

최종연구보고서

KAERI/RR-2340/2002

# 방사선 농업생명공학 기술개발

## Development of Agricultural and Biological Engineering Technology by Radiation

### 방사선이용 생물활성 증진효과 연구

#### Radiation Hormesis in Plant

연구기관

한국원자력연구소

과학기술부

# 제 출 문

## 과 학 기 술 부 장 관 귀하

본 보고서를 “방사선 농업생명공학 기술개발” 과제 (세부과제 “방사선이용 생물활성 증진효과 연구”)의 최종보고서로 제출합니다.

2003. 5. .

연 구 기 관 명 : 한국원자력연구소

연 구 책 임 자 : 김 재 성

연 구 원 : 이 영 근, 이 상 재  
임 용 택, 이 혜 연  
백 명 화, 유 준 철  
장 준 혁, 황 혜 연  
황보 준 권, 임 지 혁

제 1 위탁연구기관명: 충남대학교

위탁연구책임자 : 박 연 일

제 2 위탁연구기관명: 안동대학교

위탁연구책임자 : 권 순 태

# 요 약 문

## I. 제 목

방사선이용 생물활성 증진효과 연구

## II. 연구 개발의 목적 및 필요성

### 1. 연구개발 최종목표

- 저선량 방사선에 의한 작물 발아율과 수량 증가
- 유용식물자원 이용효율 증대
- 방사선 내성식물 개발

### 2. 연구개발의 필요성

방사선에 의한 여러 가지 영향이 동·식물 등을 대상으로 오랜 기간 연구되어 왔는데 고선량일 경우 세포의 원형질 유동과 막 투과성을 변형시키고 돌연변이를 유발하는 등 생명체에 유해한 작용을 하여 식품멸균, 살충, 육종 등의 농업적인 측면에서 많이 이용되어 왔다. 그러나 생물이 저선량 방사선으로 피폭될 경우 일반적으로 자극작용을 나타내며 고선량 방사선에 대한 고전적인 연구에서는 예측할 수 없었던 발육의 촉진, 질병 및 조사후 방사선에 대한 저항력 상승, 수명 연장 등이 확인되었다. 식물의 경우 저선량의 방사선 조사에 의해 발아, 출아, 생육 촉진, 수량 구성요소의 증가 등이 보고되었는데 특히 곡물류의 경우 저선량 방사선 조사로 상당한 자극작용이 나타나며 무조사한 대조구에 비해 수량과 발아 및 내병성 등이 증가되었다.

지금까지는 국민 복지 증진을 위한 식량, 환경, 보건, 의료 등 생명관련 산업의 발전에 방사선 이용기술이 한 분야를 이루고 있으며 부족한 식량자원의 증대를 위해서 공정개선 기술개발과 함께 고선량 방사선을 이용한 변이 유발 등의 품종 육성에 관심을 기울여 왔다. 이와 더불어 방사선에 의한 생물의 생장과 활성촉진 효과를 가져오는 저선량 방사선 처리기술 개발은 생물자원의 생산성 향상으로 식량 공급의 안정화와 식물의 환경 재해 저항성 증가에 의한 비료와 농약 사용의 감소로 환경오염을 줄일 수 있으며 유

전물질을 활성화하여 질병 저항성과 치료를 통해 국민보건 향상에 많은 도움이 될 수 있을 것으로 예상된다.

따라서 식물체 유전자 구조 변화를 유발시키지 않는 저선량 방사선에 의한 생물활성 촉진 기술의 개발 및 응용은 관련 산업의 발전과 생명과학 관련분야에 상당한 이용 효과가 있을 것으로 사료되며, 돌연변이 또는 생장장애를 유발하는 고선량 방사선과는 달리 저선량 방사선의 생물에 대한 유의한 효과를 탐색, 개발함으로써 원자력 기술의 균형적 발전과 원자력 산업의 국민 이해 증진에도 크게 기여할 것으로 기대된다. 방사선 hormesis에 대한 기초연구는 과학기술 사회에 이온화방사선을 적절히 이용할 수 있는 학문적인 지식기반을 제공하여 보다 다양한 방사선 응용기술의 개발을 가능하게 할 것으로 판단되며, 방사선 hormesis 응용 연구 및 기술 개발을 위하여 지속적인 지원이 필요할 것으로 판단된다.

### III. 연구 개발의 내용 및 범위

본 연구에서 저선량 감마선 조사에 의한 작물의 발아와 초기 생육 및 포장에서의 수량 증가 효과를 다양한 품종과 방법을 통해 조사하였고, 항산화 효소, 광합성능 및 양분 흡수 등 생리적 활성을 분석하여 저선량에 의한 생육 촉진 효과를 설명하고자 했다. 이와 더불어 작물의 당대 및 후대 수량을 분석하여 저선량에 의해서는 돌연변이가 유발되지 않으며 당대에만 그 효과가 유효하다는 것을 확인하고자 하였다.

또한 저선량 방사선의 생물활성 자극 효과를 이용하여 지치의 유용색소 물질인 shikonin생산을 유도함으로써 저선량 방사선의 새로운 활용방안을 모색하였고, 천연자연방사선을 방출하는 세라믹을 연구에 도입하여 저선량 방사선과 비교 실험을 함으로써 저선량 방사선의 생물유익효과를 검증하고자 하였다. 그리고 종묘 산업체와 연계하여 저선량 방사선을 이용한 폐기종자 활성화 및 그 활용방안에 관한 연구를 진행하였다.

이러한 연구를 기초로 하여 저선량 조사 식물의 광, 온도, UV-B 스트레스 등 다양한 환경 스트레스에 대한 내성 변화를 조사하고 동시에 감마선 조사에 의한 핵 DNA의 손상과 수선 기작 및 단백질 발현을 2-D, Comet assay 등 다양한 분자생물학적인 방법을 통하여 확인하였다.

이러한 연구는 앞으로 저선량 방사선 생물활성 효과를 연구하는데 있어 중요할 뿐만 아니라 국내의 분자생물학 발전에 기초를 제공하여 다양한 분야에서 이를 이용할 수 있도록 그 기반을 제공할 수 있을 것이다.

#### IV. 연구개발결과

1. 저선량 감마선으로 조사된 대두 종자의 초기 생육과 유식물체의 후속 고선량에 대한 방사선 감수성 변화를 조사한 결과, 작물 성장 증대 효과는 8 Gy에서 가장 높았으며, 고선량 방사선에 의한 생육 장애는 사전 저선량 조사에 의해 크게 감소되었고 저항성 증가는 8 Gy와 20 Gy에서 가장 효과적이었다.
2. 조사된 배추 품종들은 조사선량의 증가에 따라 발아율과 건물 생산량이 증가하는 경향을 보였다. 흑진주 배추는 10 Gy 조사구에서 43%, 서림 엇같이 배추는 10 Gy에서 38% 증가하였다. 그러나 청운 무는 발아율과 건물생산량에 있어 일관된 경향을 보이지 않았다.
3. 저선량 방사선에 의한 생산년도별 흑미종자의 수량검정 결과, 1년 저장 2000년산 종자보다 2·3년 저장한 1999년산과 1998년산 종자에서 뚜렷한 효과가 있었다. 1998년산 종자는 20 Gy에서, 1999년산은 1 Gy에서 수량이 뚜렷한 증가를 보였다.
4. 감마선 조사가 작물의 후대생육에 미치는 영향을 조사한 결과, 흑미와 방사콩 모품종의 경우 수량조사시 대조구에 비해 높은 값을 보였으나 유의하지는 않았으며 초기생육과 다른 포장수량구성요소 또한 별다른 증가 효과를 보이지 않았고, 방사콩 조숙품종도 초기생육과 포장수량구성요소 조사시 대조구와 비슷한 생육을 보였다. 또한 서리콩과 황금콩의 품종별 수량검정시에도 대조구와 별다른 차이를 보이지 않았다.
5. 감마선 조사에 의해 콩의 총뿌리 길이, 평균 뿌리 두께 및 총 뿌리 부피가 증가하였고 생육 조건이 제한되었을 때 자극 효과가 더욱 뚜렷하였다. 온실에서 재배한 콩의 뿌리 표면적과 길이는 선량이 증가함에 따라 증가하였으나 35일 재배 후에는 16 Gy의 선량에서 뿌리 생장이 감소하였다. 시험포장에서 재배한 콩은 저선량 자극 효과가 생육 단계에 따라 다르게 나타났으며 특히 생육 초기에 자극 효과가 크게 나타났다. 생육 단계별 감마선 자극 효과는 영양 생장기 중반에 가장 크게 나타났으며 4, 12, 20 Gy에서 뿌리 길이와 뿌리 표면적이 증가하였다.

6. 발아율이 70~80%인 시금치 종자의 경우 발아초기단계에는 저선량 조사구가 대체로 대조구에 비해 낮았으나 발아후기단계에는 1 Gy를 제외한 모든 선량에서 3~5% 정도 증가하였다. 발아율 50% 이하 종자의 발아율은 대조구에 비해 저선량 조사구에서 뚜렷한 증가효과를 보여 발아 초기 단계인 파종 8일 후에는 대조구 3.5%에 비해 모든 저선량 조사구에서 6.5~10.5%로 2배 이상 증가하였고 파종 9일 후에는 1 Gy와 8 Gy에서, 파종 12일 후부터는 20 Gy가 가장 높은 발아율을 보였다. 최종발아시에는 대조구에 비해 모든 저선량 조사구에서 2배 이상 증가하였는데 특히 20 Gy에서 61.0%의 발아율을 나타내어 가장 높았다.
7. 발아율이 50% 이하인 인동대목의 경우 최종발아율이 15% 미만이었지만 대조구에 비해 저선량 조사구에서 뚜렷한 증가효과를 보였다. 발아 초기 단계인 파종 9일 후 발아율은 8 Gy에서 가장 높았고 12일부터는 저선량 조사구의 발아 증가폭이 낮아졌으며 발아율이 가장 높았던 선량은 8 Gy와 16 Gy이었다.
8. 저온 저장한 감자 괴경에 감마선을 0.5~30 Gy 까지 조사한 결과 감자 괴경의 멍아 출현율은 1 Gy와 2 Gy 조사구에서 높았고, 멍아길이는 2 Gy와 4 Gy 조사구에서, 멍아수는 15일 저장구의 4, 8, 16 Gy에서 유의성 있는 증가를 보였다. 포장생육은 45일 저장구의 4 Gy 조사구에서 뚜렷한 증가를 보였다. 항산화 효소 활성 분석 결과, 생육이 양호했던 45일 저장구의 4 Gy에서 peroxidase 활성이 증가하였다.
9. 씨감자의 멍아 생육은 저장 방법과 기간에 따라 다르게 나타났는데 5℃ 암저장보다 20℃ 광저장에서 멍아 출현이 빨랐고 8 Gy와 16 Gy에서 높았다. 포장수량은 5℃ 암저장에서, 포장생육 및 수량은 2, 4, 8 Gy에서 증가효과를 나타내었다. 유묘 생육이 양호했던 5℃ 15일 암저장구의 식물체내 항산화 효소 catalase 활성은 1, 8, 16 Gy 처리구에서 20% 이상 증가하였고, peroxidase 활성은 1, 8, 16 Gy 처리구에서 대조구에 비해 7~16% 증가하였다. 광계II의 광양자 수율은 대조구에 비해 1 Gy와 16 Gy에서 12% 증가되었고, 광계II의 흥분압인 1-qP는 1 Gy와 16 Gy에서 대조구에 비해 32% 정도 낮았으며 NPQ는 4 Gy에서 45% 증가하였다.

10. 저선량 방사선으로 조사된 고성 재래종 옥수수 2 Gy에서, 영월 재래종은 12 Gy에서 초기 생육이 증가하였고, 포장 생장과 수량에서도 저선량 조사구에서 증가되는 경향을 보였으며 적정선량은 고성 재래종은 8 Gy, 영월 재래종은 4~12 Gy 이었다.
11. 저선량 감마선으로 조사된 방사콩 종자의 발아율과 초기 생육은 저장기간이 길어질수록 저선량 조사에 의한 자극효과가 높게 나타났으나 유묘의 생육촉진 효과는 감소하였고 초기 생육은 0.5~2 Gy에서 효과적이었다. 포장수량은 1~2년차 종자의 경우 각각 0.5 Gy와 1 Gy 조사구에서, 3년차 종자는 16 Gy에서 생육 증대 효과가 가장 높았다.
12. 자연방사선을 방출하는 천연 고품 세라믹을 토양에 주입하여 작물 발아율과 유묘초기생장에 대한 영향을 조사한 결과 배추와 무의 발아율과 초장 생장에 저선량 방사선 조사와 유사한 자극현상을 유도하였지만 감마선 조사보다 발아율 및 초장생장의 반응변이 폭의 편차가 매우 컸으며, CAT, POD와 같은 항산화효소와 지베렐린의 함량에는 거의 영향을 미치지 않았다.
13. 저선량 조사한 고추 유식물체의 초기 생육 촉진과 후속고선량 내성은 품종에 따라 달랐는데 조광고추보다 조홍고추에서 뚜렷한 증가효과가 있었고 발아율과 초기 생육촉진은 4, 8, 20 Gy 조사구에서 효과적이었다. 조홍고추 유식물체의 후속 고선량에 대한 내성은 사전 저선량 조사에 의해 크게 증가하였는데 이 때 내성증진에 가장 효과적인 사전 조사선량은 4 Gy 이었다. Carotenoid, protein 및 catalase 활성은 4 Gy와 8 Gy 조사구에서 높게 나타났다.
14. 배추 종자의 발아와 초기생육은 신규 종자에는 유의한 효과가 없었으나 묵은 종자에서는 촉진효과가 있었고 적정선량은 1 Gy 와 2 Gy 이었다. 배추 유식물체의 엽록소 함량은 대조구에 비해 저선량 조사구에서 증가하였고, 항산화 효소 활성은 낮은 선량에서는 증가하였으나 높은 선량에서는 감소하였다.
15. 감자 '대지' 품종의 경우 2, 4, 8 Gy에서 대조구에 비해 빠른 맹아 출현율을 나타내었고 온실 재배에서는 4, 8, 16 Gy에서 양호한 생육과 수

량 증가를 나타내었다. 감자 '수미' 품종에서의 멍아 출현은 2 Gy와 4 Gy에서 촉진되었고, 0.5 Gy와 4 Gy에서 양호한 생육 및 수량을 보였다. 엽록소 함량은 대조구에 비해 저선량 조사구에서 증가하였다.

16. 저선량에 의한 참박의 초기 생육촉진 효과는 품종에 따라 다른 경향을 보였는데 종자의 발아율은 2 Gy와 8 Gy에서 효과적이었고, 초기 생육은 Partner와 Support 품종의 경우 4, 16, 20 Gy 조사구에서, FR용자는 1 Gy 조사구에서 증가하였다. 초기 생육과 항산화 효소 활성은 저선량 조사구에서 전체적으로 증가하는 경향을 보였다.
17. 묵은 배추와 무 종자의 발아율은 대조구에 비해 저선량 조사구에서 증가하는 경향을 보였으며 특히 발아초기 단계에서 그 효과가 뚜렷하였다. 배추종자의 발아율은 2 Gy와 8 Gy 조사구에서 4~11%, 무의 경우는 2, 6, 10 Gy 조사구에서 25~41% 증가하였으며 특히 배추는 4 Gy, 무는 6 Gy 조사구에서 뚜렷한 증가효과를 나타내었다. 저선량 조사구의 단백질 함량은 공시식물 모두 발아 초기 단계에서 증가하였으며 Peroxidase와 catalase 활성은 4 Gy와 10 Gy 조사구에서 증가하였다.
18. 발아율이 70~80%인 참박 종자의 발아율은 4~20 Gy에서 증가하였으며 특히 4 Gy에서 가장 높았고 80~90% 종자도 4 Gy에서 가장 효과적이었으며 파종 4일 후 대조구에 비해 각각 66%와 26% 증가하였다. 발아율이 70~80%인 호박종자는 2 Gy에서, 80~90% 종자는 8 Gy에서 발아율이 향상되었다. 발아율이 70~80%인 호박종자의 유묘생육은 2 Gy에서 가장 높았다. 단백질과 catalase 활성은 참박의 경우 4 Gy에서, 호박은 catalase와 peroxidase 활성이 2 Gy와 8 Gy에서 각각 증가하였다.
19. 저선량 조사한 고추 종자의 발아율은 특히 발아 초기에 그 효과가 뚜렷하게 나타났으며 조광고추 품종은 4 Gy에서 74%, 홍광고추 품종은 8 Gy에서 11% 증가하였다. 유묘초장도 모든 저선량 조사구에서 증가하였고 특히 조광고추는 4 Gy에서, 홍광 고추는 8 Gy 조사구에서 유의성 있는 증가효과를 나타내었다. 저선량 조사한 종자의 단백질 함량은 조광고추는 발아 후기에, 홍광 고추는 발아 초기에 증가하였고, catalase와 peroxidase 활성은 조광고추는 4 Gy에서, 홍광고추는 8 Gy 조사구에서 각각 증가하였다.



20. 저선량 4 Gy가 조사된 고추의 광합성능은 대조구에 비해 1.5배 높은 것으로 나타났다. 광 스트레스에 의해  $F_v/F_m$ 은 감소되는 경향을 보였으며 4시간 처리했을 때 대조구는 50% 감소된 반면, 4 Gy 조사구는 37% 감소되었다. 광계II의 광양자 수율과 광계II 반응 중심에 의한 여기 포획율 또한 광 스트레스가 진행됨에 따라 감소되었고 4시간 처리했을 때 대조구는 47%, 4 Gy 조사구는 30% 감소되었다
21. 저선량으로 조사된 배추 유식물의 생육촉진 효과는 2, 4, 8 Gy에서 모두 나타났으며 특히 4 Gy에서 가장 뚜렷하였다. 저선량 방사선의 작물의 병저항성에 대한 상승효과 연구 결과 배추무사마귀병에 대한 방제효과는 4 Gy에서 가장 높은 것으로 관찰되었다.
22. 묵은 배추와 무 종자의 발아율은 대조구에 비해 저선량 조사구에서 증가하였고 특히 발아 초기 단계에 배추는 4, 10, 50 Gy 조사구에서, 무는 2, 6, 10 Gy 조사구에서 증가하였다. 유효 초장도 저선량 조사구에서 증가하였는데 배추는 4 Gy와 10 Gy에서, 무는 6 Gy에서 뚜렷한 증가 효과를 보였다. 단백질 함량은 발아 초기 단계에서 대조구에 비해 증가하였으며 peroxidase와 catalase 활성은 4 Gy와 10 Gy 조사구에서 증가하였다.
23. 지치의 callus 성장증가는 생장배지에 따라 달라졌으며 저선량 방사선의 효과 또한 달라졌다. DLB210.2배지에서 callus생장효과는 2 Gy에서, 천연유용물질인 shikonin 유도체의 함량은 30 Gy에서 높았다. 그러나 DM-9배지에서는 callus의 성장자극효과의 경우 1 Gy에서, shikonin유도체의 경우 2 Gy 에서 매우 양호한 효과를 보였다.
24. 무 유식물체의 초장은 대조구에 비해 10 Gy 조사구에서 7% 증가하였고 최대 광합성능은 1.2배 높았다. 효소 활성은 저선량 조사구에서 증가하는 경향을 보였으며 10 Gy 조사구에서 catalase는 30%, peroxidase는 29% 증가하였으며, superoxide dismutase는 130% 증가하였다. 광계II의 광화학적 효율인  $F_v/F_m$ 은 UV-B 스트레스가 진행됨에 따라 감소되는 경향을 보이며 대조구는 4시간 처리했을 때 75% 감소하였으나 10 Gy 조사구는 69% 감소되어 대조구에 비해 저선량 조사구가 UV-B 스트레스에 대

해 민감한 반응을 보이지 않는 것으로 나타났다.

25. 저선량 감마선에 의한 참박의 초기 생육은 대조구에 비해 4~16 Gy에서 증가하였고 자엽의 catalase와 peroxidase 활성은 대조구에 비해 8 Gy 조사구에서 가장 높았고 본엽의 경우 peroxidase 활성이 4 Gy 조사구에서 증가하였다. 저선량 조사한 박 식물체의 경우 광 스트레스에 대한 반응효과는  $F_v/F_m$ 이 대조구와 8 Gy의 경우 50% 감소되었으나 4 Gy 조사구는 40% 정도 감소하였다. 광계II의 광양자 수율( $\Phi_{PSII}$ )과 광계II반응 중심의 흥분 포획능( $1/F_o-1/F_m$ ) 또한 광저해가 진행됨에 따라 감소하여 대조구와 8 Gy는 20%, 4 Gy 조사구는 15% 감소를 보였고  $1/F_o-1/F_m$ 은 대조구와 8 Gy 조사구에서 모두 55%, 4 Gy 조사구는 45%의 감소를 나타냈다.
26. 감자 괴경의 멍아울과 생육에 대한 저선량 감마선 효과는 저장기간과 품종에 따라 다르게 나타났다. 대지 품종은 2~8 Gy에서 빠른 멍아 출현율과 양호한 생육 및 수량을 보였고, 수미 품종은 2~4 Gy에서 멍아 출현이 빨랐고 온실에서의 생육 및 수량은 4 Gy에서 증가효과가 있었다.
27. 저선량 감마선이 조사된 콩의 초장은 대조구에 비해 4 Gy 조사구에서 5% 증가하였고 최대 광합성능은 1.1 배 높았다. Catalase 활성은 4 Gy 조사구에서 대조구에 비해 25% 증가하였다. 저선량 감마선이 조사된 콩 식물체의 UV-B 스트레스에 대한 반응 효과는 최대 광합성능이 대조구는 52% 감소되는 반면, 4 Gy 조사구는 31% 감소하였다. 광계II의 광화학적 효율인  $F_v/F_m$ 은 스트레스가 진행됨에 따라 감소되며 대조구는 55% 감소되었으나 4 Gy 조사구는 39% 감소를 보여 대조구에 비해 UV-B 스트레스에 대해 덜 민감한 것으로 나타났다.
29. 고추잎이나 배양세포의 단백질이 방사선 조사 2~3일 후 일시적으로 증가하였으나 20 Gy 이상의 고선량에서는 방사선 조사 7일 후 감소되었다. 2D 전기영동결과를 통해 방사선 조사에 의해 식물 세포의 단백질 패턴이 변화하는 것을 알 수 있었다. 항산화 효소 활성은 감마선 선량에 비례하여 방사선 조사 1~5일 이내에 증가하였다가 점차 감소되는 경향을 보였다. 방사선을 유식물에 조사한 후 대조구 핵에서는 발견되

지 않았던 긴 꼬리를 가진 핵이 관찰되었다.

30. 저선량 조사에 의해 마늘세포의 재분화율이 증가하였으나 캘러스 생장에는 크게 영향을 미치지 않아 지치의 생장에 대한 유익 효과와는 크게 차이가 났지만 이는 배지의 종류와 작물에 다른 현상으로 판단되었다. 식물세포를 방사선과 자외선에 노출시킨 후 경과 시간별로 세포활력의 변화를 관찰한 결과, 방사선 처리는 정상상태에서 시간이 경과함에 따라 세포의 활력이 회복되는 것을 뚜렷이 관찰할 수 있었다. 그러나 자외선의 처리는 처리 후 시간이 경과함에 따라 세포의 활력이 현저히 감소하여 궁극적으로 세포가 고사하게 되어 방사선 처리에 대한 반응과는 대조적인 결과를 보였다.
31. 자외선과 방사선을 처리한 후 잎과 배양세포로부터 누출되는 전해물질의 양을 측정하였다. 방사선조사는 잎 및 캘러스 모두 전해물질의 누출정도가 무처리와 차이가 없으나 자외선 처리는 잎으로부터의 전해물질 누출정도가 무처리에 비해 수십배가 증가하였다. 캘러스에 자외선을 처리한 경우에도 잎에 비해서는 낮으나 자외선의 처리시간이 증가함에 따라 전해물질의 누출량이 증가하였다.

## V. 연구개발결과의 활용계획

저선량 방사선의 생물활성 증진효과 연구를 통하여 개발된 작물, 채소 종자 및 발아 저조 채종 종자의 발아율 향상과 생육증대, 수량증대 기술을 농업 관련 기관 및 종묘 산업체와 연계하여 실용화를 추진함.

저선량 감마선 조사 식물체의 광합성능 증진과 저온, UV 및 후속고선량 등 환경스트레스에 대한 내성 증진 연구 결과가 현장에 적용될 경우 저선량 작물의 건전 생장에 의한 비료, 농약의 사용의 감소를 유도할 수 있으며 농경지 토양 및 주변 하천 오염을 저감시킬 수 있는 새로운 농업기술로 제시할 수 있음.

지치의 천연유용물질인 시코닌의 생산성을 향상시킬 수 있는 세포 배양법 개발을 통해 세포 배양의 대량화가 이뤄지면 관련 산업체에 기술 이전을 추진하여 산업 재산권 확보 가능성을 제시할 수 있으며 산업체의 경제적 이익 창출에 많은 기여를 예상.

방사선 유도 단백질 및 polypeptide 탐색과 동정은 생명과학 기초 연구

와 관련 산업체의 실용화 연구에 기여할 것이며 저선량 방사선의 생물 유익 효과를 견고히 확립하고 적극적인 홍보를 통하여 국민들의 원자력에 대한 이해의 증진과 원자력의 안정성 문제 해결에 기여할 것으로 예상된다.

# S U M M A R Y

## I. Project Title

Radiation Hormesis in Plant

## II. Objectives and Importance of the Project

### 1. Objectives

- Enhancement in crop germination rate and productivity by low dose gamma radiation
- Improvement of crop utilization by low dose gamma radiation
- Development of radiation-tolerant crops

### 2. Importance of the project

After Luckey proposed the concept of radiation hormesis, studies on the effects have been carried out with a lot of animals such as virus bacteria, animal and plants. Although high doses of ionizing radiation are obviously harmful to living organisms, low-to-intermediate doses have been observed to enhance growth and survival, and augment the immune response and increase resistance to the mutagenic effects of further irradiation in animals. It was also found that germination, sprouting, growth, development, blooming and resistance of the plants to environmental stresses were accelerated by low dose ionizing radiation.

The high dose of gamma radiation has been used as not only one of the tools for the improvement of bio-related industries such as food, environment, etc., and but also the powerful tool to induce mutations for plant breeding. In the case of the low dose of gamma radiation, it was reported to have positive effects on plant growth without causing gene mutation. It is also expected that it could solve environmental problems by the reduction of pesticide, fertilizer uses, being the

essential factor for health and environment improvements. As a result, low-dose irradiation technique has high potential to benefit on bioscience and bio-related industries. Also, this technique is necessary for the better development of atomic technique and public understanding.

Radiation hormesis provides the basis for appropriate utilization of ionizing radiation as a useful tool in our technology society. It can improve resource usage and maximize food production, and increase health quality. Utilization of nature's resources can be more efficient and economical through supporting the practical application of radiation hormesis.

### **III. Scope and Contents of the Project**

This study was to elucidate the effect of low dose gamma radiation on germination, early growth and the yield in the field with various agricultural cultivars. The stimulating effect of low dose gamma radiation was explained by analyzing the physiological activities of antioxidants enzyme, photosynthetic ability, absorption of nutrition. Also, both yields of the irradiated present and its progeny crops were studied to reveal that low dose gamma radiation stimulates the yield of the irradiated present but not that of the progeny, possibly proving that there is no carry-over effects of the low dose of gamma radiation.

Induction of increased shikonin production in the plants by low dose gamma radiation was challenged to open up the possibility of applying radiation hormesis to the industrial mass production system of the natural materials useful to humans. Effects of natural radiation emitted from solid ceramics was compared on the plants with those of low dose gamma radiation. Finally, activation of aged seeds by low dose gamma radiation, probably facilitating their commercial circulation in the agriculture, was challenged in association with an industrial seed company.

The changes in the resistance of low dose gamma radiation-irradiated

plants to environmental stress, such as high light, low temperature were also investigated. Nuclear DNA damage, recovery mechanism and protein expression by gamma radiation was confirmed with use of various molecular analysis methods.

#### IV. Results of the Project

1. The growth of soybean increased by low dose gamma radiation. The optimal gamma radiation dose for the growth increment was 8 Gy in soybean plants. Growth inhibition of soybean plants by high dose gamma radiation was noticeably reduced by pre-irradiation of low dose gamma radiation. Resistance to subsequent high dose of gamma radiation was effective in 8 Gy and 20 Gy gamma radiation groups.
2. *Brassica campestris* varieties showed highest germination rate and dry weight production with increasing gamma radiation. Dry weight of Surim and Hckjinju were 43% and 38% in 10 Gy gamma radiation group, respectively, in comparison with the control. There was no differences in germination rate and dry weight production of *Raphanus sativas* var.
3. Root growth and dry weight of soybean cultivars showed apparently hormetic effects when grown in growth chamber. In the field experiments, yields of pea were not different significantly between gamma radiation irradiated cultivars, but weight of one hundred peas increased in all gamma radiation irradiated cultivars. Increment of yield was assumed to be induced through shortening the maturation stage, which was accounted for by accelerated early growth after gamma radiation.
4. The extent to which germination rate of the spinach with 70-80% of germination capacity was stimulated by low dose gamma radiation was smaller than that with 50% of germination capacity, implying that the poorer the seed vigour was, the more stimulation by low

dose gamma radiation it occurred.

5. It was clear that low dose gamma radiation stimulated germination of the root stocks with about 50% of germination capacity, although they ultimately showed less than 15% of germination rate. The optimum doses of gamma radiation were 8 and 16 Gy for the promoted germination rates.
6. Low dose gamma radiation exhibited promoting effects on the sprouting rate in the range of 1 and 2 Gy, and the sprout length in the range of 2 and 4 Gy. The number of sprouts, which were reserved for 15 days after production (DAP), were significantly increased under 4, 8 and 16 Gy gamma radiations. The growth of 45 DAP sprouts was extremely stimulated under 4 Gy gamma radiation with increase of peroxidase activity in the plantlet.
7. Though varied with storage duration and conditions, sprouting rate of potato stored at 5°C in the dark was promoted at the 8 and 16 Gy gamma radiation compared to 20°C in the light. The field growth of potato stored at 5°C was highly increased at the 2, 4, 8 Gy gamma radiations. The catalase activity of potato plantlet was increased by about 20% at 1, 8 and 16 Gy gamma radiations. Peroxidase activity was also increased by 7~16% at 1, 8 and 16 Gy gamma radiations compared to the control. The effective quantum yield of PSII was slightly increased by about 12% at 1 and 16 Gy gamma radiations. Seedlings irradiated with low dose gamma radiation showed the lower excitation pressure on PSII ( $1 - qP$ ), while NPQ was greatly increased by 45% at 4 Gy irradiated plants.
8. High stimulatory effect on early growth of maize was observed in 2 Gy gamma radiation group of kosungjaerae cultivar and in 12 Gy gamma radiation group of youngwoljaerae cultivar. The optimal radiation dose for the enhancement of yield and yield components in maize was 8 Gy in kosungjaerae cultivar and 4~12 Gy in



youngwoljaerae cultivar.

9. The seed germination of the 3 year-old seed was remarkably stimulated by low dose gamma radiation compared with that of the 2 year-old seed at the dose of 0.5~2 Gy. The characteristics of yield components evaluated significantly were improved in the 0.5~1 Gy gamma radiation group of 1 year and 2 year old seeds and in the 16 Gy gamma radiation group of 3 year old seed.
10. Natural radiation emitted from solid ceramics produced similar results to those by gamma radiation on the plants, although the extent to which it stimulated germination rate and height growth was far less than gamma radiation. Moreover, unlike gamma radiation, solid ceramics did not affect CAT and POD activities, and GA<sub>s</sub> contents at all.
11. Germination rate and early growth of Johong cultivar were noticeably increased at 4, 8 and 20 Gy gamma radiation. Resistance to subsequent high dose of gamma radiation of Johong cultivar was increased at all the low dose gamma radiation. Especially it was highest in 4 Gy gamma radiation group. Plant groups of Johong cultivar showing the resistance to subsequent high dose of gamma radiation, which had been pre-irradiated with 4 Gy and 8 Gy, were also higher in the carotenoid contents and enzyme activity than the plants not irradiated previously.
12. Compared to the new, 1-year-old seeds, old seeds irradiated by low dose gamma radiation with the range of 1~2 Gy showed vigorous growth as revealed by statistically significant increases in the germination rates and the leaf size and fresh weight. Further, seedlings grown from seeds previously irradiated by low dose gamma radiation showed higher peroxidase and catalase activities than non-irradiated seedlings.

13. Though it varied with cultivars and storage duration, the sprouting rate was promoted by 2, 4, 8 Gy gamma radiation in microtuber of "Dejima". Growth and tuber yield were also increased by 4, 8, 16 Gy gamma radiations. In microtuber of "Superior", the sprouting rate was promoted by 2 Gy and 4 Gy gamma radiations, and the growth and tuber yield by 0.5 Gy and 4 Gy gamma radiations.
14. Low dose gamma radiation had promoting effects on the germination at 2 Gy and 8 Gy and on the early growth at 4, 16 and 20 Gy in partner and support cultivar and 1 Gy in FR Yongja cultivar.
15. The germination rate of Chinese cabbage was higher at 2 Gy and 8 Gy gamma radiation group and that of radish was higher at 2, 6 and 10 Gy gamma radiation. The height of Chinese cabbage was noticeably high at 4 Gy and 10 Gy gamma radiation and that of radish at 6 Gy gamma radiation. The enzyme activities of seedlings from seeds irradiated with low dose gamma radiation was high at 4 Gy and 10 Gy.
16. In the case of bottle gourd, the germination rate of 70~80% germinative seed increased at 4~20 Gy gamma radiation. Especially, it was the highest at 4 Gy. The germination rate of 70~80% and 80~90% germinative seed at 4 days after sowing increased by 66% and 26% at 4 Gy, respectively. In the case of pumpkin, the germination rate of 70~80% and 80~90% germinative seed increased at 2 Gy and 8 Gy, respectively. Catalase activity of bottle gourd increased at 4 Gy. Catalase and peroxidase activity of pumpkin increased at 2 Gy and 8 Gy.
17. The germination rate at 7 days after sowing in Jokwang and Hongkwang cultivar was high as 74% and 11% at 4 Gy and 8 Gy, respectively. The seedling height of Jokwang cultivar was noticeably high at 4 Gy and that of Hongkwang cultivar at 8 Gy.

The protein contents of seedlings from seeds irradiated with low dose gamma radiation of Jokwang cultivar increased at the late stage of induction and that of Hongkwang cultivar at the early stage of induction. Catalase and peroxidase activities of seedlings from seeds irradiated with low dose gamma radiation of Jokwang cultivar increased at 4 Gy and that of Hongkwang cultivar at 8 Gy.

18. The  $O_2$  evolution in the 4 Gy was 1.5 times greater than in the control. The photochemical yield of PSII, estimated as  $F_v/F_m$ , was decreased with increasing illumination time by 50% after 4 hours while  $F_o$  did not change. However,  $F_v/F_m$  in the 4 Gy was decreased by 37% of inhibition. Changes in the effective quantum yield of PSII,  $\Phi_{PSII}$ , and  $1/F_o - 1/F_m$ , a measure of the rate constant of excitation trapping by the PSII reaction center, showed similar pattern to  $F_v/F_m$ .
19. The stimulating effect in early growth of cabbage and resistance to disease were observed in 4 Gy gamma radiation group.
20. Callus growth of *Lithospermum erythrorhizon* and radiation induced-hormesis effects were largely dependent on the type of growth medium. Callus growth and production of shikonin precursors on DLB210 medium were stimulated at 2 and 30 Gy irradiation, respectively, while being stimulated on DM-9 medium at 1 and 2 Gy irradiation, respectively.
21. The germination rate of Chinese cabbage increased at 4, 10 and 50 Gy and that of radish increased at 2, 6 and 10 Gy. The seedling height of Chinese cabbage was noticeably higher at 4 Gy and 10 Gy and that of radish at 6 Gy. The protein contents of seeds irradiated with low dose gamma radiation was increased compared to that of the control especially at the early stage of induction. The enzyme activity of seeds irradiated with low dose of gamma

radiation was increased at 4 Gy and 10 Gy.

22. The seedling height of radish was stimulated in plants grown from seeds irradiated with gamma radiation of 10 Gy. The  $O_2$  evolution in the 10 Gy gamma radiation was 1.2 times greater than in the control. The catalase and peroxidase activity of radish leaves grown from seeds irradiated with gamma radiation were increased at 10 Gy as was the case of superoxide dismutase activity in the leaves. The photochemical yield of PSII, estimated as  $F_v/F_m$ , was decreased with increasing illumination time by 75% after 4 hours while  $F_v/F_m$  in the 10 Gy irradiation group was decreased by 69% of inhibition.
23. The stimulating effects of the low dose gamma radiation on the early growth were not noticeably high, but were increased generally at 4~16 Gy irradiation group. The catalase and peroxidase activity of cotyledon from seeds irradiated with gamma radiation were increased at 8 Gy irradiation group. The photochemical yield of PSII, estimated as  $F_v/F_m$ , decreased with increasing illumination time by 50% after 4 hrs in the control and 8 Gy irradiation group, while  $F_o$  slightly increased. However,  $F_v/F_m$  in the 4 Gy irradiation group decreased by 40% of inhibition. Changes in the effective quantum yield of PSII,  $\Phi_{PSII}$  and  $1/F_o - 1/F_m$ , a measure of the rate constant of excitation trapping by the PSII reaction center, showed similar pattern to  $F_v/F_m$ .
24. Though varied with cultivars and storage duration, sprouting rate, growth and tuber yield were promoted by 2~8 Gy gamma radiation in microtuber of "Dejima" stored at low temperature. On the other hand, in microtuber of "Superior", sprouting rate was promoted by 2 and 4 Gy, and the growth and tuber yield by 4 Gy.
25. The seedling height of soybean were stimulated in plants grown

from seeds irradiated with the low dose of 4 Gy gamma radiation. The O<sub>2</sub> evolution in the 4 Gy gamma radiation was 1.1 times greater than in the control. The catalase activity of leaf was noticeably high at 4 Gy. The photochemical yield of PSII (Fv/Fm) was decreased with increasing illumination time by 55% after 4 hours, while Fv/Fm in the 4 Gy irradiation group was decreased by 39% of inhibition.

26. Protein content in pepper leaves and cultured cells were temporarily increased in two or three days after 1 or 5 Gy irradiation, while higher dose of gamma radiation than 20 Gy decreased protein content at seven days after radiation treatment. Based on protein spot analysis using two dimensional electrophoresis, it was shown that plant cells respond to irradiation stress by changing their protein patterns. Activities of antioxidant enzymes, superoxide dismutase and peroxidase, were temporarily increased within one or five days after treatment depending on the doses of treatment, and the activities were gradually decreased to control level or lower thereafter. After treating the seedling with radiation stress, increased tail moment was observed as the dosages of radiation increased when compared to nuclei of un-irradiated control cells, which means that radiation stress is powerful genotoxic factors for plant cell.
27. Lower dose of gamma radiation such as 1, 5 or 10 Gy promoted the formation of multi-shoot from garlic callus. Even though lower dose of gamma radiation promoted multi-shoot formation from garlic callus, callus growth was not significantly affected by the irradiation. Differential responses of pepper plants and cultured cells to gamma and UV irradiation were investigated. In seed treatment, 1 Gy of gamma radiation increased seedling dry weight up to 19.1%, but 50 Gy irradiation significantly inhibited seed germination, and seedling growth thereafter. In case of UV treatment to seed, gemination, seedling growth was not affected

regardless of duration of UV treatment.

28. Leakage of electrolytes from the leaf by 24 hours of UV stress increased up to 28.8 folds as compared with untreated control, where as gamma irradiation of 50 Gy increased electrolyte leakage by 1.2 fold.

## **V. Proposal for Applications**

It is necessary to employ radiation technology to agricultural industries. We expect the reduction of chemical manure and pesticide usage through investigating physiological activities and factors that increase resistance to environmental stresses in gamma radiation-irradiated plants.

Transfer of radiation technology to related industry is a strong possibility once the value-added product like shikonin is developed and massively produced through low dose gamma radiation technology.

The continuous investigation of gamma radiation-inducible proteins or polypeptide will contribute significantly to bio-technology research and application of radiation hormesis to related industries. It is also expected that the development of radiation hormesis will promote a better public understanding of radiation.

# CONTENTS

Chapter 1. Introduction .....	1
Chapter 2. State of the Art .....	3
Chapter 3. Contents and results of the research .....	8
1. Germination and early growth of various seeds irradiated with low dose gamma radiation .....	34
2. Germination and early growth of vegetables seeds with different storage duration by low dose irradiation .....	57
3. Yield and growth of crops in the field after low dose gamma irradiation .....	74
4. Yield of the progeny from the present irradiated with low dose gamma radiation .....	108
5. Growth and dormancy of seed potato irradiated with low dose gamma radiation .....	126
6. Shikonin production in <i>Lithspermum erythrorhizon</i> after irradiation of low dose gamma radiation .....	167
7. Influence of natural radiation from ceramics on vegetables .....	193
8. Influence of low dose gamma radiation on the growth and physiological activity of crops and vegetables .....	203
9. Influence of low dose gamma radiation on the reduction of environmental stresses .....	279
10. Analysis and utilization of plant antioxidative mechanism by radiation .....	339
Chapter 4. Objectives of R&D and possible contribution .....	405
Chapter 5. Application .....	407
Chapter 6. References .....	408

# 목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 .....	1
제 2 장 국내·외 기술 개발 현황 .....	3
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과 .....	8
제 1 절 연구 내용 및 방법 .....	8
1. 저선량 방사선이 조사된 종자의 발아와 초기생육 .....	8
가. 참박과 호박 종자의 발아와 초기 생육 .....	8
나. 배추와 무 종자의 발아와 초기 생육 .....	8
다. 대두 종자의 발아와 초기 생육 .....	9
라. 고추 종자의 발아와 초기 생육 .....	9
마. 채소종자의 산업체 비교 발아실험 .....	9
2. 저장기간에 따른 저선량 조사 채소류 종자의 발아와 초기 생육 .....	10
가. 신규 배추 종자와 묵은 배추 종자의 발아와 초기생육 .....	10
나. 묵은 참박 종자의 발아와 초기 생육 .....	10
다. 묵은 배추와 무 종자의 발아와 초기 생육 .....	11
라. 묵은 고추 종자의 발아와 초기 생육 .....	11
3. 저선량 조사한 작물의 포장생육과 수량 .....	11
가. 신규 흑미종자와 묵은 종자의 포장생육과 수량 .....	11
나. 연도별 흑미종자의 포장생육과 수량 .....	12
다. 저장기간이 다른 방사콩의 포장생육과 수량 .....	12
라. 품종별 대두종자의 포장생육과 수량 .....	13
마. 품종별 옥수수종자의 포장생육과 수량 .....	13
4. 저선량조사 작물의 후대수량 검정 .....	14
가. 흑미종자의 후대수량 검정 .....	14
나. 다수구 흑미종자의 후대수량 검정 .....	14
다. 방사콩 2계통의 후대수량 검정 .....	14
라. 품종별 대두종자의 후대수량 검정 .....	14



5. 저선량 조사한 감자의 생육 및 수량 .....	15
가. 씨감자의 휴면 조절과 생육 및 수량 .....	15
나. 저온 저장한 감자 기내 소괴경의 휴면 타파와 생육 .....	15
다. 실온 저장한 감자 기내 소괴경의 휴면 타파와 생육 .....	16
라. 씨감자 “대지” 품종의 휴면타파와 생육 .....	16
6. 저선량 조사한 지치세포배양에서의 shikonin 생산 .....	17
가. 지치의 callus 생육 .....	17
나. 지치의 shikonin 생산 .....	19
7. 자연방사선을 함유한 천연세라믹의 채소작물 생육에 대한 영향 .....	20
가. 배추와 무의 발아와 초기생육 .....	20
나. 배추와 무의 효소활성과 호르몬 함량 .....	21
8. 저선량 조사가 작물의 생리 활성에 미치는 영향 .....	24
가. 효소활성 .....	24
나. 엽록소함량 .....	24
다. 광합성능 .....	25
라. 양분흡수 .....	26
마. 대두 뿌리 활성 .....	26
바. 저선량 조사에 의한 작물의 단백질 발현 추이 .....	26
9. 저선량 조사가 작물의 스트레스 경감효과에 미치는 영향 .....	27
가. 작물의 방사선 감수성에 미치는 영향 .....	27
나. 방사선에 의한 작물의 광 스트레스 경감효과 .....	28
다. UV-B 스트레스 경감효과 .....	29
라. 저온과 산화 스트레스에 대한 오이의 반응 .....	30
마. 병해 경감효과 .....	31
10. 방사선에 의한 식물의 항산화 기구 해석 및 이용 .....	32
가. 대상 식물 및 방사선 조사 .....	32
나. 단백질 정량 및 전기영동 .....	32
다. 방사선 유도성 유전자 탐색 .....	32
라. 항산화 효소의 활성측정 .....	33
마. Comet 분석에 의한 핵 DNA 손상조사 .....	33
바. 방사선과 자외선에 대한 식물의 반응차 구명 .....	33
사. 방사선조사가 고추의 생육과 수량에 미치는 영향 .....	33

제 2 절 연구 결과 및 고찰 .....	34
1. 저선량 방사선이 조사된 종자의 발아와 초기 생육 .....	34
가. 참박과 호박 종자의 발아와 초기 생육 .....	34
나. 배추와 무 종자의 발아와 초기 생육 .....	39
다. 대두 종자의 발아와 초기 생육 .....	42
라. 고추 종자의 발아와 초기 생육 .....	44
마. 채소종자의 산업체 비교 발아실험 .....	47
2. 저장기간에 따른 저선량 조사 채소류 종자의 발아와 초기 생육 .....	57
가. 신규 배추 종자와 묵은 배추 종자의 발아와 초기 생육 .....	57
나. 묵은 참박 종자의 발아와 초기 생육 .....	61
다. 묵은 배추와 무 종자의 발아와 초기 생육 .....	65
라. 묵은 고추 종자의 발아와 초기 생육 .....	70
3. 저선량 조사한 작물의 포장생육과 수량 .....	74
가. 신규 흑미종자와 묵은 종자의 포장생육과 수량 .....	74
나. 연도별 흑미종자의 포장생육과 수량 .....	81
다. 저장기간이 다른 방사콩의 포장생육과 수량 .....	86
라. 품종별 대두종자의 포장생육과 수량 .....	94
마. 품종별 옥수수종자의 포장생육과 수량 .....	101
4. 저선량조사 작물의 후대수량 검정 .....	108
가. 흑미종자의 후대수량 검정 .....	108
나. 다수구 흑미종자의 후대수량 검정 .....	108
다. 방사콩 2계통의 후대수량 검정 .....	114
라. 품종별 대두종자의 후대수량 검정 .....	121
5. 저선량 조사한 감자의 생육 및 수량 .....	126
가. 씨감자의 휴면 조절과 생육 및 수량 .....	126
나. 저온 저장한 감자 기내 소괴경의 휴면 타파와 생육 .....	134
다. 실온 저장한 감자 기내 소괴경의 휴면 타파와 생육 .....	146
라. 씨감자 “대지” 품종의 휴면 타파와 생육 .....	159
6. 저선량 조사한 지치세포배양에서의 shikonin 생산 .....	167
가. 지치의 callus 생육 .....	167
나. 지치의 shikonin 생산 .....	179
7. 자연방사선을 함유한 천연세라믹의 채소작물 생육에 대한 영향 .....	193
가. 배추와 무의 발아와 초기생육 .....	193

나. 배추와 무의 효소활성과 호르몬 함량 .....	197
8. 저선량 조사가 작물의 생리 활성에 미치는 영향 .....	203
가. 효소활성 .....	203
(1) 배추 유식물 .....	203
(2) 묵은 참박 .....	207
(3) 묵은 채소 종자(배추와 무) .....	213
(4) 묵은 고추 종자 .....	218
(5) 참박과 호박 .....	223
(6) 씨감자 .....	228
나. 엽록소함량 분석 .....	231
(1) 배추 유식물 .....	231
(2) 묵은 참박 .....	231
(3) 감자기내 소괴경 .....	232
(4) 참박 .....	236
(5) 씨감자 .....	236
(6) 콩 .....	236
다. 광합성능 .....	240
(1) 씨감자 .....	240
(2) 고추 .....	241
(3) 무 .....	245
(4) 콩 .....	245
라. 방사선에 의한 건물 생산 및 양분 흡수의 변화 .....	248
마. 재배 환경에 따른 감마선의 자극효과 및 콩의 뿌리 활성 변화 .....	259
바. 저선량 조사에 의한 작물의 단백질 발현 추이 .....	271
9. 저선량 조사가 작물의 스트레스 경감효과에 미치는 영향 .....	279
가. 저선량 조사가 작물의 방사선 감수성에 미치는 영향 .....	279
(1) 대두 .....	279
(2) 고추의 초기 생육과 후속고선량 .....	284
나. 방사선에 의한 작물의 광 스트레스 경감효과 .....	296
(1) 고추 .....	296
(2) 참박 .....	302
다. 방사선에 의한 UV-B 스트레스 경감효과 .....	307
(1) 무 .....	307

(2) 콩 .....	313
라. 저온과 산화 스트레스에 대한 오이의 반응 .....	318
(1) 저온에 대한 오이의 광합성 반응 .....	318
(2) 산화 스트레스에 대한 오이의 반응 .....	324
마. 저선량 조사에 의한 배추 무사마귀병 저항성 유기 .....	335
10. 방사선에 의한 식물의 항산화 기구 해석 및 이용 .....	339
가. 방사선 유도성 인자(단백질 및 DNA)의 탐색 .....	339
나. 방사선에 대한 식물의 항산화 기작과 DNA 손상 .....	357
다. 방사선의 고추생육 및 수량에 미치는 영향 .....	372
라. 방사선과 자외선에 대한 고추식물체 및 배양세포의 반응차 구명 .....	391
제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도 .....	405
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....	407
제 6 장 참고문헌 .....	408

## 제 1 장 연구개발과제의 개요

인구 증가와 환경 오염 등에 의한 식량 자원의 고갈과 그에 따른 수요를 대처하기 위해서는 자원의 개발과 종자의 발아력 향상 및 생육 증진을 통한 식량 생산성 향상 방법의 개발이 필요하다. 따라서 이를 해결하기 위해 다양한 연구가 진행되어져 왔는데 그 중 최근 많은 학자들에 의해 유해한 물질도 유해량 이하의 적정 농도에서는 생물 활성을 촉진하는 효과 즉 hormesis 이용 연구가 많이 수행되고 있다. 방사선도 이러한 작용물질 중 하나로서 오래 전부터 알려져 왔으며 저선량의 X선과 감마선 등에 의한 식물의 발아력 향상, 초기 생육 촉진 및 작물의 수량 증가 등에 관한 방사선 hormesis가 보고되고 있다<sup>1,2)</sup>.

방사선이란 원자핵이나 원자가 변환을 일으키는 가운데 방출되는 빛 또는 입자를 말하는데 일반인에게는 막연히 유해한 것으로 인식되어왔다. 그러나 방사선은 다양한 형태로 항시 우리 주변에 편재해 있고 생활의 편리함을 제공한다. 지금까지 알려진 바와 같이 고선량의 이온화 방사선일 경우 생물체에 치명적으로 작용할 수 있으나 저선량으로 조사되었을 때에는 오히려 생물학적 작용을 촉진시킨다는 연구가 보고되고 있다<sup>3)</sup>. 이러한 저선량 방사선의 생물활성 촉진 효과에 대한 연구는 1930년대부터 1970년대까지 다양한 동물과 식물에서 꾸준히 수행되어 왔으며 1980년대 이르러 미주리-콜롬비아 대학의 Luckey에 의해 방사선 hormesis 개념이 제시되었다. Hormesis란 그리스어로 흥분시킨다는 의미의 "hormo"로부터 유래한 단어로 유해한 물질도 소량일 경우 생물체에 자극효과를 보인다는 개념이며 방사선은 이러한 작용물질 중 하나인 것이다. 방사선 hormesis 개념이 Luckey에 의해 제시된 이후로 바이러스, 원생동물, 척추 그리고 무척추 동물 및 다양한 식물에서 연구가 진행되고 있는데 동물의 경우 저선량 방사선 조사가 방사선 적응반응, 항산화제 증가, DNA 복구 능력의 증가, 면역기능의 증가, 암발생 억제효과 등을 일으킨다는 보고가 있다<sup>4)</sup>. 한편 저선량의 방사선을 식물의 종자나 유식물에 조사하였을 경우에는 대조구에 비해 발아율, 생장율, 장기 개화 유도, 발근력 증진, 수량증가 등이 관찰되었다<sup>5,6)</sup>.

이러한 hormesis의 생물활성 메카니즘은 아직까지 확실히 정립되지 않았지만 몇 가지 가능성 있는 이론들이 발표되고 있다. 예를 들면 저선량의 방사선에 의해 DNA 복구 과정에 관련이 있는 단백질이 생성되거나 DNA합성과정이 일시적으로 저해를 받아 조사된 세포가 회복될 수 있는 충분한 시간이 제공되고 동시에 자유 라디칼 소거종 등이 형성되어 저항성이 증가된다는

것이다<sup>7,8)</sup>. 그러나 이러한 이론들은 동물 실험 결과를 토대로 정립된 것이며 식물의 경우 정확한 메카니즘이 현재까지 제시되고 있지 않은 실정이다. 이는 식물에 조사되는 방사선의 적정 선량 기준이 확립되지 않았고 또한 실험의 재현성이 부족했기 때문인 것으로 생각되고 있다.

따라서 식물에서 hormesis 현상에 대한 메카니즘을 정립하기 위해서는 많은 통계학적인 실험 자료와 다양한 수준에서의 연구자료를 수집하고 분석해야 할 필요성이 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 충분한 연구기간을 통하여 다양한 작물의 발아율 및 생장 그리고 생리활성을 조사한 후 작물에 적용할 수 있는 적정선량을 확립하고자 하였다. 그리고 생리학, 분자생물학적 기술을 다양한 작물에 적용하여 실험, 분석함으로써 hormesis 메카니즘에 대한 기초연구를 수행하고자 하였다. 또한 자연상태에서 재배되는 작물은 생육기간동안 다양한 환경 스트레스를 경험하게 되고 이러한 스트레스는 결국 작물의 생산성을 감소시키는 중요한 요인이 되므로 본 연구에서는 광, UV-B, 온도, 후속 고선량 등 다양한 종류의 환경스트레스를 인위적으로 가하여 저선량 감마선 조사가 후속 환경스트레스에 대한 작물의 저항성을 증가시켜 생산성을 향상시킬 수 있는지 조사하고자 하였다. 이러한 기초연구는 향후 방사선 유도 내성 인자의 선별과 항산화능 향상 식물체와 같은 방사선 내성 인자를 활용한 신 기능성 작물의 개발에 필수적이며 한정된 식물 자원의 효율적인 이용을 도모하는데 중요한 연구라 할 수 있다.

## 제 2 장 국내·외 기술 개발 현황

인류를 포함한 지구상의 모든 생명은 강한 방사선, 특히 높은 감마선선 존재하에서 진화하여 왔으며 일상생활중 음식물, 물, 대지, 집, 의류 및 신체는 저수준의 방사선을 계속 방출하고 있어 사람을 포함한 모든 생체는 전리방사선을 피할 수 없다. 전리방사선의 외부 선원에는 원자로와 핵폭발 이외에 석탄연소, 가스연소 및 석유연소 시설 등이 포함되는데 이들 에너지원의 해결과 합리적 관리가 인류 기술사회의 발전을 결정한다고 할 수 있다. 대부분 사람들에 대한 최대의 방사선 피폭선원은 X선과 감마선에 의한 진단, 치료등 핵의학 이용과 자연방사선이며 이들 전체선원에서 사람의 전신 방사선 피폭량은 지역과 생활문화에 따라 다소 차이는 있으나 평균적으로 연간 약 500 mR 정도다. 방사선 장해에 관한 우리들의 지식은 저선량과 저·중선량 피폭에 대한 정보가 부족하여 고선량 급성 피폭에 관한 정보에 근거하기 때문에 저수준의 방사선 작용을 잘못 해석하기가 쉽다. 생물체가 급성조사에서는 치사선량에 해당하는 총선량을 장기간에 걸친 피폭 실험을 수행해보면 중대한 장해를 나타내지 않음을 볼 수 있다. 급성 방사선조사에 의해 잘 알려진 신체적 장해는 전리방사선을 유해하다는 단순화된 견해를 조장시켜 방사선의 급성 또는 만성피폭 어느 쪽에서든, 저선량과 극미량 방사선에 의한 장해의 예측과 혼동하게 하는 원인이 되고 있다. 이러한 무서운 단점은 각각의 광자나 입자의 흡수가 치명적으로 작용하지 않을 수도 있다는 것과 모든 생명체는 최적 상태 유지를 위하여 필연적으로 환경방사선에 항상 피폭되고 있다는 사실과 이 예측이 방사선 hormesis의 증거에 의해 타당치 않다는 것을 보여주는 것도 무시하고 있다.

Luckey에 의해 방사선 hormesis 개념이 제시된 이후 방사선 효과에 대한 많은 연구가 바이러스, 박테리아, 원생동물, 무척추 동물, 척추 동물 등 다양한 동물과 식물에서 수행되어져 왔다. Hormesis에서 가장 중요한 점은 소량의 유해작용 물질은 다량의 같은 물질이 보여주는 영향과는 정반대의 반응을 보여주는 것이다. 자극작용과 유해작용의 전환점은 표준상태에서 적절한 실험계획에 의해 확정될 수 있는데 이 선량-반응곡선의 전환점은 생리학적으로는 영점(zero)에 가까운 것 (ZEP) 이고, 분명한 문턱선량 값도 보여준다. 특정한 조건하에서는 이 문턱값은 이론적으로도, 실제적으로도 매우 중요하며, 어떤 측정 가능한 생리적 기능에 대해서 정의할 수 있고, 안전기준 확정에 의해서도 고려사항이 될 수 있다.

전리방사선에 의해 생성된 이온, radical 및 특이 분자들은 산소존재시

에는 더욱 복잡해져서 과산화물, hydro peroxides 및 여러가지 산화분자가 생성되는데 이들 속에는 비교적 유독한 화합물질도 포함될 것이다. 전리방사선의 특유의 독소로서 여러가지 quinone 또는 과산화물을 들고 있는데 아마 이들 물질은 저농도에서 자극작용을 나타낼 것이다. 보고되어 있는 방사선 hormesis에 관한 다른 생화학적 요소에는 당질대사, 광합성, 영양소 농도, 산화적 인산화 반응 및 효소활성의 변화등이 있으나 증거가 확실치 않으며 작용기작에 관계없이 방사선 자극작용이 hormesis 일반법칙과 일치한다는 점에서 이의 이해와 응용을 위해 통일된 이론적 근거를 제공하는 것이 가능할 것이다.

방사선 hormesis 효과가 돌연변이 결과일 가능성은 몇 가지 이유 때문에 부적합하다. 즉 돌연변이 효과는 대부분 균일하지 않으며 장애가 유발된다. 유발 돌연변이에서는 균일한 반응이 일어나지 않고 조사된 수천개 중에서 1개체만이 작물생산에서 유용한 것으로 기대된다. 방사선 hormesis에 관한 실험들은 보다 균일한 효과를 보여주며 돌연변이 유기에 실제 사용했던 선량보다도 훨씬 낮은 선량에서 얻어진 것이고 저선량에서 조사된 개체의 1% 이하에서 돌연변이가 나타난다. 또한 돌연변이 유기효과는 대체로 첫 세대에서 나타나지 않으나 방사선 자극효과는 조사된 개체에서 일어나고, 대체로 다음 세대에서는 나타나지 않는다. 원생동물과 단순환 식물에서 효과가 몇세대 걸쳐 나타나는 보고도 있으나 지속성은 없다.

방사선 hormesis는 식물 뿐만 아니라 원생동물, 척추, 무척추 동물에서도 나타나며 측정된 효과는 측정자의 능력에 의해서 한정되는 것으로 생각되나 호흡, 발아, 성장, 생육과 성숙, 생식, 질병과 조사후에 방사선에 대한 저항력 및 평균수명의 증가나 촉진 등으로 나타난다.

Hormesis는 개체에 변화를 일으켜 환경의 자극이나 stress에 대해서 전보다 다르게 반응시킨다. 이상적 상태에 있는 건강한 개체보다도 최적이하의 상태에 있는 개체에 활력과 체력의 증가를 일으키며 허약하거나 병약한 개체는 최대의 반응을 보이는 것으로 기대된다



## 1. 국외 연구현황

저선량 이온화 방사선은 발견된 이후 짧은 연구기간을 통해 자극작용이 있는 것으로 알려졌으며, Maldiney와 Thourenin<sup>9)</sup>은 X선이 종자의 발아를 촉진하는 것을 보고하였고, Richet<sup>10)</sup>는 저선량 방사선이 발아를 증가시키며 식물의 생장도 촉진시킨다고 보고하였다. 방사선 중 감마선은 의학과 농학 분야에서 많이 이용되고 있는데 조사 선량은 통상 원자력 작업 종자사 또는 원자력 산업관련 지역 주민들의 피폭에 비해 상당히 높은 수준이다. 농업분야에서는 고선량 방사선이 식품멸균, 살충, 육종, 해충구제 발아억제 등을 위해 사용되고 있으며 대부분이 유해한 효과를 보이고 있다.

방사선 자극 작용에 대한 실험은 <sup>60</sup>Co, <sup>137</sup>Cs을 이용하여 소련, 불가리아에서 일부 수행되고 있으며 루마니아에서도 대규모로 다년간 실시되고 있다<sup>11, 12)</sup>. 저선량 방사선에 대한 연구는 특히 일본, 미국, 중국, 인도, 소련 등 각지에서 활발히 진행되고 있는데 1996년에 Bhattacharjee는 1 cGy/day를 5일 동안 조사한 결과 쥐의 고준위 자연 방사선에 대한 저항성이 증가되고 방사선이 피폭된 지역에 거주한 사람들의 경우 생식력과 면역력이 증가되고 암 발생율이 감소하였다고 보고하였다<sup>13)</sup>.

일본에서의 연구 결과 예로는 어떠한 방사선도 조사되지 않았던 21-ICR 쥐를 8 Gy의 X-선에 노출시켰을 때 조사 30일 후 쥐의 생존율이 30% 였으나, 5 cGy X-선에 미리 노출되었던 쥐들의 경우에는 70%까지 증가되는 것으로 나타났다<sup>14)</sup>. 일본의 UNSCEAR 보고서(1994)에 의하면 히로시마 폭격 당시의 생존자들은 200 mSv의 낮은 선량에 피폭되었지만 그 후 암 발생율과 leukemia로 인한 질병이 감소되는 것으로 나타났다<sup>15)</sup>.

인디아에서는 상대적으로 높은 방사선 지역에 살았던 사람들의 암 발생율과 사망률이 저수준 방사선 지역의 사람들보다 더 낮게 나타나는 것을 보고하였고, 캐나다의 보고에 의하면 원전 지역의 주민의 암 발생율이 방사선 평균 지역의 주민들 보다 58% 정도 더 낮게 나타나는 것으로 보고하였다<sup>16)</sup>.

저선량 방사선에 대한 곡물류 종자와 식물체 연구에서는 저선량 방사선 조사에 의한 상당한 자극 작용이 관찰되었는데, 대조구에 비해 120%의 수량 증가와 환경 조건이 좋지 않은 상태에서의 발아 증가와 병에 대한 저항성 증가 등이 많이 보고되었다<sup>11)</sup>. 밀 종자에 저선량 방사선을 조사하여 재배한 식물체의 경우 수량 증가는 없었으나 질소<sup>17)</sup>와 인산 흡수<sup>18)</sup>가 증가된다고 보고한 반면, Sheppard와 Evenden<sup>12)</sup>은 보리와 밀 종자에 저선량 방사선을 조사하여 재배한 식물체의 경우 생육 촉진과 수량이 증가된다고 보고하였다. 그러나 이러한 효과도 종자의 수분 상태나 생장 온도에 따라 다르게 나타난

다는 보고도 있었다<sup>19,20)</sup>.

감자 괴경에 대한 저선량 감마선과 X선 조사는 수 십년 동안 일관되게 방사선 자극 효과를 보고하고 있는데 그 예로 휴면타파<sup>21)</sup>, 발아촉진<sup>22)</sup>, 생육기간 단축<sup>23)</sup>, 괴경 크기 증대<sup>24)</sup> 및 수량 증가<sup>24)</sup> 등을 들 수 있다. 또한 감자 괴경의 저선량 감마선 조사시 수량 증가와 더불어 비타민 C 함량이 증가된다는 보고도 있다<sup>25)</sup>.

채소 원예작물에 대한 연구는 상당한 다양성을 보여주고 있는데 토마토의 발아 증가와 생육 촉진 및 수량 증가에 대한 보고가 있다<sup>26,27,28)</sup>. 저선량 감마선으로 조사된 종자로부터 생육된 토마토 식물체에서 양분 함량의 증가가 보고되었고, 탄수화물과 아미노산<sup>28)</sup> 및 carotene 함량<sup>26)</sup>이 증가되며 Pal<sup>29)</sup>은 토마토 종자에 감마선 5~50 Gy를 조사하여 재배한 식물체에서 190%의 건물중 증가와 함께 물과 인산 흡수 및 질소, 탄수화물, 비타민 C 함량이 증가한다고 보고하였다. Nirale과 Gaur<sup>30)</sup>는 고추, 양파, 상추에 저선량 감마선을 조사했을 때 5 Gy와 10 Gy에서 생육촉진 효과가 있었다고 보고하였다. 저선량 방사선 조사에 의한 작물의 성장촉진 효과 외에도 당근의 광합성과 핵산 합성 증가<sup>28)</sup>, 겨자의 호흡, catalase 활성, 비타민 C와 질소 함량 증가<sup>31)</sup>, 홍화의 catalase와 lipase 활성 증가 등이 있으며<sup>32)</sup>, 저선량 감마선 조사에 의해 생리활성, 성장 및 수량이 자극된 다른 식물로는 상추<sup>33)</sup>, 당근<sup>34)</sup>, 고추<sup>35)</sup>, 오이<sup>36)</sup> 및 담배<sup>37)</sup> 등 농업적으로 가치가 있는 작물이 그 주류를 이루고 있다.

방사선의 식물자극 작용에 가장 재현성 있는 연구로는 딸기 뿌리 줄기 증식 실험을 수행한 Hannover 기술대학 방사선 식물학 팀의 연구 및 Kuzin<sup>27)</sup>의 X 선을 조사한 호밀, Degner<sup>38)</sup>등의 감마선 1 Gy를 조사한 옥수수 종자의 생육, 내습성 향상 및 종실수량 증가 등이 있다.

Conter 등<sup>39)</sup>에 의하면 저선량에 의한 자극에 의해 광합성 세균의 세포 증식과 더불어 산화 스트레스 하에서 유도되는 항산화효소의 활성이 증가되는데 이는 저선량 자극 효과에 있어서 항산화 효소가 환경 스트레스에 대해 방어 메카니즘으로 작용했다는 것을 시사한다. 미국, 유럽 등에서는 식물 분자생물학을 바탕으로 한 환경 스트레스에 더 잘 견디는 개량 식물개발에 관한 연구를 수행 중에 있는데 Texas Tech의 Dr. R.D. Allen은 항산화 효소의 유전자 조작에 의한 환경 스트레스 내성 식물체 개발에 관한 가능성을 제시하고 활발한 연구를 수행 중에 있다<sup>40)</sup>. 방사선과 식물체의 연구로는 감마선에 민감한 돌연변이체가 애기장대 등 여러 식물체에서 분리되고 있으나<sup>41,42)</sup> 방사선에 의해 유도되는 유전자 및 방사선 적응 기구의 탐색은 미비한

실정이다. 따라서 방사선 유도 내성 인자의 선별과 항산화능 증가 식물체와 같은 방사선 내성 인자를 활용한 신 기능성 작물의 개발은 한정된 자연자원의 효율적인 이용을 도모하는데 중요한 연구 과제라 할 수 있다.

## 2. 국내 연구현황

국내의 방사선의 생물에 대한 영향 및 이용 기술 연구는 생물과 농업분야에서 방사성 동위원소와 방사선을 이용하여 생리, 영양, 대사과정의 구명과 방사선 돌연변이 육종으로 다수의 변이체를 선발하여 직접 품종으로 이용하거나 교배모본으로 이용하고 있으며 고선량 방사선의 생물영향에 관한 연구도 많이 수행되어 왔으나 저선량 방사선에 의한 생물의 생리활성 촉진에 관한 연구는 거의 보고되어 있지 않은 실정이다.

방사선 hormesis는 인간의 과학기술 사회에 유용한 도구로서 전리방사선을 적절하게 이용할 수 있는 기반을 제공하며, 자원의 보다 효과적인 이용, 야채와 식량의 최대한 생산 및 건강증진과 수명연장을 가능하게 할 것이다. 자연자원의 효율적인 이용을 위해서 방사선 hormesis의 실용적인 응용과 연구에 대해서 한층 지원할 필요가 있겠다.

## 제 3 장 연구 개발 수행 내용 및 결과

### 제 1 절 연구 내용 및 방법

#### 1. 저선량 방사선이 조사된 종자의 발아와 초기생육

##### 가. 참박과 호박 종자의 발아와 초기 생육

본 실험에 사용된 재료로는 시판용으로 채종한 종자이었으며 발아율이 각각 70~80%와 80~90%라고 명시된 1999년에 인도에서 생산한 OK 참박 (*Lagenaria siceraria* Standl.)과 2000년 중국에서 생산한 흑종호박 (*Cucurbita ficifolia* Bouche) 품종을 농우바이오 Co.Ltd.에서 분양받아 사용하였다.

저선량 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설 ( $^{60}\text{Co}$ )을 이용하여 0, 1, 2, 4, 8, 20 Gy의 감마선을 실온에서 건조종자에 직접 조사하였고, 방사선 조사직후 직경 15 cm petridish에 흡습지(Whatman No. 2)를 5장씩 펴고 50립씩 5반복으로 종자를 치상하여 멸균수를 공급한 후 20°C·광 상태의 incubator에서 발아시켰다.

발아율조사는 종자를 치상한 후 6일까지 12시간 간격으로 실시하였고 발아개체 판정은 유근이 2 mm 이상 신장된 것으로 하였다. 유묘초장과 생체중은 종자 치상 8일 후에 측정하였다. 조사선량율은 Fricke dosimeter로 측정하였다<sup>43)</sup>.

##### 나. 배추와 무 종자의 발아와 초기 생육

1998년산 흑진주배추(BC: *Brassica campestris* var. Surim), 1995년산 서림엇같이 배추(SC: *Brassica campestris* var. Hckjinju), 1998년산 청운무(CR: *Raphanus sativas* var. Chung-un) 종자를 공시재료로 하였다.

저선량 방사선 조사는 한국원자력연구소의 저준위 조사시설( $^{60}\text{Co}$ )을 이용하여 0, 2, 4, 6, 8, 10 Gy 수준으로 건조종자에 직접 조사하였고, 방사선을 조사한 건조종자를 1998년 9월 20일 pot당 10립씩 5반복으로 파종하고 고려대학교 자연자원대 내 유리온실에서 재배하였다. 파종 후 3, 4, 5, 6, 7일째에 발아수를 측정하였고, 17일째와 59일째에 공시식물을 각각 수확하여 생중량, 초장을 측정하였다. 수확한 식물체를 흐르는 물에 깨끗이 세척하고 105°C에서 48시간 oven-dry 한 후 건중량을 측정하였으며, 분쇄하여 무기성분 분석시료로 사용하였다. 총인함량과 전질소함량은  $\text{H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{SO}_4$ 법으로

습식분해 후 각각 molybdenum청 법(P)과 salicylate 발색법(N)을 측정원리로 하는 autoanalyser(BRAN-LEUBBE)를 이용하여 정량하였고, 기타 무기성분(K, Na, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn)에 대해서는 상기한 분해액을 사용하여 ICP(GBC Integra XL)로 측정하였다.

#### 다. 대두 종자의 발아와 초기 생육

공시재료로 사용한 대두 (*Glycine max* L.) 품종은 한국원자력연구소 시험농장의 포장에서 생산하여 6개월간 실온에서 저장한 황금콩을 선정하였다. 저선량조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설 ( $^{60}\text{Co}$ )을 이용하여 감마선을 0, 4, 8, 12, 20 Gy 5수준으로 건조종자에 직접 조사하였다.

온실재배실험은 감마선 조사 당일에 종자 100립씩을 배양토와 모래가 1:1로 충전된 100공 plug tray에 파종하여 유리온실에서 발아시키고 파종 7일 후에는 발아율을, 파종 15일 후에는 초장과 생체중 등 초기생육을 조사하였다. 생육조사 직후 각 선량별로 비슷한 크기의 유묘를 선발하여 동일한 토양으로 충전된 직경 15cm의 비닐 pot 30개에 3주씩 이식하여 후속고선량 조사시료로 사용하였다.

#### 라. 고추 종자의 발아와 초기 생육

시험용 종자로는 홍농종묘의 1996년산 조광고추(*Capsicum annuum* L. cv. Jokwang)와 중앙종묘의 1999년산 조홍고추(*Capsicum annuum* L. cv. Johong)를 선정하였다. 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설( $^{60}\text{Co}$ )을 이용하여 감마선 0, 4, 8, 20, 50 Gy 수준으로 건조종자에 직접 조사하였다.

온실재배실험은 감마선 조사 당일에 종자 100립씩을 배양토와 모래가 1:1로 충전된 100공 plug tray에 파종하여 유리온실에서 발아시켜 파종 18일 후 발아율, 초장, 생체중 등 초기생육을 조사하였다. 생육조사 직후 각각의 선량별로 비슷한 크기의 유묘를 선발하여 동일한 토양으로 충전된 직경 15cm의 비닐 pot 30개에 3주씩 이식하여 후속고선량 조사시료로 사용하였다.

#### 마. 저선량 조사 채소종자의 산업체 비교 발아실험

실험에 사용된 공시재료는 1999년에 인도에서 생산한 OK 참박, 2000년에 중국에서 생산한 흑종호박, 2000년 국내 생산한 발아율 50% 이하인 인동대목, 1996년 중국에서 생산한 태양고추, 1999년 덴마크에서 생산한 발아율이 70~80%와 50% 이하인 바이오 시금치 등 총 5종의 종자이었으며 한국원자력

연구소에 보유중인 저준위조사시설을 사용하여 감마선을 조사하였다. 조사 선량은 OK 참박, 흑종호박, 인동대목의 경우 0, 1, 2, 4, 8, 16, 20 Gy 7수준이었으며, 태양고추와 시금치는 0, 1, 4, 8, 12, 20Gy 6수준이었다. 방사선 조사 후 (주)농우바이오 시험포장에 파종하였으며 발아율을 각 종자발아 시기에 맞추어 조사하였다.

## 2. 저장기간에 따른 저선량 조사 채소류 종자의 발아와 초기 생육

### 가. 신규 배추 종자와 묵은 배추 종자의 발아와 초기 생육

시험재배용 배추품종 (*Brassica campestris* L.)으로는 1998년 생산한 서울종묘의 만점 배추와 1994년 생산하여 5년간 저온저장한 농진종묘의 서림엇같이 배추종자를 사용하였다. 저선량 방사선 조사에 사용한 조사시설은 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설 ( $^{60}\text{Co}$ )이었으며 감마선을 0, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 12.0, 16.0, 20.0 Gy의 9수준으로 건조종자에 직접 조사하였다.

온실재배실험은 1999년 5월 3일에 감마선을 조사한 직후에 종자 150립을 배양토와 마사토가 1:1로 섞인 소형 50구 연결 pot에 1립씩 3반복으로 파종한 후 온실에서 발아시켜 발아율을 조사하였고 파종 10일 후인 5월 13일과 20일 후인 5월 23일에 엽장·엽폭을 조사하였다. 엽장·엽폭은 제 2본엽을 택하여 실시하였으며, 1차 조사시엔 떡잎의 엽장을, 2차 조사시엔 지상부 생체중을 추가 조사하였다.

### 나. 묵은 참박 종자의 발아와 초기 생육

시험재배용 참박품종 (*Lagenaria leucantha* L.)으로는 농우종묘의 Partner와 Support 2품종과 중앙종묘의 내병FR용자 품종을 종묘회사로부터 직접 분양받았는데 이들 종자는 발아율이 저조하여 폐기하려는 묵은 종자였다. 저선량 방사선 조사는 한국원자력연구소의 저준위조사시설 ( $^{60}\text{Co}$ )을 이용하여 감마선을 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 30 Gy의 10수준으로 건조종자에 직접 조사하였다

온실 재배 실험은 1999년 3월 31일에 감마선을 조사한 직후에 종자 150립을 배양토와 마사토가 1:1로 섞인 소형 50구 연결 pot에 1립씩 3반복으로 파종하여 온실에서 발아시켜 발아율을 조사한 후 파종 35일 만인 5월 4일에 식물체 시료중 일부는 초장, 생체중, 직경 등의 생육을 조사하였고 일부는 엽록소와 효소활성 시료로 사용하였다.

#### 다. 묵은 배추와 무 종자의 발아와 초기 생육

일반적으로 종묘산업체에서 시판중인 채소종자는 대체로 2년까지 유통시키며 그 이상된 것은 시중에서 회수하나 저장방법에 따라 다소 연장되기도 한다. 본 실험에서는 시판중인 2년차 종자를 구입하여 묵은 종자용으로 사용하고자 5년간 냉장(4℃) 저장한 7년 묵은 서울종묘의 1993년산 한여름배추(*Brassica campestris* L. cv. Hanyoreum)와 실온저장한 5년 묵은 흥농종묘의 1995년산 청수궁중무(*Raphanus sativus* L. cv. Chungsukoungzoung)를 선정하였다.

저선량 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설(<sup>60</sup>Co)을 이용하여 감마선 0, 2, 4, 6, 8, 10, 50 Gy 7수준으로 건조종자에 직접 조사하였고 방사선 조사직 후 직경 9 cm petridish에 여과지(Whatman No. 2) 2장을 깔고 50립씩 5반복으로 치상하여 멸균수 5 mL을 공급한 후 20℃·광 상태의 incubator에서 한여름배추는 파종 후 4일(4 days after sowing ; 4 DAS)부터 6일간, 청수궁중무는 파종 후 3일(3 DAS)부터 4일간 발아양상과 유묘생육을 조사하였다.

#### 라. 묵은 고추 종자의 발아와 초기 생육

시험용 재료로는 시판중인 고추종자를 구입하여 실온에서 4년간 저장한 흥농종묘의 조광고추 (*Capcicum annum* L.)와 3년간 저장한 농진종묘의 흥광고추 품종을 각각 선정하였다. 저선량 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설(<sup>60</sup>Co)을 이용하여 0, 2, 4, 6, 8, 10, 50 Gy의 감마선을 실온에서 건조종자에 직접 조사하였다.

발아실험은 방사선 조사직 후 직경 9 cm petridish에 여과지 (Whatman No. 2) 2장을 깔고 50립씩 5반복으로 치상하여 멸균수 5 mL을 공급한 후 20℃·광 상태의 incubator에서 12일 동안 발아양상과 유묘생육을 조사하였다.

### 3. 저선량 조사한 작물의 포장생육과 수량

#### 가. 신규 흑미 종자와 묵은 종자의 포장생육과 수량

포장재배를 위한 흑미(*Oryza sativa* L.) 품종은 1999년에 수확한 신규종자와 1998년에 수확하여 1년 저장한 종자를 사용하였다.

저선량 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설

(<sup>60</sup>Co)을 이용하여 0, 0.5 Gy, 1 Gy, 2 Gy, 4 Gy, 8 Gy, 12 Gy, 16 Gy, 20 Gy의 선량 수준으로 건조종자에 직접 조사하였다.

포장재배실험은 방사선조사 다음날인 2000년 4월 22일에 파종하여 40일간 육묘한 후 30 cm X 15 cm의 재식거리로 1주 2본씩 원자력시험농장의 포장에 손이앙하였으며 이앙 후 남은 묘를 30개체 선별하여 초기생육을 조사하였다. 재배는 표준재배법으로 관리하였고 10월 10일에 후기생육을 조사하였다. 수량구성요소는 등숙기에 포장에서 직접 조사하였고, 수확기에 가운데 3열에서 20주씩 건조 탈곡한 후 수확하여 주당 수량으로 환산하였다.

#### 나. 연도별 흑미종자의 포장생육과 수량

1998년과 1999년, 2000년에 수확하여 실온저장한 흑미(*Oryza sativa* L.) 종자를 포장재배를 위한 공시재료로 사용하였다.

저선량 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설(<sup>60</sup>Co)을 이용하여 0, 0.5 Gy, 1 Gy, 2 Gy, 4 Gy, 8 Gy, 12 Gy, 16 Gy, 20 Gy의 선량 수준으로 건조종자에 직접 조사하였다.

포장재배실험은 방사선조사 다음날인 2001년 4월 20일에 파종하여 40일간 육묘한 후 30 cm X 15 cm의 재식거리로 1주 2본씩 원자력시험농장의 포장에 손이앙하였다. 재배는 표준재배법으로 관리하였고 9월 24일에 후기생육을 측정하였다. 수량구성요소는 등숙기에 포장에서 직접 조사하였고, 수확기에 가운데 3열에서 20주씩 건조 탈곡한 후 수확하여 주당 수량으로 환산하였다.

#### 다. 저장기간이 다른 방사콩의 포장생육과 수량

포장재배를 위한 대두(*Glycine max* L.) 품종은 한국원자력연구소 시험농장의 포장에서 1997년 (3년 저장), 1998년 (2년 저장), 1999년 (1년 저장)에 재배, 수확하여 보존하던 콩나물용 장려품종인 방사콩 계통을 선정하였다.

저선량 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설(<sup>60</sup>Co)을 이용하여 0, 0.5 Gy, 1 Gy, 2 Gy, 4 Gy, 8 Gy, 16 Gy의 선량 수준으로 품건 종자에 직접 조사하였다.

온실 재배 실험은 방사선조사 당일인 2000년 5월 16일에 종자 100립씩을 배양토와 마사토가 1:1로 섞인 15구 연결 pot에 20립씩 5반복으로 파종한 후 온실에서 발아시켜 2주 후에 발아율을 조사하였고 파종 3주 후에 유묘초장과 생체중을 조사하였다.



포장재배실험은 방사선조사 다음날인 2000년 5월 17일에 원자력시험농장의 포장에서 이랑나비 60 cm, 주간거리 30 cm, 이랑길이 3 m의 5열 3반복으로 파종하였고, 비료는 전량기비로, 재배는 표준재배법으로 관리하였다. 수량구성요소는 등숙기에 포장에서 직접 조사하였고, 수확기에 가운데 3열에서 20주씩 건조 탈곡한 후 수확하여 주당 수량으로 환산하였다.

#### 라. 품종별 대두종자의 포장생육과 수량

포장재배를 위한 대두 (*Glycine max* L.) 품종은 서리콩과 황금콩을 사용하였으며 저선량 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사 시설 ( $^{60}\text{Co}$ )을 이용하여 0, 0.5 Gy, 1 Gy, 2 Gy, 4 Gy, 8 Gy, 12 Gy, 16 Gy, 20 Gy의 선량 수준으로 건조종자에 직접 조사하였다.

포장재배실험은 방사선조사 다음날인 2000년 5월 17일에 원자력시험농장의 포장에서 이랑나비 60 cm, 주간거리 30 cm, 이랑길이 3 m의 5열 3반복으로 파종하였고, 비료는 전량기비로, 재배는 표준재배법으로 관리하였다. 수량구성요소는 등숙기에 포장에서 직접 조사하였고, 수확기에 가운데 3열에서 20주씩 건조 탈곡한 후 수확하여 주당 수량으로 환산하였다.

#### 마. 품종별 옥수수 종자의 포장생육과 수량

저선량 방사선을 조사하여 포장에서의 수량구성요소에 미치는 영향을 조사하기 위한 옥수수 (*Zea mays* L.) 품종은 일반농가에서 재배하여 1년간 보존한 영월재래종과 고성재래종을 선정하였다.

방사선 조사는  $^{60}\text{Co}$ 을 이용하여 선량을 0, 0.5 Gy, 1 Gy, 2 Gy, 4 Gy, 8 Gy, 12 Gy, 20 Gy의 8수준으로 건조종자에 직접 조사하였다.

포장재배실험은 방사선 조사 다음날인 4월 7일에 종자 150립을 배양토와 마사토가 1:1로 섞인 소형 50구 연결 pot에 1립씩 3반복으로 파종한 후 온실에서 발아시켜 발아율을 조사하였다. 파종 20일 후에 식물체 일부는 초장과 생체중의 조사시료로, 일부는 시험포장에 재식거리 60×30 cm 간격으로 2열 20주씩, 3반복으로 이식하였으며, 그 외의 경종법은 농촌진흥청 표준경농법에 준하였다.

3요소 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O) 시비량은 20-15-15 kg/10a 이었으며 전량기비로 사용하였다. 파종 20일 후 발아율과 유묘초장 및 생체중을 조사하였고, 파종한 뒤 3개월 후에 생육상황을 포장에서 직접 조사하였다. 옥수수 품종별로 각 열 중앙의 10주씩 30주에서 옥수수 이삭을 수확하여 수량과 수량구성요소를 측정하였다.

#### 4. 저선량 조사 작물의 후대수량검정

##### 가. 흑미종자의 후대수량검정

저선량 조사한 흑미종자의 후대수량검정을 위해 1999년에 수확한 종자를 방사선 무조사상태로 2000년 4월 22일에 파종하여 40일간 육묘한 후 30 cm X 15 cm의 재식거리로 1주 2본씩 원자력시험농장의 포장에 손이앙하였으며 이앙 후 남은 묘를 30개체 선별하여 초기생육을 조사하였다. 재배는 표준재배법으로 관리하였고 10월 10일에 후기생육을 조사하였다. 수량구성요소는 등숙기에 포장에서 직접 조사하였고, 수확기에 가운데 3열에서 20주씩 건조 탈곡한 후 수확하여 주당 수량으로 환산하였다.

##### 나. 다수구 흑미종자의 후대수량검정

저선량 조사하여 수확한 흑미 다수구 선량에서의 후대수량검정을 위해 2000년에 수확하여 수량이 대조구보다 증가한 3선량을 선정하여 방사선 무조사상태로 2001년 4월 20일에 파종하여 40일간 육묘한 후 30 cm X 15 cm의 재식거리로 1주 2본씩 원자력시험농장의 포장에 손이앙하였다. 재배는 표준재배법으로 관리하였고 9월 24일에 후기생육을 조사하였다. 수량구성요소는 등숙기에 포장에서 직접 조사하였고, 수확기에 가운데 3열에서 20주씩 건조 탈곡한 후 수확하여 주당 수량으로 환산하였다.

##### 다. 방사콩 2계통의 후대수량검정

저선량조사한 대두(*Glycine max* L.)의 계통별 후대수량검정을 위해 1999년에 수확한 방사콩 2계통 종자를 방사선 무조사상태로 2000년 5월 17일에 원자력시험농장의 포장에서 이랑나비 60 cm, 주간거리 30 cm, 이랑길이 3 m의 5열 3반복으로 파종하였고, 비료는 전량기비로, 재배는 표준재배법으로 관리하였다. 수량구성요소는 등숙기에 포장에서 직접 조사하였고, 수확기에 가운데 3열에서 20주씩 건조 탈곡한 후 수확하여 주당 수량으로 환산하였다.

##### 라. 품종별 대두종자의 후대수량검정

저선량조사한 대두(*Glycine max* L.)의 품종별 후대수량검정을 위해 2000년에 수확한 서리콩과 황금콩 종자를 방사선 무조사상태로 2001년 5월 24일에 시험농장의 포장에서 이랑나비 60 cm, 주간거리 30 cm, 이랑길이 3 m의 5열 3반복으로 파종하였고, 비료는 전량기비로, 재배는 표준재배법으로 관리하였다. 수량구성요소는 등숙기에 포장에서 직접 조사하였고, 수확기에

가운데 3열에서 20주씩 건조 탈곡한 후 수확하여 주당 수량으로 환산하였다.

## 5. 저선량 조사한 감자의 생육 및 수량

### 가. 씨감자의 휴면 조절과 생육 및 수량

시험재배용 감자(*Solanum tuberosum* L.)는 생명공학연구소 인공씨감자실에서 기내 배양한 microtuber를 재배하여 생산한 대지 (Dejima cultivar) 품종 씨감자를 분양 받아 저장방법을 24시간 5℃·암상태 (습도 20±5%)와 20℃·광상태 (습도 80±5%)로 incubator에서 저장하면서 생산 후 15일 (15 DAP; days after production), 30일 (30 DAP), 45 (45 DAP)일 간격으로 방사선을 조사하였다. 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위 조사시설(<sup>60</sup>Co)을 이용하여 0, 1, 2, 4, 8, 16 Gy의 감마선을 저장중인 씨감자에 실온에서 직접 조사하였다.

맹아율과 맹아생육은 방사선 조사 후 20℃·광상태(습도 80±5%)의 incubator에 감자괴경을 저장하면서 맹아생성 최초일로부터 4일 간격으로 맹아율을 측정하였고 맹아길이와 맹아수는 감마선 조사 후 90일에 측정하였다.

포장 재배 실험은 종서 생산 약 5개월 후인 2001년 3월 29일에 한국원자력연구소 시험포장에 80cm×30cm 간격으로 파종하여 일반관행에 따라 재배한 후 파종 30일 후에 초기생육을 조사하였고 파종 85일 후에 수확하여 포장 생육과 수량구성요소를 조사하였다.

### 나. 저온 저장한 감자 기내 소괴경의 휴면 타파와 생육

시험재배용 감자(*Solanum tuberosum* L.) 품종은 생명공학연구소 인공씨감자실에서 기내 배양한 대지(cv. Dejima)와 수미(cv. Superior) 품종의 소괴경을 분양 받아 5℃, 암상태의 incubator에서 저장하면서 대지 품종은 생산 후 15일(15 DAP; days after production), 30일(30 DAP), 45일(45 DAP) 간격으로, 수미 품종은 생산 후 30일, 60일, 90일 간격으로 감마선을 조사하였다.

방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위 조사시설(<sup>60</sup>Co)을 이용하여 감마선을 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 30 Gy의 8 수준으로 저장중인 씨감자에 직접 조사하였다.

맹아율과 맹아생육은 방사선 조사 후 18-25℃의 실온, 암상태에서 감자

괴경을 저장하면서 대지 품종의 15일 저장구는 멩아 생성 최초일로부터 7일 간격으로, 30일과 45일 저장구는 5일 간격으로 멩아율을 확인하였다. 수미 품종의 30일 저장구는 7일 간격으로, 60일과 90일 저장구는 5일 간격으로 멩아율을 관찰하였다. 멩아 출현률이 80% 이상이 되면 광상태로 바꾸어 저장하면서 방사선 조사 후 60일에 멩아길이를 측정하였다.

저선량 감마선을 조사하여 멩아율과 멩아길이를 조사한 소괴경은 생명공학연구소 온실에 각각의 저선량조사 수준별로 pot(60×18×15cm)에 10립씩 3반복으로 파종하여 일반관행에 따라 재배하여 파종 30일 후에 초기생육을, 파종 90일 후에 수확하여 생육과 수량구성요소를 조사하였다.

#### **다. 실온 저장한 감자 기내 소괴경의 휴면 타파와 생육**

시험재배용 감자(*Solanum tuberosum* L.) 품종으로는 생명공학연구소 인공 씨감자실에서 기내 생산한 대지(Dejima cultivar)와 수미(Superior cultivar) 품종의 microtuber를 분양 받아 18~25℃의 실온에서 저장하면서 대지 품종은 생산 후 15일(15 days after production: DAP), 30일(30 DAP), 45일(45 DAP) 간격으로, 수미 품종은 생산 후 30일(30 DAP), 60일(60 DAP), 90일(90 DAP) 간격으로 감마선을 조사하였다.

방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위 조사시설(<sup>60</sup>Co)을 이용하여 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 30 Gy의 감마선을 저장중인 씨감자에 실온에서 직접 조사하였다.

방사선 조사 후 실온에서 감자 괴경을 저장하면서 대지 품종의 15일 저장구는 멩아생성 최초일로부터 7일 간격으로, 30일과 45일 저장구는 5일 간격으로 멩아율을 측정하였고, 수미 품종의 30일과 60일 저장구는 7일 간격으로, 90일 저장구는 5일 간격으로 측정하였다. 멩아길이는 두 품종 모두 방사선 조사 후 90일에 측정하였다.

온실생육과 수량조사는 저선량 감마선을 조사하여 멩아율과 멩아길이를 측정한 소괴경을 생명공학연구소 온실에 각각의 저선량조사 수준별로 pot(15 cm×18 cm×60 cm)에 10립씩 3반복으로 파종하고 일반관행에 따라 재배하여 파종 30일 후에 초기생육을, 파종 90일 후에 생육과 수량구성요소를 조사하였다.

#### **라. 씨감자 “대지” 품종의 휴면타파와 생육**

시험재배용 감자 (*Solanum tuberosum* L.) 품종으로는 생명공학연구소 인공씨감자실에서 기내 배양한 microtuber를 재배하여 생산한 대지 (Dejima

cultivar) 품종 씨감자를 분양 받아 5℃, 암상태의 incubator에서 저장하면서 생산 후 15일 (15 DAP; days after production), 30일 (30 DAP), 45일 (45 DAP) 간격으로 방사선을 조사하였다.

방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위 조사시설 ( $^{60}\text{Co}$ )을 이용하여 감마선을 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 30 Gy 8수준으로 저장중인 씨감자에 직접 조사하였다.

맹아생육 조사는 방사선 조사후 맹아출현 적온인 20℃, 암상태의 incubator에서 맹아 생성 최초일로부터 5일 간격으로 맹아율을, 방사선 조사 후 90일에 맹아길이와 맹아수를 확인하였다.

포장재배실험으로는 씨감자 생산 약 4개월 후인 2000년 4월 1일에 한국원자력연구소 시험포장에 80 cm×20 cm 간격으로 파종하여 일반관행에 따라 재배한 후, 파종 30일 후에 초기생육을 조사하였고 파종 95일 후에 수확하여 포장생육과 수량구성요소를 조사하였다.

## 6. 저선량 조사한 지치세포배양에서의 Shikonin생산

### 가. 저선량 감마선 조사에 의한 지치의 Callus 생육효과

#### (1) 공시재료

충남 금산에서 구입한 지치(*Lithospermum erythrorhizon*)뿌리를 수세한 후 70% ethyl alcohol로 소독한 다음 sodium hypochlorite(Cl농도 10%)용액에 20분간 침지소독하였다. 소독이 끝난 후 멸균증류수로 3회 세척한 뿌리로부터 유관속 부위의 조직절편을 채취하여 공시재료로 사용하였다. 조직절편은 NAA가 5 mg/L 첨가된 MS(Muras -hige and Skoog, 1962)기본배지에 치상하여 25℃, 16시간 장일조건과 광도는 20,000lux하에서 배양하여 캘러스를 분화시켰다. 이에 의해 분화된 callus를 실험 전과정에 공시재료로 사용하였다.

#### (2) 방사선 조사

저선량 방사선 조사에 사용한 조사시설은 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설 ( $^{60}\text{Co}$ , 선원강도 150 TBq)을 이용하여 감마선을 0.0, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0, 30.0 Gy의 8수준으로 callus에 직접 조사하였다. 조사선량은 Fricke dosimeter로 측정하였다.

### (3) 감마선 조사한 Callus의 성장효과

실험에 사용한 시료는 기내에 치상하여 증식된 callus 중 배양한지 3~4주 된 callus에서 생육이 양호한 것을 선별하여 1~2g 정도의 크기로 배지에 치상한 다음 감마선을 조사하였다. 조사는 petridish당 1~2g 정도의 callus를 petridish의 정중앙에 수평치상 하였으며, 반복수는 3반복으로 하였다. 모든 실험은 3회에 걸쳐 수행하였다. 배지는 phytigel 0.2%와 sucrose 3%가 첨가된 고체배지를 사용하였고, pH는 phytigel 첨가전에 5.8로 조정하였다. 감마선을 조사한 callus를 25℃의 growth chamber(한일, G100D)에서 배양한 후 3, 7, 14, 21일간의 간격으로 생체중을 측정하였다.

본 연구에서 사용한 배지는 실험의 여건에 따라 LS(Linsmyer and Skoog, 1965)배지, MS배지, 및 M-9배지를 사용하였다. 지치의 callus의 증식에 효과적인 성장조절물질의 조건을 구명하기 위해 cytokinin으로는 BA(benzylaminopurine)와 Kinetin(furfurylaminopurine)을, auxin으로는 NAA( $\alpha$ -naphthaleneacetic acid)와 IAA(indoleacetic acid)를 가지고 cytokinin과 auxin의 혼용처리를 하였으며, 아울러 전체의 실험에서 광과 암처리에 의한 효과의 차이를 비교하였다. 광처리에서의 일장은 16시간으로 하였고, 광도는 20,000lux로 하였다.

B2N2배지와 K2I0.2배지에서의 Callus 성장실험에서는 LS배지에 BA 2 mg/1 및 NAA 2mg/1를 첨가한 배지(이하 LB2N2배지로 표시함)와 Kinetin 2mg/1 및 IAA 0.2mg/1가 첨가된 LS배지(이하 LK2I0.2배지로 표시함)를 사용하여 callus의 성장효과를 비교 검토하였고, callus의 성장에 미치는 명암의 영향에 관하여도 검토하였다. 명조건은 20,000lux의 광도로 16시간 광처리, 8시간 암처리 하였으며, 이하의 모든 실험의 명암처리의 표시는 배지의 약자 명 앞에 광처리는 'L', 암처리는 'D'를 붙여 표기하였다. Kinetin과 BA의 Callus성장효과를 위한 실험에서는 LK2I0.2배지와 이 등(1999)에 의해 발표된 바와 같이 BA의 우수성을 고려하여 Kinetin 대신에 BA 2mg/1 및 IAA 0.2mg/1가 첨가된 LS배지(이하 LB2I0.2배지로 표시함)를 사용하여 callus의 성장에 있어서 동일 농도에서의 kinetin 과 BA의 효과와 동시에 감마선 처리에 의한 성장 효과를 비교 검토하였고, callus의 성장에 미치는 명암의 영향에 관하여도 검토하였다.

BA와 NAA의 농도차이에 의한 Callus성장효과 실험에서는 LB2N2배지와 BA의 농도간의 차이에 의한 callus의 성장효과를 비교하기 위하여 BA와 NAA의 농도를 각각 1mg/1로 낮추어 첨가한 LS배지(이하 LBINI배지로 표시함)를 사용하였고, 또한 callus의 성장에 미치는 명암의 영향과 감마선 처리에 의한

생장 효과에 관하여도 검토하였다. LS배지와 MS배지의 Callus생장효과 실험에서는 Kinetin 2 mg/l, IAA 0.2 mg/l의 농도 하에서 배지조성의 차이에 의한 callus의 성장효과를 비교하기 위하여 LS배지와 MS배지(이하 MK2I0.2 배지로 표시함)를 사용하여 callus의 성장에 미치는 효과를 비교 검토하였고, 아울러 감마선 처리에 의한 성장 효과에 관하여도 검토하였다. M-9배지의 Callus생장 실험에서는 성장조절물질이 첨가되지 않은 M-9배지를 사용하고, 감마선 처리에 의한 callus의 성장에 미치는 영양의 영향에 관하여도 검토하였다.

## 나. 저선량 감마선 조사에 의한 지치의 Shikonin 생산

### (1) 방사선 조사

저선량 방사선 조사에 사용한 조사시설은 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설( $^{60}\text{Co}$ , 선원강도 150 TBq)을 이용하여 감마선을 조사하였으며, 조사량을 생육이 양호한 선량과 저조한 선량을 각각 2선량을 선별하여 이에 중복된 0, 1, 2, 16, 30 Gy의 5수준으로 callus에 직접 조사하였다. 조사선량은 Fricke dosimeter로 측정하였다.

### (2) 감마선 조사한 Callus의 배양

실험에 사용한 시료는 기내에 치상하여 증식된 callus 중 배양한지 3~4주 된 callus에서 생육이 양호한 것을 선별하여 1~2g 정도의 크기로 배지에 치상한 다음 감마선을 조사하였다. 처리는 petridish당 1~2 g 정도의 callus를 petridish의 정중앙에 수평치상하였으며, 반복수는 3반복으로 하였다. 모든 실험은 3회에 걸쳐 수행하였다. 배지는 phytigel 0.2%와 sucrose 3%가 첨가된 고체배지를 사용하였고, pH는 phytigel 첨가 전에 5.8로 조정하였다. 감마선을 조사한 callus를 24°C의 growth chamber(한일, G100D)에서 배양한 후 3, 10, 14, 21일간의 간격으로 생체중을 측정하고 shikonin 생성량을 분석하였으며, 추가로 암배양조건에서 2개월간 배양한 callus를 공시하여 shikonin 생성량을 분석하였다.

본 연구에서 사용한 배지는 실험의 여건에 따라 LS배지 및 M-9배지를 사용하였다. 지치의 callus의 증식에 효과적인 성장조절물질의 조건을 구명하기 위해 cytokinin으로는 BA를, auxin으로는 NAA와 IAA를 가지고 cytokinin과 auxin의 혼용처리를 하였으며, 아울러 전체 과정에서 광과 암처리에 의한 효과의 차이를 비교하였다. 광처리에서의 일장은 16시간으로 하였고, 광

도는 20,000lux로 하였다.

### (3) Shikonin유도체의 함량분석

선별한 감마선을 조사한 후 각 3, 10, 14, 21일간 배양한 callus조직을 처리 기간마다 mortar에서 잘 마쇄한 후 30ml의 chloroform용액으로 암상태(4℃)에서 24시간 추출한 다음, 여과지(Watman No.2)로 여과하였다. 추출물은 MgSO<sub>4</sub>를 첨가하여 건조시킨 후 evaporator를 이용하여 5 ml로 진공으로 농축시켰다. 5 ml의 농축액으로부터 0.05 ml를 채취하여 약 30분간 건조시킨 다음 2.5% KOH 1 ml를 첨가한 후 약 15분간 강하게 흔들어 용해시킨 후 spectrophotometer(Parmacia Biotech, Ultrospec)로 622nm에서 shikonin유도체의 함량을 측정하여 단위 그람당 함량치로 환산하여 표시하였다.

LLB2N2배지에서의 Shikonin 생산 실험에서는 광에서 생장이 가장 양호하였던 LS배지에 BA 2 mg/l 및 NAA 2 mg/l를 첨가한 배지(이하 LLB2N2배지로 표시함)를 선별하여 동일한 배양조건하에서 감마선 조사에 의한 shikonin의 함량을 조사하였다. LM-9배지에서의 Shikonin 생산 실험은 M-9배지를 선별하여 명조건에서의 감마선 조사에 의한 shikonin의 함량을 조사하였다. DLB2I0.2배지에서의 Shikonin 생산실험은 암조건에서 생장이 가장 양호하였던 LS배지에 BA 2 mg/l 및 IAA 0.2 mg/l를 첨가한 (이하 DLB2I0.2배지로 표시함)배지를 선별하여 동일한 배양조건하에서 감마선 조사에 의한 shikonin의 함량을 조사하였다.

DM-9배지에서의 Shikonin 생산실험은 생장조절물질이 첨가되지 않은 M-9배지를 이용하여 암조건에서의 감마선 조사에 의한 shikonin의 함량을 조사하였다. 암조건하에서 장기간 배양한 Callus의 생장 및 shikonin 생산 실험은 LB2N2, LB2I0.2, M-9배지에서 암조건으로 60일동안 장기간 배양한 후, 감마선 조사에 의한 shikonin의 함량을 조사하였다.

## 7. 자연방사선을 함유한 천연세라믹의 채소작물 생육에 대한 영향

### 가. 배추와 무의 발아와 초기 생육

공시재료로는 농우바이오 종묘회사로부터 분양 받은 매력배추(*Brassica campestris* L.)와 백옥무(*Raphanus sativus* L.)품종을 사용하였다. 또한 실험에 사용된 자연방사선을 방출하는 고품의 원형 세라믹(직경 1.7cm, 높이 3mm)은 Pollyanna Ltd.로부터 공급받았으며 specific activity는 35.88 Bq/ea 이었다. 온실재배실험은 2002년 5월 15일에 15구 pot(높이 9cm)에 토



양을 5cm 충전한 후 고품세라믹을 1개에서 10개까지 채우고 전체 높이가 8cm가 되도록 하였다. 각 pot에 15립씩 9반복으로 파종을 하였으며 토양은 상토와 발효물 1:1로 혼합하여 사용하였다. 파종 후 1주일 간격으로 발아율 및 초장을 조사하였다.

#### 나. 배추와 무의 효소활성과 호르몬 함량

파종 6주 후에 배추와 무의 잎 0.3 g을 액체질소를 사용하여 막자사발에서 마쇄한 후 0.05 M 인산완충액(pH 7.0) 0.6 mL을 첨가한 다음 11000 rpm으로 15분간, 10000 rpm으로 10분간 원심분리하여 얻은 상등액을 조효소액으로 사용하였다. 단백질 정량은 BSA(bovine serum albumin)를 표준단백질로 사용하였다.

Catalase 활성은 기질인 과산화수소( $H_2O_2$ )의 감소량을 측정하는 방법을 사용하였다. 효소측정을 위한 반응용액은 0.053 M  $H_2O_2$  1 mL, 효소액 0.1 mL, 0.05 M 인산완충액(pH 7.0) 1.9 mL의 혼합액으로 하여, 효소활성은 cuvette 내에서 효소에 의한  $H_2O_2$ 의 분해를 240 nm의 흡광도에서 1분간 측정하여 다음의 식으로 계산하였다. Catalase 활성(unit/g) =  $(\Delta A_{240}/\text{min} \times \text{희석배율}) / (2 \times 43.6^*)$ . 여기서 43.6\*은 240 nm에서  $H_2O_2$ 의 흡광계수이다.

Peroxidase 활성은 pyrogallol을 기질로 사용한 Sigma사의 방법에 따라 측정하였다<sup>14)</sup>. 조효소액 100  $\mu\text{L}$ 를 3 mL cuvette에 넣고 0.1 M 인산완충액(pH 6.0) 0.32 mL, 0.147 M  $H_2O_2$  0.16 mL, 5% pyrogallol 용액 0.32 mL과 증류수 2.1 mL을 함께 섞은 후, 420 nm의 상온에서 20초간 흡광도 변화를 측정하였다. Peroxidase 활성(unit/g) =  $[(\Delta A_{420}/20\text{sec}) \times (\text{희석배율})] / (12^* \times \text{g시료/mL 반응액})$ . 여기서 12\*는 420 nm에서의 흡광계수이다.

지베렐린류의 화합물은 현재까지 126종 이상이 보고되고 있을 정도로 그 종류가 많고 이들 화합물의 구조 또한 아주 유사하여 HPLC상에서의 완전한 분리가 어렵고, GC에서의 retention time도 유사할 뿐만 아니라 일부 지베렐린의 경우 mass spectrum도 유사하여 하나의 분석기기로는 정확한 분리 동정이 불가능하다. 또한 식물호르몬 지베렐린(GAs)의 정확한 분리 동정 및 정량을 위해서는 식물체내의 여러 화학적 성질이 비슷한 다른 성분들의 간섭현상을 최소화할 수 있는 분리방법의 개발이 선행되어야 한다. 따라서 이들 여러 기기상의 분리특성을 이용하여 HPLC로 먼저 일부 GA류들을 분리한 후 GC/MS로 각 GA류를 분리 동정하였다.

내생 지베렐린 함량 측정을 위한 시료는 액체질소로 동결한 후 냉동건조하여  $-20^\circ\text{C}$  냉장고에 보관하면서 시료로 사용하였다. 지베렐린 추출의 일

반적인 과정은 다음과 같다. 마쇄한 시료를 80%와 100% MeOH을 차례로 가하여 충분히 추출한 후 추출여액을 60% MeOH용액이 되게 증류수를 가한 다음 -70°C 냉장고에 1~2시간 동안 엽록소를 침전 여과하여 엽록소를 제거하였다. 내부표준물질(Internal standard, ISTD)로는 30ng의  $^2\text{H}_2$  GA<sub>1</sub>,  $^2\text{H}_2$  GA<sub>3</sub>,  $^2\text{H}_2$  GA<sub>4</sub>,  $^2\text{H}_2$  GA<sub>8</sub>,  $^2\text{H}_2$  GA<sub>9</sub>,  $^2\text{H}_2$  GA<sub>12</sub>,  $^2\text{H}_2$  GA<sub>15</sub>,  $^2\text{H}_2$  GA<sub>19</sub>,  $^2\text{H}_2$  GA<sub>20</sub>,  $^2\text{H}_2$  GA<sub>24</sub>,  $^2\text{H}_2$  GA<sub>36</sub>,  $^2\text{H}_2$  GA<sub>44</sub>,  $^2\text{H}_2$  GA<sub>53</sub>을 추출하기 전에 첨가하였다. 추출여액의 pH를 2N NH<sub>4</sub>OH를 이용해 8.0~8.3으로 조정하고 다음 5g의 davisil C<sub>18</sub>(90~130 μm, 60Å pore size, Alltech) column을 통과시킨 후 감압 농축하였다.

농축된 잔사를 1g의 celite에 건조시킨 후 5g의 SiO<sub>2</sub>(ICN Silica 32-100, aktiv 60A) 컬럼에 loading하여 formic acid로 포화된 95:5 EtOAc : Hexane을 이용해서 통과시켰다. 통과시킨 여액을 감압 농축한 후 인산완충액(pH 8.0)에 녹인 다음 2N NaOH를 이용해서 pH를 8.0~9.0으로 조정하고 EtOAc를 이용하여 3회 분획하였다. 여액(인산완충액)에 1g의 polyvinylpolypyrrolidone (PVPP)을 첨가하여 1시간 동안 진탕시켰다. 진탕시킨 여액을 여과시킨 다음 6N HCl을 이용해 pH 2.5로 조정하고 ethyl acetate로 3회 분획한 후 감압 농축하였다. 농축한 잔사를 100% MeOH에 용해시켰으며, HPLC에서 각 지베렐린의 정확한 머무름 시간을 결정하여 분획화하기 위하여 [1,2- $^3\text{H}$ ] GA<sub>20</sub>와 [1,2- $^3\text{H}$ ]GA<sub>9</sub>를 첨가하여 질소가스 건조시킨 후 HPLC용 분석시료로 사용하였다.

HPLC 시스템은 Waters model 680 automated gradient controller, U6K injector, model 510 pump와 Isco fraction collector로 구성되었다. HPLC column은 μ Bondapak C18(3.9×300mm)을 사용하였으며 각 GA는 1%의 acetic acid를 포함한 28% MeOH와 100% MeOH 용액의 농도구배로 분리하였다. 유속은 분당 1.5ml로 유지하였으며 1.5ml씩 총 45분획으로 나누었다.

각각의 지베렐린 정확한 머무름 시간은 각 분획당 소량(15μl)을 취하여 Liquid Scintillation Counter(Beckman, LC 1801)로  $^3\text{H}$ -GA 표준물질의 유무를 확인하여 결정하였다. 각 분획을 Savant Automatic Environmental Speedvac(model, AE 2000)으로 건조한 후 동일 GA를 포함한 분획을 합하여 1ml의 reaction vial로 옮긴 후 40°C에서 질소가스로 건조시켰다. GA 분획 중 불순물을 많이 함유한 분획은 NH<sub>2</sub> cartridge를 사용하여 GA외의 불순물을 제거한 후 reaction vial로 옮겼다.

GA를 포함한 분획을 건조시킨 다음 1ml의 reaction vial로 옮긴 후 40°C에서 질소가스로 건조시킨 다음 각 GA를 2차례 60μl ethereal diazomethane으로 methyl ester를 유도한 후 질소가스로 건조하였다.

Silylation이 필요한 GA류는 30 $\mu$ l의 pyridine과 30 $\mu$ l의 N-D-bis(trimethyl silyl)-trifluoroacetamide (BSTFA, 1% TMCS 포함)로 70 $^{\circ}$ C에서 30분간 반응시킨 후 질소가스로 건조하였다. 시료는 무수 dichloromethane에 녹인 후 1 $\mu$ l를 30m $\times$ 0.25mm(i.d.) HP-1 capillary column이 장착된 GC-MS에 주입하였다. 5973N Mass Selective Detector (Hewlett-Packard)가 부착된 GC(Hewlett-Packard model 6890)를 사용하였으며 data는 HP 5970C Chemstation(Hewlett-Packard)을 사용하여 처리하였다.

지베렐린류의 동정은 KRI 값과 mass spectrum을 비교하여 확인하였다. 정성과 정량을 분석하기 위해 hydrocarbon standard를 이용해 Kovats Retention Index(KRI)를 구하였으며, 각 GA와 [ $^2$ H $_2$ ]GA ISTD의 3개 주요 ion mass를 비교하여 확인하였다. 모든 GA류의 동정은 KRI값과 mass spectrum을 비교함과 동시에 Australian National University의 Lewis N. Mander 교수로부터 구입한 deuterated된 각 GA 표준품의 KRI 및 mass spectrum을 비교하여 확인하였다.

#### Calculation of Kovats Retention Index(KRI)

$$= 100 \times \frac{Rt(\text{unknow}) - Rt(\text{preceding n-alkane})}{Rt(\text{following n-alkane}) - Rt(\text{preceding n-alkane})} + Cn(\text{preceding n-alkane}) \times 100$$

또한, 지베렐린의 정량은 deuterated GAs와 endogenous peak 면적의 비율을 기본으로 하여 정량하였다. 즉, GA<sub>53</sub>, GA<sub>12</sub>, GA<sub>19</sub>, GA<sub>20</sub>, GA<sub>1</sub>의 내생 함량은 448/450, 300/302, 434/436, 418/420, 506/508의 peak 면적의 비율로 계산하였다.

#### Calculation of endogenous GAs

$$= \frac{\text{Endo peak area}}{\text{ISTD peak area}} \times \text{amount of ISTD} / \text{weight (DW or FW)}$$

## 8. 저선량 조사가 작물의 생리활성에 미치는 영향

### 가. 효소활성

조효소액의 추출은 유식물체 잎조직 0.5 g을 액체질소를 사용하여 얼린 다음 막자사발에서 마쇄한 후 0.05 M 인산완충액 (pH 7.0) 1.0 ml을 첨가한 다음 4°C에서 10,000 rpm으로 10분간, 11,000 rpm에서 15분간 원심분리하여 얻은 상등액을 조효소액으로 사용하였다. 단백질 정량은 BSA를 표준단백질로 사용한 Bradford<sup>44)</sup>의 방법에 따라 측정하였다.

Peroxidase (POD) 활성은 pyrogallol (Sigma, Cot# P-0381)을 기질로 사용한 Sigma사의 방법에 따라 측정하였다. 배양세포 조효소액 100  $\mu$ l를 3 ml cuvette에 넣고 0.1 M 인산완충액 (pH 6.0) 0.32 ml, 0.147 M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.16 ml, 5% pyrogallol 용액 0.32 ml과 증류수 2.1 ml을 함께 섞은 후, 420 nm에서 20초간 상온에서 흡광도 변화를 측정하여 구하였다. UV 측정시 반응액의 흡광도가 0.4~0.7이 되도록 조효소액을 희석하여 효소활성을 측정하였다. POD 활성은 다음의 식으로 구하였다. POD 활성 (unit/g 건물중) =  $[(\Delta A_{420}/20\text{sec}) \times (\text{희석배율})] / (12^* \times \text{g시료}/\text{ml 반응액})$ . 여기서 12\*은 420 nm에서의 흡광계수이다<sup>45)</sup>.

Catalase (CAT) 활성은 기질인 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 감소량을 측정하는 방법<sup>46)</sup>을 사용하였다. 효소측정을 위한 반응용액은 0.053 M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1 ml, 효소액 0.1 ml, 0.05M 인산완충액 (pH 7.0) 1.9 ml의 혼합액으로 하였으며, 효소활성 (unit)은 cuvette내에서 효소에 의한 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 분해에 의한 240 nm의 흡광도감소를 1분간 측정하여 다음의 식으로 계산하였다. CAT 활성 (unit/g 건물중) =  $(\Delta A_{240}/\text{min} \times \text{희석배율}) / (2 \times 43.6^*)$ . 여기서 43.6\*은 240 nm에서 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 흡광계수이다.

### 나. 엽록소 함량

엽록소 함량은 Arnon<sup>47)</sup> 방법을 참조하여 생육조사시 유식물체 잎조직 0.5 g을 채취한 후, 액체질소를 사용하여 얼린 다음 막자사발에서 마쇄하여 15 ml falcon tube에 옮긴 후 10 ml의 80% acetone으로 압상태 (4°C)에서 24시간 추출한 다음 여과지 (Watman No.41)로 여과하여 80% acetone으로 10배 희석한 후 Shimazu사의 UV-1601PC spectrophotometer를 사용하여 파장 652 nm에서 흡광도를 측정하였다.

#### 다. 광합성능

엽록소 형광은 Xe-PAM flurometer (Heinz Walz, Effeltrich, Germany)를 이용하여 측정하였다. 광저해 유도 후 잎절편을 잎 디스크 전극 chamber 안에서 30분 동안 암 적응 시킨 후 Fo(반응 중심이 열려있을 때의 형광)와 Fm(암적응 후 최대형광)을 측정하였다. 일정 형광 측정광은 xenon-measuring flash lamp를 통하여 조사하였고( $0.5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ), actinic light( $600 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) 와 saturation light( $3700 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )로는 main control unit에 의해 조절되는 actinic-/saturation light unit (XE-AL)을 통하여 조사하였다. 엽록소 형광 소멸은 actinic light 조건에서 잎절편이 지속적으로 광합성을 수행하는 동안 포화광을 조사하여 분석하였다. 광합성이 수행되는 동안 포화광을 가함으로써 광계II의 환원 정도를 분석할 수 있다<sup>48)</sup>. 비광화학 소멸 계수는 Schreiber 등<sup>49)</sup>의 정의에 따라 계산하였다. 환원되어 있던  $Q_A$ 가 산화되면서 엽록소 형광이 감소하는 성분을 광화학 소멸(photochemical quenching, qQ)이라 하고, 틸라코이드막의 에너지화에 의한 소멸을 에너지 의존성 소멸(energy-dependent quenching, qE), 광계II 복합체의 광저해에 따른 소멸을 광저해 소멸(photoinhibitory quenching, qI)이라 하며, 이때 qE와 qI를 함께 비광화학 소멸(non-photochemical quenching, NPQ)이라 한다<sup>50, 51, 52, 53)</sup>.

$$\text{NPQ}(\text{nonphotochemical quenching}) = (F_m - F_m')/F_m'$$

$$\Phi_{\text{PSII}}(\text{effective quantum yield of PSII}) = (F_m' - F)/F_m'$$

$F_m$  = maximal fluorescence (dark), 암상태에서 모든 광계II 반응 중심이 닫혀있을 때의 최대 형광

$F$  = actual fluorescence, 광합성이 유도되고 있는 동안의 실제 형광

$F'_m$  = maximal fluorescence (light), 빛이 있는 상태에서 모든 광계II 반응 중심이 닫혀있을 때의 최대 형광

산소 발생은 잎절편을 Hansatech 산소 전극 chamber, Model LD2 (Hansatech Instrument Ltd., King's Lynn, Norfolk, U.K.)에 넣어  $25^\circ\text{C}$  기체 상태에서 측정하였다. 광합성을 위한 기질로 사용되는 이산화탄소는 1 M carbonate/bicarbonate 완충용액(pH 9)을 스폰지에 적셔 공급하였다<sup>54)</sup>.  $P_{\text{max}}$ 는  $1000 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 에서 측정하였으며 낮은 광에서의 광합성율은 neutral density filters를 사용하여 조절하였다.

#### 라. 양분 흡수

총인 함량과 전질소함량은  $H_2O_2-H_2SO_4$ 법으로 습식분해 후 각각 molybdenium 청법(P)과 salicylate 발색법(N)을 측정원리로 하는 autoanalyser(BRAN-LEUBBE)를 이용하여 정량하였고, 기타 무기성분(K, Na, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn)에 대해서는 위 분해액을 가지고 ICP(GBC Integra XL)를 이용하여 측정하였다.

#### 마. 대두 뿌리 활성

감마선의 조사가 뿌리의 생육에 미치는 영향을 조사하기 위하여 황금콩을 공시하고 한국원자력 연구소의 감마선조사시설을 이용하여 종자에 0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20 Gy 수준으로 감마선을 조사하였다.

재배환경이 감마선에 의한 자극효과의 발현에 미치는 영향을 파악하기 위하여 감마선을 조사한 콩품종의 종자를 온도, 습도, 빛이 제어되는 growth chamber와 고려대학교 자연자원대학 내 유리온실과 시험포장, 그리고 원자력연구소 시험포장에서 각각 재배하였다.

뿌리생육의 측정은 뿌리가 손상되지 않도록 조심스럽게 수거하고 흐르는 물로 세척하였으며 스캐너(AGFA: Snapscan1236)를 이용하여 수거한 뿌리의 형태를 영상화하였다. 영상화한 뿌리의 이미지는 영상분석프로그램(WinRhizo V4.0B)을 이용하여 분석하고, 뿌리표면적, 뿌리길이, 뿌리두께 등을 측정하였다.

#### 바. 저선량 조사에 의한 작물의 단백질 발현 추이

배추 및 애기장대를 실온에서 2일간 침윤시킨 후, 온도 28/23°C, 습도 80% 및 14/10시간의 광주기( $200 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) 조건 혹은 온실에서 생장시켰다. 저선량 방사선 처리는 배추 및 애기장대 종자는 저선량 준위에서 노출시켰다.

광합성을 측정은 준비된 잎 원형절편(diameter  $2.5 \text{ cm}^2$ )을 취한 후 Clark type 산소전극을 포함한 가스측정 동화상(LD2, Hansatech, LK)을 이용하여 측정하였다. 광계II의 광화학적 효율 측정은 방사선 처리, 저온 및  $10 \mu\text{M}$  paraquat 처리된 잎절편을 광계II가 전자를 받을 준비가 되게끔 완전히 열린상태의 조건으로 30분간 암처리 한다. 그리고 Plant Efficiency Analyser(Hanstech instrument Ltd., UK)를 이용하여 측정하였다. 광계I의 산화환원 크기 결정은 PD700DW(PAM, Walz, Germany)를 이용하여 830 nm에서

흡광도 변화를 측정함으로써 광계I의 전자 전달능 및 광계II와 I 사이의 전자 및 스트로마성 전자 푸울 크기를 결정하였다.

이차원 전기영동은 잎 1.5 g을 harvesting 하여 0.07% 2-mercaptoethanol이 포함된 chloroform 1 ml로 현탁하였다. 이를 액체질소에서 5분동안 처리한 후 10% trichloroacetic acid와 0.07% mercaptoethanol이 포함된 acetone 10 ml을 첨가한 후 -20°C에서 1hr 동안 방치한 후 45,000g에서 15min 원심분리하여 침전물을 수확하였다. 단백질 침전물을 0.07% 2-mercaptoethanol이 포함된 acetone으로 2회 washing한 후 vacuum에서 drying하였다. 단백질 파우더를 1 ml의 electrofocusing buffer(9 M urea, 2% NP-40, 2% 2-mercaptoethanol, 0.8% carrier ampholytes (Pharmalyte, pH3.5-10.0, Pharmacia, Uppsala, Sweden), 0.01% bromophenol blue)로 용해한 후 19,000g에서 10 min간 원심분리한 후 상징액을 IPG pho system으로 IEF한 후 SDS-PAGE로 2D를 수행하였다. 단백질은 spot은 silver staining을 통해서 염색한 후 image system (Biorad)를 이용하여 분석하였다.

## 9. 저선량 조사가 작물의 스트레스 경감 효과에 미치는 영향

### 가. 작물의 방사선 감수성에 미치는 영향

공시재료로 사용한 대두 (*Glycine max* L.) 품종은 한국원자력연구소 시험농장의 포장에서 생산하여 6개월간 실온에서 저장한 황금콩을 선정하였다. 저선량 감마선 조사에 사용한 시설은 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설 ( $^{60}\text{Co}$ )을 이용하여 감마선을 0, 4, 8, 12, 20 Gy 5수준으로 건조종자에 직접 조사하였다. 조사선량율은 Fricke dosimeter로 측정하였다.

온실재배실험은 감마선 조사 당일에 종자 100립씩을 배양토와 모래가 1:1로 충전된 100공 plug tray에 파종하여 유리온실에서 발아시켜 파종 7일 후에는 발아율을, 파종 15일 후에는 초장과 생체중 등 초기생육을 조사하였다. 생육조사 직후 각각의 선량별로 비슷한 크기의 유묘를 선발하여 동일한 토양으로 충전된 직경 15cm의 비닐 pot 30개에 3주씩 이식하여 후속고선량 조사시료로 사용하였다.

후속고선량조사는 저선량 조사하여 재배한 대두 식물체를 이식한 다음 날 임의 선택한 각각의 저선량 조사구 10개 pot에 후속고선량으로 50, 100, 200 Gy의 감마선을 조사하여 45일 후에 초장과 생체중 및 엽록소 함량을 측정하였다. 엽록소함량분석은 후속고선량 조사 45일 후에 Arnon 방법을<sup>47)</sup> 참조하여 조사 선량별로 동일 부위의 대두식물체 잎을 채취하였다. 잎시료

0.5 g씩을 액체질소로 얼린 다음 막자사발에서 마쇄하여 15 ml falcon tube에 옮긴 후 10 ml의 80% acetone으로 암상태 (4℃)에서 24시간 추출한 다음 여과지 (watman No. 41)로 여과하여 80% acetone으로 10배 희석한 후 shimazu사의 UV-1601pc spectrophotometer를 사용하여 파장 652 nm에서 흡광도를 측정하였다.

공시재료로 사용한 고추 (*Capsicum annuum* L.) 품종은 흥농종묘의 1996년산 조광고추(*Capsicum annuum* L. cv. Jokwang)와 중앙종묘의 1999년산 조홍고추(*Capsicum annuum* L. cv. Johong)를 선정하였다. 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설(<sup>60</sup>Co)을 이용하여 감마선 0, 4, 8, 20, 50 Gy 수준으로 건조종자에 직접 조사하였다.

감마선 조사 당일에 종자 100립씩을 배양토와 모래가 1:1로 충전된 100공 plug tray에 파종하여 유리온실에서 발아시켜 파종 18일 후 발아율, 초장, 생체중 등 초기생육을 조사하였다. 생육조사 직후 각각의 선량별로 비슷한 크기의 유묘를 선발하여 동일한 토양으로 충전된 직경 15 cm의 비닐 pot 30개에 3주씩 이식하여 후속고선량 조사시료로 사용하였다.

저선량으로 조사하여 재배한 고추 유식물체를 이식한 4일 후 임의 선택한 각각의 저선량 조사구 10개 pot에 후속고선량으로 50 Gy와 100 Gy의 감마선을 각각 40시간과 80시간에 걸쳐 조사하여 생육 시기별로 1차(50 Gy 조사구 ; 조사 21일 후, 100 Gy 조사구 ; 조사 16일 후)와 2차(50 Gy 조사구 ; 조사 28일 후, 100 Gy 조사구 ; 조사 23일 후)로 나누어 초장과 생체중을 조사하였다.

후속고선량 처리는 이식한 4일 후 임의 선택한 각각의 저선량 조사구 10개 pot에 후속고선량으로 50 Gy와 100 Gy의 감마선을 각각 40시간과 80시간에 걸쳐 조사하여 생육 시기별로 1차(50 Gy 조사구 ; 조사 21일 후, 100 Gy 조사구 ; 조사 16일 후)와 2차(50 Gy 조사구 ; 조사 28일 후, 100 Gy 조사구 ; 조사 23일 후)로 나누어 초장과 생체중을 조사하였다.

#### 나. 방사선에 의한 작물의 광 스트레스 경감효과

시험용 고추(*Capsicum annuum* L.)는 농우바이오에서 96년 중국에서 생산하여 실온에서 저장한 태양 품종을, 참박(*Lagenaria siceraria*)은 농우바이오에서 99년 인도에서 시판용 종자로 생산한 OK 품종을 분양 받아 사용하였다. 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설 (<sup>60</sup>Co)을 이용하여 건조종자에 직접 조사하고 방사선 무조사구와 비교하였다. 조사선량은 Fricke dosimeter로 측정하였다.



온실재배실험은 방사선 조사 다음날 종자 100립을 배양토와 모래가 1:1로 충전된 직경이 15 cm인 pot에 20 립씩 5반복으로 파종하여 유리온실에서 재배하면서 발아율을 조사하였고 30~40일 동안 자란 고추의 초장을 조사한 후 제 3엽을 잘라 지름이 1.5 cm인 코르크 보리로 원모양의 잎절편을 낸 후 실험에 사용하였다.

광저해 처리는 일정한 온도 (25℃)를 유지할 수 있는 아크릴통에 100 ml의 증류수를 넣은 후 원판 모양의 잎절편을 띄웠다. 광처리로 인한 열을 차단하기 위하여 수돗물이 흐르는 원통형의 유리 수조(Φ 15 cm, 높이 15.5 cm)를 아크릴통 위에 올려놓았다. 광저해 처리를 위한 광원으로는 텅스텐 할로겐 램프(Itami Protex Co. Ltd., Japan)를 사용하였으며 900  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광에서 0~6시간 동안 광저해를 유도하였다.

#### 다. UV-B 스트레스 경감효과

시험용 무 종자는 농우바이오에서 시판하고 있는 신규 품종인 백옥무를 분양받아 사용하였고, 저선량 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설 ( $^{60}\text{Co}$ )을 이용하여 감마선 0, 2, 4, 8, 10 Gy 수준으로 건조종자에 직접 조사하였다. 방사선 조사 직후 종자를 배양토와 모래가 충전된 105공 플러그에 1립씩 3반복으로 파종하여 유리온실에서 발아시켰다. 파종 7일 후 발아율을 조사하였고 발아율 조사 후 동일한 토양이 충전된 직경 15 cm pot에 4주씩 20 반복으로 이식하였으며 12일 후 초장을 조사하였다.

콩 종자로는 2000년 수확한 황금콩을 사용하였고, 저선량 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설 ( $^{60}\text{Co}$ )을 이용하여 감마선 0, 2, 4, 8, 16 Gy 수준으로 건조종자에 직접 조사하였다. 방사선 조사 다음날 종자 100립을 배양토와 모래가 1:1로 충전된 직경이 15cm pot에 10립씩 10반복으로 파종하여 유리온실에서 발아시켜 파종 7일 후에 발아율을 조사하고, 20일 후에는 초장을 조사하였다.

UV-B 처리는 일정한 온도(25℃)가 유지되는 생장기(growth chamber)에서 petridish에 원판 모양의 잎절편을 띄운 후 빛이 있는 상태에서 유도하였다. UV-B 처리를 위한 광원으로는 UV-B 램프(XX-15B, Spectronics Corporation, USA)를 사용하였으며 0~4 시간 동안 유도하였다. UV-B의 광도는 Digital Radiometer (DRC-100X, Spectronics Corporation, USA)로 측정하였고 본 실험에 사용된 광도는  $1\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$  였다.

## 라. 저온과 산화 스트레스에 대한 오이의 반응

시료의 배양과 유지는 저온 감수성 작물로 알려진 오이, 벼, 및 우리나라 주요작물인 배추 및 고추, 박을 실온에서 2일간 침윤시킨 후, 온도 28/25°C, 습도 80 % 및 14/10시간의 광주기( $200 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) 조건 혹은 온실에서 성장시켰다. 저선량 감마선 조사에 사용한 시설은 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설 ( $^{60}\text{Co}$ )을 이용하여 종자에 직접 조사하였다.

저선량 방사선, 온도 및 Paraquat 처리는 저온 스트레스를 주기 위해 완전히 성장한 오이 1엽의 직경 1 cm 잎절편을  $60 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$  광도하에서 5, 10, 15, 20°C로 온도를 각각 달리하여 6시간 처리하였다. 완전히 성장한 오이 1엽의 직경 1 cm 잎절편을 25°C,  $60 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$  광도하에서 10  $\mu\text{M}$  paraquat에 시간별(1, 2, 3, 6, 9 hr)로 처리하였다.

광합성을 측정은 준비된 잎 원형절편(diameter 2.5 cm)을 취한 후 Clark type 산소전극을 포함한 가스측정 동화상 (LD2, Hansatech, LK)을 이용하여 측정하였고 광계II의 광화학적 효율 측정은 방사선 처리, 저온 및 10  $\mu\text{M}$  paraquat 처리된 잎절편을 광계II가 전자를 받을 준비가 되게끔 완전히 열린상태의 조건으로 30분간 암처리 한다. 그리고 Plant Efficiency Analyser(Hanstech instrument Ltd., UK)를 이용하여 측정하였다.

광계I의 산화환원, intersystem 및 스트로마 전자푸울 크기 결정은 PD700 DW(PAM, Walz, Germany)를 이용하여 830 nm에서 흡광도 변화를 측정함으로써 광계I의 전자 전달능 및 광계2와 1 사이의 전자 및 스트로마성 전자 푸울 크기를 결정하였다.

Native gel을 이용한 활성산소 방어계 효소, SOD 및 APX 활성도 측정에서 Superoxide dismutase(SOD)의 활성도는 잎절편을 액체질소와 함께 냉각시킨 유발에서 마쇄한 후 0.3 ml의 추출용 완충용액(50mM K-Pi 완충용액 (pH7.8), 0.1 % ascorbic acid,  $\beta$ -MercaptoEthanol, 1 mM PMSF)을 첨가하여 같이 마쇄하였다. 이를 4°C, 12000 r.p.m.으로 5분동안 원심분리하여 얻은 상장액을 분석에 사용하였다. SOD 동위효소는 Non-denaturing PAGE(10, 15 %)로 200 V에서 2시간 전기영동하여 분리한 후 nitroblue tetrazolium (NBT)으로 발색하였다<sup>55)</sup>. MnSOD, FeSOD 및 Cu/ZnSOD는 2 mM KCN, 5 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>에 의한 저항성 유무로 판별하였다<sup>55)</sup>. Ascorbate peroxidase(APX)의 활성도는 잎 절편을 액체질소와 함께 냉각된 유발에서 마쇄한 후 0.3 ml의 추출용 완충용액 (50 mM Na-Pi 완충용액 (pH7.0), 0.1 % ascorbic acid, 1 % PVPP(w/v), 1 mM PMSF)을 첨가하여 같이 마쇄한다. 그런다음 4°C, 12000 r.p.m.으로 5분동안 원심분리하여 얻은 상

장액을 사용하였다. APX 동위효소는 Non-denaturing PAGE(10, 15 %)로 200 V에서 2시간 전기영동함으로써 분리한 후 nitroblue tetrazolium (NBT)으로 염색하였다<sup>56)</sup>.

Random Arbitrarily Primed PCR (RAP-PCR)에 의한 저온처리된 오이에서의 gene expression 변화를 조사하기 위하여 먼저 5°C, 10°C, 25°C 조건에서 6시간 동안 light chilling stress를 받은 벼 잎으로부터 TRIzol™ (GIBCO BRL)용액을 이용하여 total RNA를 분리하였다. 각 처리구로부터 추출한 RNA 9 ug에 oligo d(T)를 primer(B1 primer: GTTTCGCTCC, B12 : CCTTGACGCA)를 첨가하고 revers transcriptase (Promega)를 이용하여 50 ul reaction volume으로 42°C에서 1시간동안 cDNA를 합성하였다. 합성된 cDNA 1/10 ul를 주형으로 하고 random primer set을 이용하여 PCR을 수행하였다. PCR 조건은 92°C에서 1분간 denaturation, 35°C에서 1분간 annealing, 72°C에서 1분간 polymerization하여 40 cycle을 수행하였다. 이후 1% agarose gel에 전기영동하여 band pattern을 분석하였다.

이차원 전기영동은 잎 1.5 g을 harvesting 하여 0.07% 2-mercaptoethanol이 포함된 chloroform 1 ml로 현탁하였다. 이를 액체질소에서 5분동안 처리한 후 10% trichloroacetic acid와 0.07% mercaptoethanol이 포함된 acetone 10 ml을 첨가한 후 -20°C에서 1hr 동안 방치한 후 45,000g에서 15min 원심분리하여 침전물을 수확하였다. 단백질 침전물을 0.07% 2-mercaptoethanol이 포함된 acetone으로 2회 washing한 후 vacuum에서 drying하였다. 단백질 파우더를 1 ml의 electrofocusing buffer(9 M urea, 2% NP-40, 2% 2-mercaptoethanol, 0.8% carrier ampholytes (Pharmalyte, pH3.5-10.0, Pharmacia, Uppsala, Sweden), 0.01% bromophenol blue)로 용해한 후 19,000g에서 10 min간 원심분리한 후 상정액을 IPG pho system으로 IEF한 후 SDS-PAGE로 2D를 수행하였다. 단백질 spot은 silver staining을 통해서 염색한 후 image system (Biorad)를 이용하여 분석하였다.

#### 마. 병해 경감 효과

시험용 배추(*Brassica campestris* L.)는 만나배추를 사용하였으며 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설 (<sup>60</sup>Co)을 이용하여 0, 2, 4, 8, 16 Gy를 건조종자에 직접 조사하였고 방사선 조사 직후 직경 4 cm 연결포트에 접파하여 본포에 이식하였다. 무사마귀병 저항성 유기 여부, 배추 크기, 무게를 측정하였다.

## 10. 방사선에 의한 식물의 항산화 기구 해석 및 이용

### 가. 대상식물 및 방사선 조사

실험대상 식물은 고추의 종자, 유식물 및 배양세포(캘러스 덩이 또는 현탁배양세포), 벼 식물체 등을 대상으로 하였다. 방사선의 소스는  $^{60}\text{Co}$  감마선으로 종자, 일정시기의 유식물 및 배양세포의 경우는 최대생장기인 계대배양 4일째에 0, 1, 5, 10, 50, 100 Gy를 처리하였다. 처리한 식물재료는 즉시 액체질소에 보존하거나 일정시간이 지난 후 시료를 채취하였고, 종자 및 유식물의 경우는 pot에 재배하기도 하였다.

### 나. 단백질 정량 및 전기영동

식물재료는 고추현탁배양세포와 실생묘를 이용하였으며 배양세포는 계대배양 후 4일째 된 최대생장기에, 실생묘는 성장조절실에서 자란 6-8엽기에 감마선을 각각 0, 1, 5, 10, 20, 50 Gy씩 처리하였다. 처리 후 0, 12, 24, 48, 72시간 후에 Biorad Protein assay kit44에 의한 단백질함량 측정과 SDS-PAGE에 의한 「1차원전기영동」 과 SDS-PAGE 및 IEF에 의한 2차원 전기영동을 실시하여 방사선 처리에 의하여 특이적으로 유도되는 단백질 혹은 polypeptide를 탐색하였다. 이차원전기영동을 위해 단백질은 그 성질에 따라 친수성(hydrophilic) 단백질, 소수성(hydrophobic) 단백질과 막결합(membrane bound) 단백질 등 세 개의 층으로 분리하였다. 이차원전기영동은 먼저 단백질을 산도(pI)로 분리하는 IEF(등전점전기영동, isoelectric focusing)와 분자량별로 분리하는 SDS-PAGE를 수행하였다. 전기영동이 끝난 gel은 Bio-Rad사로부터 구입한 은염색(silver staining) kit로 발색하여 단백질의 spot를 관찰하였다.

### 다. 방사선 유도성 유전자 탐색

무처리와 방사선을 처리한 식물체로부터 total RNA를 추출하고 이로부터 poly(A)<sup>+</sup>RNA를 분리하여 cDNA library screening을 실시하였다. 60여종의 random oligonucleotide primer를 이용하여 방사선처리 식물체로부터 추출한 poly(A)<sup>+</sup>RNA로 RT-PCR을 실시하여 방사선 유도성 cDNA의 탐색을 시도하였다.

### 라. 항산화 효소의 활성측정

분석한 항산화 효소는 superoxidase dismutase(SOD), peroxidase(POD)이었다. SOD의 활성은 xanthine/xanthine oxidase system을 superoxide radicle( $O_2 \cdot$ )의 공급원으로 superoxide radicle에 의한 cytochrome c의 환원속도를 흡광도로 측정하였다. POD와 활성은 pyrogallol을 기질로 사용하여 조효소와 assay buffer로 측정하였다<sup>57, 58, 59)</sup>

#### 마. Comet 분석에 의한 핵 DNA 손상조사

현탁배양세포와 유묘에 일정 선량의 방사선을 처리한 후 경과한 시간별로 시료를 채취하였다. Comet 분석은 식물체로부터 완전한 핵의 분리, agarose에 핵의 고정, 전기영동, 형광염색 및 현미경관찰, 핵의 손상정도의 계산 등의 순으로 실시하였다<sup>60)</sup>. 한편 random primer에 의한 DNA 변이성 조사를 위해 방사선을 처리한 벼의 F2식물체로부터 genomic DNA를 추출하여 60종의 primer를 이용하여 RAPD 분석으로 방사선에 의한 유전자의 변화를 조사하였다

#### 바. 방사선과 자외선에 대한 식물의 반응차 구명

고추 종자, 유묘 및 배양세포에 방사선과 자외선을 처리하여 발아 및 초기 성장, 식물의 고사 및 가시적 피해정도, 전해물질의 누출 및 세포의 활력 및 phytoalexin의 생성 등을 조사하였다. 방사선은 1에서 50 Gy 까지 처리하였고 자외선은 Sankyo GL20 등(燈)을 사용하여 식물체와 30cm 거리에서 0.5에서 48시간까지 노출하였다.

#### 사. 방사선조사가 고추의 생육과 수량에 미치는 영향

고추 종자에 0, 1, 10, 50 Gy의 방사선을 처리한 후 파종하여 발아된 싹 생묘의 일정시기에 다시 방사선 처리를 하였다. 식물체는 1/2,000a 포트에 이식하여 일정시기에 생육상황과 수량 등을 조사하였다.

## 제 2 절 연구 결과 및 고찰

### 1. 저선량 방사선이 조사된 종자의 발아와 초기생육

#### 가. 참박과 호박 종자의 발아와 초기 생육

참박과 호박의 발아율과 초기생육에 미치는 저선량 방사선의 효과를 알아 보고자 발아율이 각각 70~80%와 80~90%라고 명시된 OK 참박과 흑종호박 종자에 감마선을 조사한 후 incubator에서 발아시켜 발아개시일로부터 3일 동안의 발아율을 관찰한 결과는 다음과 같다. 참박종자의 발아는 파종 4일 후부터 시작되었는데 종자상태에 따라 차이가 뚜렷하여, 파종 4일 후에 70~80% 종자의 경우는 대조구의 발아율이 25.3%인데 반해 4~20 Gy 수준에서 30.7%~42.0%로 21~66% 증가하였는데 특히 4 Gy에서 가장 높았고, 80~90% 종자는 모든 저선량 조사구에서 대조구 58.7%에 비해 62.0~74.0%로 6~26% 증가하여 그 중 4 Gy에서 가장 높았다. 70~80% 종자의 파종 5일 후 관찰한 발아율은 4~20 Gy 수준에서 57.3~64.7%로 대조구 47.3%에 비해 21~37% 증가하였고 파종 6일 후에도 대조구 53.3%에 비해 4~20 Gy 수준에서 66.7~74.0%로 25~39% 증가하였으며 4 Gy에서 가장 높았다. 80~90% 종자의 경우는 파종 5일 후와 6일 후에 4 Gy에서 각각 대조구 73.3%와 76.7%에 비해 80.7%와 81.3%로 10%와 6% 증가한 것을 제외하곤 별다른 증가를 보이지 않았다(그림 1). 저선량 조사한 호박종자의 발아는 참박종자에 비해 뚜렷한 증가효과를 보이지는 않았으나 종자상태별로 차이가 뚜렷하였다. 파종 4일 후의 발아율은 80~90% 종자에서만 8 Gy에서 79.3%로 대조구 77.3%에 비해 3% 증가하였고, 파종 5일 후엔 70~80% 종자는 2 Gy에서 대조구 78.7%에 비해 81.3%로 3%, 80~90% 종자는 8 Gy에서 83.3%로 대조구 80.7%에 비해 3% 증가하였다. 파종 6일에도 각각 2 Gy와 8 Gy에서 가장 높은 발아율을 보여 70~80% 종자의 경우는 86.7%로, 80~90% 종자는 84.7%로 대조구에 비해 각각 8%와 5% 증가하였다(그림. 2). 파종 8일 후 측정된 유묘초장과 생체중은 표 1에서와 같다. 참박의 경우 70~80% 종자의 유묘초장과 생체중은 각각 대조구 5.48 cm와 0.30 g에 비해 4~20 Gy 조사구에서 7~13% 증가하여 유의성있는 증가효과를 보였는데 특히 4 Gy에서 각각 6.18 cm( $p<0.05$ )와 0.34 g( $p<0.05$ )으로 가장 높았다. 80~90%의 경우는 대체로 4 Gy에서만 증가효과를 보여 대조구의 유묘초장과 생체중이 8.42 cm와 0.40 g에 비해 9.49 cm( $p<0.05$ )와 0.42 g으로 13%와 4% 증가하였다. 호박 70~80%

종자의 유효초장과 생체중은 2 Gy에서 각각 14.26 cm( $p<0.001$ )와 0.90 g( $p<0.01$ )으로 대조구 9.69 cm와 0.71 g에 비해 47%와 26% 증가하였고, 80~90% 종자의 경우는 대조구 13.54 cm와 0.76 g에 비해 8 Gy에서 각각 15.89 cm( $p<0.05$ )와 0.93 g( $p<0.01$ )로 가장 높은 효과를 보였다.

이상의 결과로 참박과 호박종자의 저선량 감마선 조사시 발아율과 유효초장이 증가됨을 알 수 있었는데 특히 발아율이 낮은 70~80% 종자에서 그 효과가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다. 김과 이<sup>61)</sup> 및 Luckey<sup>3)</sup>는 저선량 방사선에 의해 채소 종자의 발아율과 초기생육 촉진 및 생장중대에 대해 종합적으로 고찰하였고, 이 등<sup>62)</sup>은 저선량 방사선이 조사된 채소의 신규종자와 묵은 종자의 발아 실험에서 비교적 낮은 선량인 1~10 Gy에서 초기 발아가 향상되었고 그 효과는 묵은 종자에서 높았다고 보고하였다. 또한 김 등<sup>63)</sup>은 참박 종자의 발아율이 2 Gy와 8 Gy에서, 초기생육은 4~20 Gy에서 증가하였다고 보고하였다. 이에 본 실험에서는 저선량 감마선에 의한 참박과 호박 종자의 발아율 향상과 생육촉진은 발아율이 비교적 낮은 70~80%종자에서 더욱 효과적이었으며 이에 대한 적정선량은 2~8 Gy인 것으로 나타났다.

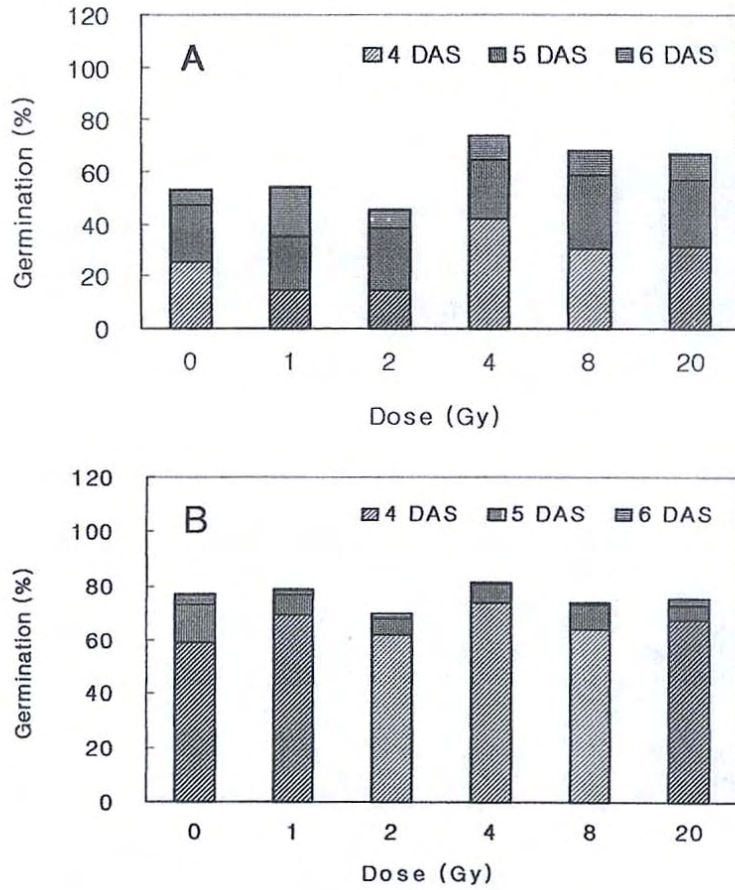


Fig. 1. Germination rate of bottle gourd developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. A ; 70-80% germinative seed. B ; 80-90% germinative seed. DAS ; days after sowing.



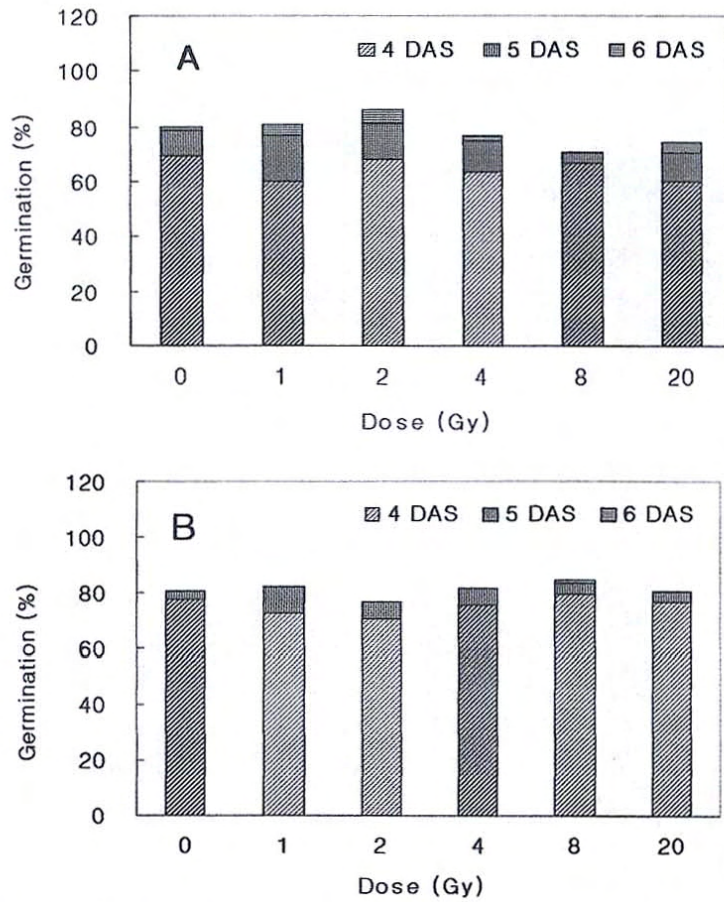


Fig. 2. Germination rate of pumpkin developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. A ; 70-80% germinative seed. B ; 80-90% germinative seed. DAS ; days after sowing.

**Table 1.** Growth response of bottle gourd and pumpkin developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation.

Dose (Gy)	Gourd				Pumpkin			
	Seedling height (cm)		Fresh weight (g/plant)		Seedling height (cm)		Fresh weight (g/plant)	
	70~80% germinative seed	80~90% germinative seed	70~80% germinative seed	80~90% germinative seed	70~80% germinative seed	80~90% germinative seed	70~80% germinative seed	80~90% germinative seed
0	5.48±0.16	8.42±0.40	0.30±0.01	0.40±0.02	9.69±0.90	13.54±0.71	0.71±0.05	0.76±0.03
1	5.91±0.51	8.54±0.32	0.29±0.02	0.36±0.01	9.67±0.54	14.02±0.87	0.64±0.03	0.81±0.06
2	5.03±0.35	8.52±0.32	0.26±0.01	0.37±0.01	14.26±0.83***	13.39±0.68	0.90±0.05**	0.77±0.03
4	6.18±0.32*	9.49±0.32*	0.34±0.01*	0.42±0.01	10.57±0.73	14.69±0.68	0.66±0.03	0.82±0.04
8	5.97±0.19*	8.34±0.32	0.32±0.02	0.39±0.01	9.51±0.66	15.89±0.84*	0.73±0.05	0.93±0.04**
20	5.99±0.27*	8.77±0.25	0.32±0.01	0.37±0.01	9.56±0.76	12.44±0.87	0.75±0.04	0.79±0.03

† : Mean ± standard error. \*, \*\*, \*\*\* : Significant at 5%, 1% and 0.1% level, respectively.

#### 나. 배추와 무 종자의 발아와 초기 생육

저선량 감마선 조사가 98년산 흑진주배추(BC)와 95년산 서림엇같이 배추(SC), 98년산 청운무(CR)의 발아율에 미치는 영향을 파악하기 위하여 10립씩 6pot에 파종한 각각의 종자의 발아수를 파종 후 3일부터 계수하여 발아율을 구하였는데 그 결과는 표 2와 같다. 98년산 흑진주배추의 경우 조사선량의 증가에 따라 발아율이 10~18%정도 증가하는 경향을 보였다. 95년산 서림엇같이 배추의 발아율은 특징적인 변화는 보이지 않았으나 6 Gy 조사구에서 약간 높게 나타났으며 청운 무의 발아율은 감마선조사에 의한 발아율의 감소를 보였고 10 Gy조사구에서 무처리구와 비슷한 정도의 발아율을 보였다. Kuzin<sup>32)</sup>의 배추에서 발아와 생육촉진에 관한 보고와 Pal<sup>64)</sup>의 무종자에서 감마선 10 Gy 조사구의 발아와 생장의 촉진효과에 관한 보고도 본 실험의 결과와 유사하였다.

저선량 감마선 조사가 흑진주배추, 서림엇같이 배추, 그리고 청운무의 건물생산량에 미치는 영향은 그림3과 같다. 파종 후 59일째에 수거한 작물의 건물량은 98년산 흑진주배추의 경우 감마선 4 Gy, 10 Gy 조사구에서 각각 무처리구에 대하여 48%, 43%의 건물생산량 증가를 보이면서 그 밖의 감마선 조사구에서도 무처리에 비해 증가된 건물생산량을 보여 감마선 조사에 의한 자극효과가 가장 잘 나타났으며, 95년산 서림엇같이배추는 10 Gy에서 38%의 건물생산의 증가를 보였다. 청운무는 8 Gy에서 16%로 건물생산량이 증가되었을 뿐 그 밖의 감마선 조사구에서는 무처리와 비슷한 량을 보였다. 본 실험에 의하면 배추종자가 무에 비하여 저선량의 감마선 조사에 더 민감하게 반응하는 것으로 보이며 특히 묵은 종자에 비해 햇종자가 감마선에 더 민감한 것으로 생각된다.

Table 2. Germination rate according to the dose of gamma radiation.

Plants	Days after sowing	Germination(%)					
		Dose(Gy)					
		0	2	4	6	8	10
<i>Brassica campestris</i> var. Surim	3	56	70	74	76	74	76
	4	64	78	82	90	88	88
	5	68	88	82	92	88	88
	6	72	88	82	92	90	90
	7	72	90	82	92	90	90
<i>Brassica campestris</i> var. Hckjinju	3	88	64	78	88	82	76
	4	96	94	88	96	96	94
	5	96	94	90	100	96	94
	6	96	94	90	100	96	98
	7	96	94	90	100	96	98
<i>Raphanus sativas</i> var. Chung-un	3	86	82	74	62	76	86
	4	90	84	74	68	78	90
	5	90	86	80	74	80	90
	6	90	88	82	74	82	90
	7	90	88	88	82	82	90

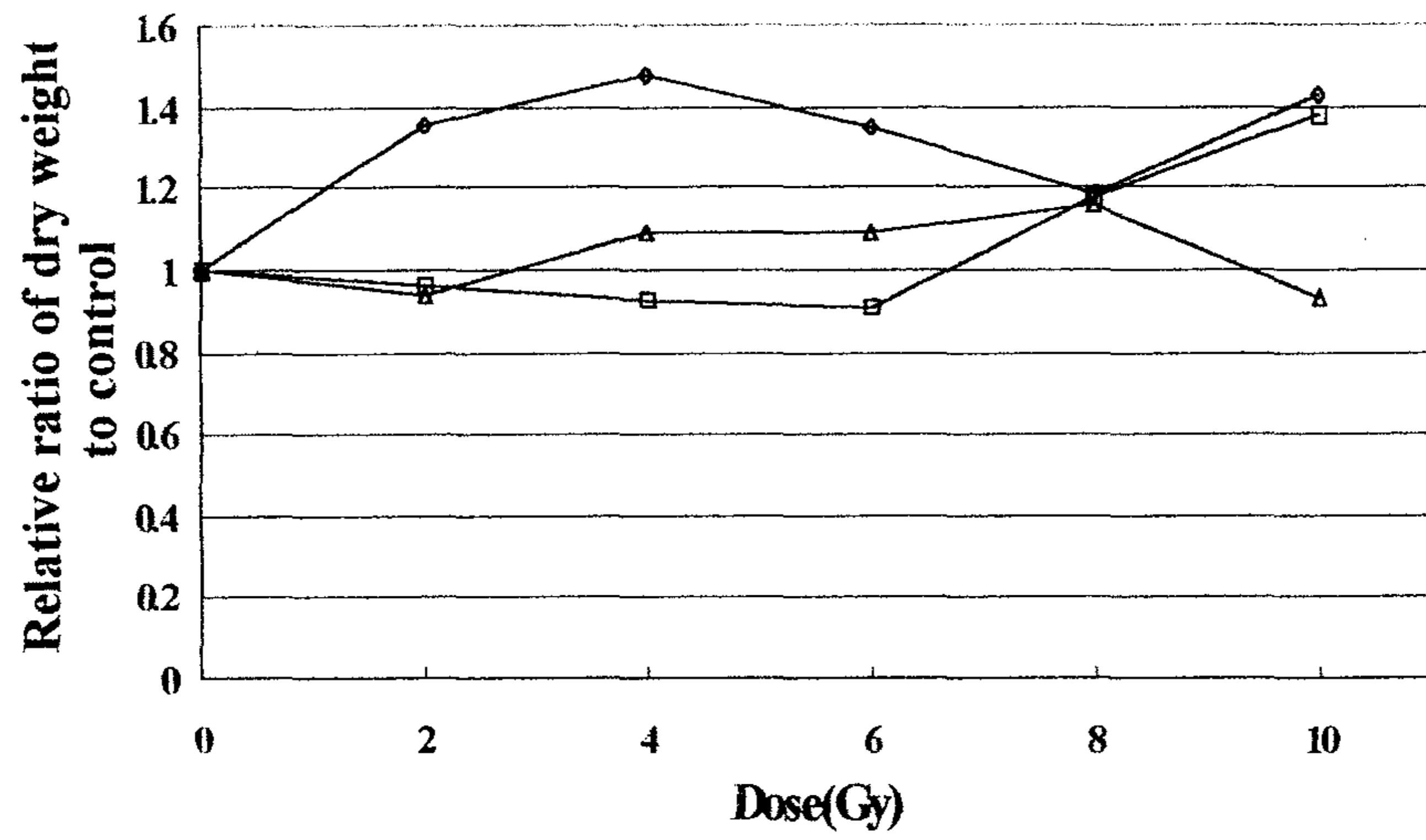


Fig. 3. Dry weight at 59 days after germination according to the dose of gamma radiation(◇*Brassica campestris* var. Surim ◻*Brassica campestris* var. Hckjinju △*Raphanus sativas* var. Chung-un).

#### 다. 대두 종자의 발아와 초기 생육

저선량 조사하여 비닐 pot에 파종하여 온실에서 재배한 대두 신규종자의 발아율은 표 3에서 보는바와 같이 대조구와 저선량 조사구 모두 비슷하게 98% 이상으로 양호하였으며 방사선 조사에 따른 어떤 차이를 보이지 않았다. 파종 15일 후에 조사한 초기생육 중 초장 또한 대조구 20.0 cm에 비해 저선량 조사구 모두 대조구 보다 2~4% 증가하여 다소 양호한 생육양상을 보였으나 뚜렷한 차이를 보이지는 않았다. 생체중에서는 대조구의 2.27 g에 비해 저선량 조사구가 다소 양호한 경향을 보였는데 8 Gy 조사구가 2.44 g으로 7% 정도 증가하였으며 12 Gy 조사구가 2.34 g으로 저선량 조사구에서는 가장 낮은 3% 정도 증가효과를 보였다. 파종 60일 후에 조사한 초장은 저선량 조사구 모두가 대조구에 비해 통계적으로 유의성있는 양호한 생육을 보였다. 저선량 조사구 중 20 Gy 조사구가 가장 높은 84.5 cm로 대조구 67.2 cm에 비해 26% 정도의 고도의 유의성있는( $p < 0.001$ ) 생육 증가를 보였고 4 Gy와 8 Gy 조사구에서도 비슷한 유의성있는( $p < 0.001$ ) 효과를 보였으며, 12 Gy 조사구에서는 75.5 cm로 대조구에 비해 12% 정도 증가하였으나 유의성은 없었다. 생체중에서도 저선량 조사 효과가 나타났으나 초장과는 다른 경향을 보였다. 8 Gy 조사구가 가장 높은 74.7 g의 생체중으로 대조구의 55.1 g에 비해 36% 정도 유의성 있는( $p < 0.05$ ) 증가효과를 보였고 다음이 4 Gy 조사구가 72.5 g으로 32% 정도 유의성있게( $p < 0.05$ ) 증가하였으나 저선량 조사구중 초장이 가장 낮았던 12 Gy 조사구는 생체중에서도 대조구보다 3% 정도 감소한 53.6 g으로 가장 낮았다. 김 등<sup>65)</sup>은 4 Gy의 감마선 조사구에서 대두종자의 발아율과 초기생육이 촉진되었으며 Stan과 Jingga<sup>1)</sup>도 10 Gy 이하의 감마선 조사에 의해 대두 종자의 발아율이 증가되었다고 하였으나 저선량 조사한 종자의 재배환경과 토양조건<sup>3)</sup> 및 종자의 상태와 품종<sup>65)</sup>에 따라서 저선량 조사효과가 다르게 나타났는데 본 실험에서는 저선량 조사에 의해 발아율 증가효과는 나타나지 않았다. Luckey<sup>3)</sup>와 Miller<sup>6)</sup>는 작물종자에 저선량 방사선을 조사하면 초기 생육촉진과 수량증가에 대한 효과가 있었다고 하였고, Stan과 Croitoru<sup>66)</sup>는 대두종자에 감마선 3~9 Gy 조사에서 생육과 pod 형성이 증가되었다고 보고하였다<sup>1)</sup>. 저선량의 x선을 대두종자에 조사한 Gaur와 Desai<sup>67)</sup>도 대두의 성장과 수량증가 효과를 인정하였다. 본 실험에서는 8 Gy 조사구에서 대두작물의 성장 증대효과가 가장 높게 나타났다.

**Table 3.** Growth response of soybean developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation.

Traits	Irradiation dose (Gy)				
	0	4	8	12	20
Germination rate (%)	98.5±0.6 <sup>†</sup>	98.3±0.6	98.8±0.5	98.8±0.5	98.5±0.6
Plant height (cm) <sup>‡</sup>	20.0±0.3	20.4±0.3	20.8±0.5	20.5±0.3	20.3±0.3
Fresh weight (g/plant) <sup>‡</sup>	2.27±0.07	2.38±0.07	2.44±0.08	2.34±0.06	2.39±0.06
Plant height (cm) <sup>§</sup>	67.2±2.9	83.7±2.4 <sup>***</sup>	84.0±2.2 <sup>***</sup>	75.5±3.6	84.5±2.5 <sup>***</sup>
Fresh weight (g/plant) <sup>§</sup>	55.1±7.0	72.5±4.1 <sup>*</sup>	74.7±6.1 <sup>*</sup>	53.6±7.8	63.6±4.0

\*, \*\*, \*\*\* : Significant at 5%, 1% and 0.1% level, respectively.

† : mean ± standar error.

‡ : before high dose gamma radiation (15 days after sowing)

§ : after high dose gamma radiation (60 days after sowing)

#### 라. 고추 종자의 발아와 초기 생육

고추품종의 시판종자에 저선량 감마선을 조사하고 온실 재배하여 생육상황을 관찰한 결과, 조광고추의 경우는 대조구에 비해 별다른 증가효과를 보이지 않았으나(표 4), 조홍고추의 경우 발아율은 4 Gy와 20 Gy 조사구에서 각각 95.5%와 94.8%로 대조구 92.7%에 비해 2~3% 정도 증가하였고 유묘초장은 8 Gy와 20 Gy 조사구에서 대조구 7.59 cm에 비해 4% 정도 증가한 7.85 cm( $p < 0.001$ )와 7.87 cm( $p < 0.001$ )로 유의성있는 증가효과를 보였으며 유묘생체중은 모든 저선량 조사구가 대조구 0.20 g에 비해 8~18% 정도 증가하였는데 특히 20 Gy 조사구에서 0.24 g( $p < 0.01$ )으로 가장 높은 증가효과를 보였다(표 5). 파종 44일 후와 51일 후 관찰한 식물체의 초장과 생체중은 조광고추의 경우 저선량 조사구가 대조구에 비해 대체로 저조한 생육을 보였으나, 조홍고추의 경우는 저선량 조사구에서 뚜렷한 생육 증가효과를 보였다. 조홍고추의 파종 44일 후의 초장은 4 Gy 조사구에서 대조구 38.8 cm에 비해 41.7 cm( $p < 0.001$ )로 7% 정도 증가하였고, 파종 51일 후의 초장은 4 Gy와 20 Gy 조사구에서 대조구 41.8 cm에 비해 44.5 cm( $p < 0.01$ )로 7% 정도 증가하였으며 생체중은 대조구 7.6 g에 비해 모든 저선량 조사구가 10~24% 정도 유의성있는 증가효과를 보였는데 특히 4 Gy 조사구에서 9.3 g( $p < 0.01$ )으로 가장 높은 증가효과를 보였다. Luckey<sup>3)</sup>와 Miller & Miller<sup>6)</sup>는 작물종자에 저선량 방사선 조사시 초기생육촉진과 수량증가 효과를 보고하였고, 김과 이<sup>61)</sup> 및 김 등<sup>68)</sup>이 채소류 등의 종자에 저선량 감마선을 조사하여 발아와 초기생육촉진 효과를 인정하였으나 작물과 품종에 따라 그 효과가 다르다고 하였다. 이 등<sup>62)</sup>은 고추종자에 감마선 1~20 Gy 조사하여 발아율과 초장이 대조구에 비해 크게 증가하였다고 하였으며 Izvorska<sup>69)</sup>는 고추종자에 감마선 조사시 생육촉진과 수량증가 등의 효과가 있었다고 보고하였다. 본 실험에서도 고추종자에 저선량 감마선 조사시 생육촉진효과를 보였는데 품종에 따라 다르게 나타났으며 조홍고추 품종의 발아율과 초기생육이 4, 8, 20 Gy 조사구에서 크게 증가하였다.



**Table 4.** Growth response of pepper(produced in 1996, Jokwang) developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation.

Traits	Irradiation dose (Gy)				
	0	4	8	20	50
Germination rate (%)	88.9±1.6 <sup>†</sup>	89.6±1.7	87.5±1.9	83.3±2.2	81.6±2.3
Seedling height (cm) <sup>‡</sup>	7.48±0.04	7.33±0.04	6.89±0.04	7.47±0.05	7.04±0.05
Seedling fresh weight (g/plant) <sup>‡</sup>	0.23±0.01	0.20±0.01	0.18±0.01	0.23±0.01	0.21±0.01
Plant height (cm) <sup>‡</sup>	41.4±0.6	38.4±0.6	38.5±0.7	37.4±0.7	38.2±0.6
Plant height (cm) <sup>§</sup>	43.5±0.5	40.8±0.5	40.5±0.8	41.0±0.5	37.1±0.6
Fresh weight (g/plant) <sup>§</sup>	8.3±0.3	7.9±0.4	8.7±0.4	7.8±0.4	6.2±0.3

† ; Mean±SE. ‡ ; 18 days after sowing. ‡ ; 44 days after sowing. § ; 51 days after sowing.

**Table 5.** Growth response of pepper (produced in 1999, Johong) developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation.

Traits	Irradiation dose (Gy)				
	0	4	8	20	50
Germination rate (%)	92.7±1.8 <sup>†</sup>	95.5±1.4	92.7±1.4	94.8±1.5	92.7±1.3
Seedling height (cm) <sup>‡</sup>	7.59±0.05	7.44±0.04	7.85±0.05*	7.87±0.07*	7.56±0.07
Seedling fresh weight (g/plant) <sup>‡</sup>	0.20±0.01	0.22±0.01	0.23±0.01*	0.24±0.01**	0.22±0.01*
Plant height (cm) <sup>§</sup>	38.8±0.5	41.7±0.4***	37.2±0.7	39.9±0.8	39.7±0.4
Plant height (cm) <sup>¶</sup>	41.8±0.6	44.5±0.5**	41.6±0.6	44.5±0.7**	42.2±0.7
Fresh weight (g/plant) <sup>¶</sup>	7.6±0.4	9.3±0.5**	8.3±0.4	9.1±0.5**	8.7±0.5*

† ; Mean±SE. ‡ ; 18 days after sowing. § ; 44 days after sowing. ¶ ; 51 days after sowing.

\*, \*\*, \*\*\* : Significant at 5%, 1% and 0.1% level, respectively.

#### 마. 채소종자의 산업체 비교 발아실험

참박종자의 발아율은 발아초기에 저선량 방사선에 의한 효과가 뚜렷하게 나타나 파종 10일 후에 4 Gy에서 대조구 47.8% 보다 20% 증가하여 57.3%를 나타냈으며 최종발아율은 1~3% 정도 증가하였다(그림 4, 5).

흑종호박의 발아율이 거의 모든 선량에서 대조구보다 낮았고 최종발아율 증가효과를 보이지 않았다(그림 6).

발아율이 50% 이하인 인동대목의 경우 최종발아율이 15% 미만이지만 대조구에 비해 저선량 조사구에서 뚜렷한 증가효과를 보였다. 발아 초기단계인 파종 9일 후 발아율은 8 Gy에서 가장 높았고 12일부터는 저선량 조사구의 발아 증가율이 150% 미만으로 낮아졌으며 발아율이 가장 높은 선량은 8 Gy와 16 Gy였다(그림 7).

저선량 조사한 태양고추의 발아율은 뚜렷한 증가효과를 보이지 않았으나 대체로 대조구에 비해 8, 12, 20 Gy에서 2~5% 정도 증가하였다(그림 8).

발아율이 70~80%인 시금치 종자의 경우 발아초기단계에는 저선량 조사구가 대체로 대조구에 비해 낮았으나 발아후기단계에는 1 Gy를 제외한 모든 선량에서 3~5% 정도 증가하였다. 발아율 50% 이하 종자의 발아율은 대조구에 비해 저선량 조사구에서 뚜렷한 증가효과를 보여 발아 초기단계인 파종 8일 후에는 대조구 3.5%에 비해 모든 저선량 조사구에서 6.5~10.5%로 86~200% 증가하였는데 특히 1 Gy가 가장 높았고 파종 9일 후에는 1 Gy와 8 Gy가 13.5%로 대조구 6.5%에 비해 108% 증가하였으며 파종 12일 후부터는 20 Gy가 가장 높은 발아율을 보였다. 최종발아시에는 대조구 17.5%에 비해 모든 저선량 조사구에서 31~249% 정도 증가하였는데 특히 20 Gy에서 61.0%의 발아율을 나타내어 가장 높았다(Fig. 9, 10, 11, 12).

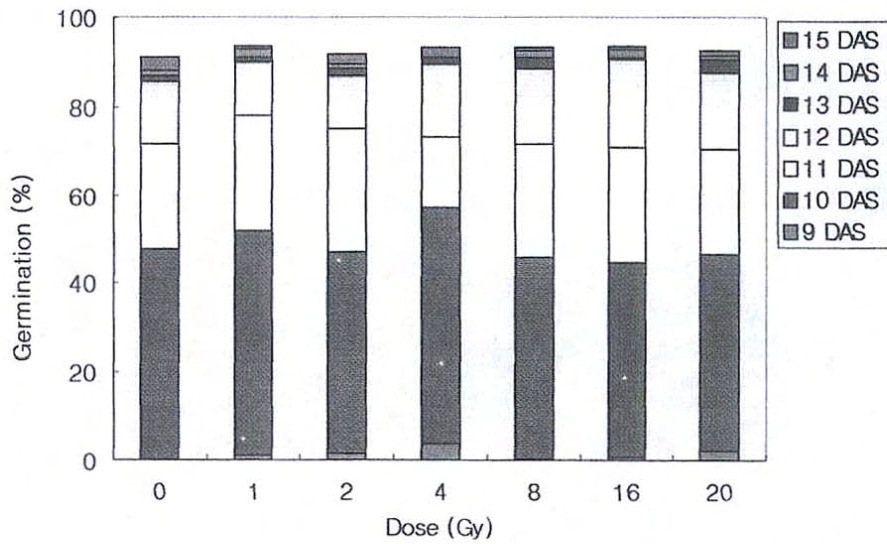


Fig. 4. Germination rate of gourd grown from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. DAS ; days after sowing. This experiment was conducted by Nongwoobio Co. Ltd.

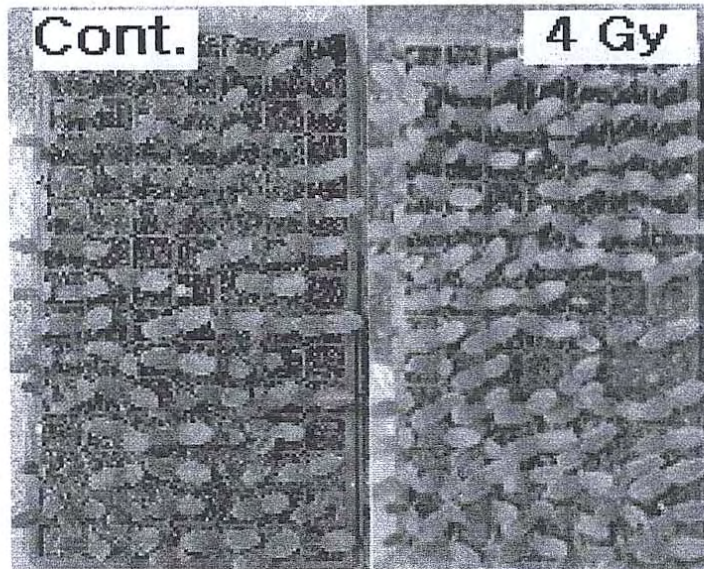


Fig. 5. Growth of gourd grown from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. This experiment was conducted by Nongwoobio Co. Ltd.

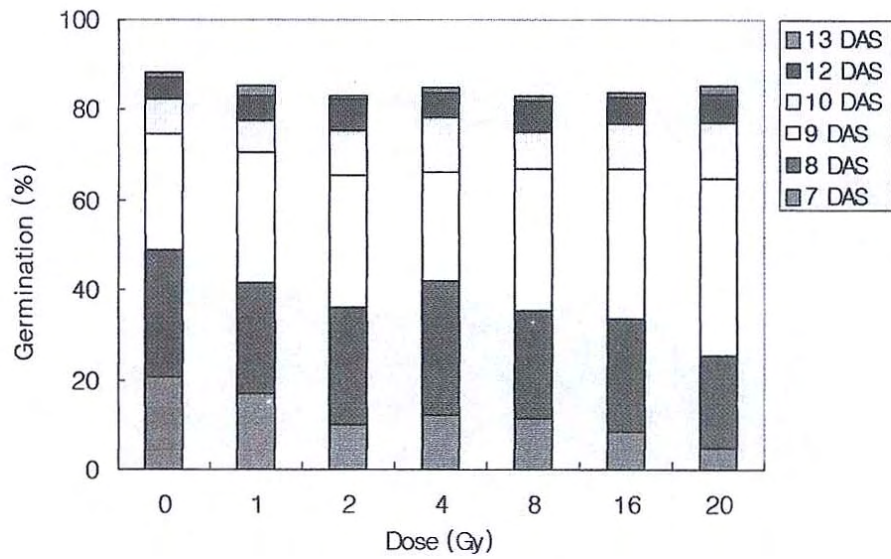


Fig. 6. Germination rate of pumpkin grown from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. DAS : days after sowing. This experiment was conducted by Nongwoobio Co.Ltd.

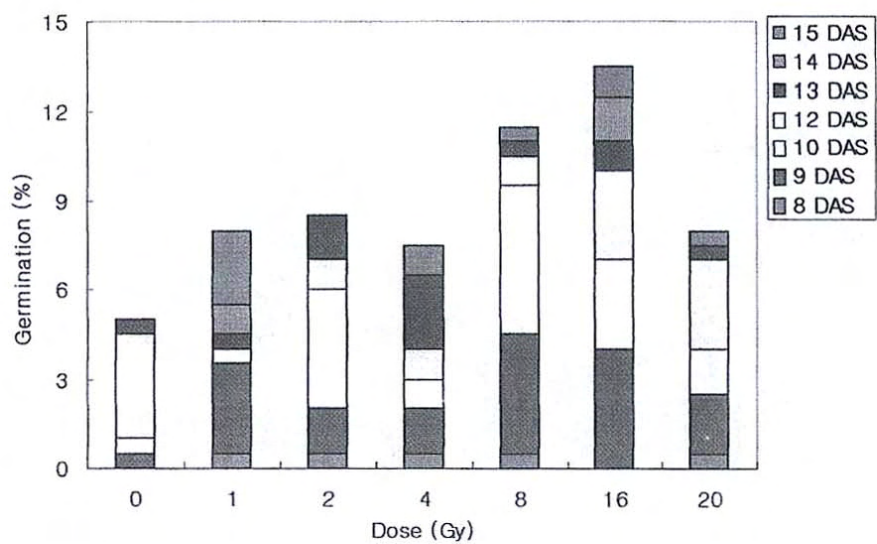


Fig. 7. Germination rate of root stock grown from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. DAS : days after sowing. This experiment was conducted by Nongwoobio Co. Ltd.

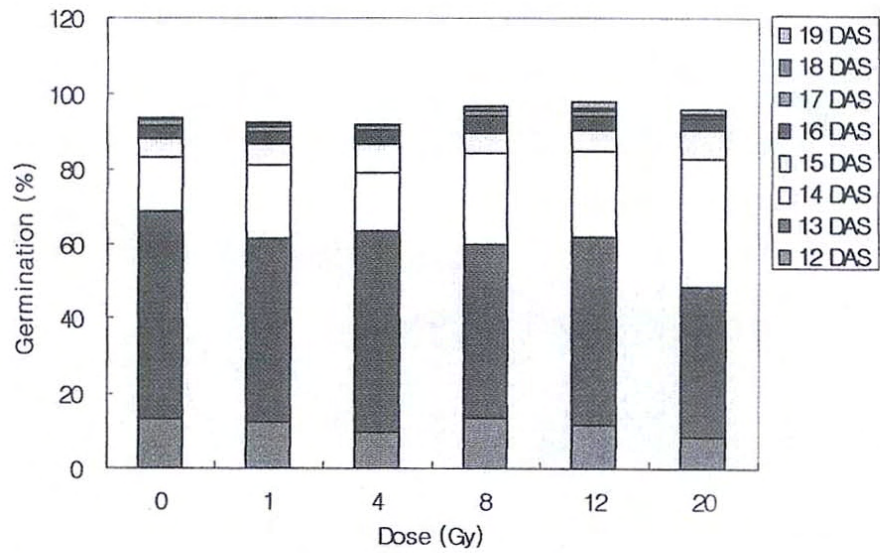


Fig. 8. Germination rate of red pepper grown from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. DAS ; days after sowing. This experiment was conducted by Nongwoobio Co. Ltd.



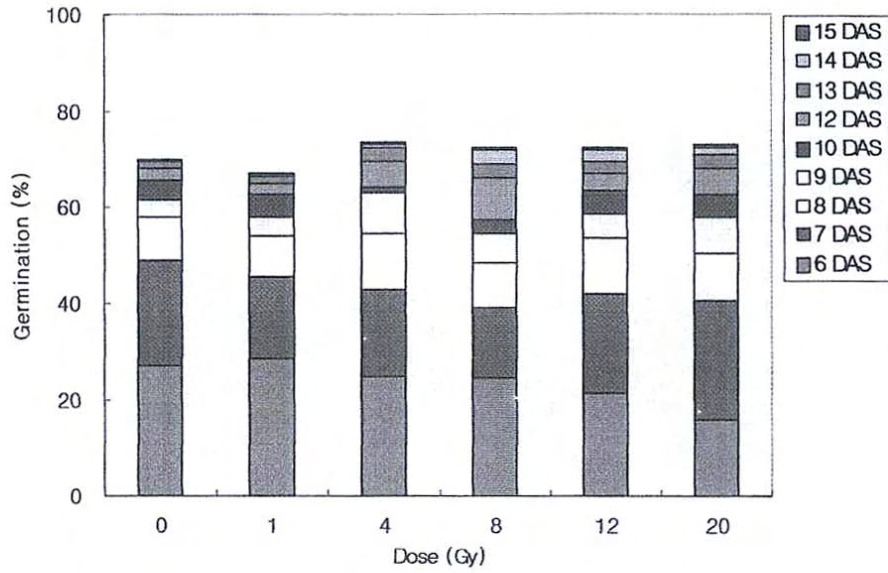


Fig. 9. Germination rate of spinach grown from 70~80% germinative seeds irradiated with different doses of gamma radiation. DAS : days after sowing. This experiment was conducted by Nongwoobio Co. Ltd.

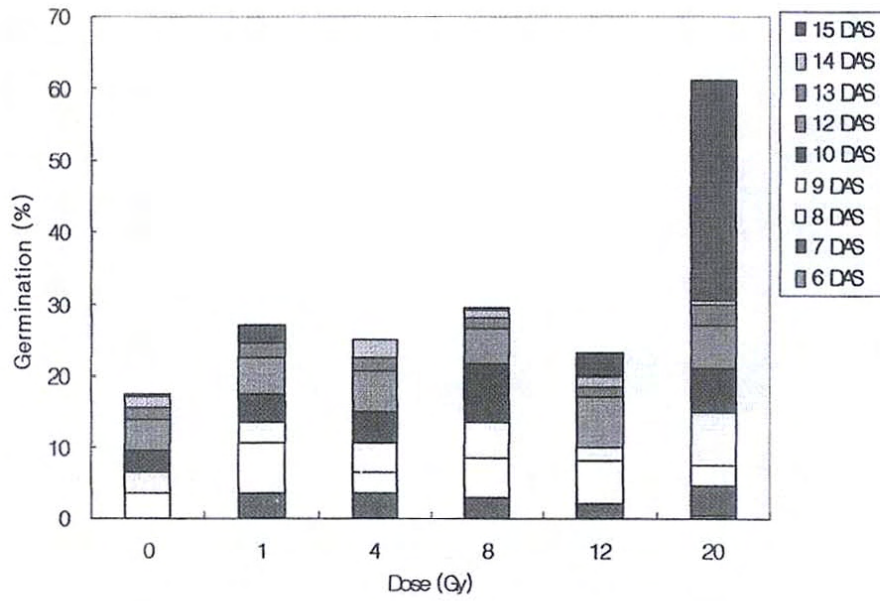


Fig. 10. Germination rate of spinach grown from 50% germinative seeds irradiated with different doses of gamma radiation. DAS ; days after sowing. This experiment was conducted by Nongwoobio Co. Ltd.

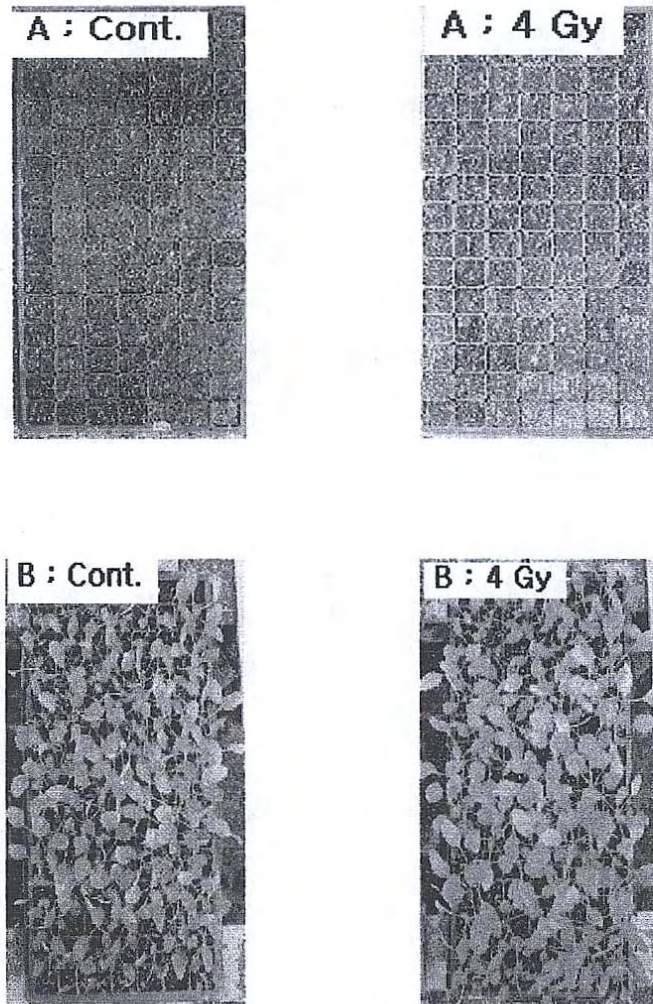


Fig. 11. Growth of spinach grown from 70-80% germinative seeds irradiated with different doses of gamma radiation. This experiment was conducted by Nongwoobio Co. Ltd.

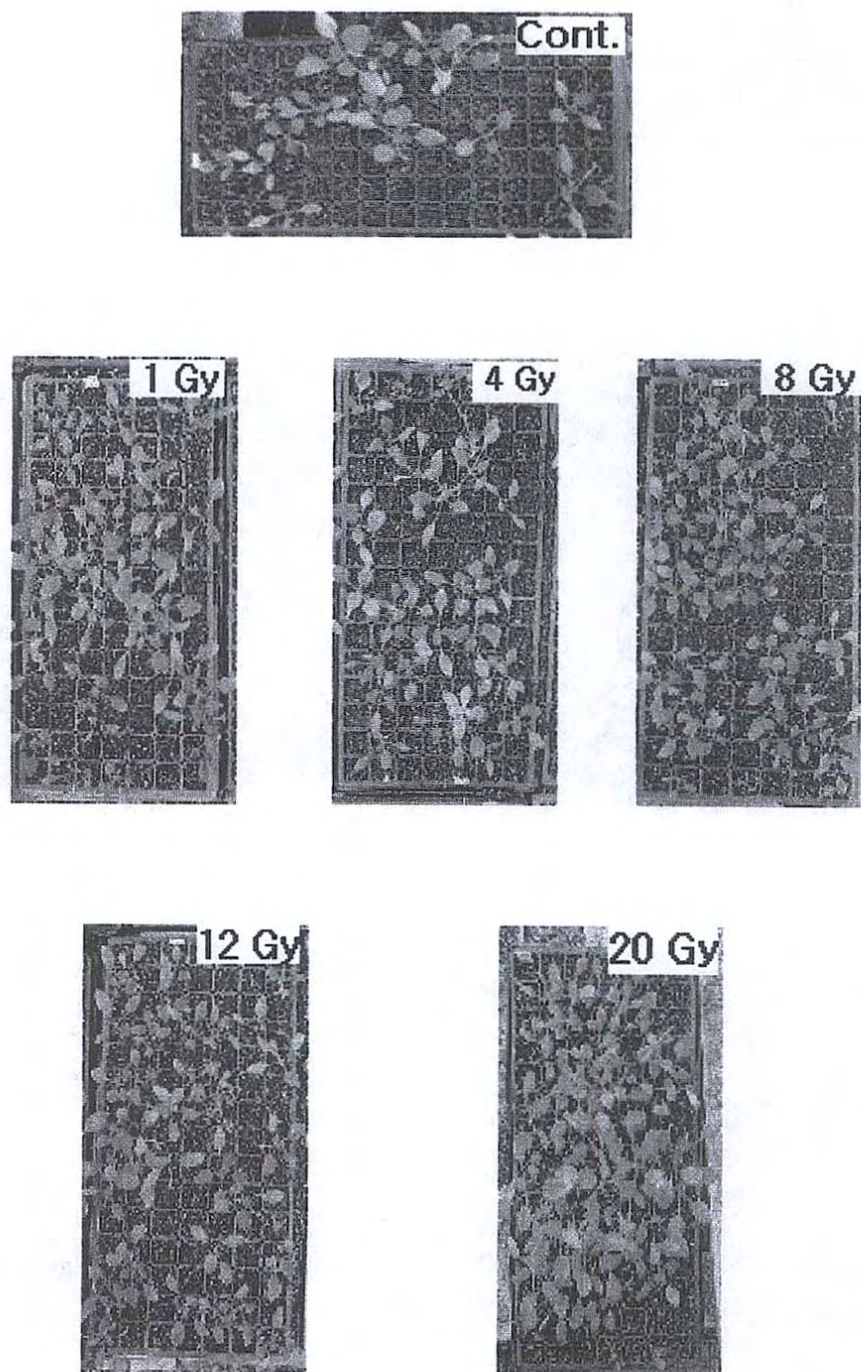


Fig. 12. Growth of spinach grown from 50% germinative seeds irradiated with different doses of gamma radiation. This experiment was conducted by Nongwoobio Co. Ltd.

## 2. 저장기간에 따른 저선량 조사 채소류 종자의 발아와 초기 생육

### 가. 신규 배추 종자와 묵은 배추 종자의 발아와 초기생육

저선량 방사선이 시판중인 배추 신규종자 “만점” 배추와 묵은 종자인 “서림엇갈이” 배추의 초기생육에 미치는 영향을 보고자 저선량 감마선을 조사하여 온실의 소형 pot에 파종하여 파종 10일과 20일 후에 생육상황을 관찰하였다. 신규종자인 만점 배추의 경우는 표 6에서와 같이 발아율은 대조구의 발아율이 98%로 높아 8.0 Gy의 99%와 16.0 Gy의 98%를 제외하고는 저선량 조사구 모두가 대조구보다 다소 낮은 경향을 보여 저선량 방사선에 의한 발아율 증가효과를 볼 수 없었다. 파종 10일 후에 조사한 떡잎의 폭은 저선량 조사구 모두가 대조구의 2.11 cm보다 낮은 값을 보였다. 엽폭에서도 떡잎과 같은 경향이였다. 엽장의 경우는 1.0 Gy와 0.5 Gy 조사구가 각각 5.01 cm와 4.98 cm로 대조구의 4.90 cm보다 다소 증가하였다. 파종 20일 후에 조사한 엽폭은 1.0 Gy 조사구만이 4.80 cm로 대조구의 4.73 cm보다 높고 나머지 조사구는 모두 낮았다. 엽장의 경우는 1.0 Gy와 4.0 Gy 조사구가 각각 9.90 cm와 9.64 cm로 높은 통계적 유의성 있는( $p < 0.01$ ) 증가효과를 보였고 0.5 Gy 조사구에서도 9.43 cm로 대조구의 9.26 cm보다 높은 생육을 보였다. 유식물체 생체중에서는 1.0 Gy 조사구만이 3.46 g으로 대조구의 3.28 g보다 높았고 나머지 조사구에서는 모두 낮은 생체중을 보여 신규종자에서는 저선량 감마선 조사에 의한 발아율과 초기생육에서 뚜렷한 증가효과를 볼 수 없었으나 다만 감마선 1.0 Gy 조사구가 초기생육을 다소 촉진하는 효과를 보여주었다. 묵은 종자인 서림엇갈이 배추(표 7)에서는 만점 배추와는 다르게 저선량 조사에 의한 뚜렷한 효과를 보여주었다. 발아율의 경우 84%을 보인 8.0 Gy 조사구를 제외한 저선량 조사구 모두가 대조구 85% 보다 다소 높은 발아율을 보였는데 2.0 Gy 조사구가 89%로 가장 높았으나 통계적 유의성은 없었다. 파종 10일 후의 떡잎의 폭은 대조구 2.18 cm에 비해 2.27 cm를 보인 0.5 Gy( $p < 0.01$ )와 2.0 Gy( $p < 0.05$ ) 조사구가 높은 통계적 유의성 있는 생육증가를 보였고 다음이 1.0 Gy 조사구의 2.25 cm( $p < 0.05$ )였으나 저선량 조사구 중 높은 수준인 12.0 Gy 이상 조사구에서는 대조구보다 낮은 값을 보였다. 엽폭에서는 20.0 Gy 조사구를 제외한 전체 저선량 조사구가 대조구의 2.35 cm보다 높아 통계적으로 유의성 있는 생육증가 효과를 보였는데 8.0 Gy 조사구가 2.61 cm( $p < 0.001$ )로 가장 높은 11% 정도 증가효과를 보였고 다음이 2.0 Gy 조사구의 2.57 cm( $p < 0.001$ )였다. 엽장에서도 엽폭과 비슷한 경향으로 20.0 Gy 조사구를 제외한 전체 조사구에서 대조구 3.97 cm보다 높은

값을 보였고 2.0 Gy 조사구의 4.67 cm( $p < 0.001$ )와 8.0 Gy 조사구의 4.65 cm ( $p < 0.001$ )가 고도의 유의성 있는 18% 정도의 증가효과를 나타내었다. 파종 20일 후의 생육조사에서도 20.0 Gy 조사구만을 제외한 저선량 조사구 전체가 대조구보다 양호한 생육양상을 보였다. 엽폭의 경우 대조구의 4.24 cm에 비해 1.0 Gy와 2.0 Gy 조사구가 4.68 cm로 10%이상의 고도의 유의성 있는 ( $p < 0.001$ ) 증가효과를 보였고 다음이 12.0 Gy 조사구의 4.62 cm( $p < 0.001$ )와 0.5 Gy 조사구의 4.57 cm( $p < 0.001$ ) 순이었다. 엽장에서도 엽폭과 같은 경향을 보였는데 1.0 Gy 조사구가 9.08 cm로 대조구의 7.96 cm보다 고도의 유의성 있는( $p < 0.001$ ) 가장 높은 14%의 생육증가를 보였고 2.0 Gy와 12.0 Gy 조사구가 각각 8.97 cm( $p < 0.001$ )와 8.66 cm( $p < 0.001$ )로 다음순이었다. 유식물체 생체 중에서도 유사한 경향으로 2.66 g의 1.0 Gy 조사구가 2.29 g의 대조구에 비해 16% 정도 유의성 있는( $p < 0.001$ ) 증가효과를 보였고 다음이 12.0 Gy 조사구의 2.64 g( $p < 0.001$ )과 2.0 Gy 조사구의 2.53 g( $p < 0.01$ ) 순이었다. 이상의 결과로 볼 때 저선량 감마선 조사가 배추종자의 발아와 초기생육에 미치는 효과는 신규종자에서는 별효과가 없었으나 묵은 종자에서는 발아와 초기생육을 상당히 촉진하는 효과를 보였다. 김<sup>70)</sup> 과 Luckey<sup>3)</sup>는 저선량 방사선 조사에 의한 채소종자의 발아율과 초기생육 촉진 및 성장증대에 관해 종합 고찰하였고, Kuzin<sup>71)</sup>은 배추종자에 5.0~10.0 Gy의 X선을 조사하여 발아와 생육촉진 및 20% 이상의 수량증가 효과를 보고하였다. 김 등<sup>72)</sup>은 시판중인 몇 가지 배추와 무의 종자에 저선량 감마선을 조사하여 0.2~4.0 Gy 범위에서 발아와 초장 등이 증가하였으나 품종에 따라 적정선량이 다르다고 하였다. 이 등<sup>73, 62)</sup>은 고추와 파종자에 저선량 감마선을 조사하여 발아율과 초기생육을 조사한 보고에서 신규종자보다도 묵은 종자에서 그 효과가 뚜렷하였다. 본 실험에서도 신규종자인 만점 배추에서는 1.0 Gy를 제외하고는 저선량 효과는 미미하였으나 묵은 서림엇같이 배추에서는 저선량에 의한 발아율과 초기생육 촉진효과를 보여 주었고 감마선 1.0 Gy와 2.0 Gy가 가장 효과적이었다.

**Table 6.** Early growth of Chinese cabbage grown from seeds(produced in 1998, cv. Manjeom) irradiated with different doses of gamma radiation.

Dose (Gy)	Germination rate (%)	10 DAS			20 DAS		
		Cotyledon width	Leaf width (cm)	Leaf length	Leaf width (cm)	Leaf length	Fresh weight (g/plant)
0	98	2.11†	2.57	4.90	4.73	9.26	3.28
0.5	96	2.08	2.54	4.98	4.67	9.43	3.20
1.0	95	2.04	2.53	5.01	4.80	9.90**	3.46
2.0	94	2.03	2.54	4.76	4.53	9.14	3.18
4.0	90	2.00	2.46	4.61	4.77	9.64**	3.24
8.0	99	2.04	2.50	4.86	4.47	9.26	3.01
12.0	97	1.99	2.47	4.67	4.44	8.86	2.86
16.0	98	1.95	2.38	4.27	4.36	8.61	2.56
20.0	97	1.99	2.27	4.19	4.37	8.95	2.71

DAS ; days after sowing. † ; Figure represents mean of 30 plants.

\*\* ; Significant at 1% level.

**Table 7.** Early growth of Chinese cabbage grown from seeds(produced in 1994,cv. Sulim eockari) irradiated with different doses of gamma radiation.

Dose (Gy)	Germination rate (%)	10 DAS			20 DAS		
		Cotyledon width	Leaf width	Leaf length	Leaf width	Leaf length	Fresh weight (g/plant)
		(cm)			(cm)		
0	85	2.18†	2.35	3.97	4.24	7.96	2.29
0.5	85	2.27**	2.42	4.25**	4.57***	8.51***	2.51
1.0	86	2.25*	2.55***	4.55***	4.68***	9.08***	2.66***
2.0	89	2.27*	2.57***	4.67***	4.68***	8.97***	2.53**
4.0	85	2.21	2.50**	4.52***	4.44*	8.56***	2.43
8.0	84	2.21	2.61***	4.65***	4.43*	8.46**	2.41
12.0	86	2.13	2.42	4.30**	4.62***	8.66***	2.64***
16.0	87	2.13	2.47**	4.43***	4.35	8.42**	2.31
20.0	87	2.02	2.15	3.85	4.03	7.68	1.92

DAS : days after sowing. † : Figure represents mean of 30 plants.

\*, \*\*, \*\*\* : Significant at 5%, 1% and 0.1% level, respectively.



#### 나. 목은 참박 종자의 발아와 초기 생육

저선량 방사선에 의한 식물 자극촉진 규명의 일환으로 목은 참박의 폐기 종자에 저선량 감마선을 조사하여 온실에서 조사한 발아율은 표 8에서 보는 바와 같이 시험한 세 품종 모두 발아율이 저조하였다. 품종 Patner의 경우 세 품종중에서 가장 높은 발아율을 보였는데 8 Gy 조사구만이 68.3%로 대조구의 63.3%에 비해 5% 정도 높은 반면 나머지 저선량 조사구 모두가 대조구보다 낮은 발아율을 보여 방사선에 의해 발아율이 억제되는 경향을 보였다. Support 품종과 FR용자에서는 저선량 조사에 의한 발아율 증가효과가 대부분의 저선량 조사구에서 나타났는데, Support의 경우 2 Gy 조사구가 66.7%로 대조구의 41.7%에 비해 통계적으로 높은 유의성있는( $p < 0.01$ ) 증가효과를 보였고 다음이 0.5 Gy 와 16 Gy 조사구의 55.0% 순이었다. FR용자에서도 대조구가 30.0%로 매우 낮은 발아율이었는데 4 Gy 조사구에서 53.3%로 통계적으로 유의성있는( $p < 0.05$ ) 증가를 보였고, 다음이 2 Gy와 12 Gy 조사구의 43.3% 였다(표 8). 파종 35일 후에 조사한 유효초장의 경우 세품종 모두 거의 모든 저선량 조사구에서 대조구에 비해 양호한 생육을 보였다(표 9). Patner의 경우 30 Gy 조사구만이 14.2 cm로 대조구의 14.9 cm보다 낮은 초장을 보였으나 16 Gy, 12 Gy, 20 Gy 조사구에서는 각각 19.3 cm, 19.2 cm, 18.8 cm로 통계적으로 고도의 유의성있는( $p < 0.001$ ) 초기생육 촉진효과를 보였다. Support 품종에서는 저선량 조사구 모두가 대조구 17.1 cm에 비해 높은 초장을 보였는데 20 Gy 조사구가 22.6 cm로 가장 높았고 다음이 2 Gy와 16Gy의 22.5 cm와 0.5 Gy의 20.9 cm 순으로 통계적으로 고도의 유의성 있는( $p < 0.001$ ) 증가효과를 나타내었다. FR용자의 초장에서도 저선량 조사구 모두가 대조구 15.2 cm에 비해 높았는데 1 Gy 조사구가 22.0 cm( $p < 0.001$ )로 가장 높았고, 다음이 30 Gy 조사구의 20.9 cm( $p < 0.001$ )와 0.5 Gy와 4 Gy 조사구의 19.8 cm( $p < 0.01$ ) 순으로 통계적으로 유의성있는 초장증가를 보여주었다.

유효의 생체중에서도 저선량 조사구가 세 품종 모두에서 대조구보다 높은 값을 보였다. Patner 품종에서는 대조구 2.7 g에 비해 16 Gy 조사구가 4.5 g( $p < 0.01$ )으로 가장 높았으며 다음이 12 Gy와 20 Gy 조사구가 4.3 g ( $p < 0.001$ ) 순이였고, Support 품종에서는 20 Gy와 16 Gy 조사구가 각각 4.6 g ( $p < 0.001$ )과 4.5 g( $p < 0.01$ )으로 대조구의 3.0 g에 비해 유의성있는 증가를 보였다. FR용자에서는 대조구의 3.6 g에 비해 1 Gy와 2Gy 조사구가 각각 5.7 g과 5.1 g으로 높은 증가를 보였으나 통계적으로 유의성은 없었다.

참박의 줄기직경에서도 저선량 조사에 의해 대체로 증가하는 경향을 보였

는데, Patner 품종에서는 4 Gy와 12 Gy 및 20 Gy 조사구가 모두 3.8 mm로 대조구의 3.3 mm에 비해 유의성있는 성장증가를 보였고 1 Gy와 8 Gy 조사구가 3.7 mm로 다음순이었다. Support 품종에서는 4 Gy와 16 Gy 조사구가 4.0 mm로 가장 높았고 다음이 0.5 Gy 조사구가 3.9 mm로 대조구의 3.7 mm에 비해 높았으나 통계적 유의성은 없었다. FR용자에서는 대조구의 3.7 mm에 비해 1 Gy 조사구가 5.1 mm로 통계적으로 높은 유의성있는 증가효과를 보였고( $p < 0.01$ ), 다음이 4 Gy와 30 Gy 조사구가 4.8 mm로 유의성있는 증가를 나타내었다( $p < 0.05$ ). 이상의 결과로 볼 때 저선량에 의한 참박의 생육효과는 품종에 따라 다른 경향을 보였는데 종자발아율의 경우는 2 Gy와 8 Gy에서 효과가 있었고 초기생육은 Patner와 Support 품종에서는 4 Gy, 16 Gy, 20 Gy가 FR용자에서는 1 Gy가 효과적이었다.

김<sup>70)</sup>과 Luckey<sup>3)</sup>는 저선량 방사선 조사에 의한 채소종자의 발아율과 초기 생육 촉진 및 성장증대에 관해 종합 고찰하였고, Kuzin<sup>32)</sup>은 배추종자에 5~10 Gy의 X선을 조사하여 발아와 생육촉진 및 20% 이상의 수량증가 효과를 보고하였다. 김 등<sup>72)</sup>은 시판중인 몇 가지 배추와 무의 종자에 저선량 감마선을 조사하여 0.2~4 Gy 범위에서 발아와 초장 등이 증가하였으나 품종에 따라 적정선량이 다르다고 하였다. 이 등<sup>62,73)</sup>은 고추와 파종자에 저선량 감마선을 조사하여 발아율과 초기생육을 조사한 보고에서 신규종자보다도 묵은 종자에서 그 효과가 뚜렷하였다.

**Table 8.** Germination rate of gourd developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation in the pot experiment.

Dose (Gy)	0	0.5	1	2	4	8	12	16	20	30
Partner	63.3±1.7	55.0±12.6	56.7±4.4	48.3±4.4	53.3±6.0	68.3±1.7	40.0±8.7	46.7±6.7	46.7±14.2	55.0±11.5
Support	41.7±6.0	55.0±2.9	48.3±15.9	66.7*±3.3	46.7±10.9	41.7±1.7	33.3±10.9	55.0±7.6	45.0±10.0	41.7±12.0
FR Yongja	30.0±5.0	35.0±5.0	36.7±4.4	43.3±6.0	53.3'±6.0	36.7±6.0	43.3±13.0	38.3±4.4	23.3±1.7	38.3±7.3

† : Figure represents the mean and the standard error of 3 repetitions.

\*, \*\* : Significant at 5% and 1% level, respectively.

**Table 9.** Growth response of gourd developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation in the pot experiment.

Dose (Gy)	Seedling height (cm)			Fresh weight (g/plant)			Stem diameter (mm)		
	Partner	Support	FR Yongja	Partner	Support	FR Yongja	Partner	Support	FR Yongja
0	14.9±0.4 <sup>†</sup>	17.1±0.5	15.2±0.7	2.7±0.2	3.0±0.2	3.6±0.6	3.3±0.1	3.7±0.2	3.7±0.3
0.5	16.5 <sup>**</sup> ±0.3	20.9 <sup>***</sup> ±0.6	19.8 <sup>**</sup> ±1.2	3.2 <sup>†</sup> ±0.2	4.1 <sup>**</sup> ±0.2	4.9±0.7	3.3±0.2	3.9±0.2	4.3±0.3
1	17.9 <sup>***</sup> ±0.5	20.2 <sup>***</sup> ±0.5	22.0 <sup>***</sup> ±0.9	3.7 <sup>**</sup> ±0.2	3.8 <sup>†</sup> ±0.2	5.7±1.4	3.7 <sup>†</sup> ±0.1	3.8±0.2	5.1 <sup>**</sup> ±0.0
2	18.2 <sup>***</sup> ±0.4	22.5 <sup>***</sup> ±0.5	19.5 <sup>†</sup> ±1.9	3.9 <sup>***</sup> ±0.2	4.3 <sup>†</sup> ±0.5	5.1±1.0	3.5±0.2	3.8±0.3	4.5±0.4
4	16.4 <sup>†</sup> ±0.7	19.9 <sup>***</sup> ±0.3	19.8 <sup>***</sup> ±0.5	3.2±0.2	3.7 <sup>†</sup> ±0.2	4.7±0.4	3.8 <sup>**</sup> ±0.1	4.0±0.1	4.8 <sup>**</sup> ±0.2
8	18.0 <sup>***</sup> ±0.3	17.7±0.5	15.7±1.6	3.8 <sup>**</sup> ±0.3	3.5±0.2	3.8±1.1	3.7 <sup>†</sup> ±0.2	3.3±0.2	4.6±0.5
12	19.2 <sup>***</sup> ±0.4	20.3 <sup>***</sup> ±0.6	17.6 <sup>†</sup> ±1.0	4.3 <sup>***</sup> ±0.3	3.7 <sup>†</sup> ±0.3	3.9±0.6	3.8 <sup>†</sup> ±0.2	3.5±0.1	4.4 <sup>†</sup> ±0.3
16	19.3 <sup>***</sup> ±0.5	22.5 <sup>***</sup> ±0.5	19.2 <sup>†</sup> ±1.7	4.5 <sup>**</sup> ±0.5	4.5 <sup>†</sup> ±0.4	4.5±1.3	3.5±0.2	4.0±0.2	4.2±0.4
20	18.8 <sup>***</sup> ±0.3	22.6 <sup>***</sup> ±0.7	17.8±2.3	4.3 <sup>***</sup> ±0.3	4.6 <sup>***</sup> ±0.3	3.6±1.1	3.8 <sup>†</sup> ±0.2	3.8±0.1	4.4±0.4
30	14.2±2.3	19.6 <sup>**</sup> ±0.6	20.9 <sup>***</sup> ±1.1	4.2±1.3	3.4±0.2	4.8±1.0	3.5±0.4	3.5±0.2	4.8 <sup>†</sup> ±0.3

<sup>†</sup> ; Figure represents the mean and the standard error of 30 plants.

\*, \*\*, \*\*\* ; Significant at 5%, 1% and 0.1% level, respectively.

#### 다. 묵은 배추와 무 종자의 발아와 초기생육

저선량 방사선이 한여름배추와 청수궁중무 묵은 종자의 발아에 미치는 효과를 보고자 저선량 감마선을 조사한 종자를 incubator에서 발아시켜 한여름배추는 발아개시일로부터 6일 동안, 청수궁중무는 4일 동안의 발아율과 초기생육을 조사하였다.

한여름배추의 발아율은 최종발아율 관찰 시(파종 후 9일)엔 대조구 54.6%에 비해 2 Gy와 8 Gy 조사구에서 각각 60.5%와 56.8%로 4~11% 정도 증가하였는데 특히 발아개시일(파종 후 4일)에는 2 Gy, 6 Gy, 8 Gy 조사구에서 대조구 9.5%에 비해 각각 13.3%, 12.0%, 12.2%로 26~39% 정도, 파종 5일 후에는 4 Gy, 10 Gy, 50 Gy 조사구에서 대조구 24.0%에 비해 26.4%, 33.0%, 31.4%로 10~38% 정도 증가하여 저선량 조사에 의해 초기발아가 촉진됨을 알 수 있었고, 파종 6일 후에는 8 Gy 조사구가 가장 높은 51.3%의 발아율로 대조구에 비해 32% 정도 증가하였다(그림 13).

청수궁중무의 최종발아율(파종 후 6일)은 모든 저선량 조사구에서 대조구 25.8%에 비해 증가하였는데 특히 2 Gy, 6 Gy, 10 Gy 조사구에서 각각 35.1%, 36.5%, 32.2%로 25~41% 정도 증가하였다. 또한 발아개시일(파종 후 3일)에도 모든 저선량 조사구가 대조구 14.0%에 비해 발아율이 증가하였는데 특히 2 Gy, 6 Gy, 10 Gy 조사구에서 각각 22.9%, 22.1%, 23.2%로 51~65% 정도 증가하였고 파종 4일 후에도 대조구 21.9%에 비해 2 Gy, 6 Gy, 10 Gy 조사구에서 37~45% 정도 증가하였다(그림 14).

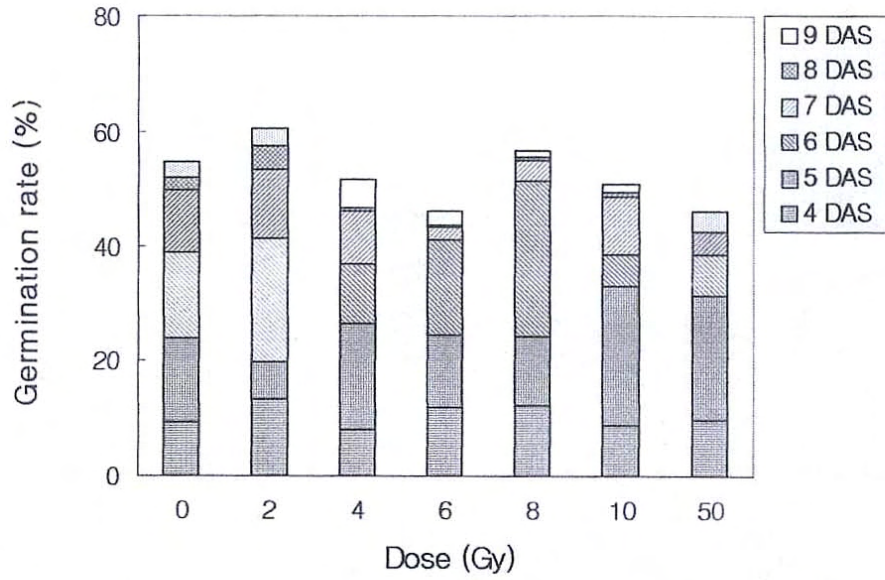


Fig. 13. Germination rate of Chinese cabbage grown from seeds(harvested in 1993, cv. Hanyoreum) irradiated with different doses of gamma radiation. DAS ; days after sowing.

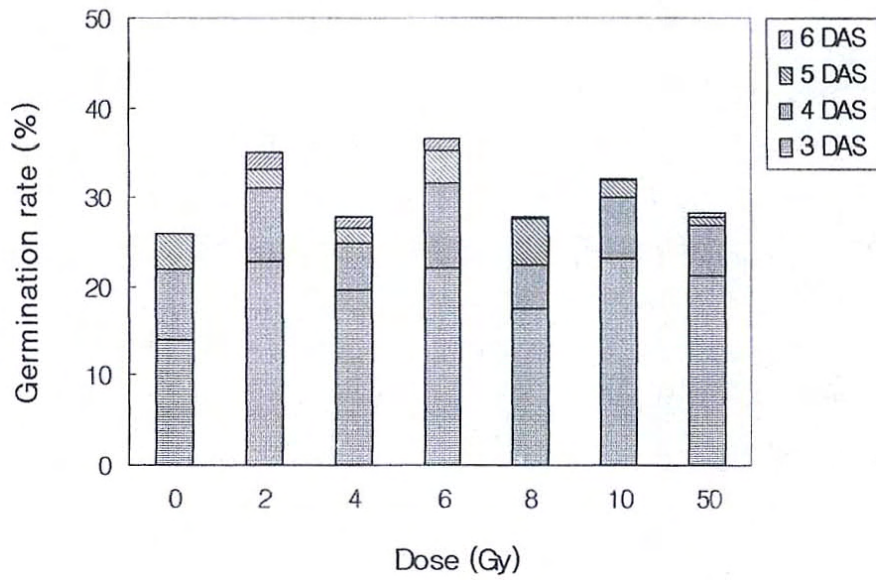
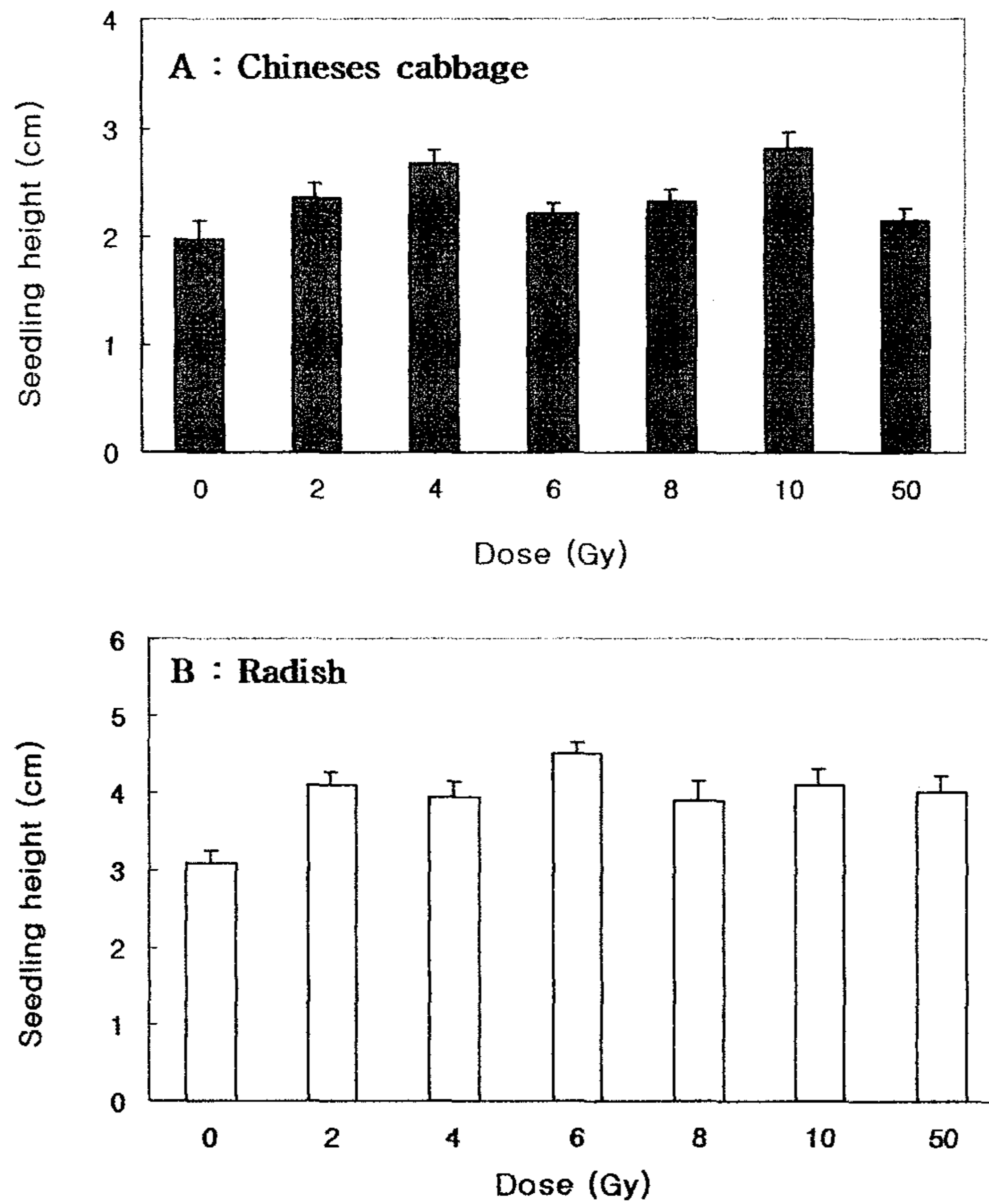


Fig. 14. Germination rate of radish grown from seeds(harvested in 1995, cv. Chung sukoungzoung) irradiated with different doses of gamma radiation. DAS ; days after sowing.

발아조사 마지막날에 조사한 한여름배추(파종 후 9일)와 청수궁중무(파종 후 6일)의 유묘초장은, 한여름배추의 경우 모든 저선량 조사구에서 대조구 1.96 cm에 비해 13~43% 정도 증가하였는데 특히 2 Gy, 4 Gy, 8 Gy, 10 Gy 조사구에서 각각 2.35 cm( $p<0.01$ ), 2.67 cm( $p<0.01$ ), 2.31 cm( $p<0.05$ ), 2.83 cm( $p<0.001$ )로 유의성있는 촉진효과를 보였다(그림 15A). 청수궁중무의 유묘초장도 한여름배추와 같이 모든 저선량 조사구에서 뚜렷한 증가로 대조구 3.07 cm에 비해 27~47% 정도 증가하였는데 특히 2 Gy, 6 Gy, 10 Gy 조사구에서 각각 4.09 cm( $p<0.001$ ), 4.50 cm( $p<0.001$ ), 4.10 cm( $p<0.001$ )로 매우 유의성있는 초기생육 촉진효과를 보였다(그림 15B).

이상의 결과로 묵은 배추와 무 종자에 저선량 감마선 조사시 발아율과 유묘초장이 증가됨을 알 수 있었는데 특히 발아율이 낮은 청수궁중무에서 그 효과가 뚜렷하게 나타났고 비교적 낮은 선량에서 초기발아가 촉진되었다. 김과 이<sup>61)</sup> 및 Luckey<sup>3)</sup>는 저선량 방사선에 의해 채소 종자의 발아율과 초기생육 촉진 및 성장증대에 대해 종합적으로 고찰하였고, Kuzin 등<sup>71)</sup>은 배추종자에 5~10 Gy의 X선 조사시 발아와 생육촉진 및 수량증가 효과를 보고하였다. 김 등<sup>74,75)</sup>은 배추의 시판 신규종자와 묵은 종자에 저선량 감마선 조사시 발아율이 10% 정도 증가하였으나 품종과 저장기간에 따라 적정선량이 다르다고 하였고, Pal<sup>64)</sup>은 무 종자에 10 Gy의 감마선 조사시 발아와 성장촉진 효과를 얻었다고 발표하였다. 이 등<sup>62)</sup>은 저선량 방사선 조사한 고추의 신규종자와 묵은 종자의 발아 실험에서 비교적 낮은 선량에서 초기 발아가 향상되었고 그 효과는 묵은 종자에서 높았다고 보고하였다. 이에 본 실험에서도 저선량 감마선 조사가 묵은 채소 종자 발아율 향상과 생육촉진 등에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며 이에 대한 적정선량은 2~10 Gy인 것으로 나타났다. 그러나 그 촉진기작은 앞으로 밝혀져야 할 것이다.





**Fig. 15.** Growth of seedlings from Chinese cabbage and radish seed irradiated with different doses of gamma radiation. Data represents mean $\pm$ SE. A ;harvested in 1993, cv. Hanyoreum. B ; harvested in 1995, cv. Chungsukoungzoung.

#### 라. 묵은 고추 종자의 발아와 초기 생육

저선량 방사선이 묵은 고추종자의 발아에 미치는 영향을 알아보기 위해 종묘회사와 생산년도가 다른 두 품종을 선정하여 저선량 감마선을 조사한 종자를 incubator에서 발아시켜 발아개시일로부터 6일 동안 발아율을 관찰한 결과는 그림 16과 같다. 발아개시일(파종 6일 후)에 조사한 조광고추 품종의 발아율은 2 Gy 조사구를 제외한 모든 선량에서 대조구가 8.0%인데 비하여  $0 \sim 49\%$  증가하였는데, 특히 4 Gy 조사구에서 12.0%로 가장 높았다. 홍광고추 품종의 경우는 4 Gy 조사구를 제외한 모든 선량에서 증가하였고 특히, 2 Gy와 8 Gy 조사구에서 대조구 1.9%에 비해 4.2%로 118% 증가하였다. 파종 7일 후에는 홍광고추 품종에 비해 조광고추 품종이 뚜렷한 발아 촉진 효과를 보였는데, 조광고추 품종의 경우는 4 Gy 조사구에서 대조구 37.8%에 비해 65.7%로 74% 증가하였으며, 홍광고추 품종은 8 Gy 조사구에서 대조구 10.3%에 비해 11.4%로 11% 증가하였다. 파종 8일 후의 발아율은 조광고추 품종은 4 Gy 조사구에서 대조구 58.4%에 비해 36% 증가한 79.6%를 나타냈으며, 홍광고추 품종의 경우는 대조구 24.5%에 비해 8 Gy 조사구에서 3% 증가하여 25.3%를 나타냈다. 또한 파종 9일 후 발아율에서는 조광고추 품종은 4 Gy 조사구에서 대조구 70.0%에 비해 84.1%로 20% 증가하였으며, 홍광고추 품종은 8 Gy 조사구에서 대조구 32.3%에 비해 10% 증가하였다. 저선량 방사선에 의한 고추의 발아율 관찰 시 파종 9일 후부터는 대조구에 비해 저선량 조사구에서 뚜렷한 증가효과가 없었으며, 최종 발아율 조사일인 파종 후 12일에는 조광고추 품종은 4 Gy 조사구에서, 홍광고추 품종은 8 Gy 조사구에서 각각 대조구 88.5%와 45.1%에 비해 3%와 6% 증가한 91.5%와 47.9%를 나타내어 발아후기보다 발아초기에 저선량 방사선에 의한 발아 촉진 효과가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다.

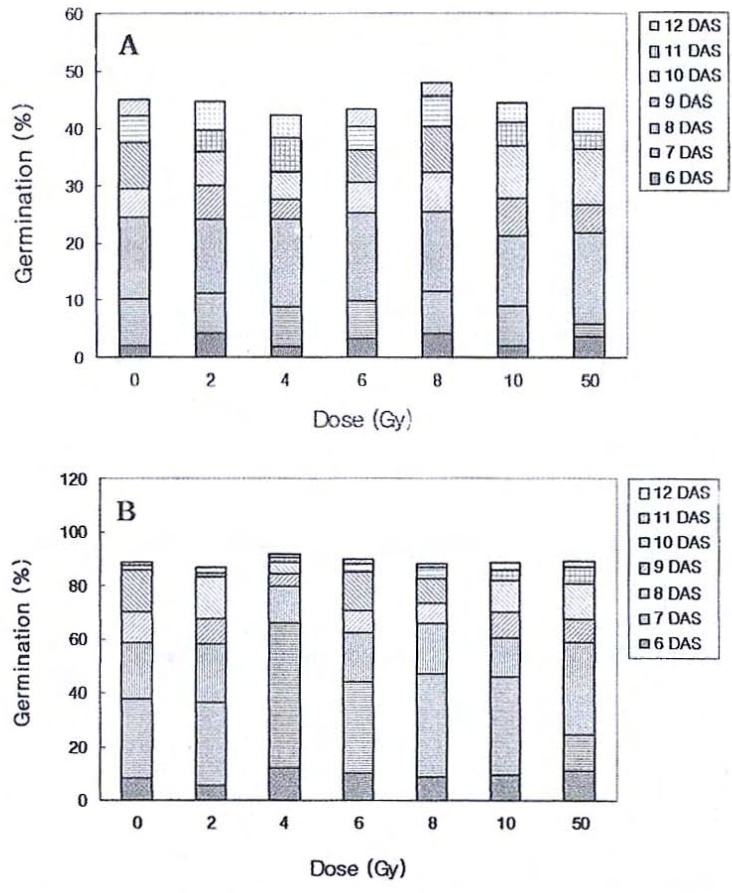
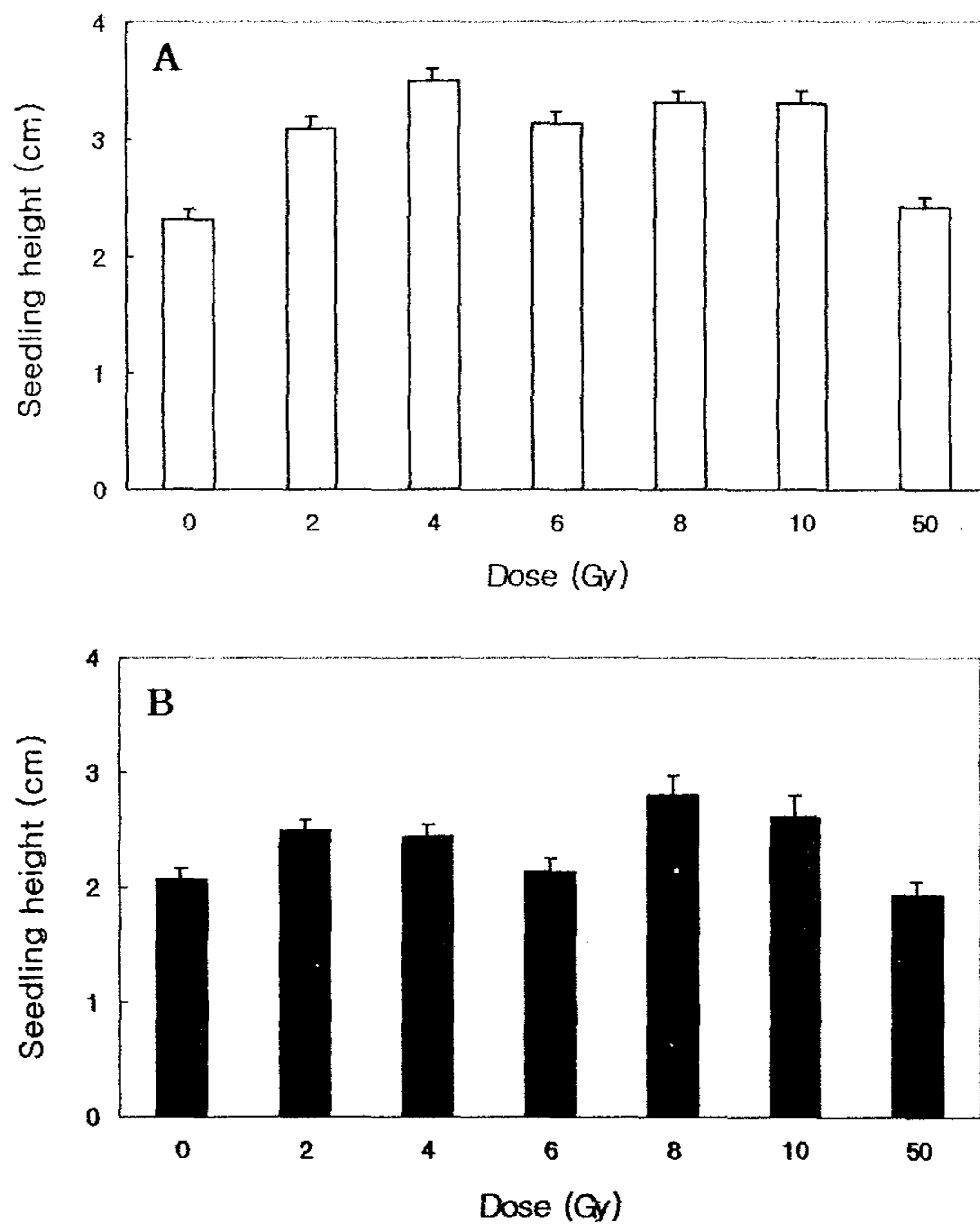


Fig. 16. Germination rate of red pepper seed irradiated with different doses of gamma radiation. A ; produced in 1996, cv. Jokwang. B; produced in 1997, cv. Hongkwang. DAS ; days after sowing.

최종 발아 관찰 시 고추의 유묘초장을 측정한 결과는 그림 17과 같다. 조광고추 품종의 경우는 대조구 2.31 cm에 비해 4% 정도 증가한 50 Gy 조사구를 제외하곤 모든 저선량 조사구에서 고도의 유의성있는 증가효과를 보였다. 특히, 초기발아율에서 뚜렷한 증가효과를 보인 4 Gy조사구에서 3.50 cm ( $p<0.001$ )로 52% 증가하였으며, 다음으로 8 Gy, 10 Gy, 6 Gy, 2 Gy 조사구 순으로 각각 33.2 cm( $p<0.001$ ), 3.30 cm( $p<0.001$ ), 3.14 cm( $p<0.001$ ), 3.10 cm( $p<0.001$ )로 34~43% 증가하였다. 홍광고추 품종의 경우에도 50 Gy 조사구를 제외한 거의 모든 선량에서 증가효과를 보였다. 초기발아율이 높았던 8 Gy 조사구에서 대조구 2.06 cm에 비해 2.80 cm( $p<0.001$ )로 36% 증가하였고, 다음으로 10 Gy, 2 Gy, 4 Gy 조사구 순으로 각각 2.61 cm( $p<0.01$ ), 2.50 cm( $p<0.01$ ), 2.44 cm( $p<0.01$ )로 18~27% 증가하였다.

이상의 결과로 묵은 고추종자에 저선량 감마선 조사시 발아율과 유묘초장이 증가됨을 알 수 있었는데 그 효과는 품종과 생산년도에 따라 다르게 나타났다. 김 등<sup>76,75)</sup>은 배추 시판종자에 저선량 감마선을 조사한 결과 발아율이 10% 정도 증가하였으나 품종과 저장기간에 따라 적정선량이 다르다고 보고한 바 있다. 또한 김 과 이<sup>61)</sup> 및 Luckey<sup>3)</sup>는 저선량 방사선에 의해 채소종자의 발아율과 초기생육 촉진 및 생장증대 효과에 대해 종합적으로 고찰하였고, 이 등<sup>62,77)</sup>은 고추와 파 종자에 저선량 감마선을 조사하여 발아율과 초기생육을 조사한 보고에서 신규 종자보다 묵은 종자에서 그 효과가 뚜렷하다고 하였는데, 본 실험에서도 3년 저장한 종자보다 4년 저장한 종자에서 저선량 감마선에 의한 효과가 뚜렷함을 확인할 수 있었다. 또한 이 등<sup>62)</sup>은 저선량 방사선 조사한 고추의 발아실험 시 비교적 낮은 선량에서 초기발아가 향상되었다고 보고하였다. 이에 본 실험에서도 저선량 감마선 조사에 의해 묵은 고추종자 발아율 향상에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 발아율 향상을 위한 적정선량은 4 Gy와 8 Gy인 것으로 나타났다.



**Fig. 17.** Seedling height of red pepper at 12 days after sowing. Seeds were irradiated with different doses of gamma radiation. A ; produced in 1996, cv. Jokwang. B ; produced in 1997, cv. Hongkwang. Data represent mean±SE.

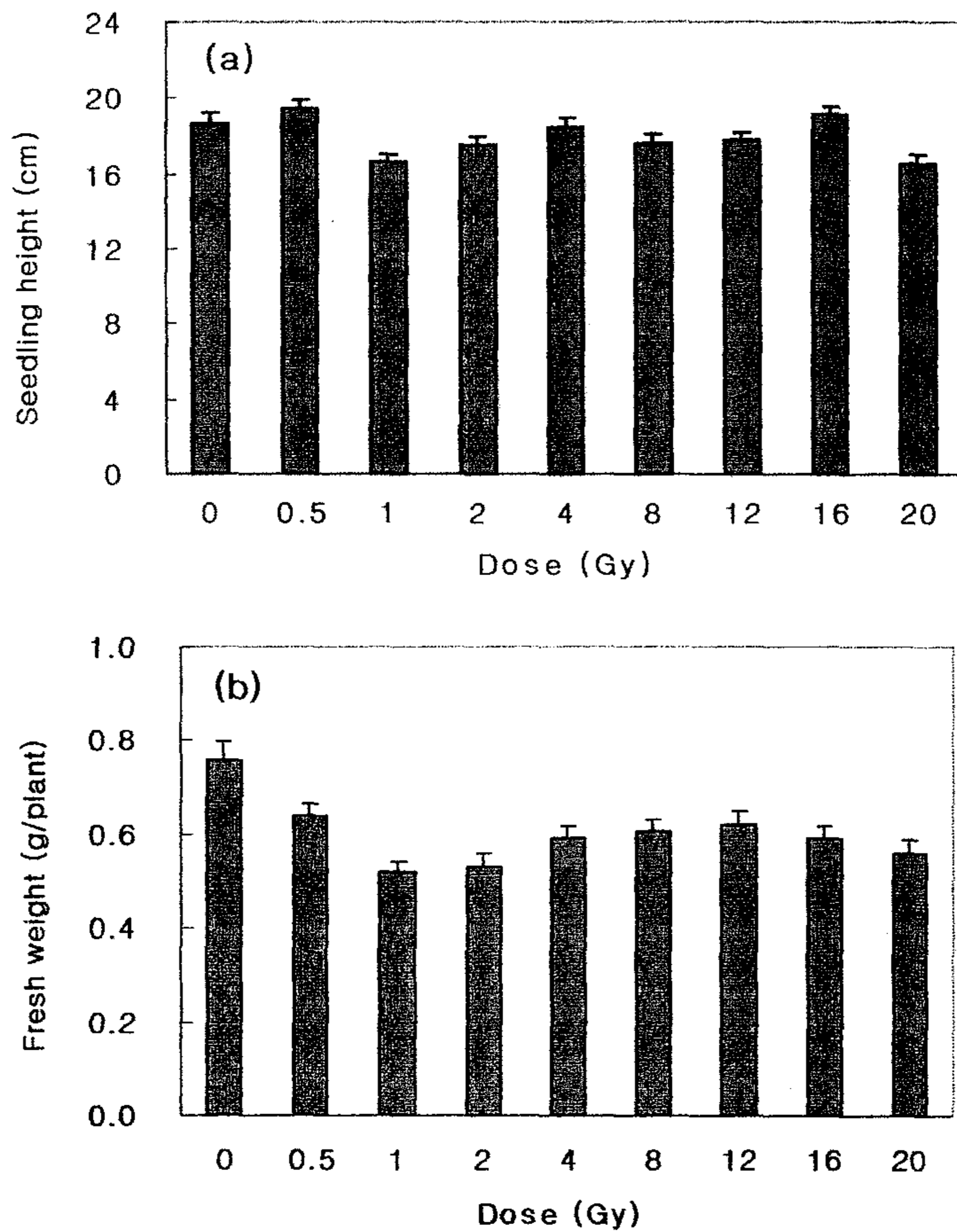
### 3. 저선량 조사한 작물의 포장생육과 수량

#### 가. 신규 흑미 종자와 묵은 종자의 포장생육과 수량

흑미종자 파종 40일 후 관찰한 유묘의 초기생육은 다음과 같다. 신규종자의 경우는 유묘초장과 생체중에서 별다른 증가를 보이지 않았으나(그림 18a, b), 1년 저장한 묵은 종자의 경우는 유묘초장은 1~20 Gy 수준에서 3~9%, 생체중은 1~17% 증가하였는데 그 중 1 Gy와 16 Gy에서 가장 높은 증가를 보였다(그림 19a, b).

포장에서 생육시킨 후 10월 10일에 후기생육을 비교하였다. 신규종자의 경우, 초장은 0.5 Gy와 8 Gy에서만 대조구 84.5 cm에 비해 85.8 cm와 86.3 cm로 2% 정도 증가하였고 간장은 0.5 Gy와 8~20 Gy 수준에서 2% 정도 증가하였다. 또한 분얼수에서는 효과가 뚜렷하여 모든 저선량 조사구에서 3~12% 증가하였는데 그중 4 Gy가 가장 높았다(표 10). 묵은 종자의 초장은 1, 2, 16, 20 Gy에서 대조구 81.4 cm에 비해 3~4% 증가하였고 간장은 4~5% 증가하였으며 분얼수도 2~11% 증가하였는데 그중 1 Gy의 생육이 가장 높았다. 건물중은 16 Gy와 20 Gy에서만 3~4% 증가하였다(표 11).

수확기에 건조 탈곡한 후 수확하여 주당 수량으로 환산한 결과는 다음과 같다. 신규종자의 경우는 0.5, 1, 12, 20 Gy에서 대조구 37.0 g에 비해 3~9% 증가하였는데 그중 0.5 Gy가 40.3 g으로 가장 높았다(그림 20). 그에 반해 묵은종자는 수량이 2 Gy에서만 42.5 g으로 대조구 41.5 g에 비해 2% 증가하였다(그림 21).



**Fig.18.** Early growth of Heckmi developed from seeds(harvested in 1999) irradiated with different doses of gamma radiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors. a ; seedling height, b ; fresh weight.

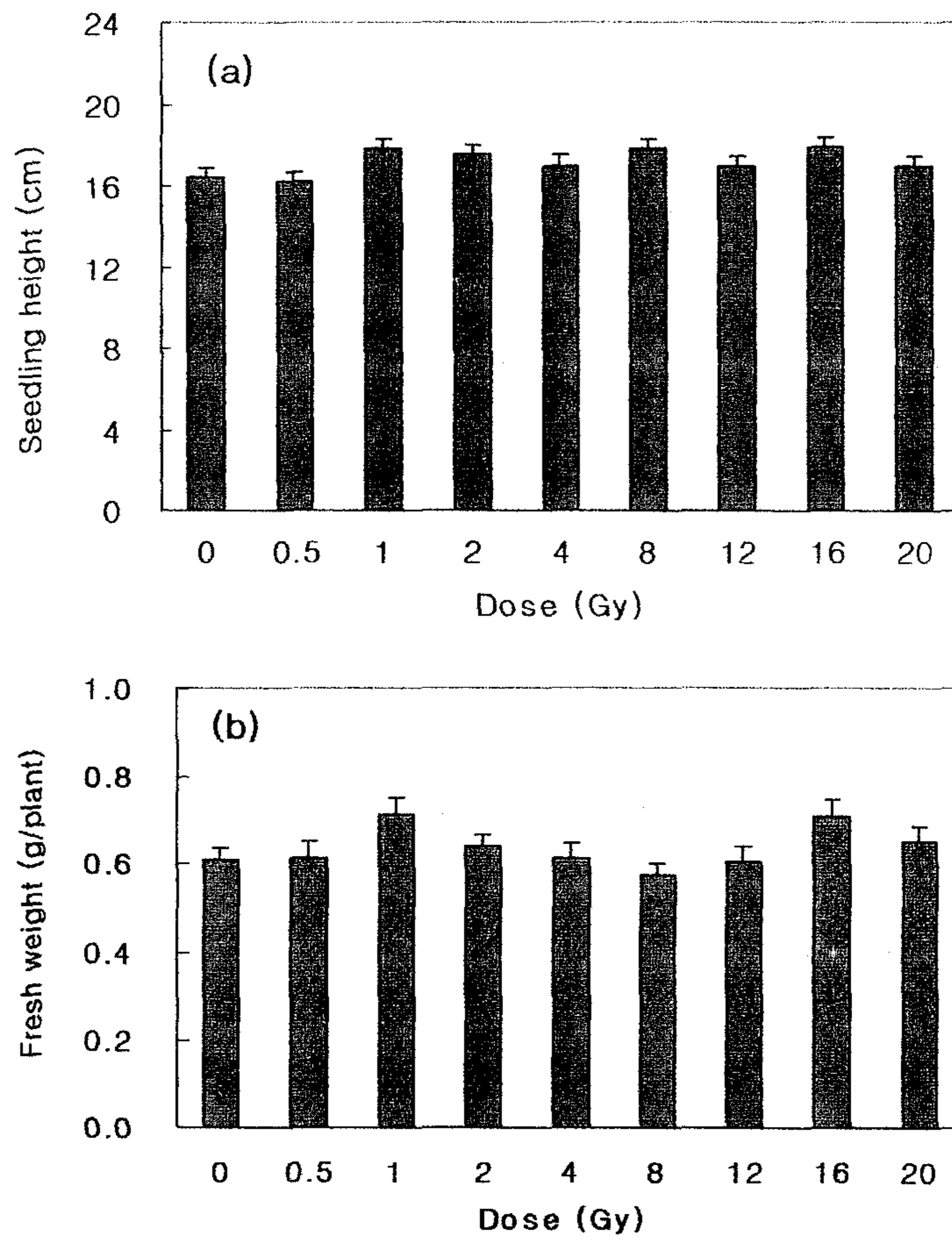


Fig.19. Early growth of Heckmi developed from seeds(harvested in 1998) irradiated with different doses of gamma radiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors. a ; seedling height, b ; fresh weight.



**Table.10.** Growth response of Heckmi developed from seeds(harvested in 1999) irradiated with different doses of gamma radiation.

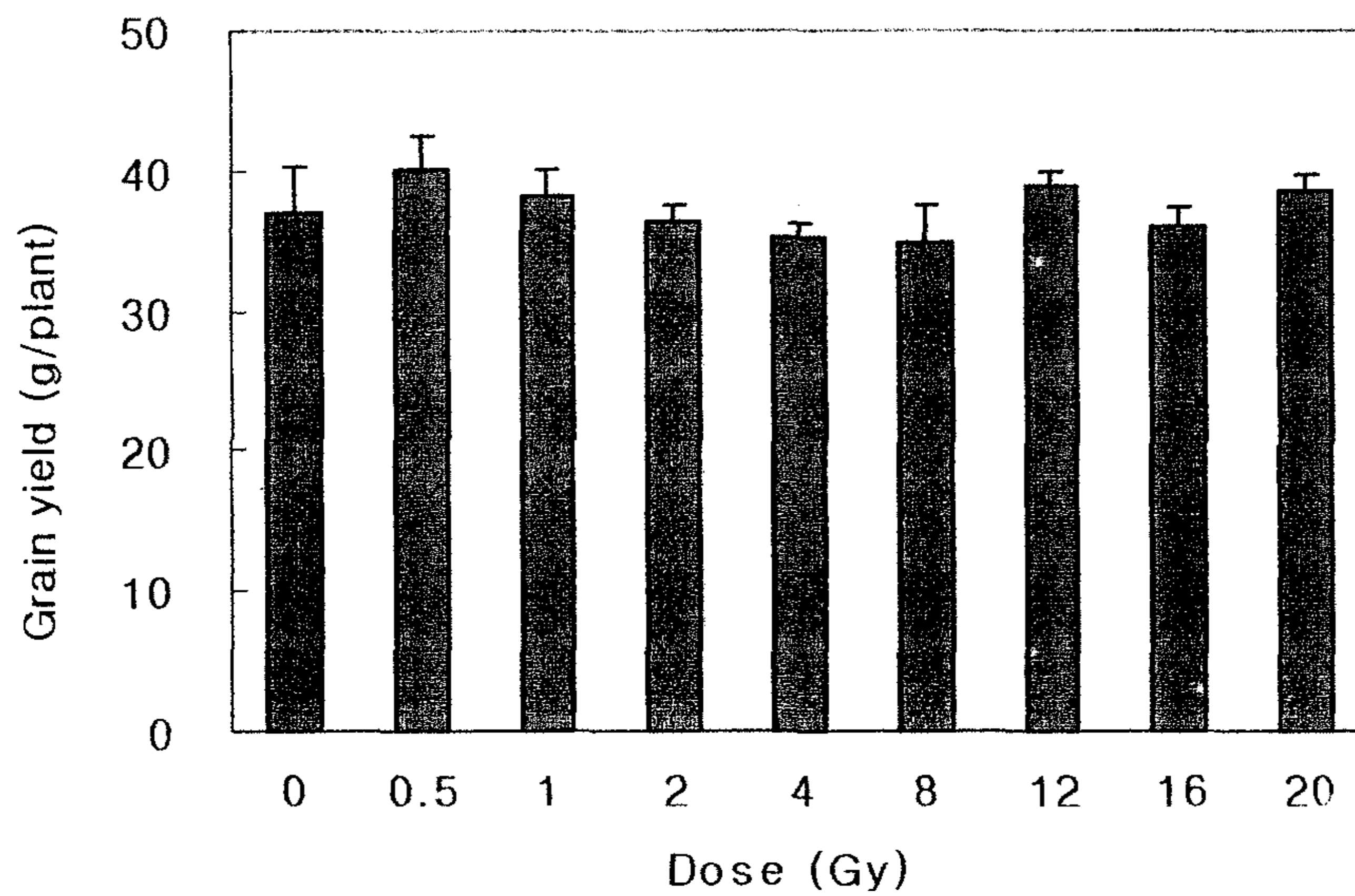
Dose (Gy)	Plant height (cm)	Culm length (cm)	No. of tillers	Panicle length (cm)	No. of panicles	Dry weight (g)
0	84.5±0.9 <sup>†</sup>	64.1±0.8	26.1±0.7	20.6±0.2	13.3±0.4	91.6±2.3
0.5	85.8±0.7	65.3±0.7	28.0±0.7	20.3±0.4	13.3±0.2	96.6±7.2
1	84.8±0.6	64.9±0.6	26.8±0.9	20.2±0.2	12.0±0.6	98.7±3.8
2	84.2±0.8	64.4±0.9	27.3±0.9	20.8±0.2	12.5±0.2	98.1±4.9
4	85.0±0.9	65.0±0.7	29.1±0.8	20.7±0.2	12.0±0.4	93.3±1.7
8	86.3±0.6	65.7±0.7	29.0±0.6	20.2±0.2	12.7±0.7	92.8±2.4
12	85.7±0.6	65.1±0.6	27.3±0.7	20.3±0.3	12.5±0.3	97.8±2.9
16	85.3±0.7	65.5±0.6	28.4±0.7	20.8±0.2	12.5±0.4	98.8±2.0
20	84.7±0.8	65.2±0.6	28.9±0.8	20.8±0.3	12.2±0.3	93.8±2.9

† : mean±SE.

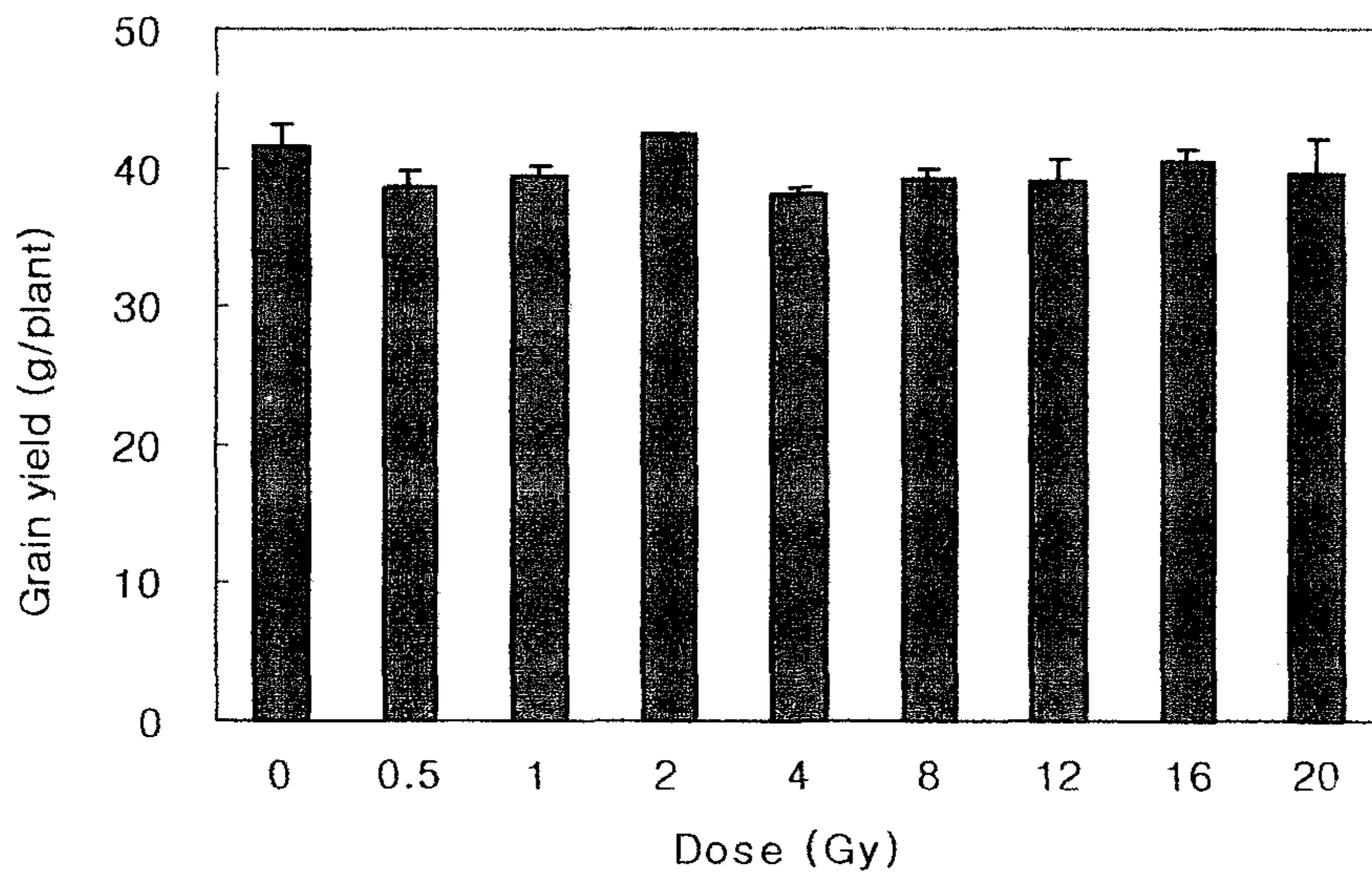
**Table.11.** Growth response of Heckmi developed from seeds(harvested in 1998) irradiated with different doses of gamma radiation.

Dose (Gy)	Plant height (cm)	Culm length (cm)	No. of tillers	Panicle length (cm)	No. of panicles	Dry weight (g)
0	81.4±0.9 <sup>†</sup>	61.4±1.0	26.6±1.1	20.6±0.2	13.3±0.3	91.9±0.9
0.5	81.8±0.9	61.5±0.8	27.9±1.0	20.9±0.2	11.7±0.3	82.5±3.5
1	84.5±0.7	64.7±0.7	29.5±0.8	20.9±0.3	11.8±0.5	91.2±1.5
2	84.6±0.8	64.6±0.6	27.2±1.0	21.2±0.3	13.0±0.3	93.0±1.8
4	80.3±0.8	60.8±0.7	27.6±1.0	20.9±0.3	12.2±0.2	89.2±3.3
8	79.8±0.9	60.3±0.8	27.2±0.8	20.7±0.2	12.7±0.6	88.5±4.3
12	82.0±0.8	62.2±0.7	26.0±0.8	20.6±0.2	12.3±0.3	88.3±4.2
16	84.8±0.9	64.1±0.9	28.2±0.7	20.7±0.3	12.5±0.5	95.1±2.1
20	83.5±0.7	62.7±0.7	27.2±0.9	21.0±0.3	12.3±0.3	95.7±2.9

† : mean±SE.



**Fig. 20.** Grain yield of Heckmi developed from seeds(harvested in 1999) irradiated with different doses of gamma radiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors.



**Fig. 21.** Grain yield of Heckmi developed from seeds(harvested in 1998) irradiated with different doses of gamma radiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors.

#### 나. 연도별 흑미종자의 포장생육과 수량

포장에서 생육시킨 후 9월 24일에 후기생육을 비교하였다. 1998년 종자의 경우, 초장은 대조구 82.1 cm에 비해 20 Gy에서만 5% 증가한 85.8 cm를 보였고 간장은 모든 저선량 조사구에서 대조구 61.3 cm에 비해 3~8% 증가하였는데 그중 20 Gy가 가장 높아 66.4 cm를 나타냈다. 또한 분얼수는 대조구 21.8 cm에 비해 모든 저선량조사구에서 5~43% 증가하였으며 이삭수도 2~16 Gy에서 6~17% 증가하였다(표 12). 1999년 종자의 경우는 초장과 간장은 별다른 증가를 보이지 않았으며 분얼수는 0.5, 1, 12, 16 Gy에서 대조구 28.6개에 비해 4~7% 증가하였는데 그 중 8 Gy가 가장 높았다. 또한 건물중에서는 0.5 Gy와 8 Gy에서 97.6 g으로 대조구 91.7 g에 비해 6% 증가하였다(표 13). 2000년 종자의 포장생육은 1998년과 1999년 종자에 비해 뚜렷한 증가를 보이지 않았다(표 14).

수확기에 건조 탈곡한 후 수확하여 주당 수량으로 환산한 결과는 다음과 같다. 1998년 종자 수량의 경우 0.5 Gy와 12 Gy를 제외하곤 증가하는 경향을 보였는데 그 중 20 Gy가 가장 높아 대조구 38.3 g에 비해 55.0 g을 나타내었다. 1999년 종자의 수량은 1 Gy가 53.3 g으로 대조구 42.5 g에 비해 가장 높았다(그림 22).

**Table. 12.** Growth response of Heckmi developed from seeds(harvested in 1998) irradiated with different doses of gamma radiation.

Dose (Gy)	Plant height (cm)	Culm length (cm)	No. of tillers	Panicle length (cm)	No. of panicles	Dry weight (g)
0	82.1±1.1 <sup>†</sup>	61.3±1.2	21.8±1.6	20.7±1.8	21.8±1.6	88.3±4.4
0.5	83.1±1.1	63.7±1.0	22.9±0.9	19.3±0.7	21.6±1.6	90.0±0.1
1	82.4±1.1	63.5±1.0	25.6±0.9	18.9±1.0	21.3±1.0	80.0±3.8
2	79.7±0.7	63.2±0.8	25.7±1.2	16.6±1.1	25.6±1.7	81.3±6.3
4	83.2±1.2	63.7±0.7	25.0±0.9	19.5±1.3	23.2±1.2	81.7±3.3
8	83.3±0.9	65.9±0.7	23.7±0.7	17.4±1.1	23.0±0.8	85.0±3.8
12	80.8±1.7	63.6±1.8	31.2±2.8	17.2±2.6	24.8±1.8	55.0±0.1
16	82.2±1.4	63.4±1.5	28.4±1.7	18.8±0.2	24.6±0.9	100.8±6.5
20	85.8±0.8	66.4±1.5	29.2±3.5	19.4±0.9	18.8±0.7	95.0±0.1

† : mean±SE.

**Table. 13.** Growth response of Heckmi developed from seeds(harvested in 1999) irradiated with different doses of gamma radiation.

Dose (Gy)	Plant height (cm)	Culm length (cm)	No. of tillers	Panicle length (cm)	No. of panicles	Dry weight (g)
0	82.8±1.0 <sup>†</sup>	62.7±0.7	24.1±0.9	20.1±0.5	23.5±1.0	91.7±2.2
0.5	83.5±0.9	63.7±0.9	26.1±1.0	19.7±0.6	22.5±1.2	97.5±1.4
1	83.1±0.8	63.5±0.7	26.1±1.2	19.6±0.3	23.9±1.9	96.7±4.4
2	82.2±0.8	61.9±0.7	22.9±0.8	20.3±0.6	20.5±0.9	89.2±0.8
4	83.7±0.7	63.7±0.7	23.3±1.2	20.1±0.7	18.9±1.4	93.3±3.0
8	83.0±0.8	63.9±0.8	23.1±1.2	19.1±0.9	23.1±1.0	97.5±1.4
12	83.7±0.8	63.6±0.6	25.7±1.0	20.1±0.6	22.8±1.0	95.8±2.2
16	81.3±0.9	61.9±0.9	24.9±0.9	19.4±0.4	20.5±1.1	91.7±4.2
20	80.5±0.9	62.0±0.9	23.6±1.2	18.5±0.3	22.3±0.9	90.0±6.3

† : mean±SE.

**Table. 14.** Growth response of Heckmi developed from seeds(harvested in 2000) irradiated with different doses of gamma radiation.

Dose (Gy)	Plant height (cm)	Culm length (cm)	No. of tillers	Panicle length (cm)	No. of panicles	Dry weight (g)
0	84.1±1.0 <sup>†</sup>	65.6±1.3	28.6±2.3	18.5±1.3	26.1±2.6	116.3±23.8
0.5	82.7±0.7	62.9±0.8	21.7±0.9	19.7±0.3	18.7±0.9	92.0±2.9
1	84.2±1.0	64.9±1.1	22.3±1.4	19.3±0.5	19.4±1.1	91.7±3.3
2	81.1±0.8	62.0±0.9	23.1±1.6	19.1±0.3	20.3±1.0	90.8±3.0
4	82.6±0.7	63.1±0.8	24.1±1.0	19.5±0.3	20.8±0.7	91.7±3.3
8	84.1±0.7	64.9±1.1	23.1±1.2	19.2±0.8	20.7±0.8	82.5±2.5
12	82.9±1.2	63.0±1.0	22.7±0.8	19.2±0.4	20.6±1.1	88.3±3.3
16	82.3±1.1	63.0±1.0	22.9±1.2	19.2±0.4	19.9±1.0	90.8±10.8
20	83.7±0.8	64.1±0.9	19.7±0.6	19.2±0.4	20.1±1.2	89.2±3.3

† : mean±SE.



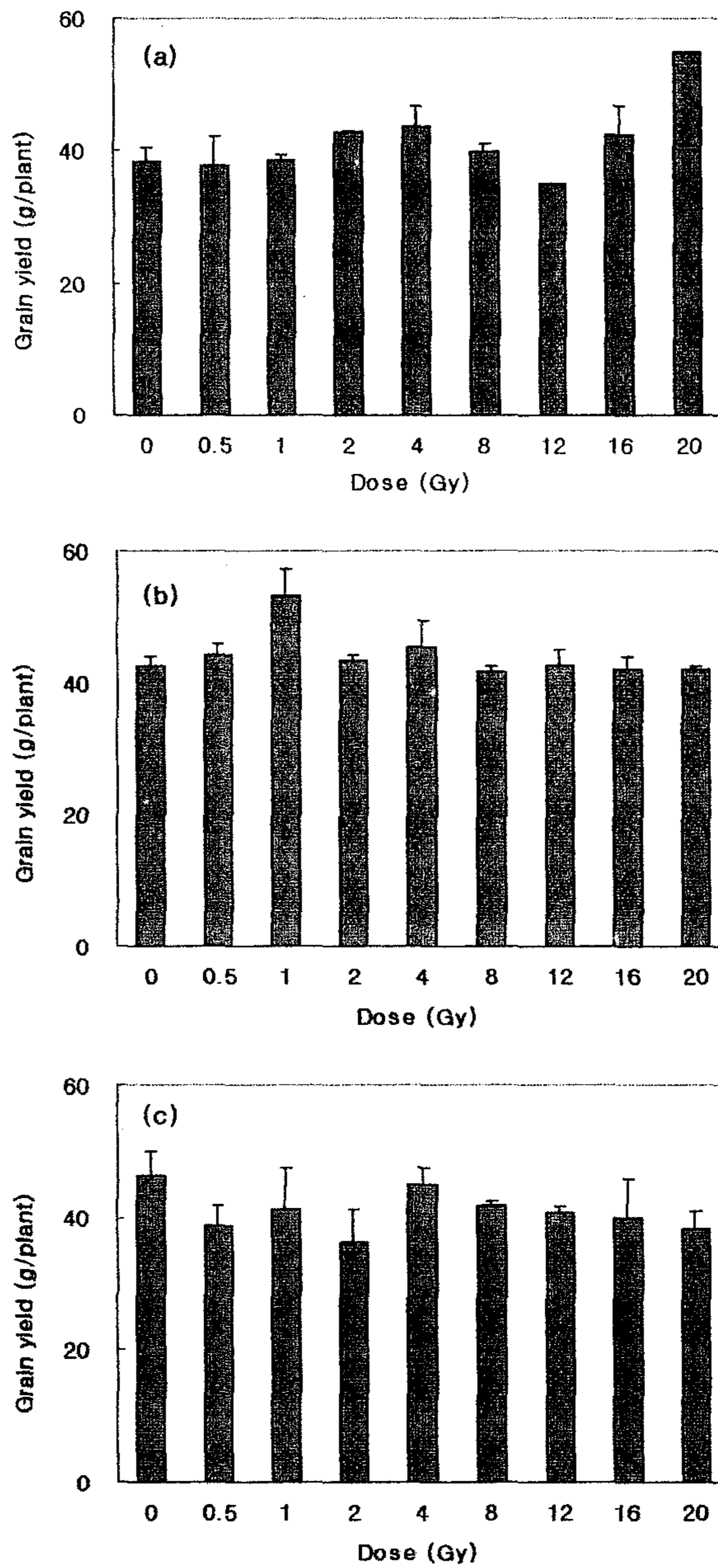
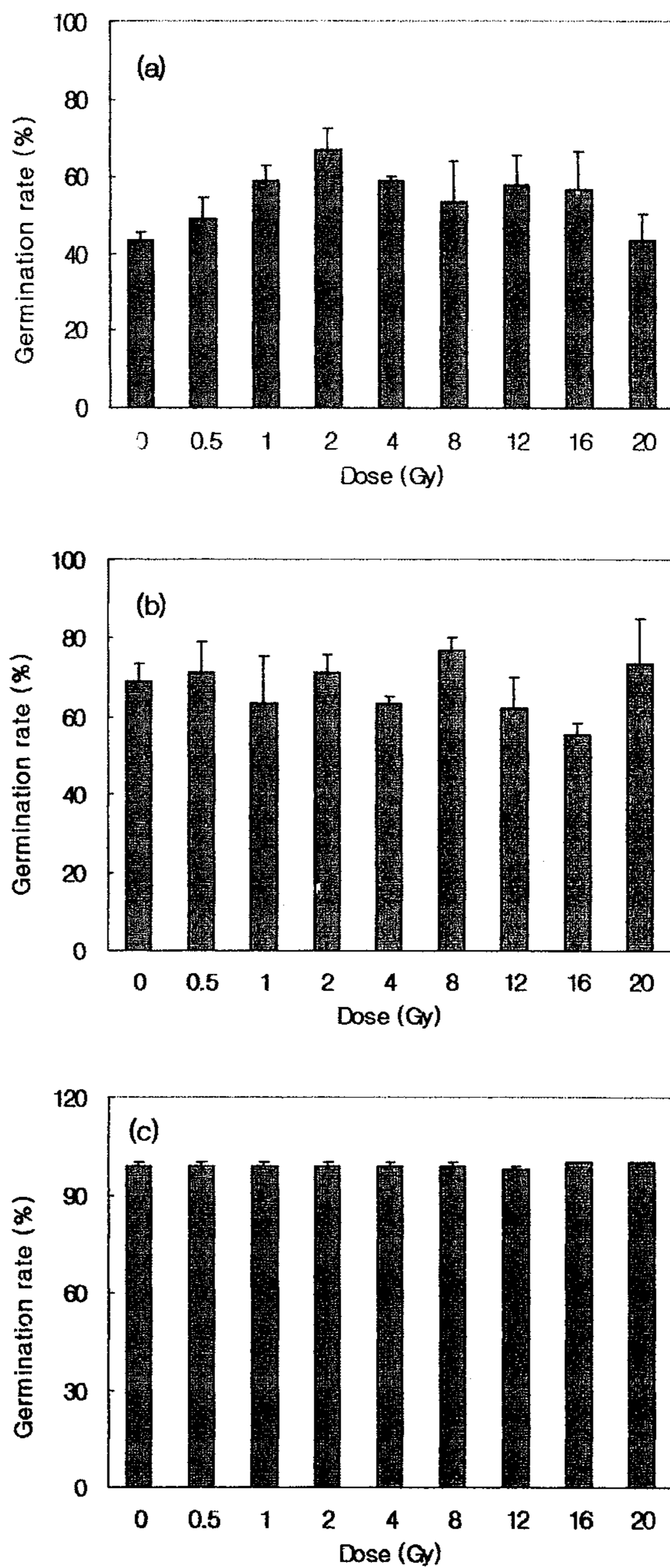


Fig. 22. Grain yield of Heckmi developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors. a, b, c : seeds harvested in 1998, 1999, 2000.

#### 다. 저장기간이 다른 방사콩의 포장생육과 수량

저장기간이 다른 대두 방사콩 종자에 저선량 방사선을 조사하여 초기생육에 미치는 영향을 조사한 결과, 파종 2주 후에 조사한 종자 발아율의 경우는 그림 23에서 보는바와 같이 3년 저장한 1997년산 종자의 발아율은 대조구 43.3%에 비해 저선량 조사구 모두가 높은 발아율을 보였는데 2 Gy 조사구가 66.7%( $p < 0.05$ )로 가장 높았고 다음이 1 Gy와 4 Gy 조사구가 58.9% ( $p < 0.05$ )로 통계적으로 유의성있는 증가효과를 보였다. 2년 저장한 1998년산 종자의 발아율에서는 76.7%의 8 Gy 조사구가 가장 높았고 다음이 0.5 Gy와 2 Gy 조사구가 71.1%로 대조구 68.9%에 비해 높았으며 1년 저장종자인 1999년 종자는 16 Gy 조사구만이 100%의 발아율로 대조구 98.9% 보다 높아 신규종자인 대조구 자체의 높은 발아율 때문에 높아 저선량 조사에 의해 증가효과가 적은 것으로 나타났다. 파종 20일 후에 조사한 유묘초장의 경우는 (그림 24), 1997년산은 0.5 Gy 조사구만이 10.6 cm로 대조구 8.8 cm에 비해 20% 정도 고도의 유의성있는( $p < 0.001$ ) 증가효과를 보였으나 나머지 저선량 조사구에서는 초장이 감소하여 발아율과는 반대 경향을 보였다. 1998년 종자에서는 대조구 9.6 cm에 비해 0.5 Gy와 1 Gy 조사구가 각각 10.0 cm로 4% 정도 증가하였고 다음이 2 Gy 조사구의 9.8 cm순이었으며 나머지 조사구에서는 감소하였다. 1999년 종자에서는 발아율에 비해 유묘초장은 4 Gy 조사구만을 제외하고 저선량 조사에 의해 증가하는 경향을 보였는데 1 Gy 조사구가 15.8 cm( $p < 0.001$ )로 가장 높았고 다음이 8 Gy 조사구의 14.4 cm ( $p < 0.001$ )와 0.5 Gy 조사구의 14.1 cm( $p < 0.01$ )로 대조구 13.2 cm에 비해 고도의 유의성있는 증가를 나타내었다. 이상의 결과를 볼 때 저선량 조사에 의한 종자 발아율 증가효과는 자체 발아율이 높은 1~2년 차 신규종자보다는 발아율이 다소 떨어지는 묵은 종자에서 더욱 효과적인 것으로 나타났다. 김 등<sup>65)</sup>은 감마선 4 Gy 조사에서 대두종자의 발아율과 초기생육이 촉진되었으나 종자의 상태와 품종에 따라서 저선량 효과가 달랐으며, Stan과 Jinga<sup>1)</sup>도 10 Gy 이하의 감마선 조사에 의해 대두종자의 발아율이 증가되었다고 하였다. 저장기간이 다른 종자의 조사에서는 김 등<sup>78)</sup>과 이 등<sup>77)</sup>이 배추와 파종자에서 1~2년 차 종자에서는 발아율 증가효과가 적었으나 3~5년 차 묵은 종자에서는 높은 증가효과를 보고하였는데 본 실험에서도 유사한 결과를 나타냈었다.



**Fig. 23.** Germination rate of soybean developed from storage seeds irradiated with different doses of gamma radiation in the pot experiment. Bars represent means  $\pm$  standard errors. a, b, c ; seeds harvested in 1997, 1998, 1999.

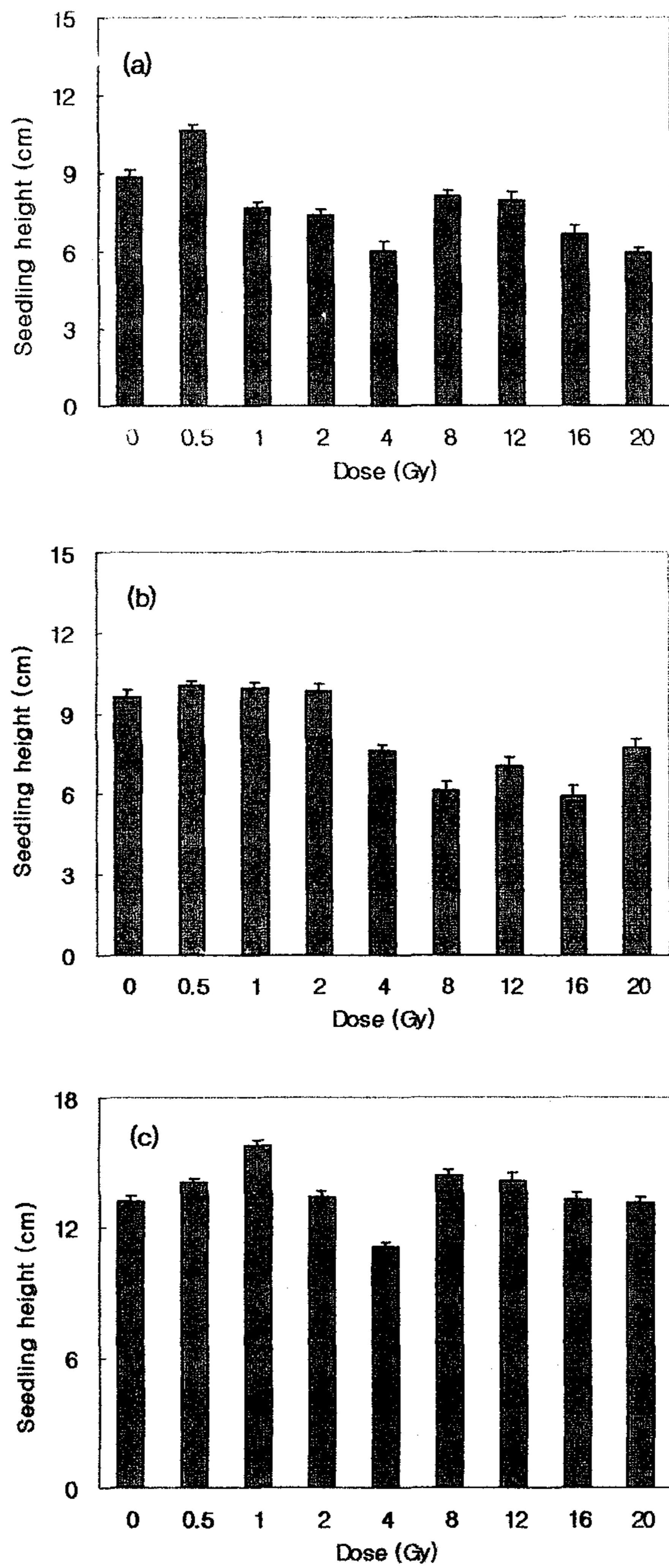


Fig. 24. Seedling height of soybean developed from storage seeds irradiated with different doses of gamma radiation in the pot experiment. Bars represent means  $\pm$  standard errors. a, b, c ; seeds harvested in 1997, 1998, 1999.

저장기간이 다른 방사콩 종자에 저선량 방사선을 조사한 후 포장 재배하여 수량구성요소를 조사하였다. 3년 저장한 1997년산 종자에서 생육한 대두의 초장은 표 15에서 보는바와 같이 4 Gy 조사구를 제외하고는 전체 저선량 조사구에서 대조구 70.3 cm보다 양호한 생육을 보였으며 16 Gy 조사구가 가장 높은 77.9 cm로 통계적으로 유의성있는( $p < 0.05$ ) 증가를 보였고 다음이 1 Gy 조사구와 0.5 Gy 및 8 Gy 조사구로 각각 75.7 cm와 74.7 cm 순이었다. 식물체의 가지수와 마디수에서는 16 Gy 조사구가 각각 9.6개와 14.1개로 가장 효과적인 증가를 보였다. 식물체 주당 pod수에서는 16 Gy 조사구의 293.5개를 제외한 저선량 조사구 전체가 대조구 275.3개 보다 적은 값을 나타내었다. 주당 종자수량에서는 대체로 저선량 조사구가 대조구 49.7 g보다 높은 값을 보였는데 8 Gy 조사구가 대조구에 비해 27%나 증가한 63.2 g으로 가장 높았고 다음이 0.5 Gy와 16 Gy 조사구로 각각 58.9 g과 54.9 g순으로 저선량 조사구 중 16 Gy 조사구가 3년 저장 종자에서는 가장 효과적인 생장 증대를 가져왔다.

2년 저장한 1998년산 방사콩의 초장(표 16)은 4 Gy 조사구가 71.1 cm로 대조구 69.1 cm보다 3% 정도 증가하였고 다음이 0.5 Gy와 16 Gy 조사구가 각각 70.9 cm와 70.1 cm 순이었다. 가지수와 마디수에서는 1 Gy 조사구와 16 Gy 조사구가 각각 9.0개와 14.0개로 대조구의 8.3개와 13.6개에 비해 가장 높은 값을 보였다. 주당 pod수에서는 1 Gy 조사구만이 279.9개로 대조구의 290.0개에 비해 4% 정도 증가하였고 나머지 저선량 조사구는 모두 대조구보다 낮은 값을 보였다. 주당 종자수량에서도 1 Gy 조사구가 58.6 g으로 대조구 55.2 g보다 6% 정도 증가하여 가장 높았고 다음이 4 Gy와 2 Gy 조사구가 각각 57.1 g과 56.0 g 순이었다. 2년 저장 종자에서는 대체로 저선량 조사구 중 낮은 1 Gy 조사가 수량증대에 가장 효과적이었다. 신규종자인 1년 저장종자의 생육특성은 표 17에서와 같이 초장은 0.5 Gy와 2 Gy 조사구만이 대조구 76.2 cm보다 높은 값을 보였으며 0.5 Gy 조사구는 7% 정도 증가한 81.8 cm로 통계적으로도 유의성있는( $p < 0.05$ ) 효과를 보였다. 식물체의 가지수에서는 저선량 조사구 전체가 대조구 7.3개 보다 높았는데 0.5 Gy와 8 Gy 조사구는 각각 9.9개( $p < 0.01$ )와 9.6개( $p < 0.05$ )로 통계적으로 유의성있는 증가효과를 보였다. 식물체 주당 pod수에서는 16 Gy 조사구가 299.8개로 가장 높아 대조구 274.1개에 비해 9% 정도 증가하였고 다음이 8 Gy와 0.5 Gy 조사구로 각각 294.1개와 292.9개 순이었다. 주당 종자수량에서는 저선량 조사구 전체가 대조구 49.5 g보다 높았는데 8 Gy 조사구가 61.1 g으로 대조구에 비해 23%나 증가하였으며 다음이 2 Gy와 0.5 Gy 조사구로 각각 59.8 g과

59.6 g 순이었다. 조사구중 가장 낮은 0.5 Gy 조사가 신규종자의 생육증대에 가장 효과적으로 나타나 종자 저장기간에 따라서 저선량에 의한 생육 촉진효과는 다르게 나타났다. Luckey<sup>3)</sup>와 Miller<sup>6)</sup>는 작물종자에 저선량 방사선을 조사하면 초기 생육촉진과 수량증가 효과가 있다고 보고하였으며 Stan과 Croitoru<sup>66)</sup>는 대두종자에 감마선 3~9 Gy 조사에서 생육촉진과 pod 형성이 증가되었다고 하였다. 김 등<sup>5)</sup>은 저선량 감마선을 조사한 대두의 생육촉진 효과는 품종에 따라 다르며 포장발아율이 0.5 Gy 조사에서 최고 30% 정도, 수량은 2~4 Gy 조사에서 20~30% 정도 증가하였다고 보고하였다. 본 실험에서는 동일 품종이라도 종자의 저장기간에 따라서 저선량 방사선에 의한 생육촉진 효과가 다르게 나타남을 알 수 있었다.

**Table 15.** Growth characters of soybean developed from seeds(produced in 1997)irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

Dose (Gy)	Agronomic traits Plant height (cm)	No. of branches /plant	No. of nods /plant	No. of pods /plant	Grain yield (g/plant)
0	70.3±2.4 <sup>†</sup>	8.1±0.7	13.9±0.5	275.3±24.3	49.7±10.8
0.5	74.7±1.4	7.9±0.8	14.2±0.4	259.7±10.1	58.9±6.1
1	75.7±2.5	8.0±0.6	14.2±0.5	252.2±21.0	51.1±8.8
2	73.7±3.4	8.4±0.6	13.2±0.4	269.6±28.7	48.6±5.6
4	69.1±2.0	7.2±0.6	13.1±0.7	268.3±28.9	52.9±2.2
8	74.7±2.0	9.1±0.9	13.9±0.4	263.0±22.2	63.2±5.9
16	77.9±2.4 <sup>*</sup>	9.6±1.2	14.1±0.7	293.5±24.7	54.9±12.1

<sup>†</sup> : Mean±SE. \* : Significant at 5% level.

**Table 16.** Growth characters of soybean developed from seeds(produced in 1998)irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

Dose (Gy)	Agronomic traits				
	Plant height (cm)	No. of branches	No. of nods	No. of pods	Grain yield (g)
0	69.1±1.6 <sup>†</sup>	8.3±0.6	13.6±0.5	290.0±27.9	55.2±2.7
0.5	70.9±2.0	8.1±0.4	13.6±0.4	277.2±25.9	49.5±8.2
1	67.0±2.6	9.0±0.6	13.4±0.4	301.7±20.8	58.6±1.6
2	69.0±1.5	8.0±0.4	13.7±0.4	258.8±21.1	56.0±3.2
4	71.1±3.1	7.1±0.5	13.4±0.3	248.3±20.4	57.1±6.7
8	66.1±1.9	7.8±0.4	13.7±0.5	253.4±20.4	51.1±2.2
16	70.1±2.2	8.0±0.4	14.0±0.3	279.9±16.3	53.3±0.7

† ; Mean±SE. \* ; Significant at 5% level.



**Table 17.** Growth characters of soybean developed from seeds(produced in 1999)irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

Dose (Gy)	Plant height (cm)	No. of branches	No. of nods	No. of pods	Grain yield (g)
0	76.2±2.3 <sup>†</sup>	7.3±0.6	14.1±0.4	274.1±16.9	49.5±10.7
0.5	81.8±1.8 <sup>*</sup>	9.9±0.8 <sup>**</sup>	14.7±0.2	292.9±15.4	59.6±4.9
1	74.6±1.7	7.4±0.4	13.0±0.6	290.7±16.9	54.2±2.1
2	77.0±3.2	7.7±0.6	13.2±0.4	267.7±15.5	59.8±5.1
4	72.9±3.1	8.2±0.5	13.2±0.4	252.4±23.7	59.0±5.1
8	74.3±3.1	9.6±0.8 <sup>*</sup>	13.4±0.7	294.1±18.7	61.1±5.5
16	76.3±3.6	7.9±0.4	14.2±0.7	299.8±19.1	55.4±5.2

<sup>†</sup> : Mean±SE. \* : Significant at 5% level.

#### 라. 품종별 대두종자의 포장생육과 수량

저선량 방사선 조사에 의한 품종별 대두의 포장생육 비교 실험을 한 결과는 다음과 같다. 발아율의 경우 황금콩 종자는 12 Gy를 제한 모든 선량에서 대조구 84.3%에 비해 2~8% 증가하였고 파종 3주 후 측정된 초기생육에서 황금콩의 유효초장은 1, 2, 20 Gy에서 대조구 15.6 cm에 비해 3~4%, 생체중은 1 Gy를 제외한 모든 저선량 조사구에서 대조구 3.4 g에 비해 4~11% 증가하였다(표 18). 서리콩의 경우는 발아율은 별다른 증가를 보이지 않았고 유효초장은 대조구 14.9 cm에 비해 1 Gy를 제외한 모든 저선량 조사구에서 3~6%, 생체중은 대조구 2.7 g에 비해 모든 저선량 조사구에서 4~14% 증가하였다(표 19).

포장에서 생육시킨 후 10월 10일에 조사한 후기생육은 다음과 같다. 황금콩의 초장은 모든 저선량 조사구에서 대조구 65.8 cm에 비해 1~5% 증가하였고, 가지수는 1 Gy와 20 Gy를 제외한 선량에서 1~8%, 마디수는 20 Gy 제한 선량에서 1~5% 증가하였다. 또한 pod수의 경우도 20 Gy를 제외한 모든 저선량 조사구에서 대조구 101.1개에 비해 1~8% 증가하였는데 그중 8 Gy가 가장 높았다(표 20). 서리콩의 경우는 초장은 대조구 75.1 cm에 비해 1~3%, 가지수는 8 Gy를 제외한 저선량 조사구에서 1~22% 증가하였는데 그중 16 Gy가 7.7개로 대조구 6.3개에 비해 가장 높았다(표 21).

수확기에 건조 탈곡한 후 수확하여 주당 수량으로 환산한 결과는 다음과 같다. 황금콩의 경우는 대조구 45.3 g에 비해 2, 16, 20 Gy에서 각각 48.6, 49.9, 51.0 g으로 7~13% 증가하였고(그림 25), 서리콩은 16 Gy에서 25.1 g으로 대조구 23.1 g에 비해 9% 증가한 것을 제하곤 별다른 증가효과를 보이지 않았다(그림 26).

**Table 18.** Early growth of soybean developed from seeds(cv. Hwangkeumkong) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

Dose (Gy)	Germination rate (%)	Seedling height (cm)	Fresh weight (g/plant)
0	84.3±2.3 <sup>†</sup>	15.6±0.3	3.4±0.1
0.5	86.7±2.5	15.5±0.2	3.7±0.2
1	89.5±2.3	15.9±0.3	3.4±0.1
2	89.5±2.9	16.1±0.3	3.6±0.1
4	91.4±2.4	15.5±0.3	3.7±0.1
8	86.2±2.4	15.6±0.3	3.6±0.2
12	78.6±6.3	15.2±0.2	3.7±0.1
16	91.0±2.3	15.4±0.3	3.8±0.1
20	85.7±2.8	16.0±0.3	3.6±0.1

† : mean±SE.

**Table 19.** Early growth of soybean developed from seeds(cv. Soelikong) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

Dose (Gy)	Germination rate (%)	Seedling height (cm)	Fresh weight (g/plant)
0	93.7±1.7 <sup>†</sup>	14.9±0.2	2.7±0.1
0.5	91.2±2.0	15.5±0.3	3.0±0.1
1	88.3±1.7	14.9±0.2	3.0±0.1
2	92.4±2.0	15.7±0.3	2.8±0.1
4	87.3±2.6	15.3±0.3	2.9±0.1
8	87.1±3.4	15.8±0.3	3.0±0.1
12	91.0±1.9	15.2±0.3	2.9±0.1
16	91.0±1.9	15.4±0.3	2.9±0.1
20	90.0±2.9	15.4±0.2	3.1±0.1

† : mean±SE.

**Table 20.** Growth response of soybean developed from seeds(cv. Hwangkeumkong) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

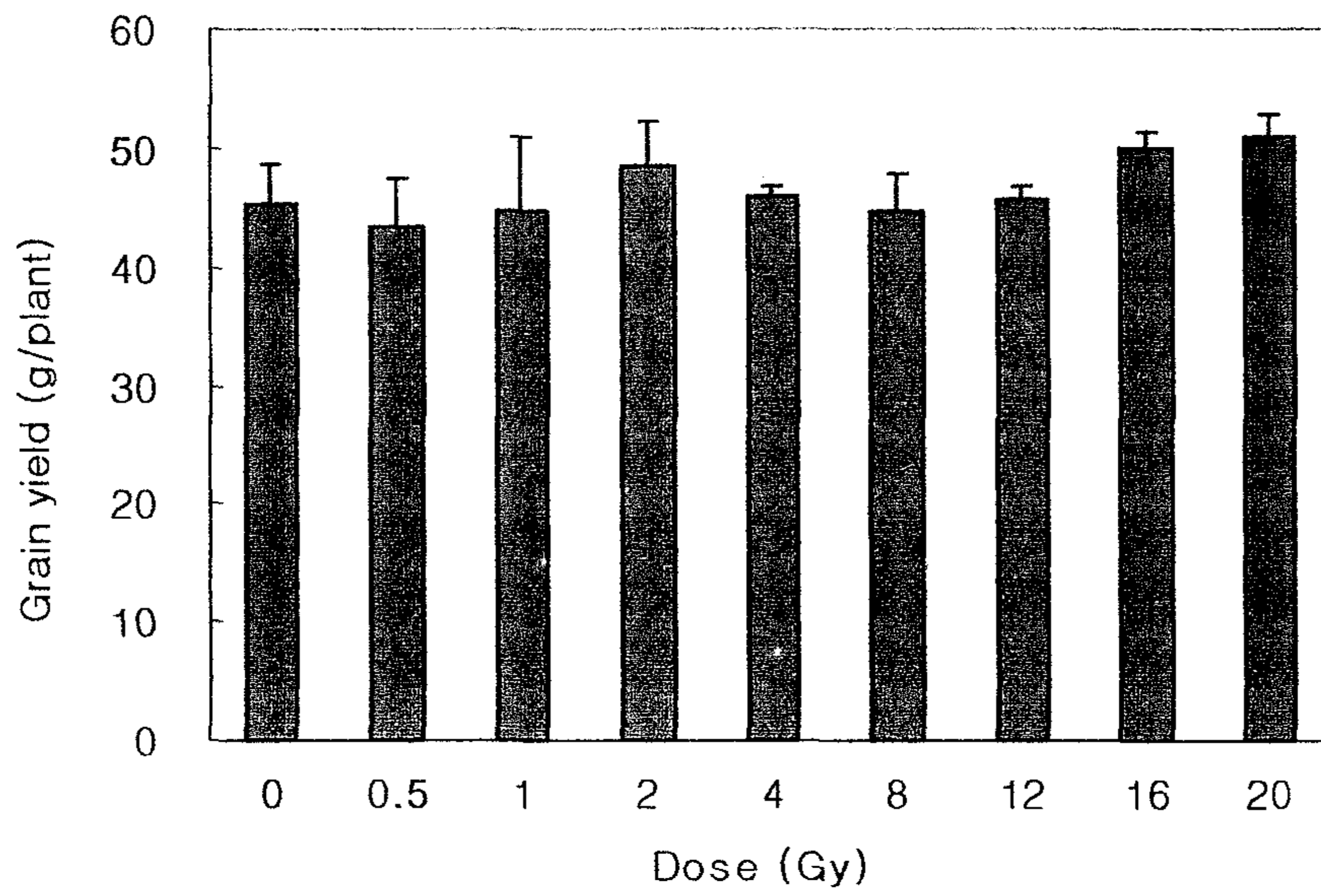
Dose (Gy)	Plant height (cm)	No. of branches	No. of nods	No. of pods
0	65.8±1.7†	6.2±0.3	17.0±0.4	101.1±4.6
0.5	67.3±1.3	6.7±0.3	17.3±0.8	102.9±4.6
1	68.7±1.7	5.9±0.4	17.3±0.4	102.9±5.5
2	67.9±1.2	6.5±0.4	17.6±0.5	105.9±4.8
4	69.0±1.3	6.3±0.3	17.5±0.4	105.9±4.5
8	67.3±2.4	6.5±0.3	17.5±0.5	109.2±3.5
12	67.3±1.6	6.4±0.4	17.9±0.4	101.9±5.1
16	66.6±1.8	6.3±0.4	17.2±0.5	105.6±3.7
20	68.7±0.8	6.0±0.4	17.0±0.4	101.0±5.0

† : mean±SE.

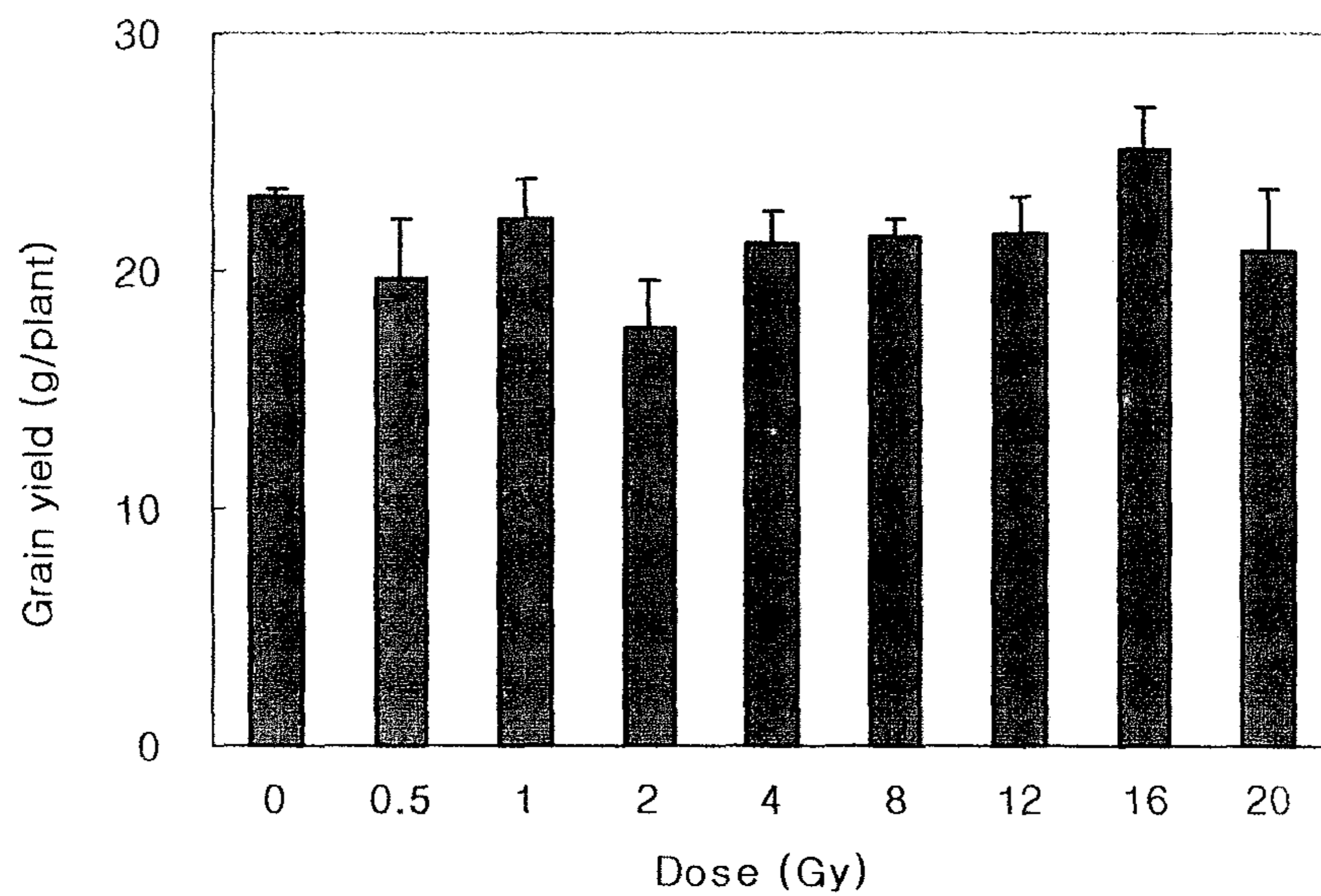
**Table 21.** Growth response of soybean developed from seeds(cv. Soelikong) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

Dose (Gy)	Plant height (cm)	No. of branches	No. of nods	No. of pods
0	75.1±1.9 <sup>†</sup>	6.3±0.4	17.9±0.5	63.0±4.2
0.5	77.1±2.2	6.3±0.4	17.7±0.4	58.6±3.7
1	75.5±1.2	6.5±0.5	18.6±0.5	71.9±5.2
2	75.5±1.3	7.1±0.5	17.3±0.6	74.1±5.9
4	75.6±1.3	6.6±0.6	17.6±0.7	68.5±4.6
8	75.7±1.1	6.0±0.6	18.2±0.4	62.7±5.8
12	75.3±1.9	6.9±0.5	18.3±0.4	66.5±5.3
16	77.4±1.8	7.7±0.5	19.0±0.4	70.9±4.3
20	76.7±1.3	6.3±0.5	18.9±0.5	65.3±4.1

† : mean±SE.



**Fig. 25.** Grain yield of soybean developed from seeds(cv. Hwangkeumkong) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment



**Fig. 26.** Grain yield of soybean developed from seeds(cv. Soelikong) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

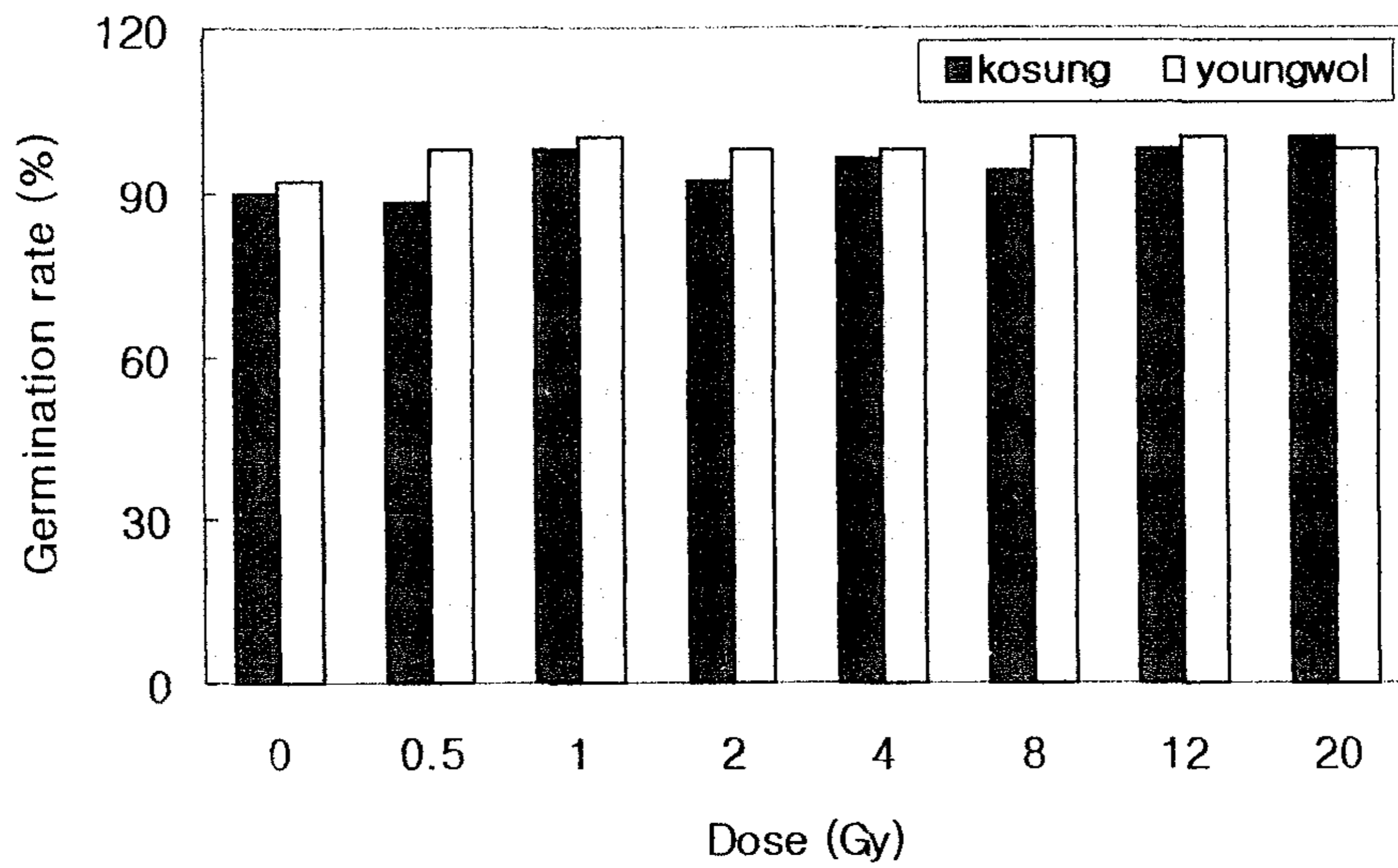


#### 마. 품종별 옥수수 종자의 포장생육과 수량

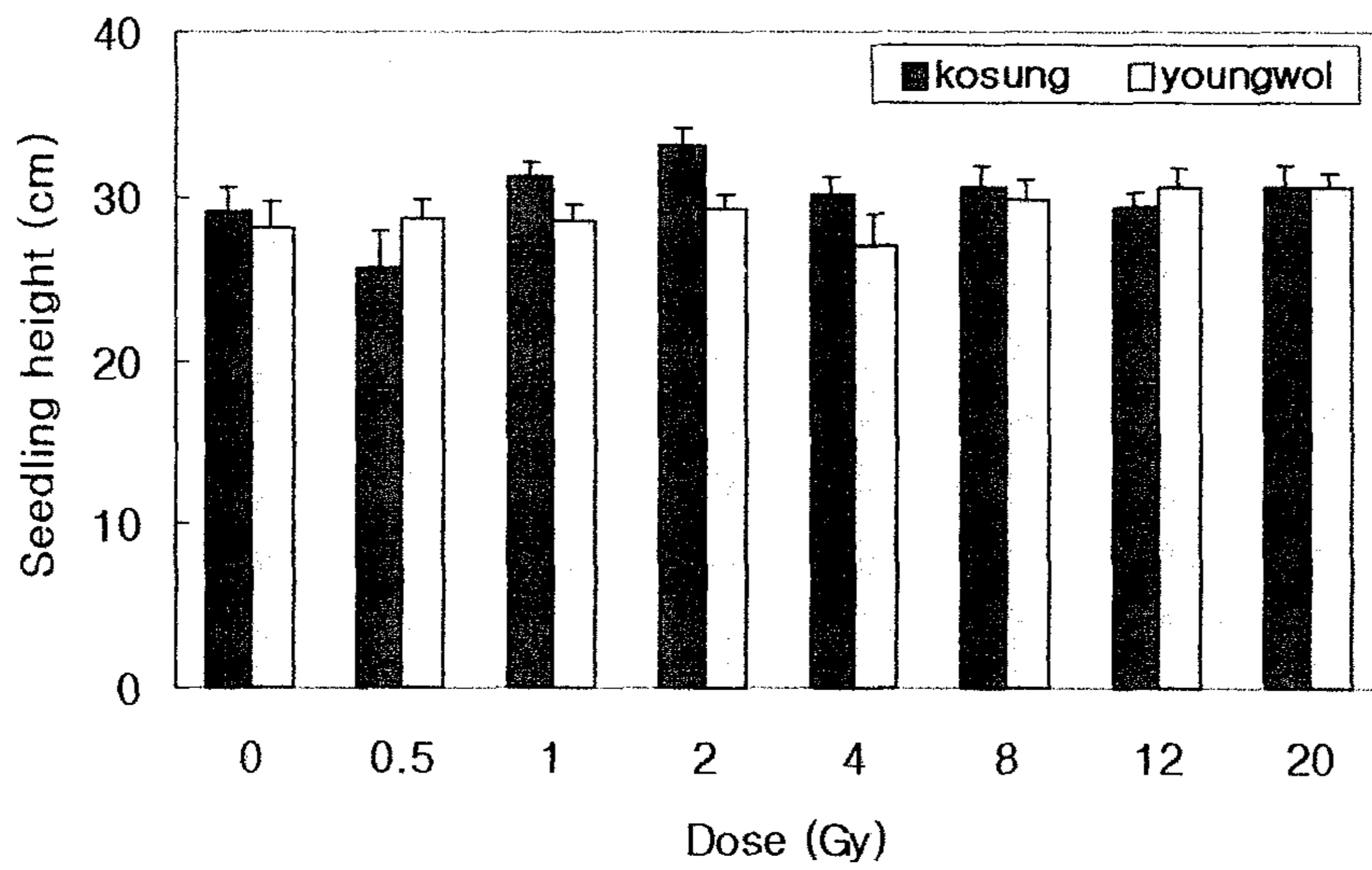
저선량 방사선 조사가 일반농가에서 재배하고 있는 재래종 옥수수의 생육에 미치는 영향을 보고자 감마선을 조사하여 온실의 소형 pot에 파종하여 20일 후에 발아율과 초기생육을 조사한 결과 저선량 효과는 품종별로 다소 차이를 보였다. 발아율의 경우 그림 27에서 보는바와 같이 고성재래종은 0.5 Gy 조사구를 제외하고는 저선량 조사구 모두가 대조구 90% 보다 높은 발아율을 보였는데 20 Gy 조사구가 100%로 가장 높았다. 영월재래종에서는 대조구 92%에 비해 저선량 조사구 모두가 높았으며 1 Gy, 8 Gy, 12 Gy 조사구가 같은 100%의 발아율을 보였다. 유묘초장(그림 28)과 생체중(그림 29)에서도 고성재래종의 경우 0.5 Gy 조사구를 제외하고는 저선량 조사구가 모두 대조구보다 높았는데 2 Gy 조사구가 30.5 cm의 초장으로 대조구 29.0 cm 보다 10% 정도 증가하였고, 생체중도 대조구 3.0 g에 비해 2 Gy 조사구와 20 Gy 조사구가 각각 4.3 g과 4.1 g으로 대조구보다 4% 정도 통계적으로 유의성있는( $p < 0.05$ ) 증가효과를 보였다. 영월재래종의 유묘초장은 12 Gy와 20 Gy 조사구가 30.6 cm로 대조구 28.0 cm보다 10% 정도 증가하였고, 생체중은 0.5 Gy, 12 Gy, 20 Gy 조사구가 모두 4.1 g으로 대조구 3.8 g보다 8% 정도 증가하였으나 유의성은 없었다. 옥수수 종자에 저선량 방사선을 조사하여 발아율 증가<sup>79)</sup>와 생육촉진<sup>80)</sup> 효과에 관한 보고가 있으며 김 등<sup>65)</sup>도 작물과 채소종자에 저선량 감마선을 조사하여 종자 발아율과 초기생육 촉진효과를 보고하였다<sup>76)</sup>.

저선량 방사선 조사가 옥수수 생장과 수량에 미치는 영향을 조사한 결과 방사선을 조사하여 포장재배한 옥수수의 생장에서도 초기생육과 비슷하게 생장촉진 효과를 보였으나 적정선량은 품종에 따라 다른 경향을 보였다. 고성재래종의 경우 표 22에서 보는바와 같이 저선량 조사구의 간장과 엽면적(엽장 X 엽폭) 등이 대조구에 비해 생장이 증대되었다. 간장은 대조구 151.5 cm에 비해 저선량 조사구 모두가 높았는데 8 Gy 조사구가 162.9 cm로 가장 높았고 다음이 2 Gy 조사구의 159.4 cm이었다. 엽면적에서도 대조구 63.5 cm<sup>2</sup>에 비해 20 Gy 조사구를 제외하고 저선량 조사구가 높았으며 8 Gy 조사구가 72.1 cm<sup>2</sup>로 대조구에 비해 10% 이상 증가하였으나 통계적 유의성은 없었다. 수량구성요소 중 이삭길이는 0.5 Gy와 1 Gy 조사구가 가장 높은 18.7 cm로 대조구 17.8 cm에 비해 5% 정도 증가하였고 이삭두께와 열수는 8 Gy 조사구가 각각 4.72 cm와 12.6개로 대조구의 4.40 cm와 10.8개에 비해 통계적으로 유의성있는( $p < 0.05$ ) 증가효과를 보여주었다. 수량구성요소 중 열당 종실수만이 저선량 조사구 모두가 대조구 32.2개에 비해 적은 값을 보여주

었으며 100립중은 8 Gy 조사구가 38.5 g으로 대조구의 34.2 g에 비해 13% 정도 통계적으로 유의성있게( $p < 0.05$ ) 증가하였다. 옥수수 주당 이삭수는 1 Gy 조사구가 1.9개로 가장 높았고 다음이 0.5 Gy 조사구의 1.8개이었으며 8 Gy와 20 Gy 조사구는 대조구와 같은 1.7개를 나타내었다. 고성재래종의 생장과 수량증대 효과는 8 Gy 조사구가 적정선량으로 나타났다. 저선량 조사에 의한 영월재래종의 생장과 수량증대 효과는 고성재래종 같이 뚜렷한 적정선량을 보여주지 않았으나 4~12 Gy 범위로 나타났다(표 23). 간장의 경우 4 Gy 조사구가 대조구 218.9 cm에 비해 6% 정도 증가된 232.6 cm로 가장 높았고 다음이 0.5 Gy 조사구의 227.6 cm이었다. 엽면적에서는 8 Gy 조사구가 832.3 cm<sup>2</sup>로 가장 높았고 다음이 12 Gy 조사구의 801.3 cm<sup>2</sup>였으나 나머지 저선량 조사구는 대조구 770.0 cm<sup>2</sup>보다 낮은 값을 보였다. 수량구성요소 중 이삭길이는 2 Gy 조사구가 20.4 cm로 대조구의 20.0 cm와 비슷한 경향이었고 나머지 저선량 조사구는 모두 대조구보다 낮았다. 이삭두께와 열수는 4 Gy 조사구가 각각 5.09 cm와 13.3개로 가장 높았고, 0.5 Gy 조사구가 각각 5.4 cm와 13.2개로, 8 Gy 조사구가 각각 5.03 cm와 13.0개로 다음순이었으며, 나머지 저선량 조사구는 대조구의 5.01 cm와 12.6개 보다 낮은 값을 보였다. 옥수수 종실 100립중에서도 12 Gy 조사구의 4.01 g을 제외하고는 저선량 조사구 모두가 대조구의 39.9 g보다 낮은 값을 보였고 주당 이삭수에서는 저선량 조사구 모두가 대조구보다 높은 수량을 보였는데 12 Gy 조사구가 대조구의 1.1개에 비해 36% 정도 높은 1.5개로 통계적으로 유의성있는 ( $p < 0.05$ ) 증가효과를 보였고 다음이 8 Gy 조사구의 1.4개였다. Caldera<sup>81)</sup>는 옥수수 종자에 저선량 방사선을 조사하여 수량이 증가되었다고 보고하였으며<sup>82)</sup>, Berezina 등<sup>80)</sup>은 옥수수 종자에 5 Gy의 감마선을 조사하여 초장과 수량 등이 증대되었다고 하였으나 본 실험에서는 품종에 따라 다소 차이를 보이나 8 Gy를 전후한 선량에서 성장촉진효과를 나타내었다.



**Fig. 27.** Germination rate of corn developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors.



**Fig. 28.** Seedling height of corn developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors.

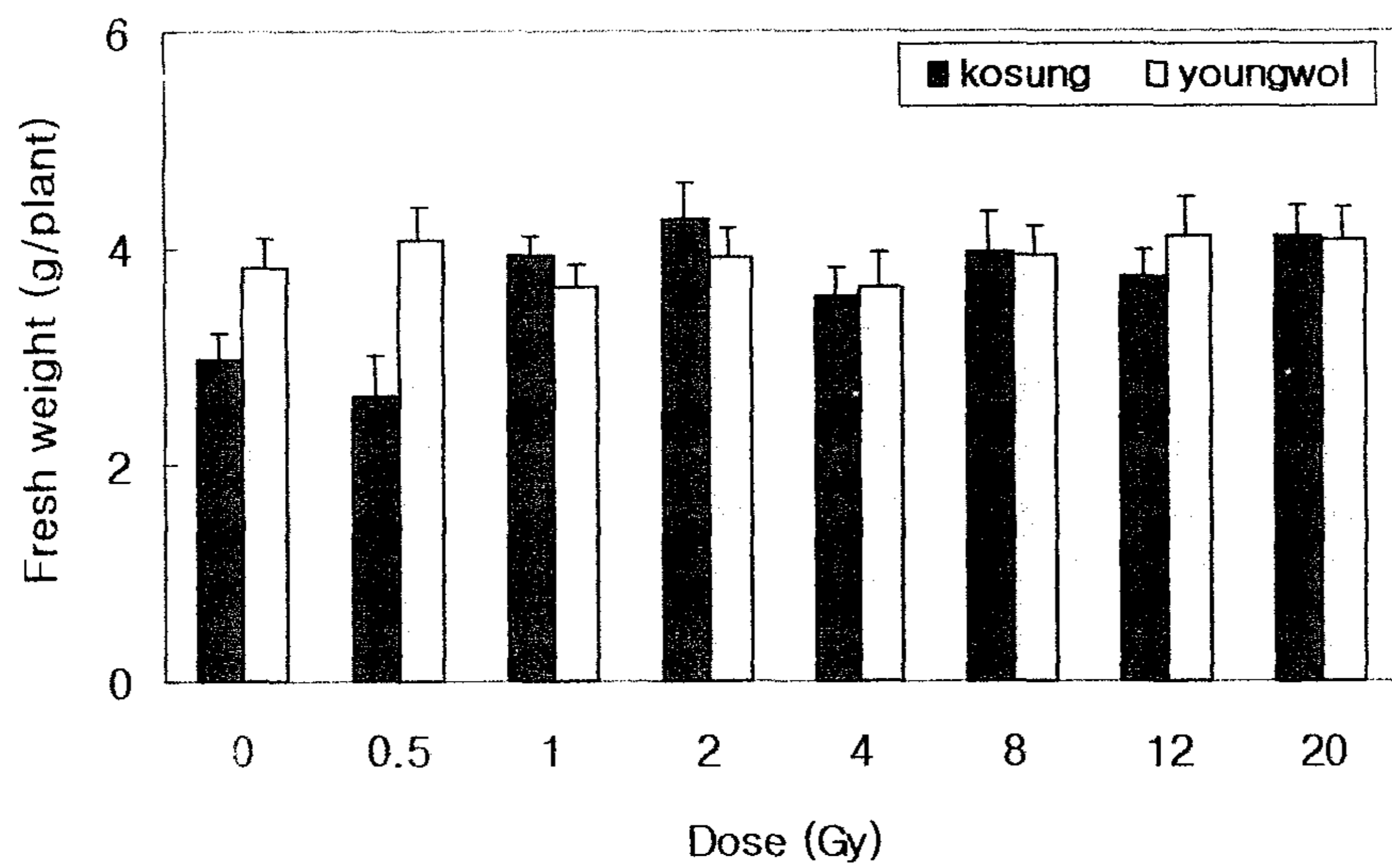


Fig. 29. Fresh weight of corn developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors.

**Table 22.** Growth response of corn(cv. Kosungjaerae) developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation.

Dose (Gy)	Stem height (cm)	Ear height (cm)	Leaf area (cm <sup>2</sup> )	Ear length (cm)	Ear width (cm)	Kernel row/ear	No. of Kernel/row	100 kernel weight(g)	No. of ear
0	151.5±6.4	63.5±4.3	440.7±25.0	17.8±0.8	4.40±0.13	10.8±0.3	32.2±1.9	34.2±1.5	1.7±0.2
0.5	154.0±4.4	59.7±4.5	442.0±23.8	18.7±0.6	4.54±0.12	11.6±0.6	30.7±1.3	34.1±2.8	1.8±0.1
1	159.3±6.5	58.1±5.1	458.8±25.5	18.7±0.8	4.60±0.09	12.2±0.7	31.9±1.6	34.5±2.2	1.9±0.2
2	159.4±5.4	62.0±3.9	460.0±17.2	18.3±0.8	4.58±0.07	11.8±0.7	31.0±1.5	33.6±1.6	1.3±0.1
4	157.9±4.5	63.6±5.1	480.9±27.1	17.3±0.8	4.27±0.14	11.6±0.5	30.4±1.3	30.6±2.2	1.6±0.1
8	162.9±5.6	72.1±5.1	498.6±23.8	17.6±0.6	4.72*±0.07	12.6*±0.5	30.2±1.4	38.5*±1.6	1.7±0.2
12	158.9±5.7	64.4±4.9	455.2±27.9	17.3±0.9	4.73*±0.14	11.8±0.7	31.3±1.9	33.8±2.1	1.6±0.2
20	151.9±8.2	55.9±5.2	351.7±33.7	17.8±0.7	4.69±0.11	12.0*±0.4	30.4±1.2	31.5±2.8	1.7±0.2

† : Figure represents the mean and the standard error of 30 plants.

\* : Significant at 5% level.

**Table 23.** Growth response of corn(cv. Youngwoljaerae) developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation.

Dose (Gy)	Stem height (cm)	Ear height (cm)	Leaf area (cm <sup>2</sup> )	Ear length (cm)	Ear width (cm)	Kernel row/ear	No. of Kernel/row	100 kernel weight(g)	No. of ear
0	218.9±6.4	112.6±5.1	770.0±31.2	20.0±0.9	5.01±0.14	12.6±0.5	31.2±1.9	39.9±1.6	1.1±0.1
0.5	227.6±5.8	113.3±5.4	673.3±40.9	18.4±0.4	5.04±0.12	13.2±0.7	29.3±1.3	34.6±2.5	1.3±0.1
1	224.1±6.0	119.4±4.1	728.6±36.6	19.3±0.7	4.80±0.12	12.4±0.6	32.3±2.3	35.9±2.3	1.2±0.2
2	220.8±5.9	109.4±5.3	732.4±34.6	20.4±0.6	4.96±0.11	12.6±0.8	32.3±1.0	34.8±2.2	1.2±0.1
4	232.6±5.5	115.7±5.5	697.1±27.3	18.7±0.9	5.09±0.15	13.3±0.6	32.5±1.2	35.2±1.9	1.2±0.1
8	222.6±6.0	111.1±4.2	832.3±26.1	19.8±0.7	5.03±0.16	13.0±0.7	33.5±1.3	38.0±3.1	1.4±0.2
12	213.2±6.2	114.1±4.3	801.3±28.9	19.8±0.4	4.89±0.18	12.2±0.5	33.1±1.0	40.1±2.6	1.5*±0.2
20	223.3±5.7	111.2±5.6	687.6±27.7	17.8±0.7	4.72±0.12	12.0±0.6	29.0±1.3	33.1±2.6	1.3±0.1

† : Figure represents the mean and the standard error of 30 plants.

\* : Significant at 5% level.

#### 4. 저선량 조사 작물의 후대수량검정

##### 가. 흑미종자의 후대수량검정

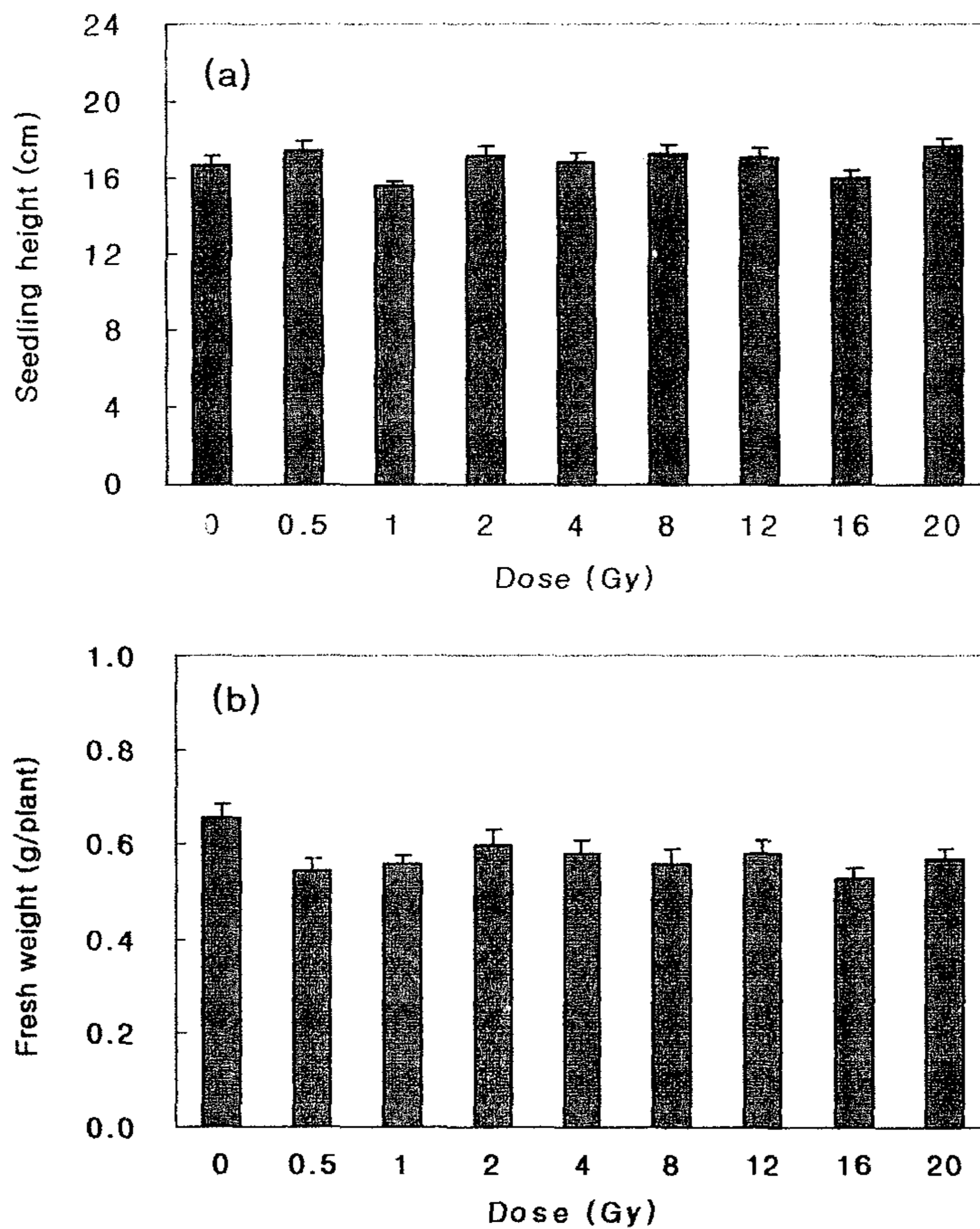
저선량 조사한 흑미종자의 후대수량검정을 위해 흑미종자 파종 40일 후 관찰한 유묘의 초기생육은 다음과 같다. 유묘초장의 경우는 대조구 16.7 cm에 비해 20 Gy에서 17.6 cm로 6% 증가하여 가장 높았지만 유의성은 보이지 않았고(그림 30a), 생체중은 모든 저선량조사구에서 감소하였다(그림 30b).

포장에서 생육시킨 후 10월 10일에 후기생육을 조사한 결과, 초장과 간장은 모든 조사구에서 감소하였고 분얼수는 8 Gy에서 건물중은 1~16 Gy에서 대조구에서 증가를 보이지 했지만 통계적으로 유의성은 보이지 않았고(표 24), 수확기에 건조 탈곡한 후 수확하여 조사한 주당 수량에서도 8 Gy를 제외한 모든 조사구에서 대조구 34.8 g에 비해 2~15% 증가하였지만 유의적인 차이를 보이지 않았다(그림 31).

##### 나. 다수구 흑미종자의 후대수량검정

2000년에 수확한 흑미종자의 다수구 선량을 선별하여 후대수량을 검정한 결과는 다음과 같다. 초장의 경우는 대조구 83.4 cm에 비해 0.5, 2, 20 Gy에서 각각 83.9, 82.2, 84.8 cm로 별다른 증가를 보이지 않았고 간장에서도 같은 결과를 보였다. 또한 분얼수의 경우는 대조구 20.7개에 비해 0.5, 2, 20 Gy에서 각각 21.7, 22.5, 21.3개를 나타내 3~5% 증가하였고 건물중도 대조구에 비해 1~12% 증가하였지만 통계적 유의성은 보이지 않았다(표 25). 수확기에 건조 탈곡한 후 수확하여 조사한 주당 수량은 0.5 Gy와 2 Gy에서 39.0 g과 40.8 g으로 대조구 37.0에 비해 5~10% 증가하였으나 유의적인 차이를 보이지는 않았다(그림 32).



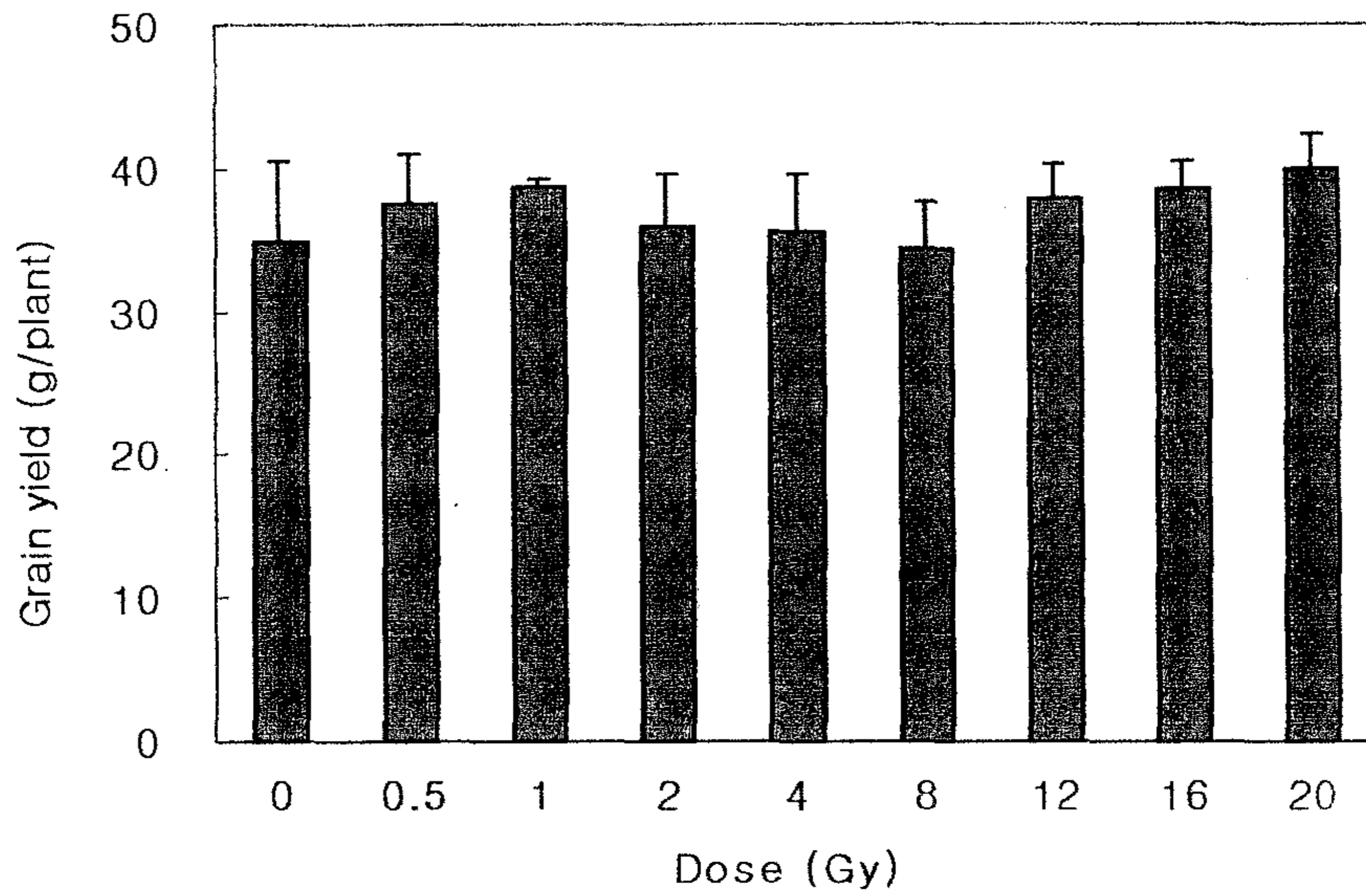


**Fig. 30.** Early growth of progeny of Heckmi developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors. a : seedling height, b : fresh weight.

**Table. 24.** Growth response of progeny of Heckmi developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation.

Dose (Gy)	Plant height (cm)	Culm length (cm)	No. of tillers	Panicle length (cm)	No. of panicles	Dry weight (g)
0	90.8±0.8	69.4±0.8	29.8±1.1	21.4±0.7	12.5±0.4	86.0±8.9
0.5	90.1±1.1	70.0±0.8	28.5±1.0	20.1±0.4	11.8±0.3	85.3±4.9
1	87.8±0.9	67.5±0.7	30.9±0.9	20.3±0.8	13.2±0.3	89.4±2.0
2	87.1±1.4	66.6±0.9	29.7±0.9	20.5±0.6	12.2±0.5	88.2±8.5
4	89.8±1.2	69.4±1.0	30.5±1.2	20.4±0.6	12.7±0.3	91.9±5.9
8	87.4±1.1	67.1±0.8	31.9±0.7	20.3±0.5	12.3±0.4	88.3±5.6
12	89.2±0.8	68.6±0.8	28.6±0.6	20.6±0.5	12.8±0.2	87.3±2.4
16	88.8±0.6	67.5±0.6	30.4±1.1	21.3±0.5	12.5±0.5	90.3±5.5
20	89.5±0.9	68.1±0.9	30.3±1.2	21.5±0.5	12.3±0.4	75.8±9.6

† : mean±SE.

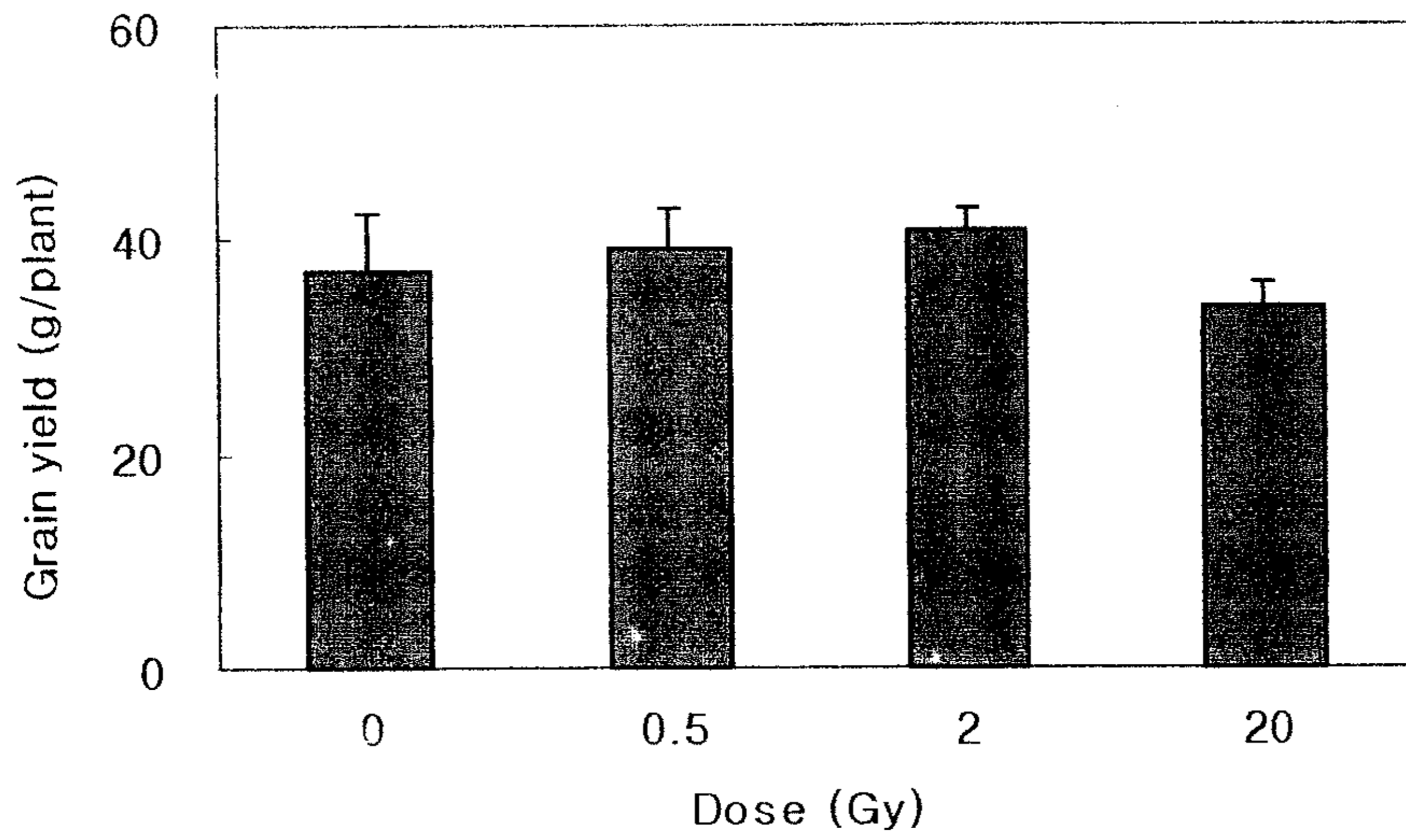


**Fig. 31.** Grain yield of progeny of Heckmi developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors.

**Table. 25.** Growth response of progeny of Heckmi developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation.

Dose (Gy)	Plant height (cm)	Culm length (cm)	No. of tillers	Panicle length (cm)	No. of panicles	Dry weight (g)
0	83.4±0.7	63.9±0.6	20.7±0.8	19.5±0.2	18.7±0.9	78.3±3.6
0.5	83.9±1.2	64.4±1.1	21.7±0.6	19.5±0.3	19.5±0.9	79.2±4.4
2	82.2±0.9	62.9±1.0	22.5±1.1	19.3±0.6	19.8±0.9	82.5±6.6
20	84.8±1.0	65.4±0.9	21.3±1.0	19.4±0.3	17.4±1.0	87.5±11.5

† : mean±SE.



**Fig. 32.** Grain yield of progeny of Heckmi developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors.

#### 다. 방사콩 2계통의 후대수량검정

대두의 계통별 후대수량검정을 위해 1999년에 수확한 방사콩 모품종과 조속품종 종자를 방사선 무조사상태로 포장에 파종하여 생육시킨 결과는 다음과 같다. 방사콩 모품종의 경우는 발아율이 대조구에 92.9%에 비해 모든 저선량조사구에서 감소하였으며 유묘초장과 생체중도 별다른 증가를 보이지 않았다(표 26). 방사콩 조속품종의 발아율은 2 Gy와 4 Gy에서 대조구 87.2%에 비해 91.3%와 92.1%로 5%와 6% 증가하였고 유묘초장은 0.5 Gy에서만 12.6 cm로 대조구 12.1 cm에 비해 4% 증가하였으며 생체중도 0.5 Gy에서만 3% 증가하였으나 유의한 차이를 보이지는 않았다(표 27).

포장에서 생육시켜 조사한 후기생육은 다음과 같다. 방사콩 모품종의 초장은 대조구 65.8 cm에 비해 모든 저선량 조사구에서 감소하였으며 간장도 4 Gy에서 2% 증가한 것을 제하곤 별다른 증가를 보이지 않았다. Pod수의 경우는 0.5 Gy만 제외하고 모든 선량에서 대조구 205.1개에 비해 3~13% 증가하였으나 통계적 유의성은 보이지 않았다(표 28). 방사콩 조속품종의 경우는 초장은 대조구 69.8 cm에 비해 모든 저선량조사구에서 1~6% 증가하였고 가지수는 2 Gy만 제외한 선량에서 1~12% 증가하였으나 유의적인 차이를 보이지 않았다. Pod수의 경우는 대조구 198.8개와 비교 시 모든 저선량 조사구에서 차이를 보이지 않았다(표 29).

수확기에 건조 탈곡한 후 수확하여 조사한 주당 수량은 다음과 같다. 방사콩 모품종의 경우는 0.5, 2, 4 Gy에서 대조구 34.6 g에 비해 각각 35.7, 35.9, 37.9 g으로 3~9% 증가하였으나 유의적인 차이를 보이지 않았고(그림 33), 조속품종의 경우는 대조구 39.2 g에 비해 모든 저선량 조사구에서 감소하는 경향을 보였다(그림 34).

**Table 26.** Early growth of progeny of soybean developed from seeds(cv. Bangsakong, mother variety) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

Dose (Gy)	Germination rate (%)	Seedling height (cm)	Fresh weight (g/plant)
0	92.9±2.9	12.1±0.2	1.59±0.08
0.5	92.9±3.9	11.7±0.2	1.47±0.04
1	90.5±2.4	11.6±0.3	1.51±0.16
2	82.5±6.1	11.9±0.2	1.58±0.08
4	89.7±2.1	11.8±0.2	1.58±0.03
8	87.3±2.3	11.9±0.1	1.50±0.05
12	92.1±2.5	11.7±0.2	1.59±0.06
16	89.7±5.1	11.4±0.2	1.52±0.10
20	84.9±4.7	12.1±0.2	1.46±0.04

† : mean±SE.

**Table 27.** Early growth of progeny of soybean developed from seeds(cv. Bangsakong, early maturing var.) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

Dose (Gy)	Germination rate (%)	Seedling height (cm)	Fresh weight (g/plant)
0	87.2±1.9	12.1±0.1	2.11±0.1
0.5	82.5±5.1	12.6±0.2	2.16±0.2
1	88.1±3.4	12.2±0.2	1.91±0.1
2	91.3±1.6	12.1±0.2	1.93±0.1
4	92.1±2.5	11.9±0.2	1.92±0.1
8	86.3±3.5	12.0±0.2	1.88±0.1
12	82.5±4.0	12.0±0.2	1.86±0.1
16	85.7±3.8	12.0±0.2	1.95±0.1
20	82.1±3.8	12.0±0.2	1.93±0.1

† : mean±SE.



**Table 28.** Growth response of progeny of soybean developed from seeds(cv. Bangsakong, mother variety) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

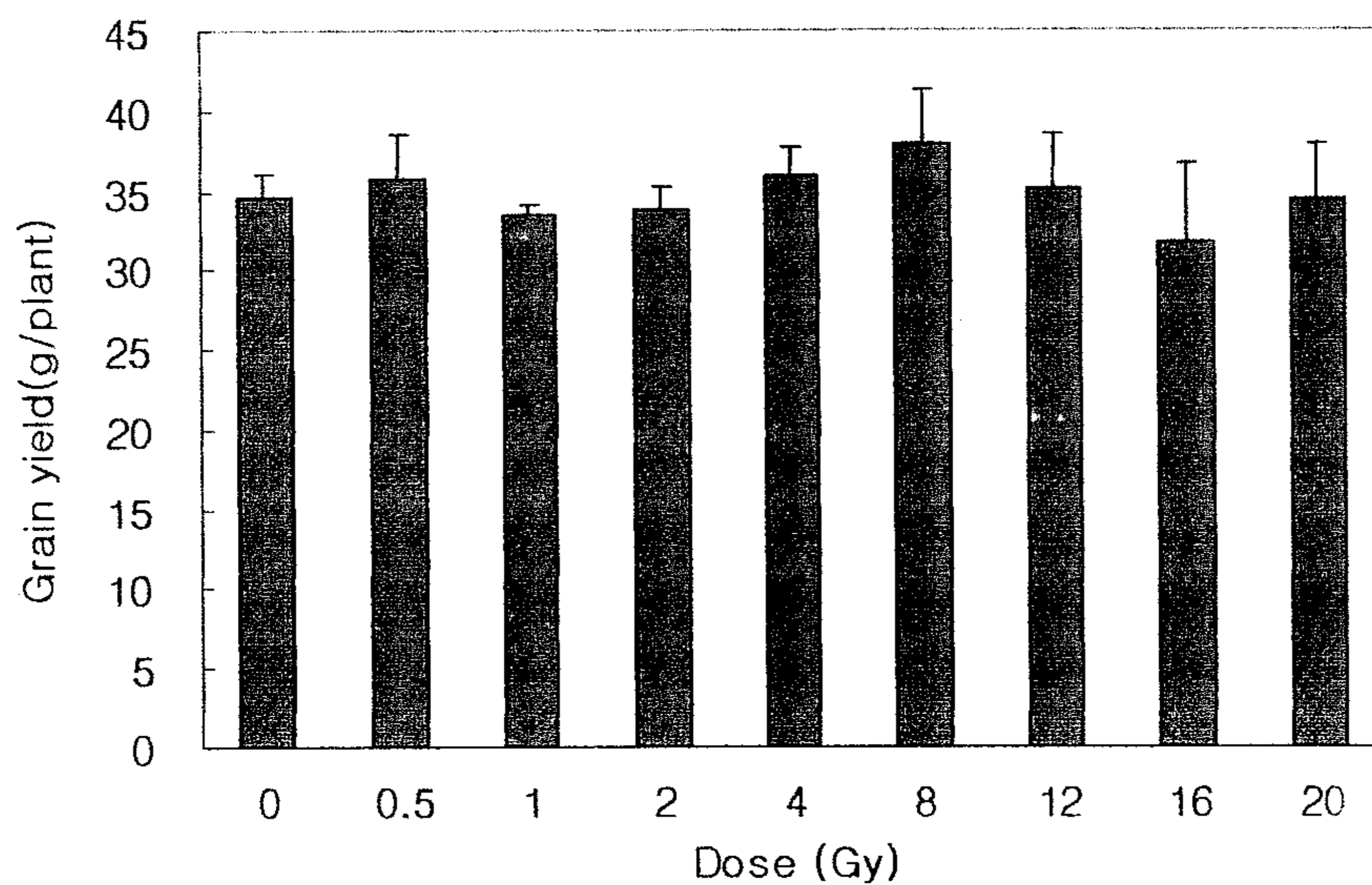
Dose (Gy)	Plant height (cm)	No. of branches	No. of nods	No. of pods
0	65.8±1.2	6.00±0.16	16.5±0.3	205.1±9.3
0.5	65.8±1.1	5.57±0.23	16.5±0.2	200.0±8.4
1	64.4±1.1	5.57±0.16	16.3±0.2	231.0±6.8
2	64.8±1.1	5.87±0.13	16.6±0.3	230.8±8.9
4	65.3±0.7	6.10±0.17	16.5±0.3	230.7±6.3
8	64.1±0.9	5.53±0.18	16.6±0.3	219.8±7.9
12	61.9±0.8	5.93±0.17	16.4±0.4	228.2±9.1
16	62.4±0.9	5.73±0.17	16.3±0.3	210.4±8.7
20	61.1±0.7	5.70±0.16	16.7±0.3	226.1±7.1

† : mean±SE.

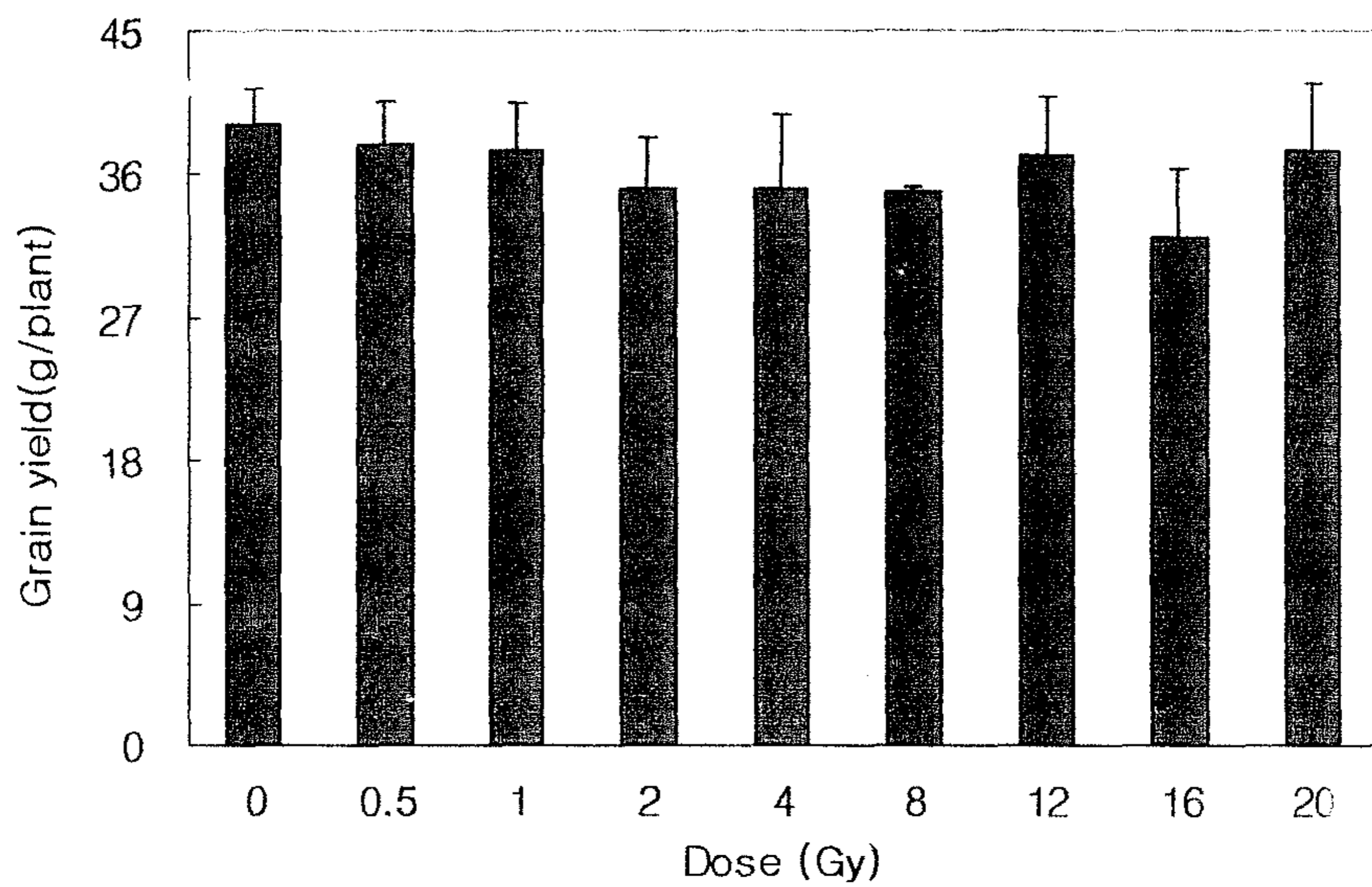
**Table 29.** Growth response of progeny of soybean developed from seeds(cv. Bangsakong, early maturing var.) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

Dose (Gy)	Plant height (cm)	No. of branches	No. of nods	No. of pods
0	69.8±1.1	4.87±0.2	17.2±0.3	198.8±5.9
0.5	73.9±1.0	5.43±0.2	17.8±0.3	198.1±7.4
1	73.4±0.7	5.03±0.2	17.5±0.2	183.6±10.0
2	70.5±1.0	4.70±0.2	17.2±0.3	181.0±6.3
4	70.8±0.9	4.87±0.2	17.4±0.2	178.6±9.2
8	70.5±0.8	4.90±0.2	17.7±0.3	199.0±7.2
12	72.6±0.7	4.93±0.2	17.3±0.3	198.5±9.6
16	71.6±1.2	4.97±0.2	16.6±0.3	173.1±8.6
20	73.1±0.9	5.43±0.2	17.3±0.2	201.4±9.0

† : mean±SE.



**Fig. 33.** Grain yield of progeny of soybean developed from seeds(cv. Bangsakong, mother var.) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.



**Fig. 34.** Grain yield of progeny of soybean developed from seeds(cv. Bangsakong, early maturing var.) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

#### 라. 품종별 대두종자의 후대수량검정

대두의 품종별 후대수량 검정을 위해 황금콩과 서리콩을 포장에 파종하여 생육한 결과는 다음과 같다. 파종 3주 후 측정된 초기생육에서 황금콩의 유묘초장은 대조구 23.1 cm에 비해 별다른 증가를 보이지 않았고 근장의 경우는 0.5 Gy를 제외한 조사구에서 대조구 9.5 cm보다 3~17% 증가하였으나 초장과 연관성을 보이지 않았으며 생체중에서도 별다른 증가를 보이지 않았다(표 30). 서리콩의 유묘초장은 대조구 21.3 cm과 거의 비슷한 생육을 보였고 근장과 생체중도 같은 결과를 보였다(표 31).

포장에서 생육시킨 후 9월 18일에 조사한 후기생육은 다음과 같다. 황금콩의 초장은 2 Gy에서 73.3 cm로 대조구 72.2 cm에 비해 2% 증가한 것을 제하곤 대조구와 비슷한 생육을 보였으며 가지수와 마디수도 비슷한 경향을 보였다. 수확기에 건조 탈곡한 후 수확하여 조사한 주당 수량은 16 Gy에서 54.0 g으로 대조구 48.3 g에 비해 12% 증가하였으나 통계적 유의성은 보이지 않았다(표 32). 서리콩의 경우는 초장에서 대조구 52.1 cm에 비해 0.5 Gy를 제한 조사구에서 1~6% 증가하였고 가지수는 16 Gy와 20 Gy에서 2~9% 증가하였으나 뚜렷한 차이를 보이지는 않았으며 건조 탈곡한 후 수확하여 조사한 주당 수량은 2~12 Gy 수준에서 대조구 15.4 g에 비해 증가하는 경향을 보이기는 했으나 유의적인 차이를 보이지는 않았다(표 33).

**Table 30.** Early growth of progeny of soybean developed from seeds(cv. Hwangkeumkong) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

Dose (Gy)	Germination rate (%)	Seedling height (cm)	Root length (cm)	Fresh weight (g/plant)
0	71.0±2.6	23.1±0.4	9.5±0.4	5.4±0.9
0.5	76.2±2.7	21.8±0.5	9.2±0.4	4.1±0.2
1	76.2±6.0	21.8±0.5	9.9±0.3	4.3±0.2
2	82.1±4.3	23.9±0.4	10.7±0.4	4.9±0.2
4	71.8±5.6	22.1±0.4	10.9±0.4	4.3±0.3
8	79.0±2.8	22.2±0.5	10.1±0.4	4.1±0.2
12	78.2±1.7	23.4±0.4	11.2±0.6	4.6±0.3
16	78.6±7.2	22.8±0.4	10.9±0.4	4.7±0.2
20	73.8±5.5	23.3±0.4	10.5±0.4	4.5±0.2

† ; mean±SE.

**Table 31.** Early growth of progeny of soybean developed from seeds(cv. Soelikong) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

Dose (Gy)	Germination rate (%)	Seedling height (cm)	Root length (cm)	Fresh weight (g/plant)
0	86.9±3.0	21.3±0.4	12.8±0.4	3.47±0.1
0.5	80.2±3.1	21.2±0.4	12.6±0.4	3.53±0.1
1	81.7±2.0	21.6±0.3	12.6±0.5	3.76±0.2
2	86.1±1.4	21.1±0.5	12.3±0.5	3.80±0.2
4	84.1±0.8	20.6±0.5	11.5±0.5	3.71±0.2
8	78.2±1.0	21.0±0.5	11.7±0.3	3.33±0.2
12	75.0±10.2	19.3±0.4	10.9±0.4	2.85±0.2
16	67.5±6.6	19.7±0.4	11.3±0.4	3.15±0.1
20	75.0±4.8	20.1±0.6	12.7±0.5	3.40±0.1

† : mean±SE.

**Table 32.** Growth response of progeny of soybean developed from seeds(cv. Hwangkeumkong) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

Dose (Gy)	Plant height (cm)	No. of branches	No. of nods	Grain yield (g)
0	70.2±0.9	7.0±0.2	13.9±0.4	48.3±1.7
0.5	70.7±1.2	6.7±0.3	13.5±0.4	42.9±2.0
1	71.4±1.3	6.8±0.3	14.1±0.4	41.9±7.7
2	73.3±1.4	7.1±0.4	13.7±0.5	50.4±6.7
4	68.5±1.9	6.5±0.4	12.6±0.5	43.7±3.2
8	66.5±2.0	7.0±0.4	13.1±0.4	46.2±10.2
12	68.1±1.7	6.5±0.3	13.6±0.5	45.9±3.3
16	69.3±1.6	6.7±0.3	13.6±0.4	54.0±3.1
20	66.2±2.2	6.7±0.3	12.4±0.6	40.3±0.5

† : mean±SE.



**Table 33.** Growth response of progeny of soybean developed from seeds(cv. Soelikong) irradiated with different doses of gamma radiation in the field experiment.

Dose (Gy)	Plant height (cm)	No. of branches	No. of nods	Grain yield (g)
0	52.1±0.8	5.93±0.4	14.1±0.4	15.4±1.9
0.5	49.6±0.8	5.60±0.3	12.9±0.6	15.8±1.9
1	52.2±0.9	5.07±0.3	12.8±0.5	15.3±2.0
2	54.1±0.9	5.47±0.4	13.2±0.5	20.4±1.0
4	53.9±1.0	5.87±0.5	12.4±0.4	21.1±3.1
8	55.5±0.9	5.07±0.4	13.3±0.4	20.5±1.5
12	54.6±1.1	5.40±0.5	13.1±0.4	16.9±2.5
16	52.5±1.2	6.07±0.3	12.8±0.5	11.9±1.7
20	53.3±0.7	6.47±0.5	13.8±0.3	14.5±1.9

† : mean±SE.

## 5. 저선량 조사한 감자의 생육 및 수량

### 가. 씨감자의 휴면 조절과 생육 및 수량

저선량 감마선 조사가 대지 씨감자의 휴면조절에 미치는 영향을 알아보기 위하여 저장방법을 5℃·암상태(습도 20±5%)와 20℃·광상태(습도 80±5%)로 하여 15일, 30일, 45일 동안 저장한 후 저선량 감마선을 조사하여 20℃·광상태(습도 80±5%)의 incubator에서 경과일수별로 멍아 발생율을 조사하였다. 5℃·암저장한 15일 저장구는 괴경 생산 후 66일(66 DAP-days after production)에 1~4 Gy에서 대조구 59.3%에 비해 66.7~81.5%로 13~38% 증가하였고 30일 저장구도 생산 후 66일(66 DAP)에 1 Gy와 2 Gy에서 각각 27.6%와 24.1%로 대조구 17.2%에 비해 40~60% 증가하였으며 45일 저장구의 경우는 생산 후 74일(74 DAP)에 1 Gy와 2 Gy에서 61.5%로 대조구 46.2%보다 33% 증가하였다. 저장기간별 멍아발생율을 괴경 생산 후 70일(70 DAP)을 기준으로 볼 때 15일 저장구는 80~90%, 30일 저장구는 40~60%, 45일 저장구는 3~15% 정도 발아되어 저장기간이 짧을수록 멍아발생이 빨라짐을 알 수 있었다(그림 35). 20℃·광저장한 씨감자의 멍아 발생율은 초기에 효과가 뚜렷하여 15일 저장구는 괴경 생산 후 40일(40 DAP)에 대조구 31.3%에 비해 1~16 Gy에서 40.6~46.9%로 30~50% 증가하였고, 30일 저장구도 생산 후 40일(40 DAP)에 2~16 Gy에서 32.4~41.2%로 대조구 23.5%에 비해 38~75% 증가하였다. 45일 저장구에서는 생산 후 48일(48 DAP)에 1~16 Gy에서 대조구 48.6%에 비해 54.3~65.7%로 12~35% 증가하였으며 모든 저장구에서 높은 증가 효과를 보인 저선량 조사구는 8 Gy와 16 Gy였다. 저장기간별 멍아율은 괴경 생산 후 48일 (48 DAP)을 기준으로 볼 때 15일과 30일 저장구는 70~85%, 45일 저장구는 45~66% 정도 발아되어 저장기간이 짧을수록 멍아 발생이 빨라졌다(그림 36). 씨감자의 멍아 발생율은 저장방법과 기간에 따라 다르게 나타났으며 5℃·암저장에서 보다 20℃·광저장에서 멍아 발생율이 15일 저장구는 18일, 30일과 45일 저장구는 22일 빨랐으며 대체로 5℃·암저장의 멍아율은 1~4 Gy에서, 20℃·광저장은 8 Gy와 16 Gy에서 저선량 감마선에 의한 효과가 뚜렷함을 확인할 수 있었다.

감마선 조사 90일 후 측정된 멍아 생육은 표 34에서 보는 바와 같이 멍아 길이보다 멍아수에서 증가 효과가 뚜렷하게 나타났는데, 5℃·암저장한 15일 저장구의 경우는 8 Gy와 16 Gy에서 대조구의 멍아수 1.85개에 비해 각각 2.52개와 2.59개로 36%( $p<0.01$ )와 40%( $p<0.01$ )증가하였다. 30일 저장구는 멍아길이가 1 Gy와 2 Gy 조사구에서 7~13% 증가한 것을 제외하곤 별다른

증가가 없었고 멍아수는 4~16 Gy에서 대조구 1.83개에 비해 2.34~2.55개로 28~40% 유의성있는 증가를 보였으며, 45일 저장구의 멍아수는 8 Gy와 16 Gy에서 2.23개로 대조구 1.73개에 비해 29%( $p<0.05$ )증가하였다. 20℃ · 광저장한 15일 저장구의 멍아수는 대조구 1.72개에 비해 4~16 Gy에서 16~29% 증가하였는데, 특히 16 Gy에서 2.22개( $p<0.05$ )로 가장 높았다. 30일 저장구는 멍아길이가 2 Gy에서 1.19cm로 대조구 1.04cm에 비해 15% 증가하였고 멍아수는 4~16 Gy에서 대조구 1.76개에 비해 7~28% 증가하였는데 특히 16 Gy가 2.26개 ( $p<0.05$ )로 가장 높았으며, 45일 저장구는 1 Gy와 16 Gy에서 대조구 1.51개에 비해 15~17% 증가하였다. 감마선 조사한 씨감자의 멍아생육은 저장기간에 관계없이 대체로 4~16 Gy에서 효과적이었으며, 특히 16 Gy에서 가장 높았다. Kim 등<sup>83)</sup>도 저선량 감마선을 조사한 감자 괴경의 멍아 출현율과 길이가 대조구에 비해 높았으며 멍아수에서는 15일 저장구의 4, 8, 16 Gy에서 유의성 있는 증가 효과가 나타났다. Luckey<sup>3)</sup>는 저선량 방사선 조사에 의해 채소 종자의 발아율과 초기 생육이 촉진되는 것을 관찰하였고, Caldera<sup>84)</sup>는 저선량 감마선 조사에 의해 감자의 수량 증가 및 발아 촉진, 휴면기간의 단축으로 인해 1년에 여러 번에 걸친 수확이 가능함을 확인할 수 있었다.

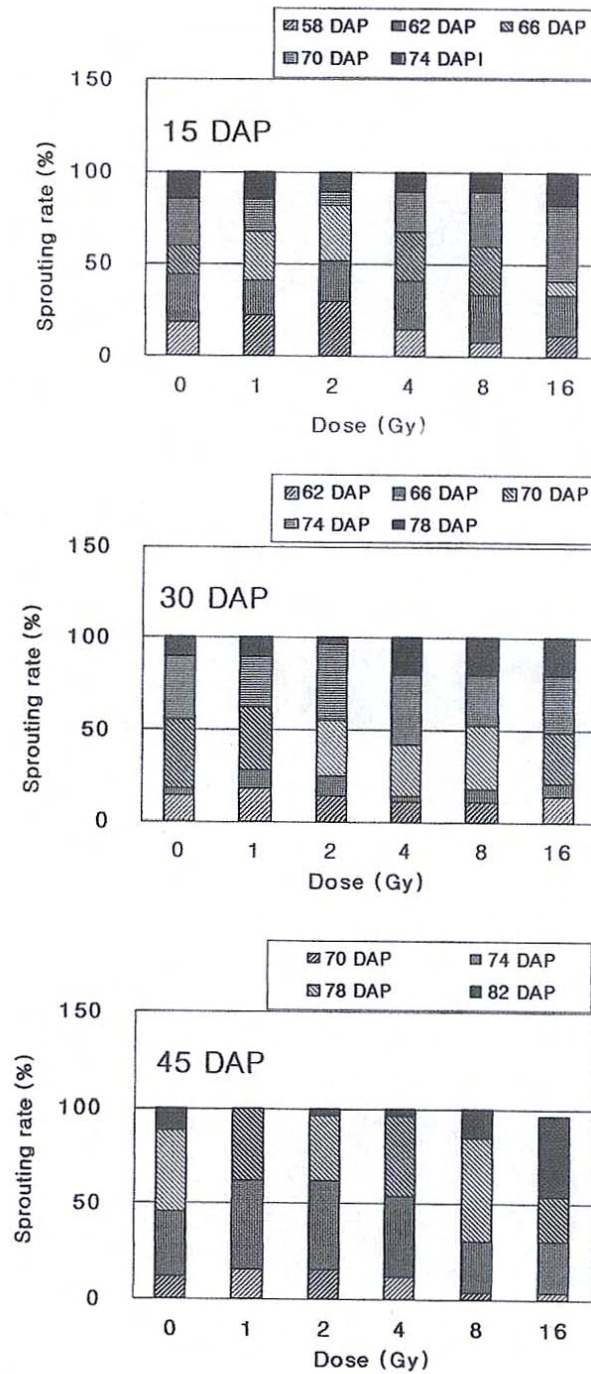


Fig. 35. Effect of low dose gamma radiation on the sprouting rate of minituber of "Dejima" with different storage duration. Minitubers were stored at  $5^{\circ}\text{C} \pm 20\pm 5\%$  under dark condition. DAP ; days after production.

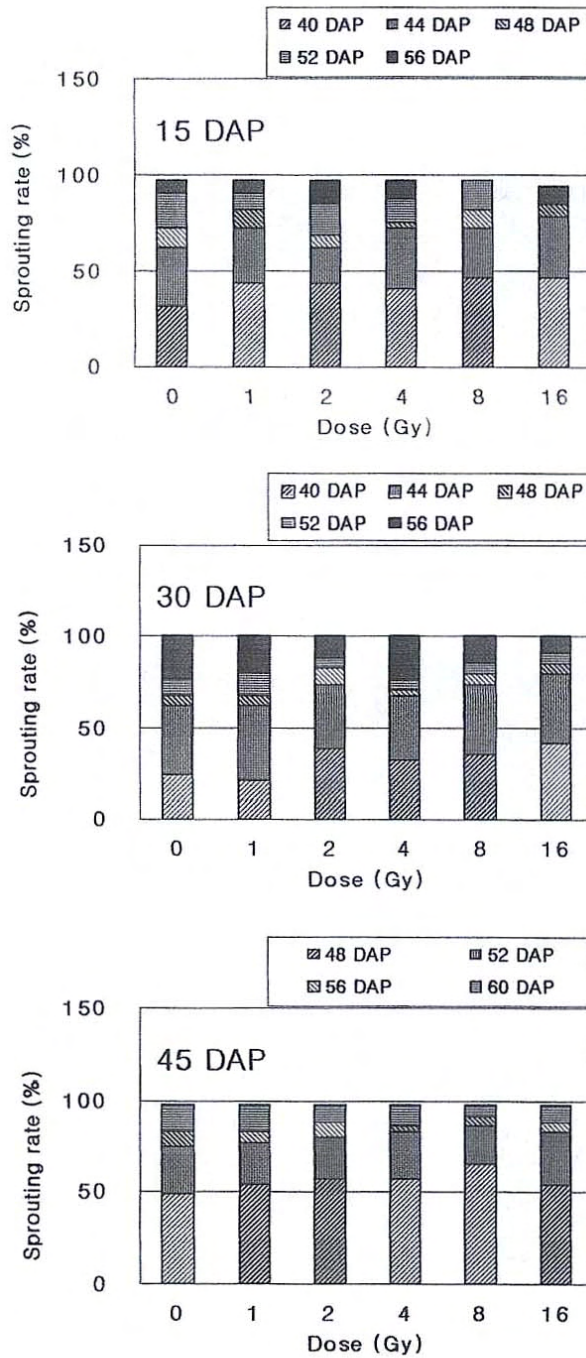


Fig. 36. Effect of low dose gamma radiation on the sprouting rate of minituber of "Dejima" with different storage duration. Minitubers were stored at 20°C · 80±5% under light condition. DAP ; days after production.

**Table 34.** Effect of low dose gamma radiation on the sprout growth of minituber of "Dejima" with different storage duration.

Dose (Gy)	Sprout length (cm)						No. of sprouts/tuber					
	CD			HL			CD			HL		
	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45
0	0.73	0.71	0.82	0.87	1.04	1.09	1.85	1.83	1.73	1.72	1.76	1.51
1	0.74	0.80	0.84	0.90	1.10	1.07	2.00	1.62	1.50	1.47	1.67	1.77
2	0.74	0.77	0.85	0.88	1.19	1.04	1.96	1.79	1.73	1.88	1.74	1.66
4	0.73	0.72	0.86	0.86	1.06	1.04	1.89	2.34*	1.77	2.00	1.88	1.49
8	0.67	0.72	0.83	0.85	1.06	1.01	2.52**	2.38*	2.23*	2.03	1.94	1.54
16	0.72	0.72	0.82	0.84	0.99	1.03	2.59**	2.55**	2.23*	2.22	2.26*	1.74

CD : Minitubers were stored at 5°C · 20±5% under dark condition.

HL : Minitubers were stored at 20°C · 80±5% under light condition.

\*, \*\* : Significant at 5% and 1% level, respectively.

포장 수량에 대한 저선량 감마선 효과는 파종 30일 후 조사한 유묘초장의 경우 5℃·암저장한 15일 저장구는 4 Gy와 16 Gy에서 12.4cm로 대조구 11.5cm보다 8% 증가하였고, 30일 저장구는 1~4 Gy에서 3~9% 증가하였는데, 특히 4 Gy가 12.9cm로 가장 높았으며, 45일 저장구는 4 Gy에서만 6% 증가하였다(표 35). 파종 85일 후 조사한 포장수량의 경우 15일 저장구는 초장과 생체중이 1, 2, 그리고 8 Gy에서 2~7% 증가하였고 괴경수는 2 Gy에서 대조구 10.3개에 비해 11.6개로 12% 증가하였으며, 괴경중은 2 Gy와 8 Gy에서 각각 402.4g과 547.6g으로 대조구 364.3g 보다 10%와 50% 증가하였다. 30일 저장구의 초장과 생체중은 거의 모든 선량에서 3~20% 증가하였으며, 괴경수도 모든 저선량 조사구가 대조구 9.2개에 비해 13~48% 증가하였고, 특히 4 Gy에서 13.6개( $p<0.01$ )로 가장 높았고, 괴경중도 4 Gy에서 476.2g으로 대조구 390.5g에 비해 22% 증가하여 가장 높았다. 45일 저장의 경우는 초장과 생체중이 8 Gy를 제외한 모든 저선량 조사구에서 3~34% 증가하였는데, 특히 초장은 4 Gy와 16 Gy에서 각각 77.4cm와 77.8cm로 대조구 71.5cm보다 8%와 9% ( $p<0.01$ ) 증가하였고 생체중은 1~4 Gy에서 616.7~678.6g으로 대조구 507.5g에 비해 유의성 있는 증가를 보였다. 괴경수는 1 Gy와 4 Gy에서 대조구 11.7개에 비해 각각 12.4개와 13.3개로 6%와 14% 증가하였으며 괴경중도 1 Gy와 4 Gy에서 9~13% 증가하였다(표 35).

파종 30일 후 조사한 20℃ 광저장의 유묘초장의 경우 30일 저장구의 2 Gy와 4 Gy에서 대조구 14.0cm에 비해 4% 증가한 것을 제외하곤 별다른 증가 효과를 보이지 않았다(표 36). 20℃·광저장에서 15일 저장구의 포장생육은 거의 차이가 없었으나 30일 저장구 초장과 생체중은 모든 저선량 조사구에서 2~28% 증가하였는데, 특히 8 Gy에서 각각 74.2cm, 와 742.3g ( $p<0.05$ )으로 가장 높았으며, 괴경수와 괴경중은 별다른 증가를 보이지 않았다. 45일 저장구도 초장과 생체중이 거의 모든 선량에서 증가하였는데, 특히 2Gy에서 69.9cm와 644.4g ( $p<0.01$ )으로 가장 높았고 괴경수와 괴경중은 증가효과를 보이지 않았다(표 36). 씨감자의 휴면조절에서는 20℃·광저장이 효과적이었으나 포장수량은 5℃·암저장에서 저선량 감마선에 의한 효과를 더 뚜렷하게 보여주었다. Sheppard 와 Evenden<sup>12)</sup>은 적정선량의 저선량 조사에 의해 작물의 초기 생육 촉진 및 성장증대, 수량증가 등을 보고하였고, Avakyan 등<sup>23)</sup>도 저선량 X선 3 Gy와 10 Gy에서 감자 괴경의 크기 증대와 수량증가 효과에 대해 보고하였다.

**Table 35.** Effect of low dose gamma radiation on the growth of minituber of "Dejima(CD)" with different storage duration.

Dose (Gy)	Seedling height <sup>†</sup> (cm)			Plant height <sup>‡</sup> (cm)			Foliage weight <sup>‡</sup> (g/plant)			No. of tubers /plant <sup>‡</sup>			Tuber weight (g/plant) <sup>‡</sup>		
	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45
0	11.5	11.9	13.0	76.6	69.8	71.5	635.7	550.0	507.5	10.3	9.2	11.7	364.3	390.5	452.4
1	11.1	12.2	13.0	79.5	73.8*	73.9	664.3	569.0	616.7*	8.2	10.4	12.4	321.4	442.9	509.5
2	11.2	12.8	12.9	76.0	72.7	75.6	681.0	592.9	678.6**	11.6	10.4	11.2	402.4	450.0	453.3
4	12.4	12.9	13.8	71.0	70.1	77.4**	556.7	571.4	626.6*	9.8	13.6**	13.3	358.6	476.2	492.9
8	11.5	12.0	11.4	79.2	76.4**	71.9	648.1	592.9	447.4	10.5	11.3	11.4	547.6*	384.3	423.7
16	12.4	10.9	13.0	68.0	77.6**	77.8**	529.0	659.5	578.6	11.0	10.5	11.4	371.4	381.0	423.8

CD : Minitubers were stored at 5°C - 20±5% under dark condition.

† , ‡ : 30 and 85 days after planting, respectively.

\*, \*\* : Significant at 5% and 0.1% level, respectively.



**Table 36.** Effect of low dose gamma radiation on the growth of minituber of "Dejima(HL)" with different storage duration.

Dose (Gy)	Seedling height <sup>†</sup> (cm)			Plant height <sup>‡</sup> (cm)			Foliage weight <sup>‡</sup> (g/plant)			No. of tubers /plant <sup>‡</sup>			Tuber weight (g/plant) <sup>‡</sup>		
	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45
0	13.9	14.0	15.3	68.4	68.8	63.7	656.9	581.5	522.2	18.0	17.4	15.0	527.6	536.5	510.0
1	13.9	14.0	14.9	66.9	70.0	66.4	670.0	625.0	527.8	16.8	16.1	14.0	523.3	558.9	507.4
2	13.5	14.6	14.9	66.7	74.5	69.9**	585.0	635.2	644.4*	16.3	13.3	8.8	500.0	474.8	498.1
4	13.7	14.6	13.8	68.8	72.5	69.4*	618.3	640.7	537.0	18.5	12.4	11.4	478.3	463.0	442.3
8	12.8	13.2	15.4	68.7	74.2	63.4	568.7	742.3*	480.8	11.9	13.9	13.2	365.0	494.0	475.9
16	13.4	13.2	15.6	70.5	70.9	68.3*	645.0	594.4	470.4	14.9	12.9	13.2	437.3	466.0	398.1

HL : Minitubers were stored at 20°C · 80±5% under light condition.

† , ‡ : 30 and 85 days after planting, respectively.

\*, \*\* : Significant at 5% and 1% level, respectively.

#### 나. 저온 저장한 감자 기내 소괴경의 휴면 타파와 생육

저선량 감마선이 저온 저장한 대지 소괴경의 휴면타파에 미치는 영향을 알아보려고 저온에서 15일, 30일, 45일 동안 저장하여 저선량 감마선을 조사한 후의 멍아율을 조사한 결과는 그림 37과 같다. 대지 감자 소괴경의 15일 저장구에서는 0.5~8 Gy에서 대조구에 비해 빠른 멍아율을 보였는데 특히 방사선 조사 후 29일에 0.5~4 Gy에서 77.8~80.6%로 대조구의 63.9% 보다 21.8~26.1% 증가하였다. 30일 저장구는 0.5, 4, 8 Gy에서 빠른 출현률을 보였는데 방사선 조사 후 10일에 4 Gy와 8 Gy에서 91.9%로 대조구의 70.3%에 비해 30.7% 증가하였다. 45일 저장구는 1~8 Gy에서 대조구에 비해 빠른 멍아 출현률을 보였는데 특히 방사선 조사 후 7일에 1, 2, 8 Gy에서 72.0~76.0%로 대조구의 68.0% 보다 5.9~11.8% 정도 증가하였다.

대지 감자 소괴경의 멍아 생장에 미치는 저선량 감마선의 효과는 그림 38에서와 같다. 15일 저장구에서는 0.5 Gy와 2 Gy에서 대조구에 비해 9% 정도의 증가 효과를 보였고 30일 저장구에서는 모든 선량에서 7~14%의 증가를 보였는데 특히 2 Gy와 4 Gy에서 14%( $p < 0.05$ )의 유의성있는 증가를 보였다. 45일 저장구에서는 0.5~4 Gy에서 대조구에 비해 3~9%의 증가를 보였으며 특히 4 Gy에서 가장 높은 9%의 증가를 보였다.

저온 저장한 수미 감자 소괴경의 휴면타파에 미치는 저선량 감마선 효과를 조사한 결과는 그림 39과 같다. 30일 저장구에서는 2~16 Gy에서 대조구에 비해 빠른 멍아 출현률을 보였는데 방사선 조사 후 41일에 2~16 Gy에서 86.5~91.9%로 대조구의 78.4%에 비해 10.3~17.2%의 증가를 보였다. 60일 저장구는 0.5~4 Gy에서 빠른 멍아 출현을 보였는데 방사선 조사 후 27일에 85.2~88.9%로 대조구의 81.5%보다 4.5~9.1% 증가하였다. 90일 저장구는 0.5 Gy를 제외한 모든 선량에서 대조구에 비해 빠른 멍아 출현률을 보였는데 특히 1~16 Gy에서 방사선 조사 후 18일에 79.3~82.8%로 대조구의 69.0%에 비해 14.9~20.0%의 증가를 보였다.

수미 감자 소괴경의 멍아 생장에 미치는 저선량 감마선 효과는 그림 40에서와 같다. 30일 저장구에서는 2~30 Gy에서 대조구와 비교하여 13~24%의 증가를 보였는데 특히 8 Gy와 16 Gy에서 각각 22%( $p < 0.05$ )와 20%( $p < 0.05$ )의 유의성있는 증가를 보였다. 60일 저장구는 1~16 Gy에서 7~14% 증가하였는데 특히 4 Gy에서 대조구에 비해 14%의 증가를 보였다. 90일 저장구에서는 모든 선량에서 3~20% 증가하였는데 특히 4 Gy에서 20%( $p < 0.01$ ), 2 Gy에서 18%( $p < 0.05$ ), 8 Gy에서 16%( $p < 0.05$ ), 1 Gy에서 15%( $p < 0.05$ )의 통계적으로 유의성있는 증가를 보였다.

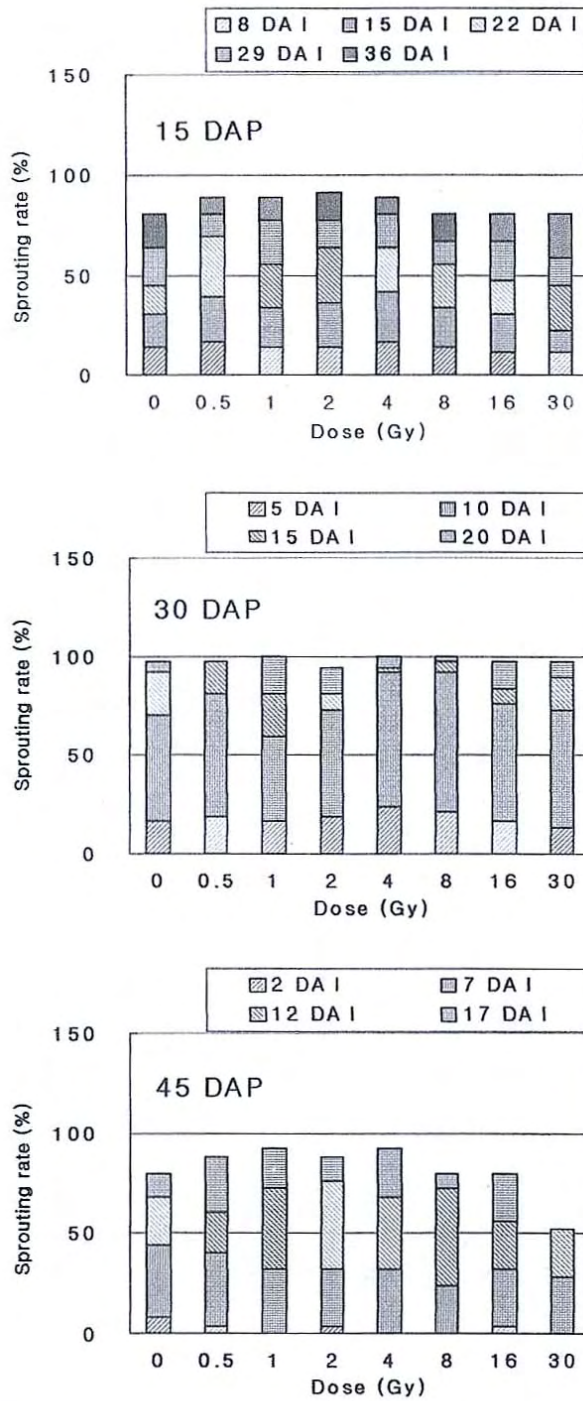
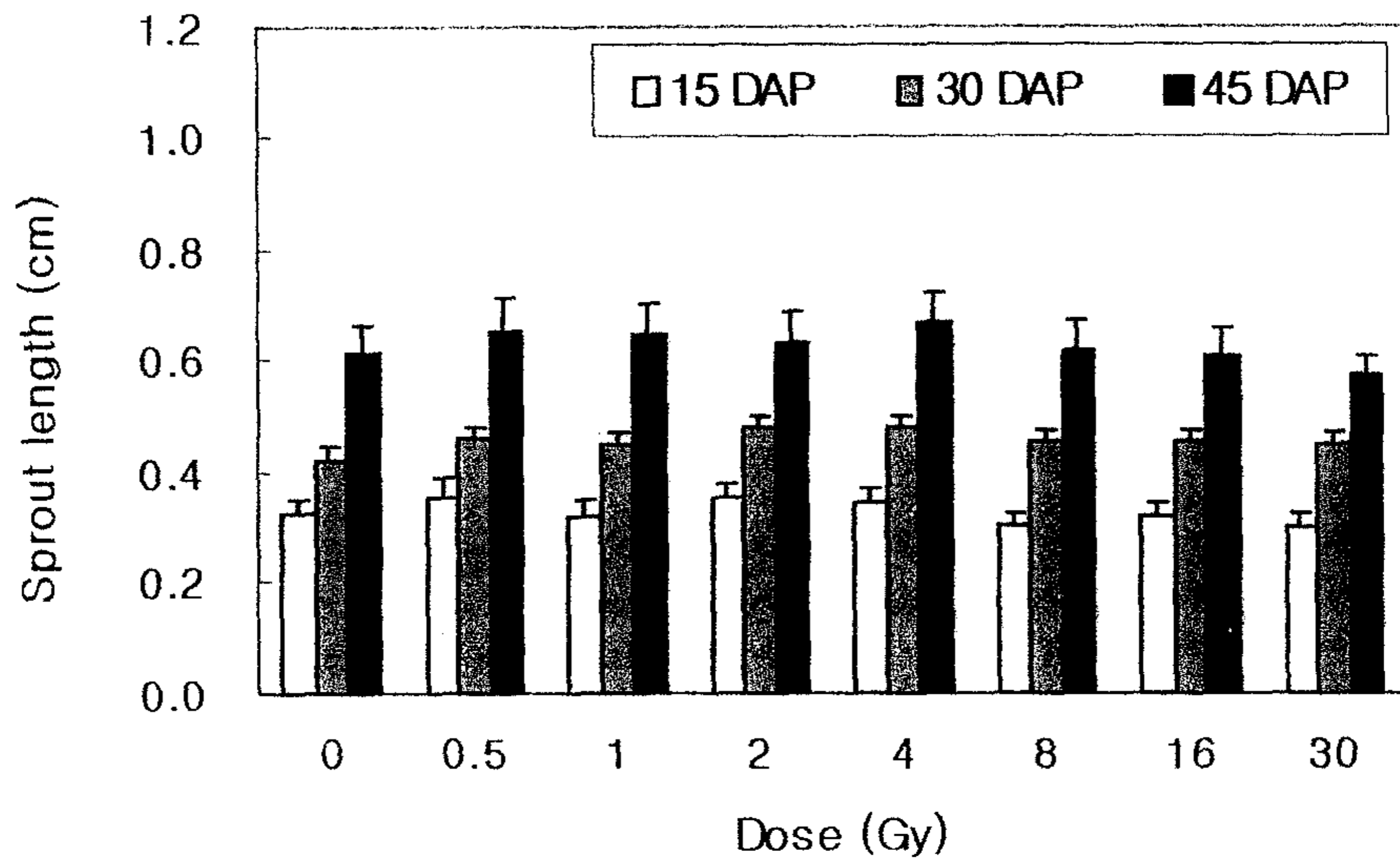


Fig. 37. Effect of low dose gamma radiation on the sprouting rate of microtuber of "Dejima" with different storage duration. Microtubers were stored at 5°C under dark condition. DAP ; days after production. DAI ; days after gamma irradiation



**Fig. 38.** Effect of low dose gamma radiation on the sprout length of microtuber of "Dejima" with different storage duration. Microtubers were stored at 5°C under dark condition. DAP ; days after production. Bars represent means  $\pm$  standard error.

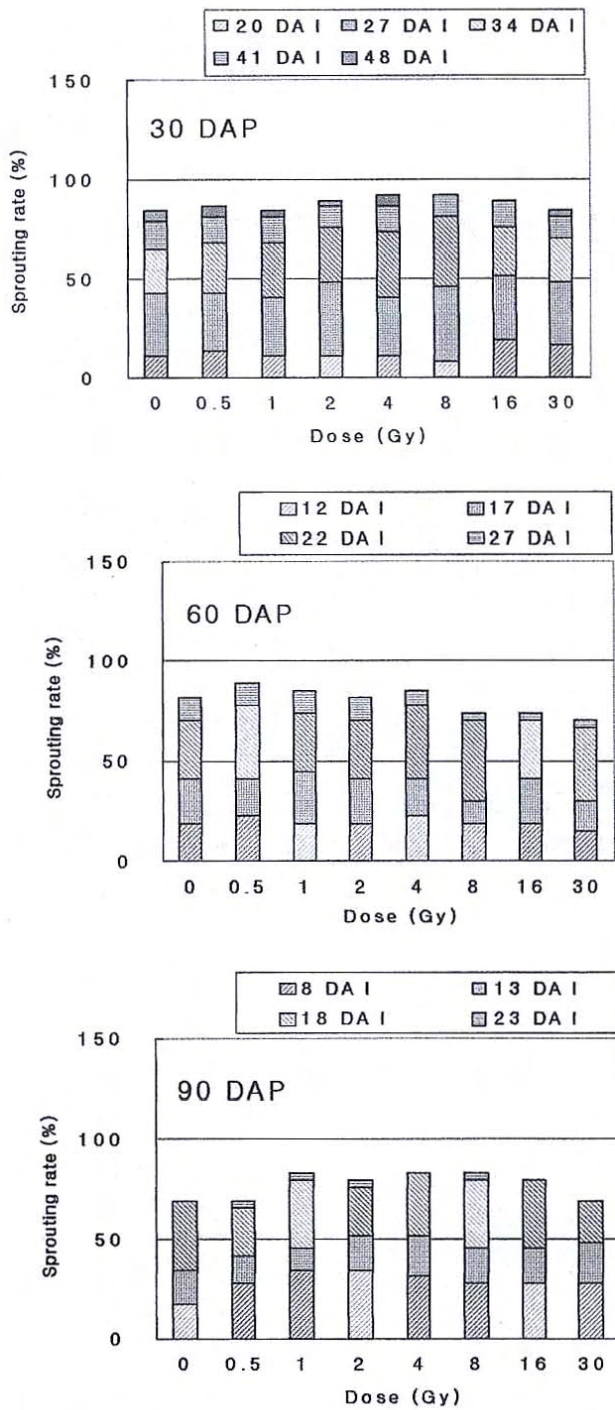


Fig. 39. Effect of low dose gamma radiation on the sprouting rate of microtuber of "Superior" with different storage duration. Microtubers were stored at 5°C under dark condition. DAP ; days after production. DAI; days after gamma irradiation.

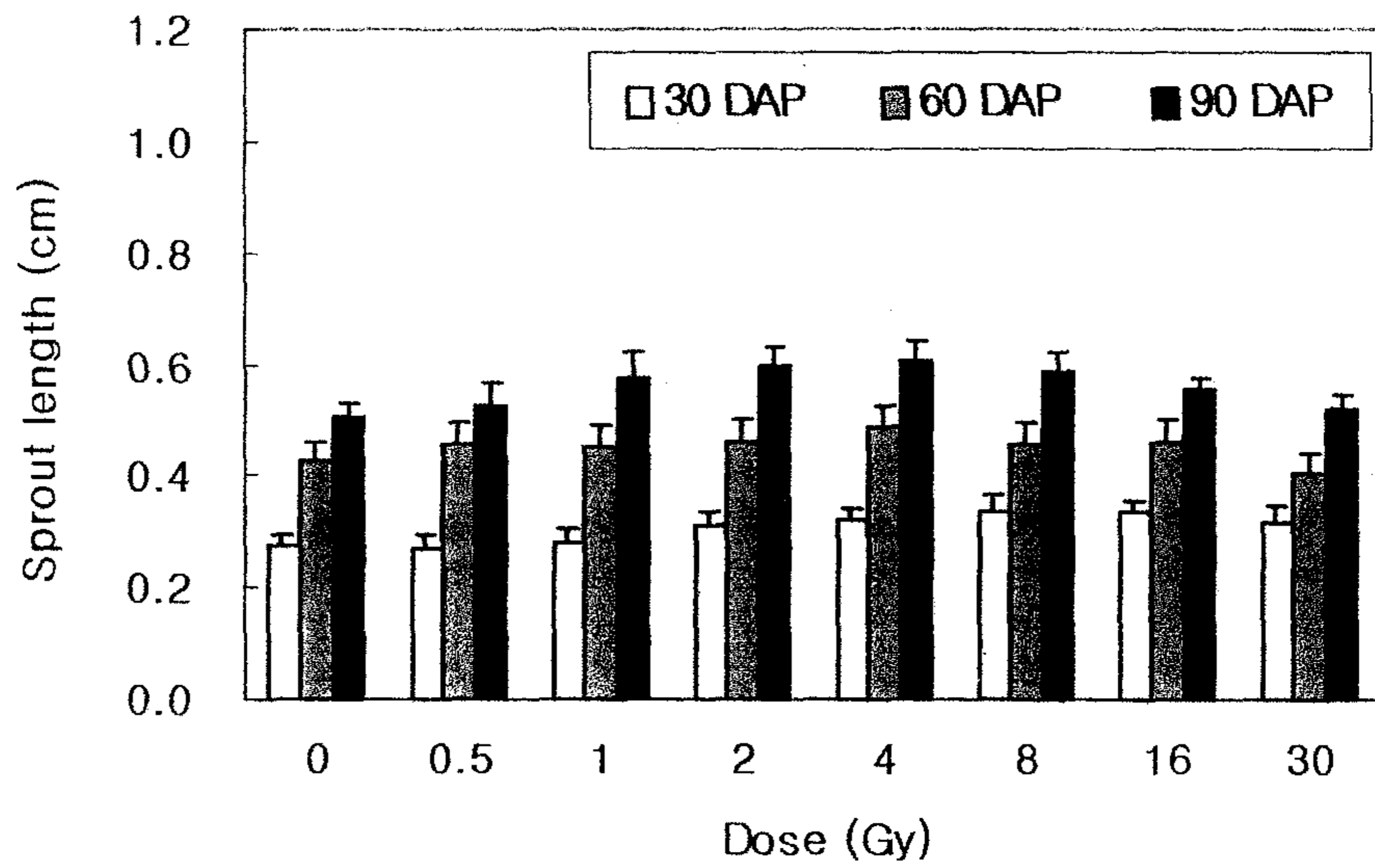


Fig. 40. Effect of low dose gamma radiation on the sprout length of microtuber of "Superior" with different storage duration. Microtubers were stored at 5°C under dark condition. DAP : days after production. Bars represent means  $\pm$  standard error.

온실생육과 수량에 대한 저선량 방사선 효과는 다음과 같다. 저선량 감마선 조사가 저온 저장한 대지 감자 소괴경의 생육에 미치는 영향을 조사한 결과(표 37), 파종 30일 후에 조사한 유묘 초장에서 15일 저장구는 2 Gy에서 15.0 cm로 대조구의 13.2 cm에 비해 14%( $p < 0.01$ )의 유의성있는 증가를 보였으며 0.5 Gy와 4 Gy에서도 각각 14.4 cm와 14.5 cm로 9%와 10%의 증가를 보였다. 30일 저장구에서는 4 Gy에서 4.9 cm로 대조구의 4.7 cm에 비해 다소증가하였으나 45일 저장구는 별다른 증가 효과가 없었다. 생육조사에서 15일 저장구의 초장은 30 Gy를 제외한 모든 저선량 조사구에서 대조구의 120.9 cm에 비해 다소 증가하였으나 지상부 생체중은 별다른 증가를 보이지 않았다. 마디수에서도 0.5~8 Gy 조사구에서 대조구의 17.9 마디에 비해 2~4%의 증가를 보였다. 30일 저장구의 초장은 2~8 Gy에서 대조구의 26.0 cm에 비해 27.3~27.8 cm로 5~7%( $p < 0.05$ )의 유의성있는 증가를 보였으며 생체중은 2 Gy와 4 Gy에서 대조구의 17.4 g에 비해 다소 증가하였다. 45일 저장구의 초장은 1~8 Gy에서 대조구의 17.8 cm에 비해 4~9% 증가하였는데 특히 2 Gy에서 19.4 cm로 9%( $p < 0.05$ )의 유의성있는 증가를 보였다. 생체중은 1~4 Gy에서 대조구의 13.1 g과 비교해 3~6%, 마디수는 1~8 Gy에서 2~5% 증가하였다.

저선량 감마선이 대지 감자 소괴경의 수량에 미치는 영향을 조사한 결과(표 38), 15일 저장구의 식물체당 괴경수는 0.5 Gy에서 4.6개로 대조구의 4.0개와 비교하여 13% 증가하였고 2 Gy와 4 Gy에서도 각각 7%와 12% 증가하였으나 유의성은 없었다. 지름이 2 cm 이상되는 괴경의 수는 식물체당 괴경의 수와 같은 경향을 보였는데 0.5 Gy에서 2.6개로 대조구의 2.3개에 비해 15% 증가를 보였고, 2 Gy와 4 Gy에서도 각각 6%와 14% 증가하였다. 식물체당 괴경중에서는 0.5 Gy에서 74.3 g으로 대조구의 63.1 g에 비해 18% ( $p < 0.05$ )의 유의성있는 증가를 보였고 다음이 4 Gy 조사구로 10% 증가하였다. 30일 저장구의 괴경수는 2~8 Gy 조사구에서 대조구의 4.8개와 비교하여 5~12% 증가하였는데 특히 4 Gy에서 12%( $p < 0.05$ )의 유의성있는 증가를 보였고 지름 2 cm 이상되는 괴경수는 2~16 Gy 조사구에서 3~10% 증가를 보였는데 특히 4 Gy가 3.0개로 가장 높게 대조구에 비해 10% 증가하였다. 괴경중에 있어서는 대조구의 32.9 g에 비해 4 Gy 조사구에서 23%( $p < 0.05$ )의 유의성있는 증가를 보였고 2 Gy와 8 Gy에서도 9%와 7% 증가하였다. 45일 저장구의 식물체당 괴경수는 2 Gy에서 5.4개로 대조구의 4.8개에 비교하여 11%( $p < 0.05$ ) 정도 유의성있는 증가를 보였고 4 Gy에서도 5% 정도 증가하였다. 지름 2 cm 이상되는 괴경수는 4 Gy에서 2.3개로 대조구의 2.0개와 비교

해 13% 증가하였고 1 Gy와 2 Gy에서도 각각 5%와 8%의 증가를 보였다. 괴경중에 있어서는 대조구의 24.2 g에 비해 2 Gy와 4 Gy에서 각각 26.9 g과 27.2 g으로 11%와 13% 증가하였다.

저선량 감마선 조사가 저온 저장한 수미 감자 소괴경의 생육에 미치는 영향을 조사한 결과(표 39), 파종 30일 후에 조사한 유묘 초장에서 30일 저장구는 4 Gy 조사구에서 대조구에 비해 9%의 증가를 보였고, 60일 저장구에서는 0.5 ~4 Gy에서 3~7%, 90일 저장구에서는 4 Gy와 16 Gy 조사구에서 대조구보다 6%의 증가를 보였다. 생육조사에서 30일 저장구의 초장은 2 Gy와 4 Gy에서 대조구보다 각각 4%와 5% 증가하였고 생체중은 2~8 Gy에서 대조구의 6.0 g에 비해 11~14%의 증가를 보였다. 60일 저장구에서 초장은 0.5~4 Gy 조사구에서 6~13%의 증가를 보였는데 특히 0.5 Gy에서 11.7 cm로 대조구의 10.4 cm에 비해 13%( $p<0.05$ )의 유의성있는 증가를 보였다. 생체중은 0.5 Gy에서 5.7 g으로 대조구의 4.5 g에 비해 27%( $p<0.05$ )로 유의성있게 증가하였고, 1 Gy와 2 Gy에서도 각각 15%와 13% 증가를 보였다. 90일 저장구의 초장은 4 Gy와 8 Gy에서 대조구의 12.7 cm에 비해서 각각 5%와 4%의 증가를 보였고 생체중도 4 Gy와 8 Gy에서 각각 5.5 g과 5.3 g으로 대조구의 5.1 g에 비해서 9%와 6% 정도 증가하였으나 통계적으로 유의성은 없었다.

저선량 감마선이 수미 감자 소괴경의 수량에 미치는 영향을 조사한 결과는 표 40에서와 같다. 30일 저장구의 경우 식물체당 괴경수는 2 Gy와 4 Gy에서 각각 3.8개와 3.5개로 대조구의 3.3개와 비교해 14%와 7%의 증가를 보였고 지름이 2 cm 이상되는 괴경수에 있어서는 2 Gy와 4 Gy에서 각각 1.14개와 1.16개로 대조구의 1.0개와 비교해 14%와 16%의 증가를 보였다. 괴경중은 2~8 Gy 조사구에서 대조구의 14.5 g에 비해 9~12% 증가하였는데 특히 4 Gy에서 16.2 g으로 가장 높은 12% 증가하였으나 통계적으로 유의성은 없었다. 60일 저장구에서 식물체당 괴경수는 0.5 Gy와 1 Gy에서 각각 4.4개와 4.3개로 대조구의 3.4개와 비교해 29%( $p<0.05$ )와 25%( $p<0.05$ )의 유의성있는 증가를 보였다. 지름 2 cm 이상되는 괴경수에 있어서는 0.5~4 Gy에서 대조구에 비해 5~8%의 증가를 보였고 괴경중에 있어서는 0.5~4 Gy 조사구에서 대조구의 12.4 g에 비해 10~26%의 증가를 보였으며 특히 0.5 Gy 조사구에서 15.7 g으로 26%( $p<0.05$ )의 유의성있는 증가를 보였다. 90일 저장구의 식물체당 괴경수는 4 Gy에서 4.1개로 대조구의 3.6개에 비해 15% 증가하였고, 2 Gy와 16 Gy에서도 각각 8%와 11% 증가하였다. 지름 2 cm 이상되는 괴경수에 있어서는 4 Gy와 16 Gy에서 대조구에 비해 8%의 증가를 보였고 괴경중에서는 4 Gy에서 16.9 g으로 대조구의 15.1 g에 비해 12% 증가하였는데



2 Gy와 16 Gy에서도 각각 11%와 10%의 증가를 보였으나 유의성은 없었다.

Kuzin 등<sup>32)</sup>은 저선량 감마선을 조사한 채소 원예 작물에 대한 연구에서 발아와 생육촉진 효과를 보고하였다. Kaindl과 Rosner<sup>79)</sup>는 옥수수 종자에 저선량 방사선 조사시 종자의 발아율이 증가한다고 보고하였으며, Caldera<sup>81)</sup>는 옥수수 식물체의 생육촉진 및 수량증가를 보고하였다. Sparrow와 Christensen<sup>2)</sup>의 저선량 수준인 3 Gy의 감마선이 감자의 수확량을 증가시킨다는 보고 이후, Caldera<sup>84)</sup>는 1~6 Gy의 감마선 조사에서, Suess와 Grosse<sup>20)</sup>는 4~8 Gy 조사에서 감자의 발아 촉진, 휴면기간 단축, 수량증가에 대한 효과를 보고하였으며, Avakyan 등<sup>23)</sup>과 Johson<sup>24)</sup>은 저선량 X선 조사에서 감자 괴경의 크기 증대 및 수량의 증가에 대한 보고를 하였다. 본 실험에서도 저선량 감마선에 의한 감자의 맹아율 촉진과 생육 및 수량의 증가 효과를 보여 주었는데, 대지 품종은 2, 4, 8 Gy에서 맹아율의 촉진 및 생육과 수량의 증대를 가져왔고, 수미 품종의 맹아율은 2 Gy와 4 Gy에서 촉진되고 4 Gy에서 생육 및 수량의 증가 효과를 가져왔다.

**Table 37.** Effect of low dose gamma radiation on the growth of microtuber of "Dejima" with different storage duration

Dose (Gy)	Seedling height <sup>†</sup> (cm)			Plant height <sup>‡</sup> (cm)			No. of nodes <sup>‡</sup> /plant			Foliage weight <sup>‡</sup> (g/plant)		
	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45
0	13.2	4.7	4.2	120.9	26.0	17.8	36.9	12.6	12.8	74.1	17.4	13.1
0.5	14.4*	4.3	4.2	125.6	26.3	18.1	18.6	13.0	12.9	76.1	17.2	12.9
1	12.8	4.5	4.1	124.1	26.0	18.6	18.2	13.0	13.2	71.7	17.4	13.5
2	15.0**	4.7	4.1	123.2	27.8*	19.4*	18.2	13.1	13.5	73.3	18.2	13.9
4	14.5*	4.9	4.4	126.4	27.5*	18.6	18.6	13.0	13.4	74.6	18.2	13.9
8	12.1	4.6	4.1	125.5	27.3*	19.0	18.2	13.1	13.1	74.6	16.9	13.2
16	12.1	4.5	3.9	125.2	23.1	16.3	17.9	12.4	12.6	73.7	14.1	11.3
30	11.4	4.3	3.6	113.0	23.2	16.7	17.8	12.6	12.5	73.0	15.1	11.5

Microtubers were stored at 5°C under dark condition.

Planting date : 15 - Mar. 31, 2000, 30 - Dec. 1, 1999, 45 (days of storage duration) - Dec. 1, 1999.

†, ‡ : 30 and 90 days after planting, respectively.

\*, \*\* : Significant at 5% and 1% level, respectively.

**Table 38.** Effect of low dose gamma radiation on number of tubers and yield of microtuber of "Dejima" with different storage duration

Dose (Gy)	No. of tuber/plant (≥2 cm)			No. of tuber/plant (Total)			Tuber weight (g/plant)		
	15	30	45	15	30	45	15	30	45
0	2.3	2.7	2.0	4.0	4.8	4.8	63.1	32.9	24.2
0.5	2.6	2.8	2.1	4.6	4.5	4.8	74.3*	33.2	24.5
1	2.1	2.7	2.2	3.7	4.5	4.8	53.5	33.2	24.1
2	2.4	2.9	2.2	4.3	5.0	5.4*	63.7	35.9	26.9
4	2.6	3.0	2.3	4.5	5.3	5.1*	69.4	40.3*	27.2
8	2.3	2.8	1.9	4.3	5.1	4.9	58.7	35.1	21.8
16	2.4	2.8	1.8	3.8	4.7	4.8	63.1	34.0	21.7
30	2.3	2.5	1.8	4.1	4.5	4.1	61.2	33.3	19.2

Microtubers were stored at 5°C under dark condition. Planting date : 15 - Mar. 31, 2000, 30 - Dec. 1, 1999  
45 (days of storage duration) - Dec. 1, 1999. \* : Significant at 5% level.

**Table 39.** Effect of low dose gamma radiation on the growth of microtuber of "Superior" with different storage duration

Dose (Gy)	Seedling height <sup>†</sup> (cm)			Plant height <sup>‡</sup> (cm)			No. of nodes <sup>‡</sup> /plant			Foliage weight <sup>‡</sup> (g/plant)		
	30	60	90	30	60	90	30	60	90	30	60	90
0	4.2	5.0	4.3	13.1	10.4	12.7	6.9	6.8	6.6	6.0	4.5	5.1
0.5	4.3	5.2	4.2	13.4	11.7*	11.6	6.8	6.9	6.4	5.8	5.7*	4.8
1	4.2	5.1	4.3	13.0	11.0	11.8	7.2	6.8	6.7	6.2	5.2	5.1
2	4.3	5.4	4.4	13.6	11.1	12.8	7.1	7.0	6.7	6.8	5.1	5.2
4	4.6	5.3	4.6	13.7	10.0	13.3	7.2	6.7	6.5	6.6	4.6	5.5
8	4.4	4.9	4.3	13.1	10.0	12.8	7.2	6.7	6.5	6.8	4.7	5.1
16	4.2	4.6	4.6	13.0	9.5	13.2	6.7	6.1	6.6	6.1	4.2	5.3
30	4.2	4.2	4.1	12.3	8.9	12.6	6.7	6.6	6.1	5.4	3.8	5.0

Microtubers were stored at 5°C under dark condition.

Planting date : 30, 60, 90 (days of storage duration) - Dec. 1, 1999.

†, ‡ ; 30 and 90 days after planting, respectively. \* : Significant at 5% level.

**Table 40.** Effect of low dose gamma radiation on number of tubers and yield of microtuber of "Superior" with different storage duration

Dose (Gy)	No. of tuber/plant (≥2 cm)			No. of tuber/plant (Total)			Tuber weight (g/plant)		
	30	60	90	30	60	90	30	60	90
0	1.00	1.05	1.16	3.3	3.4	3.6	14.5	12.4	15.1
0.5	0.88	1.12	1.03	3.1	4.4*	3.5	13.5	15.7*	14.6
1	0.86	1.13	1.00	3.2	4.3*	3.5	14.9	14.8	13.6
2	1.14	1.11	1.21	3.8	3.5	3.8	16.1	13.7	16.7
4	1.16	1.10	1.24	3.5	3.6	4.1	16.2	12.7	16.9
8	1.04	1.05	1.13	3.3	3.4	3.3	15.9	12.5	14.1
16	0.99	0.92	1.25	3.0	3.2	3.9	14.5	12.4	16.6
30	0.91	1.00	1.13	3.0	3.5	3.7	13.4	11.4	14.7

Microtubers were stored at 5°C under dark condition.

Planting date : 30, 60, 90 (days of storage duration) - Dec. 1. 1999.

\* : Significant at 5% level.

#### 다. 실온 저장한 감자 기내 소괴경의 휴면 타파와 생육

파종적기에 생산하지 못한 기내 유기 감자 소괴경은 여러가지 물리적·화학적 방법으로 휴면타파하여 파종시기를 조절하고 있다. 저선량 방사선이 대지 감자 소괴경의 휴면조절에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실온에서 15일, 30일, 45일 동안 저장한 후 저선량 감마선을 조사하여 실온저장하면서 맹아 발생율을 조사한 결과는 그림 41과 같다. 15일 저장한 소괴경에서는 발아초기에 0.5, 8, 16, 30 Gy 조사구에서 빠른 맹아 출현을 보였으며 방사선 조사 후 28일에는 2 Gy 조사구에서 맹아 출현율이 85.7%로 대조구 71.4% 보다 20.0% 증가하였다. 또한 30일 저장구의 경우 4 Gy와 8 Gy 조사구에서 초기에 대조구보다 빠른 맹아 출현을 보였는데 방사선 조사 후 8일에 각각 63.3%와 60.0%로 대조구 50.0% 보다 20.0%와 26.6% 증가하였으며, 45일 저장구에서는 방사선 조사 후 13일에 8 Gy와 16 Gy에서 각각 71.4%로 대조구 57.1%에 비해 25.0% 증가하였다. 소괴경의 맹아 생장에 미치는 감마선 조사 효과는(그림 42), 15일 저장구의 경우 8 Gy와 16 Gy에서 대조구 0.41 cm에 비해 각각 20%( $p < 0.05$ )와 11%의 생장촉진 효과를 보였다. 30일 저장구에서는 2~16 Gy 조사구가 대조구 0.49 cm에 비해 8~12% 증가하였는데 특히 4 Gy와 16 Gy에서 각각 12%( $p < 0.05$ )와 11%( $p < 0.05$ )로 유의성있는 생장촉진효과를 보였으며, 45일 저장구는 2 Gy와 16 Gy 조사구에서 대조구 0.61 cm에 비해 7~8% 증가하였다. 대지 감자 소괴경의 저장기간에 따른 맹아율과 맹아신장에 미치는 저선량 감마선의 조사효과는 15일 저장구의 경우는 8 Gy 조사구가, 30일 저장구에서는 2 Gy와 4 Gy 조사구가, 45일 저장구는 2 Gy와 16 Gy 조사구가 가장 높았으나 저장기간별로는 비슷한 증가효과를 보여 뚜렷한 경향을 알 수 없었다.

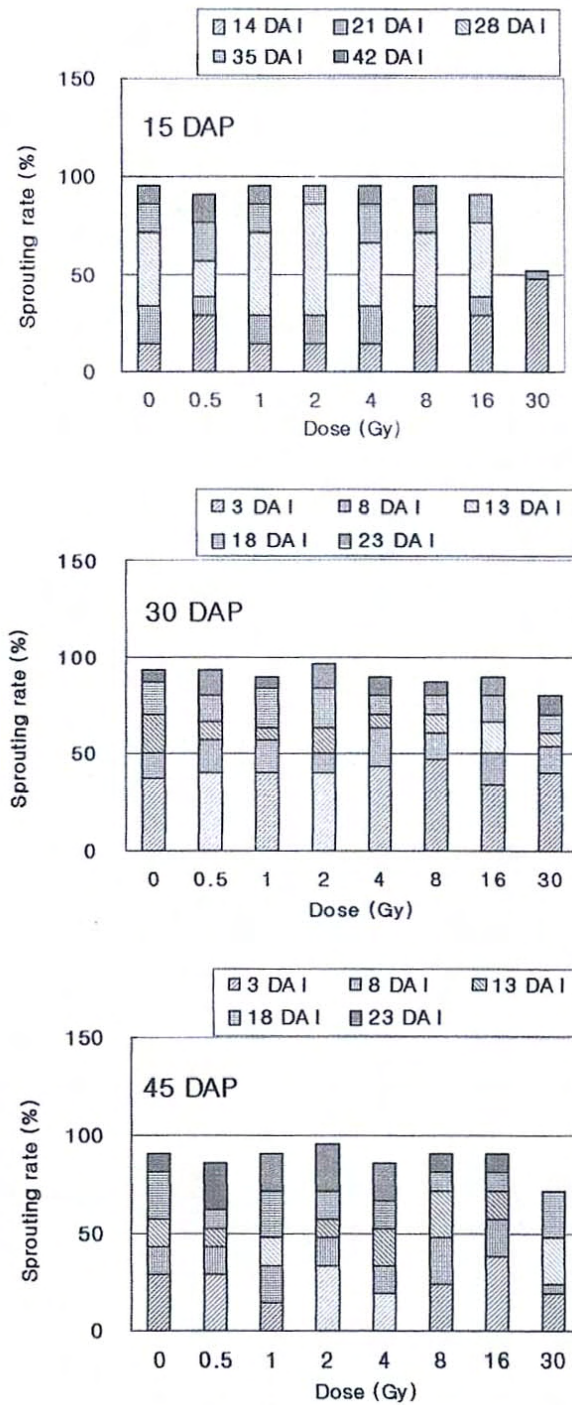
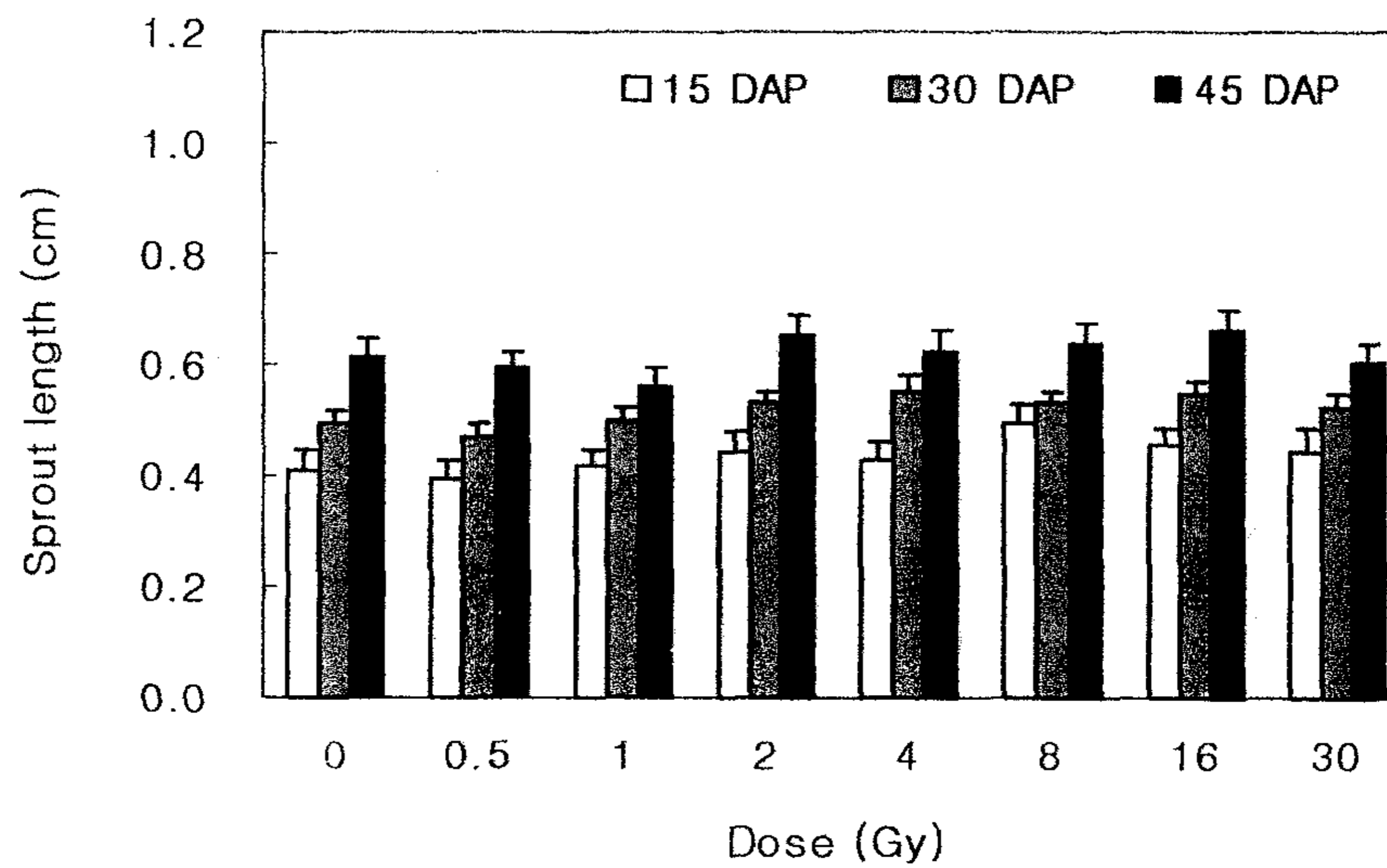


Fig. 41. Effect of low dose gamma radiation on the sprouting rate of microtuber of "Dejima" with different storage duration. Microtubers were stored at 18~25 °C under light condition after gamma irradiation. DAP ; days after production. DAI ; days after gamma irradiation.



**Fig. 42.** Effect of low dose gamma radiation on the sprout length of microtuber of "Dejima" with different storage duration. Microtubers were stored at 18~25 °C under light condition after gamma irradiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors. DAP : days after production. \* : Significant at 5% level.



수미 감자 소괴경의 휴면조절에 미치는 저선량 감마선 조사효과를 조사한 결과(그림 43), 30일 저장구의 경우 대조구를 비롯한 모든 저선량 조사구에서 저조한 맹아율을 보였다. 맹아 출현은 대조구에 비해 0.5, 4, 8 Gy 조사구에서 빠르게 나타났고 방사선 조사 후 38일에는 0.5 Gy와 4 Gy 조사구에서 72.4%로 대조구 65.5% 보다 10.5% 증가하였다. 또한 60일 저장구는 4 Gy 조사구에서 빠른 맹아출현을 보여 방사선 조사 후 24일에 맹아율이 80.0%로 대조구 70.0%에 비해 14.3% 증가하였다. 90일 저장구에서도 4 Gy 조사구에서 방사선 조사 후 17일에 대조구 75.0%에 비해 13.3% 증가한 85.0%로 저선량 조사구중 가장 높았다. 수미 감자 소괴경의 맹아 생장에 미치는  $\gamma$ 선 조사효과는 그림 44에서와 같다. 30일 저장구의 경우는 0.5 Gy에서 대조구 0.29 cm와 비교하여 12% 증가하였고, 60일 저장에서는 2 Gy와 4 Gy에서 대조구 0.53 cm에 비해 각각 7%와 15%( $p < 0.05$ ) 증가하였다. 90일 저장구에서의 맹아 길이는 2~8 Gy에서 대조구의 0.74 cm에 비해 8~16% 증가하였는데 특히 4 Gy에서 유의성있는 증가 효과를 보였다. 수미품종 소괴경의 저장기간에 따른 맹아율과 맹아신장에 미치는 저선량 조사효과는 30일 저장구의 경우 0.5 Gy 조사구가, 60일과 90일 저장구에서는 4 Gy 조사구가 가장 높았으나 각 선량별로는 비슷한 증가효과를 보여 저장기간에 따른 뚜렷한 경향을 알 수 없었다.

김 등<sup>65)</sup>과 Luckey<sup>3)</sup>는 저선량 방사선 조사에 의한 채소 종자의 발아율과 초기생육촉진에 대하여 보고하였으며, 그 적정선량은 작물 종과 종자 상태에 따라서 다르다고 하였다. Sparrow<sup>21)</sup>와 Caldera<sup>84)</sup>는 저선량 감마선 3 Gy 조사에 의해 감자 괴경의 발아와 맹아생장 촉진 등의 효과를 보고하여 감자의 휴면조절 가능성을 시사하였다. 또한 Metlitskii<sup>85)</sup>는 10 Gy 이하의 저선량 감마선은 감자 발아를 촉진시키나 20~30 Gy 정도의 중간선량은 지연시키며 100 Gy 이상의 고선량은 저해한다고 하였고, Avakyan 등<sup>23)</sup>은 3 Gy와 10 Gy의 X선 조사가 감자 괴경의 휴면타파에 효과가 있음을 보고하였다.

본 실험에서도 저선량 방사선 조사에 의해 맹아율과 맹아길이가 증가하였는데 대지품종은 대체로 2, 4, 8 Gy에서 맹아율이 촉진되고 수미품종은 2 Gy와 4 Gy에서 촉진되어 저선량 방사선에 의한 감자 휴면조절의 가능성을 보여주었다.

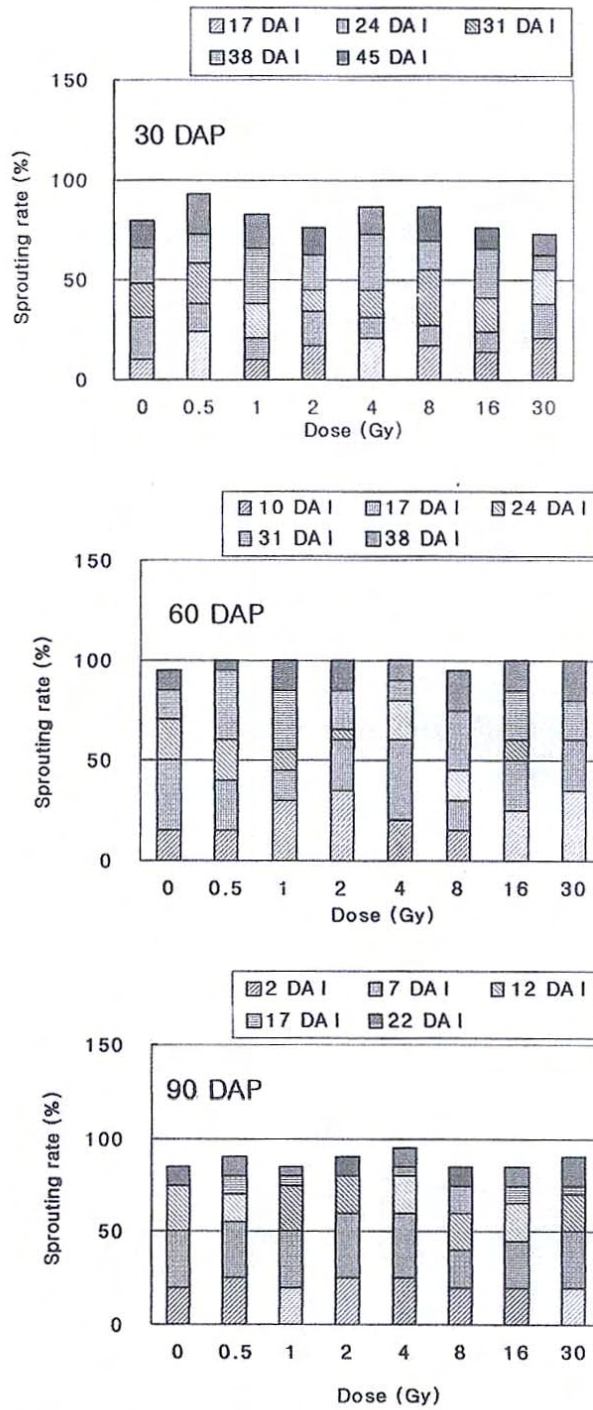
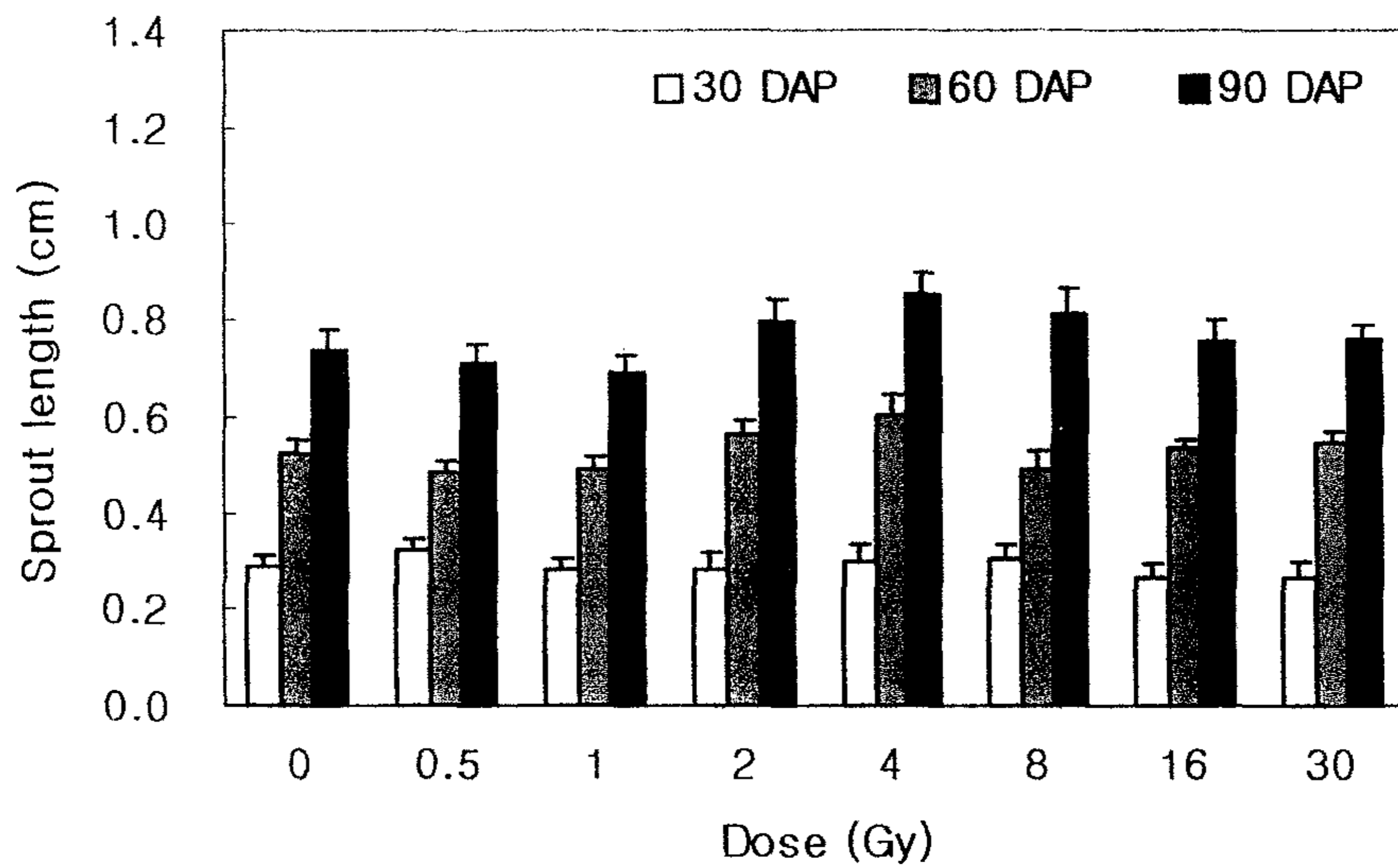


Fig. 43. Effect of low dose gamma radiation on the sprouting rate of microtuber of "Superior" with different storage duration. Microtubers were stored at 18~25 °C under light condition after gamma radiation. DAP ; days after production. DAI ; days after gamma radiation.



**Fig. 44.** Effect of low dose gamma radiation on the sprout length of microtuber of "Superior" with different storage duration. Microtubers were stored at 18~25 °C under light condition after gamma radiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors. DAP ; days after production. \* ; Significant at 5% level.

온실생육과 수량에 대한 저선량 방사선 효과는 다음과 같다. 저선량 감마선 조사가 실온 저장한 대지 감자 소괴경의 온실생육에 미치는 영향을 조사한 결과는 표 41에서와 같다. 파종 30일 후에 조사한 유묘 초장에서 15일 저장구는 8 Gy와 16 Gy에서 14.5 cm로 대조구 13.8 cm에 비해 5% 증가하였으나 30일 저장구와 45일 저장구에서는 별다른 증가 효과가 없었다. 파종 후 90일에 측정한 생육조사에서 15일 저장구의 초장은 4 Gy와 8 Gy에서 각각 49.1 cm와 50.9 cm로 대조구 44.4 cm에 비해 11%와 15% 증가하였다. 지상부 생체중은 8 Gy에서 7.4 g으로 대조구 7.0 g과 비교해 5% 증가하였으며, 마디수는 8 Gy에서 15.9 마디로 대조구 14.9 마디보다 7%( $p<0.05$ ) 정도 유의성있는 증가를 보였다. 또한 30일 저장구의 경우, 초장은 16 Gy에서 대조구 94.6 cm 비해 98.1 cm로 4% 증가하였고 생체중은 4 Gy와 8 Gy에서 대조구 42.4 g에 비해 5~6% 증가하였다. 45일 저장구의 초장은 30 Gy를 제외한 모든 저선량 조사구에서 2~7%의 증가를 보였는데 특히 16 Gy에서 42.9 cm로 대조구 40.1 cm에 비해 7% 증가하였다.

저선량 감마선 조사가 대지 감자 소괴경의 온실재배시 수량에 미치는 영향을 조사한 결과(표 42), 15일 저장구의 식물체당 괴경수에 있어서는 4 Gy와 8 Gy에서 각각 3.5개와 3.6개로 대조구 3.1개에 비해 13%와 16%( $p<0.05$ )의 유의성있는 증가를 보였다. 씨감자용으로 사용하는 지름이 2 cm 이상 되는 괴경수는 8 Gy에서 0.94개로 대조구 0.75개와 비교해 25% 정도 증가하였으며 4 Gy와 16 Gy에서는 각각 0.86개와 0.88개로 14%와 17%의 증가를 보였다. 각 식물체의 괴경중은 4~16 Gy에서 대조구 10.0 g에 비해 17~21% 증가하였는데 특히 8 Gy에서 12.1 g으로 21%( $p<0.05$ )의 유의성있는 증가 효과를 보였다. 30일 저장구의 괴경수에 있어서는 0.5, 4, 8, 16 Gy에서 대조구 3.5개에 비해 5~15% 증가하였는데 특히 4 Gy에서 4.0개로 15% 증가하였다. 2 cm 이상의 괴경수는 4~16 Gy에서 대조구에 비해 7~9% 증가하였다. 괴경중에서도 괴경수에서와 비슷한 증가를 나타내어 4 Gy에서 34.7 g으로 대조구 30.3 g에 비해서 가장 높은 15%의 증가를 보였다. 45일 저장구의 수량 조사에서 괴경수는 4 Gy와 16 Gy에서 3.5개로 대조구 3.2개에 비해 10% 증가하였으며 2 cm 이상되는 괴경수는 16 Gy에서 0.82개로 대조구 0.71개에 비해 14%( $p<0.05$ ) 정도 유의성있는 증가를 보였다. 괴경중에서도 4~16 Gy에서 대조구 10.1 g에 비해 9~13% 증가하였는데 특히 4 Gy에서 11.5 g으로 13%( $p<0.05$ )의 유의성있는 증가를 보였다.

저장기간에 따른 대지 감자 소괴경의 생육에 미치는 저선량 감마선 조사 효과는 15일 저장구의 경우는 8 Gy 조사구가, 30일 저장구에서는 2 Gy와 4

Gy 조사구가, 45일 저장구는 4 Gy와 16 Gy 조사구에서 가장 높아 저장기간에 따라 적정선량은 달랐으나 비슷한 생장 증가효과를 보여 괴경의 저장기간에 따른 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다.

저선량 감마선을 조사하여 실온 저장한 수미 품종의 온실생육을 조사한 결과는 표 43에서와 같다. 파종 30일 후에 조사한 유묘 초장에서 30일 저장구는 0.5 Gy에서 19.5 cm로 대조구 18.1 cm에 비해 8%( $p<0.05$ ) 유의성있게 증가하였고 60일 저장구에서는 4 Gy에서 9.7 cm로 대조구 9.0 cm에 비해 8% 증가하였다. 또한 90일 저장구는 4 Gy에서 5.7 cm로 대조구 5.0 cm에 비해서 14%( $p<0.05$ ) 유의성있는 증가를 보였다. 파종 90일 후의 생육 조사에서 30일 저장구의 초장은 0.5 Gy에서 84.4 cm로 대조구 80.5 cm에 비해 5%( $p<0.05$ ) 유의성있게 증가하였고 지상부 생체중도 0.5 Gy에서 36.4 g으로 대조구 33.5 g에 비해 8% 정도 증가했다. 60일 저장구에서의 초장은 30 Gy를 제외한 모든 저선량 조사구에서 양호한 생육을 보였는데 특히 4 Gy에서 27.5 cm로 대조구 23.5 cm에 비해 17%( $p<0.05$ ) 유의성있는 증가를 보였으며, 생체중도 4 Gy에서 가장 양호하게 4.5 g으로 대조구 4.1 g에 비해 9% 증가하였다. 90일 저장구의 경우 초장은 0.5 Gy와 4 Gy에서 각각 16.2 cm와 16.7 cm로 대조구 14.8 cm와 비교해서 9%와 12% 증가하였고 생체중에서도 초장과 마찬가지로 4 Gy에서 7.7 g으로 대조구 6.6 g에 비해 16%( $p<0.05$ ) 유의성있는 증가를 하였다.

저선량 감마선 조사가 수미 감자 소괴경의 온실수량에 미치는 영향을 조사한 결과(표 44), 30일 저장구의 경우 식물체당 괴경수는 0.5 Gy에서 4.5개로 대조구 3.8개에 비해 19% 증가하였고 지름이 2 cm 이상되는 괴경수에서도 0.5 Gy에서 1.13개로 대조구 0.86개에 비해 31% 증가하였다. 괴경중에서는 0.5, 1, 8 Gy에서 양호한 증가를 보였는데, 특히 0.5 Gy에서 18.9 g으로 대조구 14.2 g에 비해 33%( $p<0.05$ ), 다음이 8 Gy에서 18.0 g으로 27%( $p<0.05$ )의 유의성있는 증가를 보였다. 60일 저장구의 식물체당 괴경수는 4 Gy에서 3.2개로 대조구 2.7개와 비교해 18%( $p<0.05$ )의 유의성있는 증가를 보였으며 2 cm 이상의 괴경수도 4 Gy에서 0.58개로 대조구 0.50개와 비교해 17% 증가하였다. 괴경중에서는 2 Gy와 4 Gy에서 대조구 9.8 g에 비해 각각 10.9 g과 12.0 g으로 12%와 23% 증가하였다. 90일 저장구의 수량은 0.5 Gy와 4 Gy에서 양호한 증가를 나타내었는데 괴경수는 0.5 Gy에서 5.0개로 대조구 3.9개에 비해 26%( $p<0.05$ ) 유의성있는 증가를 하였고 2 cm 이상의 괴경수는 4 Gy에서 1.52개로 대조구 1.32개에 비해 15% 증가하였다. 괴경중에서도 0.5 Gy에서 23.3 g으로 대조구의 18.6 g에 비해 26% 증가하였고

4 Gy에서는 21.6 g으로 16% 증가하였다.

저장기간에 따른 수미 감자 소괴경의 생육에 미치는 저선량 감마선 조사 효과는 30일 저장구의 경우는 0.5 Gy 조사구가, 60일 저장구에서는 4 Gy 조사구가, 90일 저장구는 0.5 Gy와 4 Gy 조사구가 가장 높아 저장기간에 따라 적정선량은 다른 경향을 보였으나 비슷한 생육 증가효과를 나타내어 소괴경의 실온 저장기간에 따른 저선량의 조사효과는 볼 수 없었다.

Miller와 Miller<sup>6)</sup> 및 Sheppard와 Evenden<sup>12)</sup>은 적정선량의 저선량 조사에 의해 작물의 초기 생육촉진 및 성장증대와 수량증가 효과를 보고하였다. Sparrow와 Christensen<sup>2)</sup>은 저선량 감마선 3 Gy 조사에서 감자의 수확량이 증가됨을, Avakyan 등<sup>23)</sup>은 저선량 X선 3 Gy와 10 Gy 조사에서 감자 괴경의 크기 증대와 수량증가 효과에 대해 보고하였다. 김 등<sup>83)</sup>의 보고에서도 감마선 4 Gy 조사에서 씨감자 수량의 뚜렷한 증가효과를 보였다.

본 실험에서도 저선량 감마선 조사에 의해 감자 식물체의 초장과 생체중 및 괴경수 등의 증가를 보여주었는데 그 효과가 품종별로 다르게 나타나 대지 품종은 대체로 4, 8, 16 Gy에서, 수미 품종은 0.5 Gy와 4 Gy에서 증가효과를 보였다.

**Table 41.** Effect of low dose gamma radiation on the growth of microtuber of "Dejima" with different storage duration

Dose (Gy)	Seedling height <sup>†</sup> (cm)			Plant height <sup>‡</sup> (cm)			Foliage weight <sup>‡</sup> (g/plant)			No. of nodes <sup>‡</sup> /plant		
	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45
0	13.8	29.8	12.5	44.4	94.6	40.1	7.0	42.4	6.1	14.9	18.9	13.9
0.5	12.6	29.8	11.6	44.9	93.7	41.5	5.9	40.7	6.0	13.3	17.9	14.1
1	13.5	29.6	11.4	44.1	92.9	41.1	6.4	41.0	5.8	14.2	17.6	14.3
2	13.4	29.5	12.1	45.4	98.1	42.2	6.9	43.5	6.0	14.6	18.6	14.3
4	14.1	30.3	12.4	49.1	96.6	41.8	7.0	44.9	6.1	15.1	18.7	14.2
8	14.5	28.3	12.3	50.9	96.4	42.5	7.4	44.4	5.9	15.9*	18.7	14.0
16	14.5	28.2	12.3	46.2	97.5	42.9	6.9	43.2	6.3	15.5	19.0	13.9
30	11.8	28.7	11.7	43.6	91.8	39.3	7.0	41.7	6.1	15.5	18.9	13.8

Microtubers were stored at 18~25 °C under light condition after  $\gamma$  irradiation.

Planting date : 15(days after storage duration) - Aug. 24, 1999, 30 - Arp. 30, 1999, 45 - Aug. 24, 1999. †, ‡ : 30 and 90 days after planting, respectively. \* : Significant at 5% level.

**Table 42.** Effect of low dose gamma radiation on number of tubers and yield of microtuber of "Dejima" with different storage duration.

Dose (Gy)	No. of tuber/plant (Total)			No. of tuber/plant (≥2 cm)			Tuber weight (g/plant)		
	15	30	45	15	30	45	15	30	45
0	3.1	3.5	3.2	0.75	2.23	0.71	10.0	30.3	10.1
0.5	2.5	3.7	3.2	0.56	2.24	0.73	8.5	31.6	9.6
1	2.5	3.4	3.4	0.62	2.08	0.71	10.2	29.3	10.3
2	3.0	3.6	3.3	0.82	2.12	0.71	10.6	28.7	10.2
4	3.5	4.0	3.5	0.86	2.43	0.79	11.7	34.7	11.5*
8	3.6*	3.8	3.4	0.94	2.38	0.73	12.1*	32.4	11.1
16	3.3	3.7	3.5	0.88	2.47	0.82*	11.7	32.0	11.2
30	3.1	3.4	3.1	0.79	1.97	0.66	10.4	27.0	9.9

Microtubers were stored at 18~25 °C under light condition after  $\gamma$  irradiation.

Planting date : 15(days after storage duration) - Aug. 24. 1999, 30 - App. 30. 1999, 45 - Aug. 24. 1999. \* : Significant at 5% level.



**Table 43.** Effect of low dose gamma radiation on the growth of microtuber of "Superior" with different storage duration

Dose (Gy)	Seedling height <sup>†</sup> (cm)			Plant height <sup>‡</sup> (cm)			Foliage weight <sup>‡</sup> (g/plant)			No. of nodes <sup>‡</sup> /plant		
	30	60	90	30	60	90	30	60	90	30	60	90
0	18.1	9.0	5.0	80.5	23.5	14.8	33.5	4.1	6.6	20.3	12.0	9.1
0.5	19.5*	8.6	5.0	84.4*	25.5	16.2	36.4	4.2	7.0	21.9*	12.1	9.3
1	17.9	8.2	5.1	76.3	25.1	15.5	32.7	4.3	6.0	20.2	12.4	9.0
2	17.6	8.8	5.2	78.4	26.8*	14.4	34.2	4.3	6.1	20.6	12.7	8.8
4	18.7	9.7	5.7*	83.5	27.5*	16.7	34.6	4.5	7.7*	20.2	12.5	9.4
8	18.4	8.6	4.9	80.6	26.0	15.2	33.9	4.0	6.8	20.4	12.3	9.0
16	16.8	8.3	4.4	76.4	26.3	13.1	32.9	4.0	5.7	20.5	12.6	8.6
30	17.3	7.5	4.2	73.7	23.1	13.3	31.4	3.6	5.8	19.5	11.8	9.0

Microtubers were stored at 18~25 °C under light condition after  $\gamma$  irradiation.

Planting date : 30(days after storage duration) - Arp. 30. 1999, 60 - Aug. 24. 1999, 90 - Dec. 1. 1999.† , ‡ ; 30 and 90 days after planting, respectively. \* ; Significant at 5% level.

**Table 44.** Effect of low dose gamma radiation on number of tubers and yield of microtuber of "Superior" with different storage duration

Dose (Gy)	No. of tuber/plant (Total)			No. of tuber/plant (≥2 cm)			Tuber weight (g/plant)		
	30	60	90	30	60	90	30	60	90
0	3.8	2.7	3.9	0.86	0.50	1.32	14.2	9.8	18.6
0.5	4.5	2.8	5.0*	1.13	0.45	1.41	18.9*	9.7	23.3
1	3.8	2.6	3.8	0.98	0.54	1.27	15.9	10.1	16.9
2	3.9	3.0	3.7	0.87	0.50	1.21	14.3	10.9	16.5
4	3.7	3.2*	4.3	0.85	0.58	1.52	14.5	12.0	21.6
8	3.9	2.6	3.8	1.07	0.41	1.23	18.0*	8.9	19.2
16	3.1	2.6	3.9	0.84	0.42	1.22	14.7	9.1	16.8
30	3.2	2.6	4.1	0.87	0.36	1.19	11.9	9.1	17.8

Microtubers were stored at 18~25 °C under light condition after  $\gamma$  irradiation.

Planting date : 30(days after storage duration) - Apr. 30, 1999, 60 - Aug. 24, 1999, 90 - Dec. 1, 1999. \* : Significant at 5% level.

## 라. 씨감자 “대지” 품종의 휴면타파와 생육

맹아율과 맹아생육에 대한 저선량 방사선 효과는 다음과 같다. 저선량 감마선이 대지 씨감자의 휴면 타파에 미치는 영향을 알아보기로 5°C, 암상태의 incubator에서 15일, 30일, 45일 동안 저장하여 저선량 감마선 조사한 후의 맹아율을 조사한 결과는 그림 45와 같다. 15일 저장구는 0.5 Gy를 제외한 모든 저선량 조사구에서 대조구에 비해 빠른 맹아 출현율을 보였는데 방사선 조사 후 25일(25 DAI)에 1, 2, 4, 8, 16 Gy에서 80~88%로 대조구의 68%에 비해 12~20% 정도의 증가를 보였다. 30일 저장구는 0.5, 1, 2, 16 Gy에서 빠른 맹아출현을 나타냈는데 방사선 조사 후 15일(15 DAI)에 0.5, 1, 2 Gy에서 80%~84%로 대조구의 72%에 비해 8~12% 정도의 맹아율 증가를 보였다. 45일 저장구에서는 0.5, 1, 2, 4 Gy에서 대조구에 비해 빠른 맹아 출현을 보였는데 방사선 조사 후 15일(15 DAI)에 1, 2, 4 Gy에서 88~92%로 대조구의 80%에 비해 8~12% 정도의 맹아율 증가를 보였다. 맹아출현은 모든 저장기간의 1 Gy와 2 Gy에서 증가효과가 있었다.

저선량 조사가 씨감자의 맹아길이에 미치는 효과는 그림 46에서 나타난 바와 같다. 15일 저장구에서는 2, 4, 8 Gy에서 대조구에 비해 각각 18% ( $p < 0.05$ ), 23% ( $p < 0.01$ ), 30% ( $p < 0.01$ ) 정도의 고도의 유의성있는 증가효과를 보였고, 30일 저장구에서는 2, 4, 8 Gy에서 각각 14% ( $p < 0.05$ ), 20% ( $p < 0.01$ ), 17% ( $p < 0.01$ ) 정도의 유의성있는 증가를 보였으며, 45일 저장구에서는 1, 2, 4 Gy에서 각각 7%, 8% ( $p < 0.05$ ), 14% ( $p < 0.01$ )의 유의성있는 증가를 보였다. 저장 기간별 맹아길이는 대체로 2 Gy와 4 Gy에서 유의성있는 증가효과를 보였다.

저선량 조사가 씨감자 괴경의 맹아수에 미치는 효과는 그림 47에서와 같다. 15일 저장구에서는 모든 저선량 조사구에서 뚜렷한 맹아수의 증가를 보였는데 특히 4, 8, 16, 30 Gy에서 대조구에 비해 70~100% ( $p < 0.001$ )의 고도의 유의성있는 증가를 보였고, 30일 저장구에서는 8, 16, 30 Gy에서 26%~48% ( $p < 0.001$ )의 높은 유의성있는 증가를 보였으며, 45일 저장구에서는 16 Gy와 30 Gy에서 25% ( $p < 0.05$ )의 높은 증가효과를 보였다. 저선량  $\gamma$ 선 조사한 대지 씨감자의 맹아수는 생산일로부터 저장 기간이 짧아질수록, 선량이 높아질수록 유의성있는 증가를 보였다. Luckey<sup>3)</sup>와 Kim & Lee<sup>61)</sup>는 저선량 방사선 조사에 의한 채소 종자의 발아율과 초기 생육촉진에 대하여 보고하였으며, Caldera<sup>84)</sup>와 Suess & Grosse<sup>20)</sup>는 저선량 감마선 조사한 감자의 연구에서 수량증가효과 및 발아촉진과 휴면기간의 단축으로 인한 1년에 여러번에 걸친 수확의 가능성을 보여 주었다. Metlitskii<sup>85)</sup>는 저선량 감마선이 감

자 발아를 촉진시키고 중간선량은 지연시키며 고선량은 저해한다고 하였다. 또한 Jaarma<sup>22)</sup>와 Avakyan 등<sup>23)</sup>은 감자 괴경에 X선 조사시 휴면타파에 대한 효과가 있음을 보고하였다.

본 실험에서도 저선량 방사선 조사에 의해 맹아율과 맹아수 및 맹아길이 증가하였는데, 특히 씨감자 저장기간에 상관없이 맹아율은 1 Gy와 2 Gy에서, 맹아수는 16 Gy와 30 Gy에서 유의성있는 효과를 보여 저선량 방사선에 의한 감자 휴면조절의 가능성을 보여주었다.

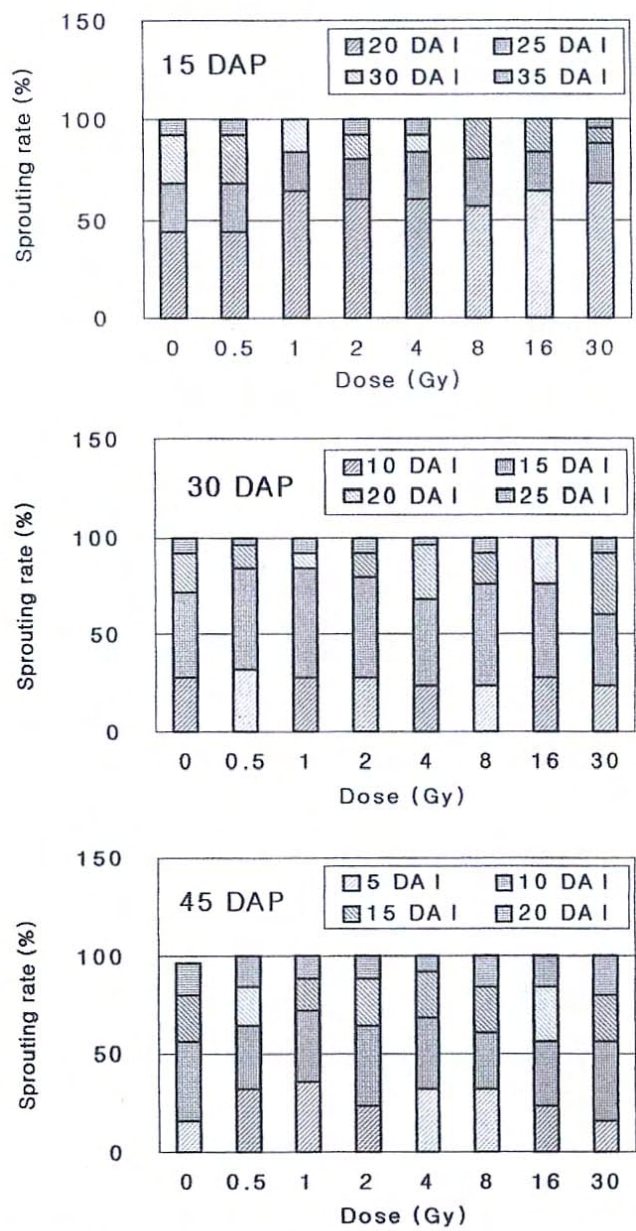


Fig. 45. Effect of low dose gamma radiation on the sprouting rate of minituber, Dejim cultivar, stored with different DAP at 5°C on dark condition. DAP ; days after production, DAI ; days after gamma radiation.

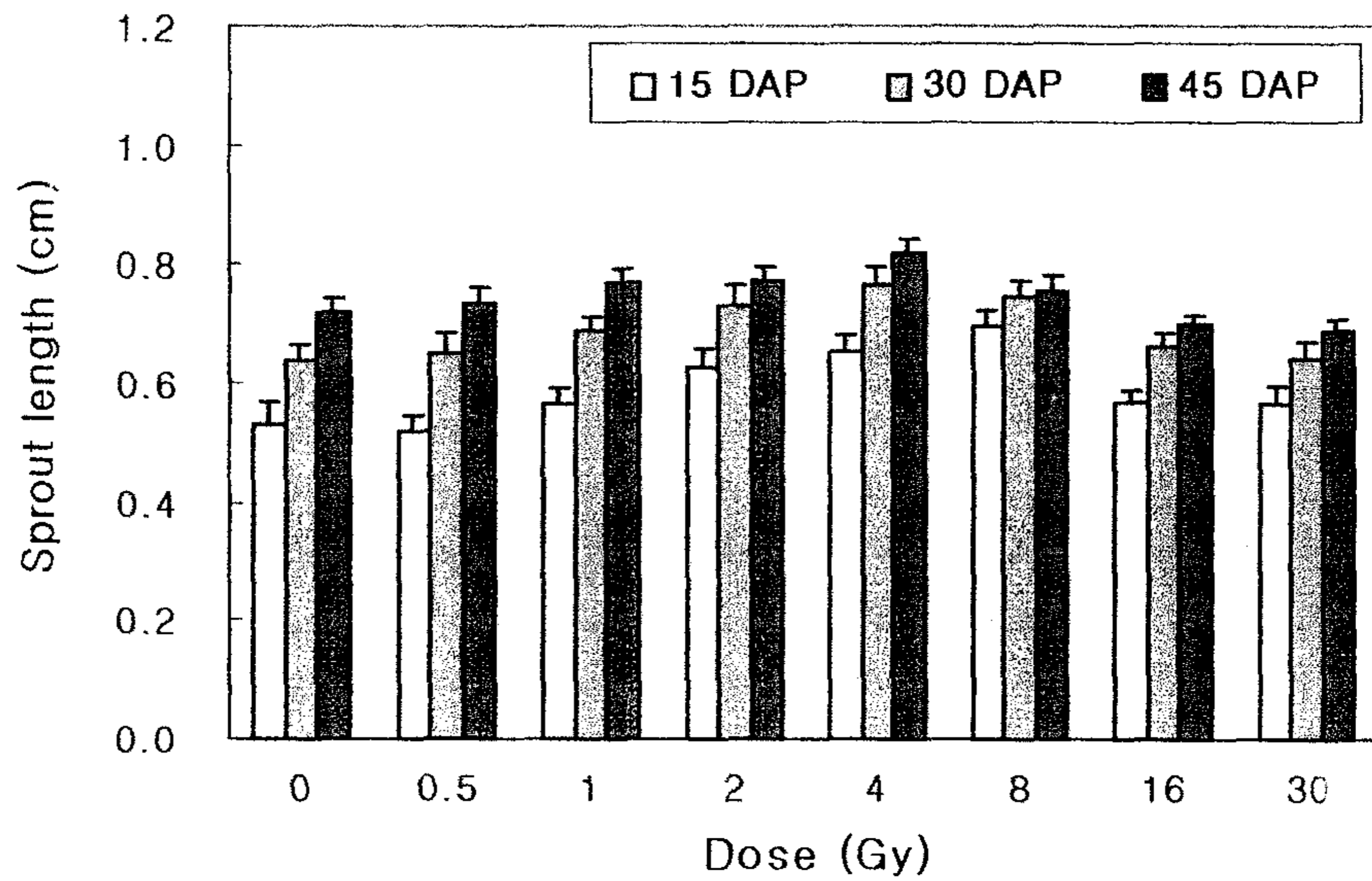


Fig. 46. Effect of low dose gamma radiation on the sprout length of minituber, Dejima cultivar, stored with different DAP at 5°C on dark condition. DAP ; days after production. Bars represent mean  $\pm$  standard errors.

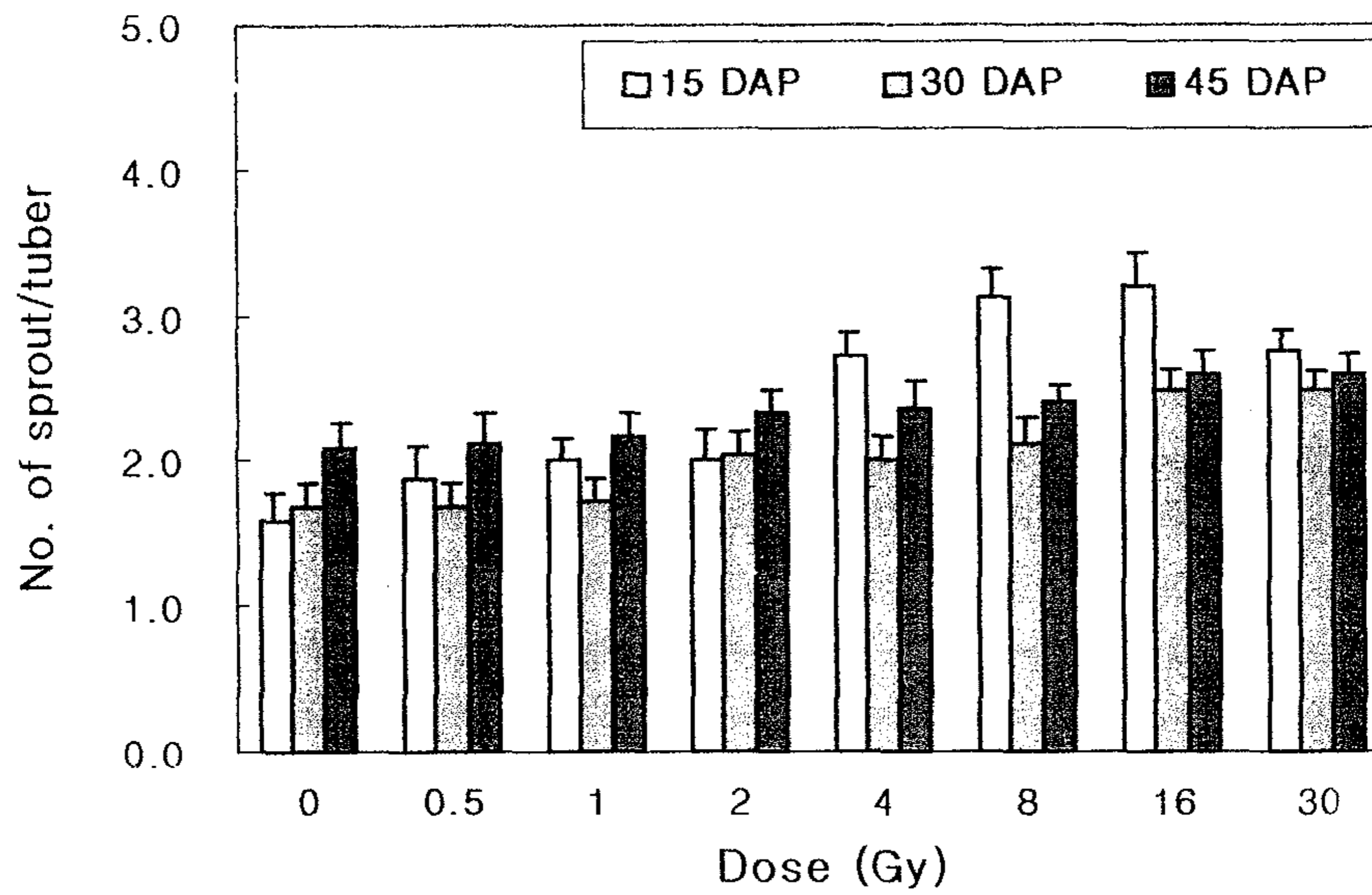


Fig. 47. Effect of low dose gamma radiation on No. of sprout of minituber, Dejima cultivar, stored with different DAP at 5°C on dark condition. DAP ; days after production. Bars represent means  $\pm$  standard errors.

포장생육과 수량에 대한 저선량 방사선 효과는 다음과 같다. 저장 기간이 다른 대지 씨감자에 저선량 감마선 조사가 포장생육과 수량에 미치는 영향을 조사한 결과는 표 45에서 보는 바와 같다. 파종 30일 후에 조사한 유묘 초장에서 15일 저장구의 경우는 8 Gy와 16 Gy에서 16.6 cm와 15.7 cm로 대조구의 14.5 cm에 비해 각각 15%( $p<0.05$ )와 8% 정도 증가하였고, 30일 저장구에서는 대조구의 15.4 cm에 비해 1 Gy에서 17.7 cm로 15%( $p<0.05$ ) 정도의 유의성있는 증가를 보였으며, 45일 저장구에서는 별다른 증가효과가 없었다.

저선량 감마선을 조사한 15일 저장구의 포장 수량구성요소중 식물체당 괴경수에 있어서는 4 Gy와 30 Gy에서 각각 14.2개와 14.1개로 대조구 13.0개에 비해 10%와 9% 정도 증가하였으며, 괴경중은 1, 2, 8, 16 Gy에서 대조구에 비해 5~8% 정도 증가하였다.

30일 저장구의 초장은 저선량 조사구가 대조구와 대체로 비슷한 생육을 보였고, 지상부 식물체 생체중은 0.5 Gy에서 대조구의 443.7 g에 비해 495.6 g으로 12% 정도 증가하였으며 마디수의 경우는 모든 저선량구에서 대조구에 비해 감소하였다. 식물체당 괴경수에 있어서는 0.5 Gy와 2 Gy에서 17.3개와 17.2개로 대조구의 16.3개보다 각각 6%와 5%의 증가를 보였으며, 괴경중은 대조구의 911 g과 비교해 0.5 Gy에서 1066 g으로 17% 정도 증가하였다. 30일 저장구에서는 대체로 0.5 Gy와 2 Gy에서 양호한 생육을 보였고 시험구 선량중 비교적 높은 선량에서는 저조한 포장생육을 보였다.

45 일 저장구에서의 초장은 대조구에 비해 모든 선량에서 유의성있는 증가효과를 보였는데, 특히 1 Gy에서 67.2 cm로 대조구의 61.3 cm에 비해 10% ( $p<0.01$ ) 정도로 가장 높은 증가효과를 보였으며, 지상부 생체중의 경우도 대조구에 비해 저선량 조사구가 뚜렷한 증가효과를 보였는데 0.5, 1, 4 Gy에서 639.6 g, 643.8 g, 650.0 g으로 대조구의 531.3 g에 비해 각각 20%, 21%, 22%( $p<0.05$ )로 모두 유의성있는 증가효과를 보였고, 마디수는 모든 선량에서 대조구의 18.8개에 비해 19.8~20.1개로 4~7%( $p<0.01$ )의 유의성있는 증가효과를 보였다. 식물체당 괴경수는 대조구의 14.2개에 비해 1 Gy와 4 Gy에서 17.2개로 21%( $p<0.05$ ) 정도 증가하였고, 괴경중도 다른 포장 구성요소와 마찬가지로 모든 선량에서 대조구에 비해 양호한 생육을 보였는데 특히, 4 Gy에서 대조구의 1037 g에 비해 1226 g으로 18% ( $p<0.05$ ) 정도의 유의성있는 증가효과를 보였다. 저선량  $\gamma$ 선 조사한 45일 저장구의 포장생육에 있어서는 다른 저장기간과 달리 모든 선량에서 대조구에 비해 뚜렷하게 유의성있는 생육증가 효과를 보였다. Miller & Miller<sup>6)</sup>와 Sheppard &



Evenden<sup>12)</sup>은 저선량 조사한 작물의 초기 생육촉진 및 생장증대와 수량증가에 대해 보고하였고 Menyhert & Balian<sup>25)</sup>은 저선량 감마선 조사가 감자에서 수량증가를 가져온다고 하였다. Avakyan 등<sup>23)</sup>과 Johson<sup>24)</sup>은 저선량의 X선 조사에서 감자 괴경의 크기 증대 및 수량의 증가에 대한 보고를 하였으나, Sprague & Lenz<sup>86)</sup>는 X선 조사에 의하여 괴경 크기는 증대되나 전체 수량증가에는 효과가 없었다고 하였다. 본 실험에서는 저선량 방사선 조사에 의해 감자 식물체의 초장과 생체중 및 괴경수 등이 증가하는 경향을 보였는데, 특히 45일 저장구의 4 Gy에서 유의성있는 증가효과를 보였다.

**Table 45.** Effect of low dose gamma radiation on the growth of minituber, Dejima cultivar, stored with different DAP at 5°C on dark condition

Dose (Gy)	Seedling height (cm)			Plant height (cm)			Foliage weight (g/plant)			No. of nods /plant			No. of tuber /plant			Tuber weight (g/plant)		
	15 DAP	30 DAP	45 DAP	15 DAP	30 DAP	45 DAP	15 DAP	30 DAP	45 DAP	15 DAP	30 DAP	45 DAP	15 DAP	30 DAP	45 DAP	15 DAP	30 DAP	45 DAP
0	14.5	15.4	15.6	49.5	47.6	61.3	427.1	443.7	531.3	18.9	19.2	18.8	13.0	16.3	14.2	905.2	910.8	1037
0.5	14.3	15.7	15.9	50.0	48.8	63.3*	424.4	495.6	639.6*	18.4	18.8	19.6*	13.2	17.3	15.0	890.8	1066.0	1082
1	14.1	17.7*	16.1	50.6	48.2	67.2**	445.2	416.4	643.8*	18.5	18.7	19.5*	13.2	13.5	17.2*	933.2	921.2	1180
2	14.7	15.1	16.6	51.2	48.0	64.7*	467.6	462.4	579.2	19.2	17.9	19.8**	12.0	17.2	14.8	932.8	946.4	1104
4	14.2	14.9	15.6	49.4	46.7	66.3*	442.0	425.6	650.0*	18.5	18.1	20.1**	14.2	14.6	17.2*	903.6	856.4	1226*
8	16.6*	14.8	15.5	48.6	47.0	65.3*	430.0	434.8	587.5	18.2	18.0	19.8**	12.9	15.4	15.0	936.3	856.4	1130
16	15.7	16.0	14.5	48.6	47.7	64.5*	444.0	450.4	613.0	19.0	18.2	19.5*	12.6	14.0	13.8	960.0	902.0	1127
30	14.5	15.1	14.8	46.8	47.9	64.9*	442.8	436.8	593.8	18.6	18.4	19.7*	14.1	14.7	15.3	900.4	904.4	1094

DAP : days after production.

\*, \*\* : Significant at 5% and 1% level, respectively.

## 6. 저선량 조사한 지치세포배양에서의 shikonin 생산

### 가. 지치의 callus 생육

#### (1) LB2N2배지와 LK2I0.2배지에서의 callus생장

저선량 방사선이 LB2N2배지와 LK2I0.2배지에서 명과 암조건으로 배양한 callus의 생장을 본 결과, 조사 후 3일만의 생장은 그림 48-A에서와 같이 LLB2N2배지 및 LLK2I0.2배지 모두 2 Gy에서 약간의 성장 증가는 보였으나 배양의 초기이므로 전체적으로 생장의 차이는 나타나지 않았다. 그러나 7일이 경과되면서 그림 48-B에서와 같이 명과 암의 성장에 대한 차이가 나타나기 시작하였다. 또한 감마선 조사량에 따른 차이도 보여, 무조사구에서는 LLB2N2배지와 LLK2I0.2배지에서 모두 약 15.5%내외의 성장증가율을 보이는데 대해 LLK2I0.2배지에서는 1 Gy에서 16.9%의 증가율을 보이고, LLB2N2배지에서는 조사간의 차이가 보이지 않았다. 그러나 DLB2N2배지에서는 무조사구 15.5%에 비해 8 Gy에서 17.5%의 증가율을 보이고 있다. 배양을 시작한지 14일이 경과하였을 때 그림 48-C에서와 같이 명조건에서는 암조건하에서 배양하였을 때에 비하여 성장율의 뚜렷한 증가효과를 보여 LLB2N2배지에서는 8 Gy에서 30.0%의 효과적인 증가율을 보여주었고, 0.5, 16, 20 Gy에서도 각각 24.4, 22.8, 22.6%를 나타내었고, 그 밖의 선량에서는 저선량 효과를 볼 수 없었다. 반면 LLK2I0.2배지에서는 저조하고, 양호한 효과를 같이 볼 수 있었다. DLB2N2배지에서는 무조사구 17.3%에 비해 다른 선량에서는 효과가 없음을 나타냈다. 또한 DLK2I0.2배지에서는 약간의 저조하고, 양호한 효과를 함께 볼 수 있었다. 배양 후 21일이 경과하였을 때의 결과는 그림 48-D에서와 같이 전체적인 생장의 흐름은 그림 48-C에서와 같았으나, LLB2N2배지에서는 8 Gy에서 53.9%의 매우 효과적인 증가율을 보여주고 있다. 그 다음으로 2, 0.5 Gy에서 각각 39.0, 36.3%를 나타내었고,

4 Gy를 제외하고 모든 선량에서 증가 효과를 보였다. LLK2I0.2배지에서는 무조사구 30.0%에 비해 16 Gy에서 38.8%를 나타냈으며, 다른 선량에서도 30%이상의 증가효과를 보여주었다. 그러나 DLB2N2배지에서는 무조사구에 비해 모든 선량에서 증가 효과를 볼 수 없었고, DLK2I0.2배지에서는 무조사구에 비해 2, 30 Gy를 제외하고 약간의 증가효과를 볼 수 있었다.

이상의 결과에서 볼 때, LB2N2배지와 LK2I0.2배지에서 명배양에서 callus의 생장이 효과적임이 분명하였고, 감마선 조사에 의한 효과에 있어서도 LB2N2배지는 8 Gy, LK2I0.2배지는 16 Gy의 특정 선량에서 성장율의 증가효

과가 인정되었으며 같은 효과가 있는 특정 선량에 있어서도 배지조성에 따른 차이가 인정되었다.

## (2) Kinetin과 BA의 callus생장효과 비교

저선량 방사선이 LK2I0.2배지와 LB2I0.2배지에서 명과 암조건으로 배양한 callus의 성장효과를 비교한 결과, 조사 후 3일만의 생장은 그림 49-A에서와 같이 LLK2I0.2배지의 2 Gy에서 약간의 성장 증가효과는 보였으나 배양의 초기이므로 LK2I0.2배지와 LB2I0.2배지에서 명과 암 모두 생장의 차이는 나타나지 않았다. 그러나 7일이 경과되면서 그림 49-B에서와 같이 명과 암의 성장에 대한 차이가 나타나기 시작하였다. 또한 감마선 조사량에 따른 차이도 보여, LLB2I0.2배지에서의 무조사구에서는 13.4%, LLK2I0.2배지에서는 15.3%의 성장 증가율을 보이는데 비해 LLB2I0.2배지의 16 Gy에서 14.9%, LLK2I0.2배지의 1 Gy에서는 16.9%의 성장 증가율을 보여주고 있다. 반면 DLK2I0.2배지에서는 무조사구와 감마선 조사량에 따른 차이가 12%내외로 거의 나지 않으나, DLB2I0.2배지에서는 무조사구 12.6%에 비해 2 Gy에서는 15.5%를 보여 LLK2I0.2배지에서의 2 Gy의 16.1%의 증가율과 비슷할 정도로 생장의 차이가 나타나고 있다.

배양 14일 후의 그림 49-C에서와 같이 LLB2I0.2배지에서는 암조건하에서 배양하였을 때에 비하여 성장율의 증가효과가 현저히 나타나 무조사구 16.7%에 비해 1 Gy에서 25.1%, 2 Gy에서는 21.5%의 성장 증가율을 보여주고, 0.5, 4 Gy를 제외하고 증가효과를 보여주고 있다. LLK2I0.2배지에서는 1 Gy에서 23.7%의 약간의 증가를 보일 뿐 전체적인 생장의 흐름은 큰 차이를 보이지 않고 있다. DLB2I0.2배지에서는 2 Gy의 약간의 증가와 그림 49-B에서 보여주었던 것과 같이 8 Gy에서 11.8%를 보여 무조사구보다 저조했던 것과는 달리 18.8%의 증가를 보였고, DLK2I0.2배지는 2, 8 Gy에서 18.8%의 증가를 보였으나, DLB2I0.2배지 같은 선량에서 각각 13.7, 12.4%의 조사간의 효과가 보이지 않았다.

배양 후 21일이 경과하였을 때의 결과는 그림 49-D에서와 같이 LLK2I0.2배지에서는 무조사구 30.3%에 비해 16 Gy에서 38.8%, 1 Gy, 2 Gy에서 각각 35.8, 36.5%의 증가율을 보여 주었고, LLB2I0.2배지에서는 무조사구 18.4%에 비해 1 Gy에서는 32%를 보여주어 크게 증가하였음을 보여주고 있다. 반면 DLK2I0.2배지에서는 전체적인 생장의 흐름은 15~19%정도로 큰 차이는 보이지 않았으며, DLB2I0.2배지에서는 무조사구 23.1%에 비해 1 Gy에서 27.6%의 증가율을 보여주고 있다.

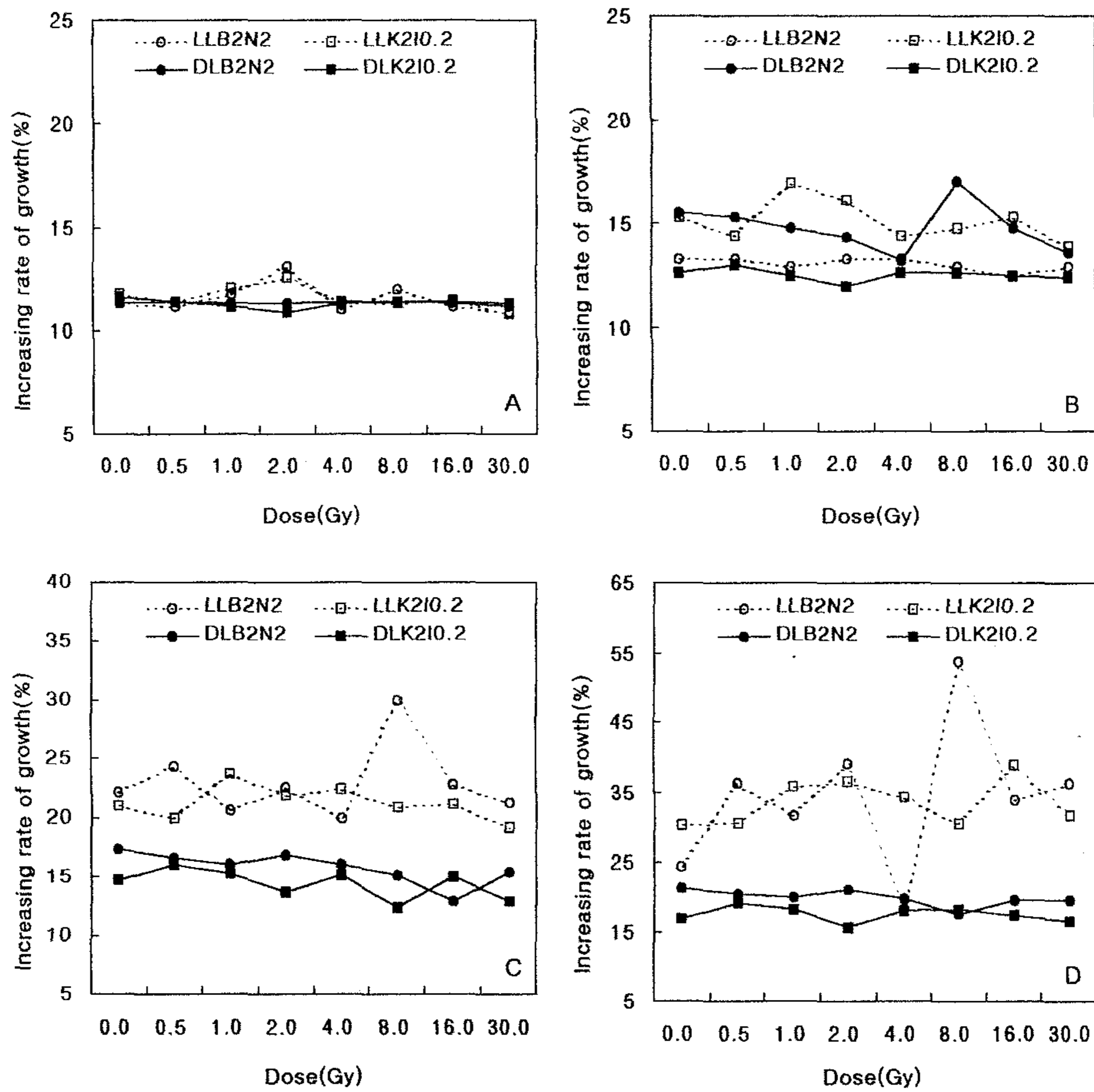


Fig. 48. Effects of gamma radiation on increasing rate of growth of *L. erythrorhizon* callus after culture for 3 days(A), 7 days(B), 14 days(C), and 21 days(D) on the LS medium supplemented with BA 2mg/l and NAA 2mg/l(LB2N2) and on the LS medium with kinetin 2mg/l and IAA 0.2mg/l(K2I0.2) in the dark(close) or the light(open).

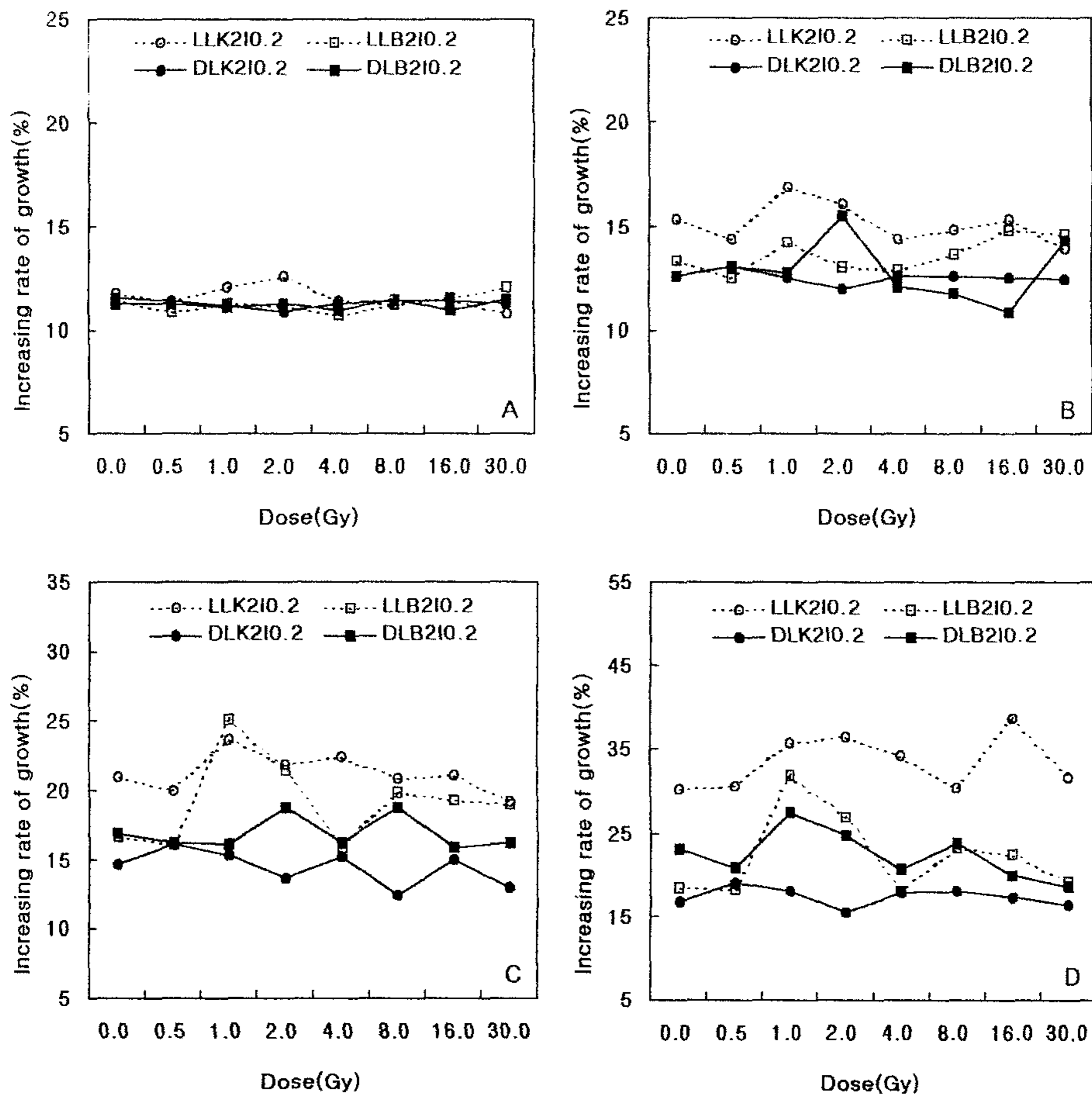


Fig. 49. Effects of gamma radiation on the increasing rate of growth of *L. erythrorhizon* callus after culture for 3days(A), 7days(B), 14days(C) and 21days(D) on the LS medium supplemented with kinetin 2mg/l and IAA 0.2mg/l(LK210.2) and on the LS medium with BA 2mg/l and IAA 0.2mg/l (LB210.2) in the dark(close) or the light(open).

### (3) BA와 NAA의 농도차이에 의한 callus생장효과 비교

BA와 NAA의 농도에 따라 callus의 성장 효과가 다를 것으로 생각되어 저선량 방사선이 LB2N2배지와 LB1N1배지에서 명과 암조건으로 배양한 callus의 성장효과를 비교한 결과, 배양 3일 후 그림 50-A에서는 LB2N2배지와 LB1N1배지간의 선량간의 차이 및 명, 암의 차이는 거의 없었고, LB2N2배지의 2 Gy에서만 약간의 효과를 보이고 있다. 그러나 배양 후 7일이 되면서, 그림 50-B와 같이 명과 암의 차이가 나기 시작하였다. LB1N1배지에서는 무조사구 16.4%에 비해 16 Gy에서 18.9%의 증가를 보였고, 다른 선량에서 큰 차이가 없었다. LB2N2배지에서는 무조사구 15.5%에 비해 8 Gy에서 17.0% 정도를 나타내었다. 그러나 암조건에서의 두 배지간의 감마선 조사에 의한 효과는 12~13%로 차이가 없는 것으로 보여진다. 배양한지 14일이 되면, 그림 50-C와 같이 7일 경과후 보다 증가 폭이 더 크게 나타났다. LB1N1배지에서는 선량의 차이는 없으나, 배지간에서는 가장 양호한 수치의 성장증가율을 보이고 있다. LB2N2배지에서는 무조사구 22.2%에 비해 8 Gy에서 30.0% 정도를 나타내었으나 다른 선량에서는 큰 효과가 없는 것으로 나타났다. 14일이 지나도 두 배지간에 암조건 및 선량간의 효과는 없는 것으로 보여진다. 21일이 지난 그림 50-D에서는 명조건의 두 배지간의 조사에 따른 기복이 크다는 것을 알 수 있었다. LB1N1배지에서는 배지간에서는 가장 양호하였으나, 선량간의 효과는 없었고, 무조사구에 비해 저선량 효과를 볼 수 없었다. 반면 LB2N2배지에서는 무조사구 24.3%에 비해 8 Gy에서 53.9% 정도로 2배 이상의 효과를 나타내었고, 다른 선량에서도 무조사구에 비해 33%이상의 효과가 있음을 나타내었다. 그러나 21일이 지나도 암조건에서의 두배지간의 차이는 나타나지 않았다.

이상의 결과에서 LB2N2배지와 LB1N1배지간의 명, 암의 차이가 뚜렷이 나타나 두 배지 모두 암조건보다는 명조건에서 효과가 있음이 확인되었다. 그러나 감마선 조사에 의한 효과면에서는 비록 성장증가율의 수치는 LB2N2배지보다 LB1N1배지에서 좋은 것으로 나타났으나, LB2N2배지에서 감마선 조사에 의한 효과의 양호한 양상이 뚜렷이 나타나, 8 Gy에서 가장 효과적이었다. LB1N1배지에서는 무조사구에 비한 효과가 나타나지 않은 것으로 보아 BA와 NAA의 농도는 각각 2 mg/l가 효과적이었음을 확인할 수 있었다.

### (4) LS배지와 MS배지의 callus생장효과 비교

실험 1-1에서 사용한 LK2I0.2배지와 배지 조성간의 차이에 의한 callus의 성장을 비교 하기 위하여 성장조절물질의 차이는 없고, 배지의 조성을 달리

한 MK2I0.2배지를 사용하여 실험을 수행한 결과, 배양 후 3일이 되면 그림 51-A에서와 같이 모든 배지에서 명과 암 모두 생장의 차이는 없었고, LMK2I0.2배지에서는 전체적으로 감마선 조사에 의한 효과에 의한 차이가 나타나지 않았다. 그러나 7일이 지나면서 그림 51-B에서는 LK2I0.2배지의 명과 암의 차이의 폭이 커지기 시작하여 LK2I0.2배지의 그림 51-A의 양상 보다 1 Gy에서 16.9%의 약간의 효과를 보였고, LMK2I0.2배지에서는 0.5 Gy에서 15.4%, 4 Gy에서 12.6%로 감마선 조사에 의한 효과가 크지 않았다. 그림 51-C는 배양한 지 14일후의 결과로 명암의 생장의 차이가 크게 나타나기 시작하였으나 감마선 조사에 의한 차이는 명배양에서만 차이를 나타내었다. LMK2I0.2배지에서는 무조사구 19.1%보다 0.5 Gy에서 22.5%, 1 Gy에서 20.8% 정도를 나타내었고, 반면 2, 8 Gy에서는 각각 17.6, 17.8%의 저조한 증가율을 보였다. 또한 LK2I0.2배지에서는 무조사구 21.0%에 비해 1 Gy에서 23.7%로 약간의 증가율을 나타내었을 뿐, 다른 선량에서는 큰 차이가 없었다. 암 조건에서는 두 배지간의 특별한 차이는 없는 것으로 보여진다.

배양을 시작한 지 21일이 경과한 결과, 그림 51-D는 LK2I0.2배지에서 무조사구 30.3%에 비해 16 Gy에서 가장 좋은 38.8%의 성장증가율을 보여주었고, 그 밖의 선량에서는 35% 내외의 증가 효과를 볼 수 있었다. LMK2I0.2배지에서는 무조사구 19.9%의 증가율에 비해 0.5 Gy에서 28.8%로 가장 좋았고, 1 Gy에서 25.9%로 그 다음으로 양호한 증가율을 보였으며, 다른 선량에서는 큰 효과를 보이지 않았다.

이상의 결과에서 LK2I0.2배지와 LMK2I0.2배지를 비교해 볼 때 명배양에서는 LK2I0.2배지의 16 Gy에서 MK2I0.2배지에서는 0.5 Gy에서 callus의 생장이 효과적이었으나, 암조건에서는 두 배지간의 생장의 흐름의 차이가 크지 않음을 알 수 있었다. 감마선 조사에 의한 효과에 있어서도 명배양에서는 특정 선량에서 성장율의 증가효과가 인정되었고 같은 효과가 있는 특정 선량에 있어서도 배지조성에 따른 차이가 인정되었다. 따라서 callus 생장에 있어서는 LS배지가 MS배지보다 효과가 있음을 알 수 있다.



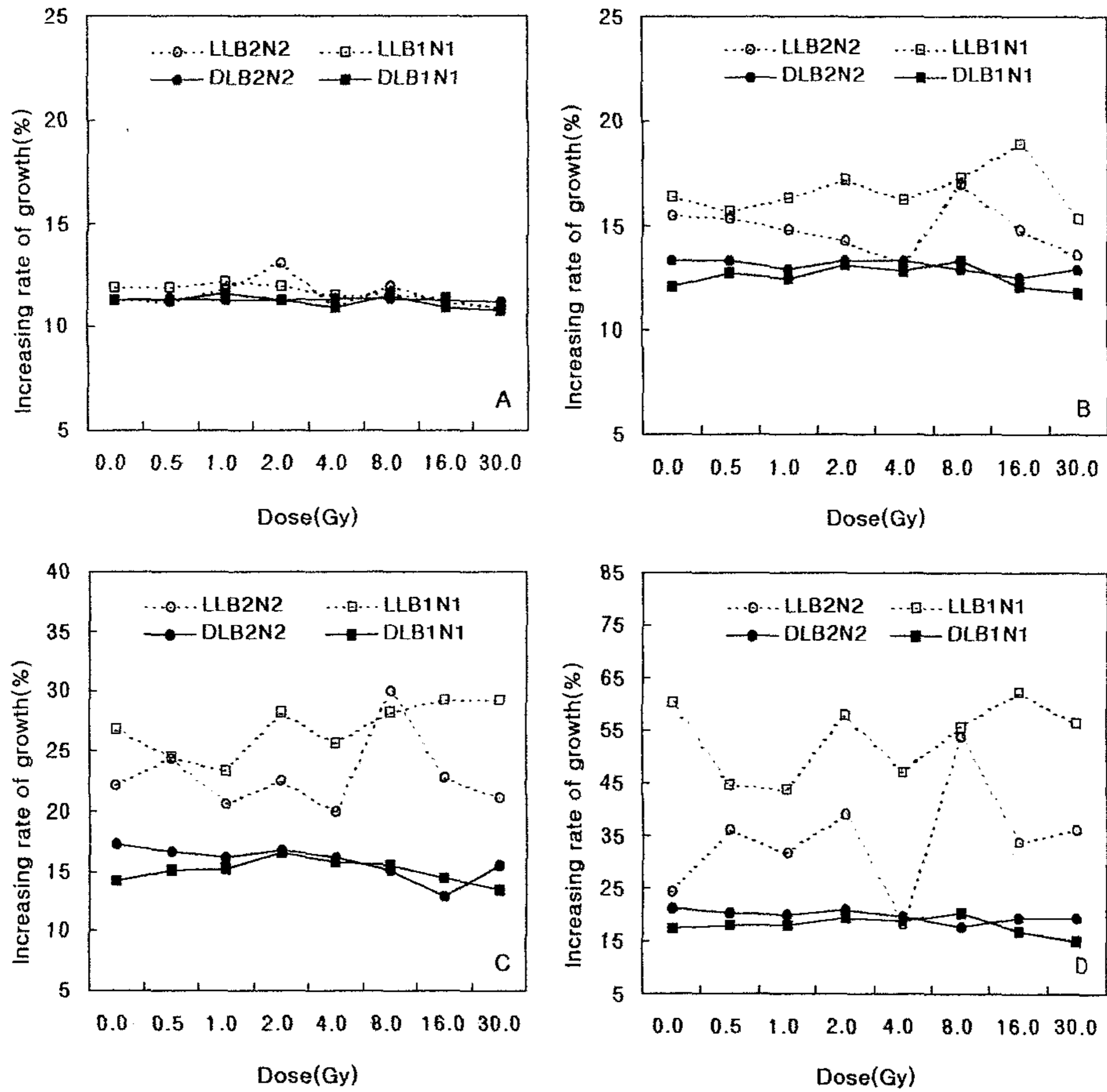


Fig. 50. Effects of gamma radiation on the increasing rate of growth of *L. erythrorhizon* callus after culture for 3days(A), 7days(B), 14days(C), and 21days(D) on the LS medium supplemented with BA 2mg/l and NAA 2mg/l(LB2N2) and on the LS medium with BA 1mg/l and NAA 1mg/l in the dark(close) or the light(open).

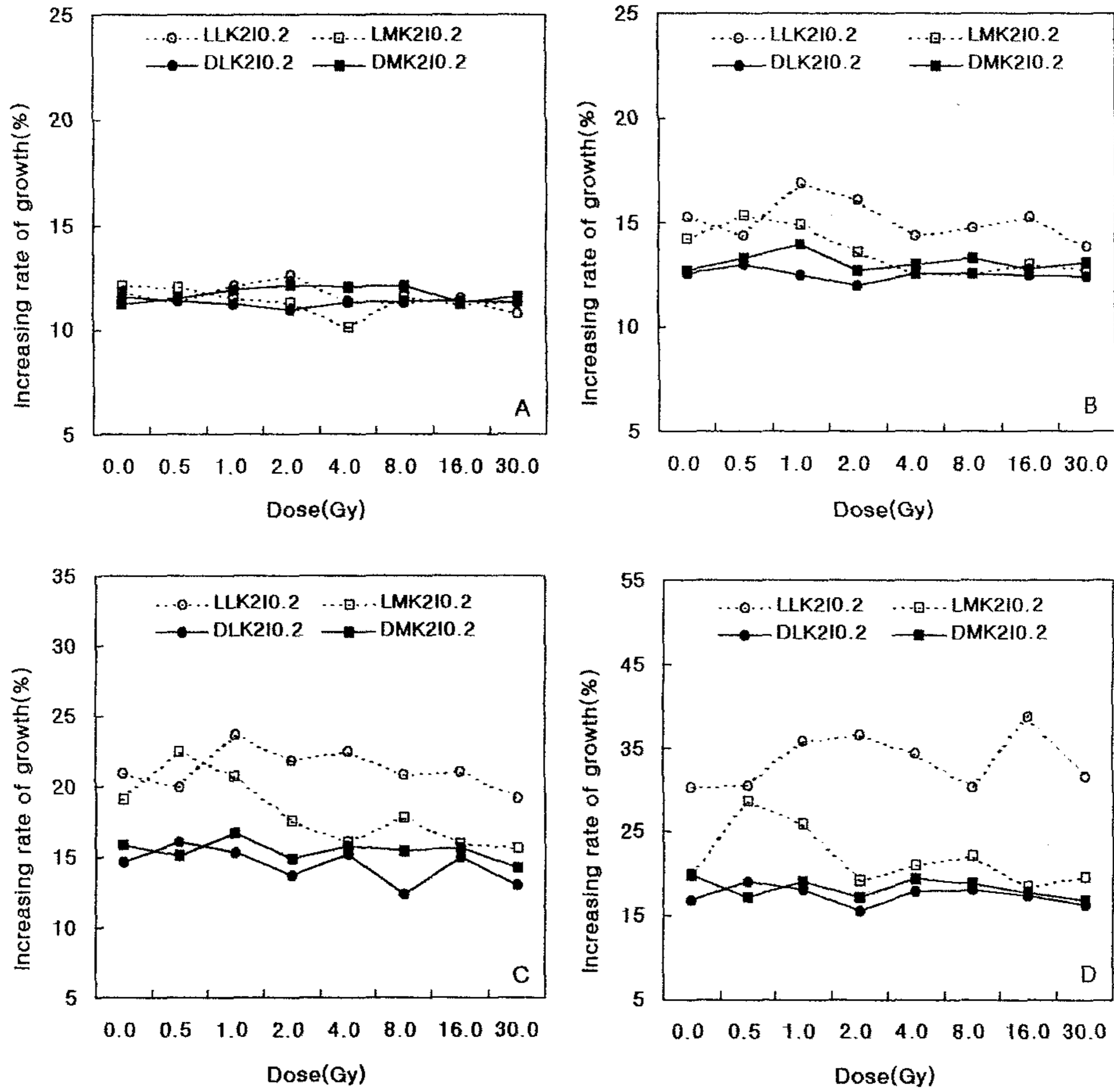


Fig. 51. Effects of gamma radiation on the increasing rate of growth of *L. erythrorhizon* callus after culture for 3days(A), 7days(B), 14days(C) and 21days(D) on the LS medium supplemented with Kinetin 2mg/l and IAA 0.2mg/l(LK210.2) and on the MS medium with kinetin 2mg/l and IAA 0.2mg/l(MK210.2) in the dark(close) or the light(open).

#### (5) M-9배지의 callus생장효과

감마선 조사에 의한 효과에 있어서 M-9배지에서의 명, 암 조건에 따른 callus 성장효과를 알아본 결과, 배양을 시작한 지 3일이 경과한 후 그림 52-A 와 같이 명과 암간의 차이와 감마선 조사간의 차이는 11%정도로 전혀 보이지 않았다. 배양한 지 7일이 경과한 후 그림 52-B에서도 3일 경과한 후에 비해서 큰 차이를 볼 수가 없었지만 LM-9배지는 13% 정도로 증가하였고, DM-9배지에서는 1 Gy에서 다른 선량에 비해 양호한 증가를 보이기 시작하였고, 0.5 Gy를 제외하고 모든 선량에서 작은 증가효과를 보였다. 배양한 지 14일이 지나면 그림 52-C와 같이 7일 경과한 후 보다 증가의 폭이 더 커졌음을 볼 수 있었다. LM-9배지에서는 감마선 조사간의 효과가 크게 보이지 않았다. 그러나 DM-9배지에서는 무조사구 12.7%에 비해 1 Gy에서 14.5%를 나타냈으며, 0.5 Gy를 제외한 다른 선량에서도 무조사구보다 증가하였음을 볼 수 있었다. 배양한지 21일이 경과하면 그림 52-D와 같이 LM-9배지와 DM-9배지간의 증가폭의 차이가 더 증가하여, LM-9배지의 무조사구 21.8%에 비해서 30 Gy에서 31.3%를 나타내어 다른 선량에 비해 양호한 성장증가율을 보였다. 차이가 크지는 않지만 DM-9배지에서는 0.5 Gy를 제외한 다른 선량에서도 무조사구보다 증가하였음을 볼 수 있었다.

#### (6) 배지 및 명·암간의 종합적인 성장

다음은 실험(1)~(5)에 걸친 실험에 따른 성장효과의 결과를 종합적으로 비교한 것이다.(그림 53-A, B)

그림 53-A는 명배양에서의 감마선 조사에 의한 5가지 배지간의 callus 성장 효과를 비교한 것으로, 그 결과를 종합하여 볼 때 가장 좋은 성장증가율을 나타낸 LB1N1배지의 무조사구는 60.3%, 차이는 인정되지 않지만 16 Gy에서 62.3%를 나타내었고, 반면 0.5, 1 Gy에서는 44.0% 정도의 저조한 양상도 나타내었다. 그 다음으로 LB2N2배지는 무조사구 24.3%에 비해 가장 좋은 선량으로 8 Gy에서는 53.9%를 나타내어 2배 이상의 효과적인 증가율을 나타내었고, 다음으로 2 Gy에서 39.0%를 나타내었으며, 반면 1, 4 Gy에서는 각각 31.7, 18.1%로 저선량 효과를 볼 수 없었다. 다음으로 LK2I0.2배지에서는 무조사구 30.3%에 비해서 16 Gy에서 38.8%를 나타내었고, 다른 선량에서도 무조사구보다 양호한 효과가 있었다. 다음으로 LB2I0.2배지에서는 무조사구 18.4%에 비해 1 Gy에서 32.0%를 나타냈으며, 0.5, 4 Gy를 제외한 다른 선량에서도 효과를 볼 수 있었다. 다음으로 MK2I0.2배지에서는 무조사구 19.9%에 비해 0.5 Gy에서 28.8%를 나타내었고, 2, 16, 30 Gy를 제외하고 다

른 선량에서도 증가 효과를 보였다. 마지막으로 M-9배지에서는 무조사구 20.9%에 비해 30 Gy에서 30.45%의 효과적인 차이가 인정되었고, 16 Gy에서도 증가효과를 볼 수 있었다. 그러나 다른 선량에서는 큰 효과가 없음을 확인하였다.

그림 53-B는 암배양에서의 감마선 조사에 의한 5가지 배지간의 callus 성장 효과를 비교한 것으로, 그 결과를 종합하여 볼 때 명배양에서와는 다른 결과가 나왔음을 알 수 있었다. 가장 좋은 성장증가율을 나타낸 LB2I0.2배지의 무조사구는 23.1%에 비해, 1 Gy에서 27.6%를 나타내었고, 반면 무조사구에 비해 16, 30 Gy에서는 각각 19.9, 18.6%로 저선량 효과를 볼 수 없었다. 그 다음으로 명배양에서 가장 좋았던 LB2N2배지는 무조사구 21.3%에 비해 다른 선량들은 저선량 효과가 나타나지 않았다. 다음으로 우열을 가리기 어려운 비슷한 양상의 성장증가율을 나타내는 MK2I0.2배지는 무조사구에 비해 감마선 조사에 의한 효과가 인정되지 않음을 볼 수 있었다. LB1N1배지는 무조사구 17.4%에 비해 16, 30 Gy를 제외하고 모든 선량에서 증가 효과를 볼 수 있었다. LK2I0.2배지에서는 무조사구 16.9%에 비해 2, 30 Gy를 제외한 다른 선량에서 성장 증가 효과를 확인하였다. 마지막으로 M-9배지에서는 무조사구 13.5%에 비해 0.5 Gy를 제외하고 다른 선량에서도 감마선 조사에 의한 작은 효과가 인정되었다.

이상의 결과로 볼 때 가장 성장증가율이 좋은 배지로는 LB1N1배지로 60% 정도의 성장증가율을 나타내었으나, 본 실험 목적에 따른 감마선 조사에 의한 성장증가율이 가장 좋은 효과적인 배지로는 명배양에서는 무조사구에 비해 2배의 성장 증가율을 나타낸 LB2N2배지라는 것이 확인되었고, 암배양에서는 LB2I0.2배지라는 것이 인정되었다. 또한 M-9배지에서도 감마선 조사에 의한 작은 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

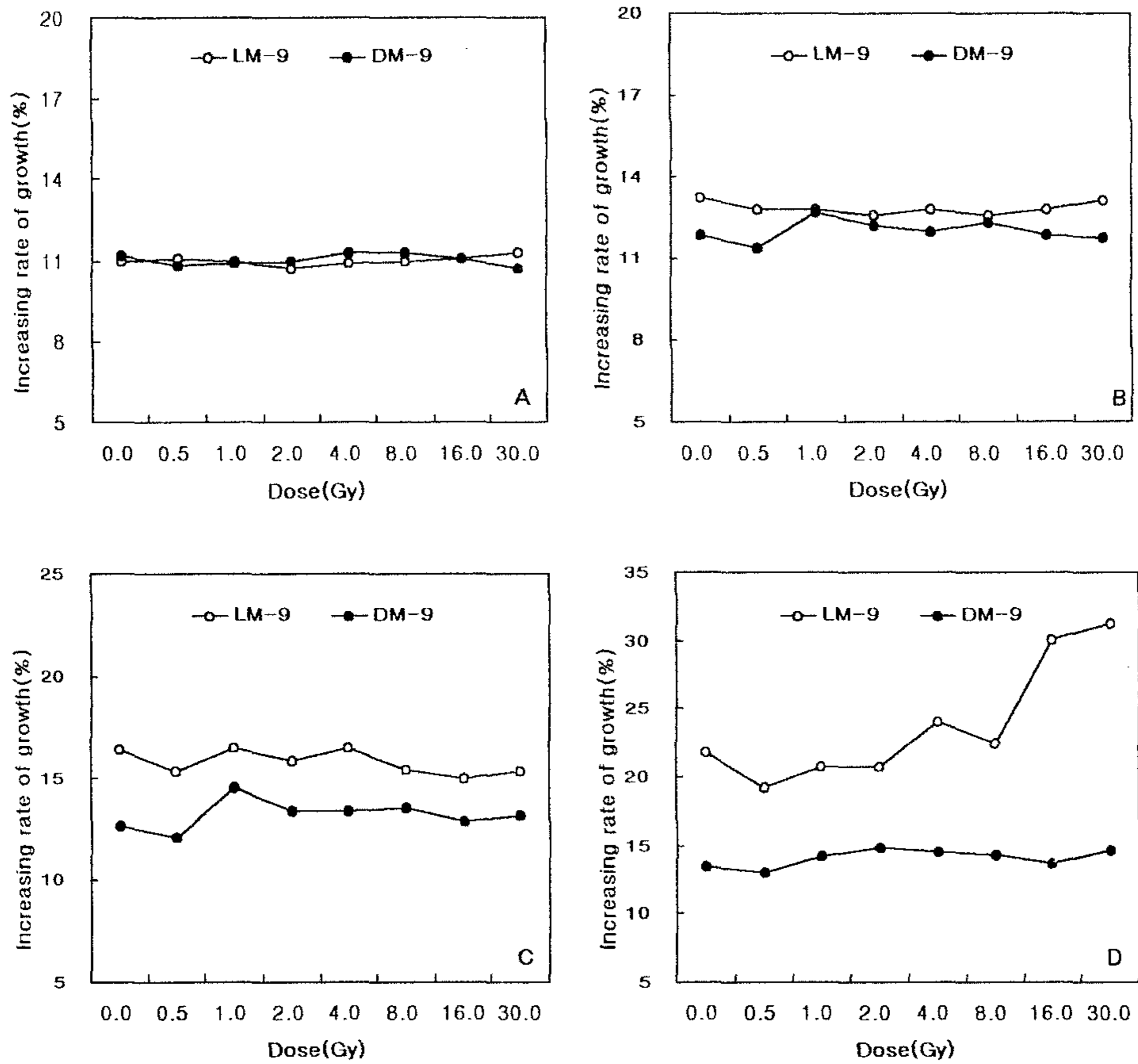


Fig. 52. Effects of gamma radiation on the increasing rate of growth of *L. erythrorhizon* callus after culture for 3days(A), 7days(B), 14days(C) and 21days(D) on hormone-free M-9 medium the dark(close) or the light(open).

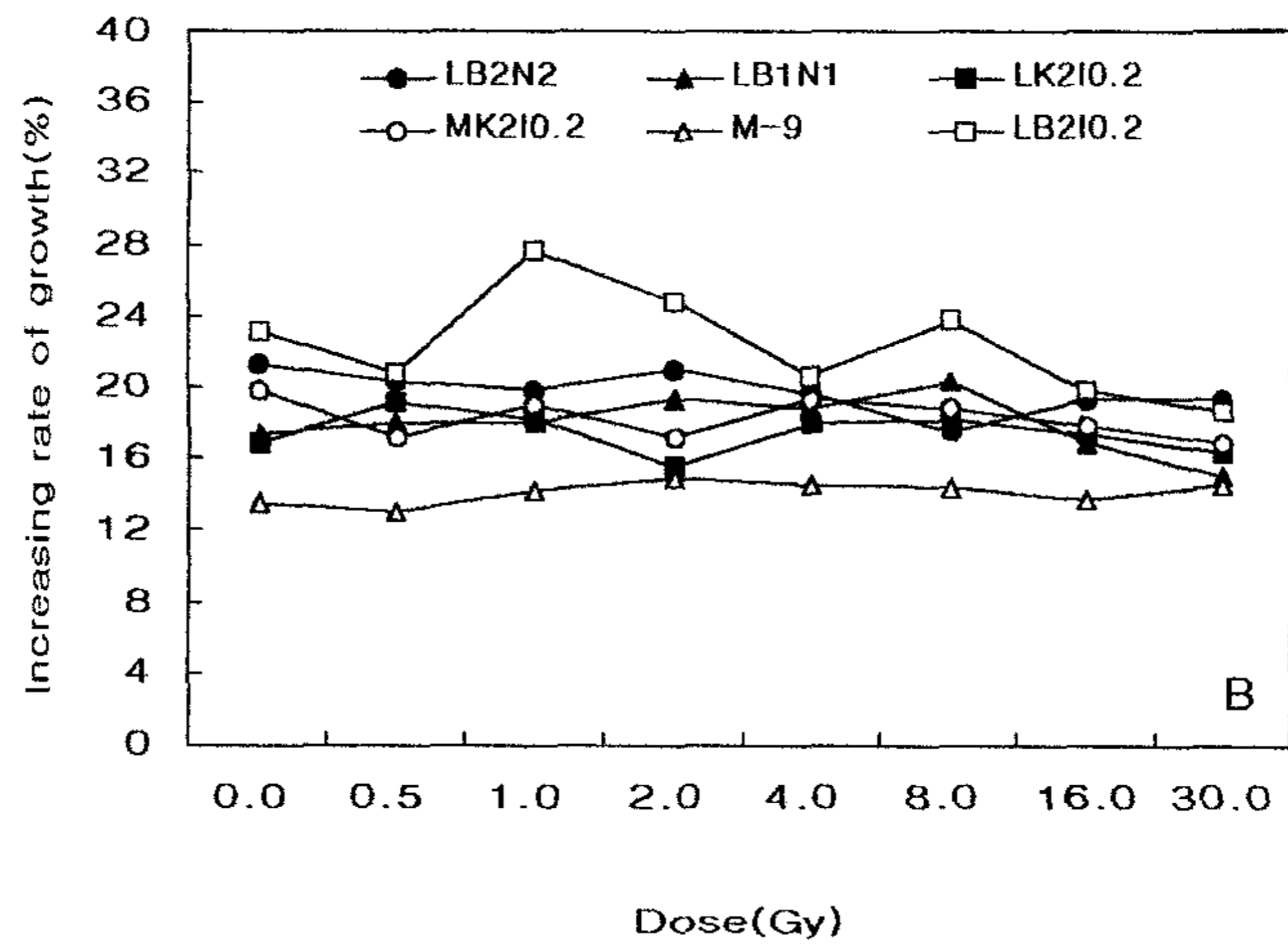
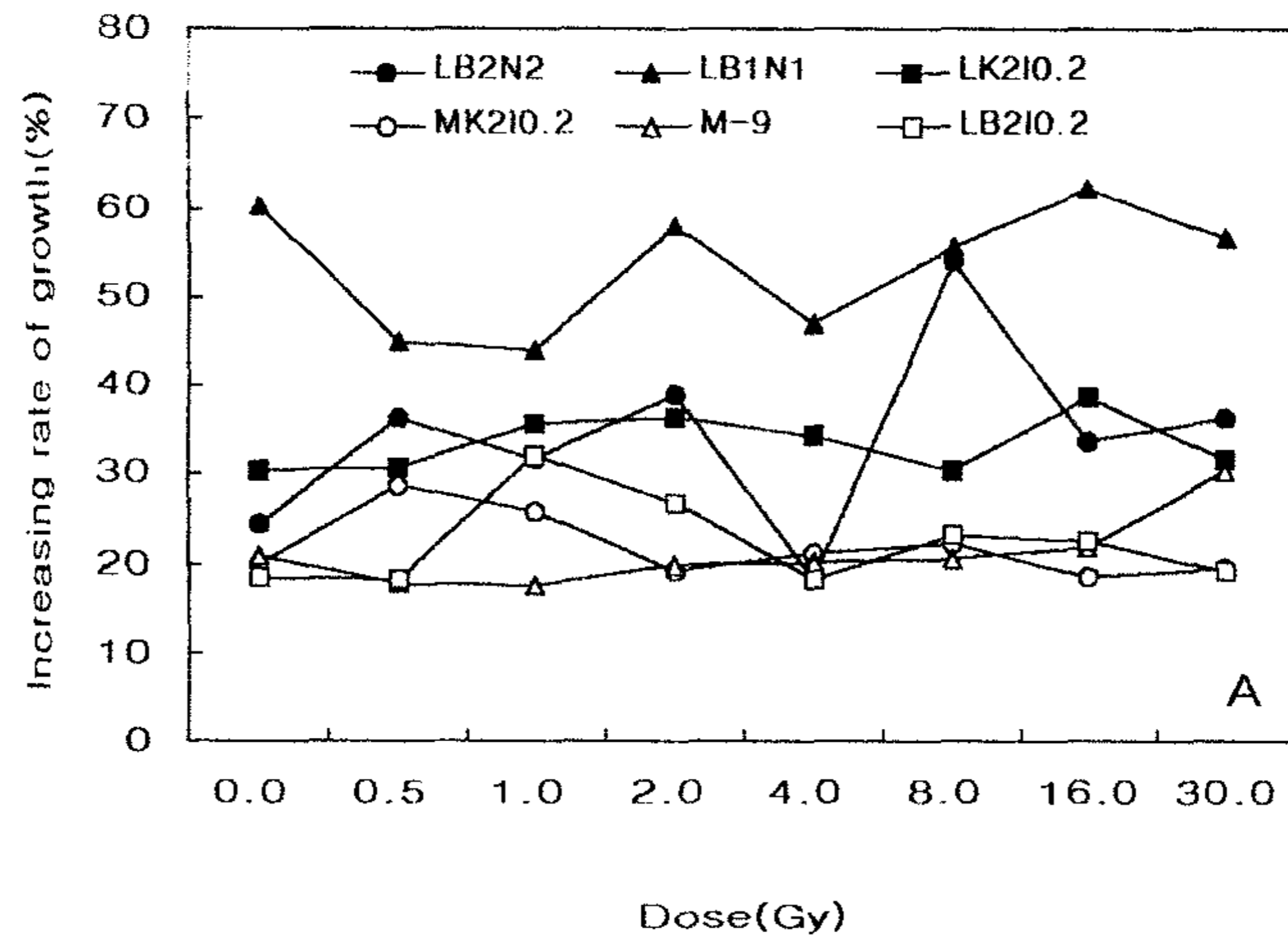


Fig. 53. Effects of gamma radiation on the increasing rate of growth of *L. erythrorhizon* callus after culture on each medium in the dark(B) or the light(A).The gamma radiation(1,2,16,30 Gy) was irradiated at 21 days after treatment.

## 나. 지치의 shikonin 생산

저선량 조사에 의한 지치의 callus 성장 실험에서 명과 암상태로 중복되어 감마선 조사에 의한 성장효과가 가장 좋은 배지의 효과적인 특정 2선량과 저조한 특정 2선량 선별할 수 있었다.

성장 효과와 추출되는 shikonin의 생성량과는 반드시 비례한다고 판단되지는 않으나, 감마선 조사에 의한 성장효과에 의한 shikonin 생성량의 촉진 효과가 있을 것이라고 생각되어, 명배양에서는 LB2N2배지를, 암배양에서는 LB2I0.2배지를 선별 하였고, M-9배지 또한 명과 암조건으로 0, 1, 2, 16, 30 Gy에서 3주간에 걸쳐 실험2를 수행한 결과 다음과 같다.

### (1) LLB2N2배지에서의 shikonin 생산효과

Kinetin이 shikonin 생성을 억제함을 고려하여, LB2N2 배지를 선별하여 특정 선량에 따른 callus의 성장에 대한 shikonin 유도체의 생성량을 추출해 본 결과 그림 54-A와 같이 배양한 지 3일이 지났을 때는 무조사구 12.0%에 비해 1 Gy에서 12.9%를 나타내었고, 16 Gy를 제외하고는 증가효과를 보였다. 그러나 shikonin 유도체의 생성량의 양상은 무조사구 0.0049 mg/g에 비해 1, 2, 30 Gy에서는 저조한 함량을 보였으나, 16 Gy에서는 0.0053 mg/g을 나타내어, callus 성장 양상과는 반대의 양상을 나타내고 있다. 10일이 지난 후 그림 54-B는 무조사구 16.3%에 비해 2 Gy에서 23.9%의 성장증가율을 보였으며 다른 선량에서도 무조사구에 비해 증가효과가 인정되었다. 이 때의 shikonin 유도체의 생성량은 3일 경과한 후 보다 무조사구와 1 Gy의 0.0042 mg/g을 제외하고 2배정도의 증가된 함량을 나타내어, 16 Gy에서 0.0082 mg/g으로 가장 높았고, 그 다음으로 30 Gy에서 0.0069 mg/g을 나타냈으며, 2, 1 Gy에서도 0.0053 mg/g으로 증가된 함량을 나타내었다. 14일이 지나 그림 54-C와 같이, 특히 무조사구 20.3%에 비해 2 Gy에서 32.6%로 높은 성장증가율을 보였고, 16, 1 Gy에서도 각각 31.1, 21.4%의 성장증가율을 나타낸 반면 30 Gy에서는 19.4% 저선량 효과를 볼 수 없었다. 저조한 증가율을 나타내었다. 그러나 shikonin 유도체의 생성량의 양상은 반대의 양상을 나타내어 무조사구는 7일 경과 후 보다 2.5배의 함량을 나타내었지만, 무조사구에 비해 모든 조사 선량에서는 저조한 함량을 나타내었다.

그림 54-D와 같이 배양한 지 21일이 지나면 무조사구 27.9%에 비해 2 Gy에서는 52.2%로 가장 높은 성장증가율을 나타내었다. 또한 1, 16 Gy에서도 각각 40.6, 37.3%의 증가율을 보였고, 30 Gy에서도 31.7%의 효과가 있음을 알 수 있다. 그러나 shikonin 유도체의 생성량은 성장증가율과는 반대로,

무조사구에 비해 모두 높은 효과가 있었으며, 30 Gy에서 0.0106 mg/g으로 가장 높은 함량을 나타내었고, 그 다음으로 1 Gy에서 0.0064 mg/g, 2, 16 Gy에서 각각 0.006, 0.0049 mg/g으로 나타났다.

## (2) LM-9배지에서의 shikonin 생산효과

감마선 조사에 의한 효과가 있을 것이라 기대하여, M-9배지를 명배양에서 실험한 결과 그림 55-A와 같이 배양을 시작한지 3일이 지나면 배양 초기이므로 큰 차이는 보이지 않으나 무조사구 13.1%에 비해 2 Gy에서 14.2%의 약간의 차이를 보이고 있다. 그러나 shikonin 유도체의 생성량의 양상은 무조사구 0.0065 mg/g에 비해서 저조한 흐름을 보여, 16 Gy에서 0.0035 mg/g으로 가장 저조한 함량을 나타내고 있다. 그림 55-B에서 볼 수 있는 바와 같이 배양 후 10일이 되면 약간의 차이가 보이기 시작하여 무조사구 15.6%에 비해 16 Gy에서 18.7%를 나타내었고, 1 Gy를 제외하고 모두 증가 효과를 보였다. 그러나 이 때의 shikonin 유도체의 생성량의 양상은 성장증가율과 비교할 때 반대의 양상을 보여 무조사구 0.0067 mg/g에 비해 16 Gy의 0.0058 mg/g을 제외하고는 1, 2, 30 Gy에서 각각 0.0074, 0.0073, 0.0068 mg/g으로 증가하였음을 확인 할 수 있었다. 배양후 14일이 되면 그림 55-C와 같이 무조사구 17.4%에 비해 2 Gy에서 23.5%를, 1, 16 Gy에서 각각 22.6, 20.2%를 나타내어 30 Gy의 15.7%를 제외하고 증가 효과가 있음을 볼 수 있었다. 그러나 이때 shikonin 유도체의 생성량은 무조사구 0.0089 mg/g에 비해 30 Gy에서 가장 높은 0.0119 mg/g의 함량을 나타내었고, 그 다음으로 16 Gy에서 0.0108 mg/g을 나타냈으며, 반면 2, 1 Gy에서는 0.0085, 0.0075 mg/g으로 저조한 함량도 볼 수 있었다. 21일이 지난 후에는 그림 55-D와 같은 양상을 보이는데 무조사구 19.4%에 비해 30 Gy의 19.0%를 제외하고 1, 16, 2 Gy에서 각각 22.1, 21.7, 20.9%로 증가함을 볼 수 있다. 그러나 이 때의 shikonin 유도체의 생성량은 무조사구에 비해 16 Gy에서 가장 높은 0.0085 mg/g의 함량을 나타내었고, 2 Gy의 0.0043 mg/g을 제외하고 1, 30 Gy에서 각각 0.0068, 0.0064 mg/g으로 높은 함량을 나타내었다.

이상으로 볼 때 알 수 있는 결과는 앞의 실험1에서와 같이 21일 간의 명배양에서의 M-9배지에서는 1 Gy에서 가장 양호한 성장증가율을 보였으나, shikonin 유도체의 생성량은 특정 선량 16 Gy에서 가장 높은 함량을 나타냄으로 인하여 성장 증가효과가 인정되었다.



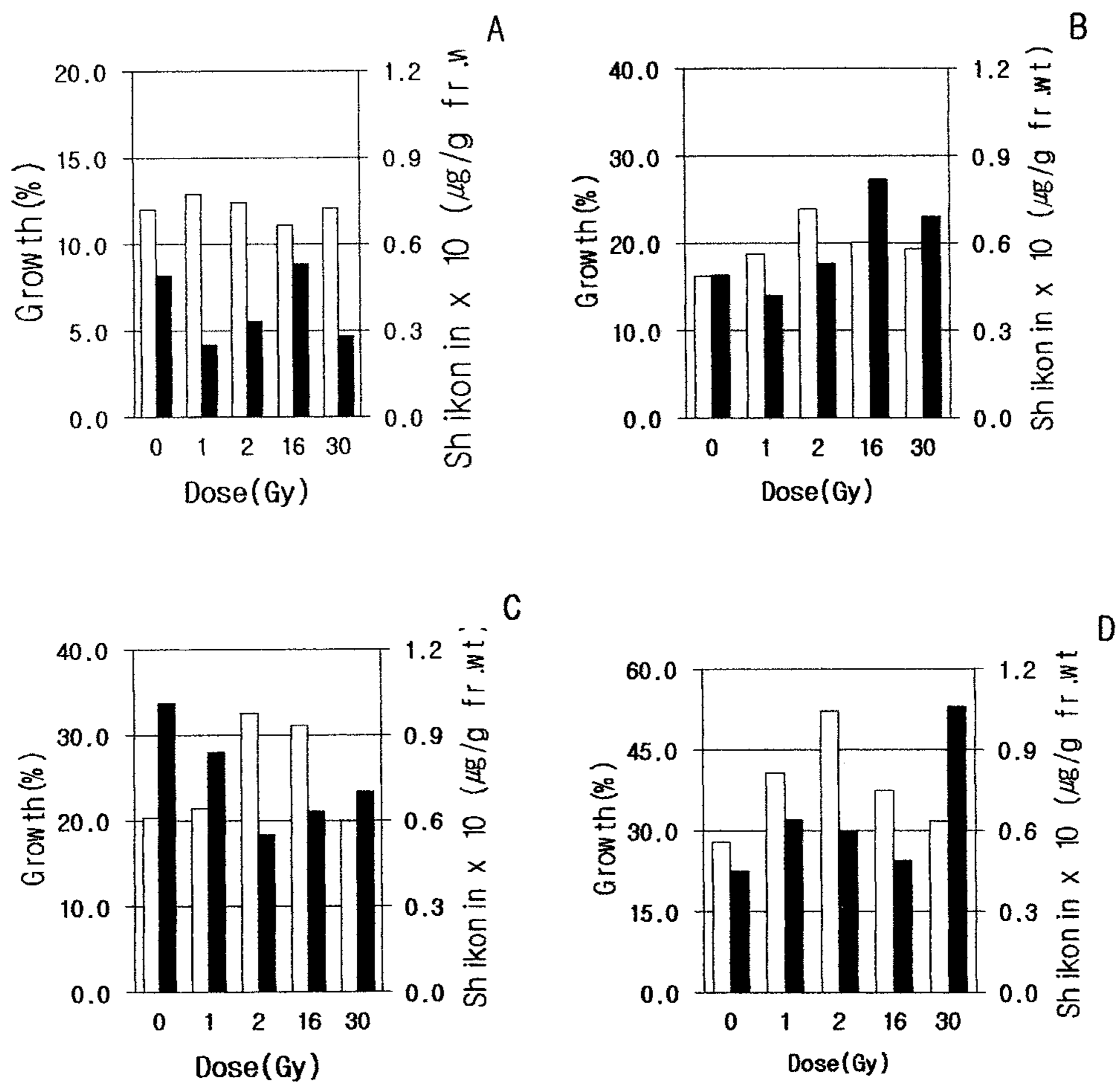


Fig. 54. Effects of gamma radiation on the growth and the contents of shikonin from *L. erythrorhizon* callus after culture for 3(A), 10(B), 14(C), and 21days(D) on the LS medium supplemented with BA 2mg/l and NAA 2mg/l(LB2N2) under 16hours day light.

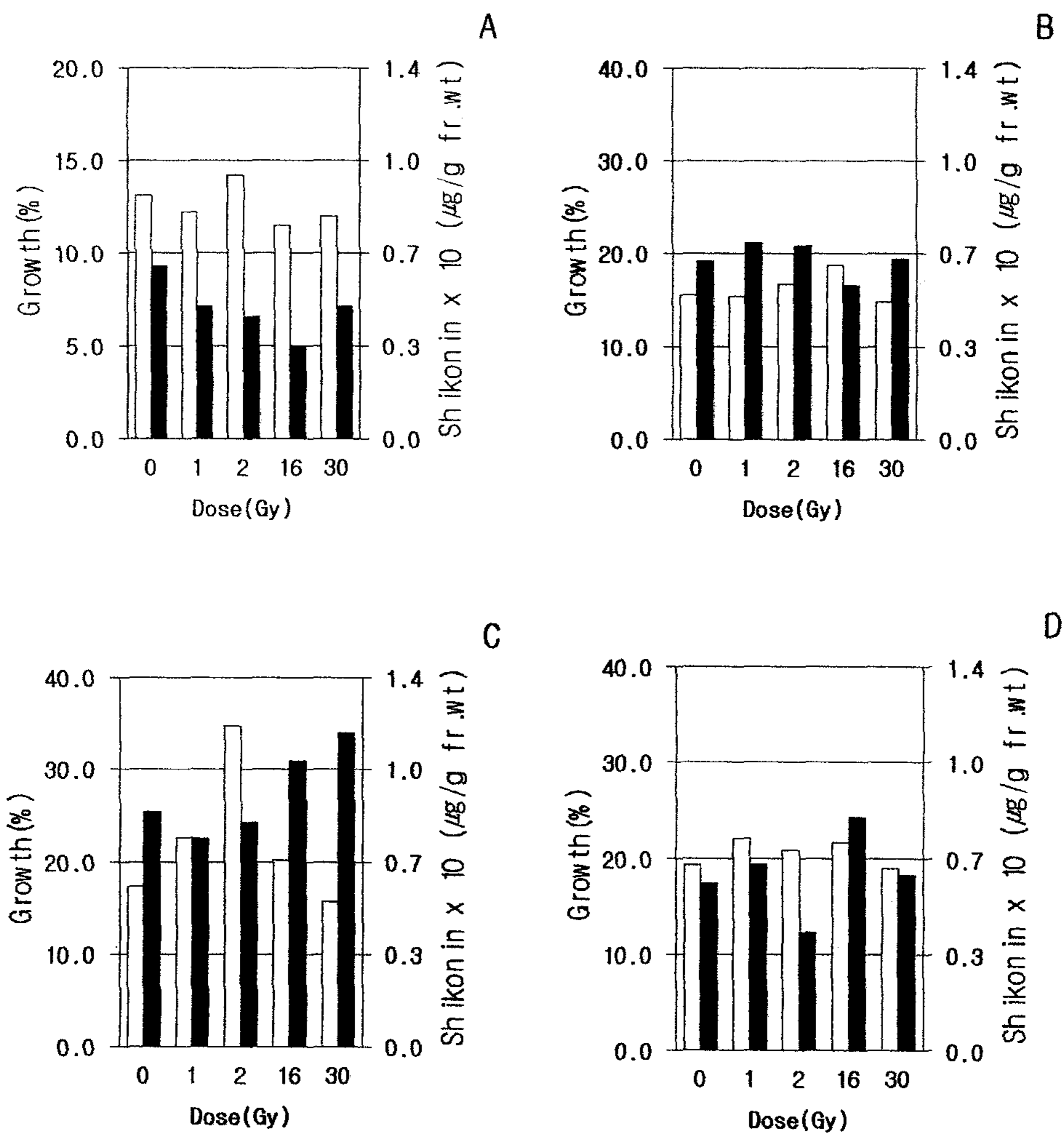


Fig. 55. Effects of gamma radiation on the growth and the contents of shikonin from *L. erythrorhizon* callus after culture for 3(A), 10(B), 14(C), and 21 days(D) on M-9 medium under 16 hours day light.

### (3) DLB210.2배지에서의 shikonin 생산효과

명배양에서는 가장 낮은 성장증가율을 보였지만, 암배양에서는 가장 높은 성장증가율을 보여 실험한 결과, 그림 56-A와 같이 배양을 시작한지 3일이 지나면 성장증가율에는 오히려 저조한 양상을 보였으나, shikonin 유도체의 생성량에는 약간의 차이를 보여 무조사구에 0.0027 mg/g에 비해 30 Gy에서 0.0043 mg/g의 함량을 나타내었고, 그 다음으로 1 Gy에서 0.0036 mg/g을 나타냈으며, 2, 16 Gy에서 0.0034, 0.0033 mg/g을 나타내어 모두 무조사구에 비해 양호한 효과를 보였다. 배양 후 10일이 되면 그림 56-B와 같이 성장증가율의 폭이 조금 더 커지기 시작하여, 무조사구 13.6%에 비해 1 Gy에서 16.9%의 효과를 보였으며, 30, 2 Gy에서 각각 16.4, 15.1%를 보였고, 반면 16 Gy에서는 11.2%의 저조한 증가율을 보였다. 그러나 shikonin 유도체의 생성량에에서는 무조사구 0.0116 mg/g에 비해서 다른 선량에서는 저조한 함량을 나타내었다. 그림 56-C와 같이 배양후 14일이 지나면 무조사구 17.6%에 비해 1 Gy의 15.6%를 제외하고 약 20%의 증가효과를 보여주었고, 이 때 shikonin 유도체의 생성량은 무조사구 0.0099 mg/g에 비해 30 Gy에서 0.0139 mg/g을 나타내었으며, 다른 선량에서도 모두 높은 함량을 나타내었다. 그림 56-D와 같이 21일 후의 양상은 무조사구 19.8%에 비해 다른 선량에서는 성장 증가 효과를 볼 수 없었지만, shikonin 유도체의 생성량은 1 Gy의 0.0066 mg/g을 제외하고 모두 높은 함량을 나타내었다. 이상의 결과를 종합해 볼 때 실험 1에서와는 달리 21일 간의 DLB210.2배지에서의 특정 선량간의 성장증가율의 효과는 크지 않았다. 그러나 그에 따른 shikonin 유도체의 생성량은 특정 선량 30 Gy에서 가장 양호한 효과가 있었음이 인정되었다.

### (4) DM-9배지에서의 shikonin 생산효과

암배양에서의 M-9배지에서의 Shikonin 생산효과가 크다는 것을 고려하여 실험한 결과, 역시 배양 초기이므로 그림 57-A와 같이 배양을 시작한지 3일이 지나면 기대했던 것과 같이 무조사구에 비해 성장증가율의 효과가 없었으나, shikonin 유도체의 생성량은 무조사구 0.003 mg/g을 나타내는데 비해 30 Gy에서 0.0112 mg/g의 가장 높은 함량을 나타냈으며, 1, 2 Gy에서 0.009 mg/g내외의 함량을 나타내었고, 16 Gy에서 0.008 mg/g의 가장 낮은 함량을 나타내었다. 그림 57-B는 배양한 지 10일이 지난 후의 양상으로 13%내외의 성장증가율간의 차이는 크지 않았으나, shikonin 유도체의 생성량은 무조사구 0.0083 mg/g을 나타내는데 비해 30 Gy에서 0.0130 mg/g의 가장 높은 함

량을 나타내었고, 2, 16 Gy에서 0.0101, 0.0099 mg/g의 함량을 나타내었으며 1 Gy에서는 0.0079 mg/g의 가장 낮은 함량을 나타내어 특정 선량간의 뚜렷한 효과를 확인하였다. 그림 57-C 배양한 지 14일이 경과한 양상으로 그 생장은 무조사구와 비슷한 성장증가율로 차이가 크게 인정되지 않으나, shikonin 유도체의 생성량은 무조사구 0.0125 mg/g을 나타내는데 비해 2 Gy에서 0.0195 mg/g의 가장 높은 함량을 나타내었고, 30 Gy에서 0.0186 mg/g의 함량을 나타내었으며, 1, 16 Gy에서 0.0140, 0.0149 mg/g의 함량을 나타내 특정 선량간의 뚜렷한 효과가 인정되었다. 배양 21일 후의 그림 57-D에서도 무조사구 14.9%에 비해 모든 선량에서 증가효과가 인정되었고, shikonin 유도체의 생성량은 무조사구 0.0073 mg/g을 나타내는데 비해 30 Gy에서 0.0143 mg/g의 가장 높은 함량을 나타내었고, 2, 16 Gy에서 0.0107, 0.0114 mg/g의 함량을 나타내었으며, 1 Gy에서 0.0074 mg/g의 함량을 나타내 특정 선량간의 조사에 의한 효과가 양호함이 인정되었다.

이상의 결과로 볼 때 21일간의 암배양에서의 M-9배지에서의 callus의 성장증가에 비해 특정 선량 1 Gy에서 Shikonin 생산효과가 매우 양호함이 확인되었다.

#### (5) 암배양조건에서 장기배양의 Callus 성장 및 Shikonin 생산효과

식물의 세포배양은 안정된 cell-line을 확보할 때까지는 계대배양 동안에 viability가 변할 수 있으며, cell-line이 확보된 후에도 오랜 시간이 지나면 이차 대사산물의 생산성이 퇴화될 수 있다는 연구들과, 암배양한 세포의 생장은 3일 쯤부터 급격히 증가하여 11일째에 최대에 이르렀고 그 이후로는 오히려 감소하였다는 보고와, 앞의 2-1~4의 결과를 종합하여 callus 성장증가율에 대한 Shikonin 생산효과는 명배양에서보다 암배양에서 더 효과적이었음을 고려하여, 60일 동안 지속해서 실험을 해본 결과 그림 58-A에서 보는 바와 같이 배양 후의 callus의 성장증가율은 암조건에서의 LB210.2배지에서는 무조사구 57.6%에 비해 2 Gy에서 62.4%의 약간의 양호한 성장증가율을 보였고, 1, 16 Gy에서는 효과를 볼 수 없었으며, 30 Gy에서는 31.9%로 가장 저조한 성장증가율을 나타내었다. LB2N2배지에서는 무조사구 41.7%에 비해 큰 차이는 나지 않지만, 16 Gy에서 46.0%를 나타내었고, 30 Gy에서는 34.9%로 저조한 성장증가율을 나타내었다. M-9배지에서는 무조사구 17.4%에 비해 큰 차이는 인정되지 않지만, 16 Gy를 제외하고 약간의 양호한 효과를 나타냄을 볼 수 있었다.

반면 Shikonin 생산효과를 볼 때 shikonin 유도체의 생성량을 비교하면

21일간의 실험에서 나온 결과와는 달리, 그림 58-B에서 볼 수 있는 것처럼, LB2I0.2배지에서는 무조사구를 비롯하여 1, 2, 16 Gy에서는 거의 차이가 없었으나, 30 Gy에서는 0.0202 mg/g의 함량을 나타내었다. LB2N2배지에서는 특정 선량간의 차이가 거의 없다고 보여진다. 그러나 M-9배지에서는 무조사구 0.0224 mg/g의 함량을 나타낸 반면 2 Gy에서는 0.1321 mg/g의 매우 효과적인 함량을 나타내었다. 그 다음으로는 16 Gy에서 0.0625 mg/g을, 다음으로 1 Gy에서는 0.0332 mg/g의 함량을 나타내었다. 30 Gy에서는 0.0127 mg/g의 가장 저조한 함량을 나타내었다.

위에서 얻은 결과는 암조건에서 특정선량에 대한 생장증가율의 효과는 LB2I0.2배지의 2 Gy에서 가장 좋았고, 그 다음으로 LB2N2배지의 16 Gy에서 좋았다. M-9배지에서는 거의 인정되지 않았지만, 2 Gy에서 좋았다. 반면 shikonin 유도체의 생산의 효과는 LB2I0.2배지는 30 Gy에서 좋았으며, LB2N2배지에서는 거의 효과가 인정되지 않았으며, M-9배지에서는 2 Gy에서 매우 양호한 효과가 있었음을 확인하였다.

이상의 실험 2의 결과를 종합해 볼 때 callus 생장 및 shikonin 유도체의 생성량은 오랜 기간이 지나 지속적으로 증가하는 양상도 볼 수 있었지만, 어느 일정 기간이 지나면 오히려 감소하는 양상도 볼 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 shikonin 유도체의 생성량은 callus 생장과 비례적으로 증가되지 않는 것이 확인되었으며, 저선량 감마선 조사에 의한 callus 생장 및 shikonin 유도체의 생성량의 촉진효과, 특히 M-9배지에 의한 저선량 감마선 조사 효과가 확인되었다.

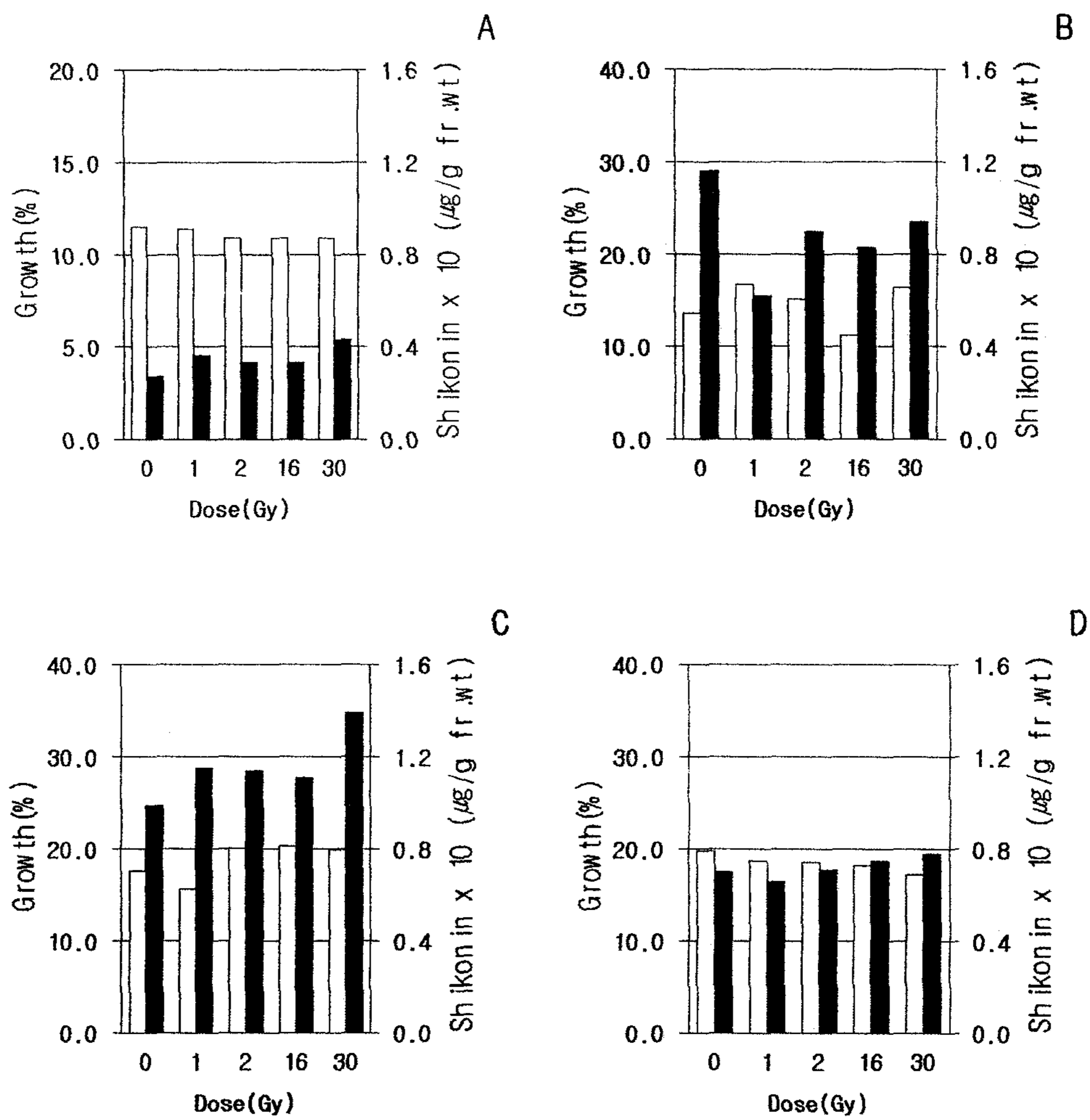


Fig. 56. Effects of gamma radiation on the growth and the contents of shikonin from *L. erythrorhizon* callus after culture for 3(A), 10(B), 14(C) and 21days(D) on LS medium supplemented with BA 2 mg/L and IAA 0.2 mg/L(LB2I0.2) in darkness.

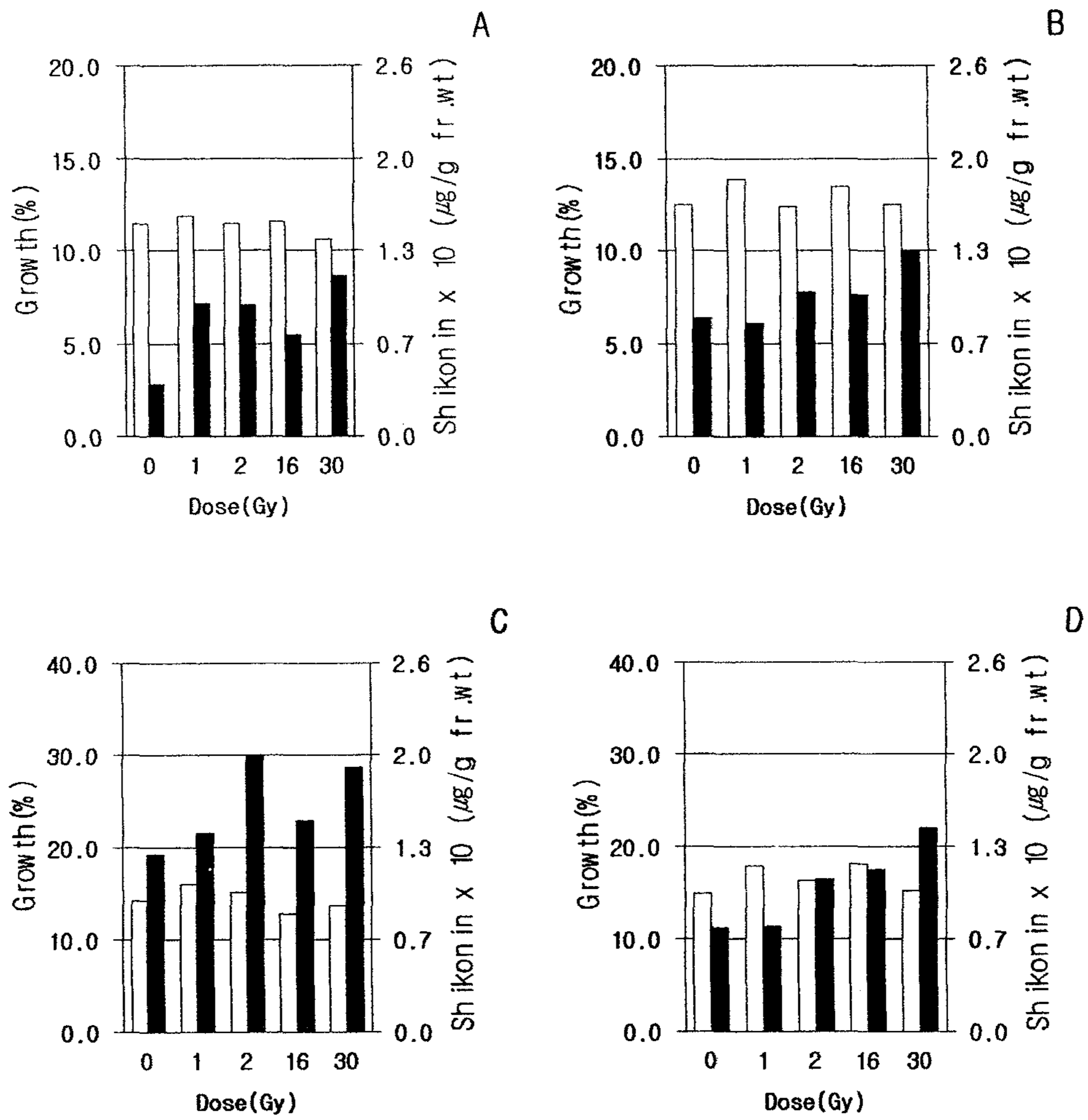


Fig. 57. Effects of gamma radiation on the growth and the contents of shikonin from *L. erythrorhizon* callus after culture for 3(A), 10(B), 14(C), and 21days(D) on M-9 medium in darkness.

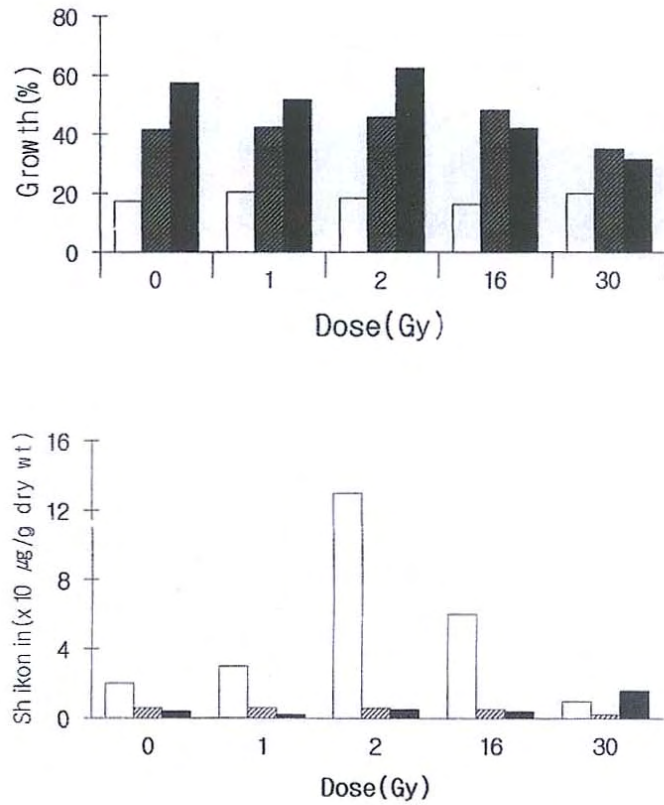


Fig. 58. Effects of gamma radiation on the increasing rate of growth(upper) of callus and the contents of shikonin(lower) of *Lithospermum* callus cultured for 60 days in the dark on the M-9 medium(M-9), LS medium supplemented with BA 2.0mg/l and NAA 2.0mg/l(LB2N2), and LS medium with BA 2.0mg/l and IAA 0.2mg/l(LB2I0.2) from the left.



Table 46. Doses of the high and low levels of callus growth and shikonin content from callus culture in the dark on the three different media after of gamma radiation.

Level Medium	Callus growth		Shikonin content	
	High	Low	High	Low
LB210.2	2.0 <sup>z</sup>	30.0	30.0	1.0
LB2N2	16.0	30.0	2.0	16.0
M-9	1.0	16.0	2.0	30.0

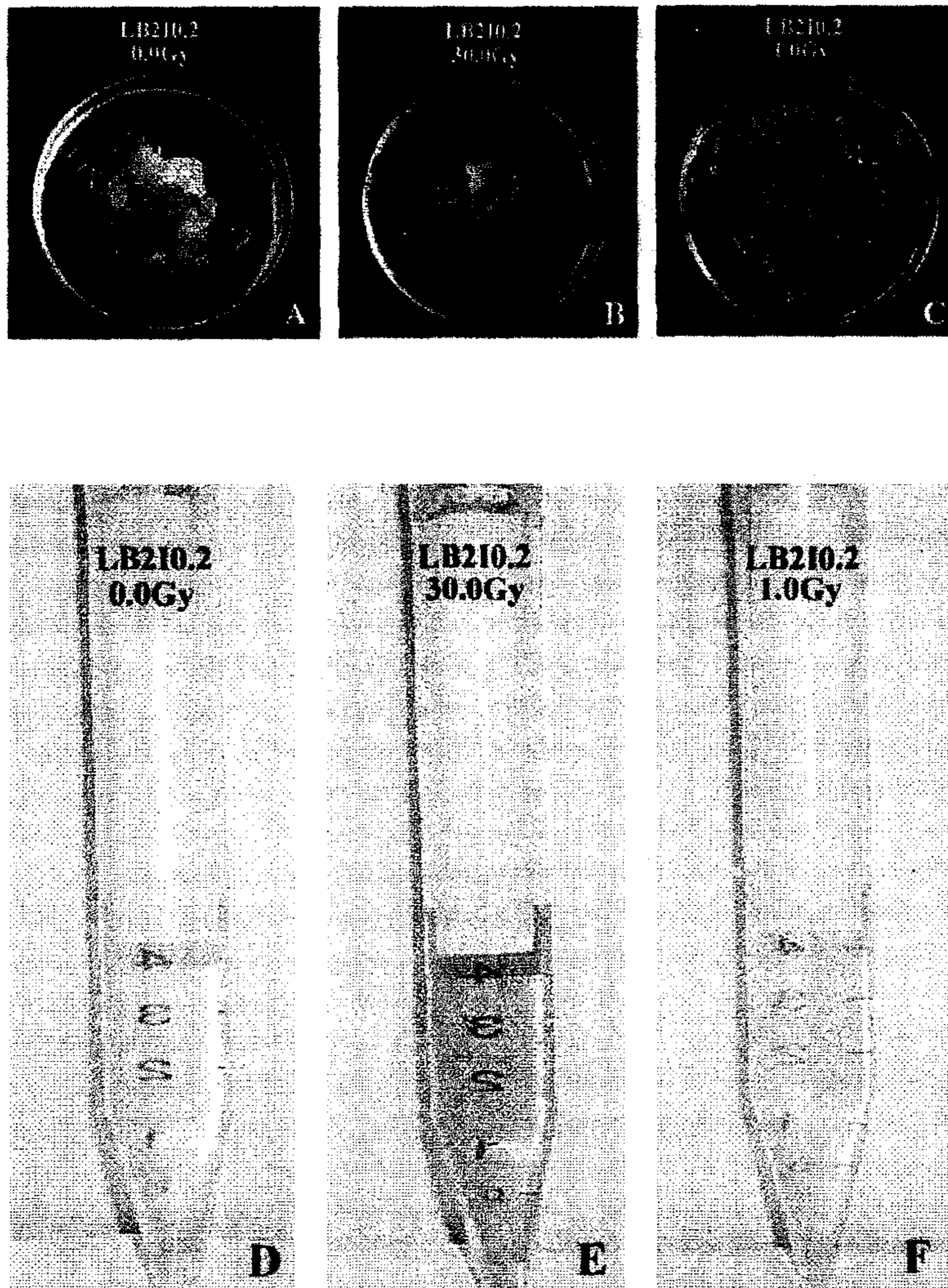


Fig. 59. The red pigment of callus and its extract of *L. erythrorhizon* grown for 60days on LB210.2 medium after gamma radiation.(A) and (D), control (B) and (E), the callus and it extract of high level red pigments (C) and (F), the callus and it extract of low level red pigments

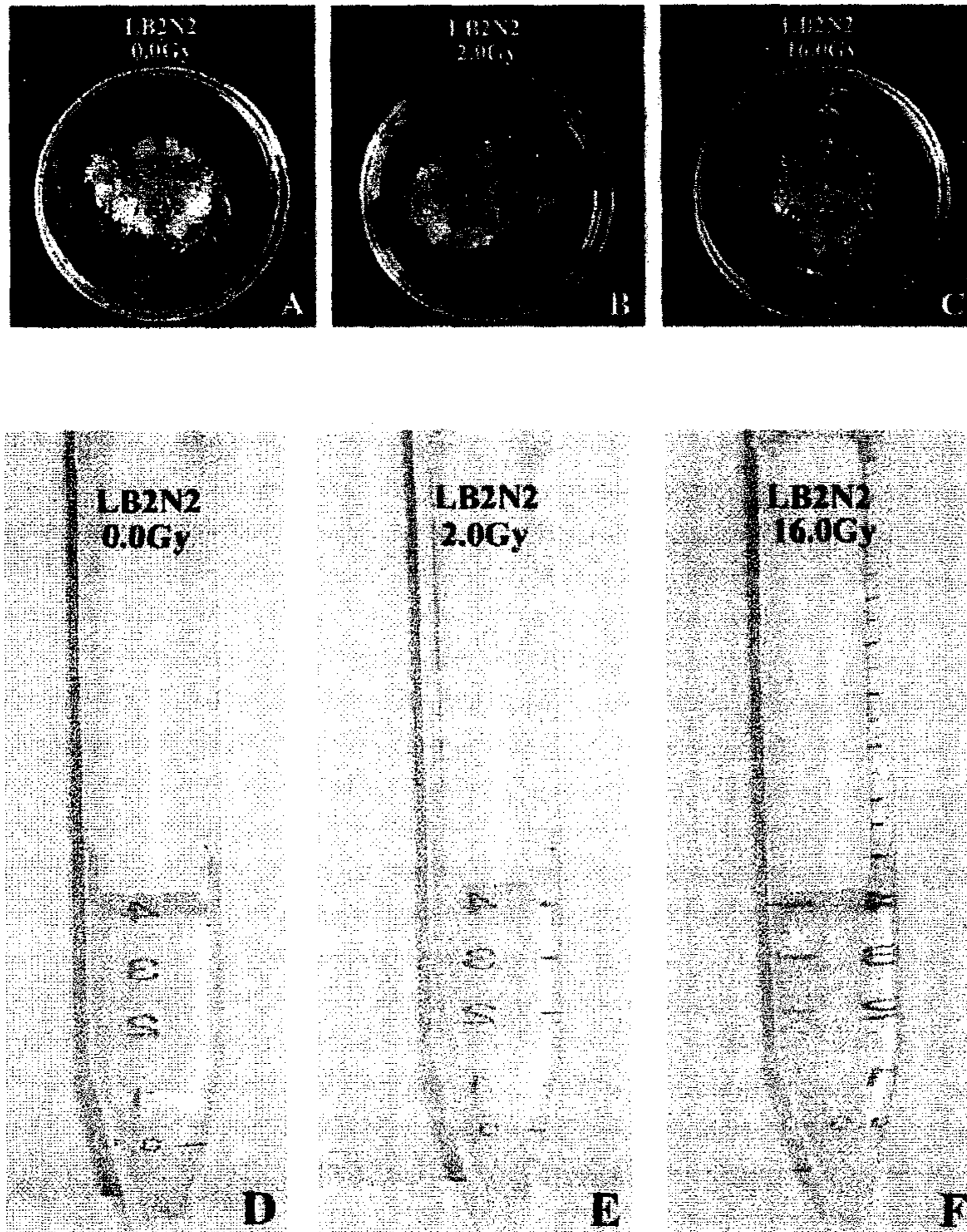


Fig. 60. The red pigment of callus and its extract of *L. erythrorhizon* grown for 60days on LB2N2 medium after gamma radiation.(A) and (D), control (B) and (E), the callus and it extract of high level red pigments (C) and (F), the callus and it extract of low level red pigments.

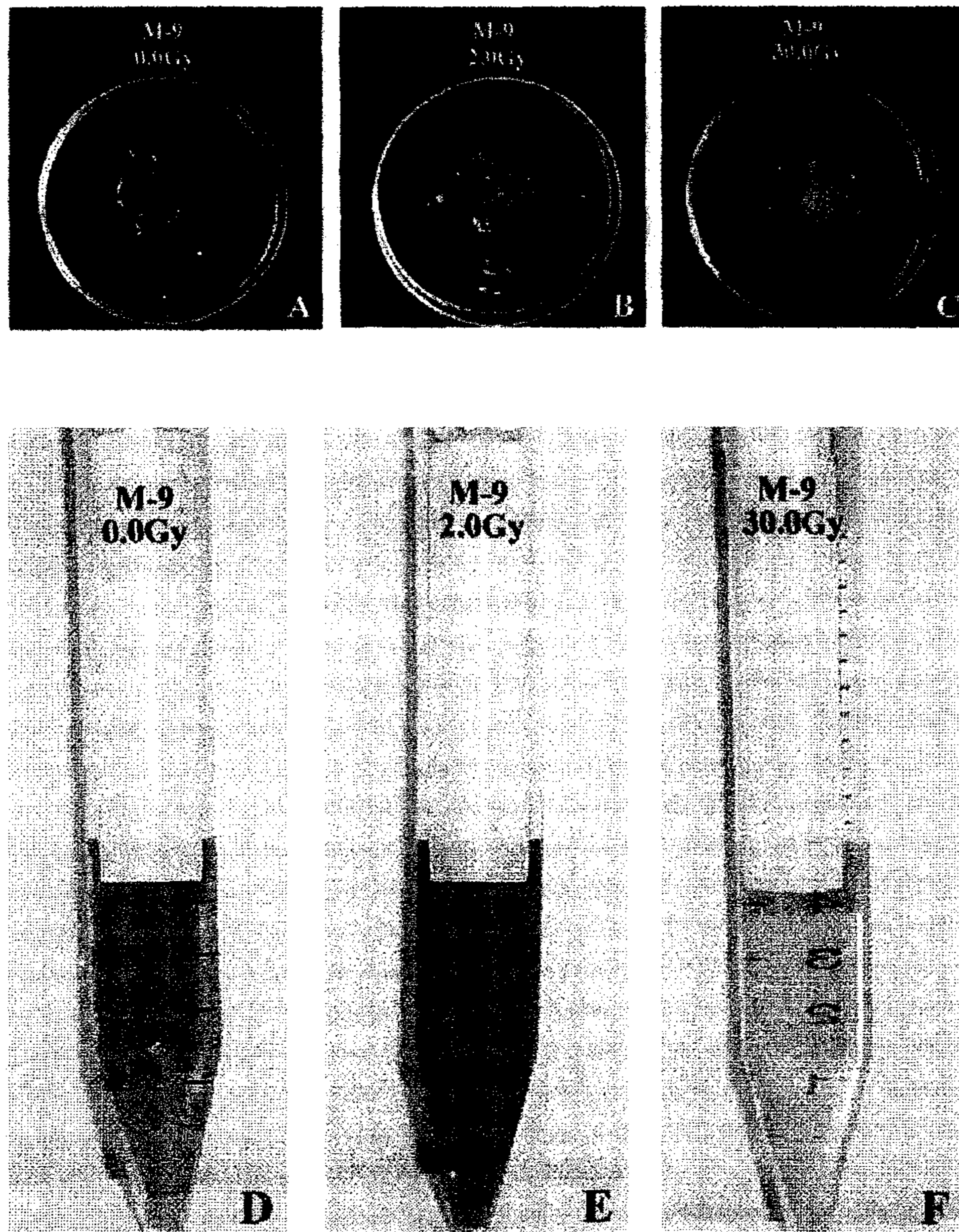


Fig. 61. The red pigment of callus and its extract of *L. erythrorhizon* grown for 60days on M-9 medium after gamma radiation.(A) and (D), control (B) and (E), the callus and its extract of high level red pigments (C) and (F), the callus and it extract of low level red pigments.

## 7. 자연방사선을 함유한 천연 세라믹의 채소작물 생육에 대한 영향

### 가. 배추와 무의 발아와 초기생육

천연세라믹에 의해 방출되는 저선량의 자연방사선이 배추와 무의 발아에 미치는 영향은 파종 1주일 후에 조사되었으며 그 결과는 다음과 같다. 배추의 천연세라믹 처리에 의한 발아율은 대조구에 비해 크게 향상되지 않았지만 5~6개 처리구에서 1~3% 정도 향상되었다(그림 62a). 이러한 경향은 무 실험구에서도 나타났으며 5~6개 처리구에서 1~3% 정도 향상되었다(그림 62b).

천연세라믹에 의해 방출되는 저선량의 자연방사선이 배추와 무의 초장에 미치는 영향은 파종 3주일 후부터 6주까지 조사되었으며 그 결과는 다음과 같다. 배추의 경우 3주째의 초장은 세라믹 3개와 8개 처리구에서 각각 대조구에 비해 5%와 3% 높았으며, 무의 경우 모든 처리구에서 대조구와 유의한 차이가 없었다(표 47). 파종 4주 후 배추 초장은 세라믹 1개, 3개 및 8개 처리구에서 대조구에 비해 각각 3%, 4%, 3% 향상되었고, 무의 경우 별 다른 처리효과가 나타나지 않았다(표 47). 파종 5주 후 배추 초장은 세라믹 2개 처리구에서 대조구에 비해 3% 향상되었고, 무의 경우 모든 처리구에서 2~5% 향상되었다(표 47).

파종 6주 후 배추 초장은 세라믹 7개 처리구를 제외한 나머지 처리구에서 1~7% 향상되고 특히 2개, 7개 처리구에서 가장 높았으며(그림 63a), 무의 경우 3개와 7개 고품세라믹 처리구에서 대조구보다 4% 높았다(그림 63b). 실험 결과를 토대로 볼 때 고품세라믹에서 방출되는 저선량의 자연방사선이 배추와 무의 발아율 및 초장에 영향을 줄 수 있으리라 판단되지만 그 반응 정도가 작아 더욱 정밀한 실험이 필요할 것으로 판단되며, 배추가 무보다 반응의 정도가 크기 때문에 좀 더 많은 작물을 대상으로 실험을 추진하여야 할 것으로 사료된다.

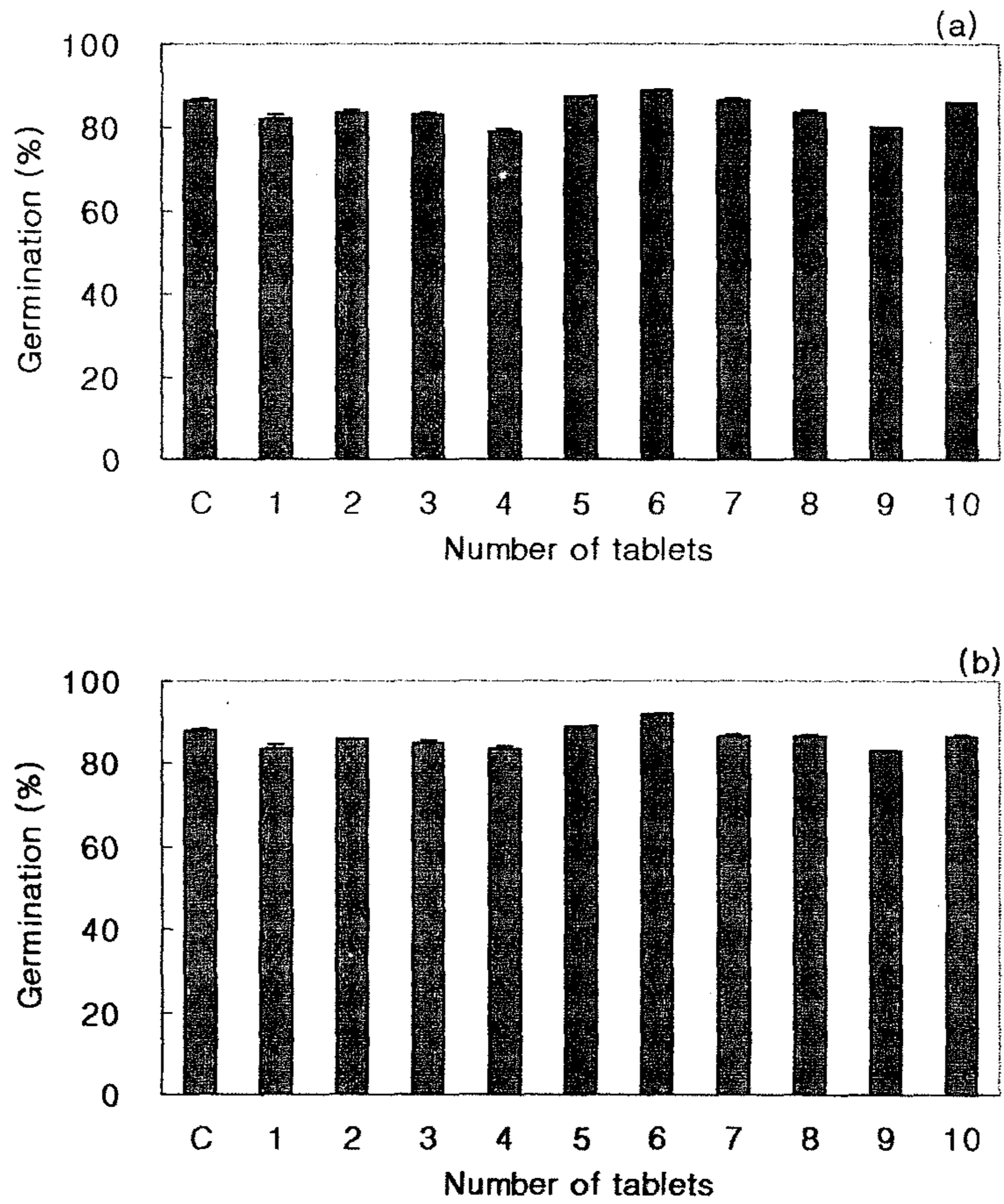


Fig. 62. Germination rate(%) of chinese cabbage(a) and radish(b) with solid ceramics. C indicates control without solid ceramics. Bars represent means  $\pm$  standard errors.

Table 47. Seedling height(cm/plant) of chinese cabbage(a) and radish(b) with solid ceramics. C indicates control without solid ceramics.

No. of ceramic	Chinese cabbage			Radish		
	3 week	4 week	5 week	3 week	4 week	5 week
Cont.	11.8	13.3	14.9	13.4	14.8	18.5
1	11.6	13.6	15.0	13.4	14.7	19.1
2	11.9	13.2	15.3	12.6	14.0	18.8
3	12.4	13.9	14.9	13.1	14.4	19.4
4	11.6	13.3	14.0	12.8	14.2	18.9
5	11.6	13.1	13.8	13.2	15.0	19.0
6	11.9	13.3	14.8	13.0	14.3	19.2
7	11.9	13.3	14.2	12.6	13.5	18.9
8	12.1	13.7	14.8	12.9	14.3	19.4
9	11.7	13.1	15.0	12.8	14.1	19.4
10	11.7	12.9	14.4	12.8	14.2	19.0

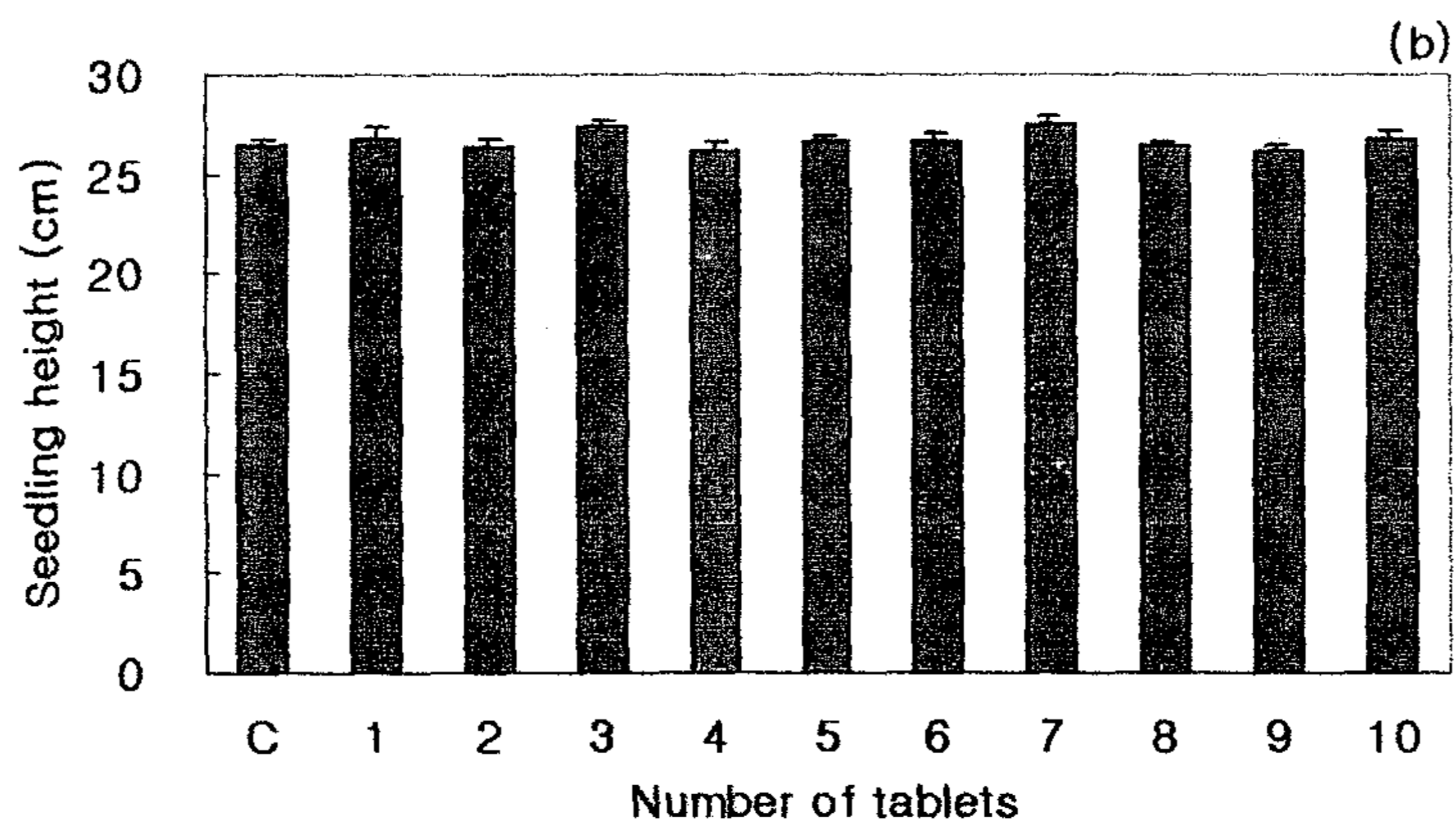
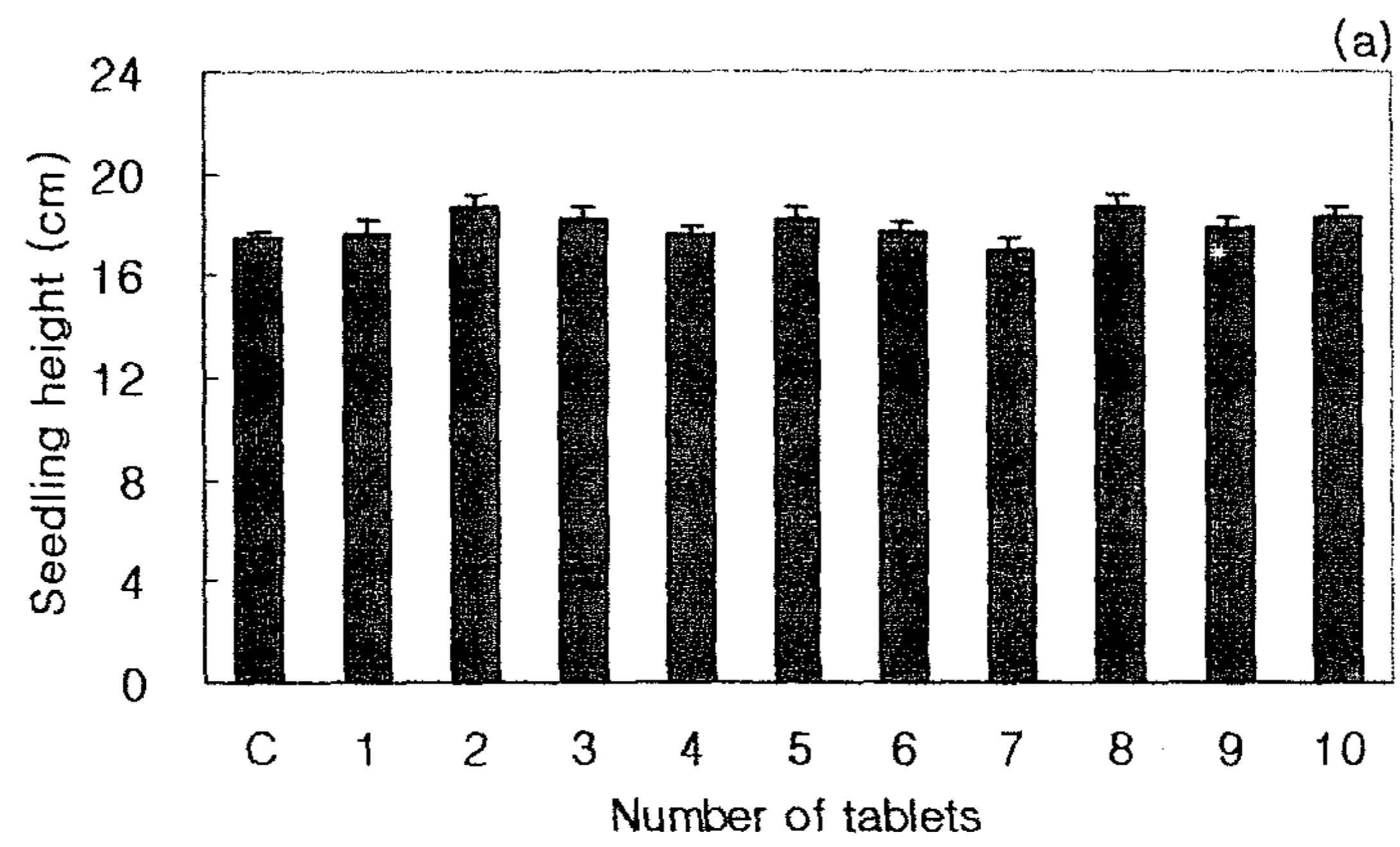


Fig. 63. Seedling height(cm/plant) of chinese cabbage(a) and radish(b) with solid ceramics. C indicates control without solid ceramics. Bars represent means  $\pm$  standard errors.



## 나. 배추와 무의 효소활성과 호르몬함량

### (1) 배추와 무의 효소활성

파종 4주 후 배추의 단백질함량(mg/g fresh weight), CAT(unit/mg protein) 및 POD(unit/mg protein)의 활성은 그림 64와 같다. 단백질함량은 전체적으로 유의한 차이가 없었지만(그림 64a), CAT와 POD 활성의 경우 고품 세라믹 처리구에서 높아지는 경향을 나타내었다(그림 64b, 64c).

파종 6주 후 배추의 단백질함량(mg/g fresh weight), CAT(unit/mg protein) 및 POD(unit/mg protein)의 활성은 그림 65와 같다. 단백질함량은 전체적으로 4주 후에 조사한 것과 비슷하게 유의한 차이가 없었지만, 전체 함량은 3배 이상 증가하였다(그림 65). CAT와 POD 활성의 경우도 4주 후의 조사와 비슷하였으며 활성은 4주와 비교해 3배 이상 증가하였다(그림 65b, 65c).

파종 4주 후 무의 단백질함량(mg/g fresh weight), CAT(unit/mg protein) 및 POD(unit/mg protein)의 활성은 그림?와 같다. 단백질함량은 전체적으로 유의한 차이가 없었으며 처리에 따른 일정한 경향을 보이지 않았다(그림 66a). CAT와 POD 활성의 경우도 단백질 함량의 경우와 마찬가지로 처리구별 차이나 일정한 패턴을 보이지 않았다(그림 66b, 66c).

단백질함량은 전체적으로 4주 후에 조사한 것과 비슷하게 처리구별로 유의한 차이가 없었지만, 전체 함량은 2배 이상 증가하였다(그림 67a). CAT와 POD 활성의 경우도 4주 후의 조사와 비슷하였으며 활성은 4주와 비교해 3배 이상 증가하였다(그림 67b, 67c). 실험 결과를 토대로 볼 때 고품세라믹에서 방출되는 저선량의 자연방사선이 배추와 무의 단백질 함량 및 항산화 효소 활성에 유의한 영향을 미치는 것으로는 판단되지 않는다.

### (2) 무의 지베렐린 함량

파종 4주 후 무의 지베렐린( $GA_{20}$ ,  $GA_1$ ) 함량(ng/g DW)에 대한 영향은 그림 68a와 같다.  $GA_{20}$ 의 경우 고품 세라믹 처리와 비례하여 증가하는 경향을 보였지만,  $GA_1$ 의 경우는 이러한 경향을 보이지 않았고 고품 세라믹 3개 처리구에서 가장 높았다.

파종 6주 후 무의 지베렐린 함량(ng/g DW)에 대한 영향은 그림 68과 같다.  $GA_{20}$ 의 경우 4주와는 달리 고품 세라믹 처리와 비례하여 감소하는 경향을 보였으며,  $GA_1$ 의 경우는 이러한 경향을 보이지 않았고 고품 세라믹 7개 처리구에서 가장 높았다(그림 68).

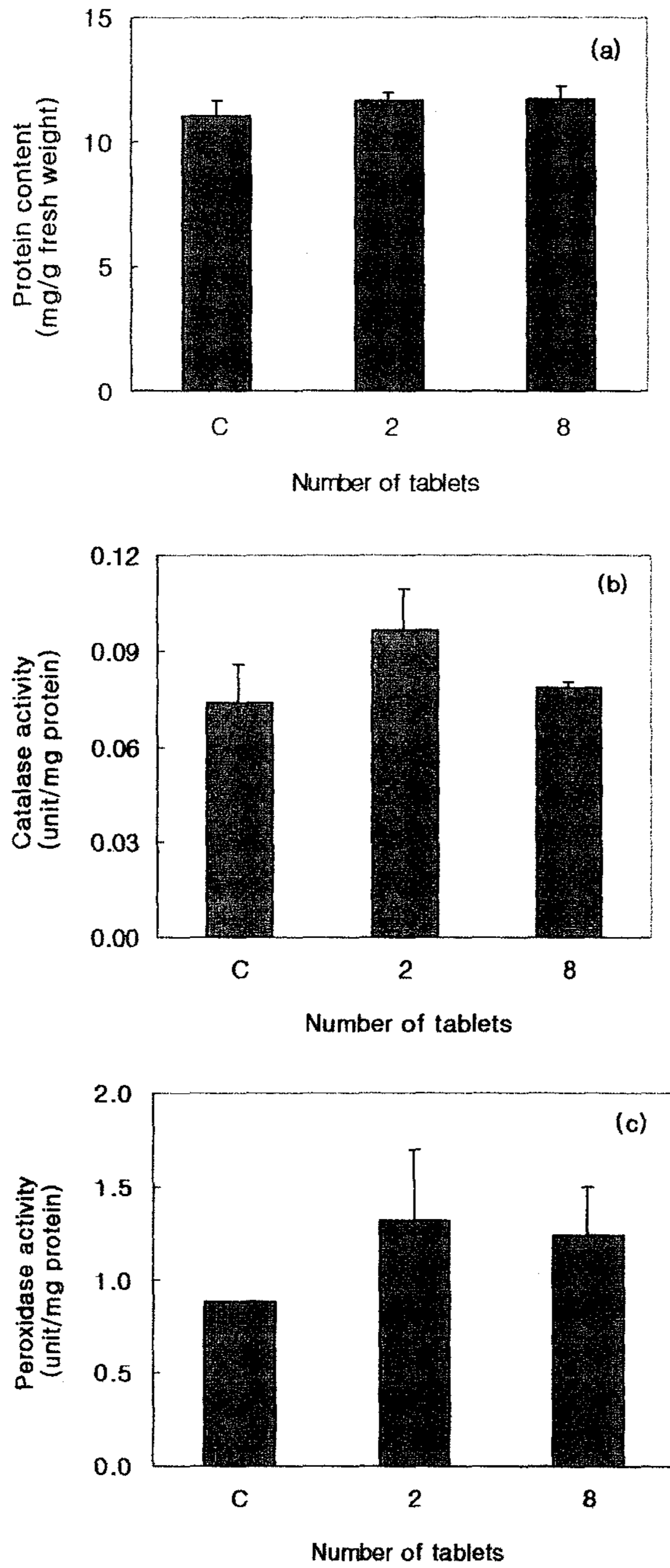


Fig. 64. (a) Protein content(mg/g fresh weight), (b) CAT(unit/mg protein) and (c) POD(unit/mg protein) activities of chinese cabbage at week 4 growth stage with solid ceramics. C indicates control without solid ceramics. Bars represent means  $\pm$  standard errors.

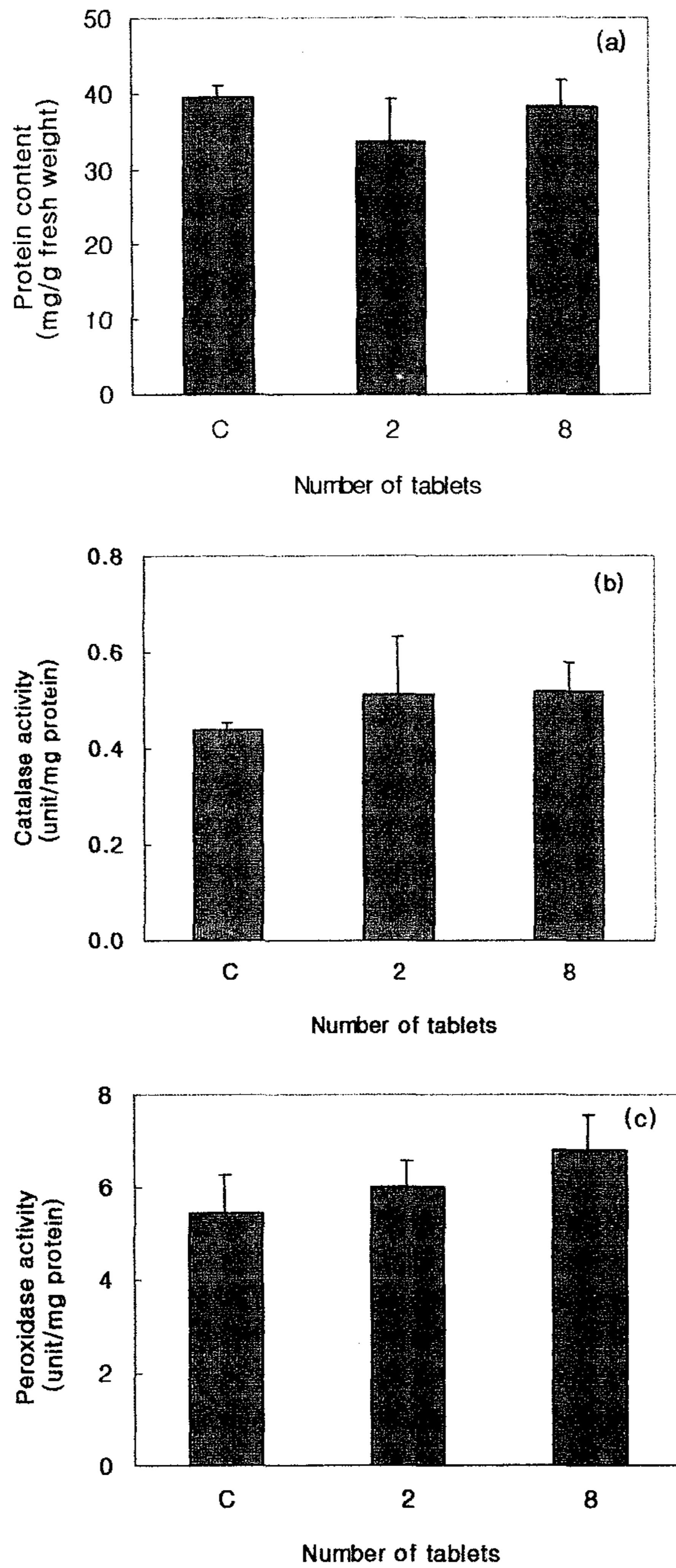


Fig. 65. (a) Protein content(mg/g fresh weight), (b) CAT(unit/mg protein) and (c) POD(unit/mg protein) activities of chinese cabbage at week 6 growth stage with solid ceramics. C indicates control without solid ceramics. Bars represent means  $\pm$  standard errors.

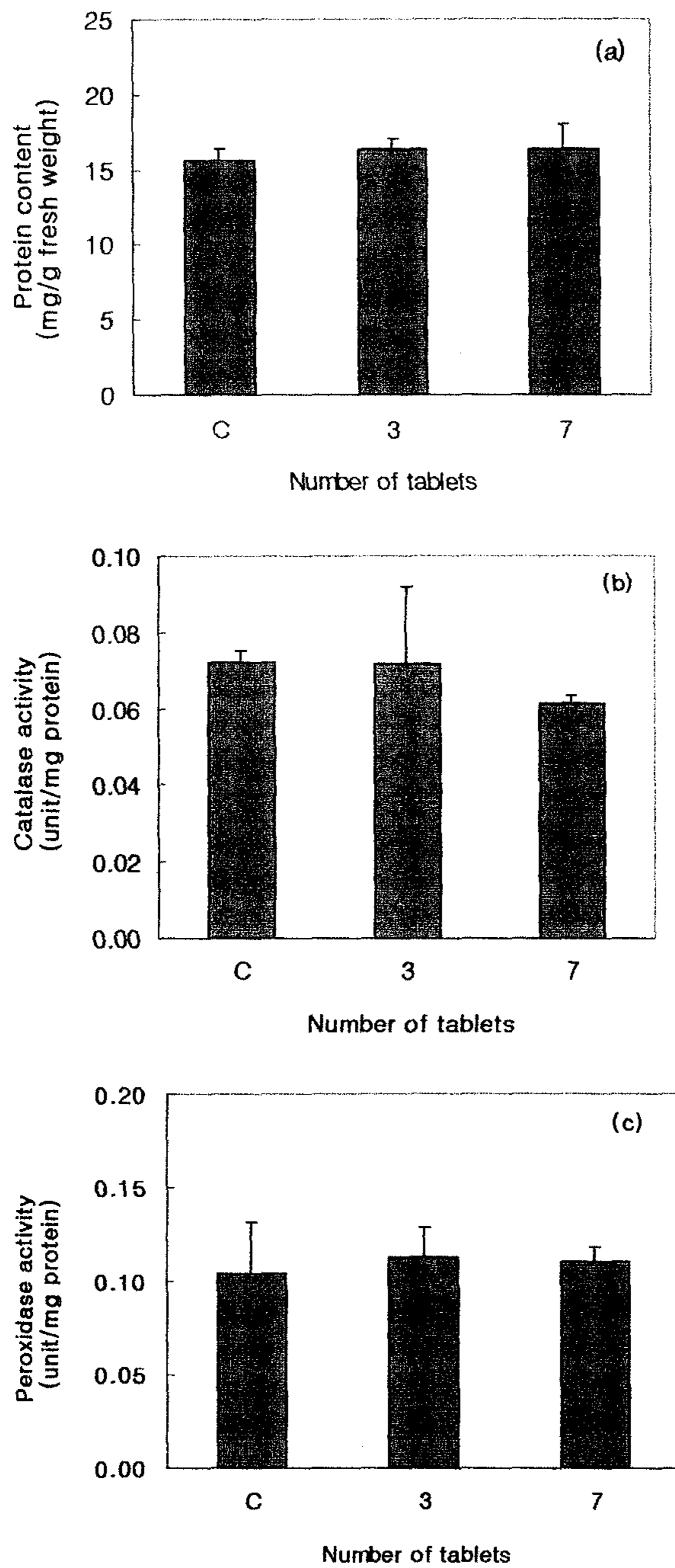


Fig. 66. (a) Protein content(mg/g fresh weight), (b) CAT(unit/mg protein) and (c) POD(unit/mg protein) activities of radish at week 4 growth stage with solid ceramics. C indicates control without solid ceramics. Bars represent means  $\pm$  standard errors.

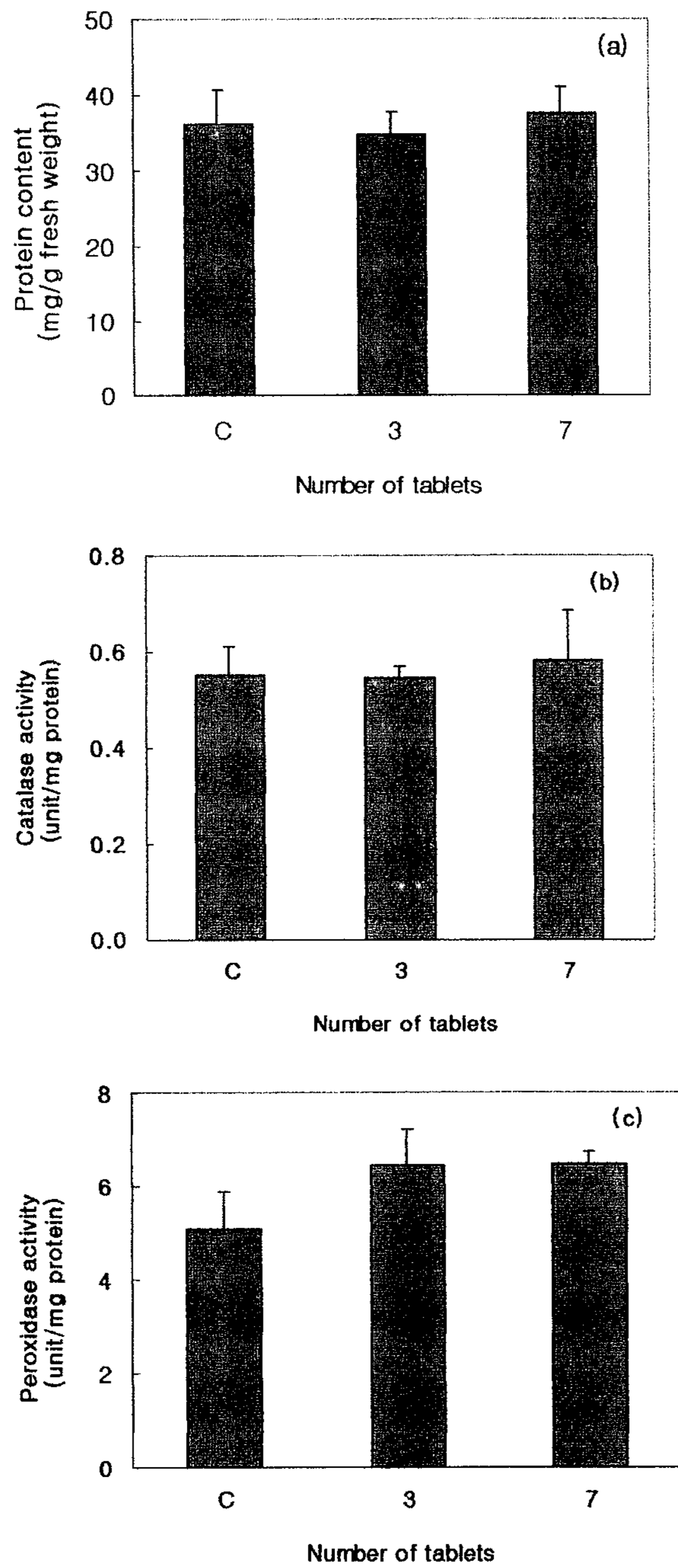


Fig. 67. (a) Protein content(mg/g fresh weight), (b) CAT(unit/mg protein) and (c) POD(unit/mg protein) activities of radish at week 6 growth stage with solid ceramics. C indicates control without solid ceramics. Bars represent means  $\pm$  standard errors.

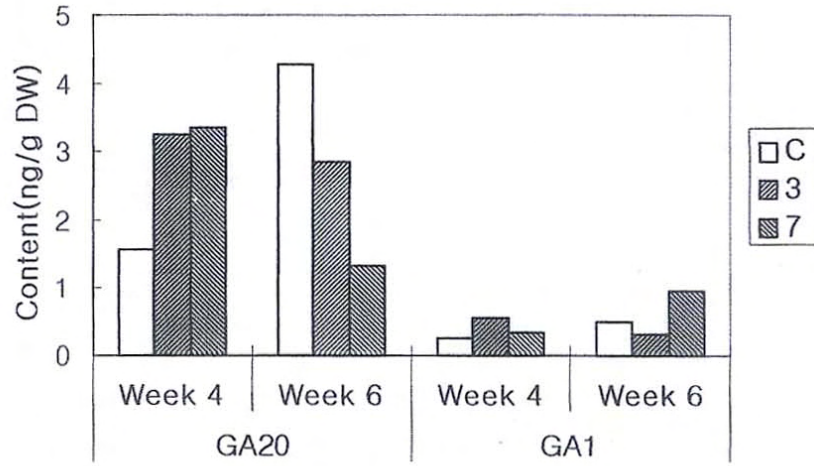


Fig. 68. GA<sub>20</sub> and GA<sub>1</sub> content (ng/g dry weight) of radish at week 4 and 6 growth stages with solid ceramics. C, 3 and 7 indicate control without solid ceramics, applications of 3 and 7 ceramics, respectively.

## 8. 저선량 조사가 작물의 생리 활성화에 미치는 영향

### 가. 효소활성

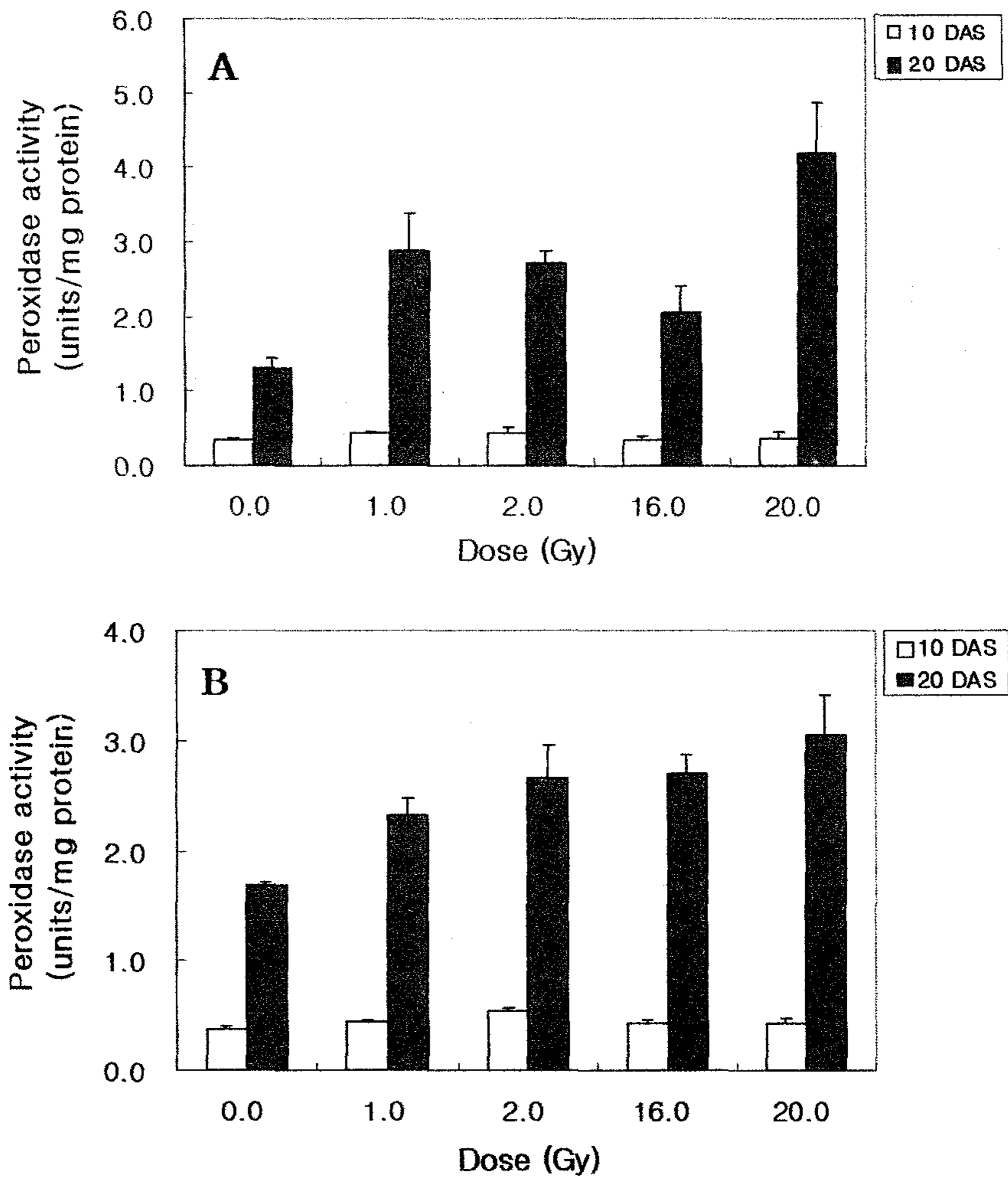
식물은 환경 스트레스에 의해 생체내의 산소가 반응성이 높은 활성산소로 변화하여 생리적 장애를 유발하나 POD, CAT, superoxide dismutase 등의 항산화효소 작용에 의해 이들 활성산소를 제거하는 방어적 기능도 동시에 보유하고 있는 것으로 알려져 있다. 저선량 방사선에 의한 식물 자극작용도 이들 효소 작용에 의한 것으로 일부 보고되어 있어<sup>87,31)</sup>, 본 실험에서도 저선량 방사선에 의한 식물 자극효과를 규명하고자 다양한 품종에서 이들 항산화효소의 활성을 분석하였다.

#### (1) 배추 유식물

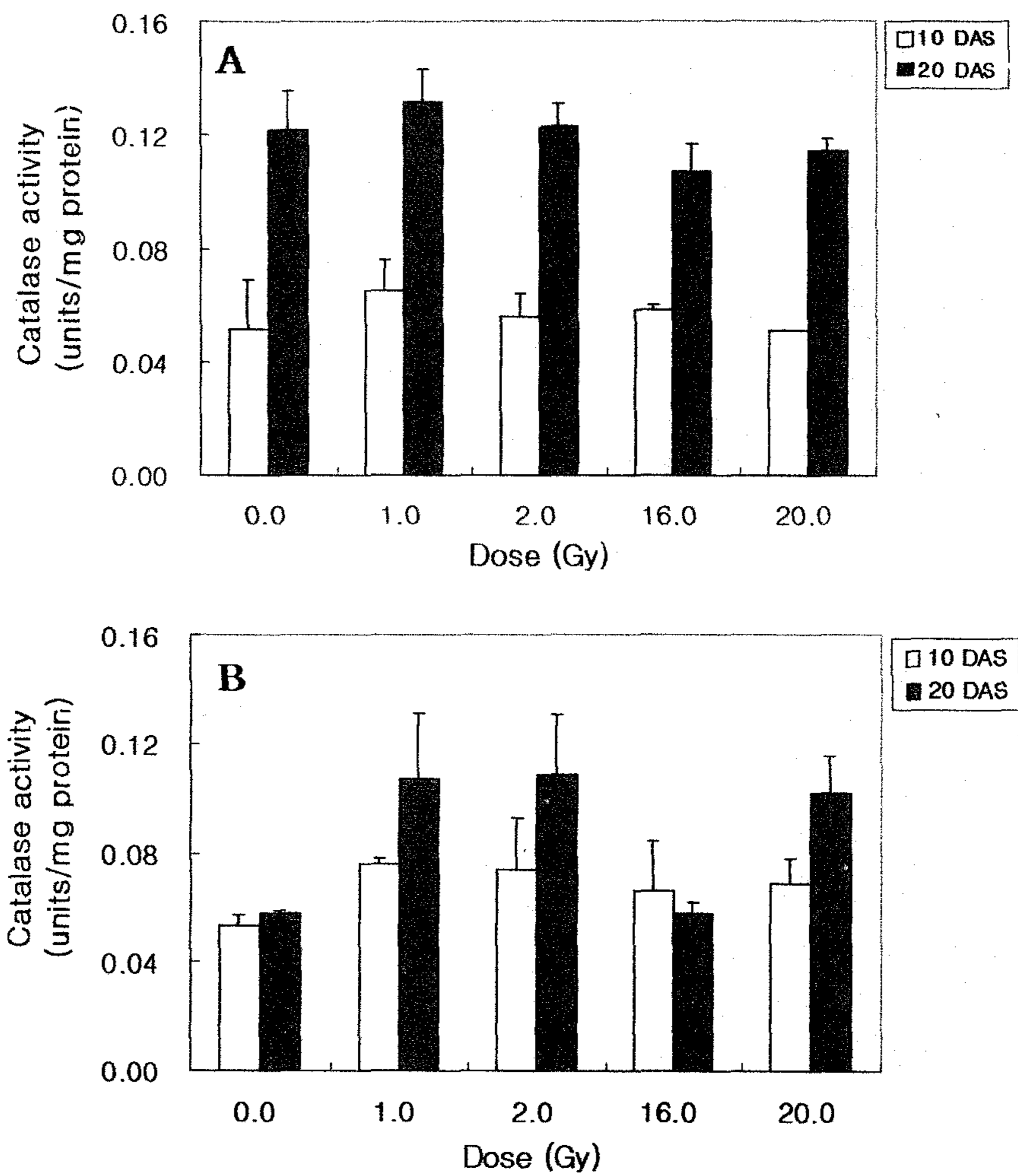
저선량 조사하여 재배한 배추의 엽록소 함량 분석을 위해 채취한 시료에서 항산화 효소도 함께 분석하였다. 만점 배추의 POD 활성은 그림 69A에서 보는바와 같이 저선량 조사구 전체가 대조구에 비해 높은 활성을 보였으며 파종 20일 후가 10일 후에 비해 훨씬 높았다. 파종 10일 후의 경우 생육이 양호한 2.0 Gy와 1.0 Gy 조사구간에 각각 0.437 unit와 0.430 unit로 대조구의 0.334 unit보다 30%정도 증가하였으나 생육이 불량한 20.0 Gy와 16.0 Gy 조사구는 0.345 unit 와 0.341 unit로 낮았다. 파종 20일 후에는 대조구에 비해 유의성 있는 높은 POD 활성을 보였으나 생육과는 어떤 경향을 보이지 않았다. 즉, 생육이 가장 불량한 16.0 Gy 조사구는 2.05 unit로 저선량 조사구 중 가장 낮은 활성을 보였으나 다음으로 생육이 불량한 20.0 Gy 조사구는 POD 활성이 가장 높은 4.19 unit로 대조구의 1.31 unit에 비해 3배 이상 유의성 있게 ( $p < 0.01$ ) 증가하였다. 그림 69B는 서림엇같이 배추의 POD 활성을 보여주는 것인데 저선량 조사구 모두가 대조구보다 높은 활성을 보였다. 파종 10일 후의 경우 생육이 양호하였던 2.0 Gy와 1.0 Gy 조사구가 각각 0.538 unit ( $p < 0.01$ )와 0.445 unit ( $p < 0.05$ )로 대조구 0.372 unit보다 각각 45%와 20% 정도 유의성 있게 증가하였다. 파종 20일 후에는 초기와는 반대로 생육이 불량한 20.0 Gy와 16.0 Gy 조사구가 각각 3.044 unit ( $p < 0.05$ )와 2.700 unit ( $p < 0.01$ )로 대조구의 1.680 unit보다 60~80% 정도 유의성 있게 증가하였다. 생육이 양호하였던 2.0 Gy 조사구와 1.0 Gy 조사구는 각각 2.660 unit ( $p < 0.05$ )와 2.320 unit ( $p < 0.05$ )로 다소 낮은 활성을 보여 저선량 감마선 조사선량의 증가에 따라 POD 활성도 증가하였다.

만점 배추의 CAT 활성 (그림 70 A)은 파종 10일 후의 경우 어떤 경향을 보이지 않고 1.0 Gy 조사구가 0.065 unit로 대조구의 0.052 unit보다 25% 정도 높았고 다음이 16.0 Gy 조사구의 0.058 unit였으나 20.0 Gy 조사구는 가장 적은 0.051 unit로 대조구보다 활성이 낮았다. 파종 20일 후의 CAT 활성은 생육이 가장 좋았던 1.0 Gy 조사구가 0.131 unit로 가장 높았고 다음이 2.0 Gy 조사구의 0.123 unit였다. 생육이 불량한 16.0 Gy와 20.0 Gy 조사구는 각각 0.107 unit와 0.114 unit로 대조구의 0.122 unit보다 낮은 활성을 보였다. 서림엇같이 배추의 CAT 활성 (그림 70B)은 저선량 조사구 모두가 대조구보다 높은 활성을 보였으며, 저선량 조사구중 낮은 선량에서는 높고 높은 선량에선 낮았다. 파종 10일 후의 경우 1.0 Gy와 2.0 Gy 조사구는 각각 0.076 unit ( $p < 0.05$ )와 0.074 unit로 대조구의 0.053 unit보다 약 40% 정도 증가하였다. 파종 20일 후에는 2.0 Gy와 1.0 Gy 조사구가 각각 0.108 unit와 0.107 unit로 대조구의 0.058 unit보다 약 85% 정도 증가하였으나 통계적 유의성은 없었으며 20.0 Gy 조사구는 0.102 unit로 대조구보다 약 75% 정도 유의성 있는 ( $p < 0.05$ ) 증가를 보였다. 저선량 조사에 의한 배추유식물체의 항산화효소 활성은 POD와 CAT 모두 저선량 조사구가 대조구보다 대체로 높은 활성을 보였다. 항산화 효소 POD는 조사선량의 증가에 따라 활성도 증가하였으나 CAT는 낮은 선량에서는 높고 높은 선량에서는 활성이 감소하였다. Zhezhe<sup>87)</sup>은 식물에 저선량 방사선을 조사하면 POD 활성과 단백질 함량이 증가한다고 하였으며 이 등<sup>88)</sup>의 보고에 의하면 카사바 세포덩어리에 방사선 조사시 선량 증가에 따라 생육이 감소하였으나 POD 활성은 증가하여 70.0 Gy 조사구에서는 250% 증가하였다. Sah와 Pramanik<sup>89)</sup>는 보리 종자에 유해한 방사선량을 조사한 결과 유묘초장은 감소하였으나 POD 활성은 35~100% 증가하였다고 보고하였다. Garg 등<sup>31)</sup>은 겨자종자에 방사선 조사시 저선량에서는 발아와 생장이 촉진되고 CAT 활성도 증가하였으나 고선량에선 감소하였다고 하였고, 이 등<sup>88)</sup>은 CAT 활성이 방사선 조사에 별 영향이 없다고 하였다.





**Fig. 69.** Peroxidase activity of chinese cabbage grown from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. A ; Manjeom cv. produced in 1998, B ; Sulim eockari cv. produced in 1994. Data represents mean  $\pm$  standard error. DAS ; days after sowing.



**Fig. 70.** Catalase activity of chinese cabbage grown from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. A : Manjeom cv. produced in 1998, B : Sulim eockari cv. produced in 1994. Data represents mean±standard error. DAS : days after sowing.

## (2) 묵은 참박

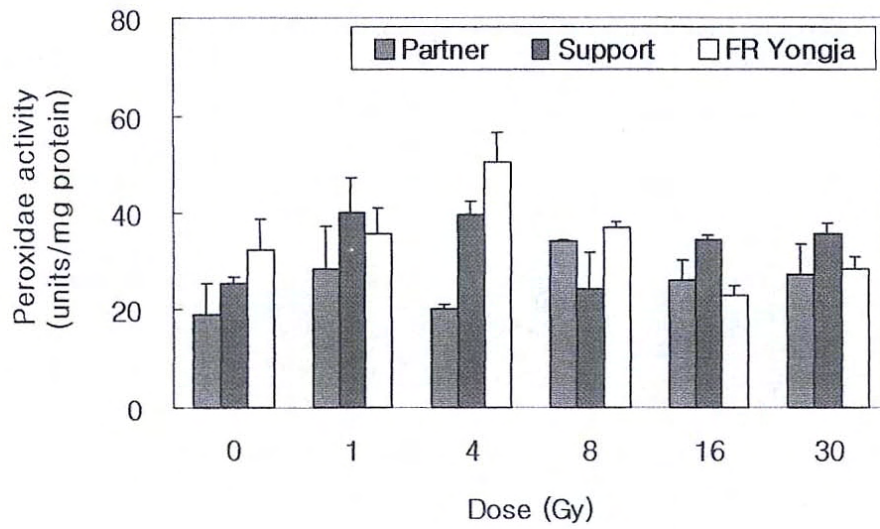
저선량 조사한 참박 유식물체중의 엽록소함량 분석과 함께 항산화효소 활성도 함께 분석하였다. 앞중의 POD 활성은 그림 71에서 보는바와 같이 Patner와 Support 품종은 모두 저선량 조사구가 대조구에 비해 높은 활성을 보였으나 품종별로 다른 경향을 보였고 생육상황과도 어떠한 뚜렷한 상관성이 없었다. Patner의 경우 대조구의 18.96 unit에 비해 8 Gy 조사구가 34.27 unit로 가장 높았고 다음이 1 Gy와 30 Gy로 각각 28.43 unit와 27.37 unit 순이었다. Support 품종에서는 1 Gy 조사구가 39.72 unit로 가장 높았고 다음이 4 Gy 와 30 Gy 조사구로 각각 39.47 unit와 35.66 unit로 대조구의 25.61 unit에 비해 통계적으로 유의성있는 ( $p < 0.05$ ) 증가를 보였다. FR용자에서는 4 Gy와 8 Gy 조사구가 각각 50.48 unit와 36.71 unit로 대조구 32.38 unit보다 높은 값을 보였으나 30 Gy와 16 Gy 조사구는 각각 28.39 unit와 22.79 unit로 대조구보다 낮은 값을 보였다.

그림 30은 CAT 활성을 나타낸 것인데 세품종 모두 1 Gy와 4 Gy 조사구가 가장 높은 값으로 대조구에 비해 통계적으로 유의성있는 증가경향을 보였다. 이상의 결과로 볼 때 저선량 조사에 의한 참박의 초기생육과 항산화효소 활성은 어떤 뚜렷한 상관관계를 나타내지는 않았으나 저선량 조사에 의해 초기생육과 항산화효소 활성은 대체로 증가하는 경향을 보였다. 품종별로도 다른 경향을 보였는데 Patner와 Support 품종에서는 생육이 양호한 저선량 조사구는 항산화효소 활성이 낮았고 생육이 대체로 빈약한 조사구에서 항산화효소 활성이 높았으나 FR용자에서는 발아와 생육이 양호한 조사구에서 항산화효소 활성도 대체로 높았다. 본 자료는 짧은 기간 초기생육에서의 분석결과이므로 생육시기별로 더 많은 선량에서 좀 더 세밀한 관찰이 필요하다고 사료된다.

Zhezhe<sup>87)</sup>은 식물에 저선량 방사선을 조사하면 POD 활성과 단백질 함량이 증가한다고 하였으며 이 등<sup>88)</sup>의 보고에 의하면 카사바 세포덩어리에 방사선 조사시 선량 증가에 따라 생육이 감소하였으나 POD 활성은 증가하여 70 Gy 조사구에서는 250% 증가하였다. Sah와 Pramanik<sup>89)</sup>는 보리종자에 유해한 방사선량을 조사한 결과 유효초장은 감소하였으나 POD 활성은 35~100% 증가하였다고 보고하였다. Garg 등<sup>31)</sup>은 겨자종자에 방사선 조사시 저선량에서는 발아와 생장이 촉진되고 CAT 활성도 증가하였으나 고선량에선 감소하였다고 하였고 이 등<sup>88)</sup>은 CAT 활성이 방사선 조사에 별 영향이 없다고 하였다.

다음으로 저선량 감마선이 참박의 초기 생육 시기별로 단백질과 효소 활성 변화에 어떠한 영향을 미치는지 관찰하였다. 첫째로 파종 11일 후 참박

의 자엽 성장기에 대조구보다 생육이 좋았던 4 Gy와 8 Gy 조사구의 자엽을 채취하여 저선량 감마선 조사에 따른 단백질과 CAT 및 POD의 활성 변화를 조사하였다. 자엽의 단백질 함량은 대조구 3.98 mg/g에 비해 4 Gy와 8 Gy 조사구에서 별다른 증가효과를 보이지 않았으나(그림 73a), 효소활성에서는 저선량 조사구에서 높은 활성을 보였는데 CAT 활성은 대조구 0.78 unit에 비해 4 Gy와 8 Gy 조사구에서 각각 0.81 unit와 0.87 unit로 3~11% 증가하였으며(그림 73b), POD 활성도는 대조구의 경우 1.99 unit인 반면 4 Gy와 8 Gy 조사구에서 각각 2.23 unit와 2.29 unit으로 12~15% 증가하였다(그림 73c). 파종 18일 후인 2분엽기에 단백질과 효소활성을 측정한 결과, 단백질 함량과 CAT 활성은 대조구에 비해 별다른 증가효과를 보이지 않았으나(그림 73a, b), POD 활성은 대조구 1.94 unit에 비해 4 Gy와 8 Gy 조사구에서 각각 2.50 unit와 2.28 unit로 17~29% 증가하였다.



**Fig. 71.** Peroxidase activity of gourd developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. Bars represent mean±standard error.

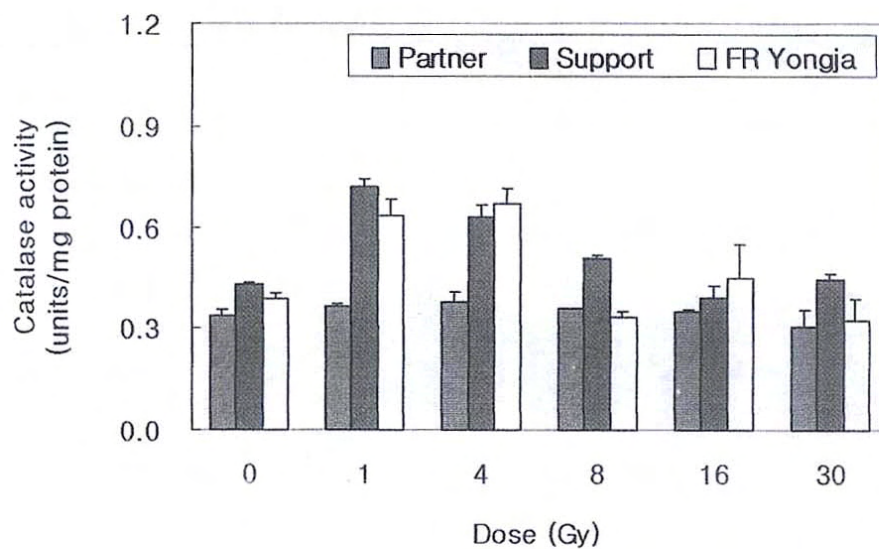
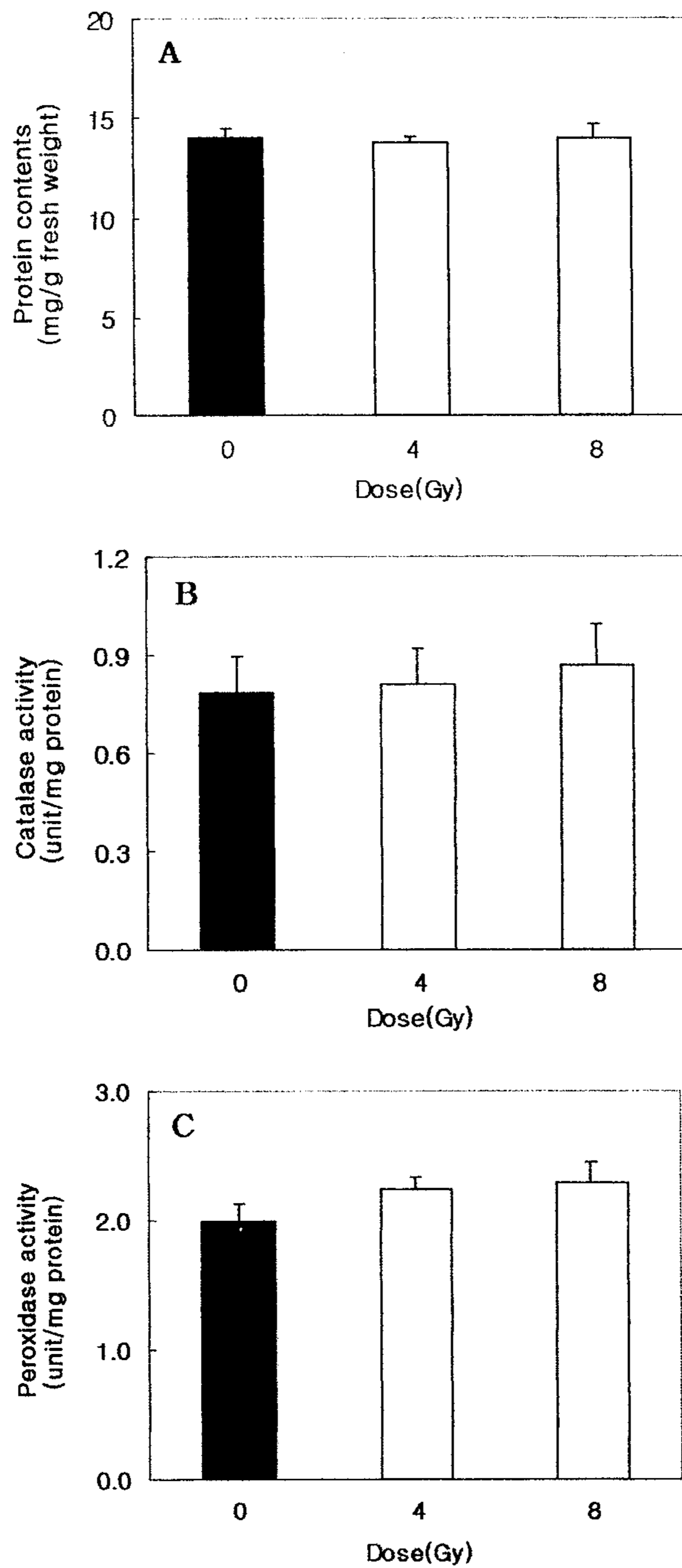
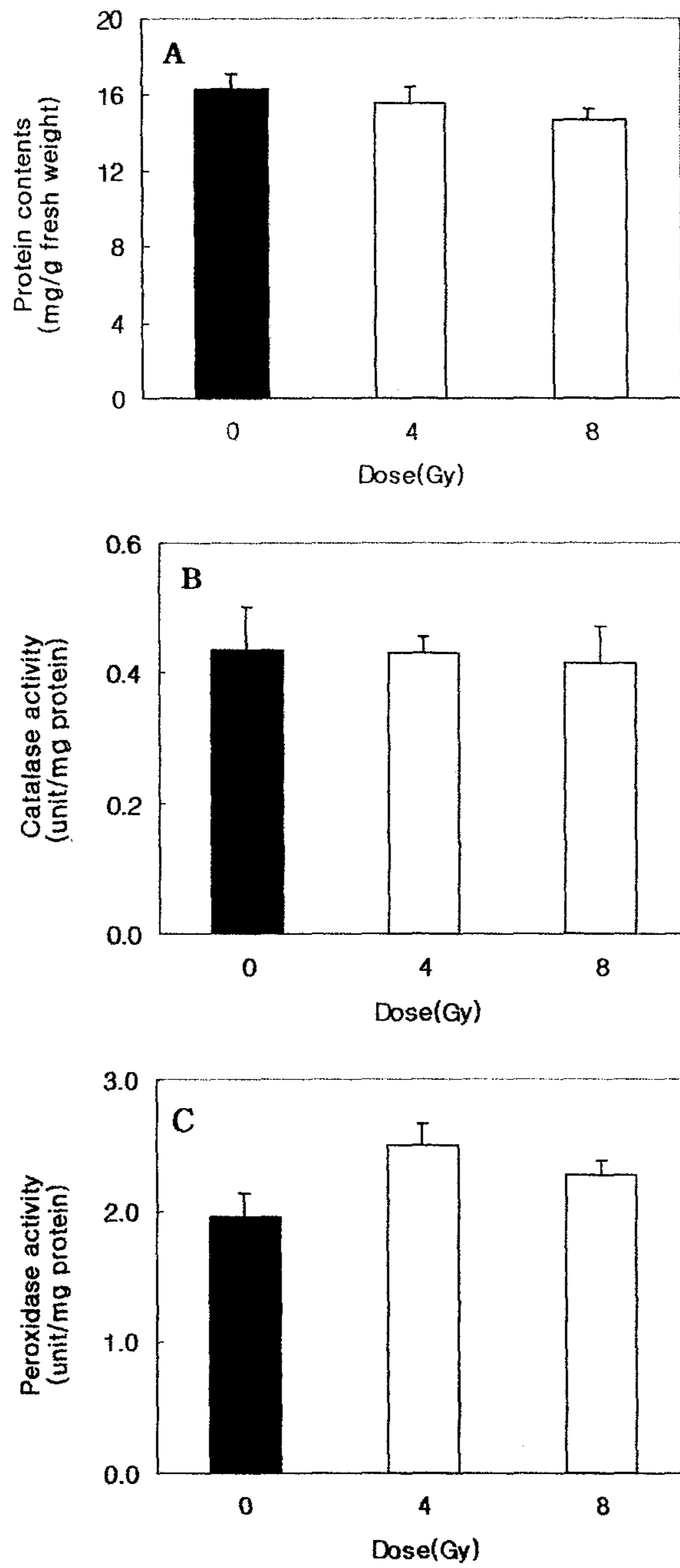


Fig. 72. Catalase activity of gourd developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. Bars represent mean±standard error.



**Fig. 73.** Enzyme activities of gourd cotyledon grown from seeds irradiated with different doses of gamma radiation at 11 days after planting. Data represents mean $\pm$ SE. (a)Protein contents, (b); Catalase activity,(c); Peroxidase activity.



**Fig. 74.** Enzyme activities of gourd leaf grown from seeds irradiated with different doses of gamma radiation at 18 days after planting. Data represents mean $\pm$ SE. (a); Protein contents, (b) ; Catalase activity, (c) ; Peroxidase activity.



### (3) 묵은 채소 종자(배추와 무)

한여름 배추와 청수궁중무의 효소 활성을 조사한 결과 한여름배추 종자의 단백질 함량은 발아초기단계인 파종 5일째에는 4 Gy와 6 Gy 조사구에서 각각 17.39 mg과 17.42 mg으로 대조구 16.51 mg에 비해 5~6% 정도 증가하였으나, 파종 9일째에는 별다른 증가효과가 없었다(그림 75A). 또한 POD 활성은 파종 5일째에는 10 Gy 조사구에서 8.65 unit로 대조구 7.46 unit에 비해 16% 정도 증가하였고 파종 9일째에는 4 Gy와 10 Gy 조사구에서 각각 31.01 unit와 35.34 unit로 대조구 23.07 unit에 비해 34~53% 정도 증가하였다(그림 75B). CAT 활성은 파종 5일째에는 모든 저선량 조사구에서 증가하였는데 특히 10 Gy 조사구에서 2.67 unit로 대조구 1.27 unit에 비해 111%( $p < 0.05$ ) 정도 증가하였고 파종 9일째에도 10 Gy 조사구에서 1.30 unit로 대조구 1.05 unit에 비해 24% 정도 증가하였다(그림 75C).

청수궁중무는 단백질 함량 조사 시 파종 3일째에는 2~10 Gy 범위에서 증가하였는데 특히 2 Gy 조사구에서 17.81 mg으로 대조구 13.57 mg에 비해 31% 정도 증가하였으며 파종 6일째에는 10 Gy 조사구에서 12.66 mg으로 대조구 11.39 mg에 비해 11% 정도 증가하였다(그림 76A). POD 활성은 파종 3일째엔 별다른 증가효과가 없었으나 파종 6일째에는 모든 저선량 조사구에서 대조구 13.08 unit에 비해 5~29% 정도 증가하였고(그림 76B), CAT 활성은 파종 3일째에 10 Gy 조사구에서 0.84 unit로 대조구 0.67 unit에 비해 24% 정도 증가하였으며 파종 6일째에는 별다른 증가효과가 없었다(그림 76C).

종자생리학자들은 종자발아과정을 4단계로 구분하여 2단계를 효소형성 또는 활성화 단계로서 대사활성 증가과정<sup>90)</sup>으로 규정하였는데 본 실험에서도 저선량 조사한 종자의 발아촉진 과정에서 유사한 결과로 효소활성이 증가됨을 확인할 수 있었다. 김 등<sup>91)</sup>은 저선량 조사한 시판 신규종자에서 생육한 배추 식물체의 초기생육 과정에서 비교적 낮은 선량에서 생육촉진과 함께 POD와 CAT 활성이 증가됨을 보고하였고, 저선량 조사한 파와 시금치<sup>74)</sup> 및 참박<sup>63)</sup> 시판종자의 발아와 초기생육 촉진효과와 함께 효소활성의 증가에 관한 보고도 있다. Garg 등<sup>31)</sup>은 겨자종자에 방사선 조사 시 저선량에서는 발아와 생장이 촉진되고 CAT 활성도 증가하였으나 고선량에서는 감소하였다고 보고하였다. 본 실험에서도 유사하게 저선량 방사선이 묵은 채소 종자에서도 발아와 초기생육을 촉진하며 동시에 효소활성도 증가시킴을 확인할 수 있었으나 적정선량은 다르게 나타나 작물의 종자상태와 발육단계별로 좀 더 구체적인 연구가 요구된다.

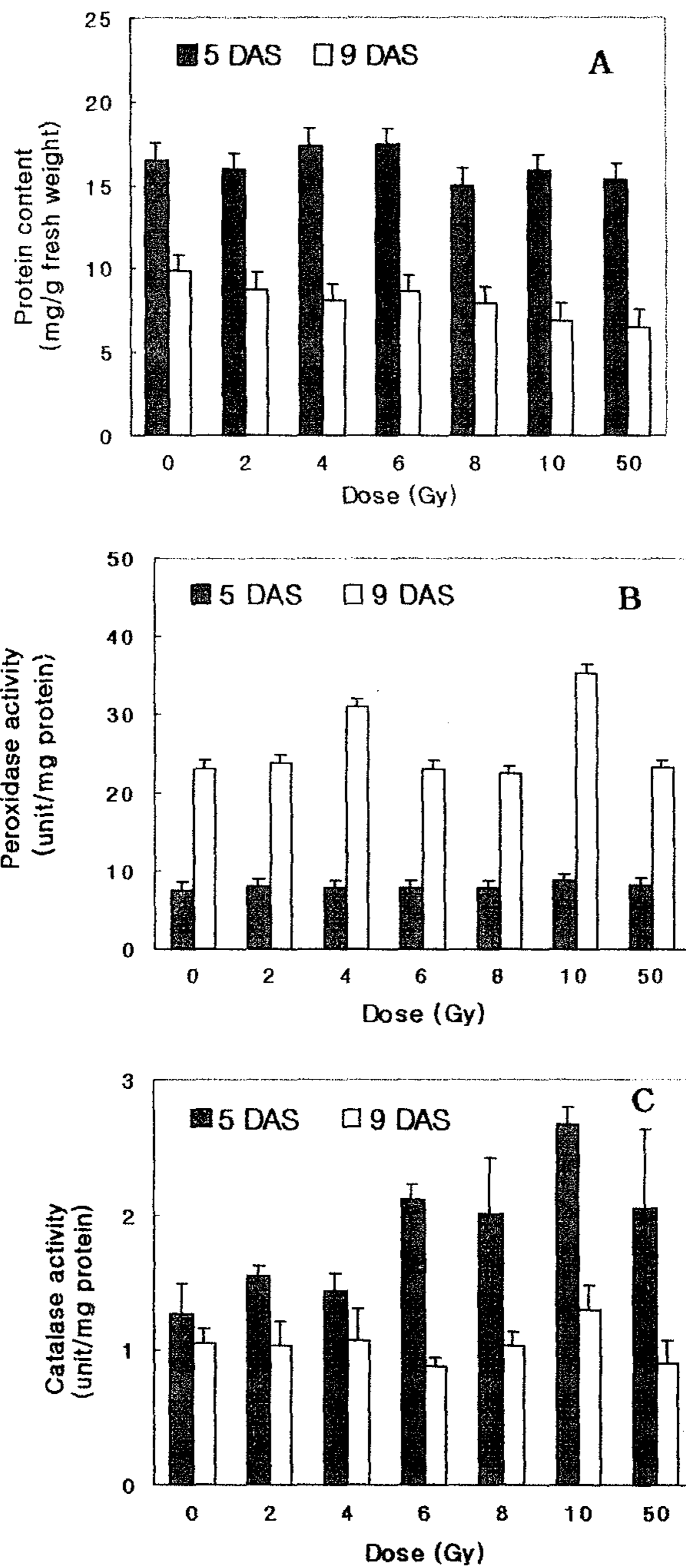


Fig. 75. Comparison of protein content and enzyme activities of seedlings from Chinese cabbage seeds (harvested in 1993, cv. Hanyoreum) irradiated with different doses of gamma radiation between at 5 DAS and 9 DAS. A ; Protein content. B ; Peroxidase activity. C ; Catalase activity. DAS ; days after sowing. Data represents mean $\pm$ SE.

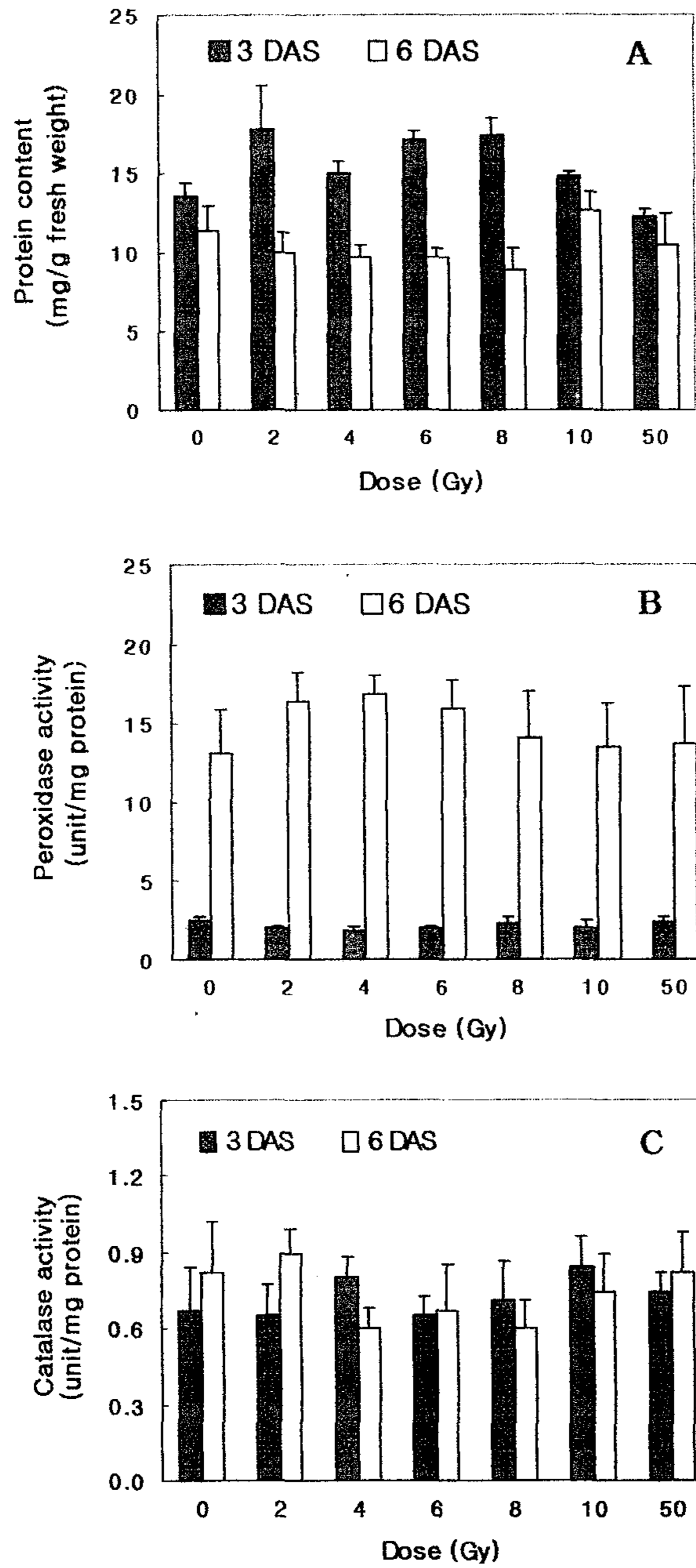
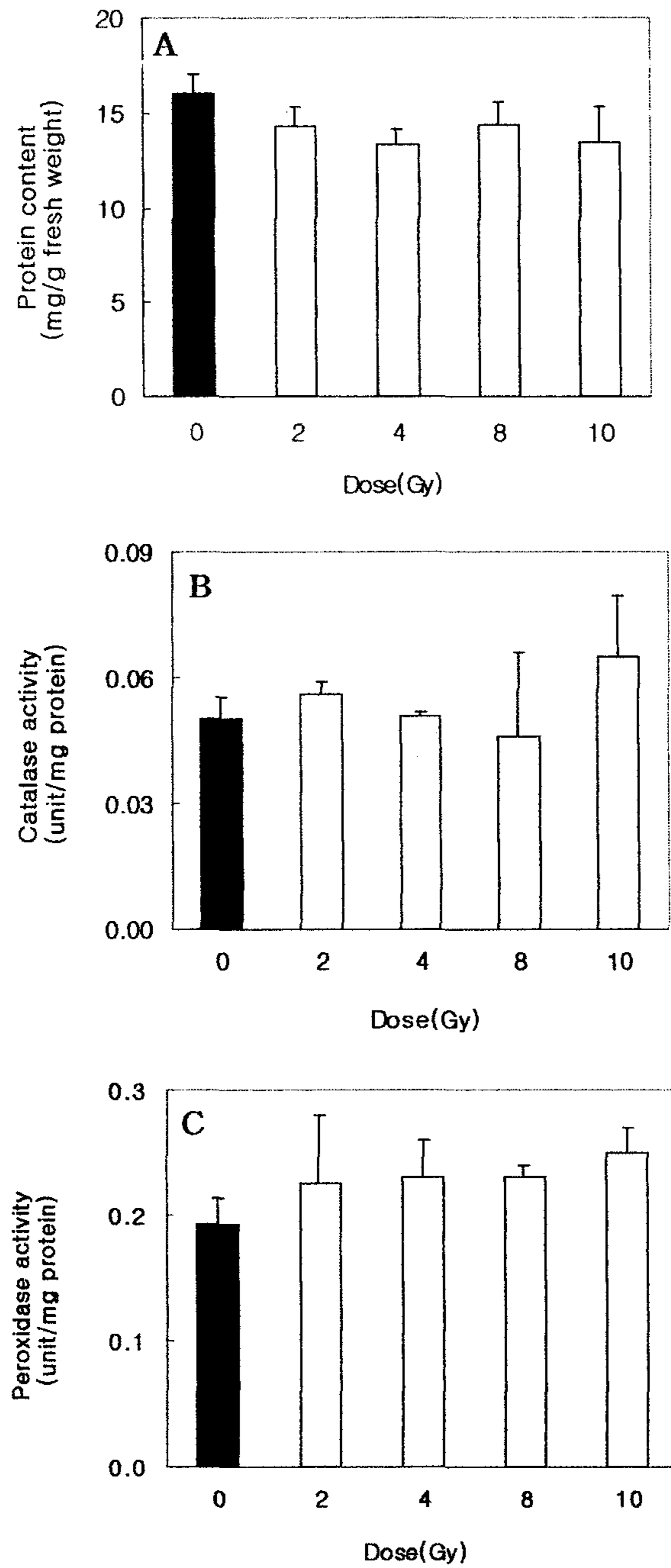


Fig. 76. Comparison of protein content and enzyme activities of seedlings from radish seeds (harvested in 1995, cv. Chung sukoungzoung) irradiated with different doses of gamma radiation between at 3 DAS and 6 DAS. A ; Protein content. B ; Peroxidase activity. C ; Catalase activity. DAS ; days after sowing. Data represents mean  $\pm$  SE.

본실험에서 저선량 감마선이 무 잎의 항산화 효소 활성 변화에 어떠한 영향을 미치는 가를 조사하였다. 그림 77 에서 보는 바와 같이 저선량의 감마선이 단백질의 함량에는 영향을 미치지 않는 것으로 보였으나 CAT활성은 대조구가 0.05unit인 반면, 10 Gy 조사구는 0.07unit 으로 대조구에 비해 30% 증가하였고, 대체적으로 저선량 조사구에서 증가하는 경향을 보였다. POD 활성은 대조구는 0.19unit였고 10 Gy 조사구는 0.25unit 으로 대조구에 비해 29% 증가하였다.



**Fig. 77.** Enzyme activities of radish leaves grown from seeds irradiated with different doses of gamma radiation at 20 days after planting. Data represents  $\text{mean} \pm \text{SE}$ . (a) ; Protein contents, (b) ; Catalase activity, (c) ; Peroxidase activity.

#### (4) 묵은 고추종자

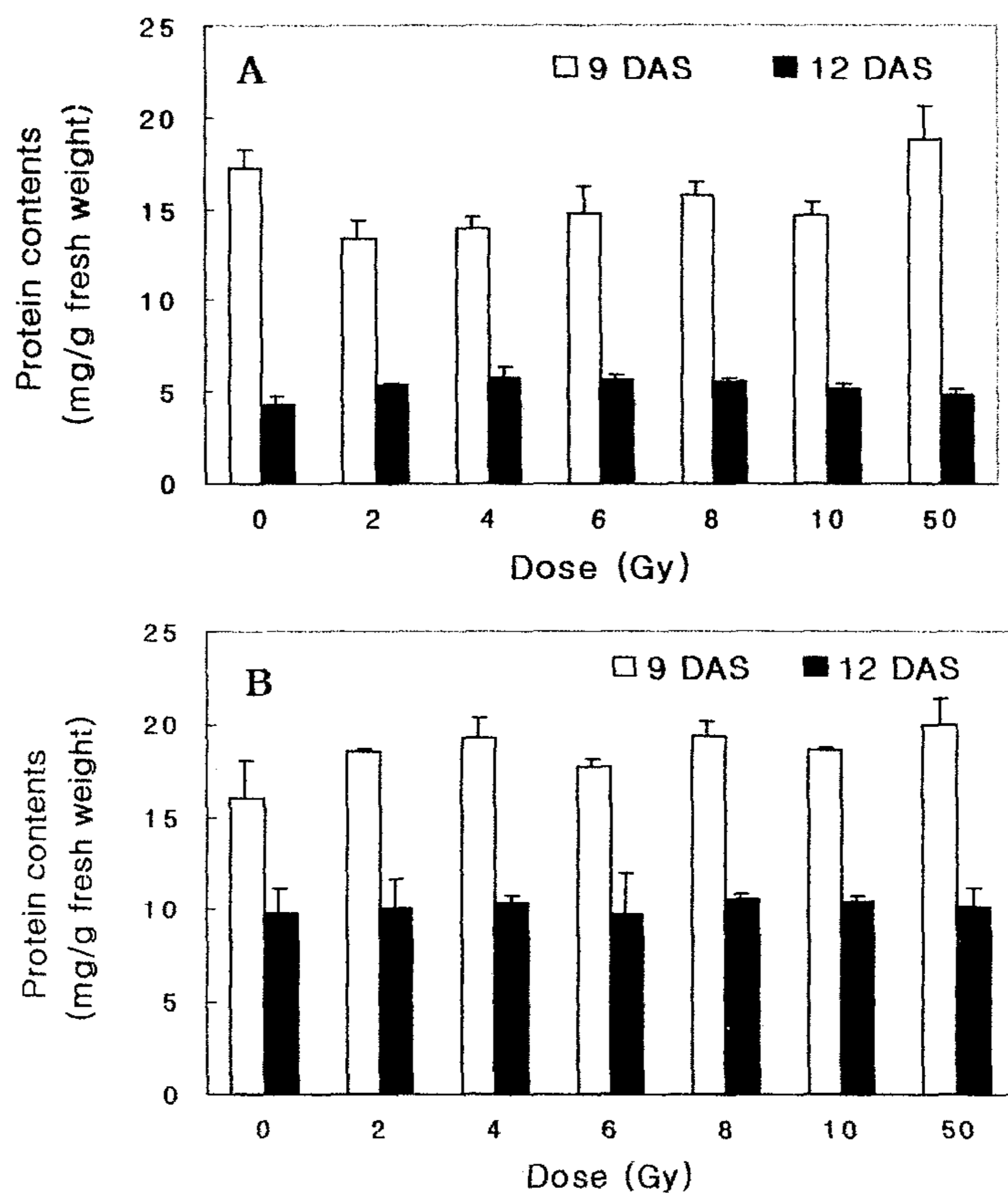
고추 종자의 효소 활성 변화를 발아초기인 파종 후 9일과 발아율 조사 최종일인 파종 후 12일로 나누어 단백질 함량과 함께 측정한 결과는 다음과 같다. 발아종자 유묘의 단백질 함량 측정 시 조광고추 품종의 경우 파종 9일 후에는 별다른 증가효과가 없었으나 파종 12일 후에는 모든 저선량 조사구에서 대조구 4.29 mg에 비해 13~35% 증가하였다. 특히 4 Gy 조사구에서 5.78 mg으로 가장 높게 나타났고, 홍광고추 품종은 파종 9일 후에는 모든 저선량 조사구에서 10~24% 증가하였으나 파종 12일 후엔 별다른 증가효과를 보이지 않았다(그림 78).

CAT 활성 측정 시 조광고추 품종은 파종 9일 후엔 별 효과가 없었으나 파종 12일 후에는 4 Gy 조사구에서 0.63 unit로 대조구 0.60 unit에 비해 5% 정도 증가하였으며, 홍광고추 품종의 경우는 파종 9일 후에는 8 Gy 조사구에서 0.54 unit로 대조구 0.48 unit에 비해 13% 정도 증가하였고 파종 12일 후에는 6 Gy 조사구를 제외한 모든 저선량 조사구에서 대조구 0.53 unit에 비해 증가하였는데 특히 유묘초장에서 촉진효과를 보인 4 Gy, 8 Gy 및 10 Gy 조사구에서 각각 0.65 unit, 0.69 unit 및 0.71 unit로 30~34% 증가하였다(그림 79).

POD 활성은 조광고추 품종의 경우 파종 9일 후에 대조구 2.53 unit에 비해 2 Gy, 4 Gy, 6 Gy 조사구에서 각각 3.16 unit, 3.70 unit, 3.89 unit로 25~54% 정도 증가하였으며 파종 12일 후에는 4 Gy 조사구에서 대조구 3.06 unit에 비해 3.66 unit로 20% 정도 증가효과를 보였고, 홍광고추 품종은 파종 9일 후엔 모든 저선량 조사구에서 대조구 2.27 unit에 비해 8~59% 정도 증가하였는데 특히 8 Gy 조사구에서 3.59 unit로 가장 높은 값을 보였으며 파종 12일 후에는 증가효과가 없었다(그림 80).

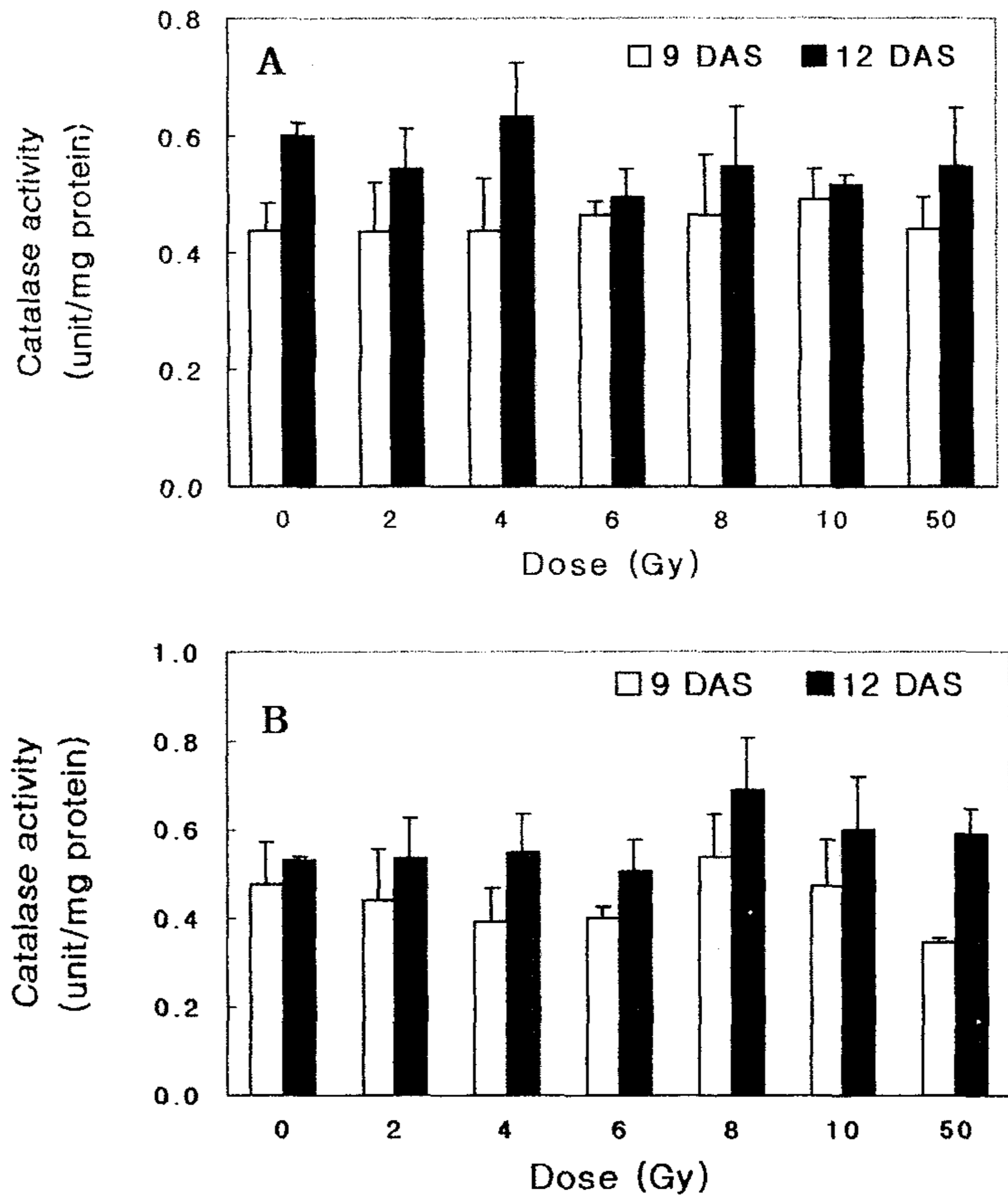
이상의 결과로 볼 때 저선량 조사와 초기생육 촉진 및 생리활성이 반응간에 어떤 뚜렷한 경향을 보이지는 않았지만, 조광고추 품종의 경우는 파종 12일 후에 조사한 단백질 함량과 CAT, POD 활성이 비교적 발아가 촉진되고 유묘초장에서 높은 값을 보인 4 Gy 조사구에서 높게 나타나 초기생육 촉진과 반응사이에 상호 관련성이 있음을 보여 좀 더 관찰할 필요가 있겠다. 또한 홍광고추 품종의 경우도 발아와 유묘초장이 촉진된 8 Gy 조사구에서 생리활성이 높은 유사한 결과를 보여, 종자생리학자들이 구분한 종자발아 4단계 과정 중 2단계인 효소형성 또는 대사활성 증가과정<sup>90)</sup>을 확인할 수 있었다. 저선량 조사한 참박<sup>63)</sup> 및 파와 시금치<sup>74)</sup> 종자에서도 저선량 조사에 의해 발아와 초기생육 촉진효과와 함께 효소활성이 증가한 보고가 있으며 저선량

조사한 종자에서 생육한 배추 식물체의 초기생육 과정에서도 생육촉진과 함께 POD와 CAT 활성이 증가하였다는 보고도 있다<sup>91)</sup>. 또한 Garg 등<sup>31)</sup>은 겨자종자에 방사선 조사시 저선량에서는 발아와 생장이 촉진되고 CAT 활성도 증가하였으나 고선량에서는 감소하였다고 보고하였다. 본 실험에서도 저선량 방사선이 묵은 고추종자의 발아와 초기생육을 촉진하며 동시에 효소활성도 증가시킴을 확인할 수 있었으나 적정선량은 다르게 나타나 작물의 종자상태와 발아단계별로 좀 더 세밀한 관찰이 필요하다고 사료된다.

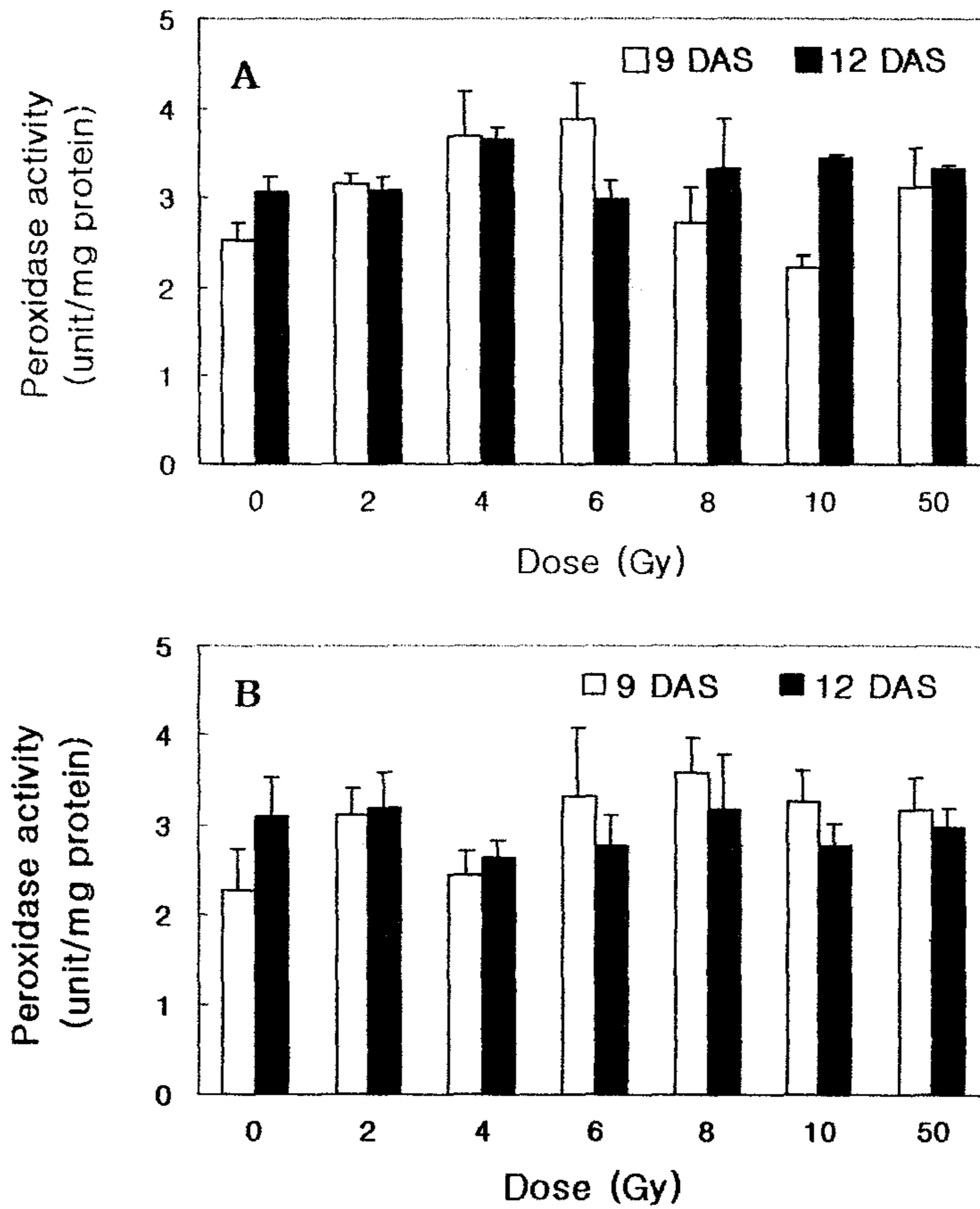


**Fig. 78.** Protein contents in germinating seeds of red pepper. Seeds were irradiated with different doses of gamma radiation. A ; produced in 1996, cv. Jokwang. B ; produced in 1997, cv. Hongkwang. Data represent mean $\pm$ SE (3 replicates). DAS ; days after sowing.





**Fig. 79.** Catalase activity in germinating seeds of red pepper. Seeds were irradiated with different doses of gamma radiation. A ; produced in 1996, cv. Jokwang. B ; produced in 1997, cv. Hongkwang. Data represent mean±SE (3 replicates). DAS ; days after sowing.

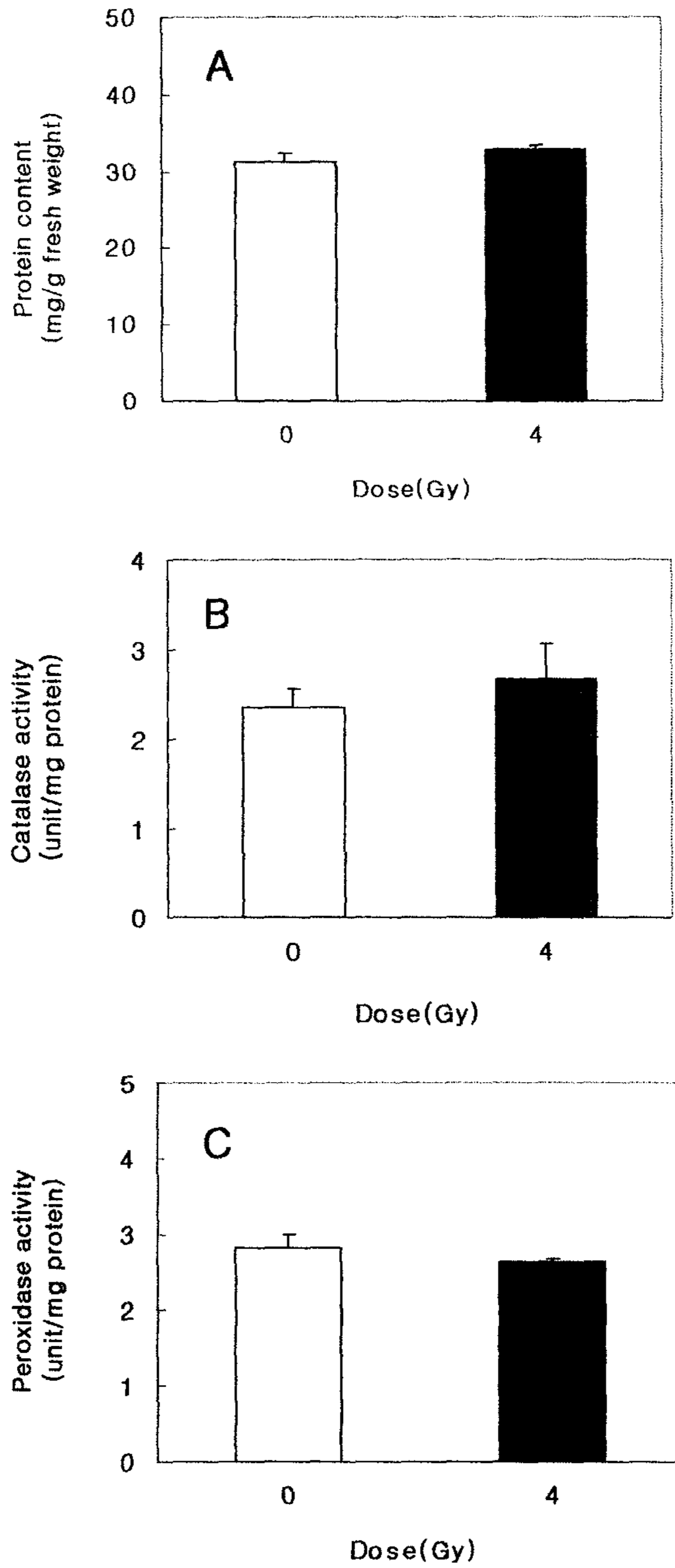


**Fig. 80.** Peroxidase activity in germinating seeds of red pepper. Seeds were irradiated with different doses of gamma radiation. A ; produced in 1996, cv. Jokwang. B ; produced in 1997, cv. Hongkwang. Data represent mean $\pm$ SE (3 replicates). DAS ; days after sowing.

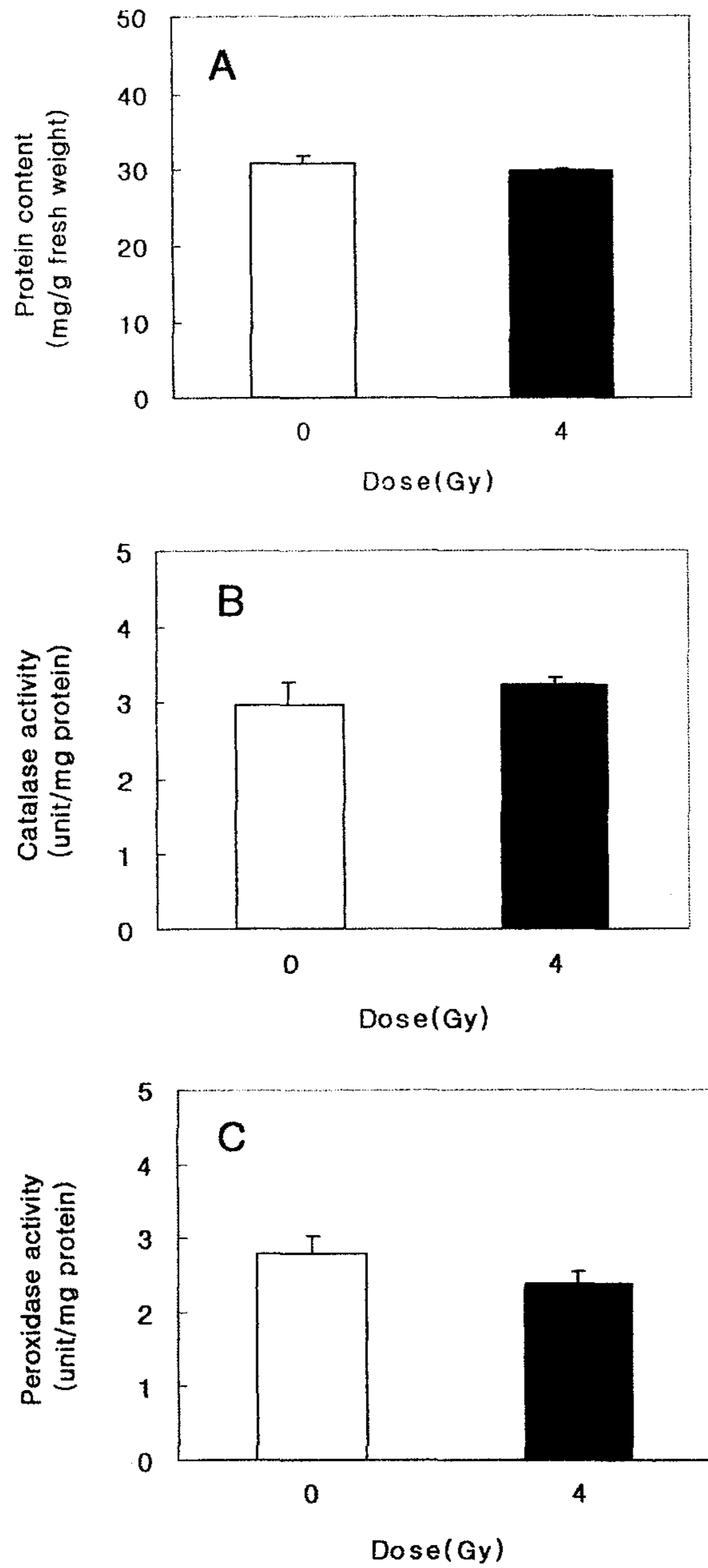
## (5) 참박과 호박

참박의 경우 파종 6 일 후에 대조구와 발아율이 가장 높았던 4 Gy 조사구의 유묘에서 단백질 함량과 catalase 및 peroxidase 활성을 측정한 결과, 70~80% 종자는 단백질과 catalase 활성이 4 Gy에서 각각 32.8 mg/g과 2.67 unit로 대조구 31.2 mg/g과 2.35 unit에 비해 5%와 14% 증가하였으며 peroxidase 활성은 별다른 증가효과가 없었다(그림 81). 또한 80~90% 종자는 catalase 활성만 4 Gy에서 3.22 unit로 대조구 2.96 unit에 비해 9% 증가하였다(그림 82). 호박의 경우 발아율이 가장 높았던 70~80% 종자의 2 Gy 조사구 유묘에서 측정한 catalase와 peroxidase 활성이 각각 1.33 unit와 4.00 unit로 대조구 1.05 unit와 3.31 unit에 비해 27%와 21% 증가하였고(그림 83), 80~90% 종자의 경우는 발아율이 가장 높은 8 Gy에서 효소활성을 측정한 결과 catalase 활성만이 대조구 2.48 unit에 비해 2.77 unit로 11% 증가하였다(그림 84).

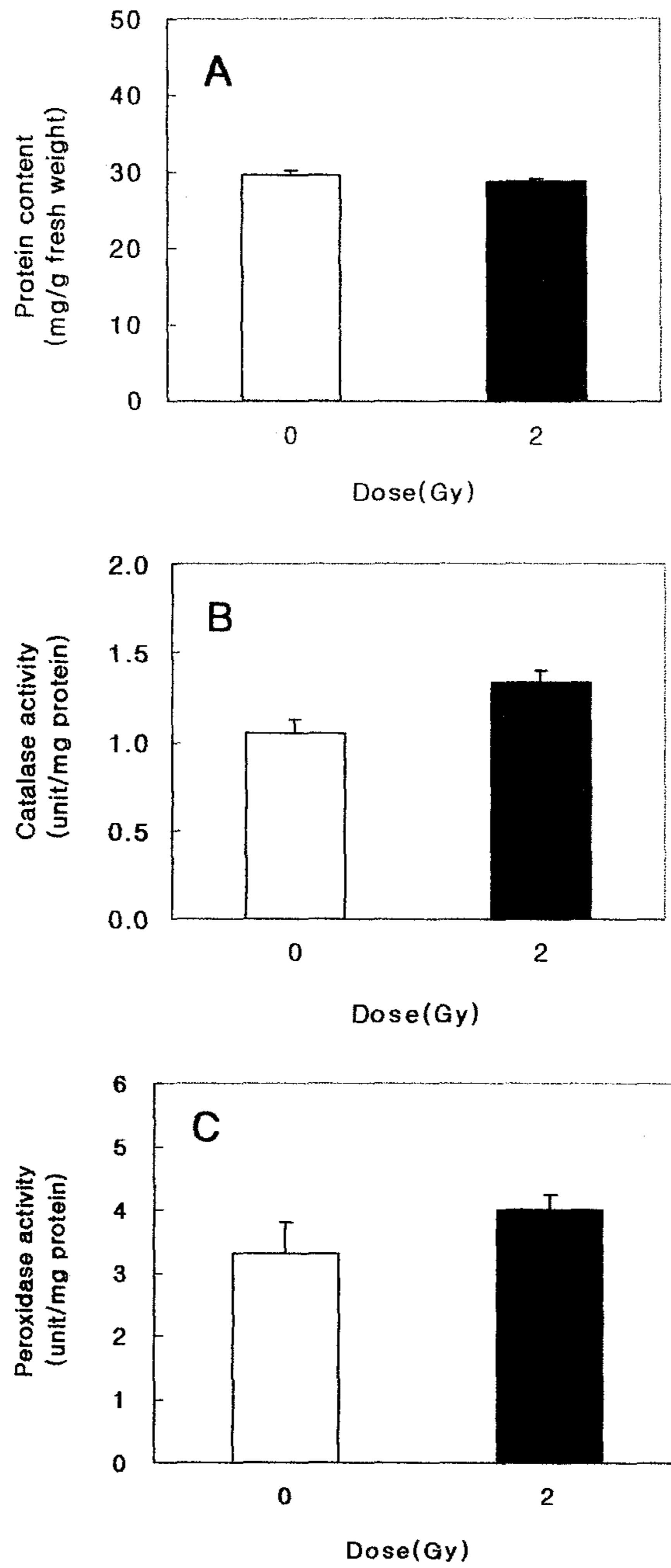
종자생리학자들은<sup>90)</sup> 종자발아과정을 4단계로 구분하여 2단계를 효소형성 또는 활성화 단계로서 대사활성 증가과정으로 규정하였는데 본 실험에서도 저선량 조사한 종자의 발아촉진 과정에서 유사한 결과로 효소활성이 증가됨을 확인할 수 있었다. 김 등<sup>91)</sup>은 저선량 조사한 시판 신규종자에서 생육한 배추 식물체의 초기생육 과정에서 비교적 낮은 선량에서 생육촉진과 함께 peroxidase와 catalase 활성이 증가됨을 보고하였고, 저선량 조사한 묵은 배추, 무, 고추 종자의 발아가 향상된 4~10 Gy에서 효소활성이 증가되었다는 보고도 있다<sup>92,93)</sup>. 저선량 조사한 파와 시금치<sup>74)</sup> 및 참박<sup>63)</sup> 시판종자의 발아와 초기생육 촉진효과와 함께 효소활성의 증가에 관한 보고도 있다. 본 실험에서도 유사하게 저선량 방사선이 참박과 호박 종자에서 발아와 초기생육을 촉진하며 동시에 효소활성도 증가시킴을 확인할 수 있었으나 작물의 종자상태와 발육단계별로 좀 더 구체적인 연구가 요구된다.



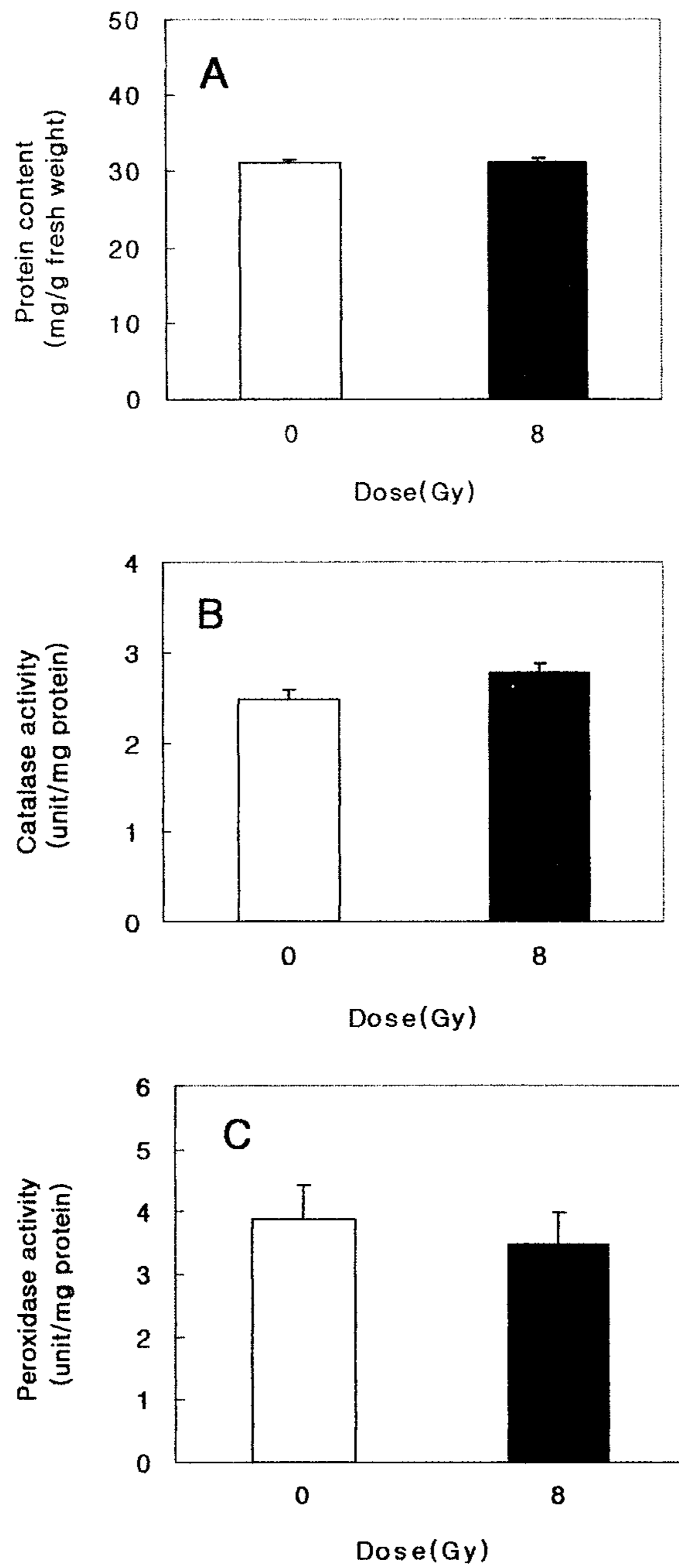
**Fig. 81.** Enzyme activity of seedling grown from 70-80% germinative seeds of bottle gourd irradiated with different doses of gamma radiation. A ; Protein content, B ; Catalase activity, C ; Peroxidase activity.



**Fig. 82.** Enzyme activity of seedling grown from 80-90% germinative seeds of bottle gourd irradiated with different doses of gamma radiation. A :Protein content, B : Catalase activity, C : Peroxidase activity.



**Fig. 83.** Enzyme activity of seedling grown from 70-80% germinative seeds of pumpkin irradiated with different doses of gamma radiation. A ; Protein content, B ; Catalase activity, C ; Peroxidase activity.



**Fig. 84.** Enzyme activity of seedling grown from 80-90% germinative seeds of pumpkin irradiated with different doses of gamma radiation. A ; Protein content, B ; Catalase activity, C ; Peroxidase activity.

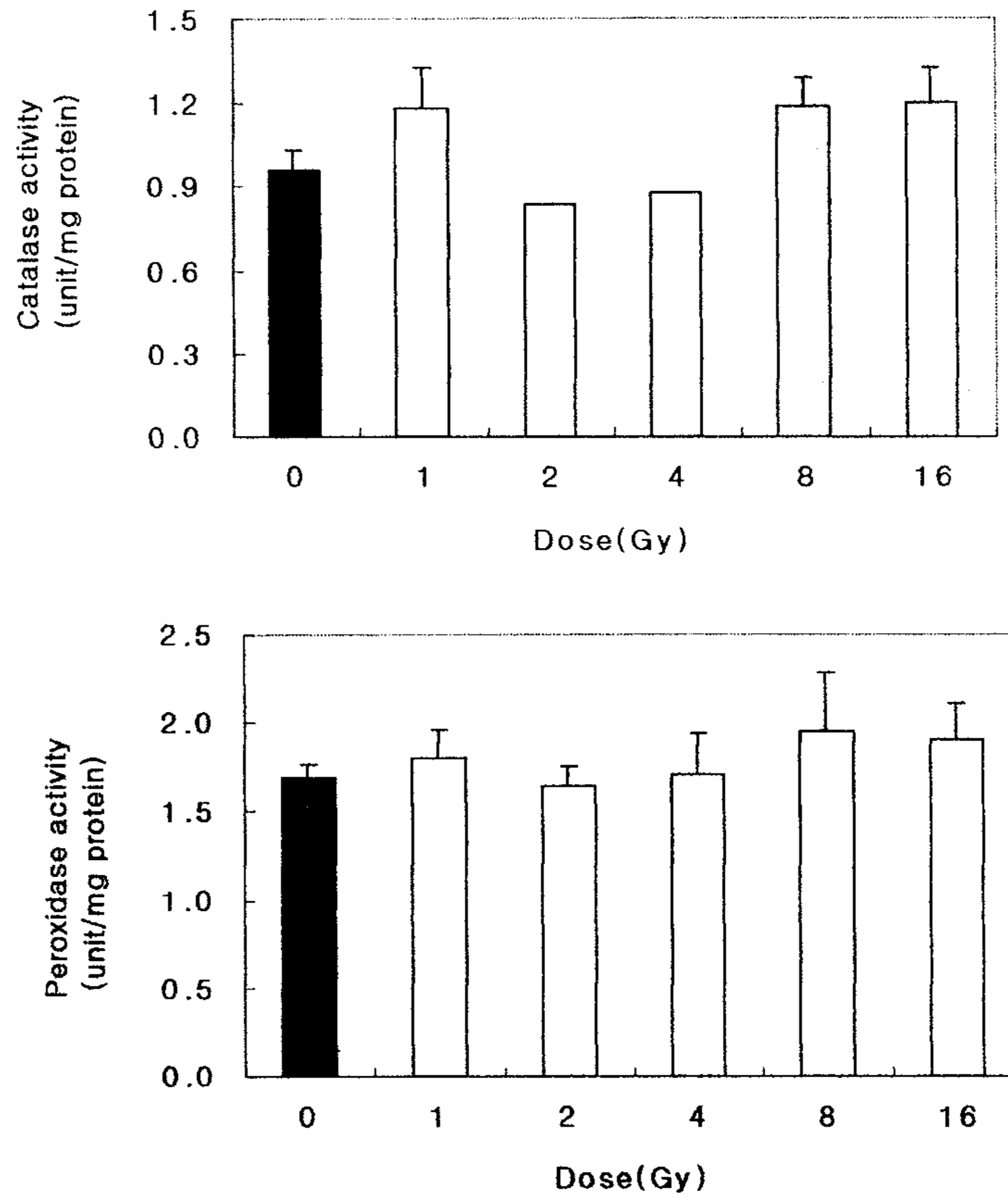
## (6) 씨감자

저선량 감마선을 조사하여 포장에 파종한 대지 감자 식물체의 효소 활성을 측정하기 위해 유묘 생육이 양호하였던 5°C·암저장한 15일 저장구의 생육 중인 잎에서의 CAT 활성과 POD 활성을 측정하였다(그림 85). CAT 활성은 1, 8, 16 Gy에서 대조구 0.96unit에 비해 각각 1.18, 1.19, 1.20unit로 20% 이상 증가하였고 POD 활성도 1, 8, 16 Gy에서 대조구 1.69unit에 비해 각각 1.80, 1.95, 1.90unit로 7~16% 증가하였다. Kim 등<sup>83)</sup>도 저선량 감마선을 조사한 감자의 POD의 활성이 45일 저장구의 4 Gy에서 증가하는 것을 보고하였고, Sah 와 Pramanik 등<sup>89)</sup>은 보리 종자에 유해 선량으로 방사선을 조사한 결과 유묘 초장은 감소하였으나 POD 활성은 35-100% 증가함을 보고하였다. Garg 등<sup>31)</sup>은 겨자 종자에 저선량 감마선을 조사하여 발아와 생장이 촉진되고 CAT의 활성 및 호흡 등의 생리적인 활성에 영향을 미친 것으로 보고하였다. 김 등<sup>63)</sup>도 참박 유식물체에 저선량 감마선 조사시 CAT와 POD 활성이 1~20 Gy 범위에서 증가하고 배추 유식물체의 효소활성은 낮은 선량에서 증가하고 높은 선량에선 감소하였다고 보고하였다.

저선량 감마선 조사하여 포장에 파종한 대지 씨감자 품종의 생육 중인 잎에서의 CAT 활성과 POD 활성은 그림 86와 같다. CAT 활성은 모든 저장기간과 선량에서 대조구에 비해 낮은 활성을 보였다. POD 활성은 15일 저장구에서 대조구의 3.46 unit에 비교하여 4 Gy에서 4.08 unit로 18% 정도, 16 Gy에서는 3.75 unit로 8% 정도 증가하였으며, 30일 저장구에서는 1 Gy에서 4.33 unit로 대조구의 3.62 unit에 비해 20% 정도, 16 Gy에서 3.99 unit로 10% 정도 증가하였다. 45일 저장구는 4 Gy에서 4.08 unit로 대조구의 3.57 unit보다 14% 정도의 증가를 나타냈다. 45일 저장구에서 양호한 생육을 보인 4 Gy의 POD 활성이 다소 증가한 것을 제외하고는 항산화 효소와 식물체 포장 생육과의 어떤 뚜렷한 상관관계를 나타내지 않았다. Zhezhe<sup>87)</sup>은 식물에 저선량 방사선을 조사하면 POD 활성과 단백질 함량이 증가한다고 하였으며, Sah & Pramanik<sup>89)</sup>는 보리종자에 유해 선량으로 방사선을 조사한 결과 유묘 초장은 감소하였으나 POD 활성은 35~100% 증가하였다고 보고하였다. Garg 등<sup>31)</sup>은 겨자 종자에 방사선 조사시 저선량에서는 발아와 생장이 촉진되고 CAT 활성도 증가하였으나 고선량에서는 감소하였다고 하였다.

본 실험에서는 생육이 뚜렷하게 증가하였던 45일 저장구의 4 Gy 조사구에서 POD 활성이 증가한 것을 제외하고는 발아 촉진 및 생육증가와 항산화효소 활성과는 어떤 명확한 상관 관계를 찾을 수 없어 향후 작물의 생육 시기별로 좀 더 세밀한 연구가 필요하다고 사료된다.





**Fig. 85.** Effect of low dose gamma radiation on enzyme activity of minituber plantlet with different storage duration. Minitubers were stored at  $5^{\circ}\text{C} \cdot 20 \pm 5\%$  under dark conditions.

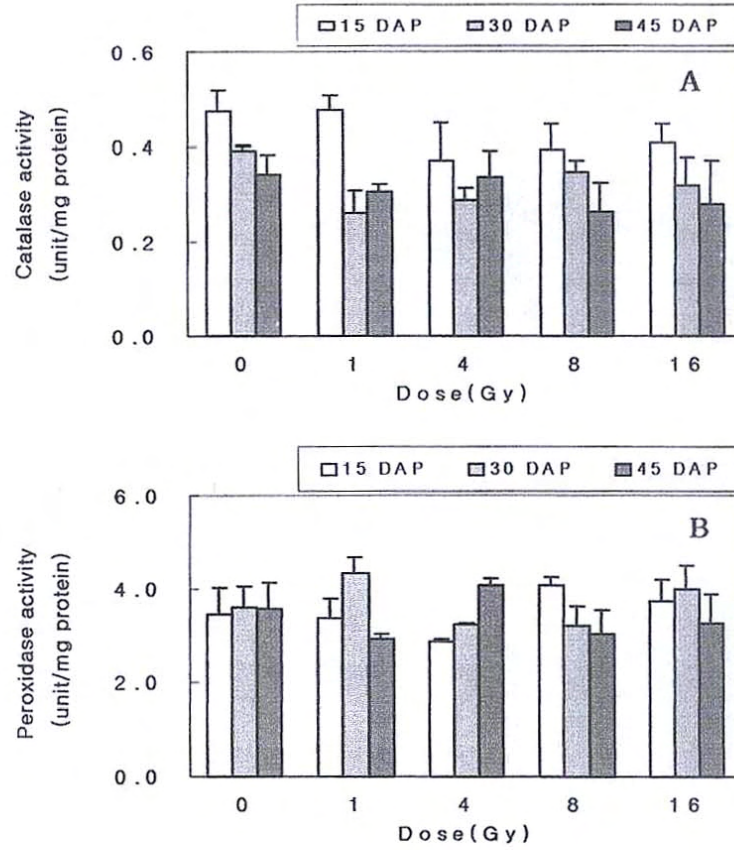


Fig. 86. Effect of low dose gamma radiation on Enzyme activity of minituber plantlet, Dejima cultivar, stored with different DAP at 5°C on dark condition. DAP ; days after production. A ; Catalase activity. B ; Peroxidase activity. Bars represent means±standard errors.

## 나. 엽록소 함량 분석

### (1) 배추 유식물

저선량 감마선을 조사하여 재배한 배추유식물체중 생육에 다소 차이를 보이는 저선량 조사구 1.0 Gy, 2.0 Gy, 16.0 Gy, 20.0 Gy와 무조사한 대조구를 선정하여 파종 10일 후와 20일 후에 배추 유식물체의 잎을 채취하여 전체 엽록소 함량을 분석하였다(표 48). 만점 배추의 경우 저선량 조사구 모두가 대조구에 비해 높은 함량을 보였는데 파종 10일 후의 전체 엽록소 함량으로 볼 때 대조구의 7.22 mg/g에 비해 생육이 저조하였던 20.0 Gy가 7.71 mg/g으로 가장 높았고 다음이 2.0 Gy 조사구와 1.0 Gy 조사구로서 각각 7.57 mg/g과 7.45 mg/g 이었다. 파종 20일 후에는 생육과 뚜렷한 반대 경향을 보였는데 생육이 가장 저조하였던 16.0 Gy와 20.0 Gy 조사구가 각각 7.10 mg/g 와 7.05 mg/g으로 높은 함량을 보인 반면에 생육이 양호하였던 1.0 Gy 조사구가 6.87 mg/g으로 저선량 조사구중 가장 낮은 함량을 보였다.

서림엇같이 배추의 파종 10일 후의 전체 엽록소 함량도 20일 만점 배추와 동일한 경향으로 저선량 조사구 모두가 대조구 보다 높았다. 즉, 생육이 저조하였던 16.0 Gy 와 20.0 Gy 조사구의 전체 엽록소 함량이 각각 8.52 mg/g 와 8.37 mg/g으로 가장 낮은 대조구의 8.02 mg/g보다 4~6% 높았다. 또한 생육이 양호하였던 2.0 Gy와 1.0 Gy 조사구는 각각 8.15 mg/g와 8.08 mg/g으로 대조구 보다 낮은 함량을 보였다. 파종 20일 후에도 비슷한 경향으로 20.0 Gy와 16.0 Gy 조사구의 전체 엽록소 함량이 각각 7.97 mg/g와 7.66 mg/g으로 대조구 7.23 mg/g 보다 6~10% 높은 함량을 보였으나 생육이 가장 양호하였던 1.0 Gy 조사구가 대조구 보다도 낮은 7.12 mg/g로 가장 낮은 함량을 보였다. 저선량 방사선 조사에 의한 식물의 생리활성 증진효과 중에는 광합성능<sup>87, 28)</sup>, 엽록소 함량<sup>64)</sup> 및 효소 활성<sup>31, 89, 87)</sup> 증가 등 많은 결과들이 보고되어 있다. Gorlanov<sup>94)</sup>는 강낭콩 종자에 저선량 감마선을 10.0 Gy~20.0 Gy 조사하여 발근촉진 효과와 함께 잎의 엽록소 함량이 대조구에 비해 높았다고 하였으며, Pal<sup>64)</sup>도 저선량 조사한 토마토의 생육촉진과 엽록소 함량이 증가하였다고 보고하였다. 본 실험의 경우 저선량 조사에 의한 배추 유식물체의 엽록소 함량은 저선량 조사에 의해 증가하였고 조사선량의 증가에 따라 증가하였다.

### (2) 목은 참박

저선량 감마선을 조사하여 재배한 참박 유식물체중 생육에 다소 차이를

보인 저선량 조사구 1 Gy, 4 Gy, 8 Gy, 16 Gy, 30 Gy 조사구와 무조사한 대조구를 선정하여 생육을 조사한 후에 잎중의 엽록소함량을 분석한 결과는 그림 87에서 보는바와 같이 생육과 뚜렷한 어떠한 경향을 보이지 않았다.

품종 Patner의 경우 초장과 생체중이 낮고 직경이 큰 4 Gy 조사구만이 19.69 mg/g으로 대조구의 16.74 mg/g보다 높았고 나머지 조사구는 같거나 적은 값을 보였다. Support 품종에서도 생육이 빈약했던 1 Gy와 8 Gy 조사구가 각각 24.75 mg/g와 23.61 mg/g으로 대조구의 22.06 mg/g보다 높은 값을 나타냈고 생육이 양호하였던 16 Gy 조사구에서는 19.83 mg/g으로 대조구보다 낮았다. FR용자에서는 저선량 조사구가 대조구에 비해 생육이 모두 양호하였으나 엽록소함량은 모두 대조구보다 낮은 값을 보였다.

저선량 방사선 조사에 의한 식물의 생리활성 증진효과 중에는 광합성능<sup>28)</sup>, 엽록소 함량<sup>94,64)</sup> 및 효소 활성<sup>31,87,89)</sup> 증가 등 많은 결과들이 보고되어 있다. Gorlanov<sup>15)</sup>는 강낭콩 종자에 저선량 감마선을 10~20 Gy 조사하여 발근 촉진 효과와 함께 잎의 엽록소 함량이 대조구에 비해 높았다고 하였으며, Pal<sup>64)</sup>도 저선량 조사한 토마토의 생육촉진과 엽록소 함량이 증가하였다고 보고하였다. 본 실험에서는 품종에 따라 다른 경향을 보이면서 저선량 조사에 의한 뚜렷한 경향을 보이지 않아 계속해서 관찰할 필요가 있겠다.

### (3) 감자 기내 소괴경

저선량 감마선 조사에 의한 감자 식물체의 성장증대와 수량증가효과를 감자 식물체의 광합성능과의 관련성을 알아보고자 온실에 파종한 감자 식물체의 잎을 채취하여 엽록소 함량을 분석한 결과는 그림 88에서와 같다. 감자 잎의 엽록소 함량은 대지 품종이 수미 품종보다 대체로 높은 값을 보였는데, 대지 품종의 경우는 생육이 양호하였던 4 Gy에서 전체 엽록소 함량이 3.35 mg/g으로 대조구의 3.28 mg/g 보다 높았다. 또한 모든 저선량 조사구에서 좋은 생육을 보였던 수미 품종에서도 대체로 대조구보다 1~2% 정도 높은 엽록소 함량을 보였다. 저선량 방사선 조사에 의한 식물의 생리활성 증진효과 중에는 광합성능<sup>28)</sup>과 엽록소 함량<sup>94,64)</sup> 증가 등에 관한 결과가 보고되어 있다. Gorlanov<sup>94)</sup>는 강낭콩 종자에 감마선 10~20 Gy를 조사하였을 때 잎의 엽록소 함량이 대조구에 비해 높았다고 하였으며, Pal<sup>64)</sup>도 저선량 감마선 5~50 Gy를 조사한 토마토에서 생육촉진과 엽록소 함량이 증가하였다고 보고하였다. 본 실험에서는 생육이 증가한 저선량 조사구에서 대체로 엽록소 함량이 미미하나마 증가됨을 확인할 수 있었으나 뚜렷한 상관관계를 찾을 수 없어 향후 작물의 생육시기별로 좀 더 세밀한 연구가 필요하다.

**Table 48.** Total chlorophyll contents (mg/g fresh weight) of Chinese cabbage leaves grown from seeds irradiated with different dose of gamma radiation

Dose (Gy)	Cultivar	Manjeom		Sulim eockari	
		10 DAS	20 DAS	10 DAS	20 DAS
0		7.22(100) <sup>†</sup>	6.69(100)	8.02(100)	7.23(100)
1.0		7.45(103)	6.87(103)	8.08(101)	7.12(98)
2.0		7.57(105)	6.99(104)	8.15(102)	7.34(102)
16.0		7.36(102)	7.10(106)	8.52(106)	7.66(106)
20.0		7.71(107)	7.05(105)	8.37(104)	7.97(110)

DAS : days after sowing.

<sup>†</sup> : The values in the parentheses are the ratio to the control.

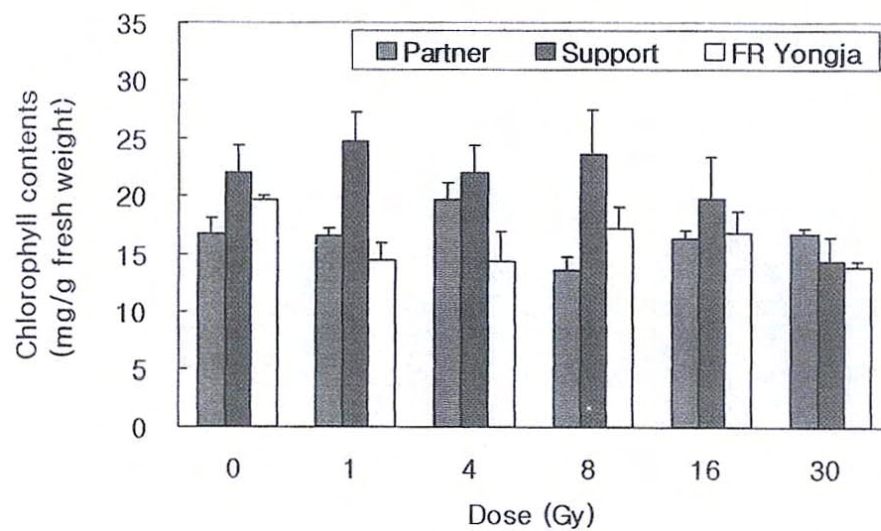
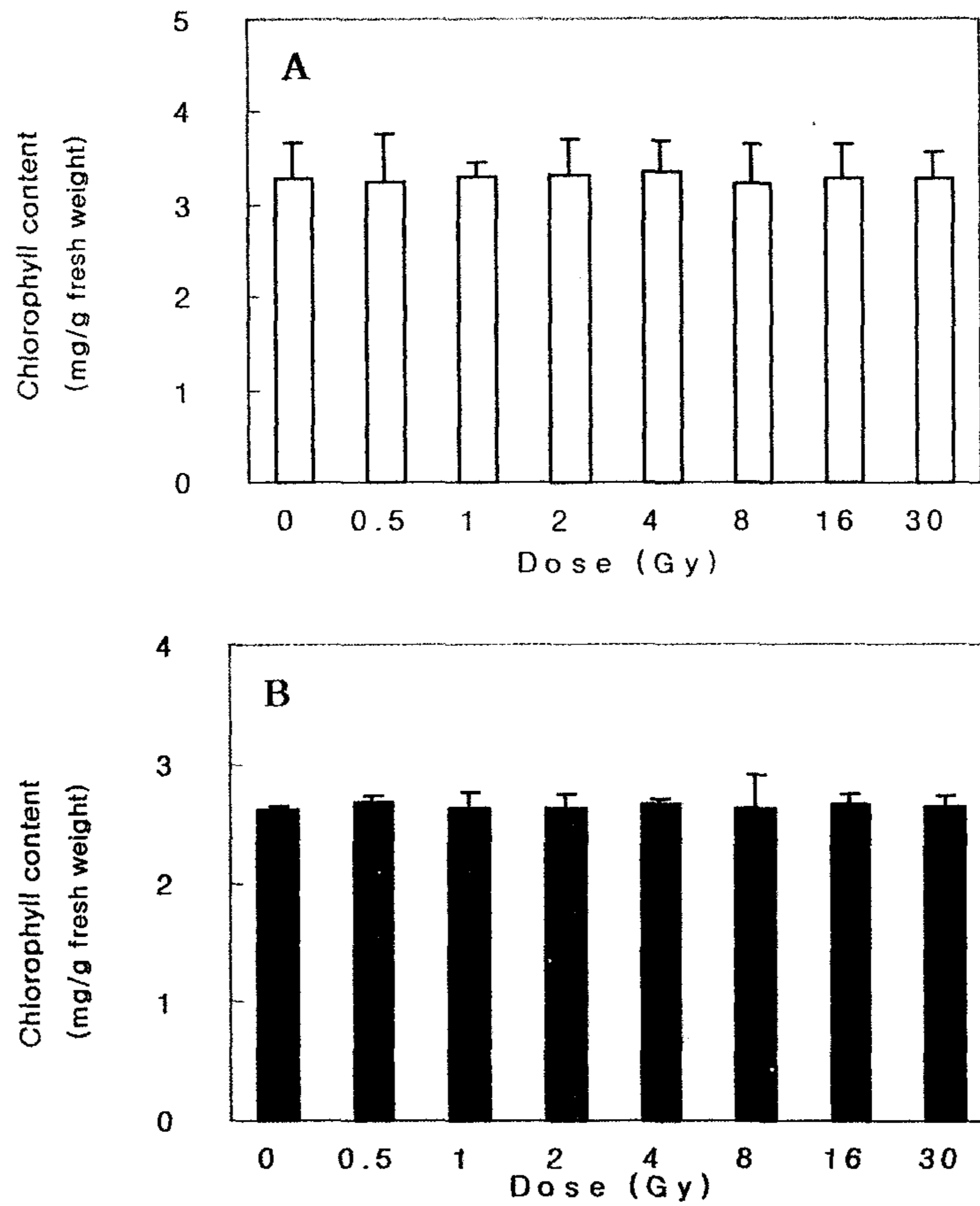


Fig. 87. Chlorophyll contents of gourd developed from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. Bars represent means±standard errors.



**Fig. 88.** Effect of low dose gamma radiation on the chlorophyll content of microtuber plantlet. A ; Dejima cultivar, B ; Superior cultivar. Microtubers were stored at 8~25 °C under light condition after gamma radiation. Bars represent means±standard errors.

#### (4) 참박

대체로 양호한 생육 양상을 보였던 4 Gy와 8 Gy 조사구의 엽록소 함량을 조사한 결과 대조구의 경우 총 엽록소 함량이  $329 \mu\text{mol}/\text{m}^2$  였고, 4 Gy 조사구는  $262 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ 였으며 8 Gy 조사구에서는  $263 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ 로 대조구에 비해 감소하였다(표 49). 이 등<sup>62)</sup>은 고추에 저선량 감마선을 조사하여 총 엽록소를 조사한 결과 저선량 방사선 조사에 의해 엽록소 함량이 증가하는 것을 관찰하였으나 박의 경우에는 저선량 조사구에서 엽록소 함량이 20% 정도 감소하였다. 한편 엽록소 a/b 비의 경우는 대조구는 2.66 였고, 4 Gy와 8 Gy 조사구는 각각 3.09, 3.07 였다. 일반적으로 낮은 광량에 적응된 식물의 틸라코이드 막 내의 엽록소 a/b는 2.0~2.2 정도인 반면 높은 광량에 적응된 식물의 경우는 2.6~3.6 사이로 알려져 있다<sup>95)</sup>.

#### (5) 씨감자

저선량 감마선을 조사하여 재배중인 식물체 앞에서 엽록소 함량의 변화를 분석하였다. 총 엽록소량은 대조구가  $287 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 인 반면 저선량 1, 2, 4, 8 Gy의 엽록소 양은 각각 308, 300, 294,  $331 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 대조구에 비해 대략 7% 증가하였다(표 50). 엽록소 a/b 는 대조구의 경우 1.75인 반면 2 Gy와 8 Gy는 각각 1.86, 1.79로 대조구에 비해 4% 정도 증가하였다(표 50). 이러한 결과들을 통해 저선량 감마선 조사에 의해 엽록소 함량이 증가된다는 것을 알 수 있었으며, Lee 등<sup>62)</sup>도 고추에 저선량 감마선을 조사하여 총 엽록소 함량을 조사한 결과 대조구의 함량이 36.68임에 비해 4 Gy와 8 Gy에서 49.82와 50.52로 높은 엽록소 함량을 관찰하였다. Anderson 등<sup>95)</sup>은 Chl a/b 와 총 엽록소 함량, 틸라코이드 막을 구성하고 있는 구성 성분, 그리고 광합성 활성과의 관계를 조사한 결과 Chl a/b가 증가할수록 광합성 기구의 구성성분과 광합성 능이 증가하는 것을 관찰하였고 파라미터간에 밀접한 상관관계가 있다고 보고하였다.

#### (6) 콩

대체로 양호한 생육 양상을 보였던 4 Gy 조사구의 엽록소 함량을 조사한 결과 대조구의 경우 총 엽록소 함량이  $109 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$  인 반면, 4 Gy 조사구는  $117 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 대조구에 비해 증가하는 경향을 보였다. 한편 엽록소 a/b 는 대조구는 4.08 였고, 4 Gy 조사구는 4.15였다(표 51).



**Table 49.** Changes in the chlorophyll contents of gourd from seeds irradiated with different doses of gamma radiation.

Dose (Gy)	Total Chl. ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )	Chl a/b
0	329 $\pm$ 56.7 <sup>†</sup>	2.66 $\pm$ 0.36
4	262 $\pm$ 25.1	3.09 $\pm$ 0.05
8	263 $\pm$ 12.0	3.07 $\pm$ 0.11

<sup>†</sup> : mean $\pm$ SE, Chl. : Chlorophyll

**Table 50.** Effect of low dose gamma radiation on the chlorophyll content of potato.

Dose (Gy)	Total Chl. ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )	Chl a/b
0	287 $\pm$ 11.8 <sup>†</sup>	1.75
1	308 $\pm$ 19.9	0.86
2	300 $\pm$ 14.8	1.86
4	294 $\pm$ 24.4	1.75
8	331 $\pm$ 26.2	1.79
16	281 $\pm$ 15.6	1.69

† : mean $\pm$ SE, Chl : Chlorophyll

**Table 51.** Changes in the chlorophyll contents of soybean from seeds irradiated with different doses of gamma radiation.

Dose (Gy)	Total Chls ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ )	Chl a/b
0	109 $\pm$ 5.92 <sup>†</sup>	4.08 $\pm$ 0.44
4	117 $\pm$ 9.93	4.15 $\pm$ 0.13

<sup>†</sup> : mean $\pm$ SE

## 다. 광합성 능

### (1) 씨감자

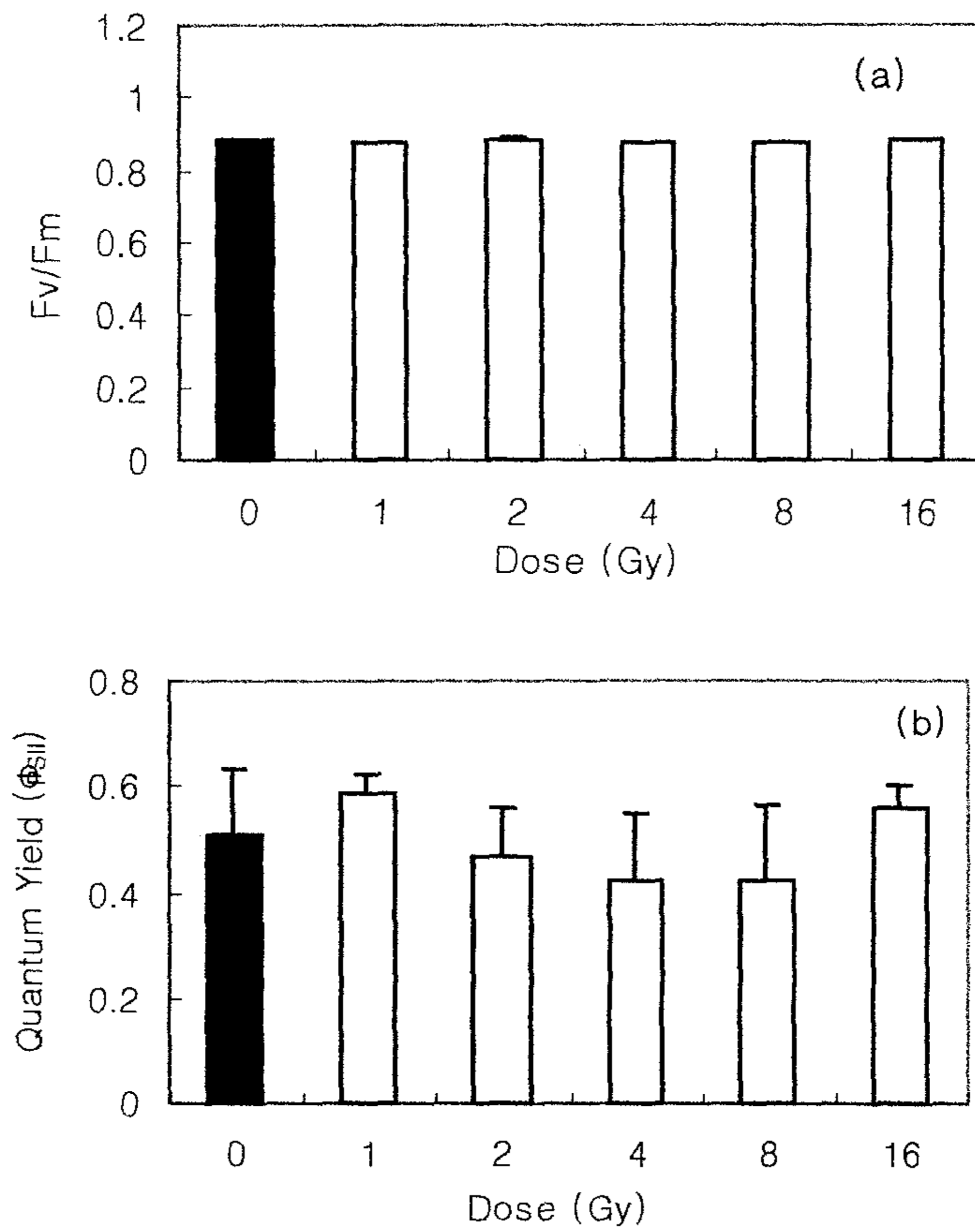
엽록소 형광 파라미터의 변화는 다음과 같다. 주로 엽록소 a에서 방출되는 엽록소 형광과 광합성 메카니즘 사이의 관계는 1931년 Kautsky가 암적응된 잎에 빛이 조사될 경우에 독특한 양상으로 형광이 방출된다는 것을 밝힘으로써 연구되기 시작한 이후 광합성의 생물 물리학적 측면을 측정하는데 편리하게 사용되어져 왔다<sup>97)</sup>. 반응중심이 열려 있을 때의 최소 형광을  $F_0$ 라고 하며 광계 II에 있는 엽록소 a 분자가 여기 된 후 에너지가 반응중심으로 이동하기 이전에 나오는 형광을 말한다.  $Q_A$ 를 완전히 환원시킬 수 있는 포화광을 조사했을 때 유도되는 최대 형광을  $F_m$ 이라 하며  $F_m$ 에서  $F_0$ 를 빼준 값을  $F_v$ 라 한다.  $F_v/F_m$ 은 광계II의 활성을 나타내주는 지표로 사용되며 들뜬 에너지 포획 능력을 나타내준다. 따라서 대조구와 저선량 감마선이 조사된 감자에서 나타나는 광계II 반응 중심의 들뜬 에너지 포획능의 변화를 알아보기 위하여 형광 파라미터를 조사하였다. 그림 89a에서 보는 바와 같이  $F_v/F_m$  값은 대조구의 경우 0.885로 저선량 감마선 1, 2, 4, 8, 그리고 16 Gy가 조사된 경우와 차이가 거의 없었다. 그림 89 b 에서 보는 바와 같이 광계II의 광양자 수율을 나타내주는  $\Phi_{PSII}$ 는 대조구의 값이 0.509인 반면, 1 Gy와 16 Gy는 각각 0.584 와 0.559로 대략 대조구에 비해 12% 정도 증가했다. 이러한 결과는 저선량 감마선 조사가 의해 광계II의 기능에는 영향을 미치지 않는 것으로 보이나 광계II로부터 광계I으로의 전자 전달 과정이 저선량 감마선 조사에 의해 효과적으로 일어나는 것으로 생각된다.

엽록소 형광 소멸의 변화를 조사한 결과는 다음과 같다. 식물은 흡수된 빛을 광화학 반응에 이용하거나 비광화학적 과정을 통해 에너지를 발산 시키기 때문에 광화학적 소멸과 비광화학적 소멸을 측정하여 감자의 에너지 분산의 변화에 대해 측정하였다. 환원되어 있던  $Q_A$ 가 산화되면서 엽록소 형광이 감소되는 성분을 광화학 소멸이라하며 이것은 광화학적 반응을 통한 흥분 에너지의 재분배를 촉진한다. 비광학적 소멸은 엽록체의 루멘과 스트로마간의 pH의 차이를 나타내주며 잎의 에너지 상태나 광계II의 광양자 효율을 조절하는데 중요한 역할을 하고 광저해로 인한 손상으로부터 광계II를 보호한다고 보고되고 있다<sup>98)</sup>. 광계II의 흥분 압(excitation pressure)을 설명하는  $1-qP$ 는 대조구의 경우 0.336였으나 1 Gy와 16 Gy에서는 각각 0.221과 0.236으로 대략 32% 감소하는 것으로 나타났다(그림 90a). 비광학적 소멸인 NPQ의 경우 대조구는 1.22였고, 4Gy는 1.78로 45% 증가했다(그림

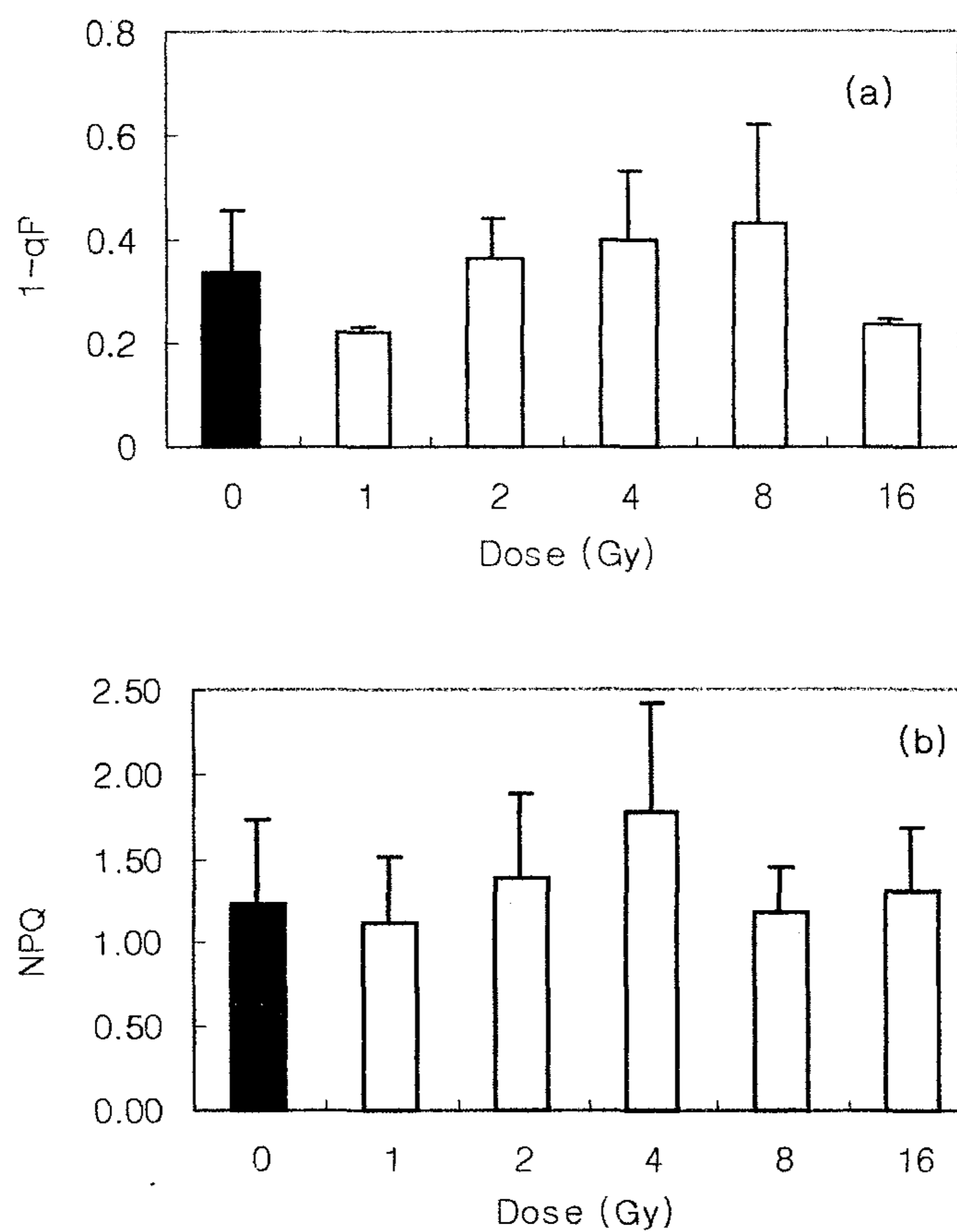
90b). 이러한 NPQ의 증가는 에너지의 일부가 열로 발산되어 광계II를 보호하고 틸라코이드 막을 가로질러 형성되는  $\Delta\text{pH}$ 가 증가했기 때문이다.

## (2) 고추

고추 잎에서 광자선속밀도(photon fluence rate, PFR)에 따른 광합성 특성을 조사하기 위하여 광량에 따른 산소발생을 조사하였다. 그림 91 에서 보는 바와 같이 대조구와 4 Gy의 감마선이 조사된 고추의 산소 발생이  $1000 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광량에서 포화되는 것으로 나타났다. 포화광에서 각각의 산소 발생은 대조구의 경우  $16 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , 4 Gy 조사구는  $25 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 대조구에 비해 1.5배정도 높은 것으로 나타났다(그림 91). 호흡률의 경우 대조구는  $3.3 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , 4 Gy 조사구는  $3.8 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 저선량 감마선이 조사되었을 때 증가하는 것으로 나타났다(그림 91). 저선량 방사선 조사에 의해 당근의 광합성과 핵산 합성의 증가<sup>28)</sup>, 호밀<sup>99)</sup>과 메밀<sup>100)</sup>의 수량 및 광합성이 증가되는 것이 관찰되었다. 본 실험에서도 산소 발생율을 측정된 결과 저선량 감마선 조사에 의해 고추의 광합성 능이 증가되는 것을 알 수 있었다. 반면, 제한된 낮은 광량에서는 변화하는 광량에 따른 산소 발생의 차이가 대조구나 4 Gy의 감마선을 조사한 고추 사이에 별로 차이가 없는 것으로 나타났다.



**Fig. 89.** Changes in the maximal photochemical efficiency of PSII (Fv/Fm)(a) and changes in the effective quantum yield of photochemical energy conversion at PSII reaction centers(b),  $\Phi_{\text{PSII}}$  of potato grown from seeds irradiated with different doses of gamma radiation.



**Fig. 90.** Changes in the excitation pressure of PSII (1-qP)(a) and changes in the non-photochemical quenching (NPQ)(b) of potato grown from seeds irradiated with different doses of gamma radiation.

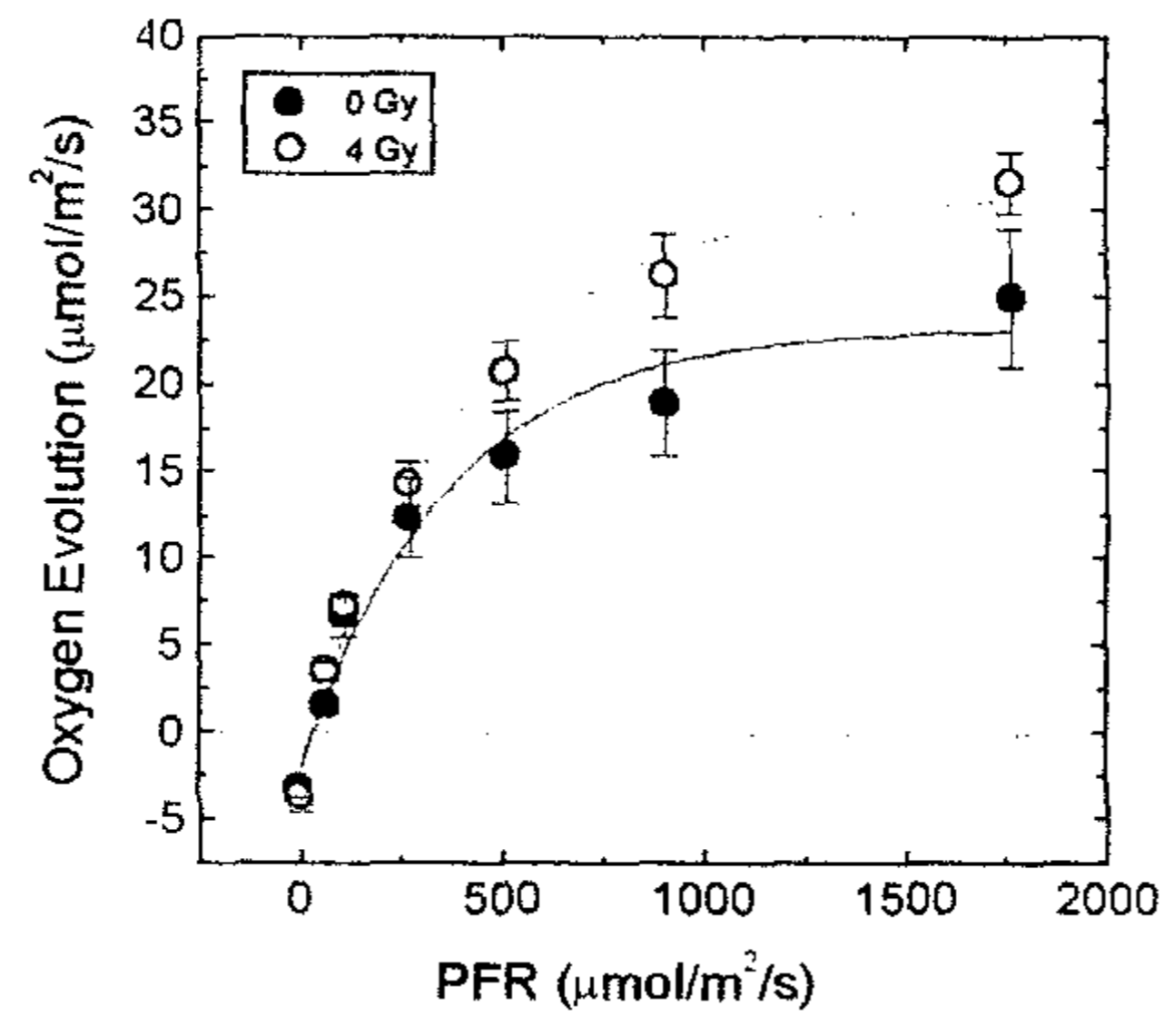


Fig. 91. Change in the  $\text{O}_2$  evolution in pepper leaf discs as a function of photon fluence rate (PFR). ●, Control ; ○, 4 Gy irradiation.

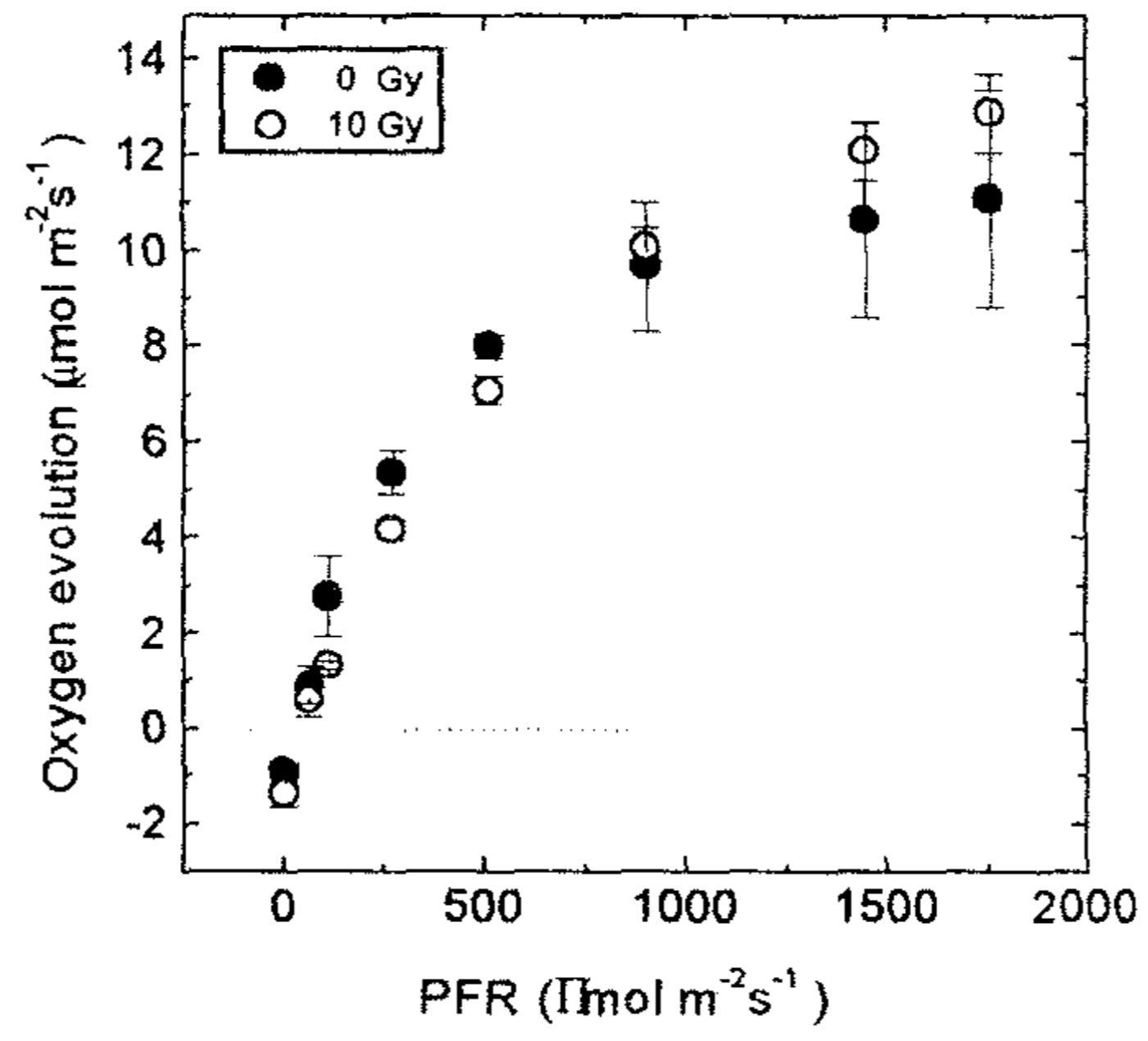


### (3) 무

무 잎에서 광자선속밀도(photon fluence rate, PFR)에 따른 광합성 특성을 조사하기 위하여 광량에 따른 산소발생을 조사하였다. 그림 92 에서 보는 바와 같이 대조구와 10 Gy의 감마선이 조사된 무의 산소 발생은  $1400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서 포화되는 것으로 나타났다. 포화광에서 각각의 산소 발생은 대조구의 경우  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 10 Gy 조사구는  $12 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 대조구에 비해 1.2 배정도 높은 것으로 나타났다(그림 92). 호흡률의 경우 대조구는  $0.89 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 10 Gy 조사구는  $1.35 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 저선량 감마선이 조사되었을 때 증가하는 경향을 보였다(그림 92). 저선량 방사선 조사에 의해 당근<sup>28)</sup>, 호밀<sup>99)</sup>, 메밀<sup>100)</sup> 등의 수량 및 광합성이 증가되는 것이 관찰되었는데 본 실험에서도 저선량 감마선 조사에 의해 무의 광합성 능이 다소 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

### (4) 콩

콩 잎에서 광자선속밀도(photon fluence rate, PFR)에 따른 광합성 특성을 조사하기 위하여 광량에 따른 산소발생을 조사하였다. 그림 51a 에서 보는 바와 같이 대조구와 4 Gy의 감마선이 조사된 콩의 산소 발생은  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서 포화되는 것으로 나타났다. 포화광에서 각각의 산소 발생은 대조구의 경우  $6.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 4 Gy 조사구는  $7.4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 대조구에 비해 1.1 배정도 높았다(그림 93a). 호흡률의 경우 대조구는  $0.88 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 4 Gy 조사구는  $1.62 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 저선량 감마선 조사에 의해 호흡율이 증가되는 것을 관찰할 수 있었다(그림 93a).



**Fig. 92.** Change in the  $\text{O}_2$  evolution in radish leaf discs as a function of photon fluence rate (PFR). ●, Control ; ○, 10 Gy irradiation.

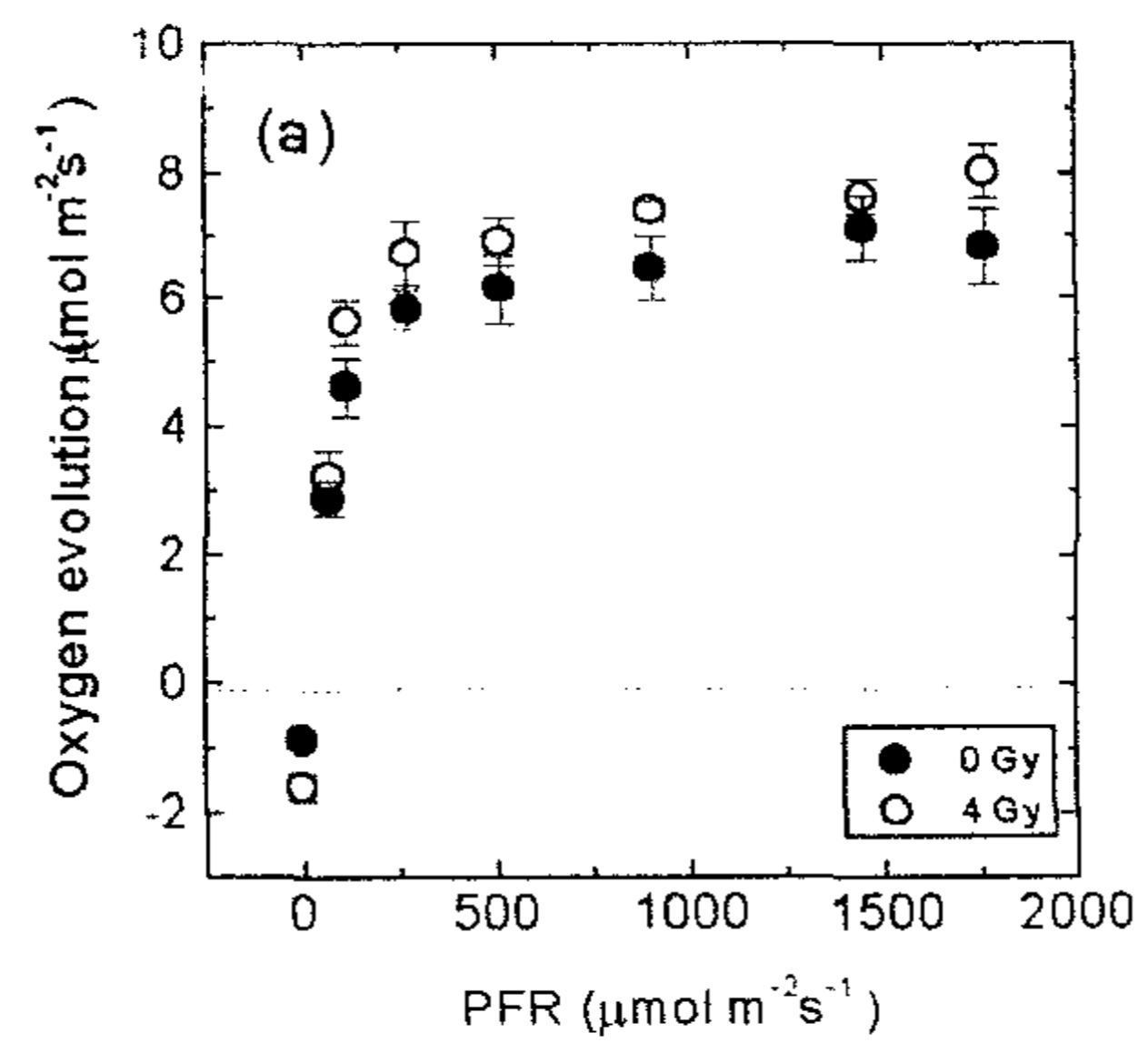


Fig. 93. Change in the  $\text{O}_2$  evolution in soybean leaf discs as a function of photon fluence rate (PFR). ●, Control ; ○, 4 Gy irradiation(a).

#### 라. 방사선에 의한 건물 생산 및 양분 흡수의 변화

방사선조사가 양분흡수에 미치는 영향은 다음과 같다. 저선량 감마선에 의한 자극효과가 작물의 영양생리에 미치는 영향을 파악하고자 조사일을 생육초기(파종후 17일)와 후반기(파종 후 59일)로 나누어 각 작물의 TKN, TP 함량을 분석하였으며 그 밖의 무기양분인 K, Ca, Mg, Na 그리고 미량원소인 Zn, Cu, Fe, Mn의 함량을 분석하였다. 분석한 작물의 TKN과 TP의 함량은 그림 94, 그림 95, 그림 96와 같다.

흑진주배추의 TKN과 TP함량을 보면 생육초기에는 감마선 무처리구에 비하여 적은 N, P함량을 보이지만 파종 후 59일째에는 4 Gy와 10 Gy에서 각각 약 50%와 40%의 함량증가가 나타났으며 이는 흑진주배추의 건물생산량 결과와도 일치하는 경향을 보이고 있다. 서림엇같이배추는 파종 후 17일 때 감마선 2 Gy 조사구에서 N, P가 각각 무처리에 비하여 12%와 43%증가를 보였으나 파종 후 59일 때에는 10 Gy 조사구에서 N, P함량이 증가하였다. 청운무에서는 파종 후 17일에는 8 Gy에서 N의 함량이 무처리구에 대해 29% 함량증가를 보였으며 생육후기로 갈수록 2 Gy, 4 Gy에서의 N함량이 증가하였다. Haunold 등<sup>17)</sup>과 Korosi 등<sup>16)</sup>은 각각 볼밀과 덩굴강남콩에서 감마선조사에 의한 질소와 인의 흡수 증가를 보고한바 있어 본 실험의 배추와 무 종자에서의 질소와 인의 함량 증가 또한 감마선에 의한 자극효과로 보인다.

저선량 감마선 조사 작물의 TKN과 TP 함량을 살펴본 결과 감마선 처리에 의한 질소와 인의 흡수변화가 일관되게 나타나지 않고 생육시기에 따라 차이를 보이는 것으로 나타났다. 또한 생육후기에서 10 Gy에서 질소와 인의 함량이 증가하는 것으로 보아 감마선에 의한 자극효과를 자세히 살펴보기 위해서는 10 Gy이상에서의 변화를 더 관찰할 필요가 있을 것으로 생각된다.

표 52, 53, 54은 각각 파종 후 17일 때에 수거한 감마선 조사 작물내의 무기양분의 함량변화를 보이고 있다. 흑진주배추는 8 Gy까지 Fe의 함량이 무처리의 197%로 증가하고 10Gy에서는 급격히 감소하는 경향을 보였으며 서림엇같이배추는 2 Gy에서 Cu와 Fe의 함량이 무처리구에 비하여 522%, 427%의 증가를 보였고 8 Gy에서 872%, 309%의 증가를 보였다. 또한 청운무에서는 Cu의 함량이 6 Gy, 8 Gy, 10 Gy에서 약 40%정도의 함량증가를 보여 감마선의 조사가 작물의 미량원소 특히 Cu와 Fe의 흡수촉진에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 그 밖의 무기양분의 함량은 흑진주배추에서는 일관된 경향을 보이지 않았지만 서림엇같이배추에서는 2 Gy와 10 Gy에서 약간의 증가경향이 나타났으며 청운무에서는 8 Gy에서 증가경향이 나타났다.

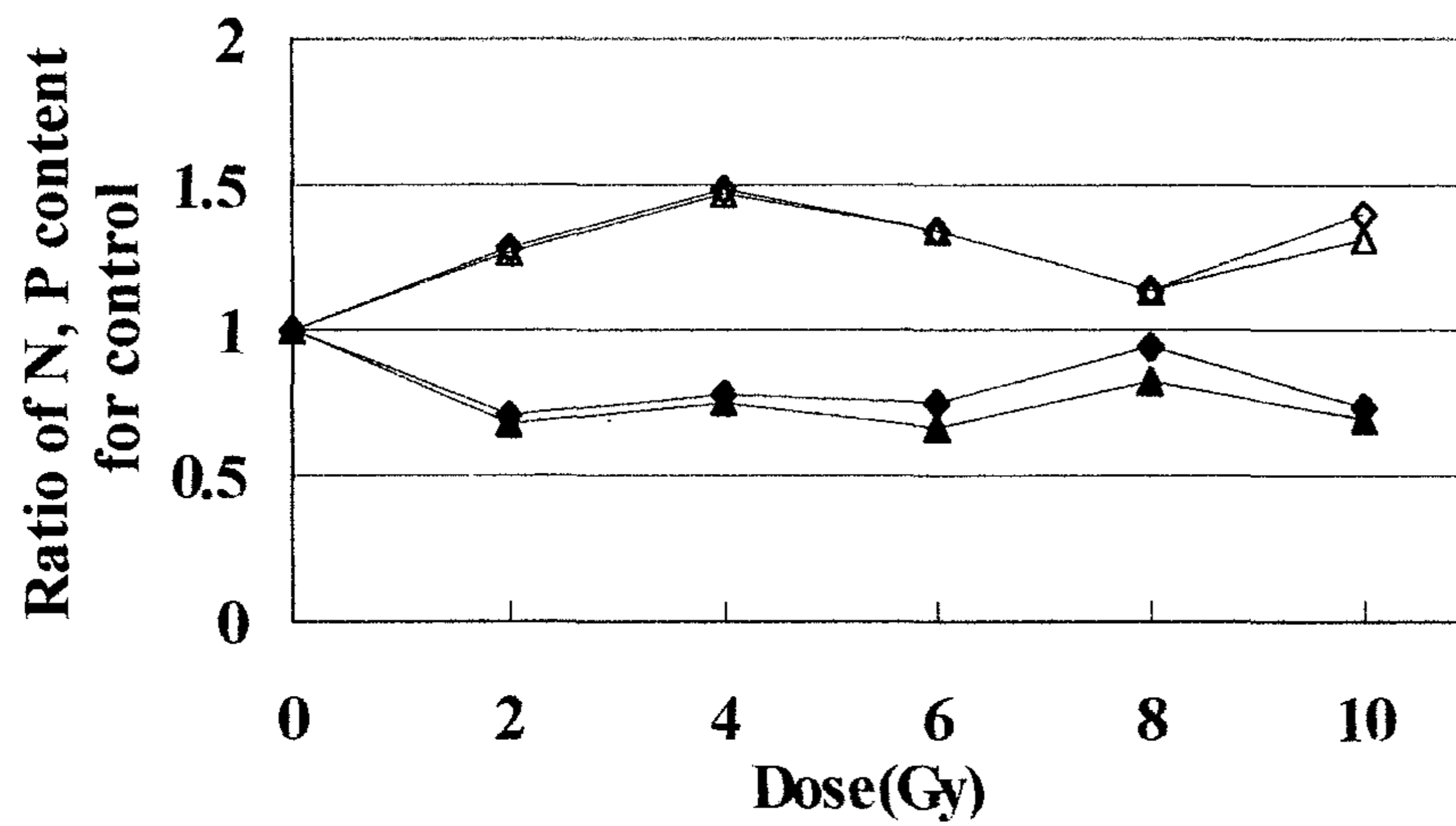


Fig. 94. Contents of Nitrogen(N) and phosphate(P) in *Brassica campestris* var.Surim at 17, 59days after germination according to the dose of gamma radiation (◆-17days-N ▲-17days-P ◇-59days-N △-59days-P).

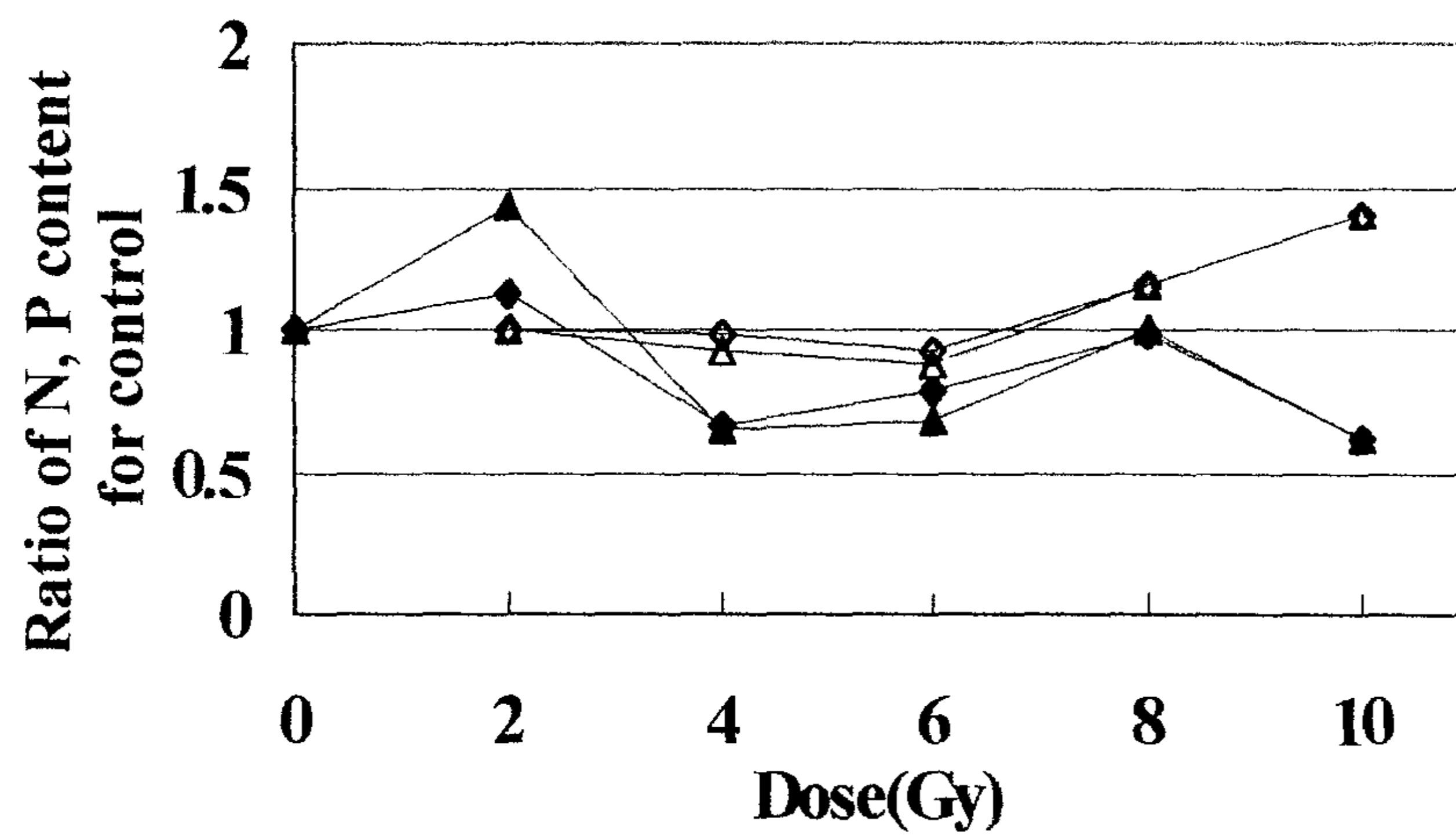


Fig. 95. Contents of Nitrogen(N) and phosphate(P) in *Brassica campestris* var. Hckjinju at 17, 59days after germination according to the dose of gamma radiation(◆-17days-N ▲-17days-P ◇-59days-N △-59days-P).

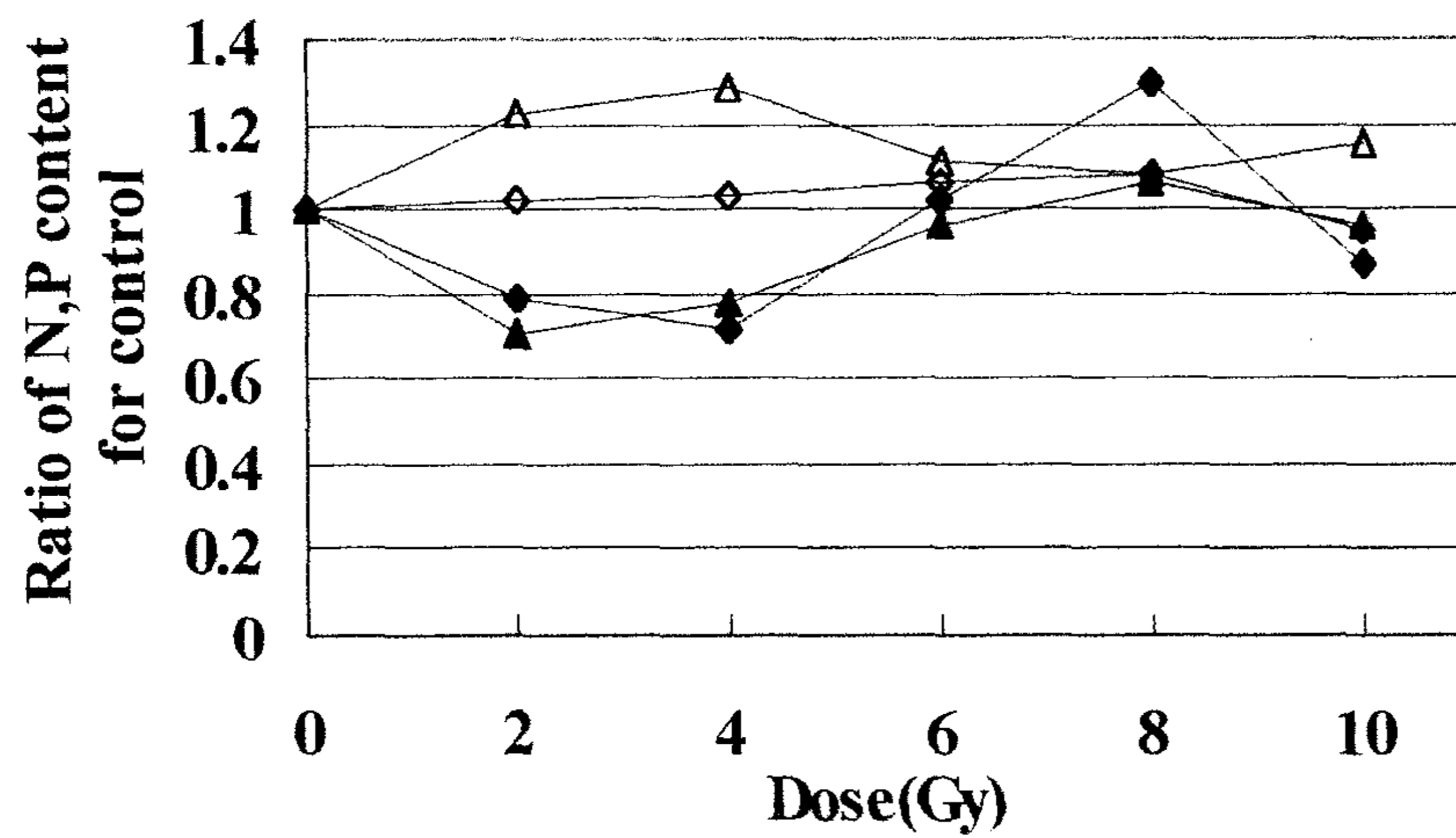


Fig. 96. Contents of Nitrogen(N) and phosphate(P) in *Raphanus sativas* var. Chung-un at 17, 59days after germination according to the dose of gamma radiation(◆17days-N ▲17days-P ◇59days-N △59days-P).

**Table 52.** Contents of mineral nutrient in *Brassica campestris* var. Surim at 17days after germination according to the dose of gamma radiation

Mineral nutrient	Nutrient content(g)					
	Dose of gamma radiation (Gy)					
	0	2	4	6	8	10
Na	23 (1.00)	17 (0.74)	22 (0.94)	19 (0.83)	26 (1.13)	28 (1.21)
K	86 (1.00)	53 (0.61)	80 (0.92)	62 (0.72)	77 (0.89)	89 (1.03)
Ca	36 (1.00)	34 (0.96)	46 (1.28)	39 (1.09)	45 (1.24)	53 (1.48)
Mg	7.3 (1.00)	6.0 (0.82)	7.7 (1.06)	6.1 (0.85)	8.0 (1.11)	9.6 (1.32)
Zn	0.13 (1.00)	0.11 (0.82)	0.12 (0.92)	0.13 (1.01)	0.14 (1.03)	0.18 (1.36)
Cu	0.030 (1.00)	0.028 (0.94)	0.031 (1.04)	0.036 (1.20)	0.040 (1.34)	0.043 (1.42)
Fe	0.30 (1.00)	0.33 (1.08)	0.54 (1.77)	0.66 (2.17)	0.90 (2.97)	0.31 (1.01)
Mn	0.065 (1.00)	0.051 (0.78)	0.062 (0.95)	0.078 (1.19)	0.095 (1.45)	0.081 (1.25)



**Table 53.** Content of mineral nutrient in *Brassica campestris* var. Hckjinju at 17days after germination according to the dose of gamma radiation

Mineral nutrient	Nutrient content(g)					
	Dose of gamma radiation (Gy)					
	0	2	4	6	8	10
Na	434 (1.00)	553 (1.27)	377 (0.87)	379 (0.87)	425 (0.98)	292 (0.67)
K	1739 (1.00)	1944 (1.12)	1249 (0.72)	1240 (0.71)	1272 (0.73)	983 (0.57)
Ca	514 (1.00)	961 (1.87)	602 (1.17)	585 (1.14)	695 (1.35)	630 (1.22)
Mg	140 (1.00)	161 (1.15)	106 (0.76)	125 (0.89)	93 (0.66)	104 (0.74)
Zn	2.63 (1.00)	2.70 (1.03)	1.89 (0.72)	2.53 (0.96)	3.26 (1.24)	1.64 (0.62)
Cu	0.331 (1.00)	2.507 (6.22)	0.631 (1.91)	0.587 (1.78)	3.212 (9.72)	1.114 (3.37)
Fe	7.85 (1.00)	41.42 (5.28)	14.63 (1.86)	11.18 (1.42)	32.12 (4.09)	13.93 (1.78)
Mn	1.274 (1.00)	1.805 (1.42)	1.109 (0.87)	1.282 (1.01)	1.545 (1.21)	0.971 (0.76)

**Table 54.** Contents of mineral nutrient in *Raphanus sativas* var. Chung-un CR at 17days after germination according to the dose of gamma radiation

Mineral nutrient	Nutrient content(g)					
	Dose of gamma radiation (Gy)					
	0	2	4	6	8	10
Na	723 (1.00)	549 (0.76)	575 (0.80)	718 (0.99)	867 (1.20)	759 (1.05)
K	2055 (1.00)	1474 (0.72)	1613 (0.78)	1836 (0.89)	2680 (1.30)	1917 (0.93)
Ca	832 (1.00)	623 (0.75)	679 (0.82)	840 (1.01)	998 (1.20)	1106 (1.33)
Mg	198 (1.00)	163 (0.82)	160 (0.81)	191 (0.96)	248 (1.25)	205 (1.04)
Zn	4.60 (1.00)	3.58 (0.78)	3.32 (0.72)	3.88 (0.84)	5.09 (1.11)	4.87 (1.06)
Cu	0.93 (1.00)	0.99 (1.06)	0.88 (0.95)	1.32 (1.42)	1.33 (1.43)	1.28 (1.38)
Fe	10.50 (1.00)	9.20 (0.88)	7.55 (0.72)	10.54 (1.00)	8.88 (0.85)	9.80 (0.93)
Mn	1.69 (1.00)	1.51 (0.89)	1.46 (0.86)	1.74 (1.03)	2.10 (1.25)	1.64 (0.97)

파종 후 59일 째 수거한 작물의 무기양분함량은 표 55, 56, 57에 나타내었다. 흑진주배추와 서림엇같이배추의 각각 4 Gy, 8 Gy에서 1가 양이온인  $\text{Na}^+$ 와  $\text{K}^+$ 의 함량이 특이적으로 높게 나타나는 경향을 보였으며 청운무의 8 Gy조사구에서도  $\text{K}^+$ 의 함량증가가 나타났다. 이러한 1가 양이온의 증가는  $\text{Na}^+$ 와  $\text{K}^+$ 의 생리조절기능을 감안하고 토마토에서의 아미노산과 탄수화물 등의 함량증가를 보고한 Vlasjuk<sup>28)</sup>의 결과를 고려하면 감마선 조사로 인한 자극 효과로 나타난 체내 유기산 또는 아미노산 함량의 증가로 기인한 것으로 추정된다.

지금까지 Luckey<sup>3)</sup>와 김 등<sup>6)</sup>에 의해 저선량방사선에 의한 식물종자의 발아와 초기생육의 촉진 및 수량 증가에 대한 고찰이 있었지만, Miller 등<sup>6)</sup>이 저선량 방사선의 조사에 의한 식물의 생육촉진과 수량증가를 인정하면서도 반복실험에서의 재현성과 오차의 문제를 지적한 바와 같이 본 실험에서도 식물 종에 따라 적정 선량이 다르게 나타났으며 반복간의 편차가 크게 나타났다. 또한 본 실험의 결과를 선량-반응 곡선의 형태<sup>11)</sup>로 비교해 보면 TKN, TP 함량은 98년산 흑진주 배추에서 TP 함량반응을 제외하고는 선량-반응곡선이  $\gamma$  또는  $\delta$ 형태를 보였으며, 대부분의 무기원소함량과 17일 째 수거한 작물체내의 Cu, Fe 함량반응도  $\gamma$  또는  $\delta$ 형태의 선량-반응곡선의 형태를 보여 감마선에 의한 자극효과(hormesis)가 일부 나타나기는 하지만 일반적 현상이라고 인정하기에는 모호하였다. 따라서 감마선 조사가 영양생리에 미치는 영향을 좀 더 구체적으로 파악하기 위한 더 많은 연구결과의 집적이 필요할 것으로 판단된다.

**Table 55.** Contents of mineral nutrient in *Brassica campestris* var. Surim at 59days after germination according to the dose of gamma radiation

Mineral nutrient	Nutrient content(g)					
	Dose of gamma radiation (Gy)					
	0	2	4	6	8	10
Na	441 (1.00)	713 (1.62)	769 (1.74)	652 (1.48)	569 (1.29)	700 (1.59)
K	3689 (1.00)	5159 (1.40)	5379 (1.46)	5646 (1.53)	4182 (1.13)	5236 (1.42)
Ca	2457 (1.00)	2820 (1.15)	3252 (1.32)	3056 (1.24)	3055 (1.24)	2946 (1.20)
Mg	382.9 (1.00)	487.7 (1.27)	546.2 (1.43)	532.2 (1.39)	457.6 (1.20)	548.8 (1.43)
Zn	11.60 (1.00)	12.03 (1.04)	15.51 (1.33)	11.11 (0.96)	13.38 (1.15)	16.13 (1.39)
Cu	1.499 (1.00)	2.219 (1.48)	2.262 (1.51)	2.150 (1.43)	1.832 (1.22)	2.283 (1.52)
Fe	31.27 (1.00)	28.17 (0.90)	43.35 (1.38)	33.71 (1.07)	34.33 (1.09)	49.20 (1.57)
Mn	1.508 (1.00)	1.478 (0.98)	2.008 (1.33)	1.522 (1.01)	1.640 (1.09)	2.169 (1.44)

**Table 56.** Contents of mineral nutrient in *Brassica campestris* var. Hckjinju at 59days after germination according to the dose of gamma radiation

Mineral nutrient	Nutrient content(g)					
	Dose of gamma radiation (Gy)					
	0	2	4	6	8	10
Na	954 (1.00)	743 (0.78)	1172 (1.23)	1200 (1.26)	1552 (1.63)	1416 (1.48)
K	8907 (1.00)	8171 (0.92)	6723 (0.75)	6801 (0.76)	9654 (1.08)	11011 (1.23)
Ca	4647 (1.00)	4341 (0.93)	3743 (0.81)	3989 (0.86)	5201 (1.12)	5560 (1.20)
Mg	737 (1.00)	710 (0.96)	671 (0.91)	704 (0.95)	874 (1.19)	977 (1.33)
Zn	16.46 (1.00)	14.32 (0.87)	14.83 (0.90)	12.78 (0.78)	21.35 (1.30)	20.24 (1.23)
Cu	2.577 (1.00)	2.316 (0.90)	2.011 (0.78)	1.679 (0.65)	3.674 (1.43)	4.953 (1.92)
Fe	74.66 (1.00)	64.51 (0.86)	57.71 (0.77)	68.23 (0.91)	75.89 (1.02)	95.71 (1.28)
Mn	3.209 (1.00)	2.972 (0.93)	3.173 (0.99)	2.946 (0.92)	3.547 (1.01)	4.245 (1.32)

**Table 57.** Contents of mineral nutrient in *Raphanus sativas* var. Chung-un at 59days after germination according to the dose of gamma radiation

Mineral nutrient	Nutrient content(g)					
	Dose of gamma radiation (Gy)					
	0	2	4	6	8	10
Na	1255 (1.00)	1233 (0.98)	1358 (1.08)	1236 (0.98)	1276 (1.02)	1146 (0.91)
K	3384 (1.00)	3771 (1.11)	3610 (1.07)	3666 (1.08)	4196 (1.24)	3204 (0.95)
Ca	3335 (1.00)	3460 (1.04)	3575 (1.07)	3493 (1.05)	3355 (1.01)	3102 (0.93)
Mg	565 (1.00)	584 (1.03)	603 (1.07)	610 (1.08)	612 (1.08)	546 (0.97)
Zn	13.27 (1.00)	12.35 (0.93)	15.27 (1.15)	13.03 (0.98)	13.39 (1.01)	12.51 (0.94)
Cu	1.47 (1.00)	1.44 (0.97)	1.52 (1.03)	1.35 (0.92)	1.52 (1.03)	1.44 (0.98)
Fe	30.92 (1.00)	31.84 (1.03)	32.16 (1.04)	31.72 (1.03)	32.75 (1.06)	28.31 (0.92)
Mn	3.34 (1.00)	3.76 (1.13)	3.63 (1.09)	3.39 (1.01)	3.89 (1.16)	3.18 (0.95)

#### 마. 재배 환경에 따른 감마선의 자극 효과 및 콩의 뿌리 활성 변화

Growth chamber에서 재배한 콩품종의 선량반응곡선의 형태는 다음과 같다. 감마선에 의한 자극효과가 콩품종의 뿌리생육에 미치는 영향을 조사하고 환경조건의 변화가 감마선 자극효과의 발현에 미치는 영향을 조사하기 위하여 콩 종자에 감마선을 0.5~20 Gy로 조사하여 growth chamber에서 22일간 재배하고 뿌리의 생육을 조사한 결과는 표 58과 같다. 또한 그림 97, 98, 99은 각각 뿌리 두께별로 뿌리표면적, 뿌리길이, 뿌리부피의 분포를 보이고 있다. 감마선의 조사에 의한 총뿌리길이, 평균뿌리두께, 총뿌리부피의 변화는 감마선 무조사구에 비하여 유의수준 5%에서 뚜렷한 증가를 보였으며 선량이 20 Gy까지 증가할수록 계속하여 뿌리의 생장량이 증가하였다. 또한 생육환경이 제한되고 일정하게 조절되는 경우 자극효과는 확연하게 나타나는 것으로 보인다.

온실에서 재배한 콩품종의 선량반응곡선의 형태는 다음과 같다. 온실에서 22일과 35일 동안 재배한 콩품종에서 저선량 감마선조사에 의한 뿌리생육의 변화는 표 59과 같으며, 콩품종의 뿌리생육은 재배기간이 길어질수록 저선량감마선에 의한 자극효과가 감소하는 경향을 보였다. 22일간 재배한 경우 뿌리표면적과 뿌리길이는 선량이 증가함에 따라 대체적으로 증가하는 경향을 보였으나 35일 재배 후 수거한 경우 16 Gy의 선량에서 뿌리생장이 줄어드는 경향을 보였다.

**Table 58.** Effect of gamma radiation on root growth of soybean cultivars cultivated in growth chamber

Dose (Gy)	Duration of cultivation	Root growth			
		Root total length (cm)	Root surface area (cm <sup>2</sup> )	Root average diameter (mm)	Root volume (cm <sup>3</sup> )
0		221(1.00) <sup>+</sup> b*	30(1.00) a	0.436(1.00) c	0.34(1.00) b
0.5		308(1.39) ab	45(1.51) a	0.473(1.09) abc	0.55(1.62) ab
1		304(1.38) ab	34(1.41) a	0.452(1.04) bc	0.49(1.44) ab
2		299(1.35) ab	46(1.53) a	0.503(1.15) a	0.59(1.73) ab
4	22 days	313(1.42) ab	48(1.59) a	0.486(1.11) ab	0.60(1.77) ab
8		304(1.38) ab	46(1.53) a	0.488(1.12) ab	0.58(1.70) ab
12		320(1.45) ab	50(1.64) a	0.500(1.14) ab	0.63(1.85) ab
16		331(1.50) ab	51(1.69) a	0.487(1.12) ab	0.64(1.90) ab
20		389(1.76) a	59(1.94) a	0.484(1.11) ab	0.72(2.13) a

\*Any two means having a common letter are not significantly different in the 5% level of significance.

<sup>+</sup>Figures given in parentheses are values of ratio for control



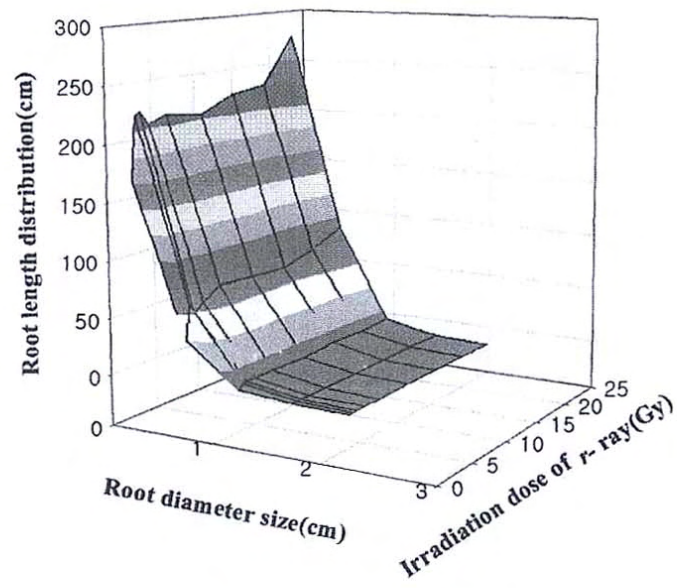


Fig. 97. Change of total root length distribution by gamma radiation at soybean cultivars cultivated in growth chamber according to root diameter size.

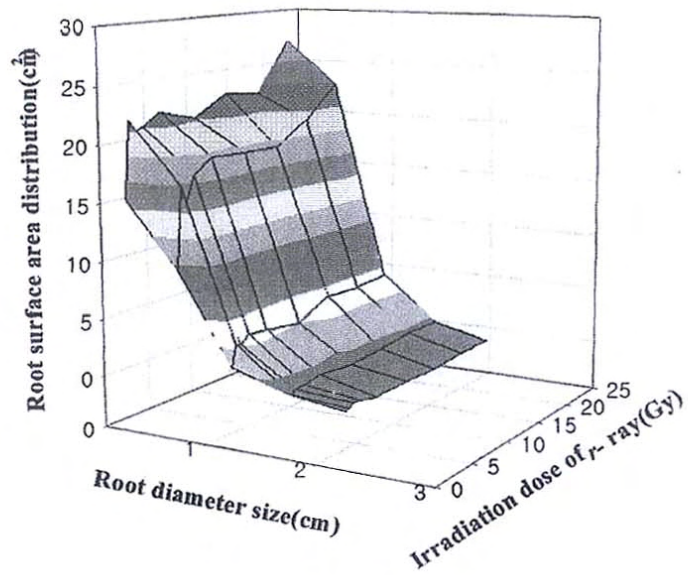


Fig. 98. Change of total root surface area distribution by gamma radiation at soybean cultivars cultivated in growth chamber according to root diameter size.

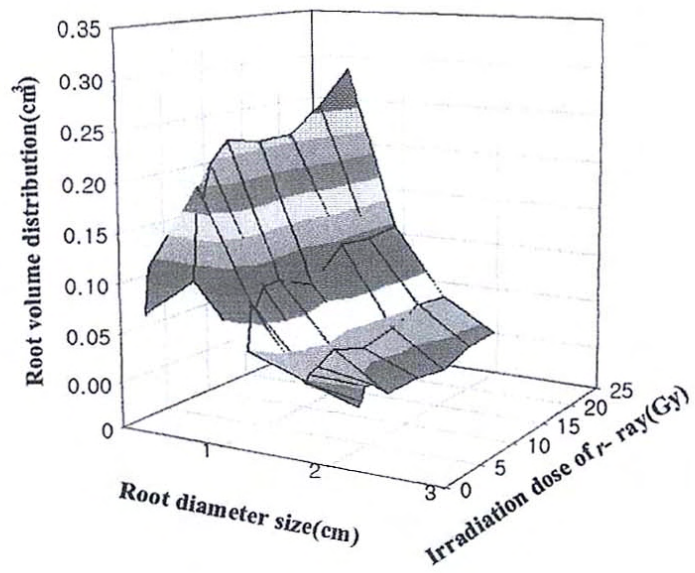


Fig. 99. Change of total root volume distribution by gamma radiation at soybean cultivars cultivated in growth chamber according to root diameter size.

**Table 59. Effect of gamma radiation on root growth of soybean cultivars cultivated in green house**

Dose (Gy)	Duration of cultivation	Root growth			
		Root total length	Root surface area	Root average diameter	Root volume
		(cm)	(cm <sup>2</sup> )	(mm)	(cm <sup>3</sup> )
0		368(1.00) <sup>†</sup> ab*	53(1.00) b	0.464(1.00) a	0.62(1.00) a
0.5		353(0.96) b	56(1.07) ab	0.515(1.11) a	0.74(1.20) a
1		416(1.13) ab	63(1.20) ab	0.486(1.05) a	0.79(1.28) a
2		541(1.47) a	83(1.57) a	0.493(1.06) a	1.03(1.66) a
4	22 days	390(1.06) ab	56(1.06) ab	0.459(0.99) a	0.64(1.04) a
8		372(1.01) ab	55(1.05) ab	0.479(1.03) a	0.67(1.08) a
12		477(1.29) ab	77(1.46) ab	0.521(1.12) a	1.01(1.64) a
16		430(1.17) ab	96(1.31) ab	0.512(1.10) a	0.90(1.45) a
20		422(1.15) ab	67(1.27) ab	0.511(1.10) a	0.87(1.41) a
0		864(1.00) ab	139(1.00) a	0.518(1.00) b	1.82(1.00) a
0.5		909(1.05) a	145(1.04) a	0.512(0.99) b	1.88(1.03) a
1		861(0.99) ab	142(1.02) a	0.532(1.03) ab	1.91(1.05) a
2		860(0.99) ab	137(0.98) a	0.520(1.01) b	1.82(1.00) a
4	35 days	871(1.01) ab	144(1.03) a	0.530(1.03) ab	1.92(1.05) a
8		828(0.96) ab	138(0.99) a	0.537(1.04) ab	1.86(1.02) a
12		787(0.91) abc	138(0.99) a	0.562(1.09) a	1.95(1.07) a
16		673(0.78) c	108(0.78) b	0.513(0.99) b	1.40(0.77) b
20		747(0.87) bc	123(0.89) ab	0.532(1.03) ab	1.65(0.91) ab

\*Any two means having a common letter are not significantly different in the 5% level of significance

†Figures given in parentheses are values of ratio for control

시험포장에서 재배한 콩품종의 선량반응곡선의 형태는 다음과 같다. 시험포장에서 22일과 50일간 재배한 콩품종에서 저선량 감마선 조사에 의한 생육반응은 표 60와 같다. 온실에서 재배한 경우와 같이 재배기간이 길어짐에 따라 선량반응이 상이하게 나타났다. 22일간 재배한 경우 총뿌리길이와, 총뿌리표면적에서 선량의 증가에 따라 생육의 증가를 보였으며 무선량구에 비하여 유의수준 5%에서 차이를 보였다. 그러나 50일간 재배한 경우 16 Gy 조사구에서 뿌리두께가 현저히 감소하였으며 뿌리표면적과 뿌리길이는 감소의 경향이 관찰되었으나 통계적 유의성은 없었다. 따라서 저선량 감마선에 의한 자극효과는 생육단계에 따라 다르게 나타나는 것으로 생각된다.

재배환경이 콩품종의 저선량 감마선 조사효과에 미치는 영향은 다음과 같다. 표 61은 종자에 저선량의 감마선조사 후 상이한 재배환경에서 재배한 콩품종의 생육단계에 따른 건물중의 변화를 보이고 있다. 위에서 언급한바 있는 뿌리생장결과와 건물중은 growth chamber에서 재배한 경우 조사한 감마선량의 증가에 따라 일정한 증가양상을 보였으나 온실과 포장에서 재배한 콩품종의 경우 뿌리생육과 건물중에서 선량의 증가에 따라 통계적인 유의성이 나타나지 않았다. 그러나 growth chamber에서 재배한 콩품종의 경우 매우 빠른 성장속도를 보였고, 온실재배구의 경우 포장재배구보다는 빠른 생육속도를 보여 재배기간을 기준으로 서로 다른 재배환경에서 성장한 시험구들의 생육상태를 절대적으로 비교하는데는 어려움이 있을 것으로 생각된다. 그러나 같은 생육환경에서 재배한 시험구는 재배기간이 길어짐에 따라 감마선에 의한 자극효과가 약화되는 것을 알 수 있었다. Lowell<sup>101)</sup>은 옥수수에 대한 자극효과의 연구에서 재현성 있는 결과를 얻기 위해서는 절대적으로 일정한 환경상태에서 실험이 이루어져야 한다고 지적한 바 있으며 본 연구 결과에서도 growth chamber에서 재배한 경우 안정적인 실험 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 자극효과의 포장적용을 위해서는 포장에서 나타나는 자극효과의 발현에 관한 연구도 중요할 것으로 생각된다.

시험포장에서 재배한 콩품종의 감마선조사에 따른 뿌리생육과 생산량의 변화는 다음과 같다. 생육단계별 감마선에 의한 자극효과의 반응은 표 62, 그림 100, 그림 101와 같다. 감마선 조사에 의한 자극효과는 생육단계에 따라 다양하게 나타났으며 영양생장기 중반에 뿌리길이와 뿌리표면적이 4 Gy, 12 Gy 와 20 Gy에서 자극효과를 보였다. 생식생장기인 개화기와 등숙기에서는 뿌리의 생장이 선량처리구에서 감소하였다. 특히 등숙기에 들어서 저선량처리에서 뿌리생장의 급격한 감소가 나타났는데, 이는 선량처리에 따른 자극효과로 인하여 발현된 빠른 등숙으로 인한 것으로 생각된다.

**Table 60.** Effect of gamma radiation on root growth of soybean cultivars cultivated in field.

Dose (Gy)	Duration of cultivation	Root growth			
		Root total length	Root surface area	Root average diameter	Root volume
		(cm)	(cm <sup>2</sup> )	(mm)	(cm <sup>3</sup> )
0		39(1.00) <sup>†</sup> b*	7(1.00) b	0.580(1.00) a	0.102(1.00) a
0.5		52(1.31) b	8(1.15) ab	0.507(0.87) abc	0.102(1.00) a
1		75(1.89) ab	13(1.87) ab	0.567(0.98) ab	0.187(1.83) a
2		73(1.84) ab	13(1.85) ab	0.560(0.96) ab	0.187(1.83) a
4	22 days	106(2.69) a	15(2.20) ab	0.463(0.80) c	0.180(1.77) a
8		73(1.85) ab	11(1.69) ab	0.519(0.89) abc	0.155(1.52) a
12		96(2.43) ab	13(1.86) ab	0.437(0.75) c	0.143(1.40) a
16		105(2.66) a	16(2.21) a	0.480(0.83) bc	0.184(1.80) a
20		79(2.01) ab	13(1.85) ab	0.523(0.90) abc	0.172(1.68) a
0		639(1.00) ab	131(1.00) a	0.664(1.00) a	2.18(1.00) a
0.5		815(1.28) a	173(1.33) a	0.685(1.03) a	3.00(1.38) a
1		735(1.15) ab	152(1.16) a	0.660(0.99) a	2.57(1.18) a
2		586(0.92) ab	122(0.93) a	0.667(1.01) a	2.05(0.94) a
4	50 days	813(1.27) a	161(1.23) a	0.638(0.96) a	2.58(1.18) a
8		771(1.21) ab	160(1.23) a	0.647(0.97) a	2.76(1.27) a
12		638(1.00) ab	134(1.03) a	0.667(1.01) a	2.34(1.08) a
16		468(0.73) b	100(0.76) a	0.679(1.02) a	1.74(0.80) a
20		518(0.81) ab	112(0.86) a	0.704(1.06) a	2.01(0.92) a

\*Any two means having a common letter are not significantly different in the 5% level of significance.

<sup>†</sup>Figures given in parentheses are values of ratio for control

**Table 61.** Effect of gamma radiation on dry weight of soybean cultivars cultivated in different environment condition

Dose (Gy)	Cultivation situation (Duration of cultivation)				
	Chamber (22 days)	Green house (22days)	Green house (35days)	Field (22days)	Field (35days)
	g				
0	0.297(1.00) <sup>+</sup> b*	0.318(1.00) ab	0.833(1.00) a	0.243(1.00) a	1.557(1.00) a
0.5	0.283(0.95) b	0.316(0.99) ab	0.865(1.04) a	0.173(0.71) a	1.011(0.65) ab
1	0.486(1.64) a	0.296(0.93) ab	0.854(1.03) a	0.308(1.27) a	0.925(0.59) ab
2	0.325(1.10) ab	0.387(1.22) a	0.924(1.11) a	0.202(0.83) a	0.918(0.59) ab
4	0.301(1.01) b	0.223(0.70) b	0.970(1.17) a	0.257(1.06) a	1.150(0.74) ab
8	0.285(0.96) b	0.261(0.82) b	0.884(1.06) a	0.280(1.15) a	1.045(0.67) ab
12	0.332(1.12) ab	0.343(1.08) ab	0.920(1.10) a	0.251(1.03) a	1.008(0.65) ab
16	0.376(1.27) ab	0.250(0.79) b	0.744(0.89) a	0.284(1.17) a	1.272(0.82) ab
20	0.308(1.04) b	0.254(0.80) b	0.874(0.93) a	0.288(1.19) a	0.711(0.46) b

\*Any two means having a common letter are not significantly different in the 5% level of significance

<sup>†</sup>Figures given in parentheses are values of ratio for control

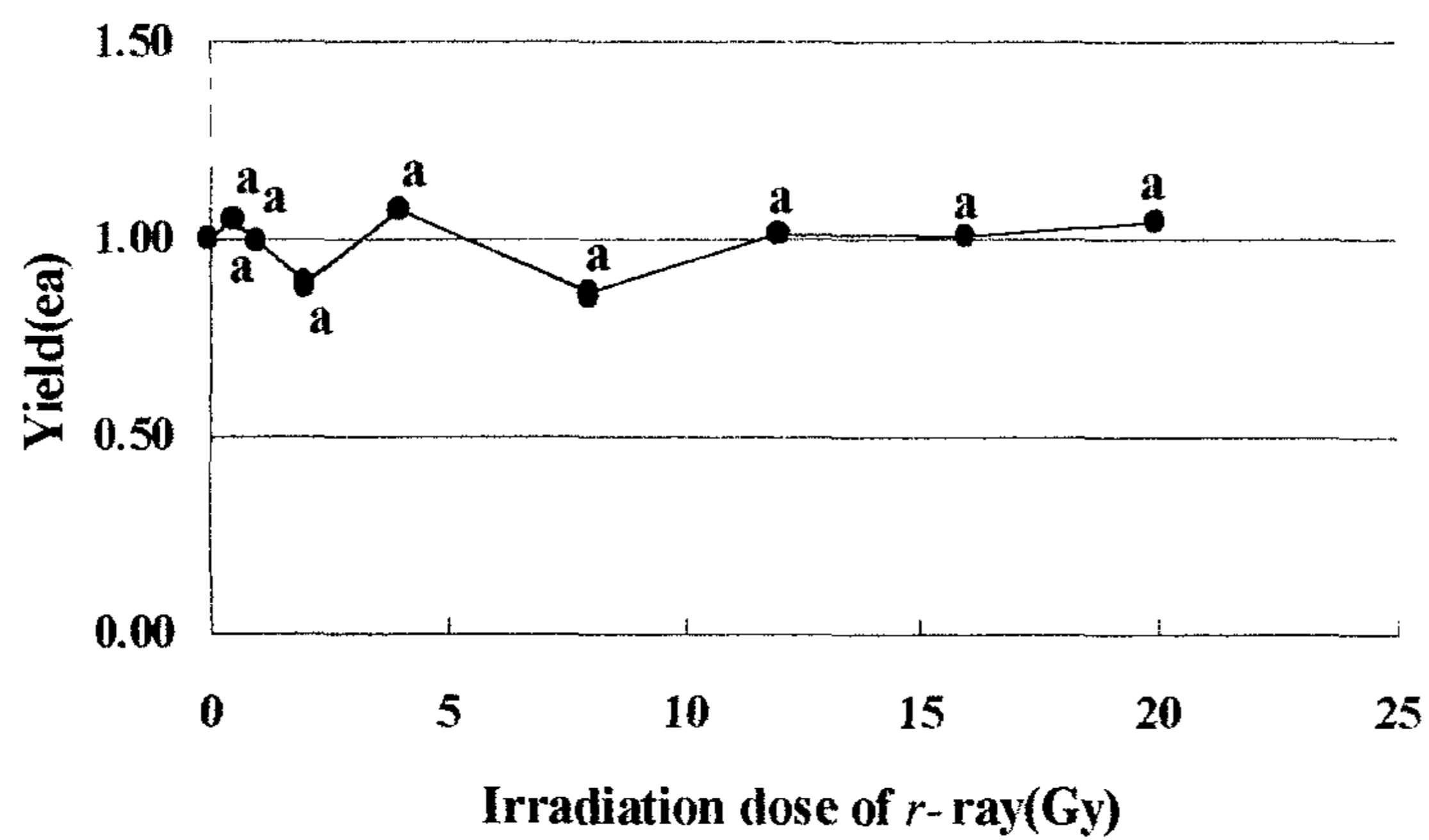
**Table 62.** Effect of gamma radiation on root growth and yield of soybean cultivars cultivated in field for whole life cycle.

Dose (Gy)	Duration of cultivation	Root growth			
		Root total length (cm)	Root surface area (cm <sup>2</sup> )	Root average diameter (mm)	Root volume (cm <sup>3</sup> )
0		448(1.00) <sup>†</sup> bcd*	98(1.00) bc	0.729(1.00) bc	1.77(1.00) c
0.5		464(1.04) abcd	102(1.04) abc	0.713(0.98) c	1.84(1.04) bc
1		431(0.96) cd	107(1.08) abc	0.803(1.10) a	2.15(1.22) a
2	middle vegetative stage	531(1.19) ab	113(1.15) ab	0.693(0.95) c	1.94(1.10) abc
4		536(1.20) a	116(1.18) a	0.701(0.96) c	2.04(1.15) ab
8		405(0.91) cd	96(0.97) c	0.767(1.05) ab	1.82(1.03) bc
12		479(1.07) abc	105(1.07) abc	0.711(0.97) c	1.85(1.05) bc
16		378(0.84) d	81(0.82) d	0.690(0.95) c	1.40(0.79) d
20		509(1.14) ab	112(1.14) ab	0.716(0.98) c	2.00(1.13) abc
0		1,203(1.00) a	332(1.00) a	0.919(1.00) ab	7.62(1.00) a
0.5		1,021(0.85) abc	281(0.84) b	0.909(0.99) abc	6.34(0.83) b
1		889(0.74) bcd	245(0.74) bc	0.986(0.97) abc	5.50(0.72) bc
2	flowering stage	836(0.70) d	241(0.72) bc	0.942(1.02) a	5.69(0.75) bc
4		1,017(0.85) abc	278(0.84) b	0.897(0.98) abc	6.26(0.82) b
8		1,099(0.91) a	278(0.84) b	0.841(0.92) c	5.77(0.76) bc
12		1,085(0.88) ab	283(0.85) ab	0.878(0.96) abc	6.19(0.81) b
16		833(0.69) cd	219(0.66) c	0.859(0.93) bc	4.70(0.62) c
20		786(0.65) d	223(0.67) c	0.983(1.02) ab	5.24(0.69) bc
0		436(1.00) ab	260(1.00) ab	2.097(1.00) ab	10.74(1.00) ab
0.5		377(0.60) c	220(0.68) b	2.302(1.09) a	9.23(0.77) ab
1		355(0.85) bc	215(0.80) b	1.853(0.89) bc	8.72(0.75) b
2	pod maturing stage	317(1.20) a	184(1.17) a	1.902(0.93) bc	12.62(1.14) a
4		306(1.06) ab	178(1.00) ab	1.879(0.90) bc	10.53(0.95) ab
8		283(0.76) bc	173(0.77) b	1.993(0.97) bc	8.65(0.78) b
12		272(0.60) c	170(0.67) b	2.234(1.05) a	8.70(0.73) b
16		234(0.79) bc	162(0.78) b	2.031(0.95) abc	8.98(0.77) ab
20		219(0.79) bc	153(0.72) b	1.822(0.87) c	7.87(0.64) b

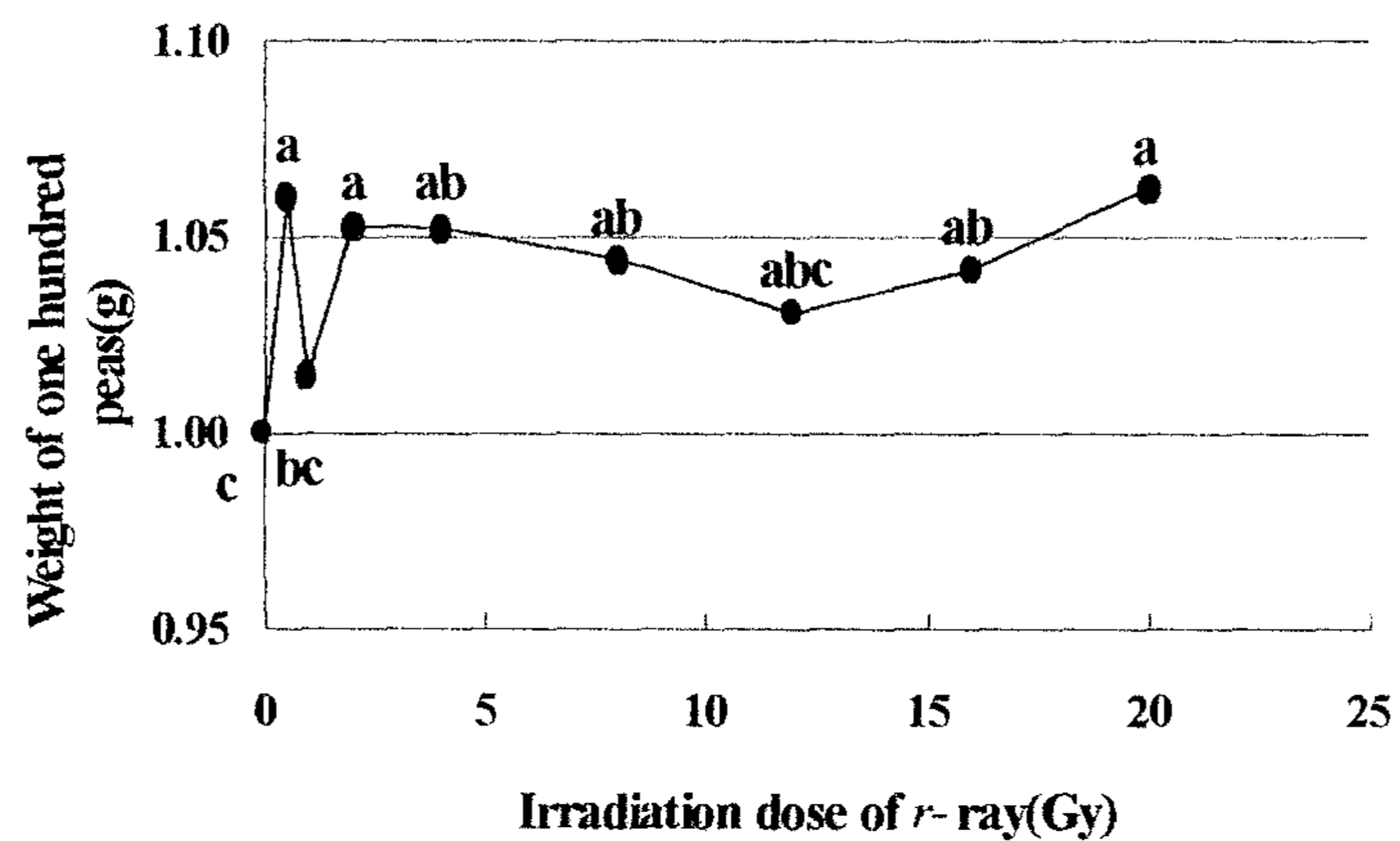
\*Any two means having a common letter are not significantly different in the 5% level of significance

<sup>†</sup>Figures given in parentheses are values of ratio for control





**Fig. 100.** The Changes of soybean cultivars yield by gamma radiation cultivated in field (Values with same letters are not significantly different at 5% level).



**Fig. 101.** The Changes of dry weight of one hundred peas by gamma radiation cultivated in field (Values with same letters are not significantly different at 5% level).

#### 바. 저선량 조사에 의한 작물의 단백질 발현 추이

저선량 조사에 의한 애기장대의 생장반응은 다음과 같다. Lensberg 생태형 애기장대에 4, 8, 그리고 200 Gy의 감마선을 조사한 결과 저선량인 8 Gy에서 발아율과, 잎의 길이 및 생중량이 각각 165, 140 및 129 % 증가하였다 (표 63). 이러한 결과는 저선량 감마선에 의한 식물의 생산성이 증가한다는 보고와 일치하는 것이다. 따라서 애기장대를 이용하여 작물에서 수행할 수 없었던 functional genomics를 수행할 수 있는 기반을 확립하였다.

저선량 조사된 애기장대 잎에서 단백질 발현 추이는 다음과 같다. 감마선 조사에 의해서 아래 그림 102에서 보는 바와 같이 여러개의 단백질 발현이 억제되었다. 현재 감마선 조사에 의해 증감되는 단백질 분석을 수행하고 있다.

저선량 감마선이 조사된 배추 잎에서 광합성 수행도와 단백질 발현의 변화는 다음과 같다. 8 Gy조사된 배추 잎에서 광합성율( $P_{max}$ )을 조사한 결과, 표 64에서와 같이 최대광합성율( $P_{max}$ )이 대조구에 비해서 148% 증가하였다. 그러나 엽록소 함량(Chl), 암호흡율(Res), 암소 및 광 조건에서 광계2의 광화학적 효율( $F_v/F_m$  및  $1-F/F_m'$ ), 광계1의 반응중심의 수( $\Delta A/A_{810}$ ), 광합성 기구의 excitation pressure( $1 - q_P$ ) 및 여기에너지의 비광화학적 소산( $q_N$ )에는 영향을 미치지 아니하였다.

또한 감마선 조사에 의해서 아래 그림에서와 같이 발현이 촉진되거나 억제되는 여러 단백질군을 확인할 수 있었다. 현재 이들을 동정하고 있다(그림 103, 104, 105, 106).

**Table 63.** Effects of various gamma radiation on the development of *Arabidopsis* seedlings

	<u>Doses (Gy)</u>			
	0	4	8	200
Germination (%)	46	62	76	62
Leaf length (cm)	1.5 ± 0.16	2.0 ± 0.2	2.1 ± 0.1	1.9 ± 0.2
Leaf weight (mgFW/leaf)	16.7±2.4	20.1±3.5	21.6 ± 1.3	20.1 ± 2.6

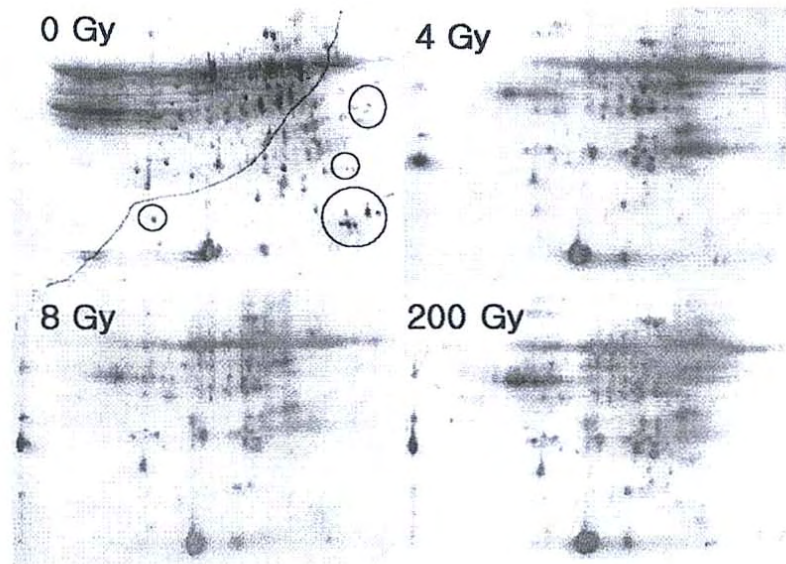


Fig. 102. Effects of various gamma radiation on the protein expression of *Arabidopsis* leaves.

**Table 64.** Effects of low dose gamma radiation (8 Gy) on the photosynthesis of Chinese cabbage leaves

Treatment	Res ( $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	Pmax ( $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	Chl ( $\text{mgm}^{-2}$ )	PSII		$\Delta\text{A}/\text{A}810$	1-qP	qN
				Fv/Fm	1-F/Fm'			
Control	-2.84±0.29	4.14±0.62	4.68±0.10	0.78±0.03	0.08±0.01	1.05±0.08	0.88±0.01	0.44±0.02
Radiation (8 Gy)	-2.83±0.12	6.11±0.35	5.09±0.18	0.78±0.08	0.09±0.01	1.02±0.04	0.09±0.01	0.40±0.03

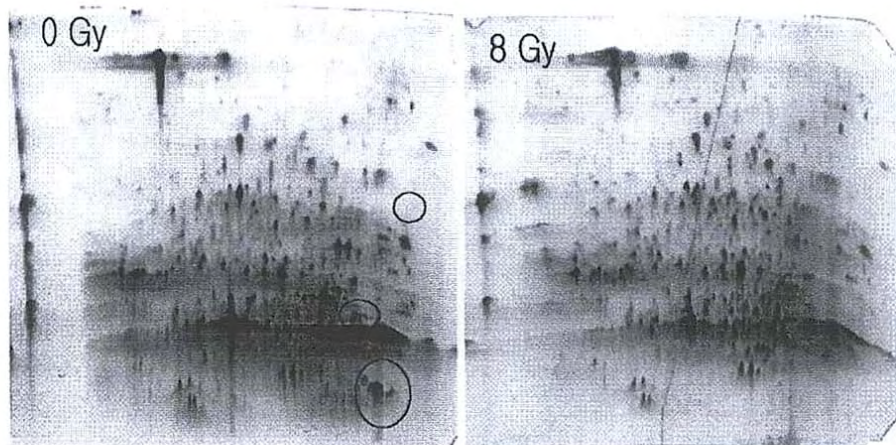
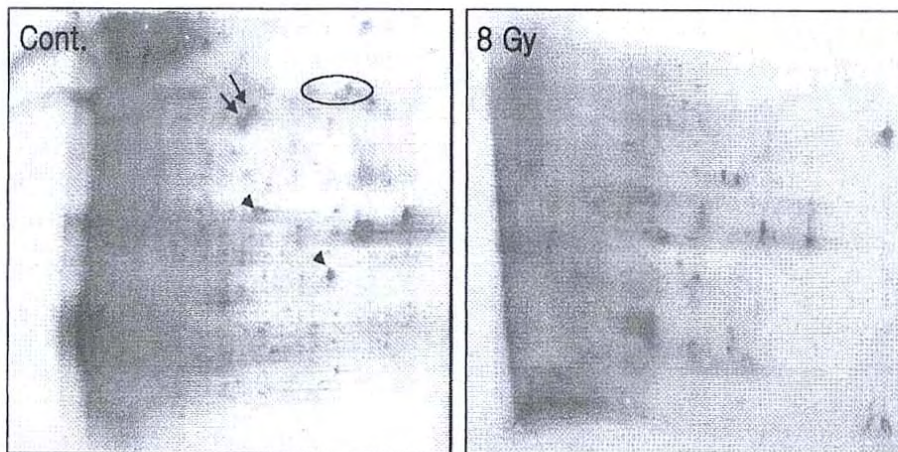


Fig. 103. Effects of various gamma radiation on the protein expression of Chinese cabbage leaves.



**Fig. 104.** Effects of various gamma radiation on the protein expression of pumpkin leaves.



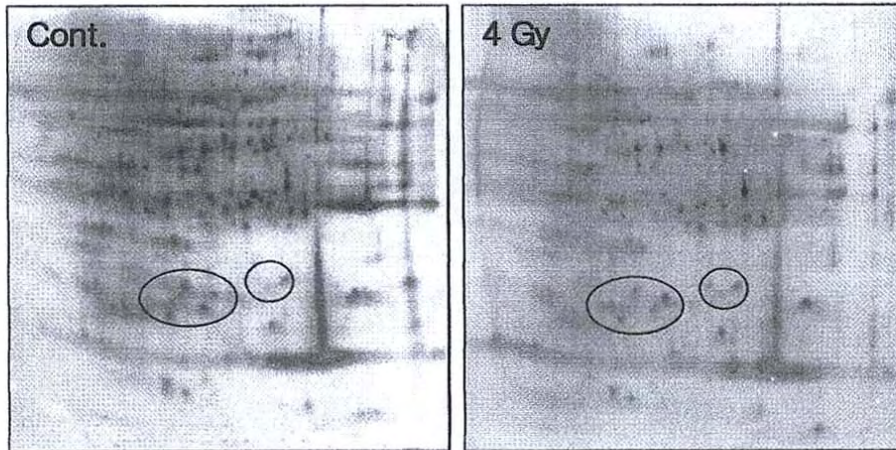


Fig. 105. Effects of various gamma radiation on the protein expression of gourd leaves.

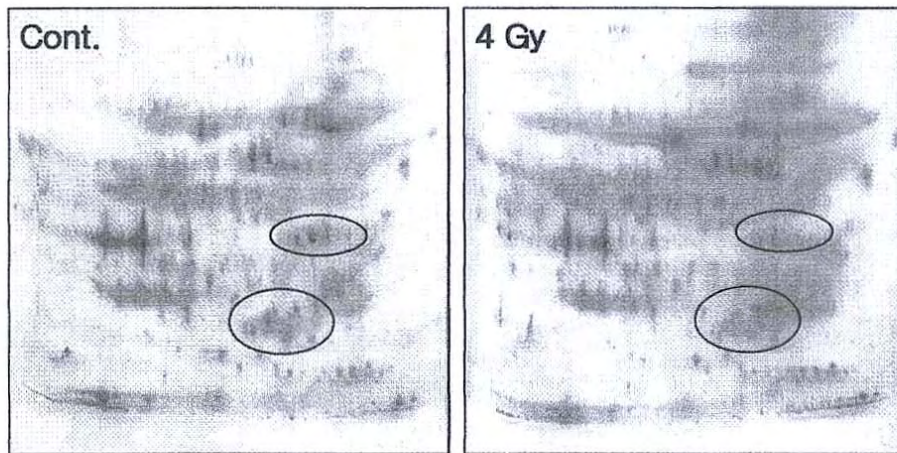


Fig. 106. Effects of various gamma radiation on the protein expression of soybean leaves.

## 9. 저선량 조사가 작물의 스트레스 경감 효과에 미치는 효과

### 가. 저선량 조사가 작물의 방사선 감수성에 미치는 영향

#### (1) 대두

저선량으로 조사한 종자로부터 생육한 대두 작물체의 후속고선량에 대한 방사선 감수성 변화를 알아보려고 저선량 조사하여 파종한 후 15일째에 대두 유식물체에 감마선 50, 100, 200 Gy을 조사하고 45일 후에 생육상황을 관찰하였다. 초장의 경우는 그림 107에서 보는바와 같이 50 Gy를 조사한 경우 대조구의 41.3 cm에 비해 저선량 조사구 모두가 양호한 생육으로 저선량 조사에 의한 후속고선량에 대한 저항성을 보였고 20 Gy 조사구가 43.5 cm로 5% 정도 증가하였으나 통계적으로 유의성은 없었다. 100 Gy 조사구에서는 8 Gy 조사구가 23.7 cm로 8% 정도로 증가하였으나 나머지 저선량 조사구에서는 대조구 21.8 cm와 비슷하거나 낮은 초장을 보여 다른 고선량 조사구와는 차이를 보였다. 200 Gy 조사구에서는 대조구 20.7 cm에 비해 저선량 조사구 모두가 높은 초장을 보였고 8 Gy 조사구가 25.5 cm로 23%의 통계적으로 고도의 유의성있는 ( $p < 0.001$ ) 증가효과를 보였다. 다음이 20 Gy와 4 Gy 조사구로 각각 23.8 cm와 22.8 cm의 초장으로 통계적으로 유의성있게 각각 15% ( $p < 0.01$ )와 10% ( $p < 0.05$ )의 증가효과를 나타내었다. 생체중(그림 108)에서도 초장과 비슷한 경향을 보였으며 50 Gy 조사구에서는 8 Gy 조사구가 16.7 g으로 대조구 14.7 g에 비해 14% 정도 증가하였으나 유의성은 없었다. 100 Gy 조사구에서도 4 Gy와 20 Gy 조사구가 5.5 g으로 대조구 4.7 g에 비해 17% 정도 증가하였으나 유의성은 없었고 12 Gy 조사구는 4.5 g으로 대조구보다 4% 정도 감소하였다. 200 Gy 조사구에서는 저선량 조사에 의해 후속고선량에 대한 뚜렷한 저항성을 보였는데 8 Gy 와 20 Gy 조사구가 6.1 g으로 대조구 3.9 g에 비해 50% 이상 높은 통계적 유의성있는( $p < 0.01$ ) 증가효과를 보였다. 다음이 4 Gy와 12 Gy 조사구에서도 각각 5.5 g과 4.6 g으로 통계적으로 유의성있는 41%( $p < 0.05$ )와 18%( $p < 0.05$ )의 증가를 보였다. 본 실험의 결과로 볼 때 저선량 조사가 대두 유식물체의 후속고선량에 대한 방사선 내성을 증가시키며 적정 저선량은 8 Gy 정도인 것으로 나타났다.

그림 109은 대두 식물체의 엽록소 함량을 보여주는 것인데 고선량 방사선 조사에 의한 생육장해로 함량이 다소 낮아지는 경향을 보였다. 고선량 조사 않은 대조구 식물체에서는 생육경향과는 다르게 20 Gy의 31.0 mg을 제외하고는 저선량 조사구 모두가 대조구의 27.9 mg 보다 낮은 함량을 보였다. 고

선량 50 Gy 조사구에서는 저선량 조사구 모두가 대조구 16.8 mg보다 높은 함량을 보였는데 12 Gy 조사구가 25.5 mg으로 50% 정도 높은 유의성있는 ( $p < 0.01$ ) 증가를 보였고 다음이 8 Gy 조사구의 21.8 mg으로 30% 정도 유의성있게 ( $p < 0.05$ ) 증가하였다. 100 Gy 조사구에서는 생육이 불량하였는데 엽록소 함량에서도 비슷한 경향을 보였으며 4 Gy 조사구가 19.0 mg으로 대조구 15.8 mg보다 20% 정도 증가하였으나 다른 저선량 조사구에서는 대조구와 비슷하거나 크게 감소하였다. 200 Gy 조사구에서는 저선량 조사구 모두가 대조구 11.1 mg보다 매우 높은 함량을 보였는데 12 Gy와 8 Gy 조사구는 각각 19.1 mg과 18.3 mg으로 대조구보다 각각 72%와 65% 증가하여 통계적으로 높은 유의성 ( $p < 0.01$ )을 나타냈다. 이상의 결과로 볼 때 저선량 방사선 조사에 의해 후속고선량에 대한 방사선 저항성이 증가한 것으로 나타났다. 저선량 조사한 식물의 후속고선량 저항성에 관한 보고가 많지는 않으나 Luckey<sup>3)</sup>와 김과 이<sup>61)</sup>는 저선량 조사한 종자에서 생육한 식물체는 영양, 생리대사 활성화로 병 저항성과 한발 내성 및 후속고선량에 대한 저항성이 증가한다고 하였으며 김 등<sup>102)</sup>이 저선량 조사한 토마토 식물체의 초장과 생체중이 후속고선량에 대하여 저선량 무조사구에 비하여 양호하였으며 품종에 따라 다르다고 하였다. 저자가 수행한 몇 가지 실험결과에서도 저선량 조사에 대해 고추 역병 저항성<sup>103)</sup>과 대두의 산성비 장해에 대한 피해 경감효과<sup>104)</sup> 등을 확인할 수 있었다.

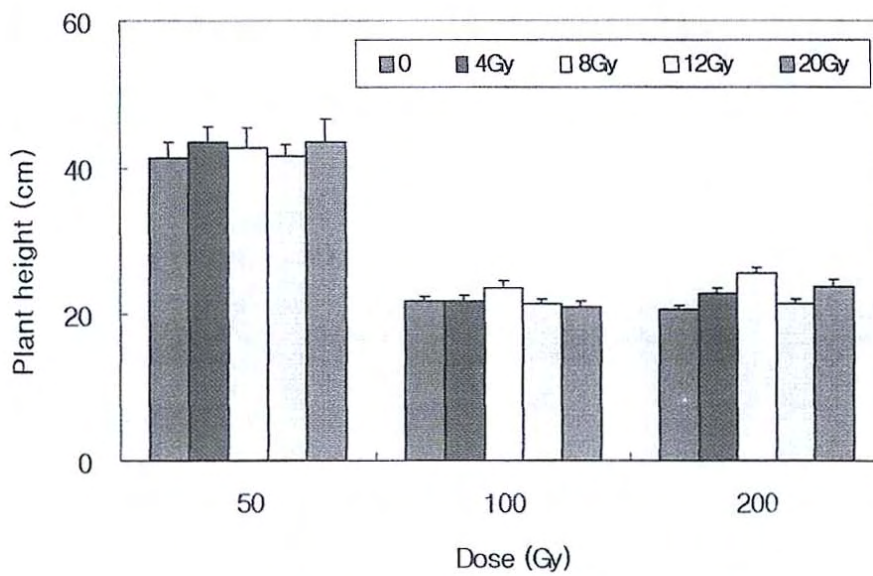


Fig. 107. Effects of subsequent high dose radiation on the plant height of soybean grown from seed irradiated with low dose of gamma radiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors.

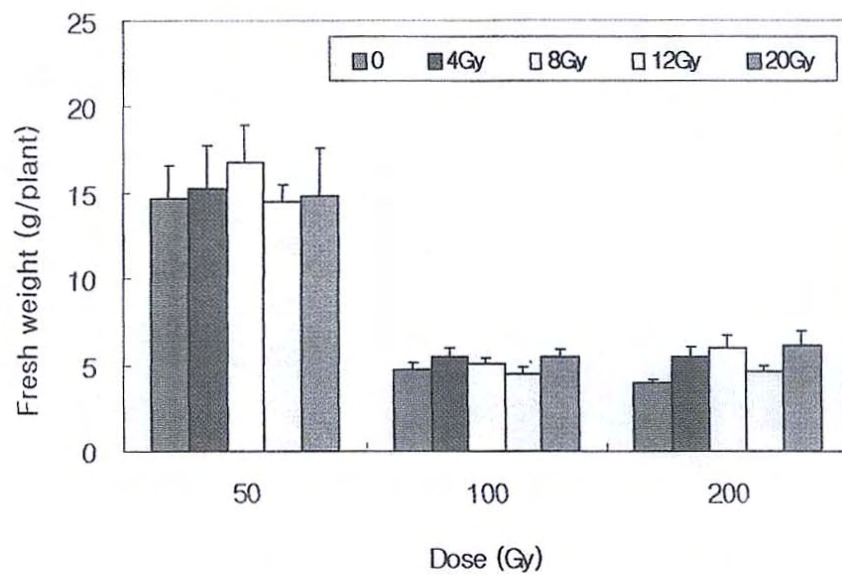


Fig. 108. Effects of subsequent high dose radiation on the fresh weight of soybean grown from seed irradiated with low dose of gamma radiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors.

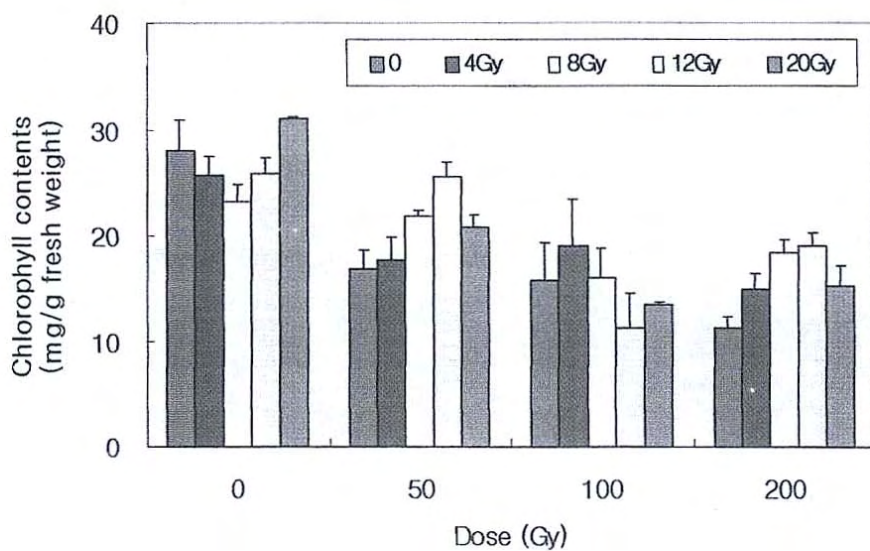


Fig. 109. Effects of subsequent high dose radiation on the chlorophyll contents of soybean grown from seed irradiated with low dose of gamma radiation. Bars represent means  $\pm$  standard errors.

## (2) 고추의 초기 생육과 후속 고선량

저선량 조사한 종자로부터 생육한 고추 식물체의 후속고선량에 대한 내성 변화를 알아보려고 저선량 조사하여 파종한 후 22일째에 고추 유식물체에 감마선 50 Gy와 100 Gy를 조사하고 생육시기별로 1차(50 Gy 조사구 ; 조사 21일 후, 100 Gy 조사구 ; 조사 16일 후)와 2차(50 Gy 조사구 ; 조사 28일 후, 100 Gy 조사구 ; 조사 23일 후)에 걸쳐 내성변화를 관찰하였다. 1차 초장 관찰에서 조광고추는 후속고선량 조사시 저선량 방사선 전조사에 의한 내성효과를 보이지 않았으나(그림 110), 조홍고추의 경우는 후속 50 Gy 조사에서 대조구 27.5 cm에 비해 8 Gy와 20 Gy 조사구에서 각각 29.0 cm( $p<0.01$ )와 28.8 cm( $p<0.05$ )로 5% 정도, 후속 100 Gy 조사에서는 대조구 20.5 cm에 비해 모든 저선량 조사구에서 11~17% 정도 생육장애에 대한 억제 를 보여 유의성있는 내성효과를 나타냈는데 특히 후속 100 Gy 조사의 4 Gy 조사구에서 24.0 cm( $p<0.001$ )로 가장 높은 내성효과를 보였다(그림 111).

1차 생육 관찰 7일 후인 2차 생육 관찰 시에도 조광고추는 별다른 내성효과를 보이지 않았으나(그림 112), 조홍고추의 경우는 후속 50 Gy 조사의 초장이 대조구 30.3 cm에 비해 4, 8, 20 Gy 조사구에서 각각 31.6 cm( $p<0.05$ ), 32.0 cm( $p<0.01$ ), 32.4 cm( $p<0.01$ )로 4~7% 정도, 후속 100 Gy 조사시엔 모든 저선량 조사구가 대조구 20.8 cm에 비해 22.9~24.2 cm( $p<0.001$ )로 10~16% 정도 생육장애가 낮게 나타나 고도의 유의성 있는 내성효과를 보였다(그림 113).

생체중의 경우 조광고추는 후속 50 Gy와 100 Gy 조사 시 사전 8 Gy 조사구에서 5~7% 정도 생육장애가 낮게 나타났으며(그림 114), 조홍고추의 경우는 후속 50 Gy 조사의 모든 저선량 조사구가 대조구 5.9 g에 비해 12~25% 정도 생육에 대한 장애억제 효과를 보였는데 특히 20 Gy 조사구에서 7.4 g( $p<0.01$ )으로 가장 높았고, 100 Gy 조사에서도 모든 저선량 조사구가 대조구 3.3 g에 비해 3.9~4.5 g으로 21~38% 정도 생육장애 억제효과를 보여 고도의 유의성 있는 내성효과를 확인할 수 있었다(그림 115).



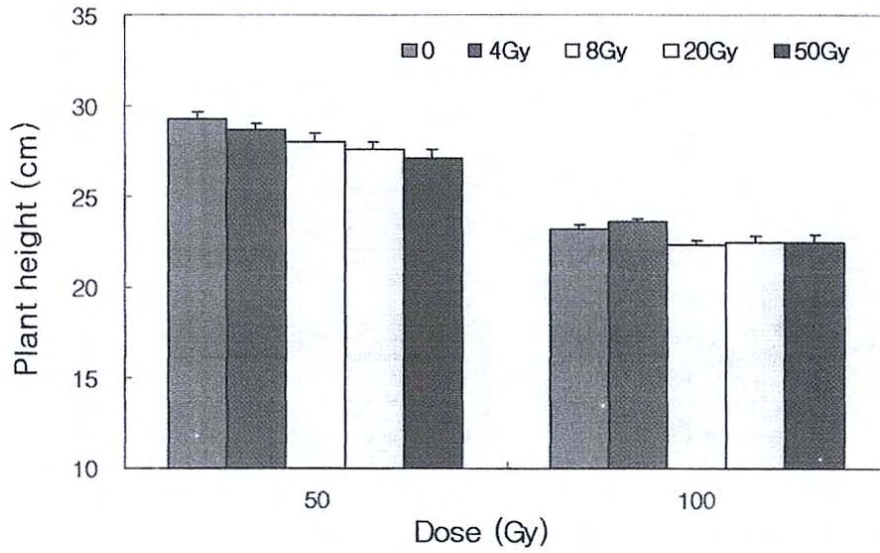


Fig. 110. Effects of subsequent high dose radiation on the plant height of pepper grown from seed(cv. Jokwang) irradiated with low dose of gamma radiation. Mean  $\pm$  SE. This is the first measurement.

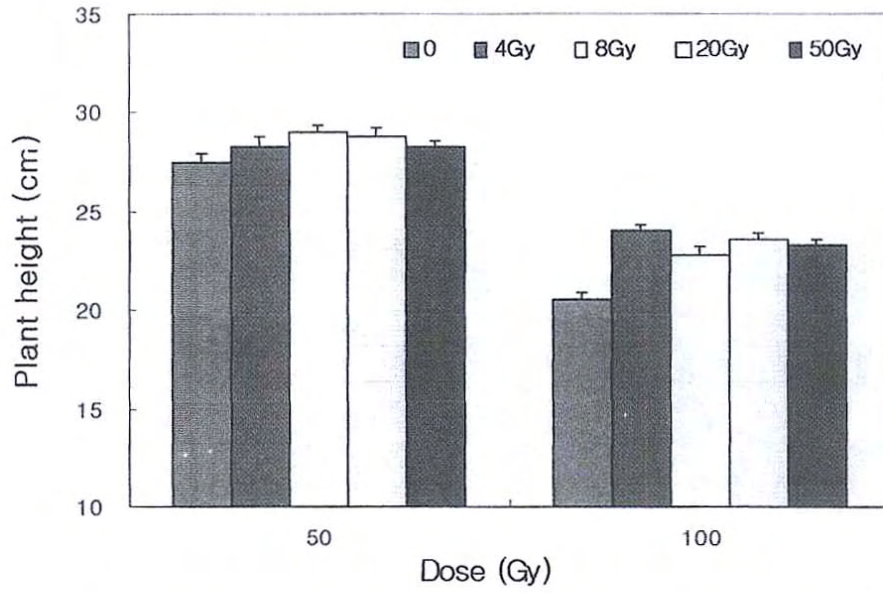


Fig. 111. Effects of subsequent high dose radiation on the plant height of pepper grown from seed(cv. Johong) irradiated with low dose of gamma radiation. Mean  $\pm$  SE. This is the first measurement.

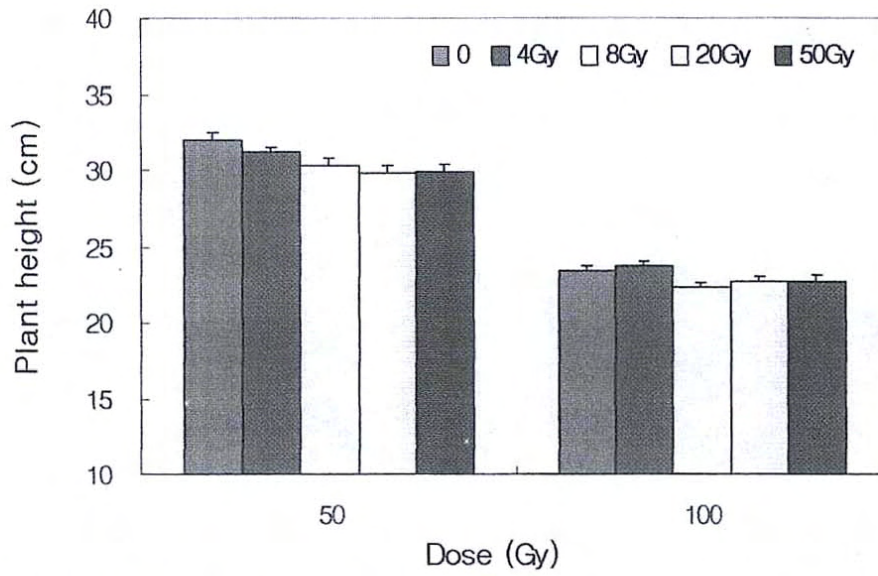


Fig. 112. Effects of subsequent high dose radiation on the plant height of pepper grown from seed(cv. Jokwang) irradiated with low dose of gamma radiation. Mean $\pm$ SE. This is the second measurement.

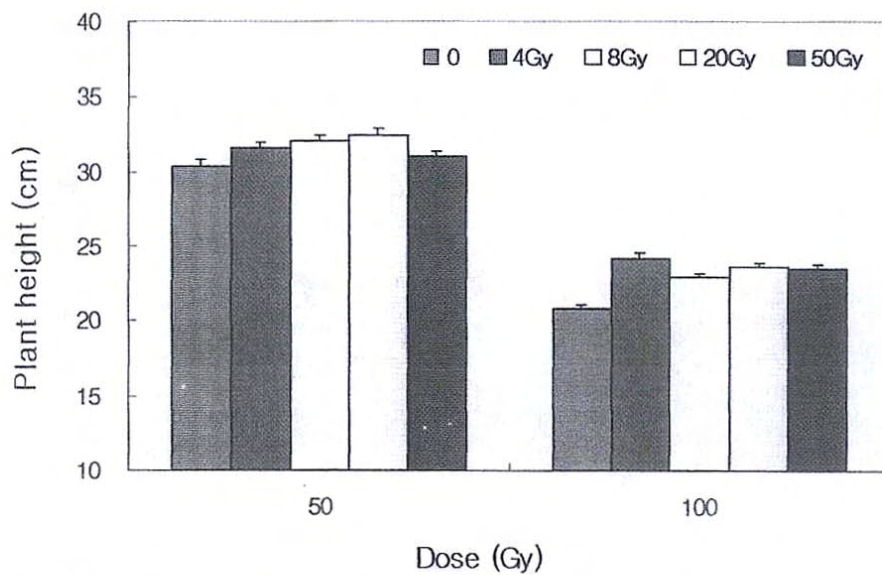
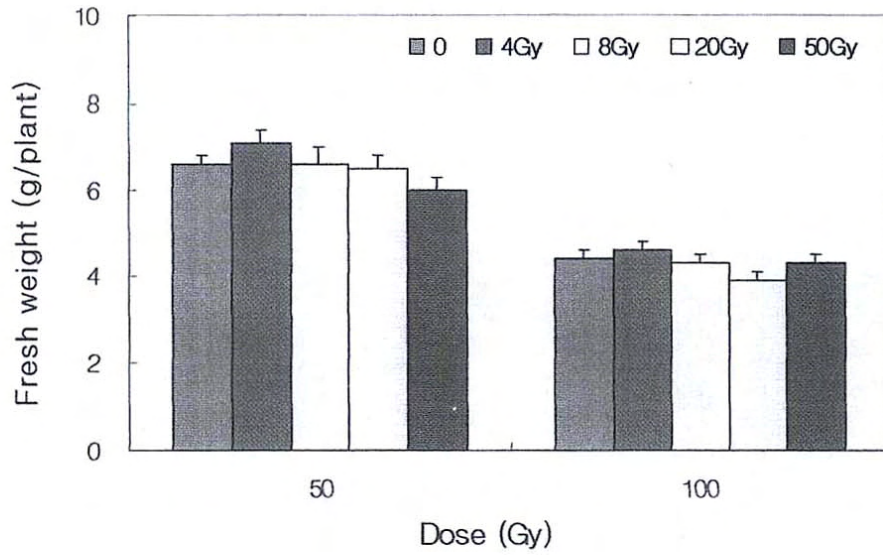


Fig. 113. Effects of subsequent high dose radiation on the plant height of pepper grown from seed(cv. Johong) irradiated with low dose of gamma radiation. Mean $\pm$ SE. This is the second measurement.



**Fig. 114.** Effects of subsequent high dose radiation on the fresh weight of pepper grown from seed(cv. Jokwang) irradiated with low dose of gamma radiation. Mean  $\pm$  SE.

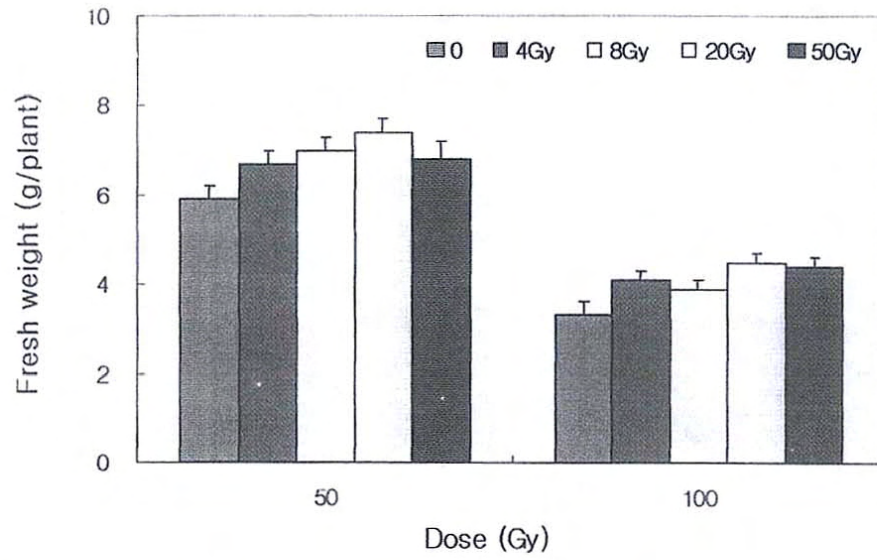


Fig. 115. Effects of subsequent high dose radiation on the fresh weight of pepper grown from seed (cv. Johong) irradiated with low dose of gamma radiation. Mean  $\pm$  SE.

1차 생육관찰 시 측정된 엽록소 함량에서 조광고추는 별다른 효과가 없었으나(표 65), 조홍고추의 경우는 후속 50 Gy와 100 Gy 조사의 엽록소 a, 엽록소 b, carotenoid 함량이 모든 저선량 조사구에서 대조구에 비해 높게 나타났는데, 특히 후속 100 Gy 조사시 생육에 대한 장애 억제효과를 보인 4 Gy 조사구에서 엽록소 a는 대조구 0.48 mg에 비해 0.65 mg( $p<0.01$ ), 엽록소 b는 대조구 0.16 mg에 비해 0.21 mg( $p<0.05$ ), carotenoid 함량은 대조구 0.14 mg에 비해 0.19 mg( $p<0.01$ )으로 33~39% 정도 높아 유의성있는 내성효과를 보였다(표 66).

1차 생육관찰 시 측정된 단백질과 효소 활성은, 조광고추는 고선량 조사하지 않은 식물체에서 모든 저선량 조사구가 대조구에 비해 다소 높은 값을 보였으나 생육과는 어떠한 경향을 보이진 않았고(그림 116), 조홍고추의 경우는 후속 50 Gy 조사에서 대조구에 비해 대체로 높은 값을 보였는데 특히 생육에 대한 장애 억제효과를 보인 8 Gy 조사구에서 단백질함량은 대조구 8.66 mg/g에 비해 11.59 mg/g( $p<0.05$ ), CAT 활성은 대조구 1.20 unit에 비해 3.66 unit( $p<0.01$ )로 가장 높은 값을 보여 후속고선량 조사시 저선량 방사선조사에 의한 내성효과를 확인할 수 있었다(그림 117). Luckey<sup>3)</sup>와 김과 이<sup>61)</sup>는 저선량 조사한 종자에서 생육한 식물체는 영양, 생리대사 활성화로 병 저항성과 한발 내성 및 후속고선량에 대한 내성이 증가한다고 하였다. 또한 김 등<sup>102)</sup>은 저선량 조사하여 생육한 토마토 유식물체는 후속고선량에 피폭 시 저선량 무조사구에 비하여 생장이 양호하였으나 그 효과는 품종에 따라 다르다고 하였고, 대두 유식물체의 경우는 저선량 조사에 의한 후속고선량 내성 증가가 8 Gy와 20 Gy 조사구에서 효과적이었다고 보고하였다. 저자들이 수행한 몇 가지 실험결과에서도 저선량 조사에 의해 대두의 산성비 장애에 대한 피해 경감효과<sup>104)</sup>와 고추 역병 저항성<sup>103)</sup>등을 확인할 수 있었다.

**Table 65.** Effects of subsequent high dose radiation on the pigment contents of pepper, Jokwang cultivar, grown from seed irradiated with low dose of gamma radiation

Dose (Gy)	0 <sup>a</sup>			50 Gy <sup>a</sup>			100 Gy <sup>a</sup>		
	Chl. A	Chl. B	Carotenoid	Chl. A	Chl. B	Carotenoid	Chl. A	Chl. B	Carotenoid
	(mg/g fresh weight)			(mg/g fresh weight)			(mg/g fresh weight)		
0	0.80±0.01	0.27±0.01	0.22±0.00	0.65±0.14	0.20±0.01	0.19±0.03	0.48±0.00	0.16±0.01	0.14±0.00
4	0.78±0.09	0.27±0.04	0.22±0.03	0.81±0.03	0.24±0.01	0.23±0.00	0.65±0.01*	0.21±0.02'	0.19±0.00*
8	0.83±0.04	0.28±0.02	0.23±0.01	0.69±0.05	0.22±0.03	0.19±0.01	0.60±0.00*	0.20±0.01*	0.18±0.00*
20	0.71±0.02	0.22±0.01	0.20±0.01	0.71±0.01	0.22±0.01	0.20±0.00	0.57±0.04	0.19±0.02	0.17±0.01
50	0.78±0.03	0.25±0.00	0.20±0.04	0.73±0.05	0.23±0.01	0.21±0.02	0.51±0.07	0.17±0.01	0.15±0.02

a : Subsequent high dose.



**Table 66.** Effects of subsequent high dose radiation on the pigment contents of pepper, Johong cultivar, grown from seed irradiated with low dose of gamma radiation

Dose (Gy)	0 <sup>a</sup>			50 Gy <sup>a</sup>			100 Gy <sup>a</sup>		
	Chl. A (mg/g fresh weight)	Chl. B (mg/g fresh weight)	Carotenoid (mg/g fresh weight)	Chl. A (mg/g fresh weight)	Chl. B (mg/g fresh weight)	Carotenoid (mg/g fresh weight)	Chl. A (mg/g fresh weight)	Chl. B (mg/g fresh weight)	Carotenoid (mg/g fresh weight)
0	0.81±0.05	0.29±0.02	0.22±0.01	0.74±0.03	0.26±0.01	0.21±0.01	0.51±0.07	0.18±0.03	0.15±0.02
4	0.79±0.07	0.28±0.03	0.22±0.02	0.74±0.09	0.27±0.06	0.21±0.03	0.50±0.07	0.18±0.02	0.15±0.02
8	0.86±0.08	0.39±0.09	0.21±0.01	0.75±0.03	0.26±0.02	0.21±0.01	0.55±0.16	0.19±0.05	0.16±0.05
20	0.77±0.10	0.28±0.04	0.21±0.03	0.76±0.08	0.30±0.07	0.21±0.02	0.49±0.03	0.17±0.01	0.14±0.02
50	0.76±0.03	0.26±0.01	0.22±0.01	0.60±0.03	0.21±0.01	0.13±0.04	0.61±0.08	0.21±0.02	0.18±0.02

a : Subsequent high dose.

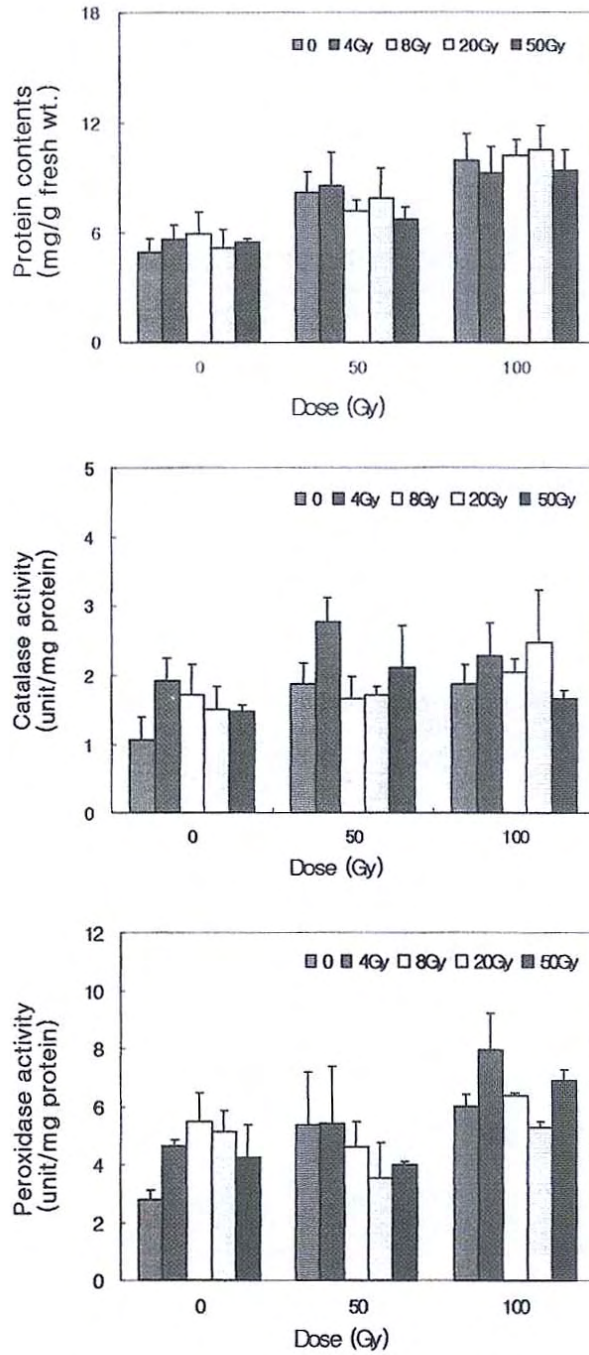


Fig. 116. Effects of subsequent high dose radiation on the enzyme activity of pepper, Jokwang cultivar, grown from seed irradiated with low dose of gamma radiation. Mean $\pm$ SE.

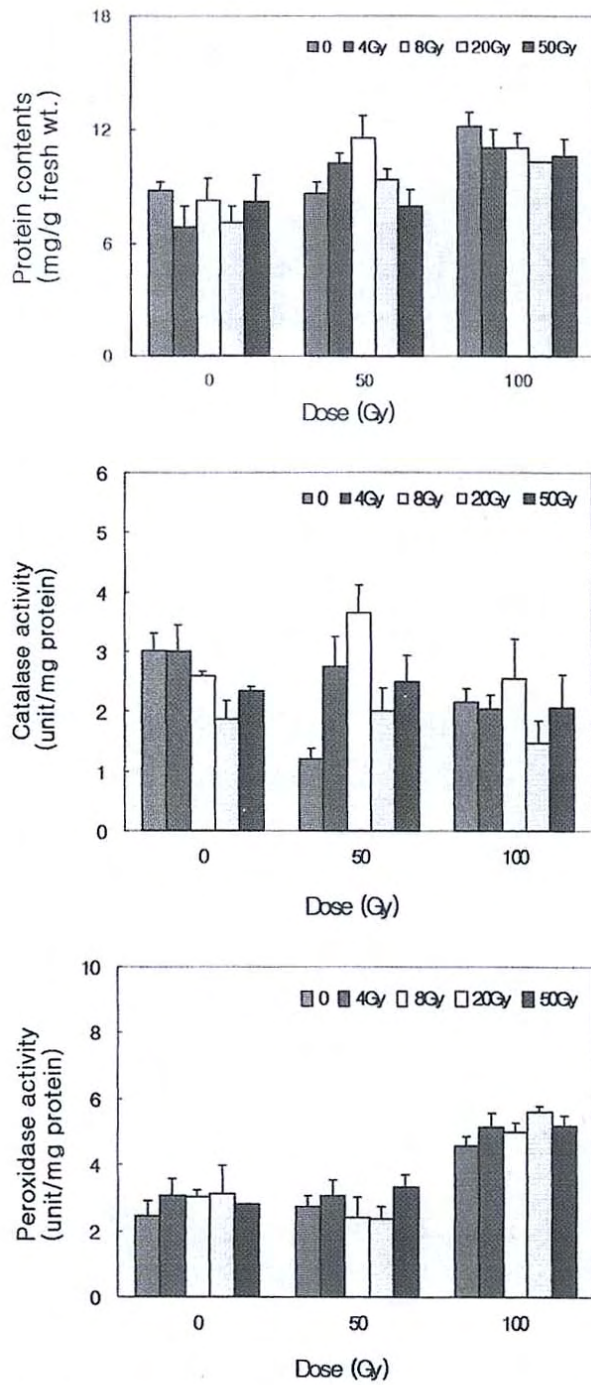


Fig. 117. Effects of subsequent high dose radiation on the enzyme activity of pepper, Johong cultivar, grown from seed irradiated with low dose of gamma radiation. Mean $\pm$ SE.

## 나. 방사선에 의한 작물의 광 스트레스 경감 효과

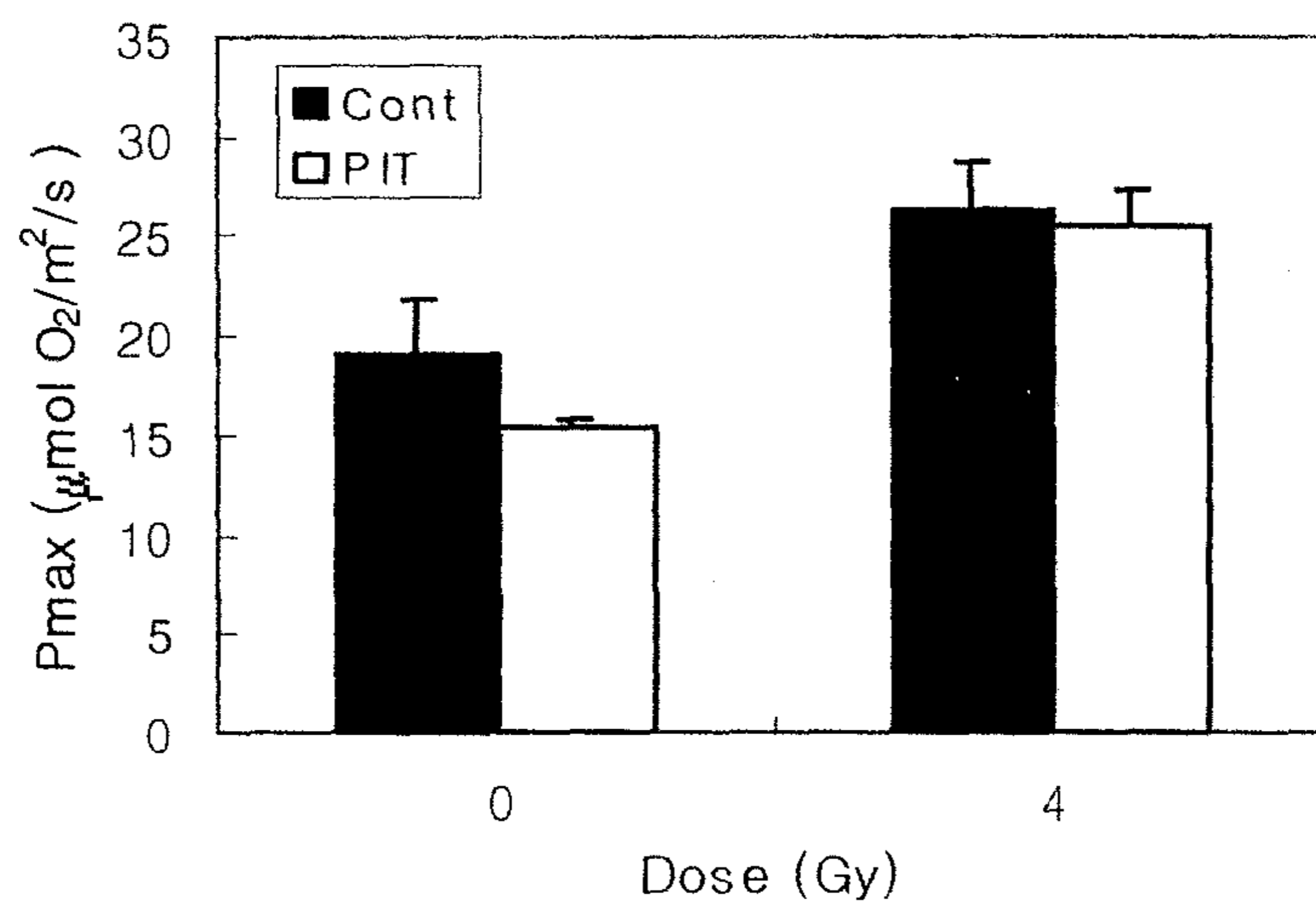
### (1) 고추

광저해에 따른 산소발생의 변화는 다음과 같다. 광 스트레스에 대한 저선량 감마선이 조사된 고추의 반응 변화를 알아보기 위하여 대조구와 저선량 감마선이 조사된 고추에서  $P_{max}$ 를 조사하였다. 그림 118 에서 보는 바와 같이 대조구와 4 Gy의 감마선이 조사된 고추의 산소 발생을 조사한 결과 대조구는  $18.9 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  이었고 4 Gy 조사구에서는  $26.3 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  였다. 다음으로  $900 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  에서 4시간 동안 광저해를 유도했을 때 대조구의 경우 산소 발생이  $15.4 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  으로 20%정도 감소되는 반면, 4 Gy 조사구는  $25.5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 광 스트레스에 의해 3% 정도의 감소를 보였다(그림 118). Grisenko 과 Mazhara<sup>105)</sup> 등은 옥수수에 저선량을 조사한 후 감염에 대한 저항력이 증대된 것을 관찰하였고, 콩과 식물에서 한발에 대한 저항성 증가도 보고하였다. 본 실험의 결과를 통해 저선량 감마선 조사가 고추의 광 스트레스에 대한 저해를 감소시키는 것을 알 수 있었다.

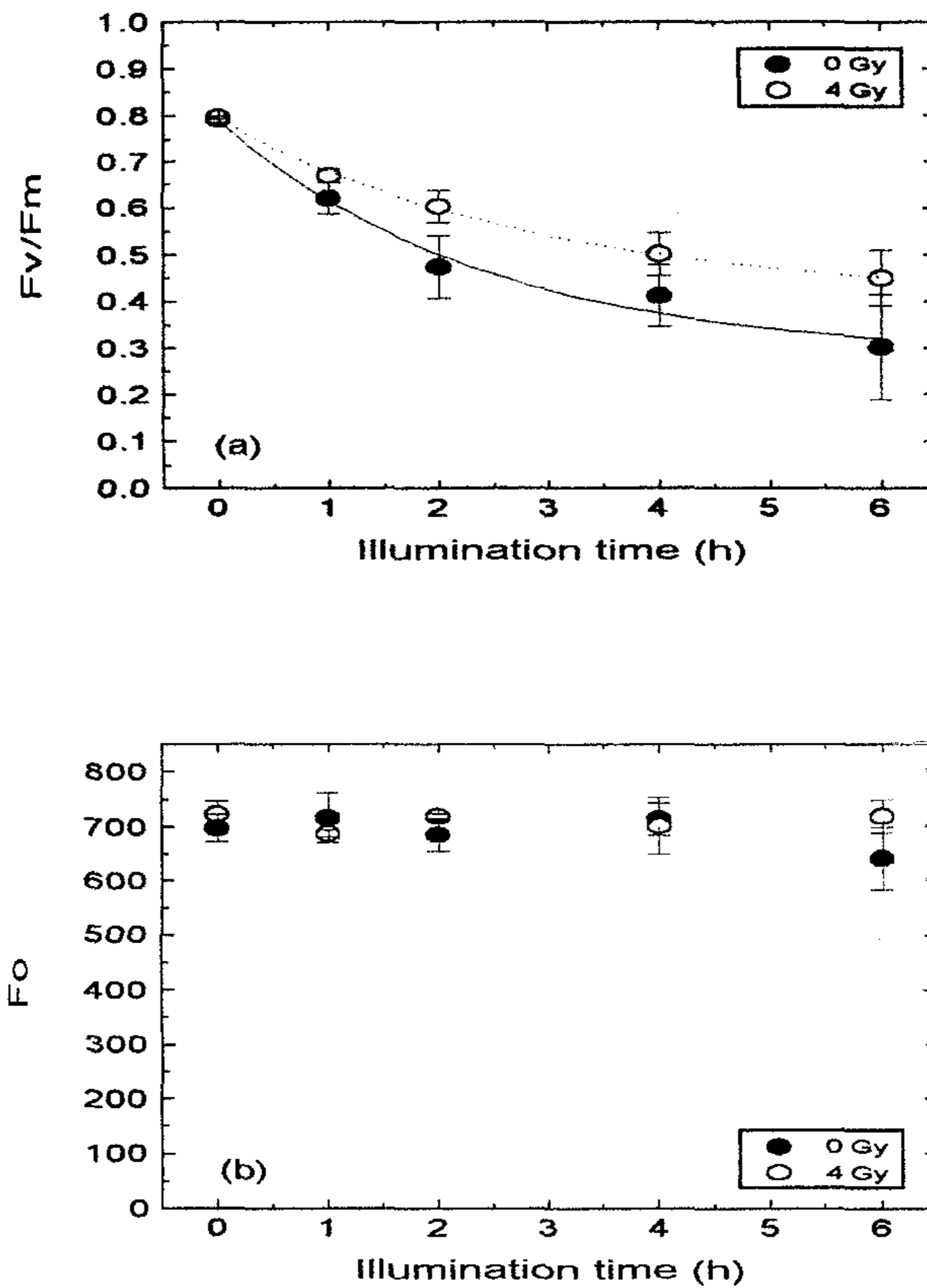
광저해에 따른 형광 파라미터의 변화는 다음과 같다. 엽록소 형광과 광합성 메카니즘 사이의 관계는 1931년 Kautsky가 암적응된 잎에 빛이 조사될 경우에 독특한 양상으로 형광이 방출된다는 것을 밝힘으로써 연구되기 시작한 이후 광합성의 생물 물리학적 측면을 측정하는데 편리하게 사용되어져 왔다<sup>97,106,107)</sup>. 일반적으로  $F_0$ 와  $F_v/F_m$ 은 광계 II의 활성을 나타내주는 지표로 환경 스트레스에 대한 식물의 반응 양상을 측정하는데 널리 사용되고 있다. 그림 119a 에서 보는 바와 같이 광저해가 진행됨에 따라  $F_v/F_m$ 이 감소되는 경향을 보이며 대조구의 경우  $900 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광량을 4시간 조사하였을 때  $F_v/F_m$ 의 값이 0.4 정도로 50%의 감소를 볼 수 있었다. 반면 4 Gy 조사구의 경우  $F_v/F_m$ 값이 대략 0.5 정도로 대조구에 비해 광 스트레스에 대해 덜 민감한 것으로 나타났다(그림 119a). 한편,  $F_0$ 는 광저해가 진행됨에 따라 거의 변화가 없었으며 또한 대조구나 4 Gy 조사구간의 차이도 없는 것으로 나타났다(그림 119b). 틸라코이드 막을 가로 질러 형성되는  $\Delta\text{pH}$ 와 밀접한 관련이 있는 비광화학적 소멸인 NPQ는 광저해가 진행됨에 따라 감소되는 경향을 보이며  $900 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광량에서 4시간을 처리했을 때 60%정도 감소하였고(그림 120), 대조구와 4 Gy의 감마선이 조사된 고추사이에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 감소되는 NPQ는 광저해에 의해 ATPase가 영향을 받아  $\Delta\text{pH}$ 의 형성을 저하시키는 것으로 보고된 바 있다<sup>108)</sup>.

광저해에 따른 광계II의 광양자 수율과 여기 포획률의 변화는 다음과 같

다. 광계II의 광양자 수율을 나타내주는  $\Phi_{PSII}$ 는 대조구의 경우  $900 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광량을 4시간 처리했을 때 대략 43% 감소한 반면 4 Gy 조사구의 경우 28% 정도 감소되는 것으로 나타났다(그림 121a). 이러한 결과를 통해 저선량 감마선 조사가 광계II로부터 광계I로의 전자전달 감소를 억제하는 것을 알 수 있었다. 광계II 반응중심에 의한 여기 포획률을 나타내주는 엽록소 형광 파라미터  $1/F_0-1/F_m$ 는 기능성 광계II(functional PSII after light treatment)의 수와 상관 관계가 있는 것으로 나타나 상대적으로 측정하는데 시간이 걸리는 기능성 광계II의 수를 대신하여 사용되어지고 있다<sup>109)</sup>.  $1/F_0-1/F_m$  또한 광저해가 진행됨에 따라 감소되었으며  $900 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광량을 4시간을 처리했을 경우 대조구의 경우 광계II의 수가 48%정도 감소한 반면, 4 Gy 조사구는 30% 감소되는 것으로 나타났다(그림 121b). 따라서 이 두 파라미터를 통해 4 Gy의 감마선이 조사된 고추의 경우 대조구에 비해 광 스트레스에 대해 덜 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.



**Fig. 118.** Changes in the maximal photosynthetic O<sub>2</sub> evolution (P<sub>max</sub>) in pepper leaf discs with PIT or without PIT(Cont). Pepper leaf discs were exposed to 900 μ mol/m<sup>2</sup>/s for 4 hrs at 25°C. Data presented are mean values ±S.E. for 3 measurements. PIT represents photoinhibition.



**Fig. 119.** Changes in the maximal photochemical efficiency of PSII ( $F_v/F_m$ ) as a function of illumination time(a). Changes in dark-level fluorescence yield,  $F_0$  as a function of illumination time(b). Pepper leaf discs were exposed to  $900 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  at  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . ●, Control ; ○, 4 Gy irradiation.

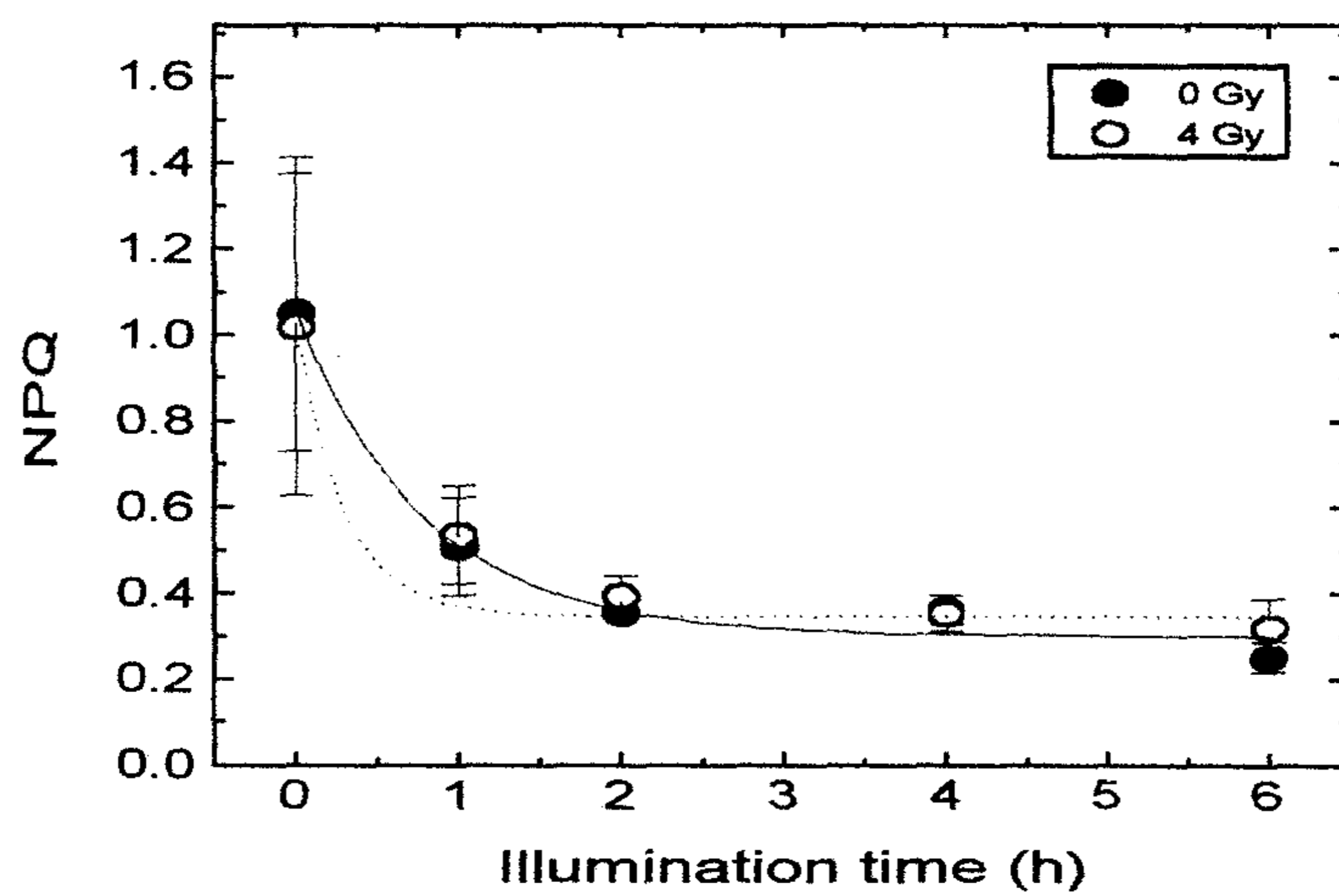
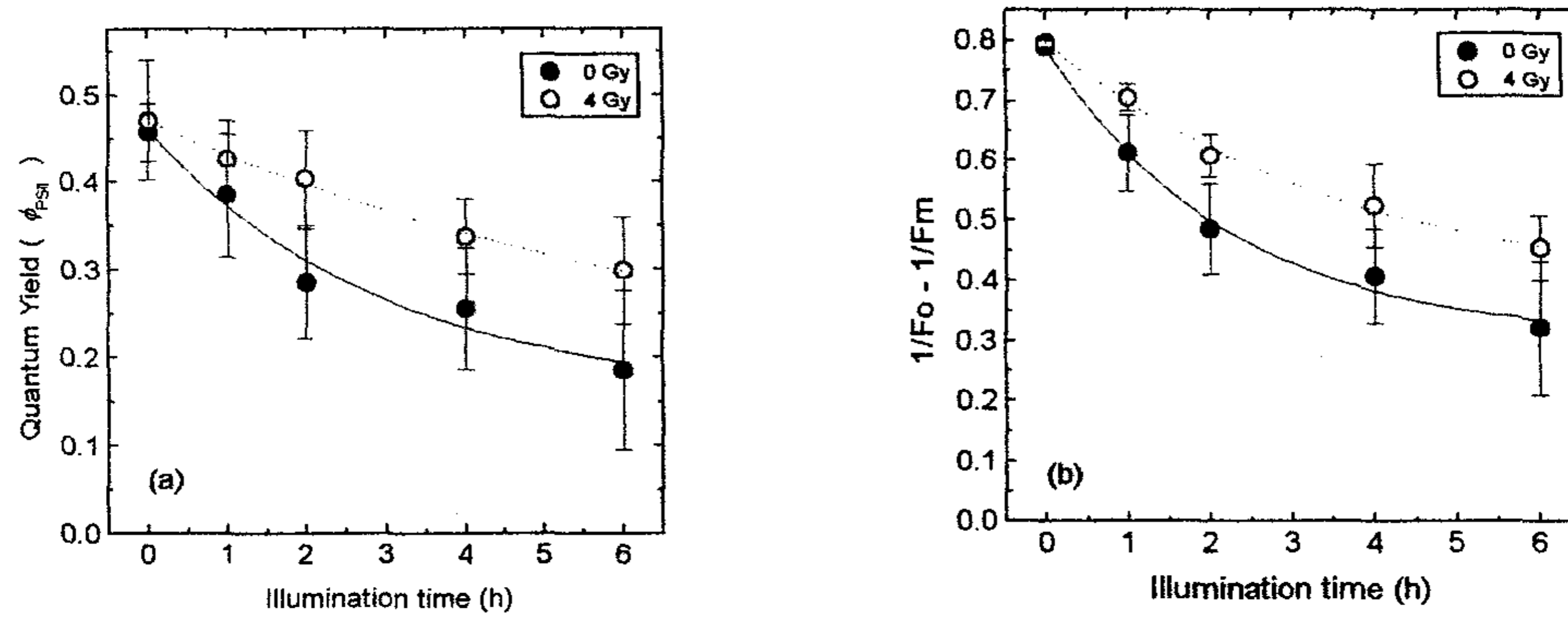


Fig. 120. Changes of the non-photochemical quenching, NPQ, in pepper leaves as a function of illumination time. Pepper leaf discs were exposed to  $900 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  at  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . ●, Control ; ○, 4 Gy irradiation.





**Fig. 121.** (a) Changes in the effective quantum yield of photochemical energy conversion at PSII reaction centers,  $\Phi_{PSII}$  with illumination time. (b) Changes in the fluorescence parameter,  $1/F_o - 1/F_m$  with illumination time. Pepper leaf discs were exposed to  $900 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  at  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . ●, Control ; ○, 4 Gy irradiation.

## (2) 참박

광저해에 따른 형광 파라미터의 변화는 다음과 같다. 참박의 초기 생육이 증가하고 항산화 효소의 활성이 증가되는 저선량 감마선 4 Gy와 8 Gy를 조사한 참박 식물체의 광 스트레스에 대한 반응 변화를 알아보기 위하여 광저해를 유도한 후 엽록소 형광을 측정하였다. 엽록소 형광은 주로 엽록소 a에서 방출되며 광합성과 밀접한 관계가 있다는 것이 밝혀진 이후로 광합성 활성을 측정하는 지표로 사용되고 있다. 반응중심이 열려 있을 때의 최소 형광을  $F_0$ 라고 하며 광계 II에 있는 엽록소 a 분자가 여기 된 후 에너지가 반응중심으로 이동하기 이전에 나오는 형광을 말한다.  $Q_A$ 를 완전히 환원시킬 수 있는 포화광을 조사했을 때 유도되는 최대 형광을  $F_m$ 이라 하며  $F_m$ 에서  $F_0$ 를 빼준 값을  $F_v$ 라 한다.  $F_v/F_m$ 은 광계 II의 활성을 나타내주는 지표로 사용되며 들뜬 에너지 포획 능력을 나타내준다. 그림 122a에서 보는바와 같이 광저해가 진행됨에 따라  $F_v/F_m$ 이 감소되는 경향을 보이며  $900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 빛의 세기로 4시간 처리했을 때 대조구와 8 Gy 조사구는  $F_v/F_m$ 이 각각 0.41과 0.38로 광저해를 처리하지 않았던 앞에 비해 대략 50% 정도 감소되는 것으로 나타났다. 한편 4 Gy의 경우 0.47로 40% 정도의 감소를 보이며 대조구에 비해 광 스트레스에 대해 덜 민감한 것으로 나타났다. 이는 식물이 광저해나 UV 등의 스트레스를 받게 되면 그 극복책의 일환으로 항산화 효소의 활성이 증가되는데 따라서 4 Gy에서의 높은 POD의 활성이 광 스트레스의 저해 효과를 감소시키는 것으로 생각된다. 광계II의 손상은  $F_0$ 의 증가를 수반하는데 본 실험에서도 광저해가 진행됨에 따라  $F_0$ 의 증가를 보였으나 대조구나 저선량 조사구간의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다(그림 122b). 반응 중심에 에너지를 전달할 수 없는 엽록소 분자들이 많아지면  $F_0$ 는 증가하며 일반적으로 식물이 스트레스를 받을 때 증가하는 것으로 보고되고 있는데<sup>110)</sup> 본 실험에서  $F_0$ 의 증가는 광스트레스로 인해 광계II의 반응중심이 손상이 되었거나 혹은 안테나로부터 반응중심으로의 여기 에너지의 전이가 방해받았기 때문인 것으로 사료된다.

광저해에 따른 광계II의 광양자 수율과 흥분 포획률의 변화는 다음과 같다. 광계II의 광양자 수율을 나타내주는  $\Phi_{PSII}$  또한 광저해가 진행됨에 따라 감소하는 경향을 보였으며  $900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량을 4 시간 처리했을 때 대조구와 8 Gy 조사구는 각각 0.20와 0.19로 광저해를 처리하지 않았던 앞에 비해 대략 20%의 감소를 보인 반면(그림 123a) 4 Gy 조사구는 0.21로 15%의 감소를 나타냈다. 광계II 반응중심에 의한 흥분 포획률을 나타내주는 엽록소 형광 파라미터  $1/F_0 - 1/F_m$ 는 기능성 광계II(functional PSII after

light treatment)의 수와 상관 관계가 있는 것으로 나타나 상대적으로 측정하는데 시간이 걸리는 기능성 광계II의 수를 대신하여 사용되어지고 있다<sup>109)</sup>.  $1/F_0-1/F_m$ 는 광저해가 진행됨에 따라 지수적으로 감소되는 경향을 보였으며 대조구와 8 Gy 조사구는 각각 0.35, 0.37로 55%정도 감소되는 것으로 나타났다(그림 123b). 반면 4 Gy 조사구는 0.45로 대략 45% 정도의 감소를 보였으며 광저해에 덜 민감한 것으로 나타났다(그림 123b). 틸라코이드 막을 가로 질러 형성되는  $\Delta pH$ 와 밀접한 관련이 있는 비광화학적 소멸인 NPQ는 광저해가 진행됨에 따라 감소되는 경향을 보이며  $900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서 4시간을 처리했을 때 70%정도 감소하였고, 대조구와 저선량 감마선이 조사된 박간의 차이는 없는 것으로 나타났다(그림 124). NPQ를 나타내는  $qE$ ,  $qI$ ,  $qT$  등은 여러 스트레스에 의한 생리적 조건에 따라 다르게 나타나며 주로  $qE$ 에 의한 영향을 가장 많이 받는다<sup>111)</sup>. 따라서 감소되는 NPQ는 광저해에 의해 ATPase가 영향을 받아  $\Delta pH$ 의 형성을 저하시킨다는 보고가<sup>108)</sup> 있으나 좀더 자세한 조사가 요구된다.

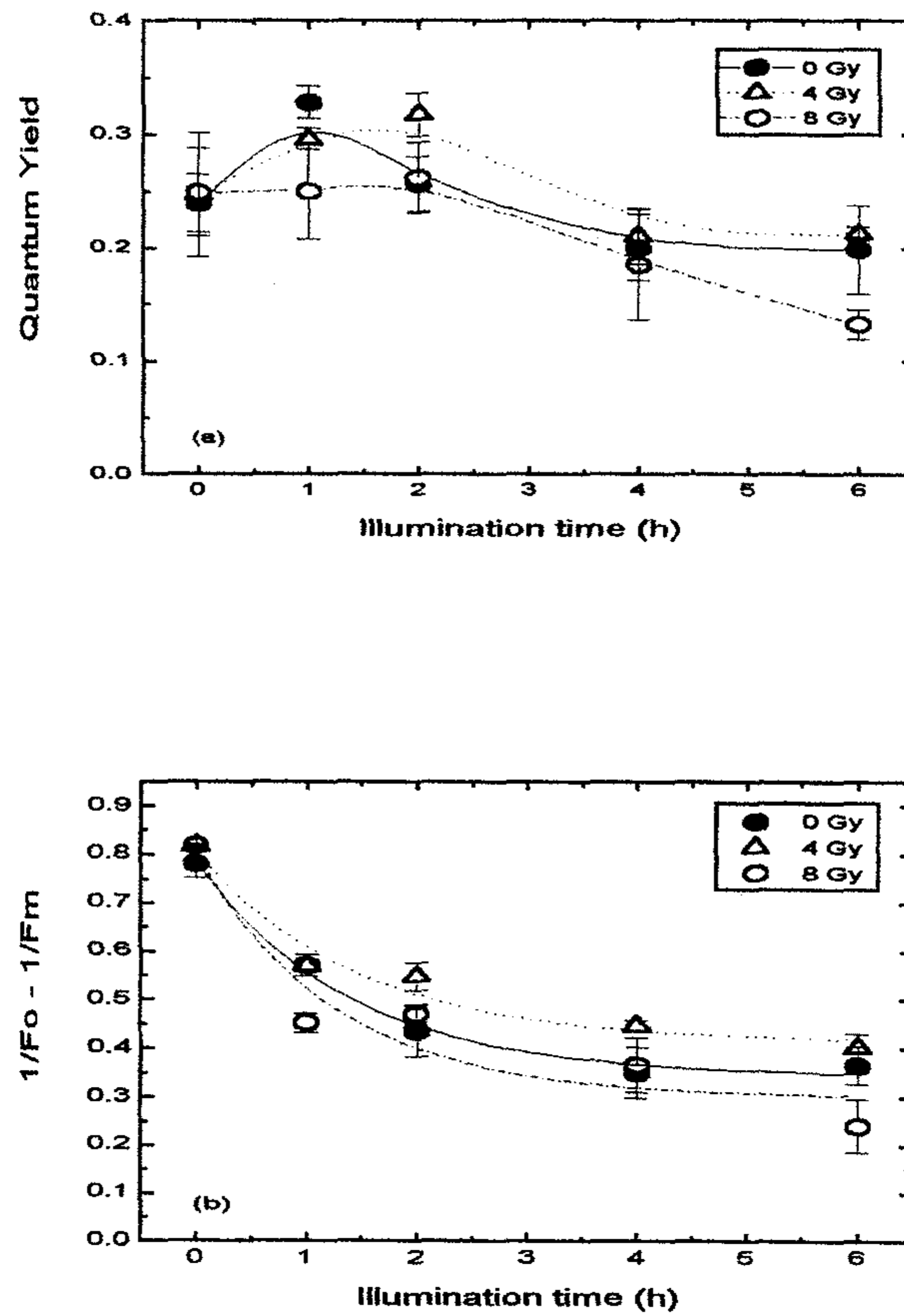


Fig. 122. Changes in the maximal photochemical efficiency of PSII ( $F_v/F_m$ ) (a) and changes in dark-level fluorescence yield,  $F_o$  as a function of illumination time(h) (b) of high light ( $900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at  $25^\circ\text{C}$ . ●, Control ; △, 4 Gy irradiation ; ○, 8 Gy irradiation.

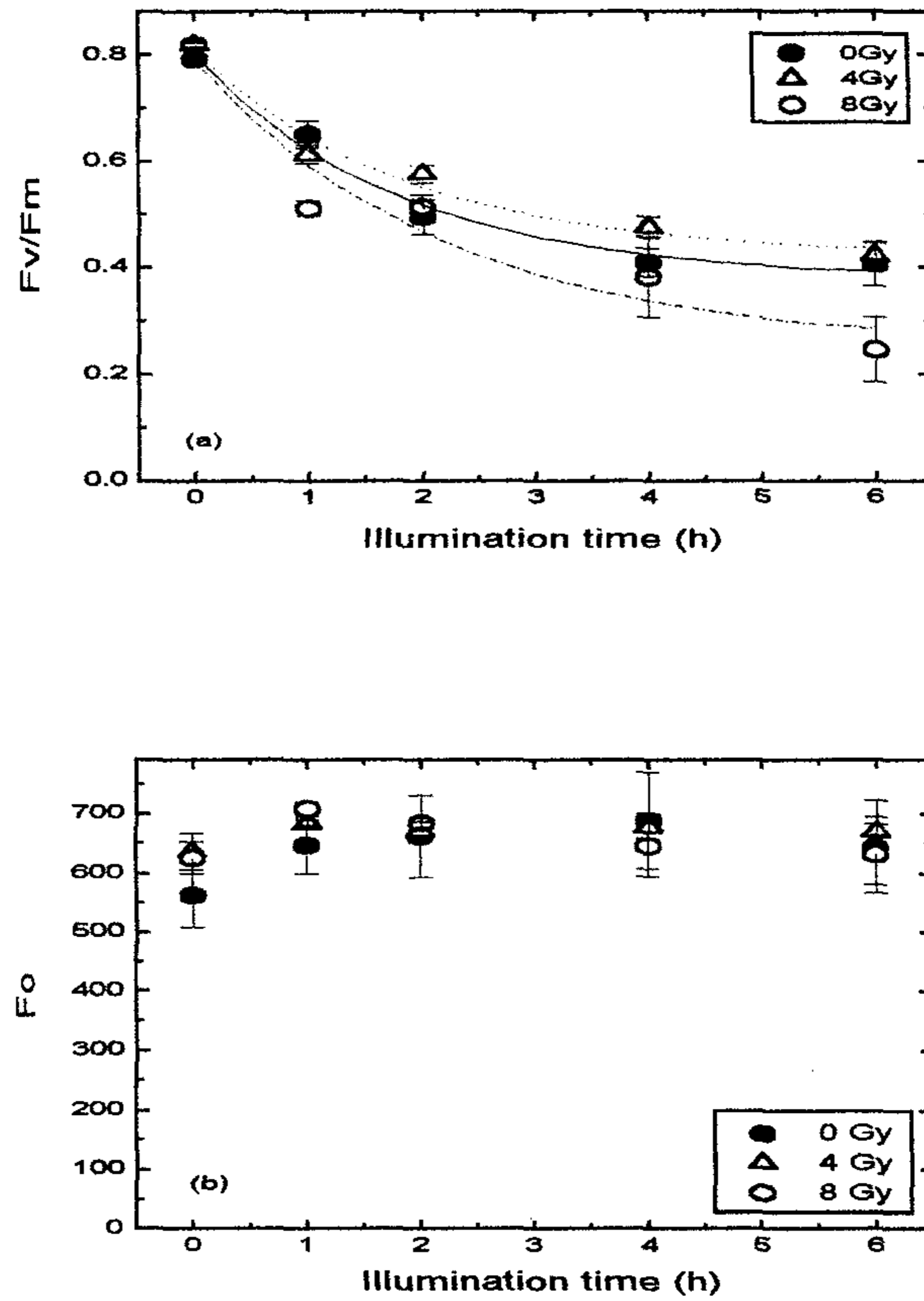


Fig. 123. Changes in the effective quantum yield of photochemical energy conversion at PSII reaction centers,  $\Phi_{PSII}$  with illumination time (a) and changes in the fluorescence parameter  $1/F_o - 1/F_m$  with illumination time (b). Gourd leaf discs were exposed to  $900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  at  $25^\circ \text{C}$ . ●, Control ;  $\Delta$ , 4 Gy irradiation ; ○, 8 Gy irradiation.

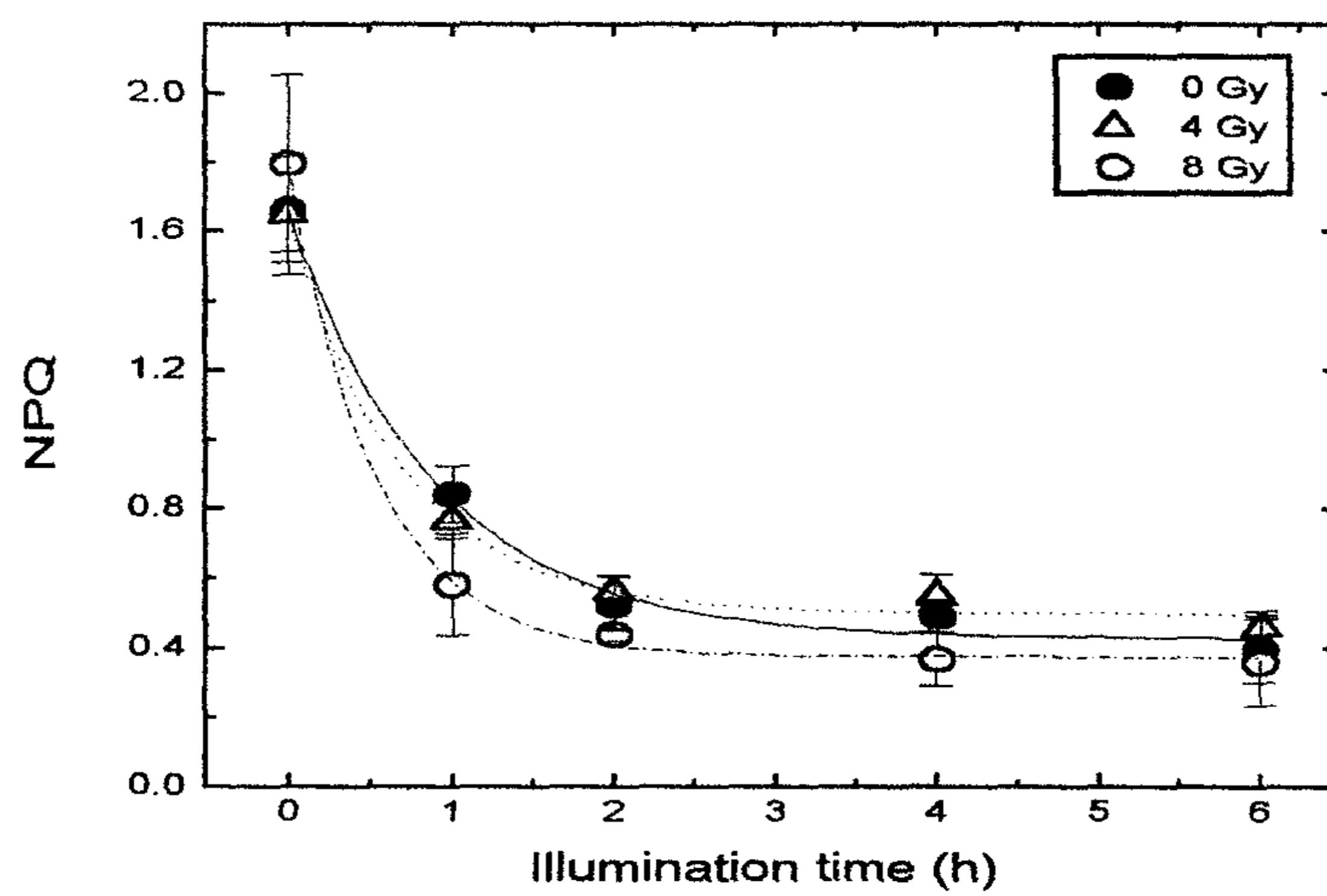


Fig. 124. Changes of the non-photochemical quenching, NPQ, in Gourd leaves as a function of illumination time(h). Gourd leaf discs were exposed to  $900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  at  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . ●, Control ; △, 4 Gy irradiation ; ○, 8 Gy irradiation.

## 다. 방사선에 의한 UV-B 스트레스 경감 효과

### (1) 무

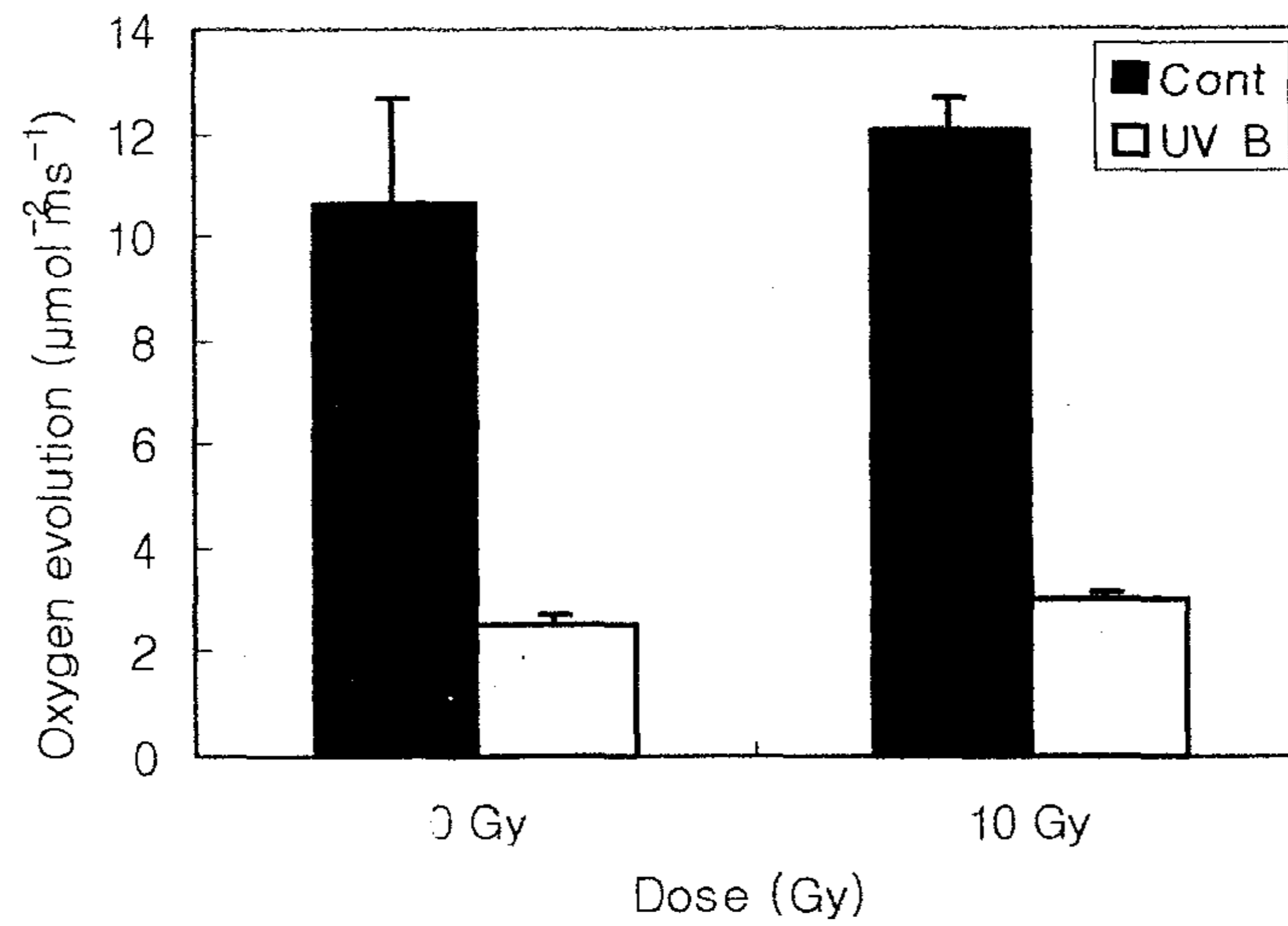
UV-B 스트레스에 따른 산소발생의 변화는 다음과 같다. UV-B 스트레스에 대한 저선량 감마선이 조사된 무 식물체의 반응 변화를 알아보기 위하여 대조구와 저선량 감마선이 조사된 무 앞에서  $P_{max}$ 를 조사하였다.  $P_{max}$ 는 무 잎의 산소 발생이 포화되는  $1400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서 측정하였다. 그림 76에서 보는 바와 같이 대조구와 10 Gy의 감마선이 조사된 무의 산소 발생을 조사한 결과 대조구는  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  이었고 10 Gy 조사구에서는  $12 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 였다. 다음으로 UV-B 스트레스를 4시간 동안 유도했을 때  $P_{max}$ 는 대조구의 경우  $2.54 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 76%의 감소를, 10 Gy 조사구는  $3.01 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 75% 감소를 보였으며 대조구와 저선량 조사구간에 차이는 거의 없었다(그림 125).

UV-B 스트레스에 따른 형광 파라미터 및 엽록소 형광 소산의 변화는 다음과 같다. 무 잎의 초기 생육이 증가하고 항산화 효소의 활성이 증가되는 저선량 10 Gy가 조사된 무 식물체의 UV-B 스트레스에 대한 반응 변화를 알아보기 위하여 UV-B 스트레스를 유도한 뒤 엽록소 형광을 측정하였다. 엽록소 형광은 주로 엽록소 a에서 방출되며 광합성과 밀접한 관계가 있다는 것이 밝혀진 이후로 광합성 활성을 측정하는 지표로 사용되고 있다. 반응중심이 열려 있을 때의 최소 형광을  $F_0$ 라고 하며 광계II에 있는 엽록소 a 분자가 여기 된 후 에너지가 반응중심으로 이동하기 이전에 나오는 형광을 말한다.  $Q_A$ 를 완전히 환원시킬 수 있는 포화광을 조사했을 때 유도되는 최대 형광을  $F_m$ 이라 하며  $F_m$ 에서  $F_0$ 를 빼준 값을  $F_v$ 라 한다. 일반적으로  $F_0$ 와  $F_v/F_m$ 은 광계II의 활성을 나타내주는 지표로 환경 스트레스에 대한 식물의 반응 양상을 측정하는데 사용된다. 그림 126에서 보는 바와 같이 UV-B 스트레스가 진행됨에 따라  $F_v/F_m$ 이 감소되는 경향을 보이며 대조구의 경우 UV-B를 4시간 처리하였을 때  $F_v/F_m$ 의 값이 0.2 정도로 스트레스를 처리하지 않았던 잎에 비해 75% 감소된 반면, 10 Gy 조사구는 69% 감소되어 대조구에 비해 UV-B 스트레스에 대해 덜 민감한 것으로 나타났다(그림 126). 광계II의 광양자 수율을 나타내는  $\Phi_{PSII}$ 는 대조구의 경우 UV-B를 4시간 처리했을 때 대략 90% 감소하는 반면, 10 Gy 조사구는 84% 감소되었다. 이러한 결과를 통해 저선량 감마선 조사가 UV-B 스트레스에 의한 광계II로부터 광계I으로의 전자 전달 지체를 다소 감소시키는 것으로 보였다(그림 126).

이러한 광계II의 손상은  $F_0$ 의 증가와  $F_m$ 의 감소를 수반하는데 본 실험에서

도 UV-B 스트레스가 진행됨에 따라  $F_o$ 는 증가한 반면  $F_m$ 은 감소하는 경향을 보였다(그림 127a, b). 반응 중심에 에너지를 전달할 수 없는 엽록소 분자들이 많아지면  $F_o$ 는 증가하는데 대체적으로 식물이 스트레스를 받을 때 증가되는 것으로 보고되고 있다<sup>112)</sup>. 특히 빛이 있는 상태에서 UV-B 스트레스를 유도할 경우 광계II의 D1/D2 단백질의 손상이 가속화되므로<sup>113)</sup> 본 실험에서  $F_o$ 의 증가는 UV-B 스트레스로 인해 광계II의 반응중심이 손상되었거나 혹은 안테나로부터 반응중심으로의 여기 에너지의 전이가 지체되기 때문인 것으로 생각된다. UV-B에 대한 손상 정도를 측정하는데 있어 사용되는 다른 지표로  $F_v$ 를 들 수 있는데 스트레스가 진행됨에 따라 감소하는  $F_v$ 는 손상된 반응 중심에서 형광 quencher가 형성되기 때문이라고 알려져 있다<sup>114)</sup>. 본 실험에서도 UV-B 스트레스가 진행됨에 따라  $F_v$ 가 감소되는 경향을 보였으며 UV-B를 4시간 처리했을 때 대조구는 94%가 감소되는 반면, 10 Gy 조사구는 84% 감소되었다(그림 127c). 틸라코이드 막을 가로질러 형성되는  $\Delta pH$ 와 밀접한 관련이 있는 비광화학적 소멸인 NPQ는 스트레스가 진행됨에 따라 감소되는 경향을 보이며 UV-B를 4시간을 처리했을 때 50%정도 감소하였고, 대조구와 저선량 조사구간에 차이는 없는 것으로 나타났다(그림 128). NPQ를 나타내는  $qE$ ,  $qI$ ,  $qT$  등은 여러 스트레스에 의한 생리적 조건에 따라 다르게 나타나며 주로  $qE$ 에 의한 영향을 가장 많이 받는다<sup>111)</sup>. 따라서 감소되는 NPQ는 UV-B 스트레스에 의해 ATPase가 영향을 받아  $\Delta pH$ 의 형성을 저하시킨다는 보고가 있다<sup>108)</sup>.





**Fig. 125.** Changes in the maximal photosynthetic O<sub>2</sub> evolution (P<sub>max</sub>) in radish leaf discs with UV-B stress or without stress(Cont). UV-B was given at the intensity of 1W · m<sup>-2</sup> to the detached leaves. Data presented are mean values ± S.E. for 3 measurements.

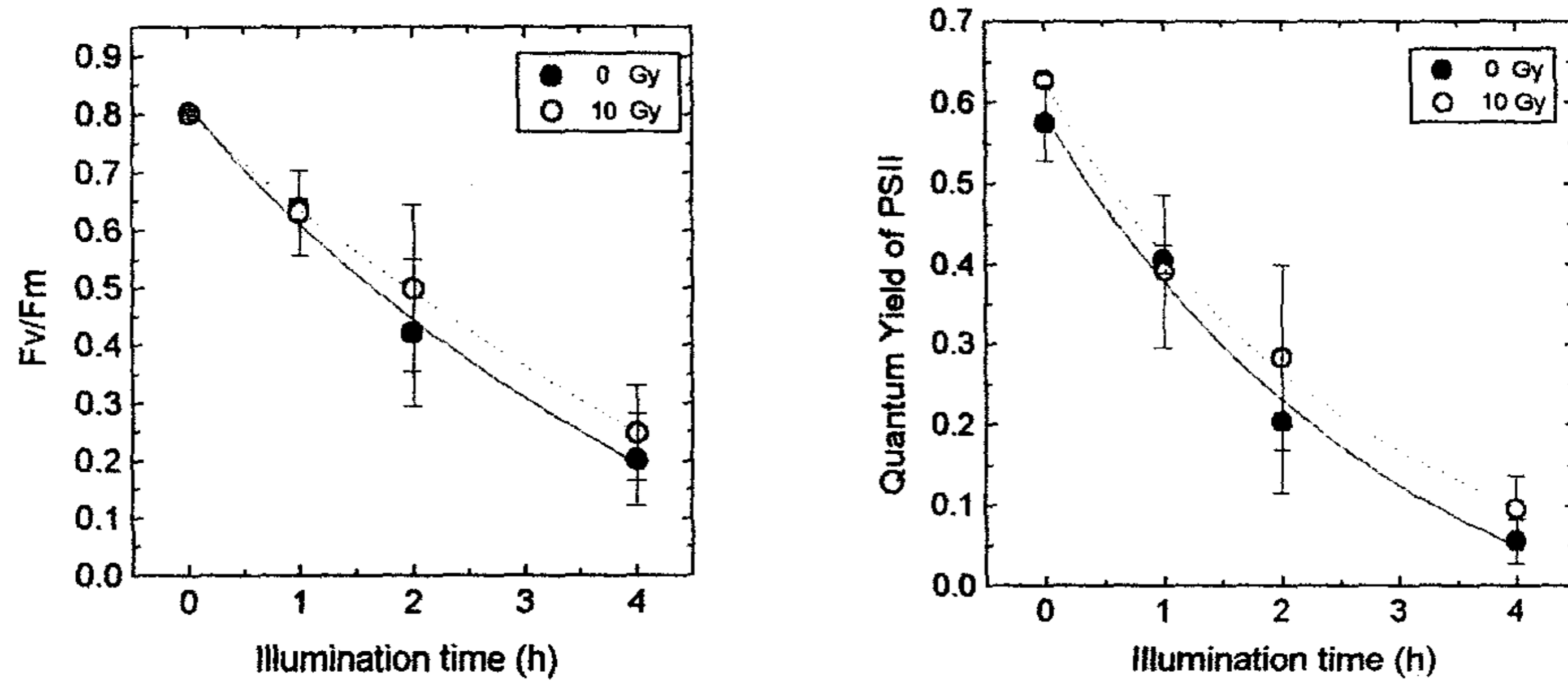


Fig. 126. (Left) Changes in the maximal photochemical efficiency of PSII ( $F_v/F_m$ ) as a function of illumination time and (right) Changes in the effective quantum yield of photochemical energy conversion at PSII reaction centers,  $\Phi_{PSII}$  with illumination time (h). UV-B was given at the intensity of  $1W \cdot m^{-2}$  to the detached leaves. ●, Control ; ○, 10 Gy irradiation.

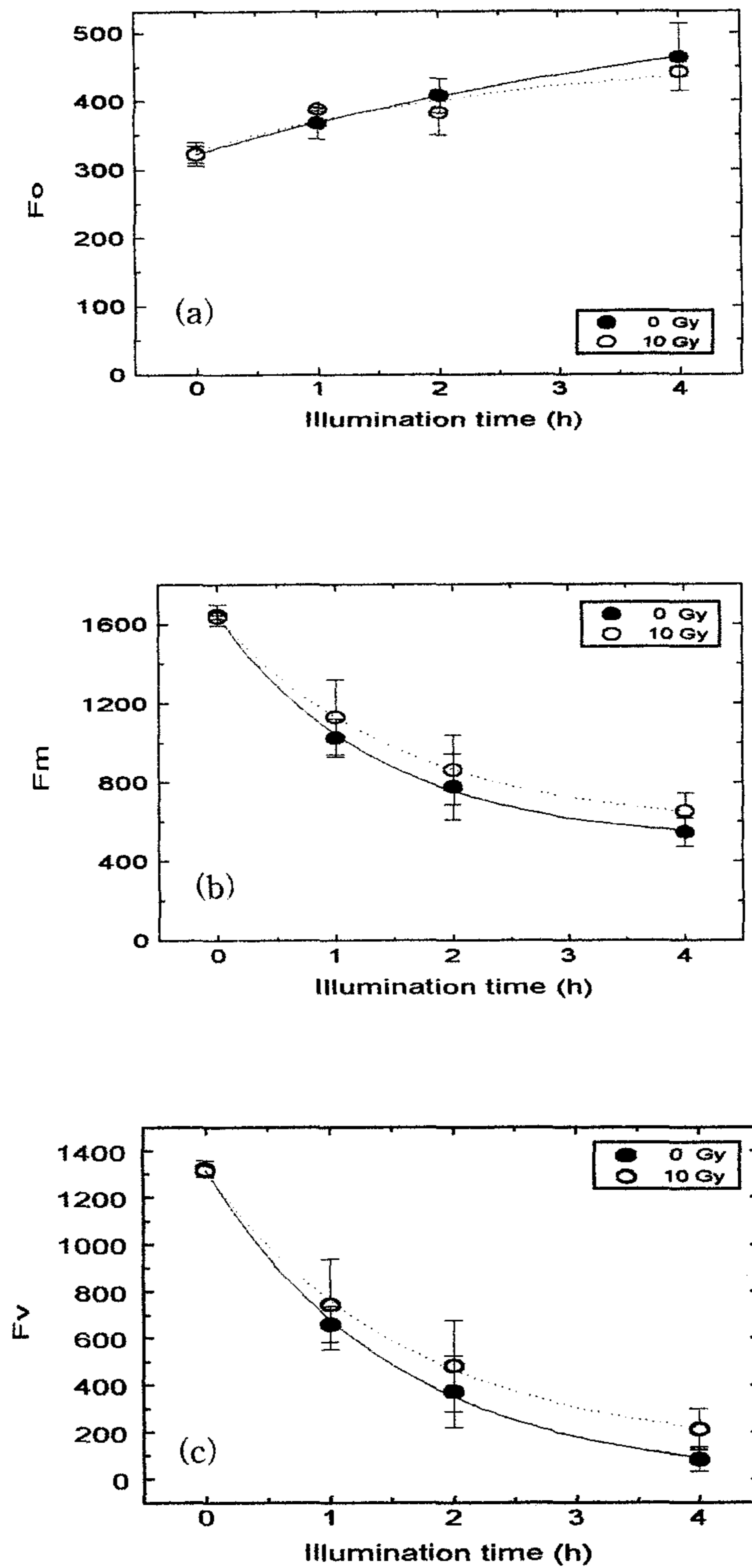


Fig. 127. Changes in dark-level fluorescence yield ( $F_o$ )(a), the maximal fluorescence of PSII ( $F_m$ )(b) and the variable fluorescence of PSII ( $F_v$ )(c) as a function of illumination time. UV-B was given at the intensity of  $1W \cdot m^{-2}$  to the detached leaves. ●, Control ; ○, 10 Gy irradiation.

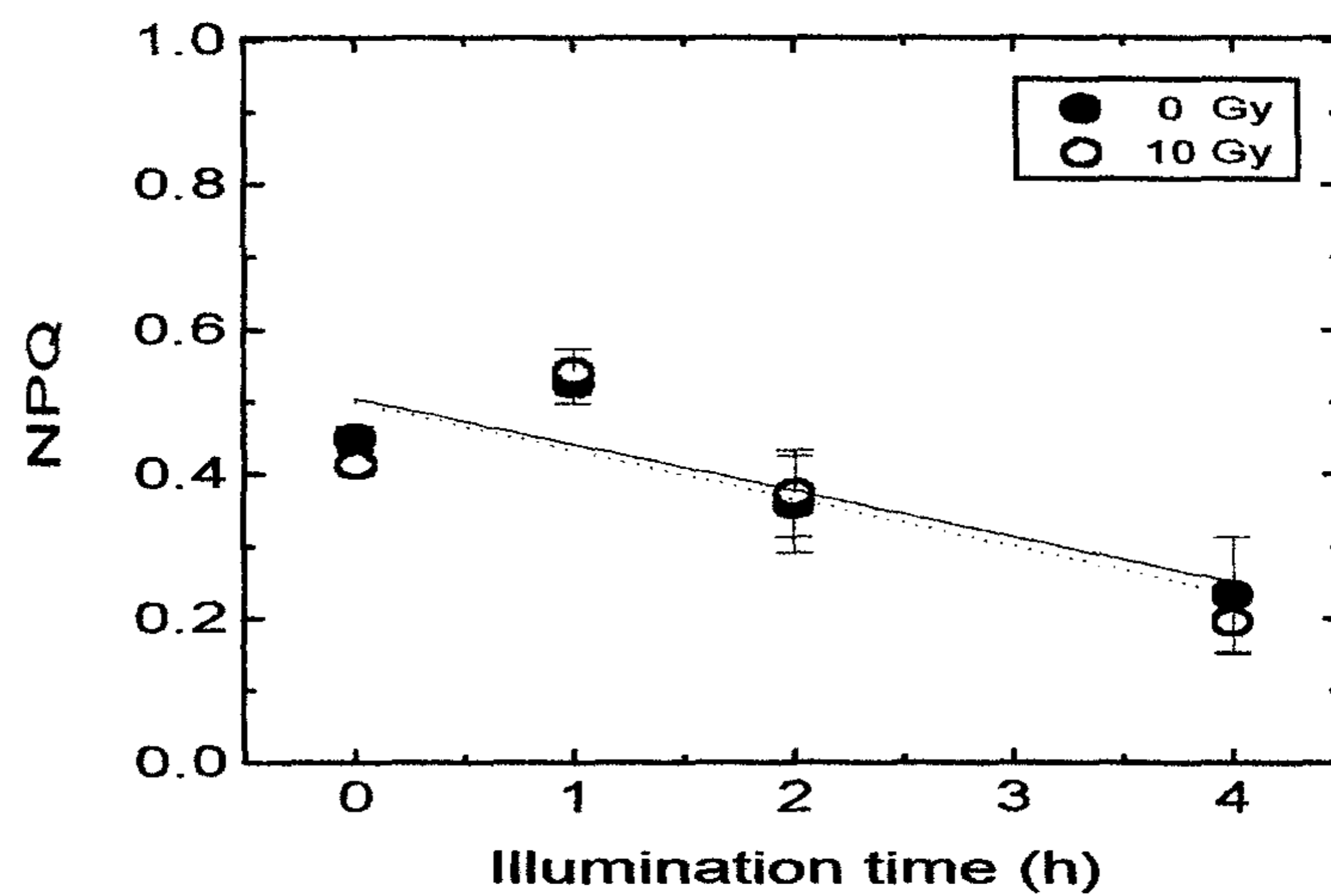


Fig. 128. Changes of the non-photochemical quenching, NPQ, in radish leaves as a function of illumination time. UV-B was given at the intensity of  $W \cdot m^{-2}$  to the detached leaves. ●, Control ; ○, 10 Gy irradiation.

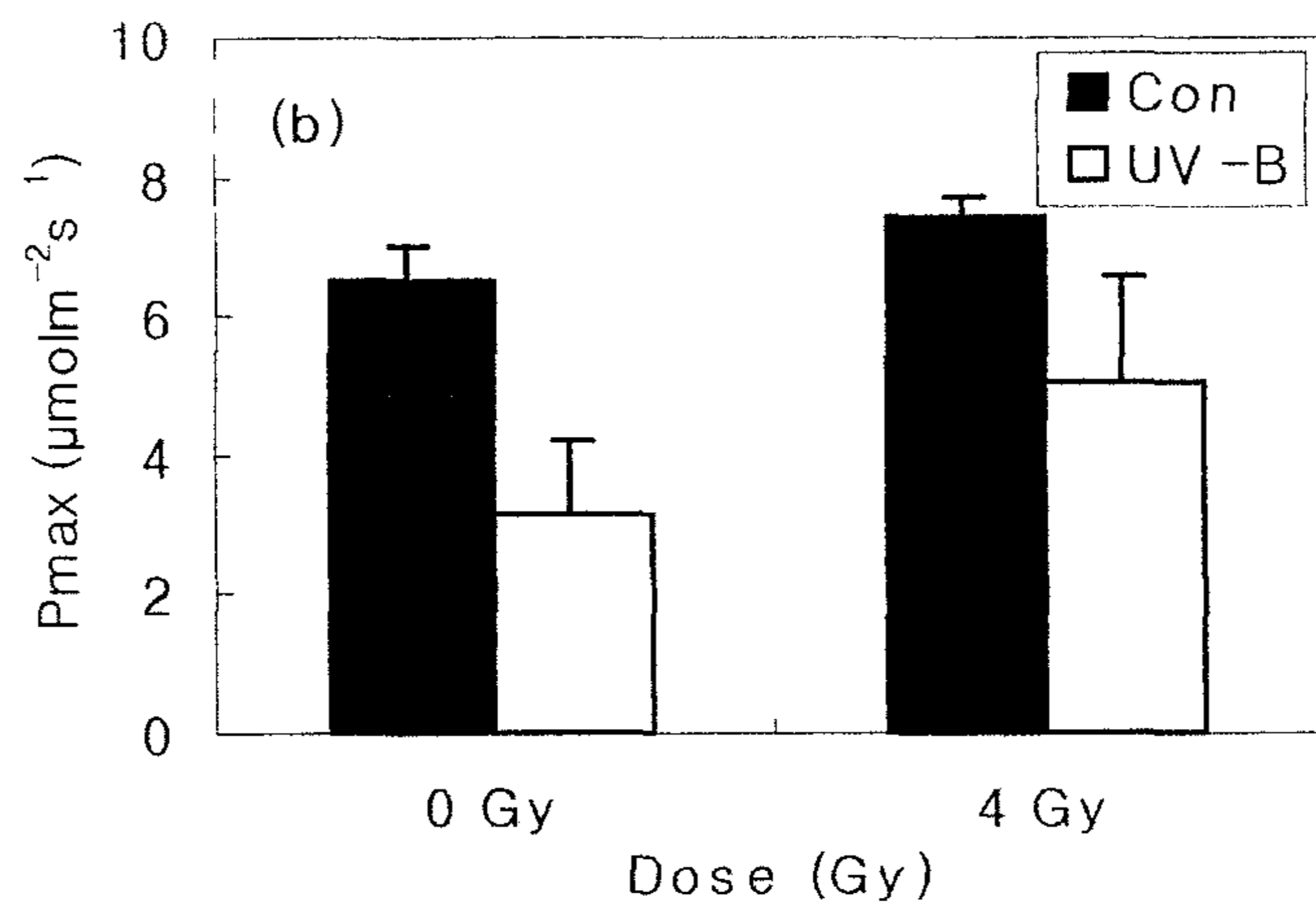
## (2) 콩

UV-B 스트레스에 따른 산소발생의 변화는 다음과 같다. 저선량 감마선이 조사된 콩 식물체의 UV-B 스트레스에 대한 반응 변화를 조사하기 위하여 산소 발생을 통한 최대 광합성 능( $P_{max}$ )을 측정하였다.  $P_{max}$ 는 콩 잎의 산소 발생이 포화되는  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서 측정하였다. 그림 129 에서 보는 바와 같이 대조구와 4 Gy의 감마선이 조사된 콩 잎의 산소 발생을 조사한 결과 대조구는  $6.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  이었고 4 Gy 조사구는  $7.4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 였다. 다음으로 UV-B 스트레스를 4시간 동안 유도했을 때 대조구의 경우 산소 발생이  $3.14 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 으로 52% 정도 감소되는 반면, 4 Gy 조사구는  $5.07 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 UV-B 스트레스에 의해 31% 정도의 감소를 보이며 대조구에 비해 UV-B 스트레스에 대한 저해 효과가 지연되는 것으로 보였다.

UV-B 스트레스에 따른 형광 파라미터의 변화는 다음과 같다. 콩 잎의 초기 생육이 증가하고 항산화 효소의 활성이 증가되는 저선량 4 Gy가 조사된 콩 식물체의 UV-B 스트레스에 대한 반응 변화를 알아보기 위하여 UV-B 스트레스를 유도한 뒤 엽록소 형광을 측정하였다. 엽록소 형광은 광합성 기구의 구성요소에 대한 연구뿐만 아니라 환경의 변화에 따른 광합성 및 광합성 기구의 변화를 측정하는데 사용되고 있다. 광계II의 광화학적 효율은 나타내는  $F_v/F_m$ 은 UV-B 스트레스가 진행됨에 따라 감소되는 경향을 보이며 대조구의 경우 UV-B를 4시간 처리하였을 때  $F_v/F_m$ 의 값이 0.35 정도로 55%의 감소를 볼 수 있었다. 반면 4 Gy 조사구는  $F_v/F_m$ 값이 대략 0.48로 UV-B를 처리하지 않는 잎에 비해 39% 감소되어 대조구에 비해 UV-B 스트레스에 대해 덜 민감한 것으로 나타났다(그림 130a). UV-B에 대한 손상 정도를 측정하는데 있어 흔히 사용되는 다른 지표로  $F_v$ 를 들 수 있는데 스트레스가 진행됨에 따라 감소하는  $F_v$ 는 손상된 반응 중심에서 형광 quencher가 형성되기 때문이라고 알려져 있다. 본 실험에서도 UV-B 스트레스가 진행됨에 따라  $F_v$ 가 감소되는 경향을 보였으며 UV-B를 4시간 처리했을 때 대조구는 83%가 감소되는 반면, 4 Gy 조사구는 55% 감소되었다(그림 130b).

엽록소 형광 소멸의 변화는 다음과 같다. 식물은 흡수된 빛을 광화학 반응에 이용하거나 비광화학적 과정을 통해 에너지를 발산 시키기 때문에 광화학적 소멸과 비광화학적 소멸을 측정하여 콩 식물체의 에너지 분산의 변화에 대해 측정하였다. 환원되어 있던  $Q_A$ 가 산화되면서 엽록소 형광이 감소되는 성분을 광화학 소멸이라하며 이것은 광화학적 반응을 통한 흥분 에너지의 재분배를 촉진한다. 비광학적 소멸은 엽록체의 루멘과 스트로마간의 pH의 차이를 나타내주며 잎의 에너지 상태나 광계II의 광양자 효율을 조절

하는데 중요한 역할을 하고 광저해로 인한 손상으로부터 광계II를 보호한다. 광화적 소산인 qP는 UV-B 스트레스에 의해 거의 변화가 없었으나 비광화적 소멸인 NPQ의 경우 감소하는 경향을 보이며 대조구는 UV-B를 4시간 처리했을 때 71% 감소되었고, 4 Gy는 0.52로 32% 감소되는 것으로 나타났다 (그림 131).



**Fig. 129.** Changes in the maximal photosynthetic O<sub>2</sub> evolution (P<sub>max</sub>) in soybean leaf discs with UV-B stress or without stress (Cont)(b). UV-B was given at the intensity of 1 W·m<sup>-2</sup> to the detached leaves.

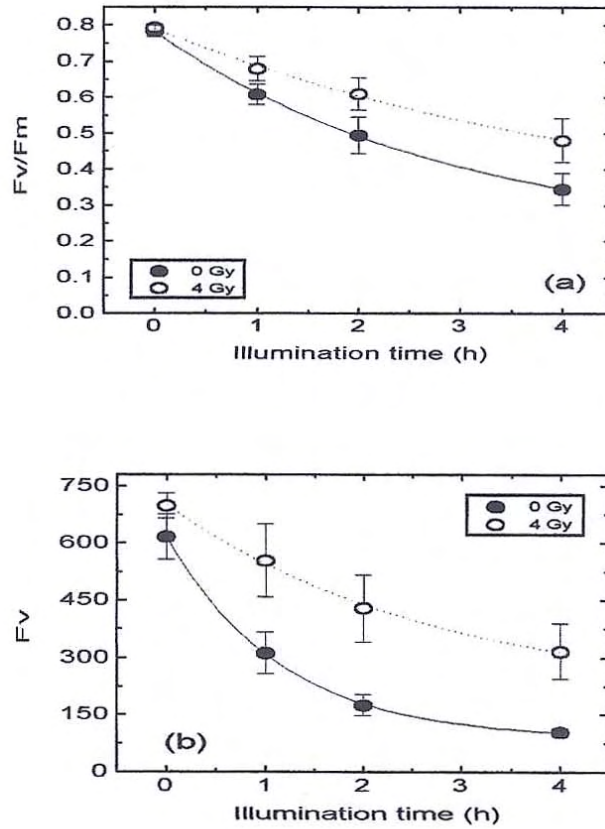
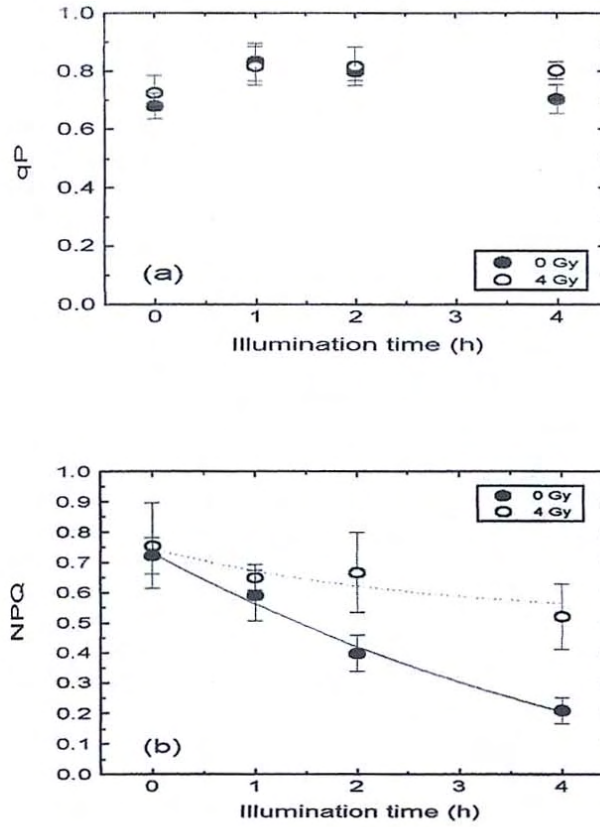


Fig. 130. Changes in the maximal photochemical efficiency of PSII ( $F_v/F_m$ ) as a function of illumination time(a). Changes in the variable fluorescence of PSII ( $F_v$ ) as a function of illumination time(b). UV-B was given at the intensity of  $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  to the detached leaves. ●, Control ; ○, 4 Gy irradiation.





**Fig. 131.** Changes in the photochemical quenching(a) and changes in the non-photochemical quenching(b) of soybean grown from seeds irradiated with different doses of gamma radiation. UV-B was given at the intensity of  $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  to the detached leaves. ●, Control ; ○, 4 Gy irradiation.

## 라. 저온과 산화 스트레스에 대한 오이의 반응

### (1) 저온에 대한 오이의 광합성 반응

저온 스트레스에 의한 광합성율을 조사한 결과, 그림 132에서와 같이 최대광합성율( $P_{max}$ ) 및 양자수율(quantum yield)가 감소하였다. 이러한 광합성율 감소가 광계II 혹은 광계I의 활성 감소에 의한 것인지를 조사하고자 광계II의 광화학적 효율(그림 133A) 및 광계I의 redox kinetics(그림 133B)를 각각 조사하였다. 오이를 온도별로 처리한 잎의 광계II 효율을 측정하였다(그림 133). 그 결과 광계II의 광화학적 효율 보다는 Far red light에 의해서 산화될수 있는 광계I의 함량( $P700+$ )함량이 현저하게 감소하였다. 게다가 광계I의  $P700+$ 이 산화되는데 필요한 시간( $t_{1/2}$ )이 저온 처리에 의해서 감소함을 보여주었다. 이는 저온 처리에 의해서 광계II보다는 광계I의 광저해가 현저하게 민감함을 보여줄 뿐만 아니라 광계I을 중심으로 한 순환적 전자전달(cyclic electron transport)가 일어남을 시사한다.

저온에 대한 항산화 효소, SOD 및 APX의 활성도 변화는 다음과 같다. 오이를 온도별로 처리하여 SOD 활성을 보았다(그림 134). 그 결과 3개의 band가 확인되었다. 전기 이동도에 따라 band1에서 band3로 명명하였을 때 isoenzyme의 종류를 알아보기 위해 발색과정 중 1 mM KCN과 5 mM  $H_2O_2$ 을 각각 처리하였다. 두 가지 모두에 저항성을 보인 band1이 Mn SOD, 둘 다에 민감성을 보인 band2는 Cu/Zn SOD, band3는  $H_2O_2$ 에는 민감하고 KCN에 저항성을 보이므로 Fe SOD임을 알수 있었다. 각각의 band는 온도가 낮아짐에 따라 활성이 감소함을 확인할 수 있었다. 오이를 온도별로 처리하여 APX 활성을 보았다(그림 134). 그 결과 온도에 상관없이 동일한 활성을 보였다.

저온에 대한 오이의 유전자 발현은 다음과 같다. Random Arbitrarily Primed PCR (RAP-PCR)에 의한 저온처리된 오이에서 gene expression 변화를 조사하였다. 먼저 5°C, 10°C, 25°C 조건에서 6시간 동안 light chilling stress를 받은 벼 잎으로부터 TRIzol™ (GIBCO BRL)용액을 이용하여 total RNA를 분리하였다. 각 처리구로부터 추출한 RNA 9ug에 oligo d(T)를 primer(B1 primer: GTTTCGCTCC, B12 : CCTTGACGCA)를 첨가하고 revers transcriptase (Promega)를 이용하여 50 ul reaction volume으로 42°C에서 1시간동안 cDNA를 합성하였다. 합성된 cDNA 1/10 ul를 주형으로 하고 random primer set을 이용하여 PCR을 수행하였다. PCR 조건은 92°C에서 1분간 denaturation, 35°C에서 1분간 annealing, 72°C에서 1분간 polymerization하여 40 cycle을 수행하였다. 이후 1% agarose gel에 전기영

동하여 band pattern을 분석하였다. 그림 135에서 보여주는 바와 같이 3 - 6개의 band 영역에서 증가, 감소, 사라짐, 발현 등의 차이가 있음을 알 수 있었다. 따라서 저온 처리된 오이 RNA의 발현양상에 변화가 있었음을 확인할 수 있었다.

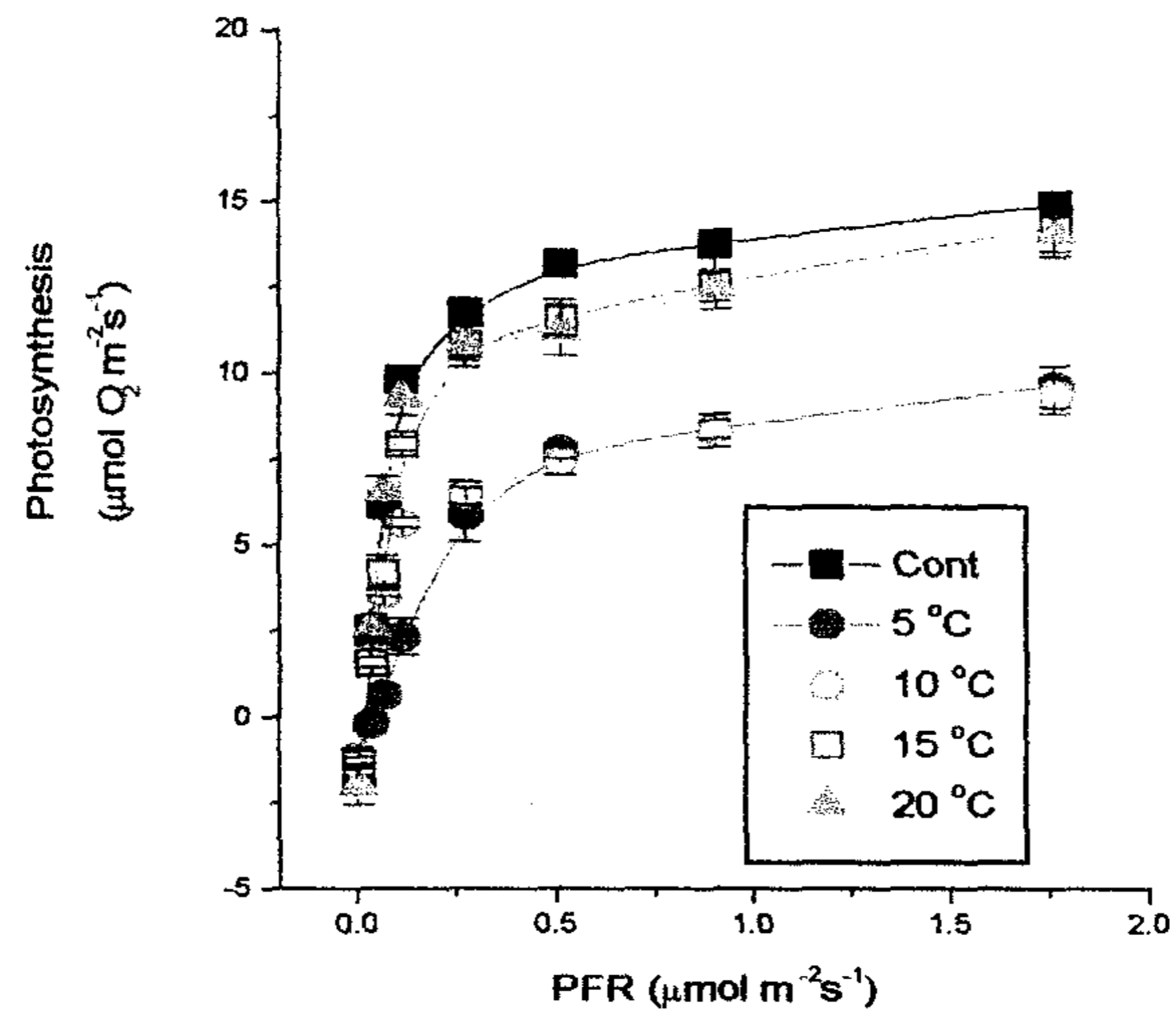
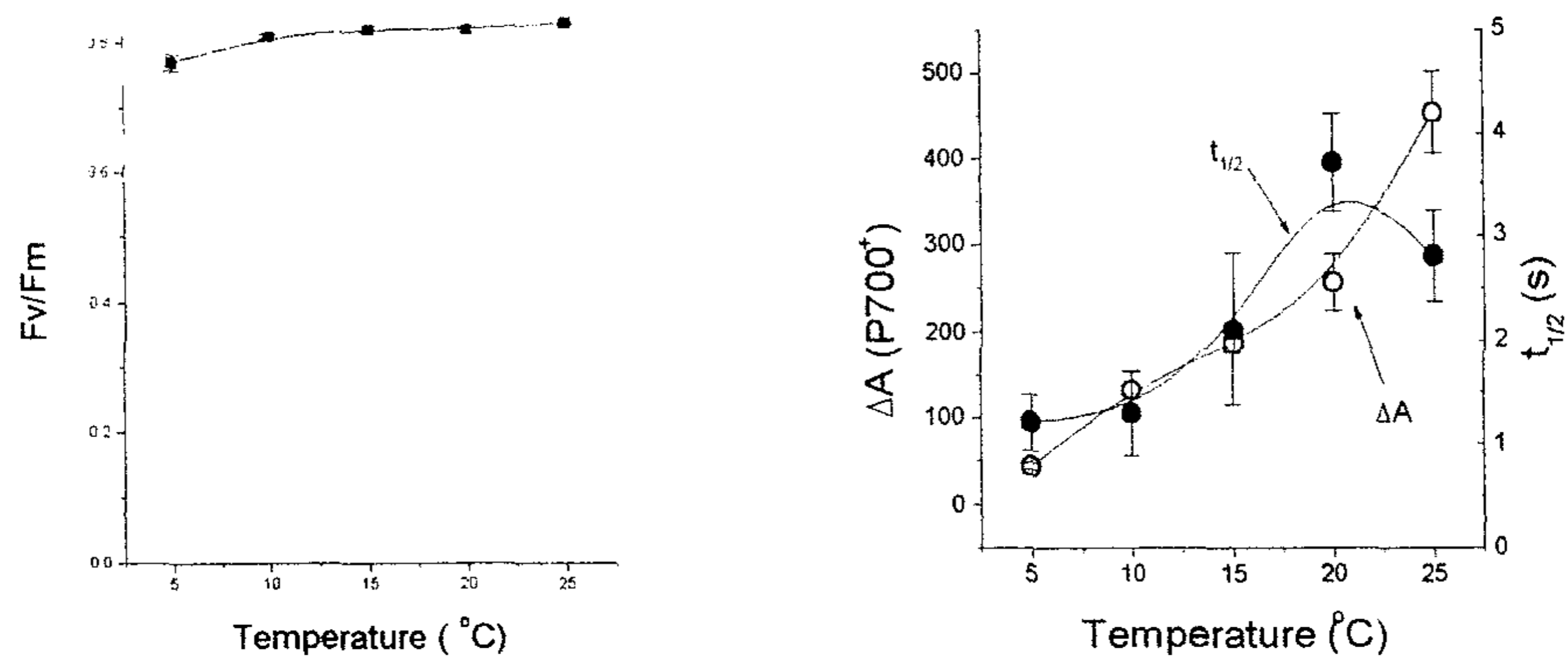
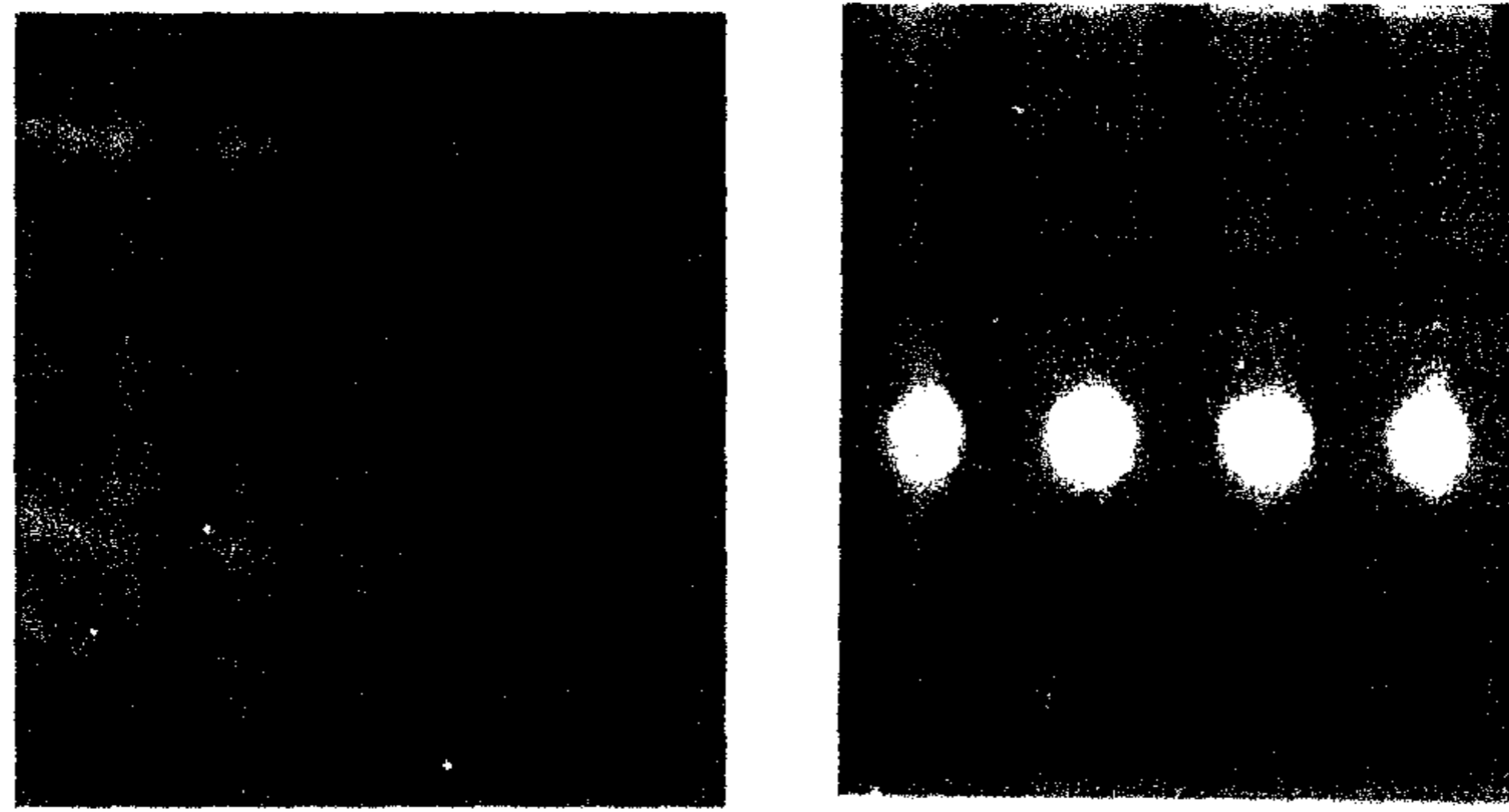


Fig. 132. Photosynthesis of cucumber leaves exposed various low temperatures for 6 hrs in the light( $0.1 \text{ mmol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

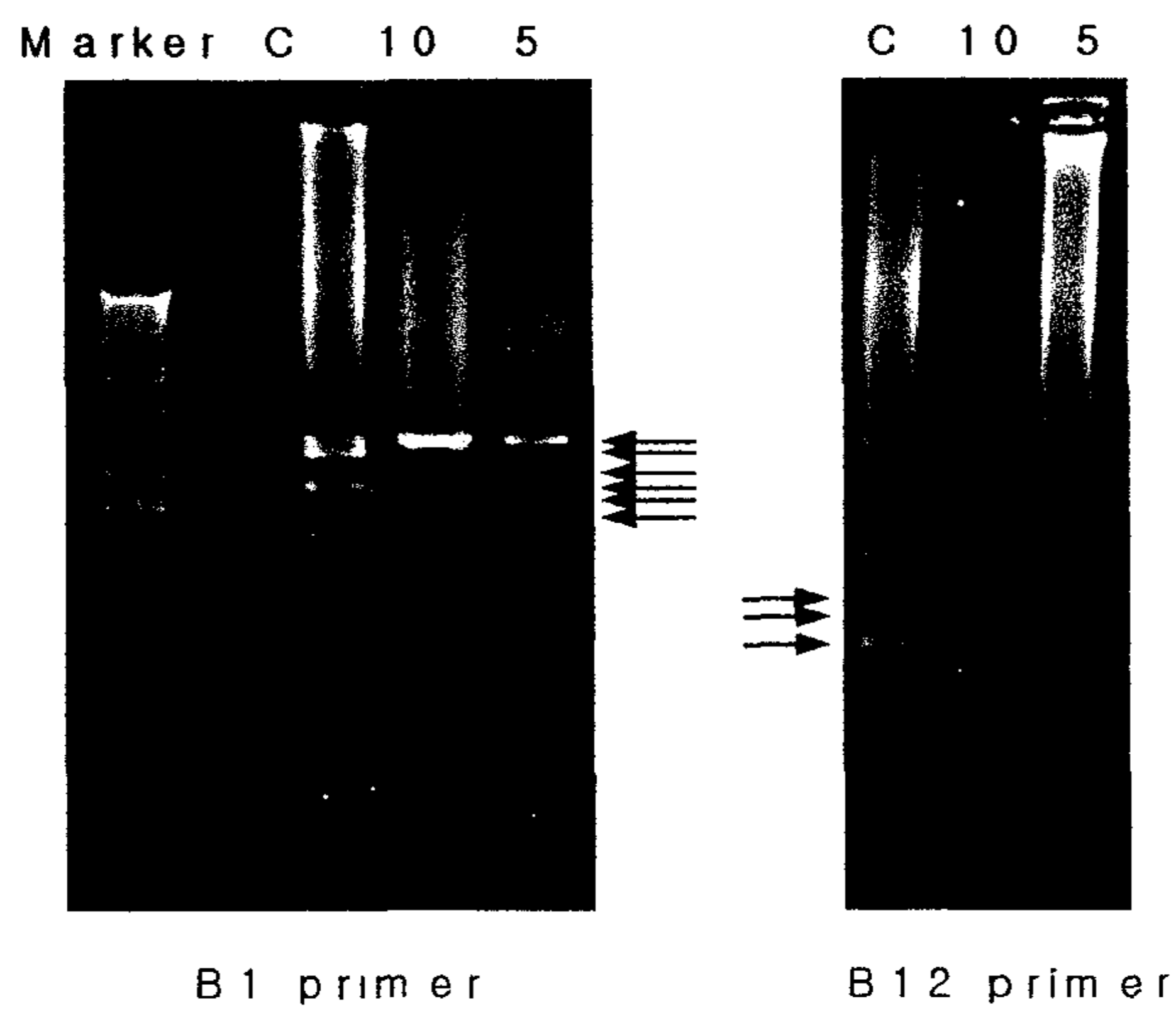


**Fig. 133.** Effects of light chilling on PSII potential quantum yield (*left*) oxidizable P700 $^{+}$  ( $\Delta A$ ) and re-reduction of P700 $^{+}$  (*right*) in the leaves of cucumber exposed light-chilling stress for 6 hrs.

20°C 15°C 10°C 5°C      20°C 15°C 10°C 5°C



**Fig. 134.** Zymograms for SOD (*left*) and APX (*right*) in the leaves of cucumber exposed to light chilling stress for 6 hrs.



**Fig. 135.** RAP-PCRs for cucumber leaves exposed to 5 and 10 °C for 6 hrs under the light.

## (2) 산화 스트레스에 대한 오이의 반응

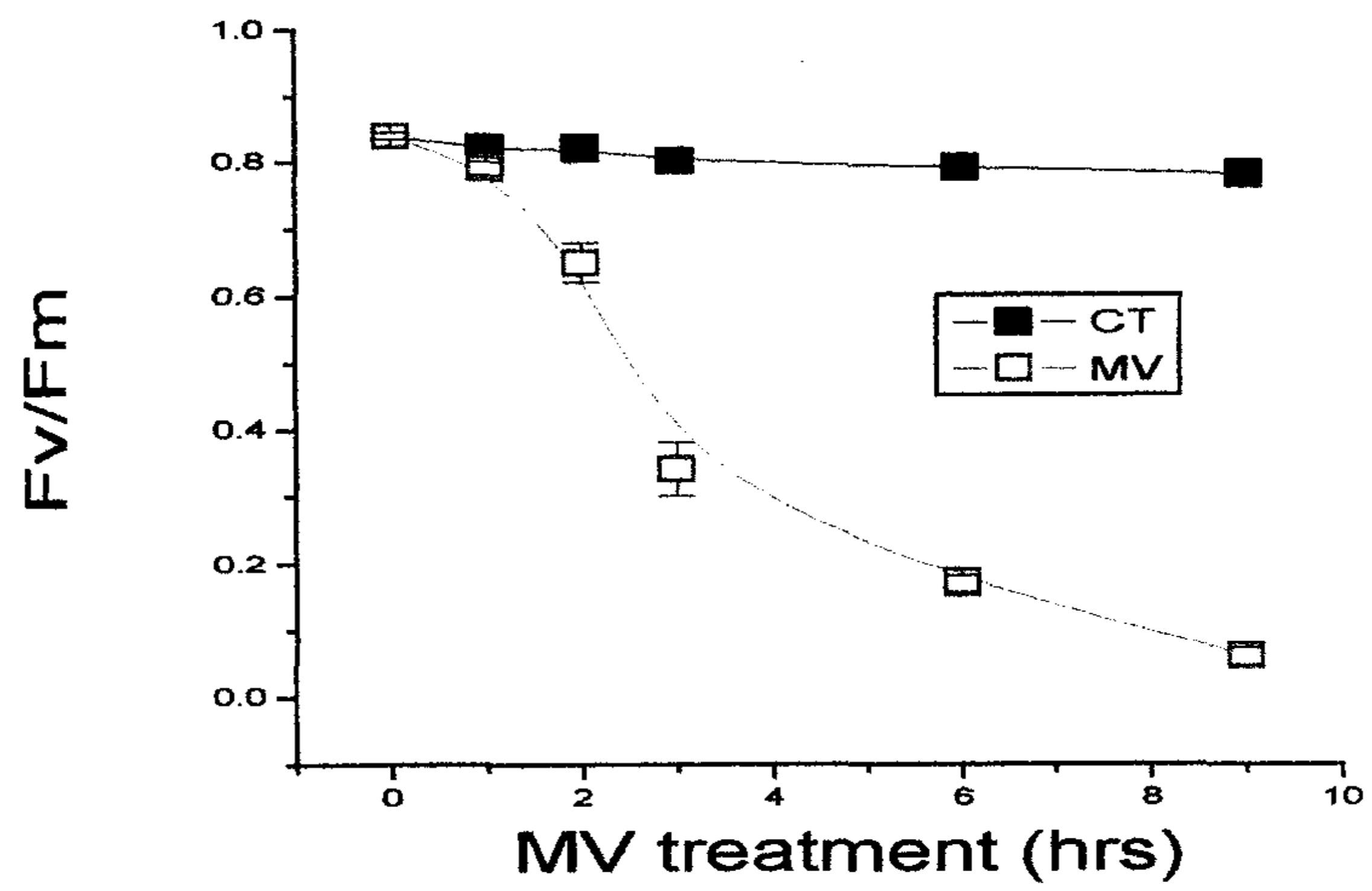
광계II 및 광계I의 광화학적 효율은 다음과 같다. 오이를 10  $\mu\text{M}$ 의 paraquat에 시간별로 처리한 잎의 광계II의 광화학적 효율을 측정하였다(그림 136). 그 결과 광화학적 효율을 나타내는  $F_v/F_m$ 이 2시간 처리 후에 급격히 감소하였다.

Superoxide dismutase(SOD) 및 Ascorbate peroxidase(APX) 활성도 변화는 다음과 같다. 오이를 10  $\mu\text{M}$ 의 paraquat에 시간별로 처리하여 SOD 활성을 보았다(그림 137). 그 결과 3개의 band가 확인되었는데 band2는 거의 나타나지 않았고, band1,3은 처리시간이 길수록 활성이 감소함을 확인할 수 있었다. SOD와는 달리 paraquat에 의해서 APX 활성은 영향을 받지 않았다.

Paraquat(MV) 처리에 오이의 광합성 반응은 다음과 같다. 저온 스트레스에 의한 광합성을 조사한 결과, 표 67에서와 같이 최대광합성율( $P_{max}$ ) 및 양자수율( $1 - F/F_m'$ )이 감소하였다. 그러나 광합성 기구의 excitation pressure ( $1 - qP$ ) 및 여기에너지의 비광화학적 소산 (NPQ)에는 영향을 미치지 아니하였다. 이러한 광합성 감소가 광계II 혹은 광계I의 활성 감소에 의한 것인지를 조사하고자 광계II의 광화학적 효율 (그림 138A) 및 광계I의 oxidizable  $P700^+$  함량(그림 138B)을 각각 경시적으로 조사하였다. 그 결과 MV 처리에 의해서  $P700^+$  함량이 감소하였으나 광계II의 양자효율은 거의 영향을 받지 않았다. 이는 MV 처리에 의한 광합성 감소가 광계II보다는 광계I의 피해에서 기인함을 시사한다.

MV에 대한 항산화 효소, SOD 및 APX의 활성도 변화는 다음과 같다. MV 처리에 의한 광계I 저해가 광합성 기구의 보호계인 SOD나 APX의 감소에서 기인하는지를 조사하고자 MV 처리후 2시간 된 오이 원형절편에서 SOD(그림 139A) 및 APX (그림 139B) 활성을 조사하였다. MV 처리되지 않은 대조구에 비해서 두 효소의 활성도가 현저하게 감소하였는데, SOD 보다 APX 활성도가 보다 감소하였음을 알 수 있다. 따라서 MV에 의한 광합성 저해는 활성산소 소거종인 APX가 일차적으로 저해된 결과로 유도되는 2차적인 사건임을 알 수 있었다.





**Fig. 136.** Changes in PSII quatum yield (Fv/Fm) as a function of MV treatment in the leaf disks of cucumber leaves. CT, control; MV, methyl viologen.

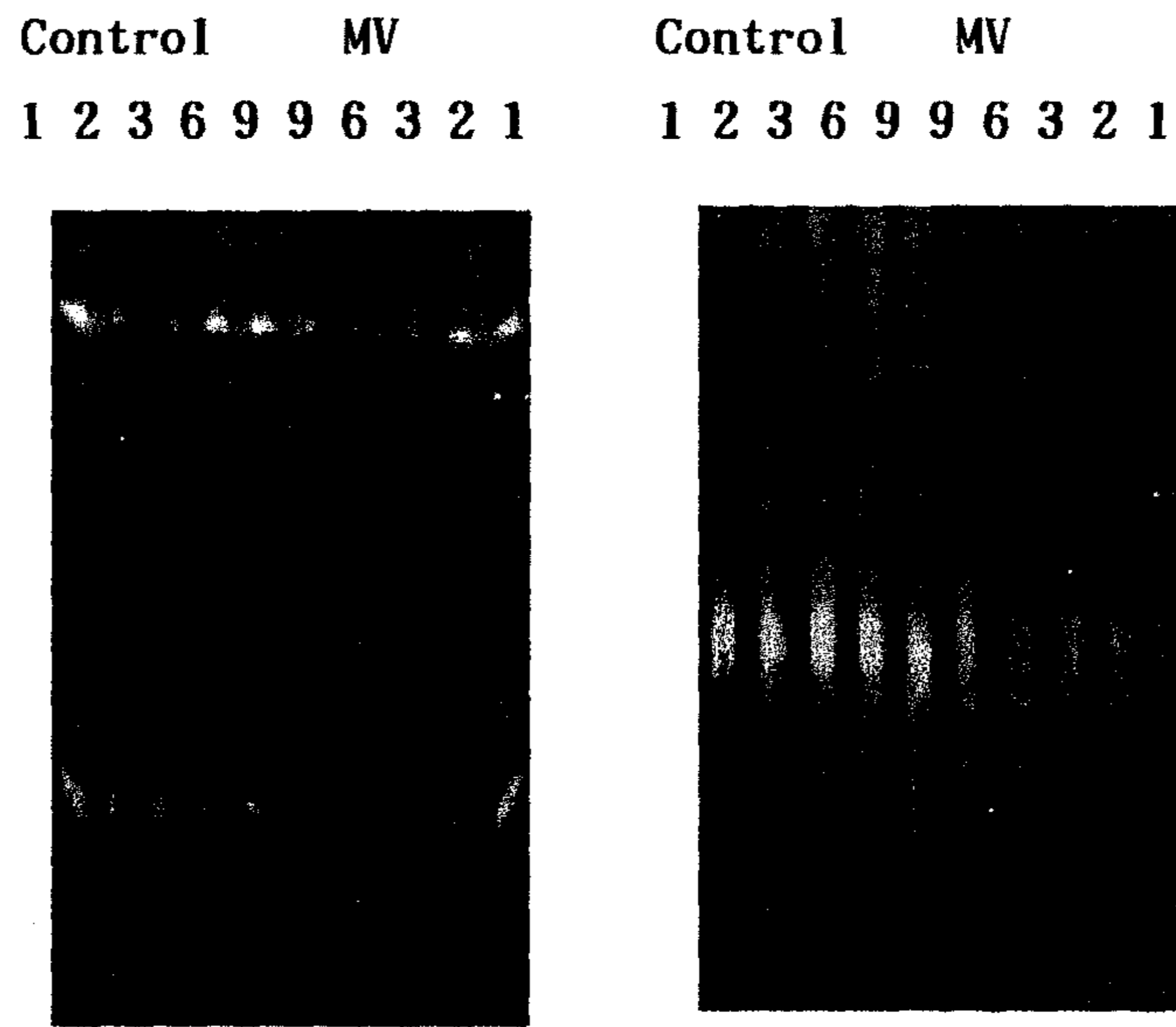
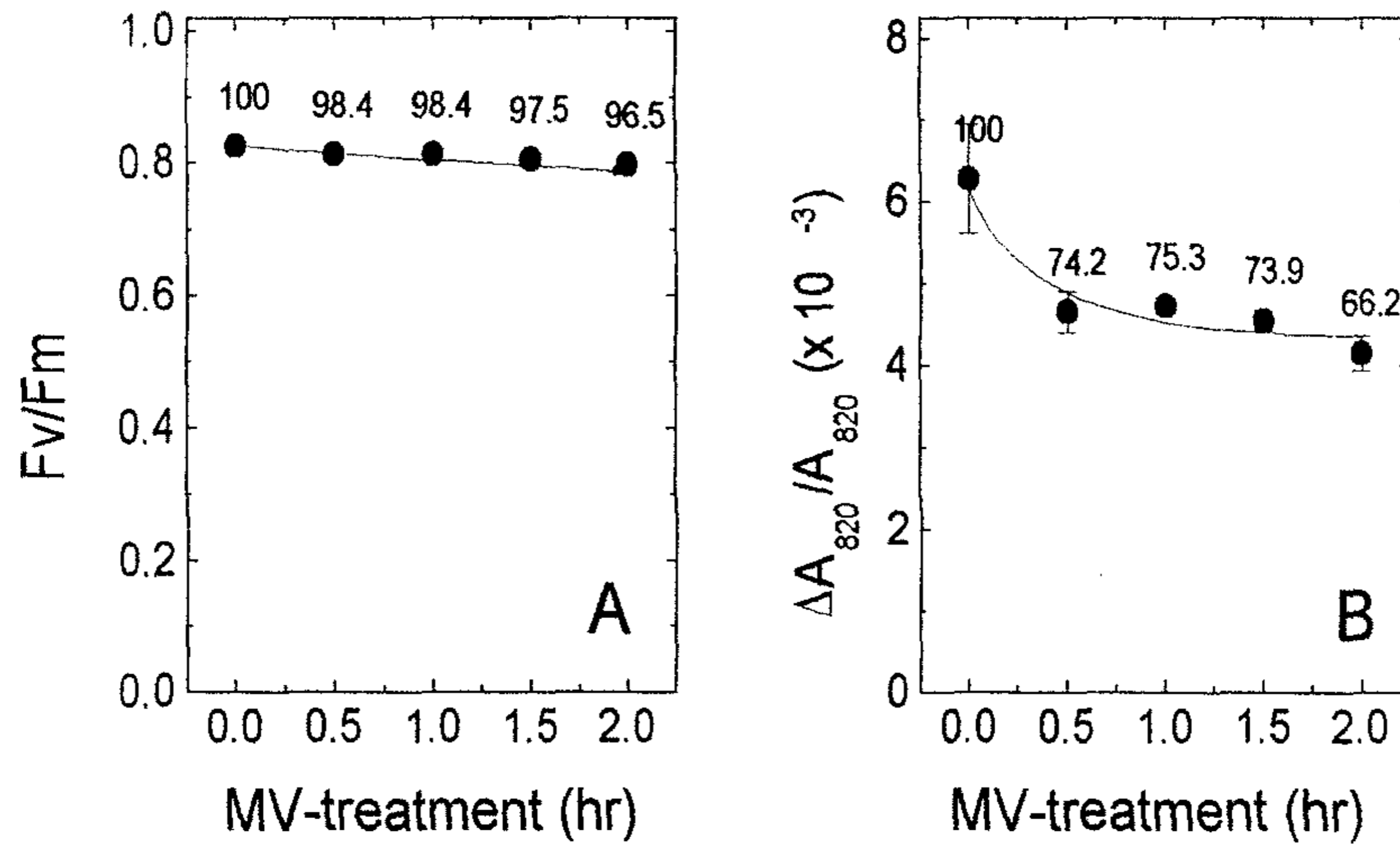


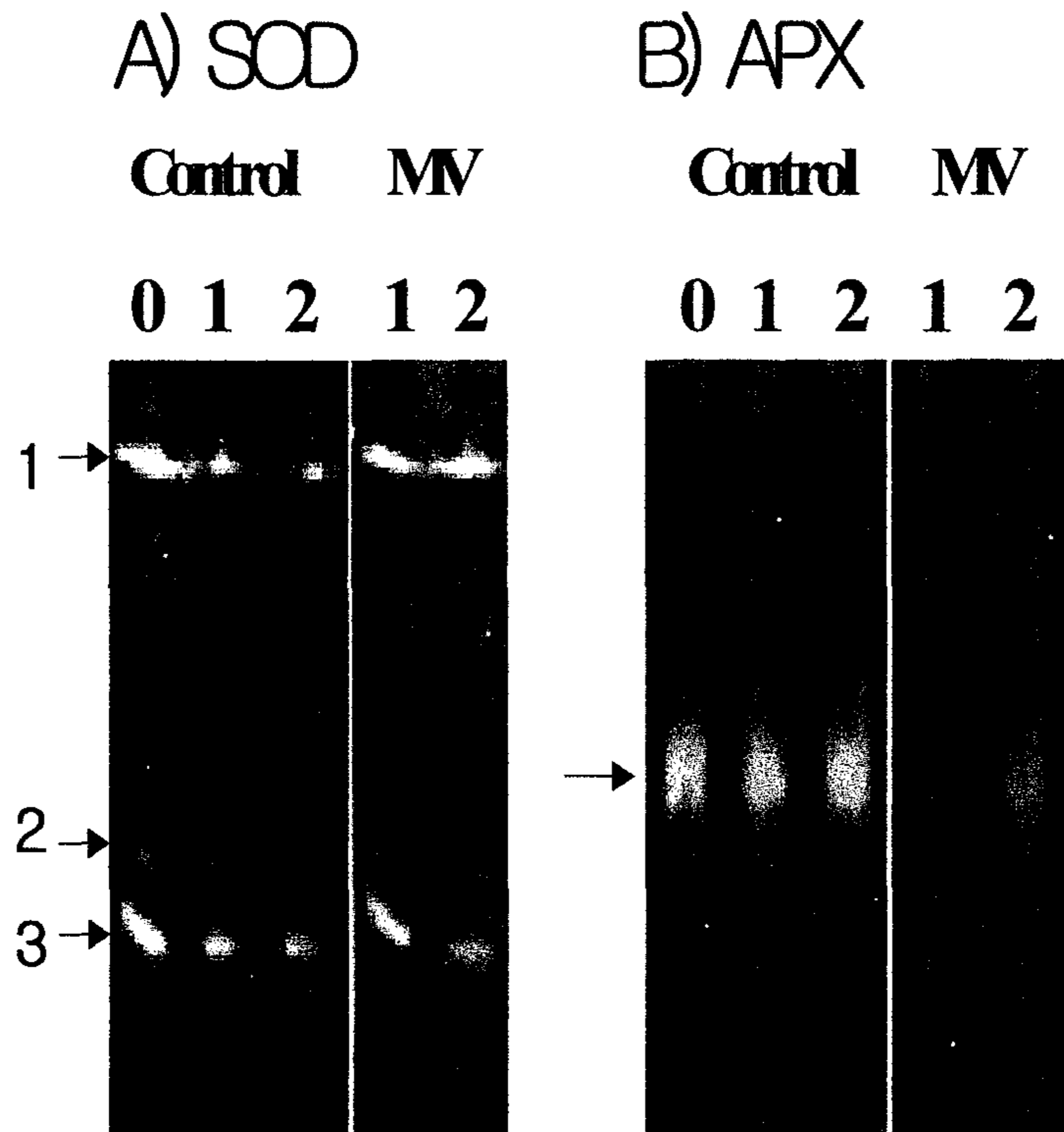
Fig. 137. Zymograms for SOD (*left*) and APX (*right*) in the leaves of cucumber exposed to 10  $\mu$ M methyl viologen for various periods (hrs) under the light.

**Table 67.** MV-induced changes in the actual quantum yield of PSII ( $1 - F/F_m$ ), electron flux at PSII [ $(1 - F/F_m) \times 100 \times 0.5 \times 0.9$ ], PSII excitation pressure ( $1 - qP$ ), nonphotochemical quenching (NPQ), and maximal photosynthetic  $O_2$  evolution ( $P_{max}$ ,  $\mu\text{mol}O_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) of cucumber leaves. Leaf disks were floated on DW (CO) or 10  $\mu\text{M}$  methylviologen (MV) for 2 hrs at an illumination of 100  $\mu\text{mol} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  at  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ . Mean values ( $\pm\text{SE}$ ) for 7 - 9 leaf disks are shown.

Parameter	1-F/F <sub>m</sub>	Electron flu	1-qP	NPQ	P <sub>max</sub>
CO	0.63 $\pm$ 0.03	45.63 $\pm$ 1.26	0.21 $\pm$ 0.04	0.51 $\pm$ 0.09	14.92 $\pm$ 0.62
MV	0.49 $\pm$ 0.03	22.19 $\pm$ 1.40	0.29 $\pm$ 0.04	0.35 $\pm$ 0.04	10.75 $\pm$ 0.38



**Fig. 138.** A, Maximal quantum yield of PSII (Fv/Fm) and B, the extent of P700+ (A<sub>820</sub>/A<sub>820</sub>) as a function of MV treatment (hr) at an irradiance of 100 mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> in cucumber leaves. Mean values (SE) for 5-7 leaf disks are shown.



**Fig. 139.** Zymograms for superoxide dismutases (A) and ascorbate peroxidase (B) from the cucumber leaves exposed MV for 2 hrs at an irradiance of  $100 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . In A, Band 1 was identified as Mn-SOD, and Bands 2 and 3 as Cu/Zn-SODs. Each number in the panel represents period (hr) for MV treatment.

저선량 방사선 조사가 고추의 생장과 항산화 효소계에 미치는 효과는 다음과 같다. 저선량 조사가 고추 생장에 미치는 효과를 조사하였다. 저선량 조사에 고추의 엽록소 함량, 엽록소 a/b 비, 수용성 단백질, 잎의 생중량 및 길이를 측정된 결과, 모든 지표가 증가하였음을 알 수 있었다(표 68).

이러한 저선량에 의한 생장 증가와 항산화 효소계의 활성화 증가와의 상관 관계를 조사하였다 (그림 140). 엽록체에서 여러 환경스트레스로부터 광합성 기구를 보호하는 것으로 알려진 SOD와 APX 중에서 APX 활성도가 저선량 감마선 조사에 의해서 현저하게 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 저선량 조사에 의한 생산성 증가는 활성산소종 소거계의 활성화 증가에 따른 광합성 기구의 보호와 밀접한 관련이 있는 것으로 추정된다.

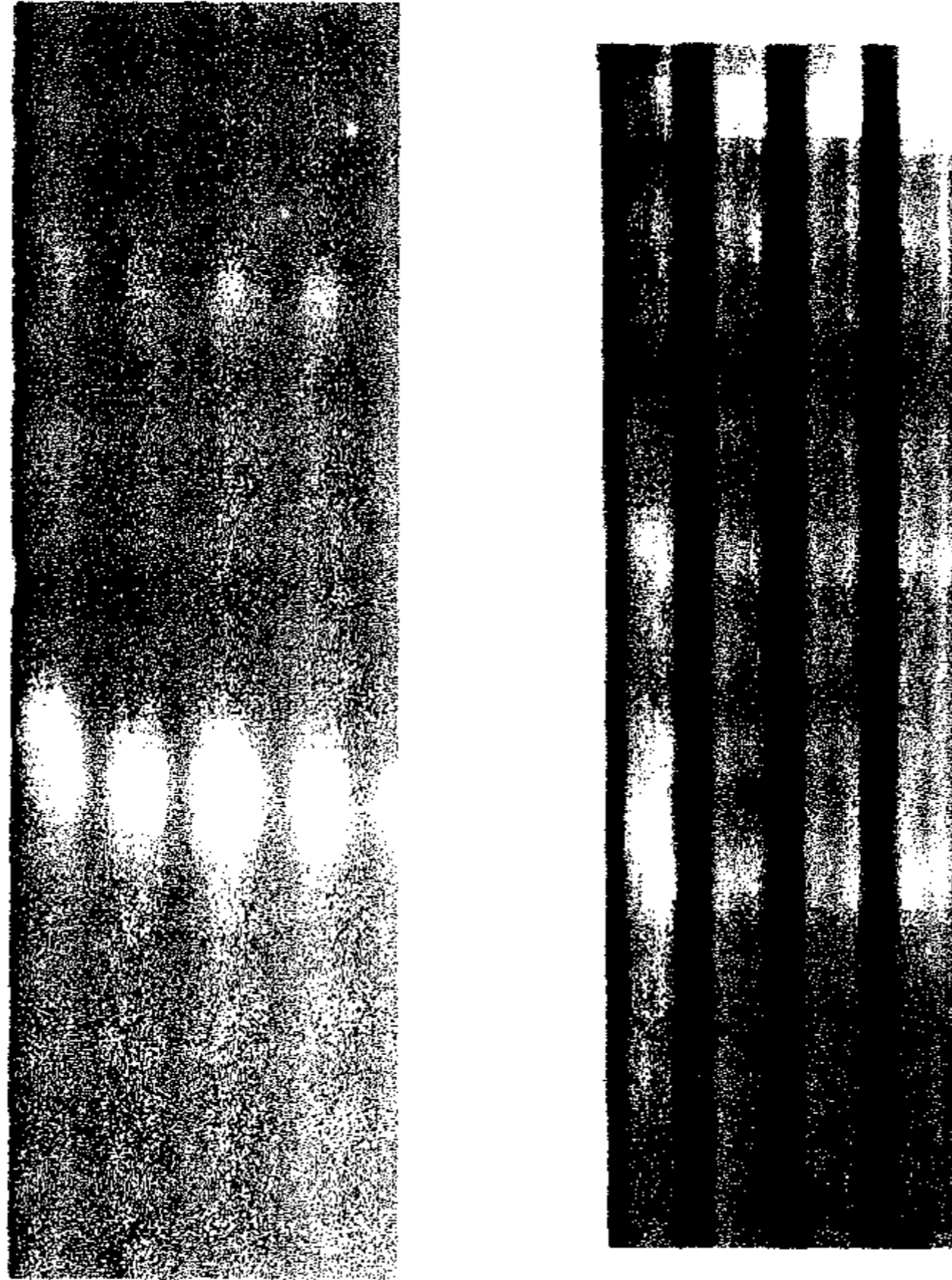
저선량 방사선이 박의 light chilling에 대한 저항성에 미치는 효과는 다음과 같다. 저선량 조사에 의한 항산화 효소계의 활성화 증가(그림 141)는 저선량 처리가 식물의 abiotic stress에 대한 내성 증대를 야기할 수 있을 것으로 추정된다. 따라서 이러한 가설을 검증하고자 저선량 처리된 박에서 잎 원형질편을 만든 후 5°C의 저온 및 100  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 광 조건에서 48시간 동안 처리하면서 광계II의 광억제에 대해서 조사하였다. 그 결과 저선량 처리가 박 잎의 광계II 활성화 감소를 어느 정도 지연하는 것으로 나타났다.

오이 잎의 protein expression profile은 다음과 같다. 환경스트레스를 받은 오이 잎에서 단백질 발현 패턴의 변화를 살펴보고자 이차원 전기영동을 실시하였다. 먼저 pale green을 띠는 돌연변이체(그림 142B)와 야생종 (그림 142A)의 단백질 발현 변화를 조사한 여러 개의 단백질 발현이 현저히 저하되는 것으로 나타났다. 따라서 현재 감마선 조사된 고추와 박에서 이차원 전기영동 실험을 수행하고 있다.

**Table 68.** Changes in chlorophyll (Chl; mg cm<sup>-2</sup>), leaf length (cm) and fresh weight(mg/leaf) of pepper leaves grown 3 weeks under a glass house. Seeds were irradiated by various low dose gamma radiation.

Dose(Gy)	Chl	Chl a/b	<u>Leaf</u>	
			length	weight
0	166.04	4.38	2.56	46.2
1	206.77	5.00	3.34	71.5
4	170.94	5.21	3.02	64.9
8	216.05	4.76	3.39	78.2

Dose(Gy) 0 1 4 8 0 1 4 8



**Fig. 140.** Effects of low-dose gamma radiation on APX(left) and SOD(right) enzyme activities from primary leaves of pepper.



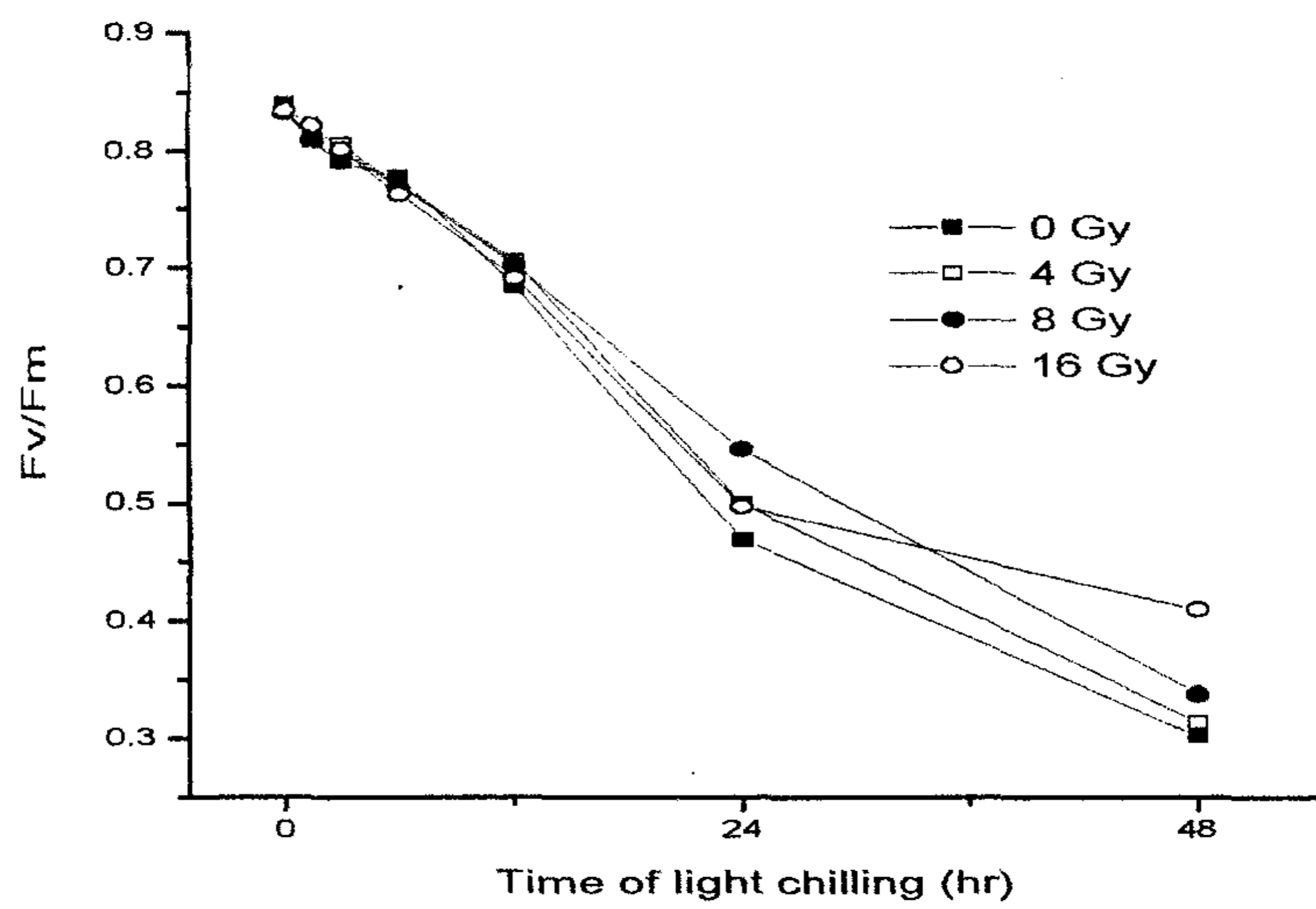


Fig. 141. Effects of light chilling on PSII potential quantum yield in the leaves of pumpkin exposed light-chilling stress for 48 hrs.

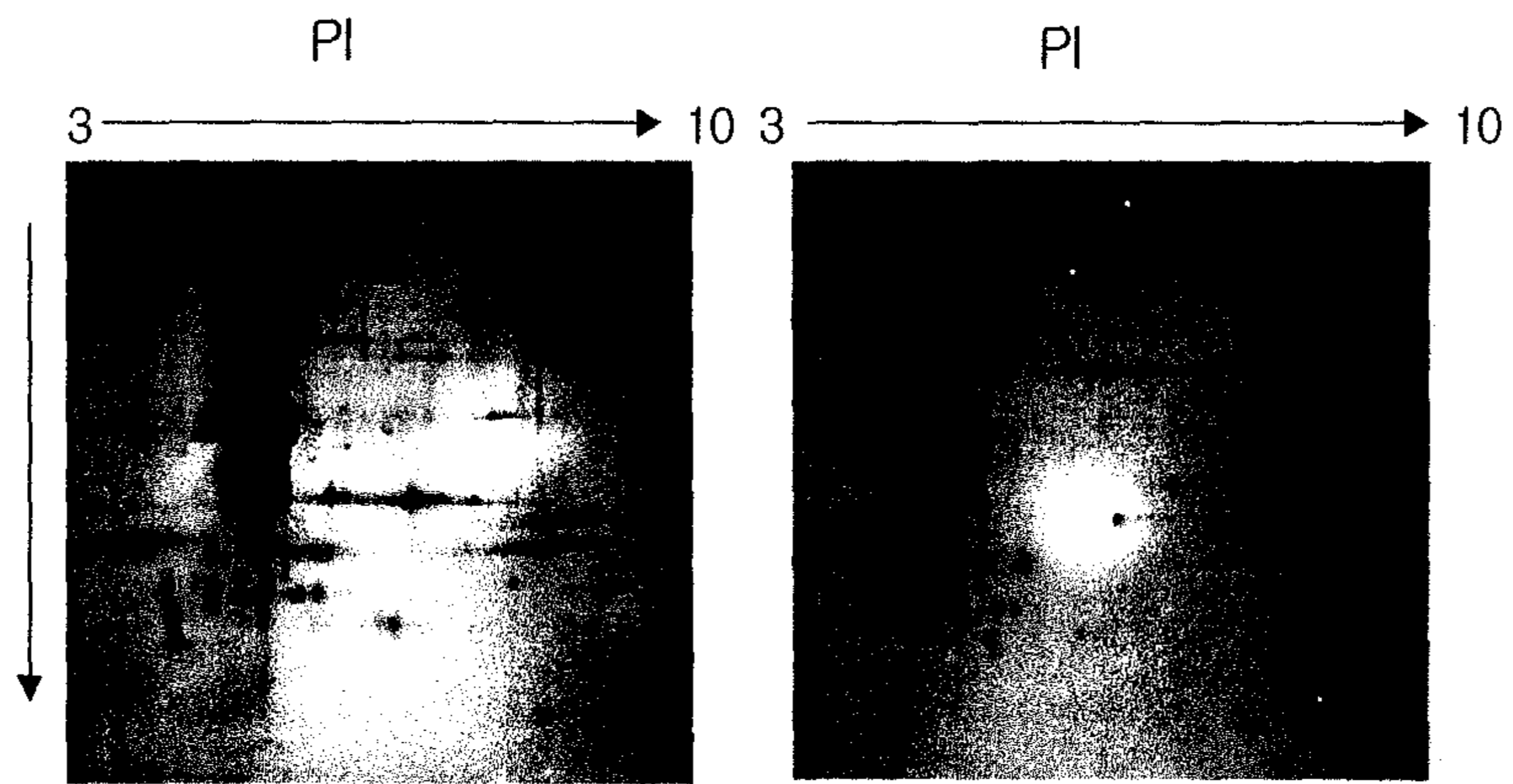
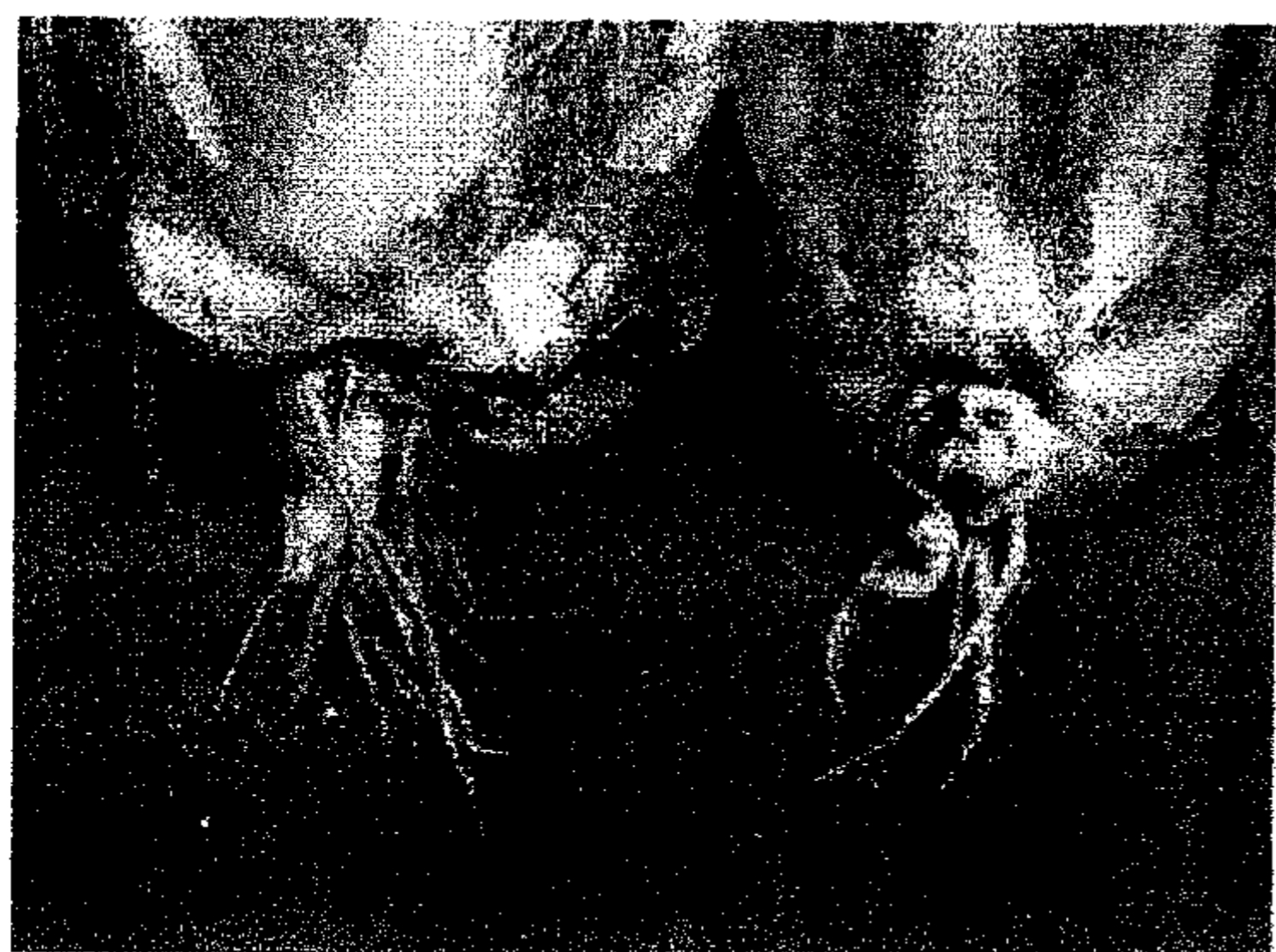


Fig. 142. Profiles of protein expression in cucumber leaves, wild type (left, A) and pale green(right, B) variety.

#### **마. 저선량 조사에 의한 배추 무사마귀병 저항성 유기**

저선량 감마선 조사시 모든 조사에서 공히 무조사에 비해 약간의 생육 촉진 효과가 나타났으나 조사간에는 차이가 있었다. 그 가운데 4 Gy 조사 효과가 가장 우수하였다.

4 Gy 조사를 했을 때 배추 무사마귀병 방제효과가 육안으로 증명되었다.



Control

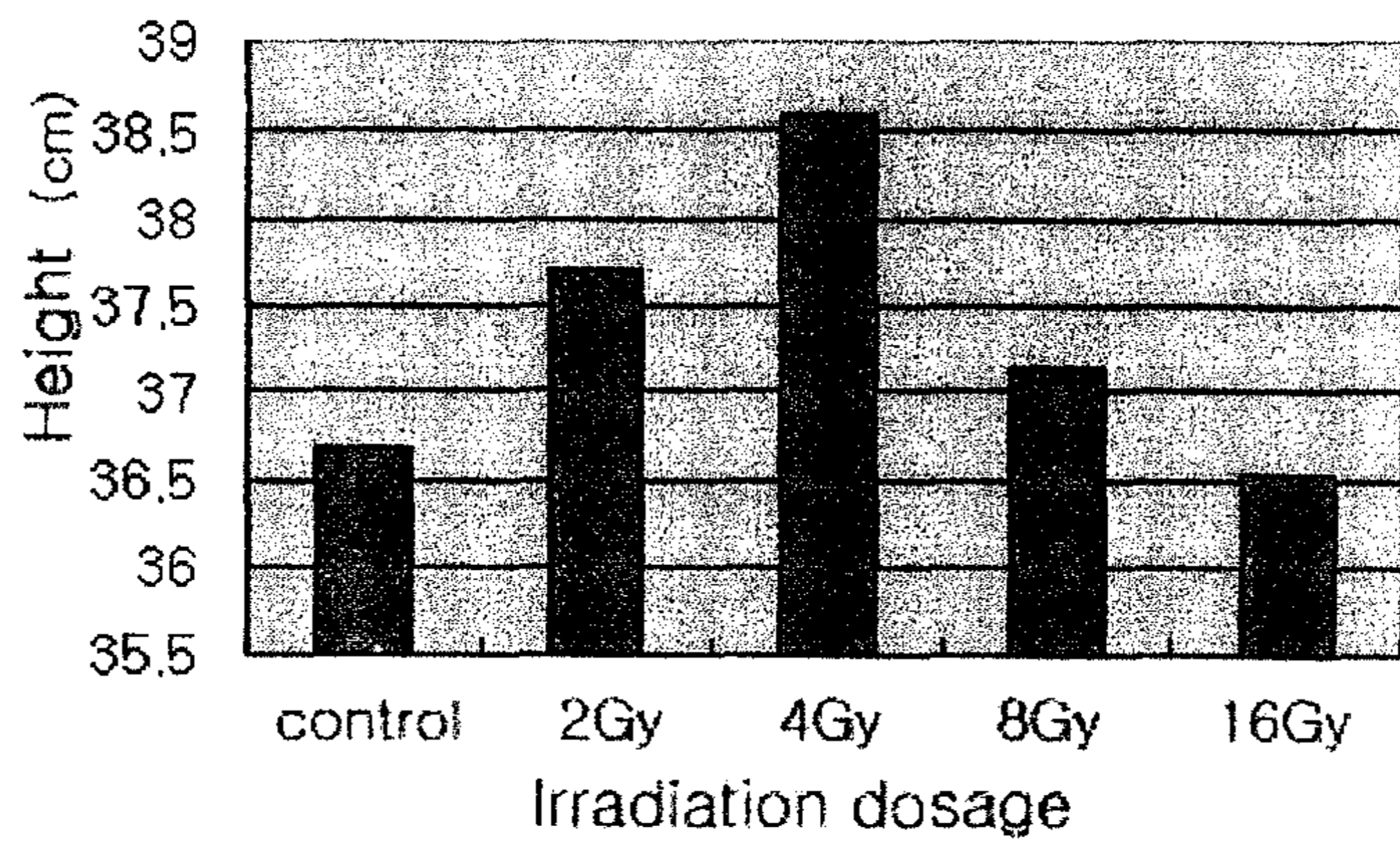


4 Gy

**Fig. 143.** Suppression effect of gamma irradiation on club root disease of chinese cabbage

**Table 69.** Effect of gamma radiation on weight of chinese cabbage

Irradiation dosage	Weight				promoting effect(%)
	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Mean	
Control	2184	2533	1922	2213	-
2 Gy	2300	2633	2133	2355	6.4
4 Gy	2611	2789	2700	2700	22.0
8 Gy	2533	2711	2478	2574	16.3
16 Gy	2467	2789	2378	2545	15.0



**Fig. 144.** Comparison of plant height between chinese cabbage irradiated with different dosage of gamma radiation

## 10. 방사선에 의한 식물의 항산화 기구 해석 및 이용

### 가. 방사선 유도성 인자(단백질 및 DNA)의 탐색

고추 식물체 및 현탁배양세포에 방사선을 조사한 후 경시적인 단백질 함량의 변화를 측정하였고, 전기영동을 실시하여 단백질패턴의 변화를 관찰하였다. 한편 방사선 유도성(gamma radiation inducible) 유전자의 탐색을 위해 cDNA screening과 60여종의 random primer를 이용한 RT-PCR을 실시하였다. 본 실험에 사용된 방사선의 소스는  $^{60}\text{Co}$  감마선이었으며 조사한 식물재료는 즉시 액체질소에 보존하거나 일정시간이 지난 후 시료를 채취하였고, 종자 및 유식물의 경우는 pot에 재배하였다. 단백질 함량의 변화는 다음과 같다. 식물재료는 고추 현탁배양세포와 실생묘를 이용하였으며, 현탁배양세포는 계대배양 후 4일째 된 대수생장기에, 실생묘는 성장조절실에서 자란 6-8엽기에 감마선을 각각 0, 1, 5, 10, 20, 50 Gy씩 조사하였다. 조사 후 0, 1, 3, 7일 후에 단백질분석 kit(Biorad Protein Assay Kit)를 이용하여 단백질함량을 측정하였다.

그림 145는 방사선을 조사한 현탁배양세포의 단백질 함량을 나타낸 것이다. 방사선 1 Gy 및 5 Gy 조사에서는 조사 후 3일까지는 단백질 함량이 증가하다가 7일째에는 감소하여 무조사 세포와 비슷하였고, 10 Gy 조사에서는 조사 1일 후에 단백질 함량이 가장 높았으나 그 이후에는 차츰 감소하였다. 고선량인 20 Gy 및 50 Gy 조사에서는 조사 후 3일까지는 변화가 없었으나 7일째에는 단백질 함량이 감소하였다.

식물체의 잎 단백질은 방사선 조사에 의해 큰 변화가 관찰되지 않았으나, 1 Gy 및 5 Gy를 조사한 후 1일 및 3일이 경과한 식물체에서는 약간 증가하는 경향이였다(그림 146). 고선량인 50 Gy를 조사한 식물체는 배양세포와 마찬가지로 조사 후 7일째에는 무조사보다 단백질 함량이 감소하였다.

방사선을 조사한 배양세포나 식물체의 단백질함량 측정 결과를 종합해 보면, 저선량인 1 Gy 및 5 Gy에서는 조사한 후 2-3일간은 무조사보다 단백질의 함량이 증가하는 경향을 보였고, 고선량인 20 Gy 및 50 Gy를 조사한 경우는 단백질함량의 증가는 관찰되지 않으나 조사 후 7일이 경과한 세포에서는 무조사보다 단백질 함량이 감소하였다. 고선량 방사선은 생물체에 치명적인 피해를 가하여 생물의 생존에 위협적인 존재이나 저선량의 방사선은 생물의 생리활성을 촉진한다는 보고가 있다<sup>62,115)</sup>. 본 실험에서 1 혹은 5 Gy 정도의 저선량 방사선을 조사한 식물 단백질 함량이 일시적으로 증가되는 것이 저선량 방사선의 생리활성촉진효과와 관련이 있을 것으로 추정된다.

방사선을 조사한 식물체나 배양세포를 정상상태로 되돌려 일주일 정도 경과한 후에는 저선량 방사선에 의해 증가되었던 단백질 함량이 다시 무조사와 같은 수준으로 감소하는 것으로 보아 저선량 방사선에 의한 초기의 단백질함량 증가효과는 일시적 현상으로 판단된다. 한편 고선량인 20 Gy 또는 50 Gy 조사는 조사 후 일주일째에 단백질 함량이 무조사보다 감소하는 것으로 보아 고선량 방사선 조사 후 식물의 지속적인 생장에 억제적 요인으로 작용할 것으로 추정된다.

단백질 발현 패턴은 다음과 같다. SDS-PAGE에 의한 「1차원전기영동」과 SDS-PAGE 및 IEF에 의한 「2차원전기영동」을 실시하여 방사선 조사에 의하여 특이적으로 유도되는 단백질 혹은 polypeptide를 탐색하였다. 한편, 방사선을 조사한 배양세포로부터 poly(A)<sup>+</sup>RNA를 추출하여 이들의 유전정보를 이용하여 기내합성(*in vitro* translation)된 단백질 패턴을 알아보기 위하여 하여 이차원전기영동을 실시하였다. 이차원전기영동은 IEF(등전점전기영동, isoelectric focusing)와 SDS-PAGE 순으로 실시하였다.

단백질 전기영동은 생물체가 스트레스에 노출되었을 때 세포내의 단백질을 어떻게 변화시키는가를 관찰하는데 이용되며, 스트레스 특이성 단백질 혹은 polypeptide를 동정하고 관련 유전자를 탐색하는 단서를 제공할 수 있다. 방사선 스트레스에 노출된 식물체가 단백질 패턴을 변화할 수 있는 유형은 다음 몇 가지로 요약될 수 있다. 첫째는, 특정한 단백질의 소실이다. 이는 고선량의 방사선이 기존의 세포내 단백질을 변성시키거나 파괴함으로써 발생할 수도 있고, 그 단백질을 코딩하는 유전자의 발현을 억제하거나 유전자 자체에 손상을 가하여 나타날 수도 있다. 둘째는, 새로운 단백질의 생성이다. 생체내 새로운 단백질의 생성은 기존의 단백질로부터 변형되어 생성된 것이기 보다 방사선에 의해 활성화된 특성의 유전자가 새로운 polypeptide를 합성함으로써 이루어 질 것으로 추정된다. 새로이 생성되는 단백질은 주로 방사선을 조사한 후 일정한 시간이 경과한 후에 관찰되는데, 이들 단백질은 방사선 유도성 유전자(radiation inducible gene)를 탐색하는데 중요한 단서를 제공하며, 식물이 방사선 스트레스에 적응하면서 생존해 나가는데 필요한 저항성 도는 내성 인자로 작용할 가능성이 높다. 셋째는, 특정 단백질의 함량을 변화시키는 것이다. 함량변화는 방사선 스트레스에 노출되었을 때 증가(up-regulated)되거나 감소(down-regulated)되는 두 가지 유형을 들 수 있는데, 이들 단백질은 식물이 방사선에 대하여 나타내는 다양한 대사반응을 예측하는 지표로 이용될 수 있을 것이다.

방사선을 조사한 후 식물체나 배양세포를 정상상태에 두고 일정한 간격으



로 단백질을 추출하여 SDS-PAGE 전기영동을 실시한 결과 새로운 단백질 밴드가 생성되거나 기존의 단백질의 함량이 증가하는 등 다양한 유형의 반응을 하는 것으로 나타났다.

그림 147은 고추 배양세포에 1, 10, 50 Gy를 조사하고 0, 24, 48시간이 경과한 후의 단백질 패턴을 나타낸 것이다. 방사선을 조사한 직후와 24시간 후의 단백질 패턴은 조사 선량에 관계없이 무조사와 동일한 패턴을 보였다. 그러나 48시간 후의 단백질패턴은 'a' 로 표시된 부위의 polypeptide가 현저히 증가하였는데, 특히 50 Gy보다 1 및 10 Gy를 조사한 세포에서 뚜렷한 증가가 관찰되었다.

그림 148는 고추 식물체에 1, 5, 10, 50 Gy를 조사한 후 0 및 24시간 후에 단백질 패턴을 나타낸 것이다. 방사선 조사에 의해 변화되는 5개의 단백질 밴드(a, b, c, d, e)가 확인되었다.

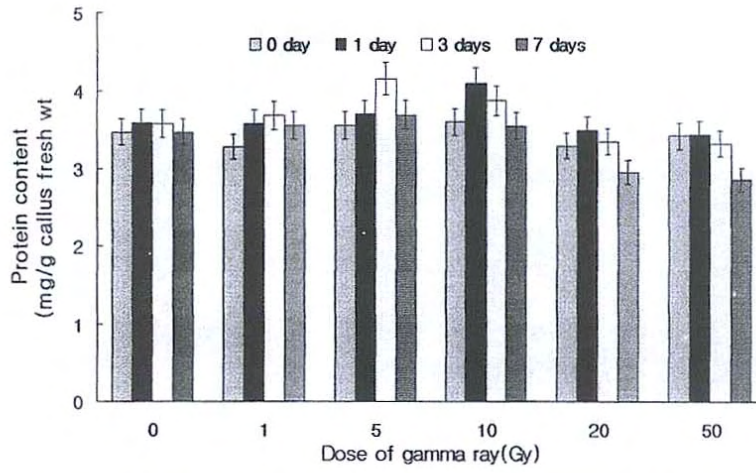
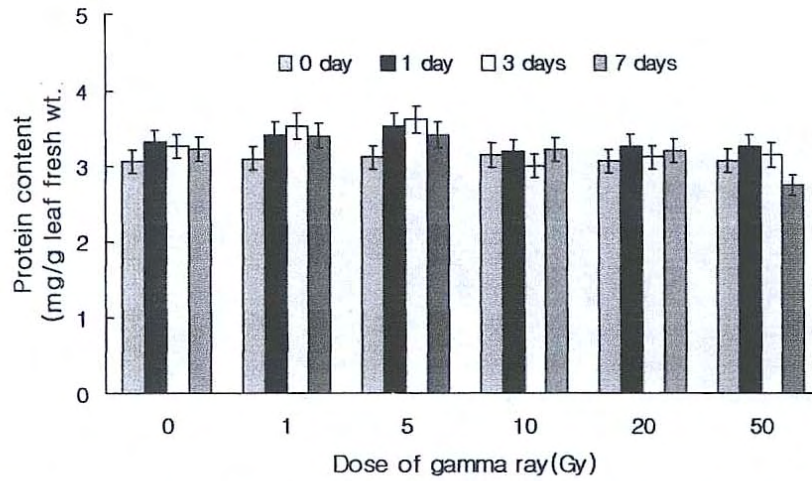


Fig. 145. Effect of gamma radiation on protein content in pepper suspension cell. Protein content was measured at 0, 1, 3, 7 days after irradiation.



**Fig. 146.** Effect of gamma ray irradiation on protein content in pepper leaves. Protein content was measured at 0, 1, 3, 7 days after irradiation.

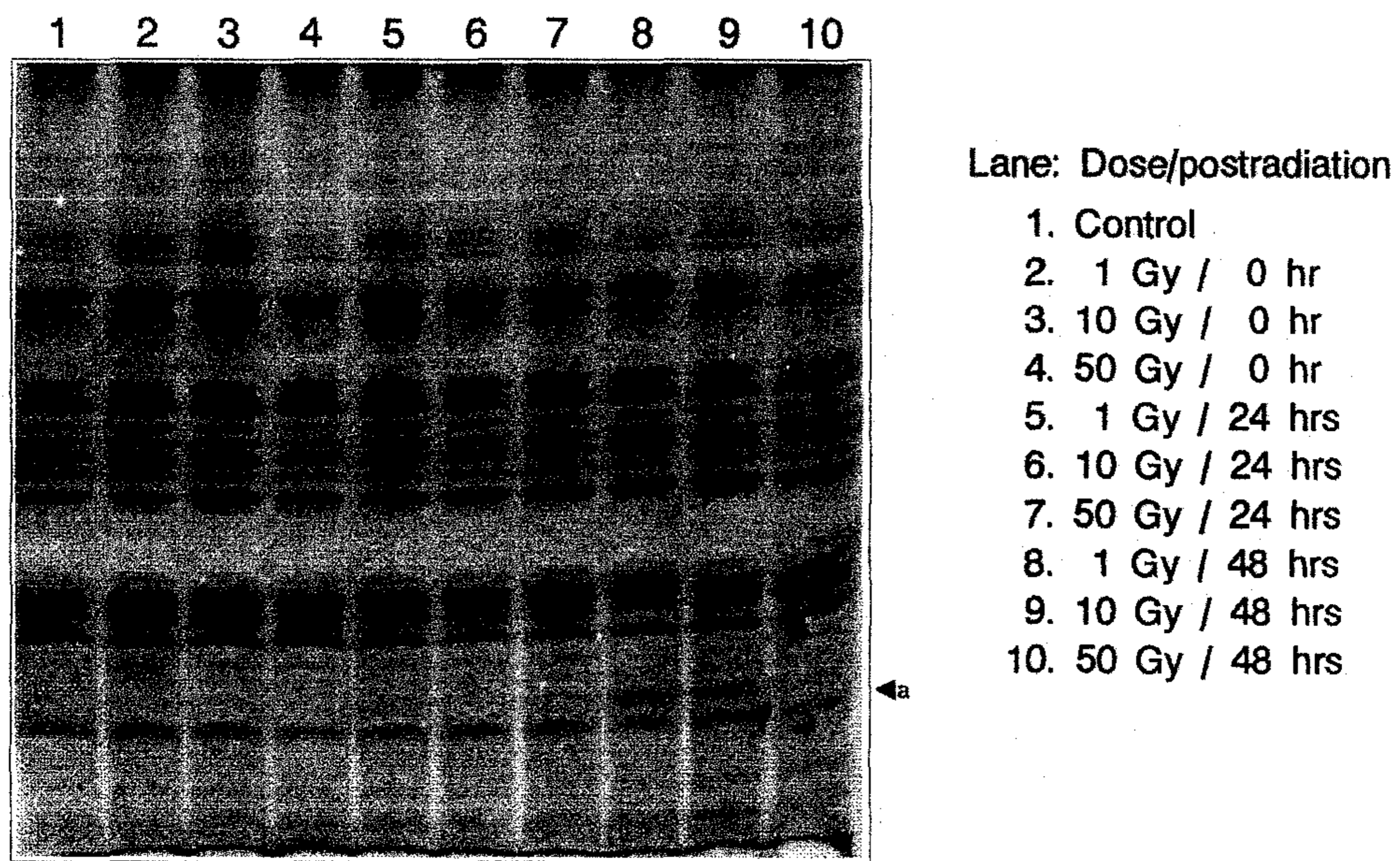
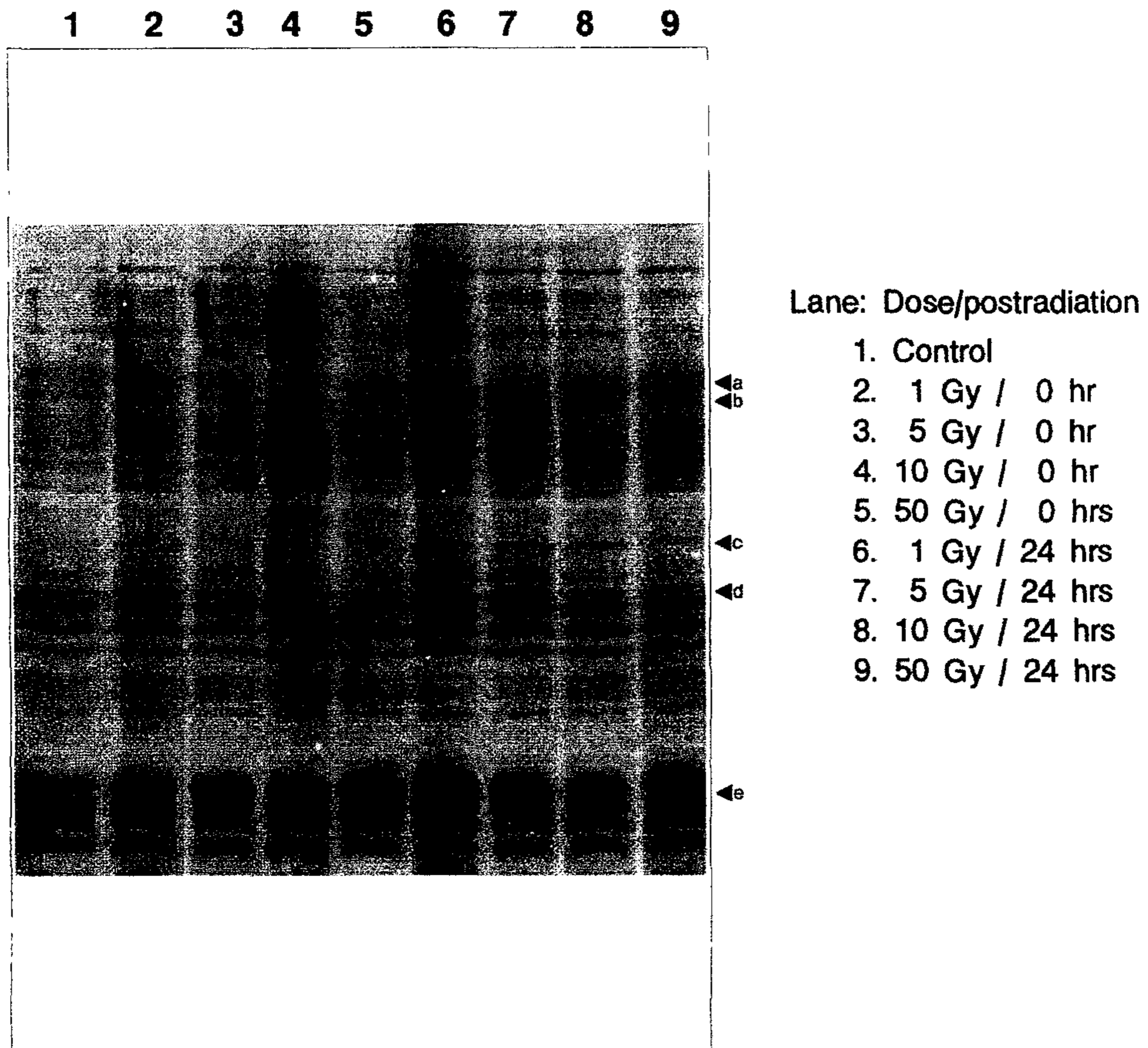


Fig. 147. SDS-PAGE of protein from pepper suspension cell irradiated with gamma radiation.



**Fig. 148.** SDS-PAGE of proteins from pepper leaf irradiated with gamma radiation.

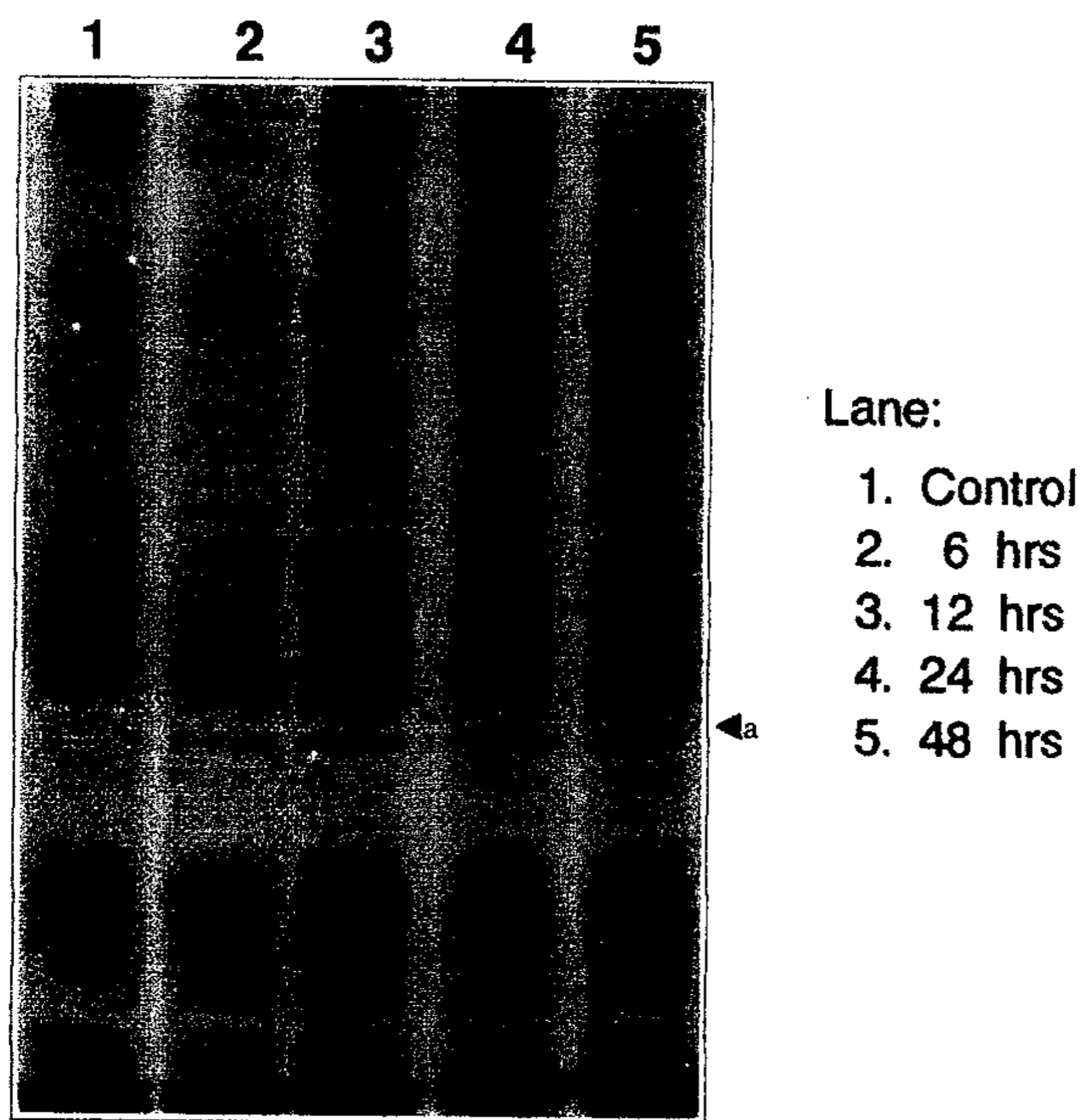
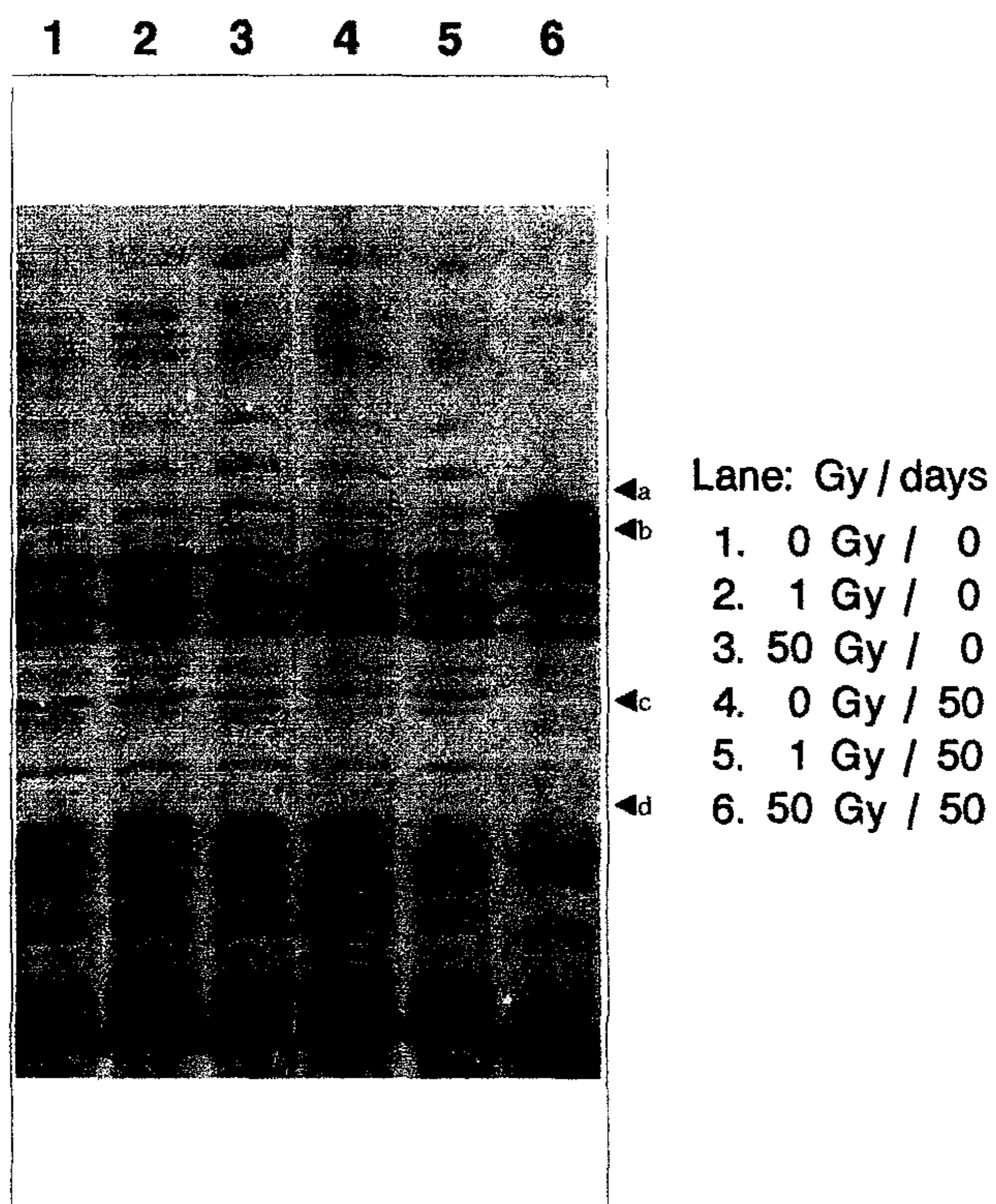


Fig. 149. SDS-PAGE of pepper leaf protein after 1 Gy gamma radiation. Protein was extracted at 6, 12, 12, 24 and 48 hours after irradiation.



**Fig. 150.** SDS-PAGE of protein extracted from new appeared pepper leaf irradiated with gamma radiation. Protein was extracted at 0 and 50 days after irradiation.

그림 149은 저선량인 1 Gy를 고추식물체에 조사 후 경과한 시간별로 단백질을 관찰하였다. 저선량인 1 Gy 조사후 6시간째부터 'a'로 표시된 단백질의 함량이 현저히 증가하였다.

그림 150은 방사선을 1 및 50 Gy를 조사하여 조사직후와 50일이 경과한 후에 새로 형성되는 잎(조사 직후에는 크기가 5 mm이하인 잎을 시료로 채취하였음)으로부터 단백질을 분리한 것이다. 방사선을 직접 조사한 잎이 아닌 방사선 조사 후 정상상태에서 새로 출현한 잎의 단백질 패턴은 무조사 및 1 Gy 에서는 거의 변화가 없었으나 50 Gy를 조사한 식물체의 50일 후 단백질 패턴은 현저한 변화가 있었다.

그림 151는 무조사 식물체와 10 및 50 Gy를 조사한 식물체의 잎 단백질을 친수성, 소수성 및 막 결합 단백질로 구분하여 이차원 전기영동을 실시한 gel 사진이다. 각각의 단백질 구획으로부터 방사선 조사에 의해 변화되는 수종의 polypeptide를 관찰할 수 있었다.

변화된 단백질 spot의 수를 보면 친수성(hydrophilic) 단백질 5개(a1-a5로 표시), 소수성(hydrophobic) 단백질에서 5개(b1-b5로 표시) 및 강한 소수성(highly hydrophobic) 및 막 결합(membrane bound) 단백질에서 2개(c1-c2로 표시)가 관찰되었다. 변화되는 단백질의 유형은 방사선조사에 의해 발현이 증가하는 것(up regulated), 감소하는 것(down regulated), 사라지는 것(disappear), 새로이 합성되는 것(new synthesis)등으로 구분되었다(표 70).

먼저 발현이 증가되는 단백질을 보면 a1 단백질로 무조사에서는 아주 미량이 발현되나 10 Gy 조사에서는 단백질의 양이 현저하게 증가하며 50 Gy 조사에서는 10 Gy 보다는 낮으나 무조사구보다 높았다. 50 Gy 조사에서는 변화된 단백질의 대부분의 사라지거나 함량이 감소하는 것으로 나타났으나 10 Gy 조사에서는 다양한 변화가 관찰되었다. a2, b3, b4 단백질은 10 Gy 조사에서는 변화가 없으나 50 Gy조사에서는 현저히 감소하였고, a3 단백질은 10 Gy에서는 변화가 없으나 50 Gy조사에서는 단백질이 거의 사라졌다. 10 Gy 조사에서 새롭게 합성되는 단백질은 a4, c1, c2 등 3개가 관찰되었는데, 특히하게도 이들 단백질은 50 Gy의 고선량 조사에서는 나타나지 않았다. b1과 b2단백질은 저선량인 10 Gy조사에서도 그 함량이 급격히 감소하는 것으로 나타났다(표 70).

이차원전기영동의 결과로 보아 방사선에 노출된 식물체는 단백질의 함량을 증가 또는 감소하거나 새로운 단백질을 합성하는 등 다양한 방법으로 반응한다는 것을 알 수 있었다. 발현이 증가하거나 새로이 생성되는 단백질은



식물의 방사선에 대한 적응 기작과도 큰 관련이 있을 것으로 추정된다. 특히 새로이 생합성되는 단백질은 방사선에 의해 활성화된 특이적인 유전자가 존재함을 시사하고 있다. 본 실험에서 밝혀진 a4, c1 및 c2 단백질은 방사선 유도성 유전자를 탐색하는 단서를 제공하며, 활성이 증가하는 a1 단백질도 방사선에 대한 식물의 적응 기작과 관련지어 계속 연구를 할 필요가 있을 것이다.

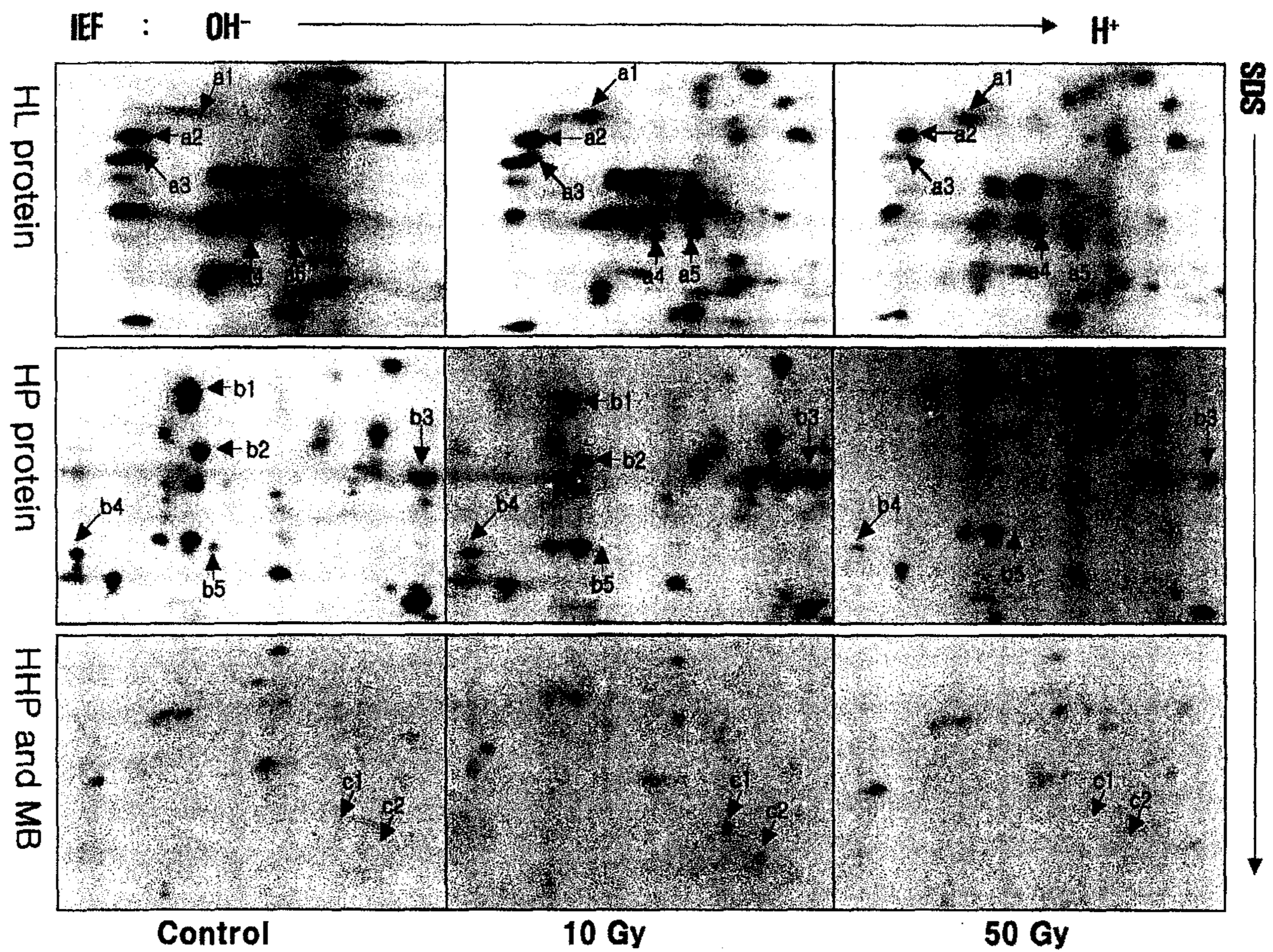


Fig. 151. Two dimensional electrophoresis of pepper leaf protein irradiated with 0, 10 and 50 Gy of gamma radiation. HL: hydrophilic protein, HP: hydrophobic protein, HHP and MB: highly hydrophobic and membrane bound protein.

**Table 70.** Modification of protein spots by gamma radiation through two dimensional electrophoresis.

Properties	Spot no.	Dosage of gamma radiation	
		10 Gy	50 Gy
Hydrophilic	a1	Up regulated	Up regulated
	a2	No change	Down regulated
	a3	No change	Disappear
	a4	New synthesis	Disappear
	a5	No change	Disappear
Hydrophobic	b1	Down regulated	Down regulated
	b2	Down regulated	Down regulated
	b3	No change	Down regulated
	b4	No change	Down regulated
	b5	Disappear	Disappear
Membrane bound	c1	New synthesis	Disappear
	c2	New synthesis	Disappear

\*Spot numbers refer to gel profile of protein on Fig. 1.

방사선 유도성 유전자(cDNA)의 탐색 결과는 다음과 같다. 무조사구 및 50 Gy를 조사한 식물체로부터 total RNA를 추출하고 이로부터 poly(A)<sup>+</sup>RNA를 분리하고 cDNA library를 제작하였다. cDNA screening을 통하여 positive clone을 선발하였다. 몇 개의 positive clone으로부터 plasmid를 분리하여 무조사와 방사선 50 Gy를 조사한 cDNA를 probe로 하여 dot hybridization을 실시한 결과 방사선을 조사한 probe에 특이적으로 강하게 나타나는 clone들을 확인할 수 있었다(그림 151).

Southern dot hybridization에서 방사선을 조사한 cDNA probe에만 특이성을 보였던 clone을 RSC(radiation specific clone)로 명명하고, 그 중 6개(RSC 1 - 6)를 조사한 결과는 표 71과 같다. RSC1은 insert cDNA가 확인되지 않았고, RSC 2, 3, 5, 6번 clone은 Northern에서 특이성이 나타나지 않았으나 RSC4는 약 1.8 kb의 방사선 특이성 transcript가 나타나는 것으로 확인되었다(그림 152).

RSC 4는 cloning vector (pBluescript SK+)에 insert 크기가 680 bp 정도 되는 partial cDNA이었으며, 제한효소로 절단해본 결과 cloning site인 Xho I과 Eco RI 제한효소 사이의 Eco RI 방향에서 약 120bp 떨어진 곳에 Eco RI 제한부위가 있는 것으로 확인되었다(그림 153). 이 유전자의 full sequence cDNA를 탐색 중에 있으며, RSC 4 cDNA가 방사선에 의해서만 특이적으로 발현되는지, 아니면 다른 생물적, 비생물적 스트레스에 의해서도 발현이 가능한 유전자인지 계속 연구 중에 있다.

그림 154는 60개의 random primer를 이용하여 RT-PCR을 실시한 결과, 60개의 primer중 2개의 primer에서 방사선에 의해서 특이적으로 양이 증가하는 band를 가진 cDNA를 확인하였다. 이 clone은 PCR vector에 subcloning이 진행중이다.

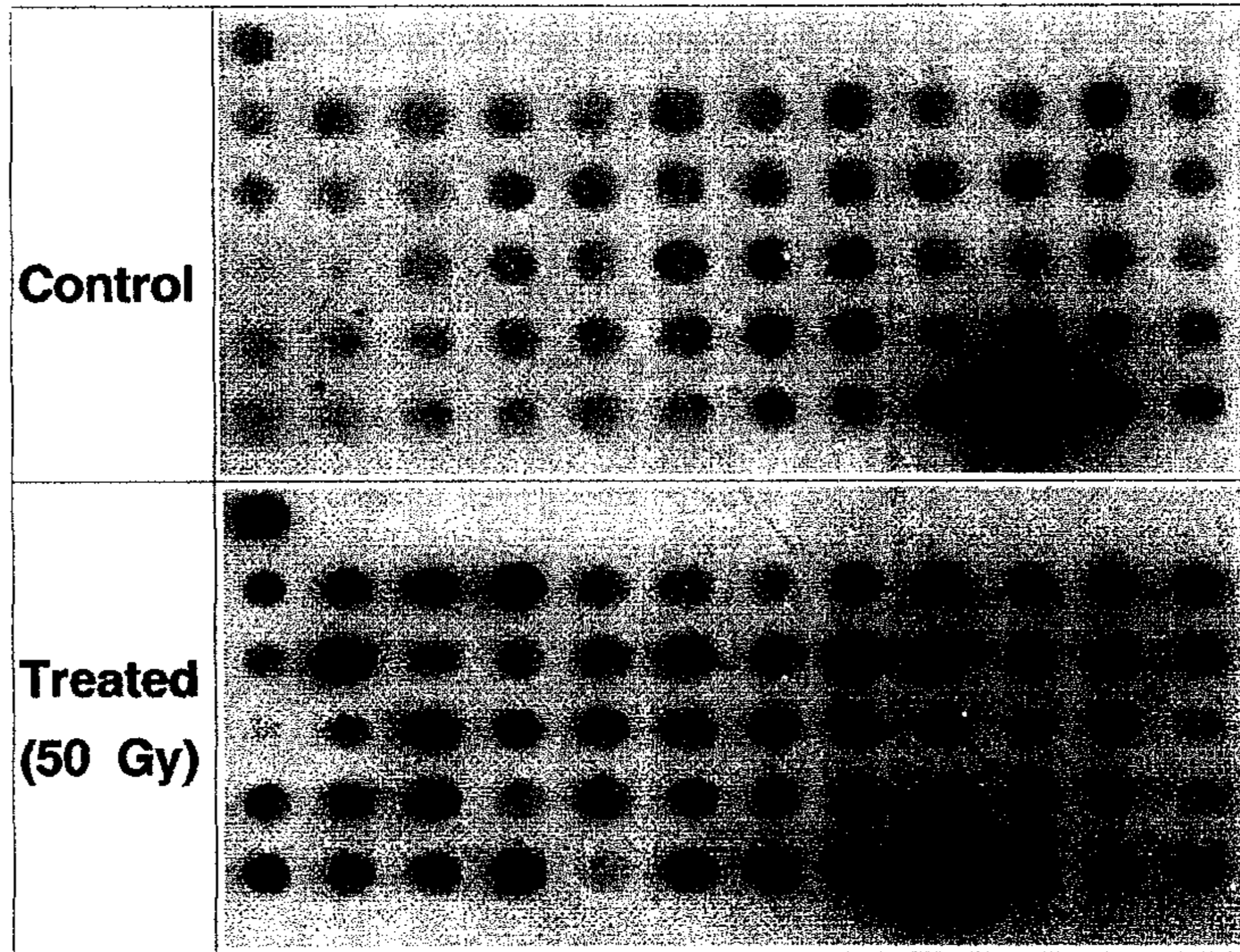


Fig. 152. Dot hybridization of candidate clones of radiation inducible gene probed with control and 50 Gy - irradiated cDNA.

**Table 71.** Results of cDNA screening for gamma radiation specific gene

Clone number	Insert cDNA size(kb)	Specificity	
		Southern dot hybridization	Northern hybridization
RSC 1	-	-	-
RSC 2	590	+	-
RSC 3	590	+	-
RSC 4	680	+	specific for 50 Gy (mRNA 1.8 kb)
RSC 5	590	+	-
RSC 6	590	+	-

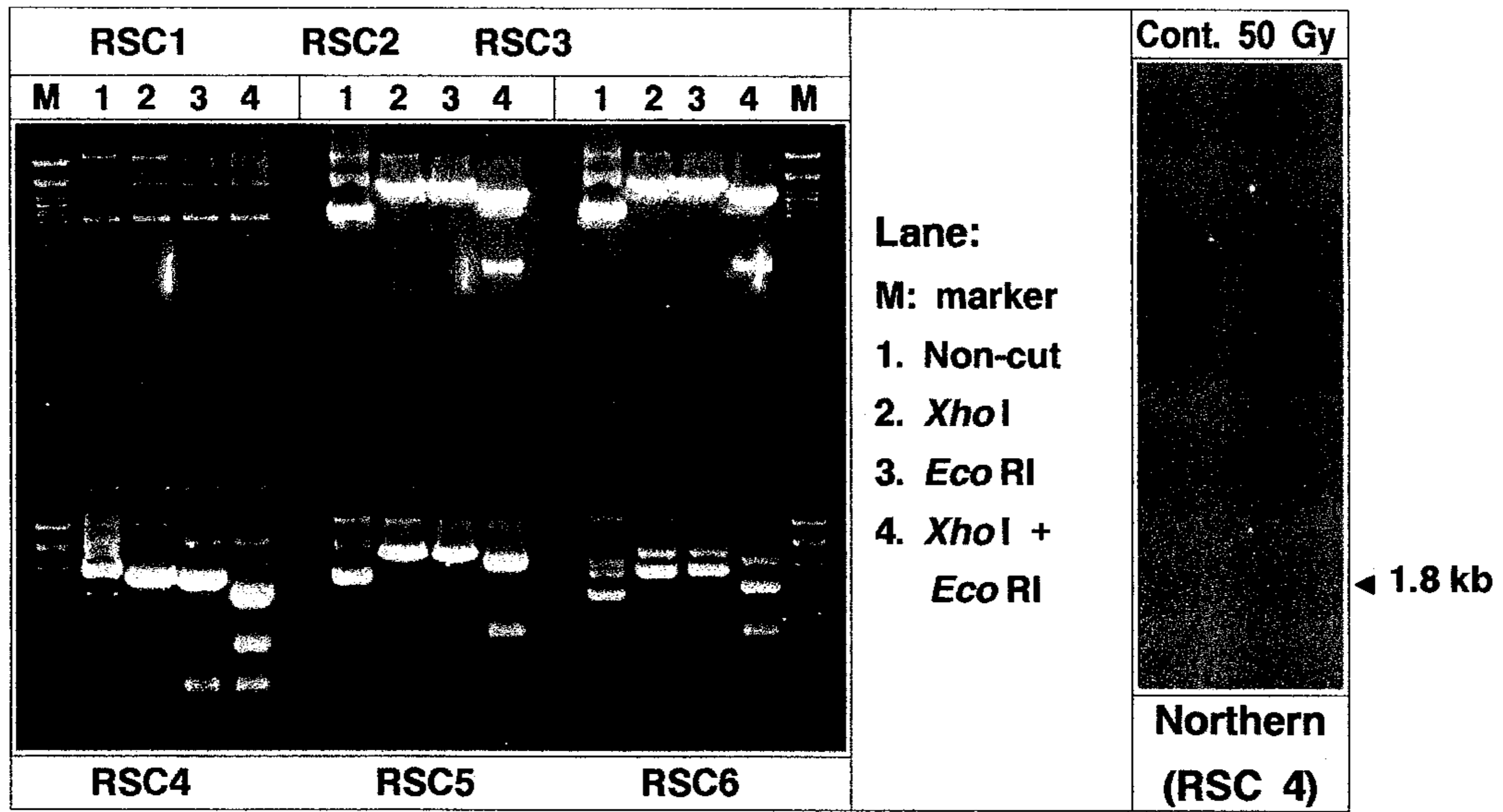
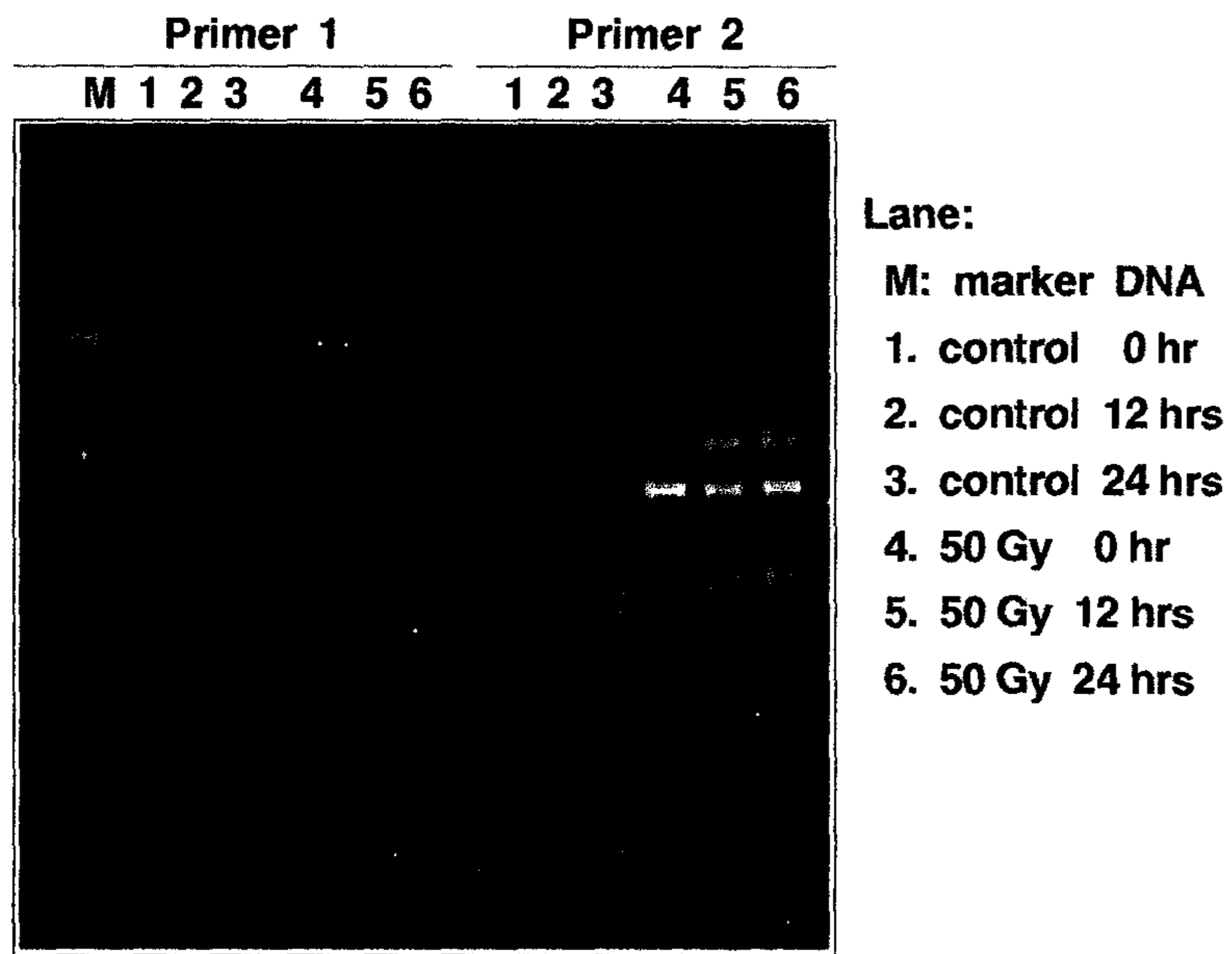


Fig. 153. Restriction analysis of six clones(left) and Northern blot with RSC 4 clone.



**Fig. 154.** RT-PCR of poly(A)+RNA from pepper plant irradiated with gamma radiation.



#### 나. 방사선에 대한 식물의 항산화 기작과 DNA 손상

식물의 항산화 효소 활성 변화는 다음과 같다. 방사선을 조사한 후 일정 시간별로 항산화 효소인 superoxide dismutase(SOD)와 peroxidase(POD)의 활성을 측정하였다(표 72). 모든 선량에서 방사선을 조사한 후 정상 상태에 다시 1-5일이 경과하면 항산화 효소의 활성이 증가하나 증가된 활성이 계속 유지되는 것이 아니라 다시 활성이 감소하는 것으로 나타났다. SOD 효소의 활성을 보면 1 Gy를 조사한 식물체는 5일 후에 26.7 unit/mg protein으로 활성이 최고에 도달하나 10 및 50 Gy를 조사한 식물체는 조사 1일 후에 각각 36.7 및 68.8 unit/mg protein으로 최고 활성을 보여 노출된 선량이 높을수록 효소활성의 증가가 빨리 나타나며, 무조사에 대한 활성의 증가 정도도 높은 경향이였다. POD의 활성도 SOD의 활성과 같이 1, 10, 50 Gy조사에서 각각 1일 후에 18.8, 39.8 및 43.9 x 10<sup>-2</sup> unit/mg protein를 보여 노출된 선량이 증가할 수록 효소 활성도는 높았다. 한편 SOD 및 POD 공히 1 및 10 Gy를 조사한 식물체는 방사선 조사 후 20일에 측정된 효소의 활성이 무조사 식물체와 비슷하나 50 Gy를 조사한 식물체는 무조사보다 낮았다.

식물은 자신의 생활사에서 다양한 종류의 생물적 혹은 비생물적 스트레스에 직면하게 되는데, 이러한 스트레스의 많은 부분이 활성산소종의 증가에 의한 산화적 스트레스를 유발하는 것으로 알려져 있다. 식물에 주로 작용하는 산화적 스트레스원으로는 자외선, 오존, 화학물질 및 환경오염에 의한 산성비 등이 알려져 있으며, 이들 스트레스는 식물세포의 항산화 기구에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 고선량 방사선의 인체 유해작용은 활성산소종의 증가에 의한 세포의 치명적인 독성발휘가 그 원인이며, 특히 감마선의 고 에너지는 세포내의 물분자를 분해하여 hydroxyl 기를 발생하여 강한 산화력을 가지게 되는 것으로 알려져 있다<sup>116,117)</sup> 본 실험에서 방사선 조사에 의해 항산화효소인 SOD와 POD의 활성이 급격히 증가하는 것은 방사선 에너지에 의한 식물의 산화적 스트레스가 증가함에 따른 장애를 극복하기 위한 자체 방어기작으로 추정된다. 그러나 고선량의 방사선에 의한 과도한 산화 스트레스는 항산화효소의 활성증가에도 불구하고 식물세포에 심각한 독성으로 작용하여 지속적인 식물의 생장이 억제되고 더 나아가 개화와 과실의 형성에도 장애를 초래할 것으로 추정된다.

**Table 72.** Effect of gamma radiation on enzyme activity of superoxide dimutase(SOD) and peroxidase(POD) in leaf and suspension cell of pepper.

Enzyme activity	DAT*	Leaf				Suspension cell			
		0	1	10	50Gy	0	1	10	50Gy
SOD activity (U/mg protein)	0	11.7	10.6	15.7	28.8	32.4	29.8	30.3	28.7
	1	12.5	15.4	36.7	68.8	34.8	31.4	77.7	97.8
	5	10.9	26.7	24.7	15.3	29.8	35.4	30.5	40.7
	20	16.7	10.6	14.8	8.7	37.7	33.6	29.7	27.4
POD activity (x 10 <sup>-2</sup> U/mg protein)	0	8.6	8.2	11.7	13.2	18.7	17.6	18.9	20.1
	1	7.3	18.8	39.8	43.9	16.4	19.8	34.9	54.3
	5	8.9	18.7	19.1	16.1	17.6	22.9	18.9	18.7
	20	9.4	8.7	12.4	4.7	20.7	18.4	20.1	20.5

\*DAT: Days after treatment

배양세포의 comet 분석과 DNA 손상에 대한 결과는 다음과 같다. Comet 분석은 세포에 방사선을 조사한 후 핵 DNA가 손상되는 정도를 단세포전기영동법(single cell gel electrophoresis, SCGE)으로 관찰하는 방법으로, 방사선 조사에 의해 손상된 DNA는 전기영동 겔에서 쉽게 이동되므로 핵을 중심으로 긴 꼬리를 형성하게 되는데 이 모양이 혜성의 모습과 유사하여 comet 분석이라고 한다. 그림 106은 단세포전기영동 후 나타나는 핵의 모양이 혜성(comet)처럼 나타나는 모양을 9등급으로 나타낸 것으로, 손상을 받지 않은 핵은 comet의 꼬리가 거의 관찰되지 않으나 손상을 받은 핵은 긴 꼬리를 가진 핵이 관찰된다. Comet에서 머리부분(head)과 꼬리부분(tail)의 길이를 측정함으로써 핵 DNA의 손상정도를 파악할 수 있다.

관찰된 핵의 손상정도에 따라 comet의 머리 부분과 꼬리부분의 모습이 다르게 나타나는데, 핵의 손상이 거의 되지 않은 것을 1등급으로 하고 핵의 손상이 심하여 comet의 머리부분은 전혀 보이지 않고 꼬리부분만 보이는 것을 9등급으로 간주하였다(그림 155). 이를 바탕으로 각 조사별로 관찰된 핵 60개를 분류한 결과는 그림 155와 같다.

무조사 세포는 관찰된 총 60개의 핵 중에서 30개의 핵이 전혀 손상을 받지 않은 1등급으로 분류되고 2등급이 14개로 comet의 뿌리 부분이 거의 없는 것이 대부분을 차지하였다. 그러나 50 및 100 Gy의 방사선을 조사한 세포의 핵은 1등급의 핵 수가 각각 9개 및 7개로 줄어드는 반면, 꼬리가 긴 comet의 모양을 하는 4등급 이상의 핵이 현저히 증가하는 것을 볼 수 있었다(그림 156). 이는 방사선을 조사한 배양세포의 핵 DNA가 심각한 손상을 받게 된다는 것을 의미하며 고선량 방사선 조사에 의한 돌연변이 유발의 가능성을 강하게 시사하고 있다.

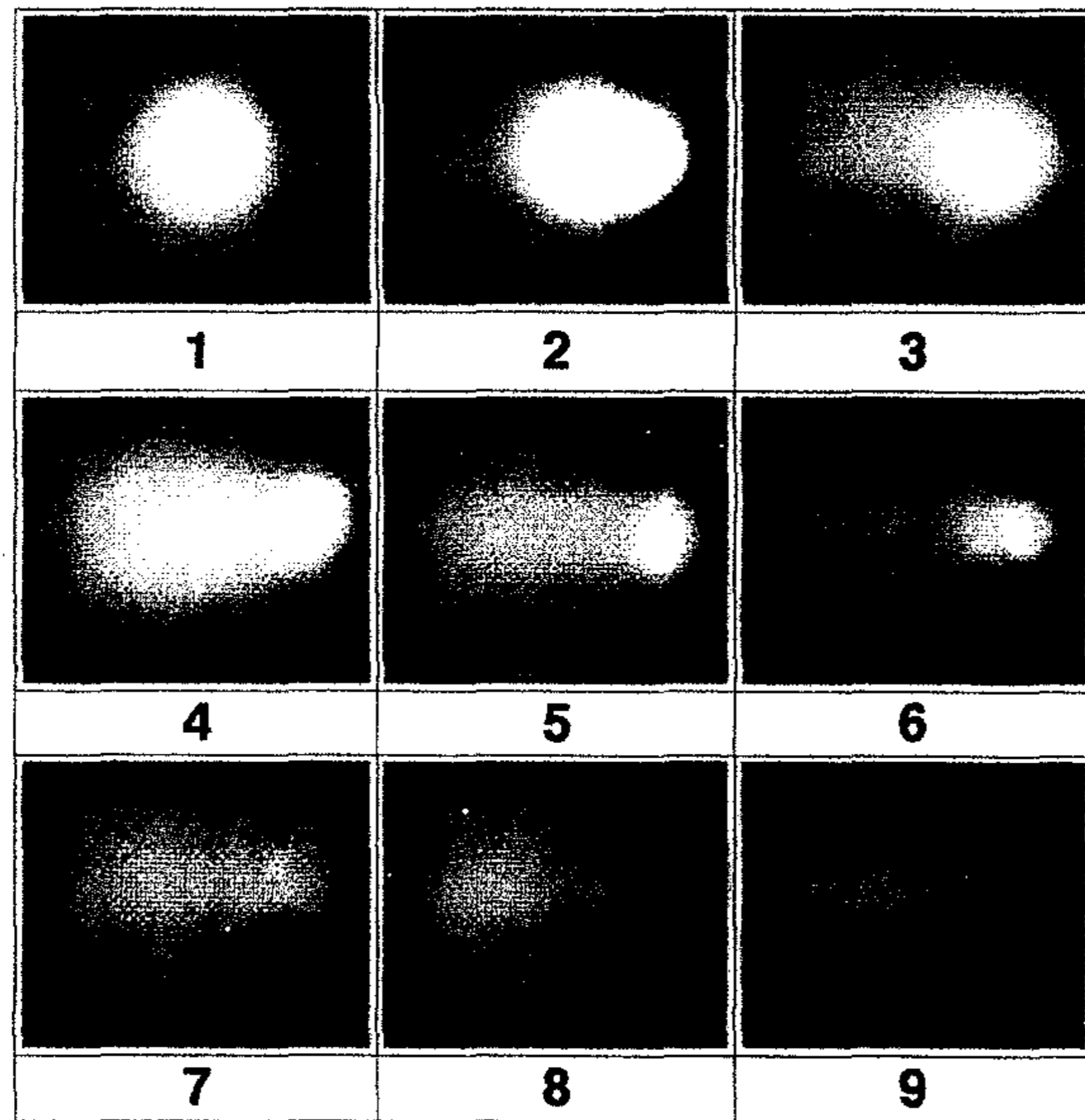
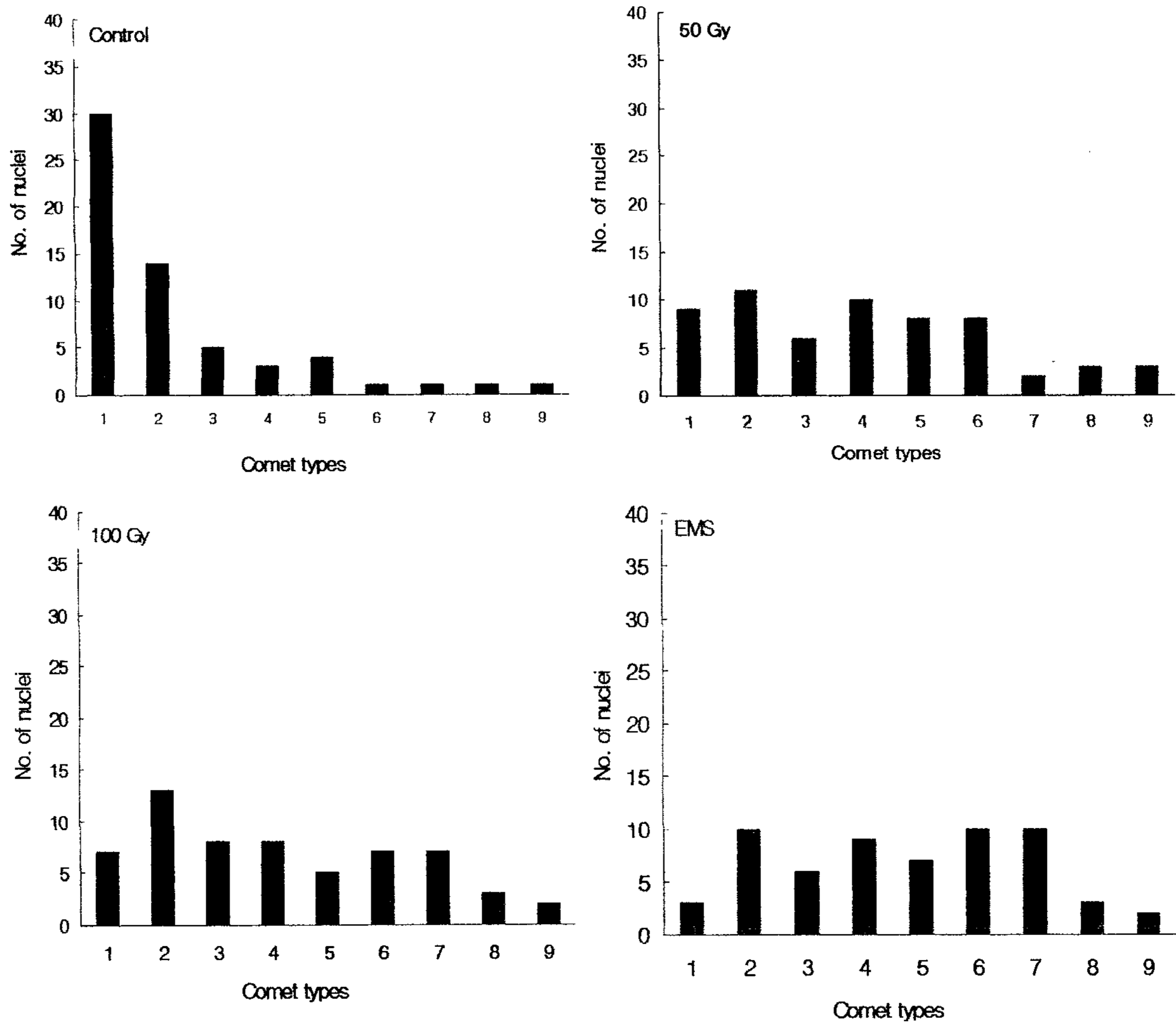


Fig. 155. Degree of nuclear DNA damage resulted from gamma radiation through comet assay.



**Fig. 156.** Number of nuclei observed by comet assay based on the degree of nuclear DNA damage rate(1-9). 1: no tail with intact nucleus, 9: tail only without head DNA.

후속 고선량에 대한 식물의 생장 및 comet 분석결과는 다음과 같다. 고추 종자에 0, 4, 20 Gy의 방사선을 조사한 후 발아된 식물체에 다시 후속으로 고선량(50, 100 Gy)을 조사하여 식물체의 생육 및 DNA 손상정도를 관찰하였다.

표 73는 방사선을 조사한 식물체의 발아율과 초장을 조사한 결과이다. 발아율은 무조사가 89.5%, 20 Gy를 조사한 종자가 86.7%로, 20 Gy까지의 선량으로는 고추종자의 발아에 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 한편 식물체의 초장을 보면 0, 4 및 20 Gy를 종자에만 조사하고 후속 선량을 조사하지 않은 경우에는 7월 13일에 각각 56.6, 57.7 및 58.3 cm로 조사선량에 관계없이 거의 영향을 미치지 않으나, 후속으로 50 및 100 Gy의 고선량을 조사한 경우는 조사이후의 초장생장은 거의 일어나지 않는 것으로 나타났다. 고추 종자에 4 및 20 Gy의 방사선을 전조사 한 것이 후속으로 조사한 고선량(50 및 100 Gy) 방사선에 대한 피해를 경감시키지는 않는 것 같다.

Comet assay에서 조사당 60개의 세포핵을 관찰하여 단세포전기영동을 실시한 후 핵의 꼬리(tail) 길이와 머리(head)의 길이 분포를 표시한 결과 무조사 세포는 꼬리의 길이가 짧고 머리의 길이가 긴 핵이 다수를 차지하나 방사선 50 및 100Gy를 조사한 세포의 핵은 꼬리의 길이가 길어지는 핵의 수가 현저히 증가하였다. 이는 고 선량의 방사선에 의해 핵 DNA가 손상을 받는 것을 의미한다(그림 157).

그림 158는 comet의 머리길이에 대한 꼬리 길이의 비(tail/head length, T/H 값)를 나타낸 것이다. T/H 값이 클수록 방사선에 의해 핵의 손상을 더 많이 받은 것이다. 후속 고선량을 조사하지 않고 종자에만 조사한 경우 무조사, 4 및 20 Gy 조사에서 각각 T/H 값이 1.7, 1.88 및 2.26을 보여 방사선 조사에 의해 약간 증가하는 경향이나 유의성은 인정되지 않았다. 한편 후속 고선량 50 및 100 Gy를 조사에 대한 효과를 보면, 종자에 방사선 전조사가 없는 경우(C/50 및 C/100)는 각각 5.98 및 5.57의 T/H 값을 보이나, 4 Gy를 종자에 전조사 한 경우(4/50, 4/100)는 각각 4.87 및 4.45, 20 Gy를 전조사 한 경우(20/50, 20/100)는 4.13 및 3.57로 전조사를 한 식물체가 T/H 값이 약간 낮게 나타나는 경향이나 유의성이 인정되지 않았다.

그림 159은 각 조사별 단세포전기영동 후 나타나는 핵의 head DNA함량을 나타낸 것이다. 종자에 전조사만 한 경우의 head DNA 함량을 보면 무조사, 4 및 20 Gy에서 각각 76.7, 74.9 및 74.2%를 나타내어 전조사의 방사선 선량간에 유의한 차는 없다. 그러나 후속 방사선 50 및 100 Gy를 조사한 경우에는 head DNA 함량이 현저히 줄었다.

방사선을 종자에 전조사 한 것이 후속 고선량을 받은 식물체의 DNA 손상을 경감하는 효과는 인정되지 않았다. 그림 160은 comet assay에 나타난 핵의 모습을 사진으로 나타낸 것이다.

**Table 73.** Growth of pepper as affected by sequential gamma radiation.

Treatment		Germination (April 15)	Plant height(cm)		
1st(Mar. 15) Seed treat.	2'nd(May 21) Seedling treat.		May 13	June 19	July 13
0	0	89.5%	16.6	25.8	56.6
	50 Gy			21.3	22.3
	100 Gy			19.4	21.9
4 Gy	0	87.1%	16.8	26.4	57.7
	50 Gy			20.1	22.4
	100 Gy			19.8	20.1
20 Gy	0	86.7%	16.1	26.7	58.3
	50 Gy			20.4	23.1
	100 Gy			18.7	20.1



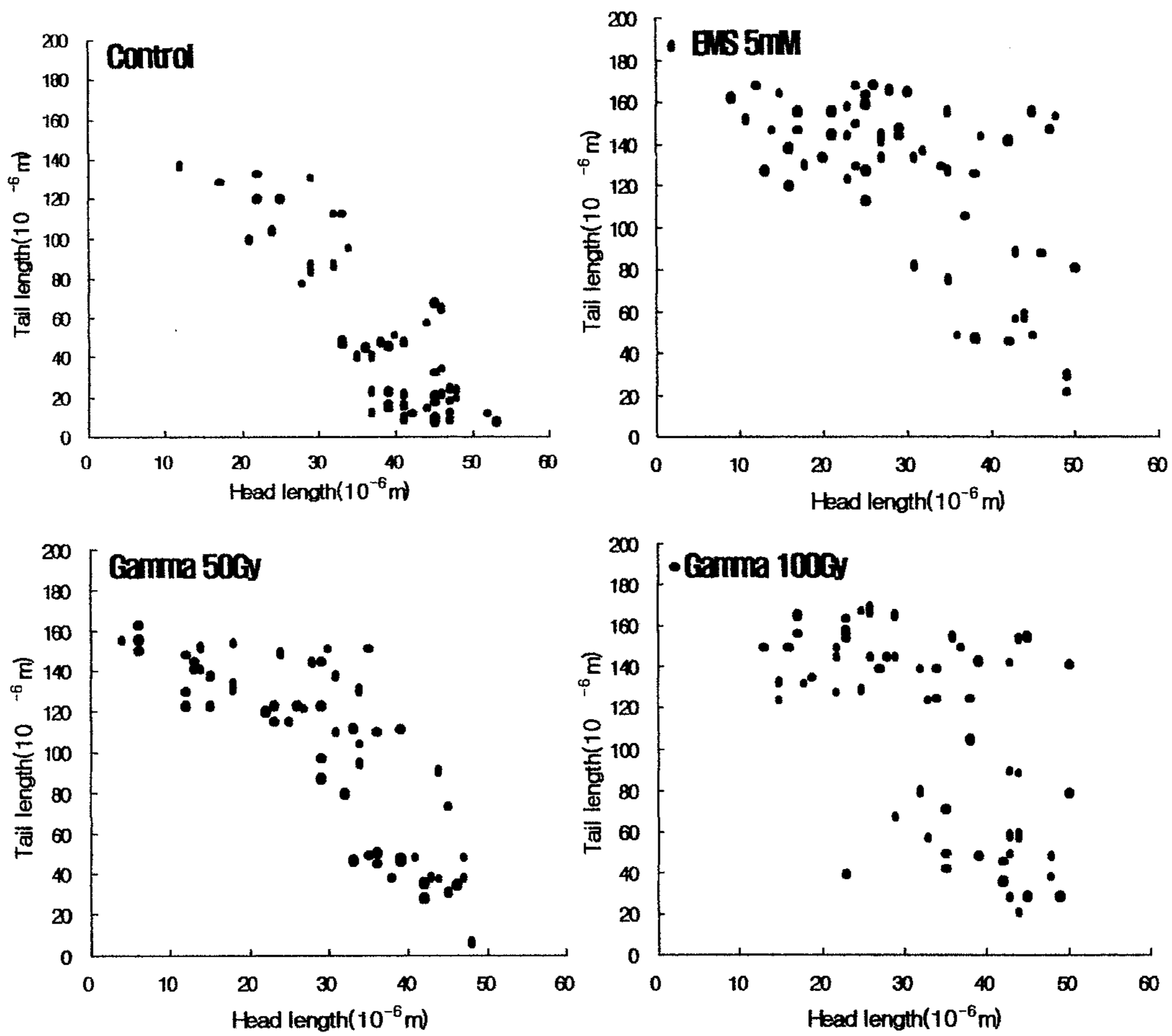
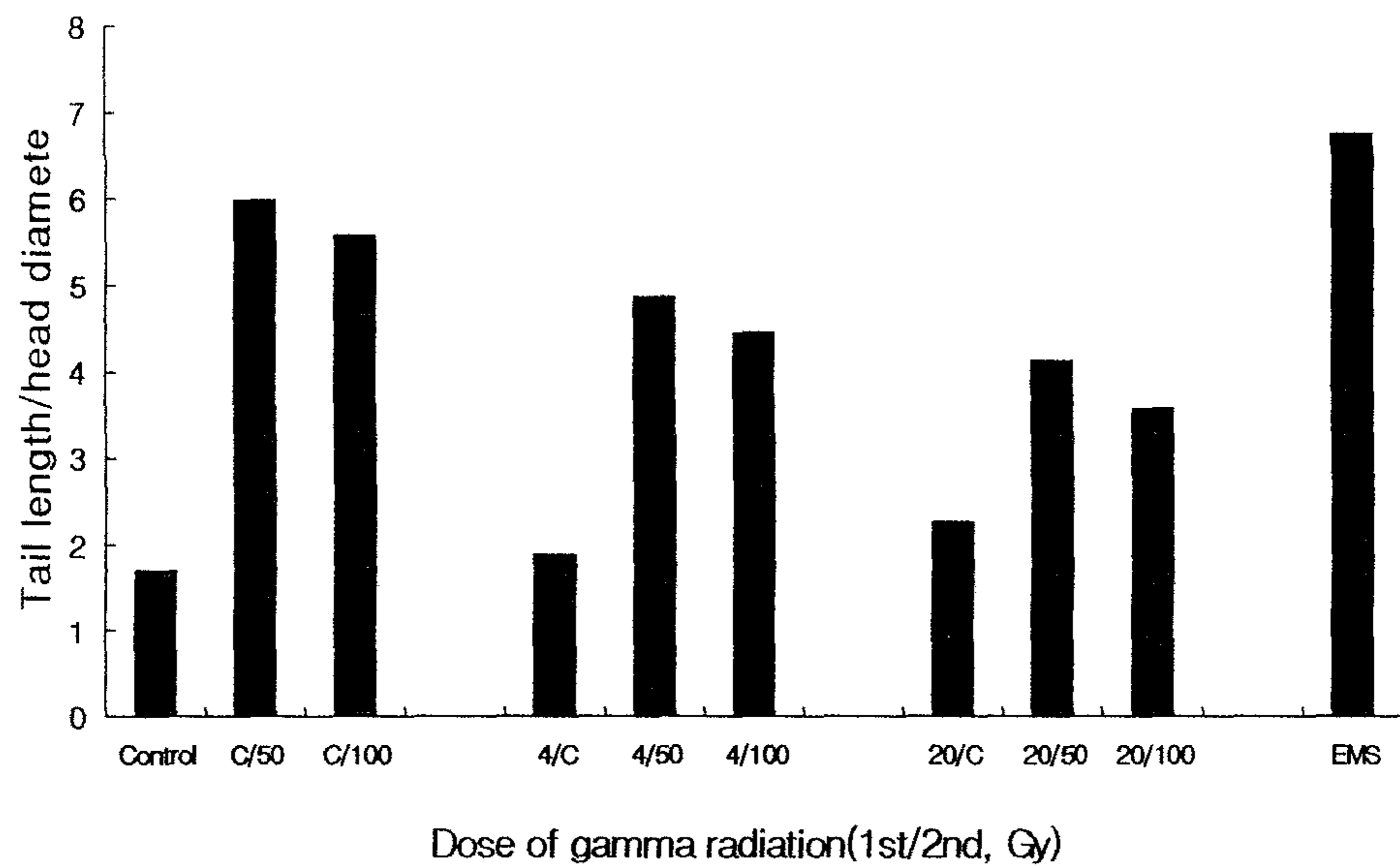
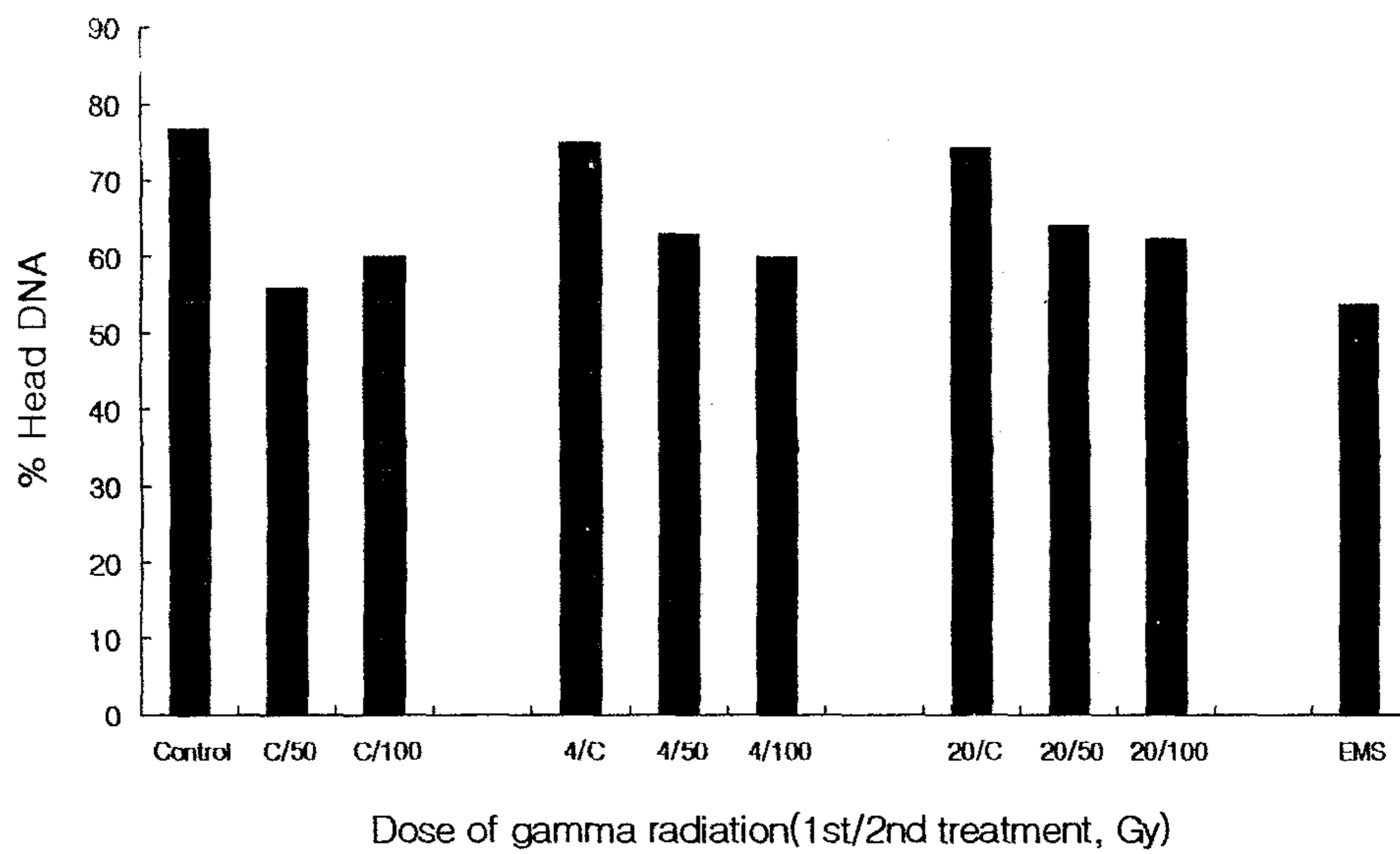


Fig.157. Distribution of nuclei based on the tail and head length by comet assay



**Fig.158.** Ratio of tail length to head diameter in comet assay of pepper leaf nuclei irradiated with gamma radiation.



**Fig. 159.** % head DNA of pepper leaf nuclei treated with radiation by comet assay.

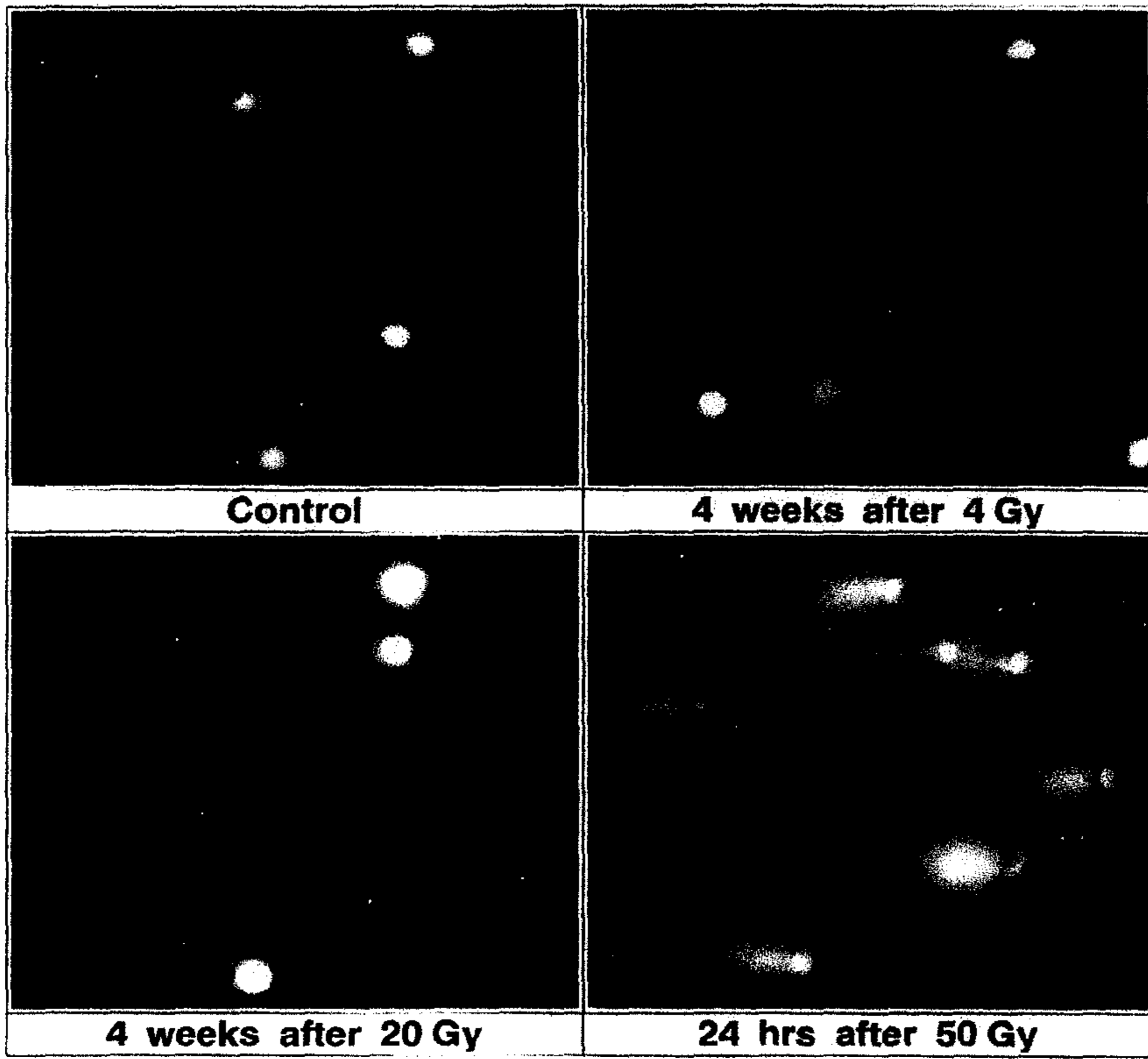


Fig. 160. Comet assay of pepper cell nuclei after irradiation

RAPD분석에 의한 벼 DNA 변이성 조사한 결과는 다음과 같다. 저선량의 방사선을 조사한 벼의 유전적 변이성을 조사하기 위하여, 2 Gy의 방사선 조사한 흑미벼의 F2 개체와 식물체에 직접 16 Gy를 조사한 설악벼를 대상으로 random primer를 이용한 RAPD분석을 실시하였다. Genomic DNA의 추출은 6개의 다른 식물체로부터 분리하여 template로 하였다. 사용된 primer는 10개 염기서열을 가진 것 60개를 분석하여 전기영동상의 다형성 여부를 조사하였다.

총 60개의 primer를 PCR한 중 16 Gy를 식물체에 직접조사 한 설악벼는 27개, 2 Gy를 조사한 F2식물체인 흑미벼는 26개가 PCR 산물인 DNA 밴드를 보였고, 그 중 개체간에 차이를 보인 primer는 설악벼의 무조사 및 방사선 16 Gy 조사에서 각각 6개 및 5개였고 흑미벼는 무조사 및 조사 모두 5개였다.

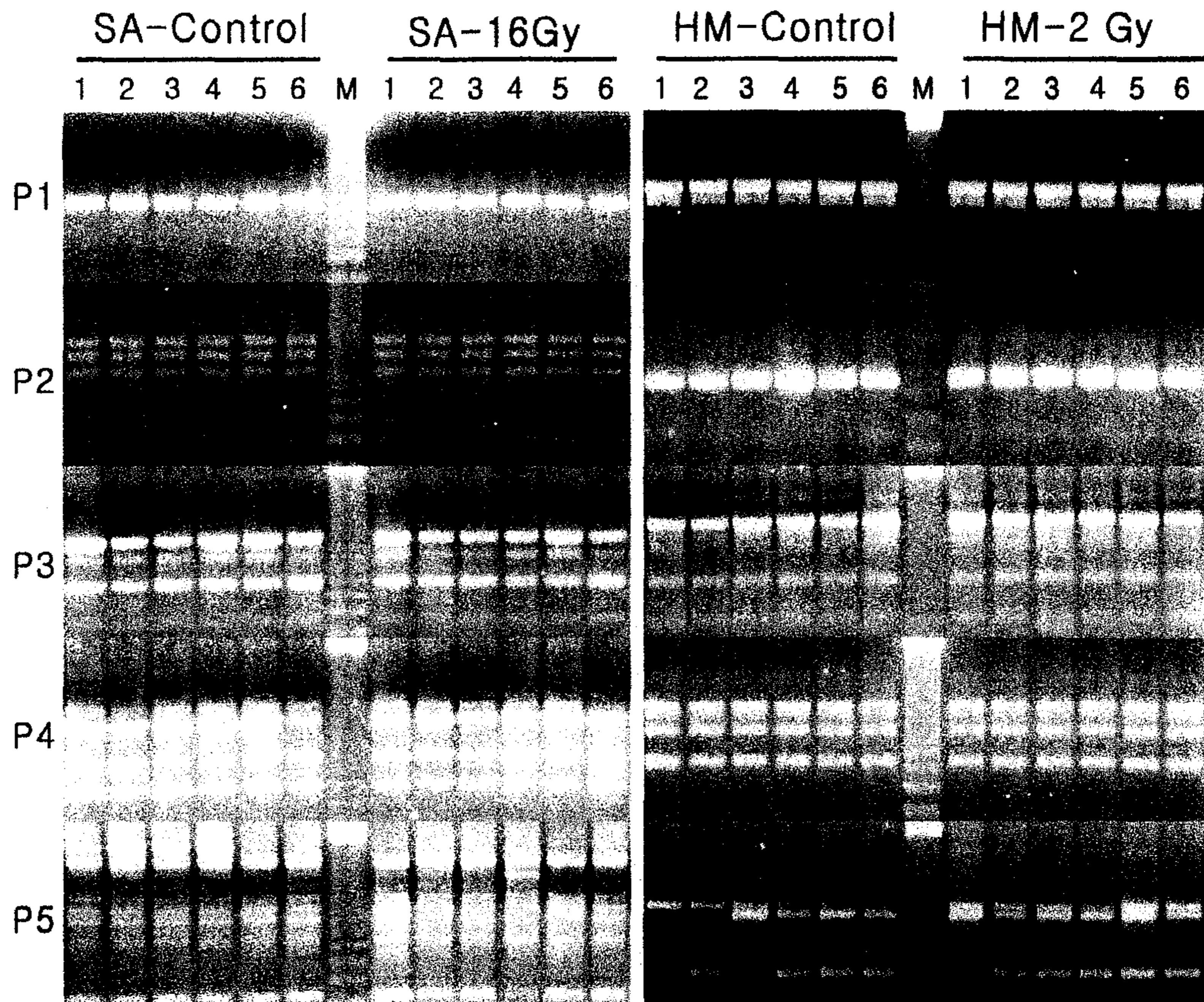
총 DNA 밴드 수는 설악벼가 126개 흑미벼가 169개였으나 개체간의 차이를 보인 밴드는 설악벼가 무조사에서 11개 및 16 Gy 조사에서 10개, 흑미벼는 조사 및 무조사 모두 3개였다(표 74). RAPD 결과 DNA 밴드상에서 개체간의 차이를 보이긴 하나 방사선 조사에 의해서만 특이적으로 생성되거나 사라지는 밴드는 확인할 수 없었다.

그림 161는 설악벼 및 흑미벼의 조사 및 무조사 식물체 각각 6개체로부터 genomic DNA를 추출하여 각각의 primer에 대한 DNA 밴드상의 변이를 관찰한 사진이다. 설악벼의 경우 P1, P2, P3 primer는 방사선을 조사(16 Gy)한 식물체와 무조사 식물체간에 동일한 DNA 밴드를 보일 뿐 아니라 같은 조사에 있는 개체간에도 동일한 DNA 밴드를 보인다. 반면 primer P4와 P5는 개체간에 차이를 보이는 밴드들이 관찰된다. 그러나 개체간에 차이가 나는 DNA 밴드가 조사한 식물체와 무조사 식물체에서 공동으로 관찰되므로 이들 밴드는 방사선의 조사에 의한 변이가 아니라 개체간의 차이에 의해 나타나는 변이인 것으로 추정된다. 한편 흑미벼를 보면 primer P1, P2, P3, P4는 조사간 개체간에 동일한 DNA 밴드를 보이거나 P5는 개체간에 차이를 보인다. 그러나 흑미벼의 P5 primer에 의한 DNA 밴드의 변이도 조사(2 Gy) 및 무조사에 같이 나타나므로 방사선효과가 아니라 개체간의 차이에 의한 변이로 보인다. 결과적으로 RAPD방법으로는 방사선을 조사한 벼에서 DNA 변이를 찾을 수 없었다.

**Table 74.** Summary of RAPD analysis using 60 random primers with genomic DNA of irradiated rice.

Primers and DNAs	Seolak rice		Heckmi rice(F2)	
	0	16 Gy	0	2 Gy
Primers				
No. of primers tested	60	60	60	60
Primers showing PCR product	27	27	26	26
Heterogeneous primers	6	5	5	5
DNA bands				
No. of DNA bands	126	126	169	169
Heterogeneous bands	11	10	3	3
Result	NS*	NS	NS	NS

\*NS: non-significant



**Fig. 161.** RAPD profiles of six individual plants of Seolak(SA) irradiated with 16 Gy and Heckmi(HM), F2 of 2 Gy irradiated parents. M: DNA marker.

#### 다. 방사선의 고추생육 및 수량에 미치는 영향

방사선 조사가 고추의 생육 및 수량에 미치는 영향은 다음과 같다. 고추 유묘에 방사선을 0, 1, 5, 10, 20 및 50 Gy를 조사한 후 0, 20, 50 및 80일 후에 초장, 간장 및 엽수를 조사하였다(그림 161, 163). 방사선을 조사한 선량별로 고추의 초장을 비교해 보면 저선량인 1 및 5 Gy을 조사한 식물체는 무조사에 비해 초장이 증가하였고, 10 Gy 이상의 고선량에서는 선량이 증가할수록 현저한 감소를 보였다(그림 162) 방사선을 조사한 후 80일째에 무조사 식물체의 초장은 56.0 cm이었으나 방사선 1 Gy를 조사한 식물체는 65.3 cm로 무조사보다 16.6%의 초장증가 효과가 나타났다. 한편 고선량인 20 및 50 Gy를 조사한 식물체는 각각 43.7 및 14.5 cm의 초장을 보여 각각 22.0 및 75%의 초장 감소를 초래하였다. 특히 본 실험에서 조사한 방사선 중 가장 고선량인 50 Gy를 조사한 식물체는 조사 당시의 초장과 조사 80일 후의 초장이 거의 같아 고선량의 방사선은 식물의 길이 생장에 치명적인 해를 주는 것으로 나타났다.

방사선을 조사한 식물체의 잎 수를 조사한 결과 1 및 5 Gy 조사에서는 무조사에 비해 잎의 수가 현저히 증가한 반면 고선량인 20 및 50 Gy에서는 현저한 감소를 보여 방사선의 잎 수에 미치는 영향도 초장에 미치는 영향과 비슷한 경향이였다(그림 163). 방사선 조사후 80일에 조사한 잎의 수는 무조사가 식물체 당 381.7개인데 비하여 방사선 1 및 5 Gy를 조사한 식물체는 각각 476.7 및 539.0개로 무조사보다 많았고, 고선량인 20 및 50 Gy를 조사한 식물체는 각각 281.7개 및 17개로 무조사에 비해 현저한 감소를 보였다(그림 163). 따라서 저선량인 1 및 5 Gy 조사는 고추식물체의 초장과 잎의 수를 증가시키는 효과가 있었으나, 10 Gy 이상의 고선량 조사는 방사선의 선량이 높을수록 억제정도가 심하게 나타났다.

방사선을 조사한 고추의 화기 발달과 과실형성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 조사 선량별로 화아수, 꽃의 수 및 과실의 수를 조사하였다(그림 164). 먼저 총 형성된 화기의 수, 즉 화아, 꽃 및 과실을 합한 수를 보면 1 Gy 조사가 117.4개로 무조사 70.8개에 비해 많았고, 5, 10, 20 Gy를 조사한 식물체도 90.7, 86, 86개로 무조사보다 많았다. 그러나 50 Gy를 조사한 식물체는 전혀 화기의 형성이 관찰되지 않았다. 실제 고추의 수량으로 간주할 수 있는 과실의 수는 1 Gy조사에서는 무조사보다 유의하게 증가하였으나 5 Gy를 조사한 식물체는 무조사와 유의한 차이가 인정되지 않았다. 한편 10 Gy 이상을 조사한 식물체는 조사 선량이 증가함에 따라 과실수도 현저하게 줄었다.



재배적 측면에서 보면 식물체에서 형성된 화아가 정상적으로 개화하고 개화된 꽃으로부터 정상적인 수분과 수정이 이루어진 후 가능한 많은 수의 과실이 형성되는 것이 수량을 증가시키는 바람직한 방법일 것이다. 본 실험의 결과를 보면 1 Gy나 5 Gy를 조사하면 무조사에 비해 화아 및 꽃의 수가 증가되고 과실의 수도 증가되나 비교적 고선량인 10 Gy 조사는 꽃의 수는 가장 많았으나 과실로의 발달은 1 Gy 혹은 5 Gy조사에 비해 저조하며, 그보다 고선량인 20 Gy조사는 화아의 수는 70.0개로 무조사가 30.2개인데 비해 많으나 화아로부터 꽃과 과실로의 발달되는 것은 현저히 감소되었다. 본 실험에서 조사한 방사선은 화아가 형성되기 이전에 조사한 것으로 고선량의 방사선이 개화나 암수 생식기관의 발달에 이상을 초래하였을 가능성이 있는 것으로 추정된다.

표 75는 방사선 조사 후 80일에 고추 식물체를 모두 수확하여 엽면적과 잎 및 과실을 포함한 지상부와 뿌리의 건물중을 조사한 것이다. 엽면적은 1 Gy 및 5 Gy 조사가 각각 2,800.3 및 2,345.7 cm<sup>2</sup>/plant로 무조사가 1,694.7 cm<sup>2</sup>/plant인데 비하여 현저하게 증가하였으나 이들 잎의 건물중은 무조사와의 차이가 인정되지 않았다. 한편 과실의 건물중은 무조사가 8.9 g/plant 비해 1 Gy 및 5 Gy조사가 14.1 및 13.1 g/plant로 이들 조사의 수량의 증가 효과가 인정되었다. 뿌리의 건물중은 고선량인 50 Gy를 제외하고는 무조사와 유의한 차가 없었으나 지상부의 생육은 1 Gy 및 5 Gy조사에서 현저한 증가 효과가 나타났고, 20 Gy이상의 고선량 조사에서는 무조사에 비하여 억제되었다.

이상의 방사선조사에 의한 고추 식물체의 생육반응을 보면 저선량인 1 및 5 Gy 조사에서는 고추의 초장, 엽수 및 건물중과 수량의 증가가 뚜렷하게 관찰되었으나, 10 Gy 조사는 무조사와 비슷하거나 약간 증가하였고, 고선량인 20 Gy 이상 조사에서는 현저한 생육 억제가 나타나고, 50 Gy를 조사한 식물체는 거의 생육이 중지되는 것으로 나타났다.

방사선에 대한 생물활성촉진효과(hormetic effect)는 여러 가지 작물을 대상으로 증명되고 있는데, 주로 저선량의 방사선 조사에 의한 발아촉진, 광합성 증가, 숙기단축, 물질함량 및 수량 증가와 같은 효과가 증명되었다(118, 62, 115, 26, 28, 66, 34, 66, 82). Pal<sup>64)</sup>은 토마토 종자에 감마선 10 Gy이하의 저선량을 조사하면 식물체에 탄수화물, 아미노산 및 carotene 색소가 증가하며, 수분, 질소 및 인산의 흡수가 증가하며 수량증가 효과가 나타난다고 보고하였다. 한편 Lee 등<sup>62)</sup>은 고추 건조종자에 저선량의 방사선을 조사하면 종자의 발아율과 식물체의 무기성분 함량이 증가하는 효과가 있다고 하였다. 본 실험

험에서는 식물체인 유묘에 방사선을 직접 조사하였으나, 저선량인 1-5 Gy의 방사선 조사에서 초장, 엽수 및 수량 등에서 뚜렷한 증가를 보여 종자조사 뿐만 아니라 식물체에 조사한 경우에도 저선량 방사선의 생물활성촉진효과가 인정되었다. 그러나 20 Gy이상의 고선량 방사선은 오히려 고추의 생육 및 수량에 뚜렷한 억제작용을 나타내었다.

그림 165은 방사선에 노출된 식물체를 정상의 상태로 되돌린 후 20일과 80일에 측정된 잎의 엽록소 함량을 나타내었다. 조사 20일 후에는 조사간에 엽록소 함량에 유의한 차이가 보이지 않았으나, 조사 80일 후에는 10 Gy 이상의 고선량을 조사한 식물체는 엽록소 함량이 현저히 감소하였다. 그러나 초장, 엽면적 및 수량 등에서 촉진효과를 보였던 저선량인 1 Gy 및 5 Gy 조사는 무조사 식물체와 엽록소 함량에 차이가 없었다. 따라서 방사선을 조사한 식물체의 엽록소 함량만으로는 저선량의 방사선의 성장촉진효과를 해석할 수 없었다. 한편 고선량을 조사한 식물체의 생육 및 수량억제 효과와 엽록소 함량의 감소가 유사한 경향이나, 고선량에 의한 엽록소 함량의 감소가 식물의 생육과 수량 감소에 일차적인 원인으로 작용했을 것으로 보기 힘들며, 본 실험에서 나타난 엽록소 함량의 감소는 고선량 방사선의 다양한 유해작용 중의 한 결과일 것으로만 추정된다.

그림 166은 선량별로 조사한 식물체를 pot에 이식하여 재배하는 것을 사진으로 나타내었다. 저선량에서는 생육이 무조사보다 증가하는 것을 볼 수 있었고, 고선량 조사에서는 식물의 생장이 현저히 떨어지는 것을 관찰할 수 있었다(그림 166).

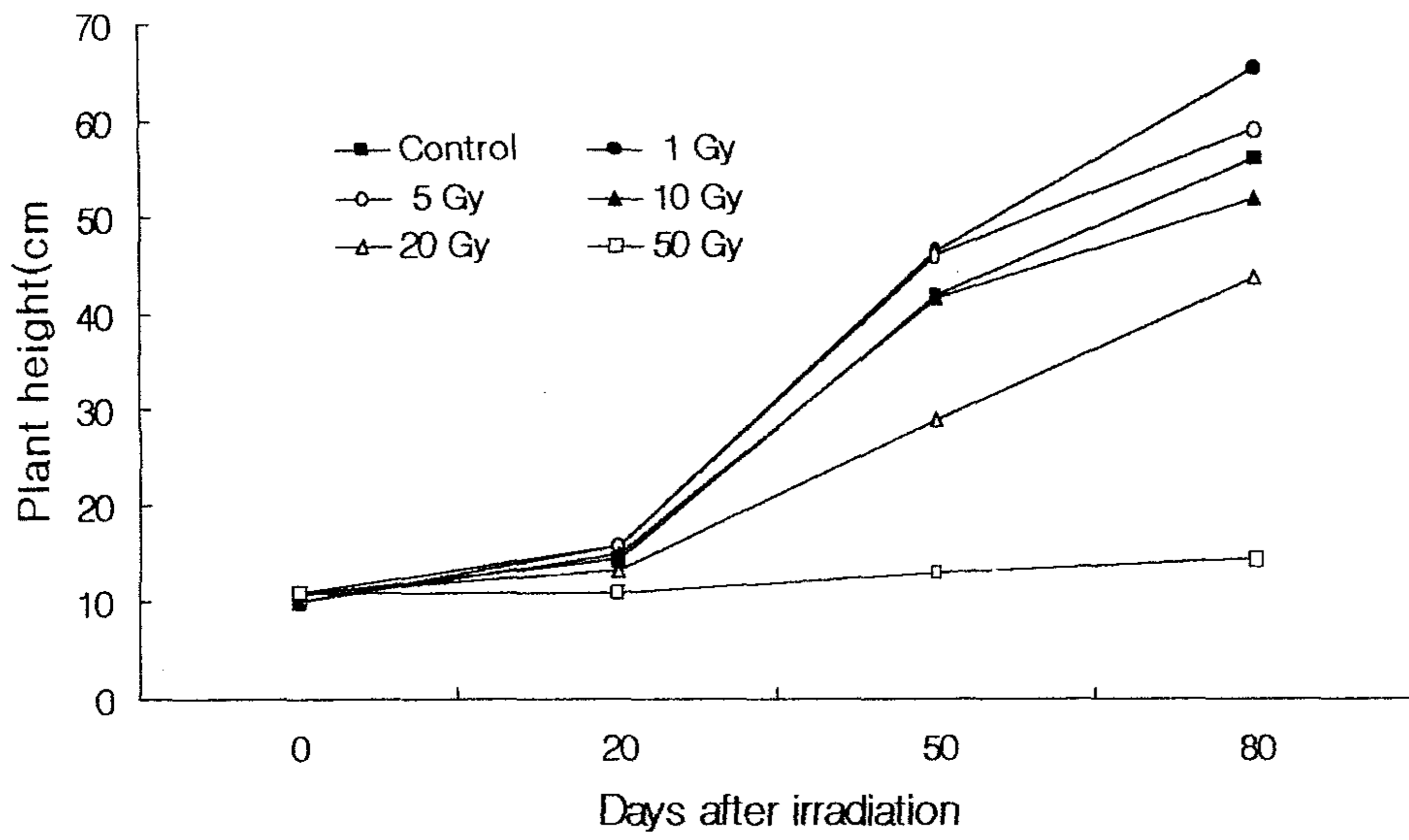


Fig. 162. Effect of gamma radiation on plant height of pepper plant

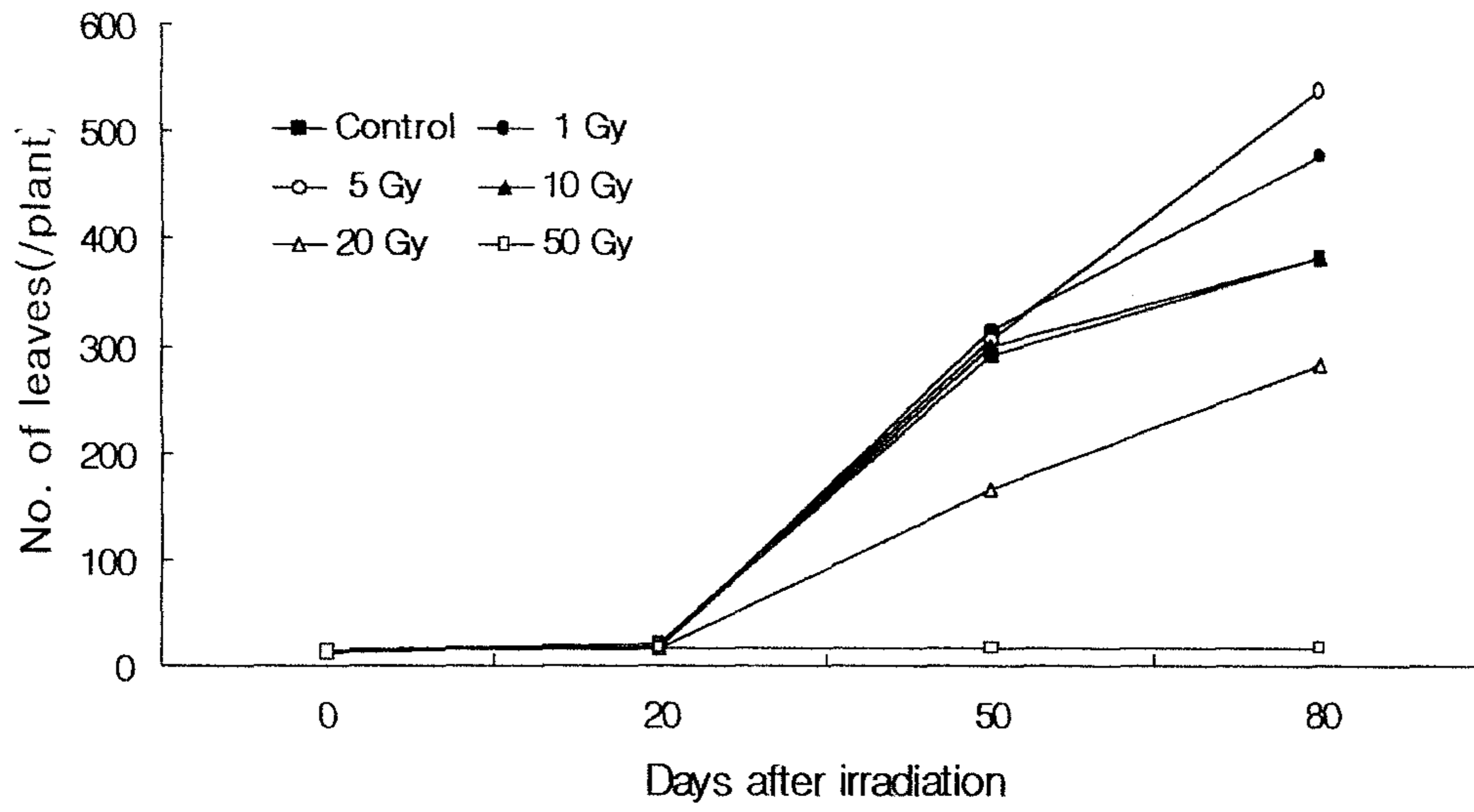
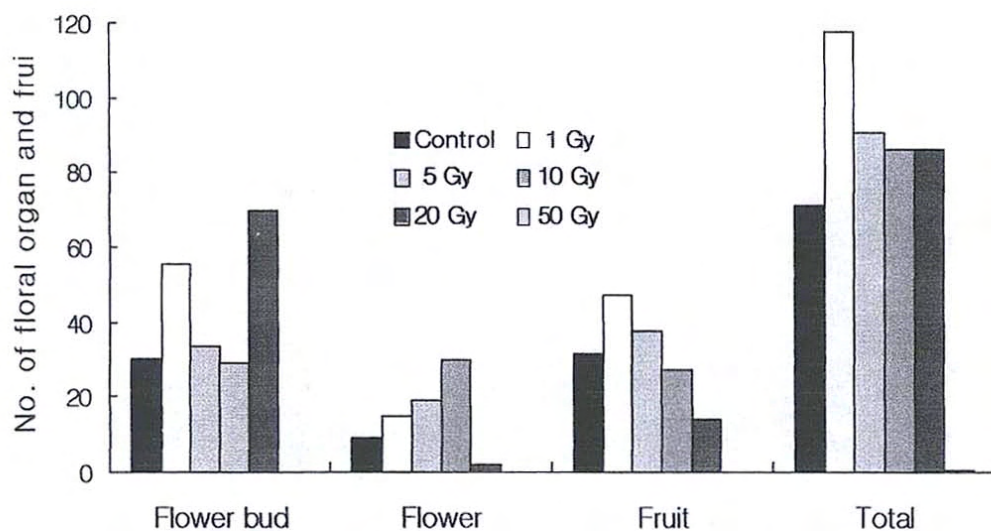


Fig. 163. Effect of gamma radiation on the leaf number of pepper plant

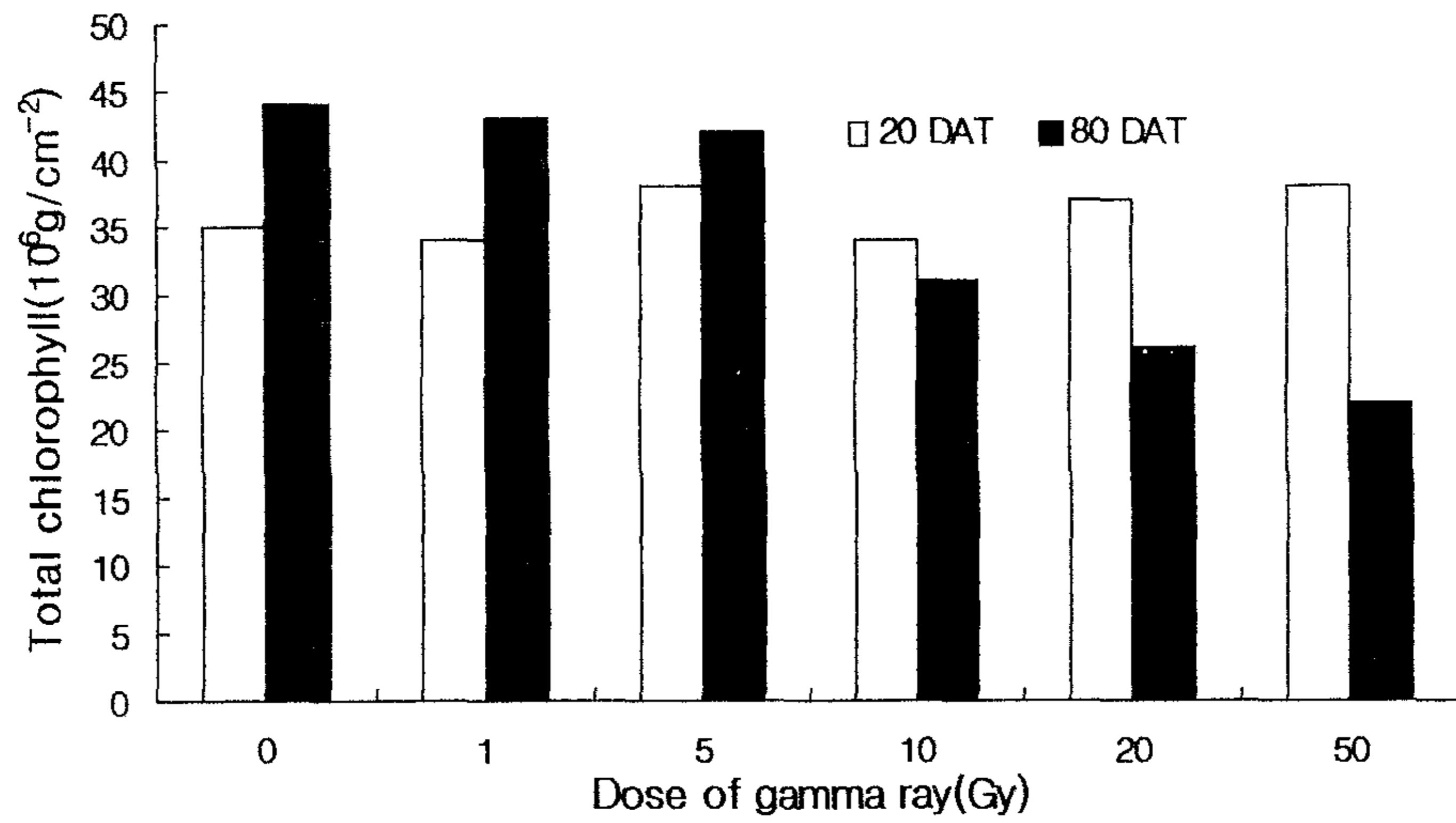


**Fig. 164.** Effect of gamma radiation on the development of flower and fruit in pepper plant. Pepper seedlings were irradiated with radiation( $^{60}\text{Co}$ ) at 13-15 leaf stage and transplanted to 1/2,000a pot, and then counted at 80 days after irradiation.

**Table 75.** Effect of gamma radiation on the growth and dry weight of pepper plant<sup>1)</sup>.

Doses (Gy)	Leaf/plant		Fruit dry wt(g)/plant	Dry weight(g)/plant		
	Area(cm <sup>2</sup> )	Dry wt(g)		Top	Root	Total
0	1,694.7 c	11.6 bc	8.9 c	32.4 c	7.4 b	39.8 c
1	2,800.3 e	15.2 c	14.1 d	47.5 e	8.7 b	56.2 e
5	2,345.7 de	13.3 c	13.3 d	40.1 de	7.8 b	47.9 de
10	2,056.0 cd	12.6 bc	10.9 cd	36.3 cd	7.8 b	44.1 cd
20	1,216.0 b	8.3 b	5.4 b	22.7 b	5.6 b	28.3 b
50	86.3 a	1.2 a	0.0 a	2.9 a	0.5 a	3.4 a

<sup>1)</sup>Pepper seedlings were treated with gamma radiation(<sup>60</sup>Co) and transplanted to 1/2,000a pot, and then harvested 80 days after irradiation. Dry weight of top is sum of leaf, stem and fruit weight. In a column, means followed by a common letters are not significantly different at the 5% level by DMRT.



**Fig. 165.** Effect of various doses of gamma radiation on chlorophyll content ( $\mu\text{g/cm}^2$ ) in pepper leaf determined at 20 and 80 days after irradiation.

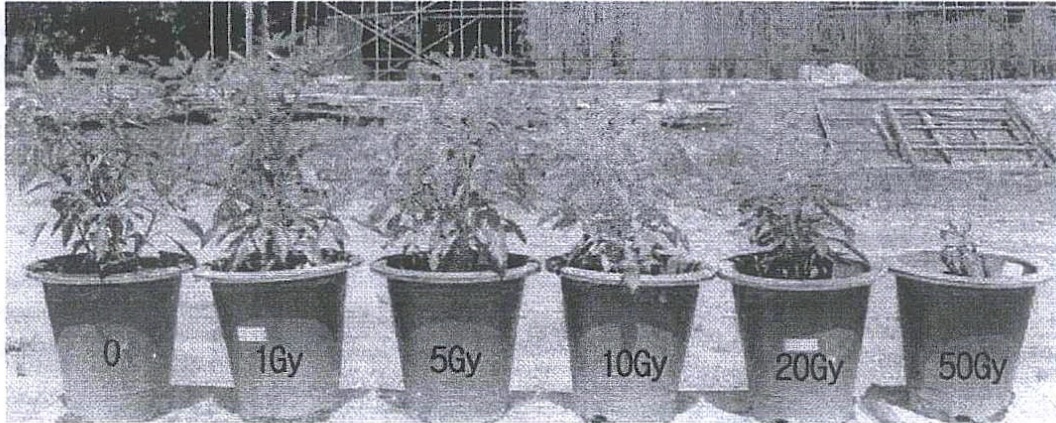


Fig. 166. Growing of pepper plant after gamma radiation in the pots.



방사선 연속조사가 고추의 생육 및 수량에 미치는 영향은 다음과 같다. 본 실험에서는 방사선을 고추 종자에만 0, 1, 10, 50 Gy를 조사한 경우, 종자 조사한 고추의 실생묘에 다시 방사선 50 Gy를 조사한 경우, 종자 조사는 하지 않고 실생묘에만 조사한 경우 등 세가지 방법으로 나누어 고추를 1/2,000a 풋트에 이식하여 일정시기에 생육상황과 수량 등을 조사하였다.

먼저 방사선 조사 선량별로 수확기의 초장을 보면 그림 167과 같다. 종자에 만 조사한 경우 무조사, 1, 10, 50 Gy 조사(각각 0/0, 1/0, 10/0, 50/0로 표시)에서 각각 초장이 57.4, 65.8, 59.3 및 41.3 cm로 저선량인 1 Gy 조사에서는 초장이 무조사보다 증가하였고, 고선량인 50 Gy에서는 초장이 감소하였다. 종자조사 후 발아된 식물체에 다시 방사선을 조사하는 경우(예, 1/10은 종자 조사 1 Gy 후 식물체에 후속으로 10 Gy를 조사한 경우 임), 1/10 및 10/10조사에서 각각 69.5 및 63.3cm의 초장을 보여 무조사 57.4 cm보다 생육 촉진효과가 있었다. 그러나 식물체에만 10 Gy를 조사한 경우(0/10)와 종자에만 10 Gy를 조사한 경우(10/0)는 초장의 증가효과가 없었다.

고선량인 50 Gy 조사는 종자조사의 경우(50/0)는 41.3 cm로 무조사 57.4 cm보다 조금 억제되는 되었으나, 식물체에 조사한 경우는 종자 전조사의 여부에 관계없이 고추의 생장이 거의 일어나지 않는 것으로 나타났다. 본 실험에서는 종자에 저선량(1 또는 10 Gy)의 방사선을 조사하더라도 식물체에 후속으로 조사한 방사선이 고선량(50 Gy)인 경우에는 방사선 피해를 경감하는데 효과가 없었다.

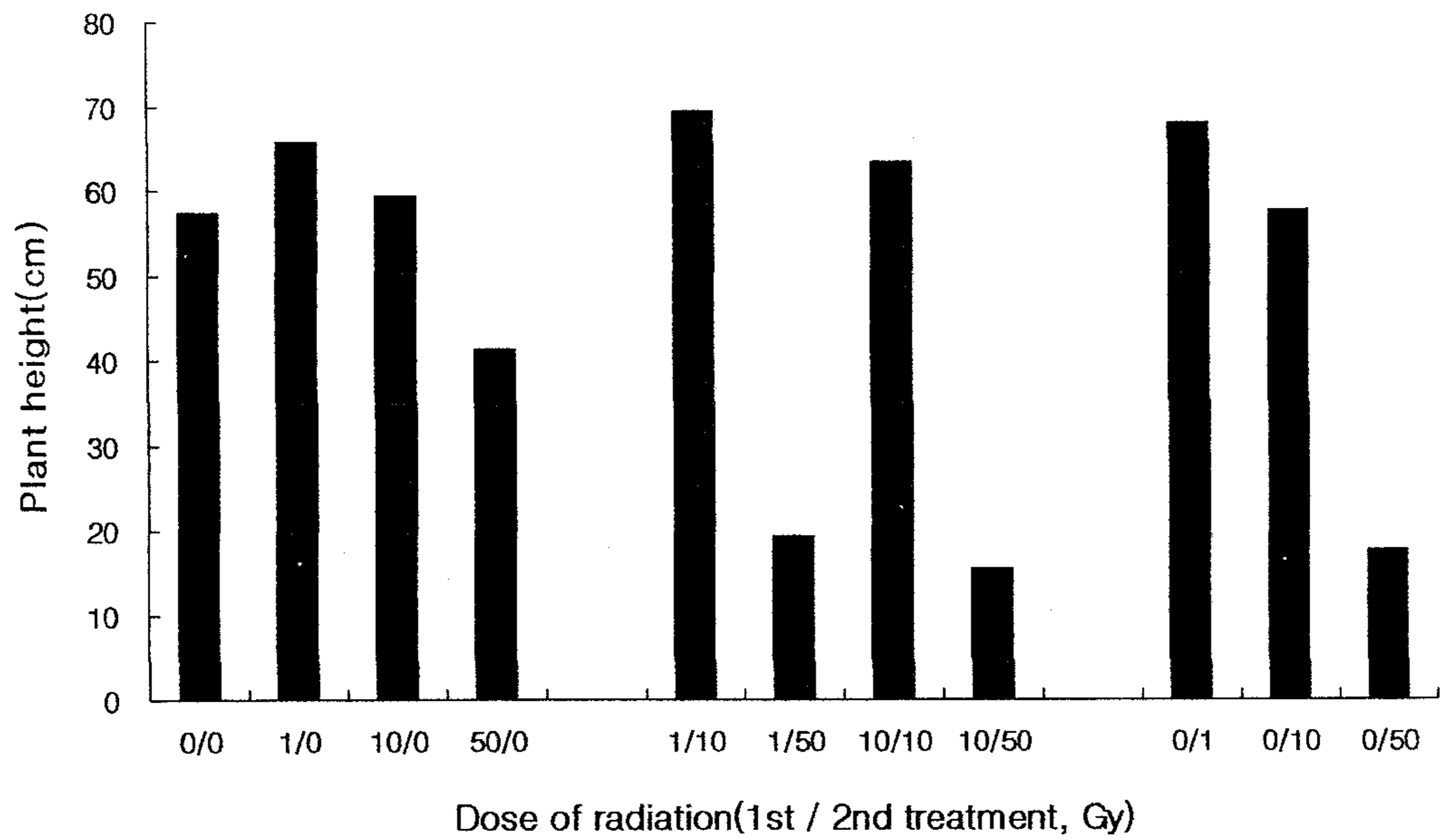
그림 168는 방사선을 조사한 식물체의 엽면적과 건물중을 나타낸 것으로 초장에 대한 효과와 유사한 경향을 보였다. 고선량인 50 Gy를 식물체에 조사한 경우는 방사선을 조사한 후부터는 새로운 잎의 전개나 생장이 거의 일어나지 않고 잎의 생장이 중단되는 것으로 나타났다. 한편 1/10조사에서는 엽면적이 2,938 cm<sup>2</sup>/plant로 가장 넓었는데, 0/0, 10/0, 0/10조사에서 각각 1,868, 2,208 및 2,009 cm<sup>2</sup>/plant로 나타나 종자에 1 Gy의 저선량을 조사하고 후속으로 10 Gy의 방사선을 조사한 경우 엽면적의 증가 효과가 있는 것으로 나타났다. 한편 종자에만 1 및 10 Gy를 조사한 경우 잎의 건물중이 각각 12.3 및 14.1 g/plant로 무조사 11.4 g/plant보다 높았다.

방사선을 조사한 식물체의 과실 수와 건물중은 그림 169과 같다. 과실의 수는 종자조사 없이 식물체에만 1 Gy를 조사한 것(0/1)이 식물체당 46.5개로 무조사 35.3개보다 많았으며, 종자에만 10 Gy를 조사한 것(10/0) 40.7개, 종자 1 Gy 후 식물체 10 Gy를 조사한 것(1/10) 44.7개로 과실의 수 증가에 효

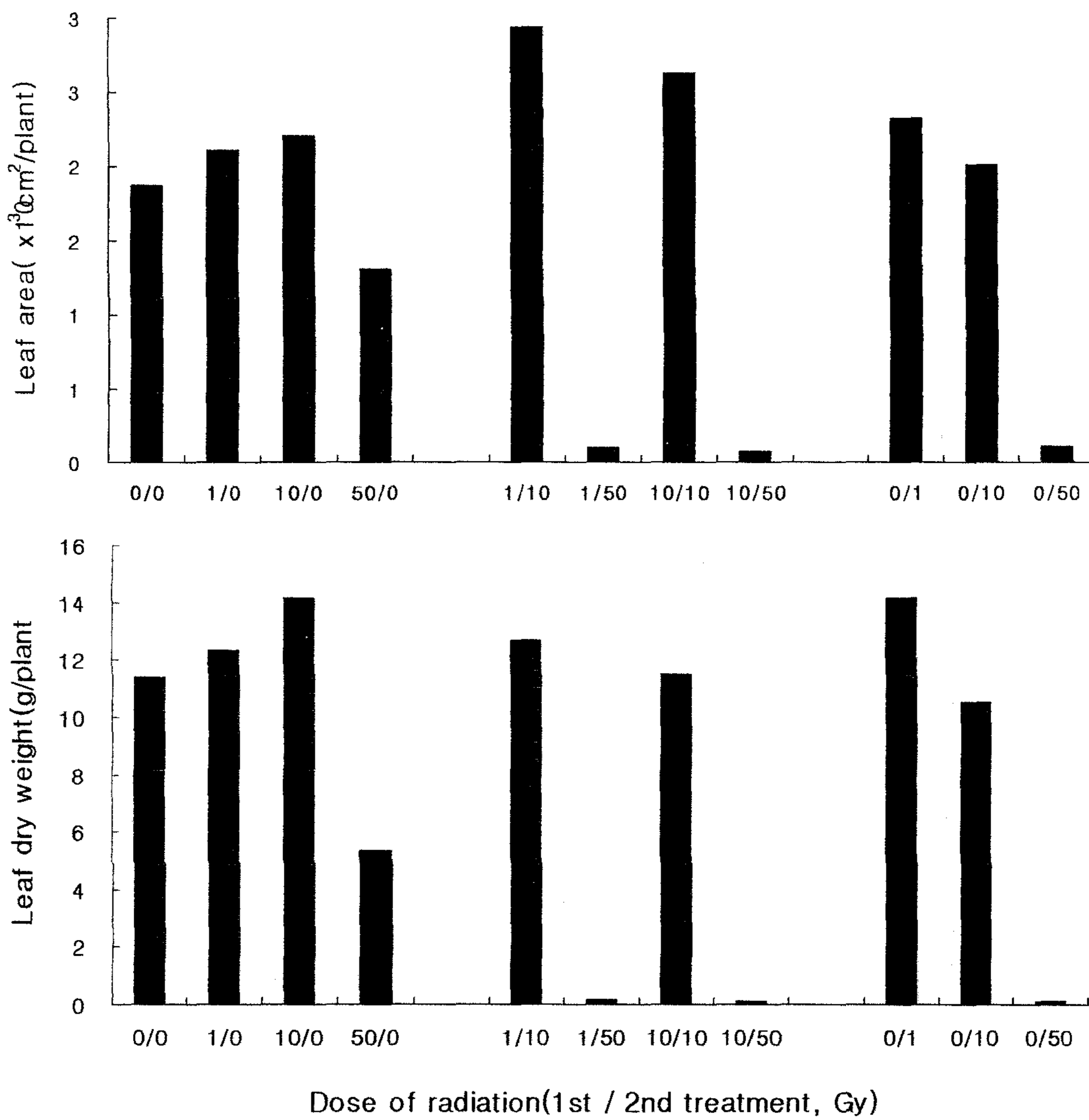
과가 있었다. 과실의 건물중도 과실의 수와 비슷한 경향인데 0/1 조사에서 13.0g, 1/10 조사에서 12.7g, 0/10 조사에서 11.4g, 10/0조사에서 10.5g으로 무조사 9.6 g/plant 보다 높았다. 그러나 50 Gy 조사에서는 일부 식물에서 과실이 소수 관찰되나 정상적인 과실형태를 갖춘 것은 없었다.

그림 170은 뿌리의 건물중을 나타낸 것이다. 뿌리의 건물중은 종자조사에서는 조사선량에 관계없이 무조사와 차이가 없으나, 식물체 조사에서는 50 Gy 조사에서는 심한 억제 현상이 나타났다. 지상부의 건물중(잎+줄기+과실)은 1/10, 0/1조사에서 무조사보다 높았다.

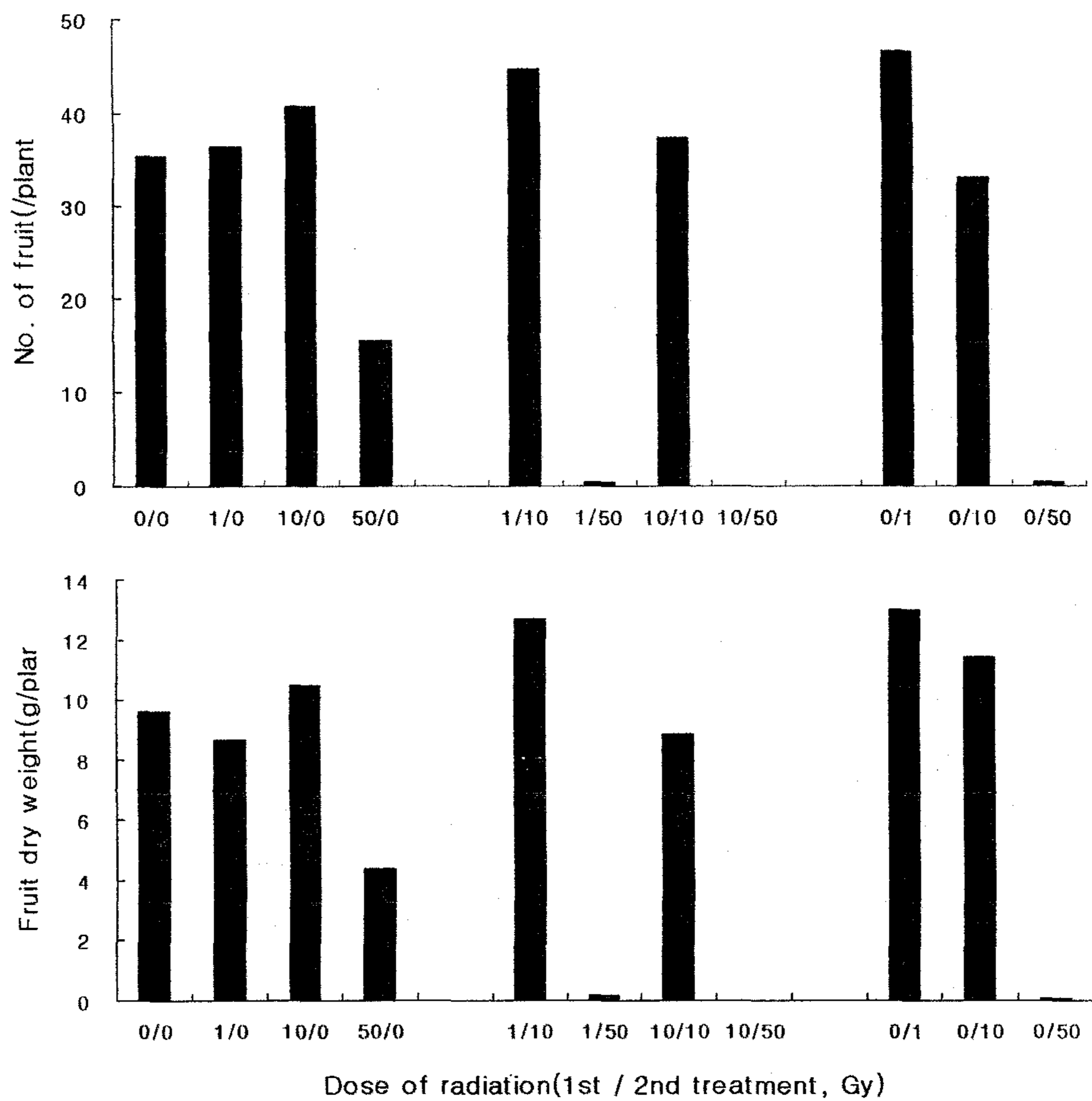
이상의 결과를 종합하면 방사선을 종자에 전조사 할 경우, 종자 1 Gy 후 식물체에 후속으로 10 Gy를 조사(1/10)하면 초장, 엽수 및 과실수량에 촉진 효과가 있었으며, 전조사를 하지 않고 식물체에 저선량인 1 Gy를 조사한 경우에도 생육 촉진효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 방사선의 전조사가 후속 고선량(50 Gy)에 대한 피해를 경감하는 효과는 인정되지 않았다.



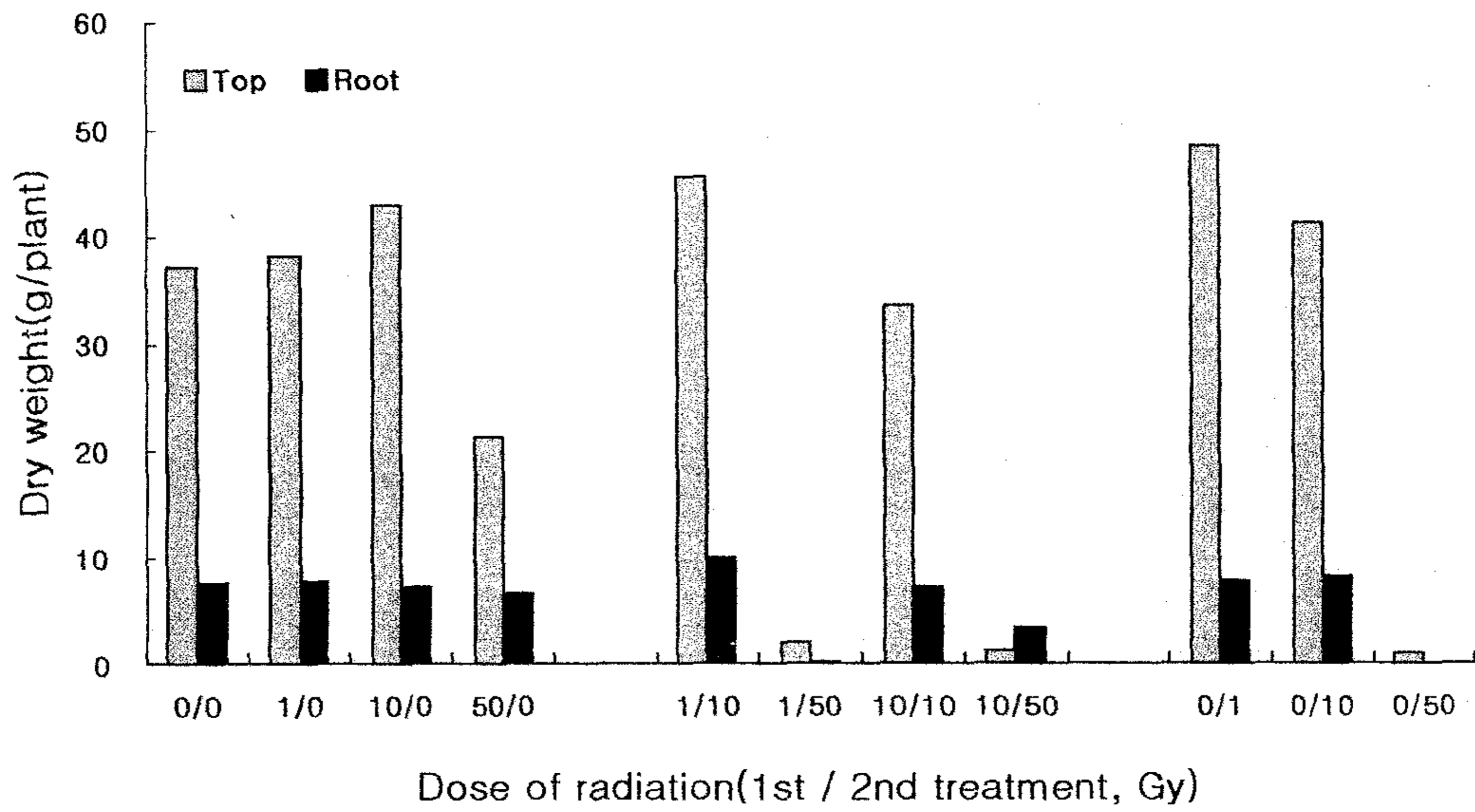
**Fig. 167.** Plant height of pepper plant as affected by sequential gamma radiation. First irradiation at seed and second at 12-13 leaf stage.



**Fig. 168.** Leaf area and dry weight of pepper plant as affected by sequential gamma radiation. First irradiation at seed and second at 12-13 leaf stage



**Fig.169.** Fruit number and dry weight of pepper plant as affected by sequential gamma radiation. First irradiation at seed and second at 12-13 leaf stage.



**Fig. 170.** Dry weight of pepper plant as affected by sequential gamma radiation. First irradiation at seed and second at 12-13 leaf stage

마늘세포의 재분화에 미치는 영향은 다음과 같다. 방사선을 조사한 세포를 재분화 배지인 MS기본에 kinetin 3 + NAA 3mg/L, BA 1 + NAA 3 mg/L에 따로 치상하였고, 세포의 증식배지인 2,4-D 1mg/L에 치상하여 6주 후에 세포의 증식량을 조사하였다.

방사선량 1에서 10 Gy 조사는 세포의 성장량이 무조사에 비해 약간 증가하는 경향이나 유의성이 없었고, 20 및 50 Gy 조사에서는 세포 성장에 현저한 감소가 나타났다(그림 171).

방사선을 조사한 세포의 재분화율은 현저한 변화를 보였다. 재분화 배지를 kinetin 3.0 + NAA 3.0 mg/L로 한 경우 10 Gy 조사시 샹레당 98.7개의 신초가 발생하여 무조사가 24.4개인데 비하여 재분화에 효과적이었고, BA 1.0 + NAA 3.0 mg/L배지에서는 5 Gy를 조사한 것이 가장 좋았다. 20 Gy이상의 조사는 뿌리 신초 모두 거의 발생하지 않았다(표 76, 그림 171, 그림 172).

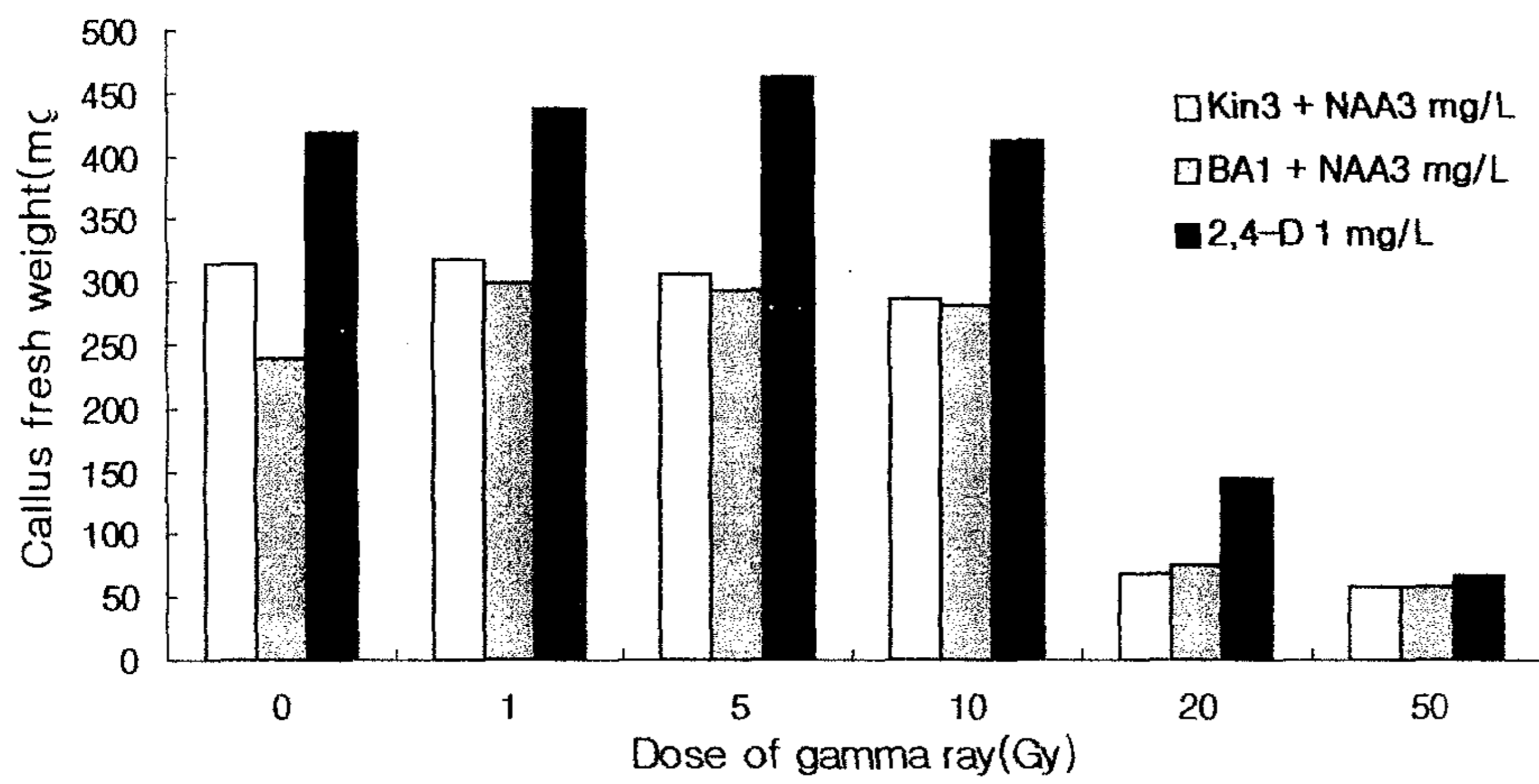


Fig. 171. Effect of gamma radiation on the growth of garlic callus. Data was collected at 6 weeks after irradiation.

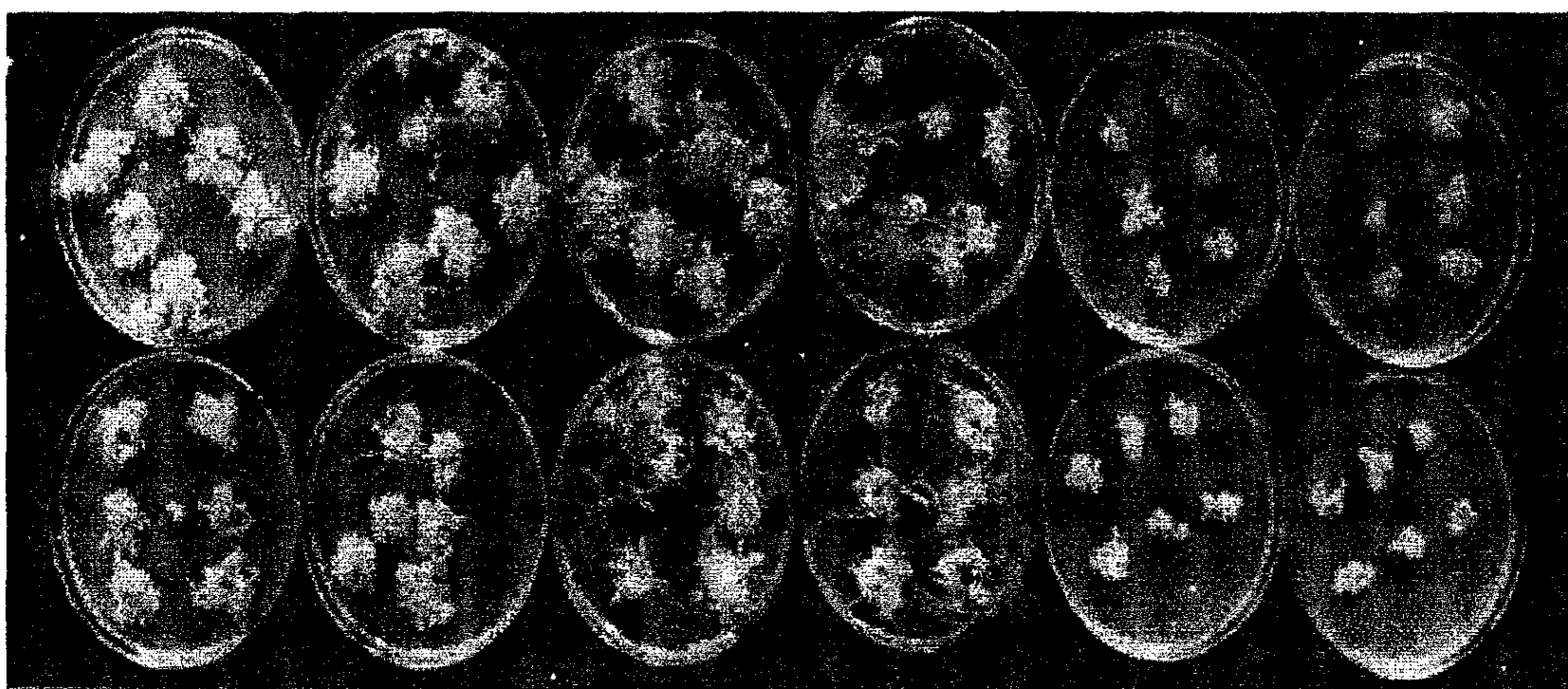


**Table 76.** Effect of gamma radiation on the regeneration of garlic callus.

Dose (Gy)	Kinetin 3.0 + NAA 3.0 mg/L <sup>1)</sup>		BA 1.0 + NAA 3.0 mg.L	
	Rooting	Shooting <sup>2)</sup>	Rooting	Shooting
0	4.7	24.4	22.5	18.7
1	5.5	32.3	16.0	36.6
5	4.3	60.8	24.6	64.5
10	17.7	98.7	30.6	38.6
20	0.0	1.3	1.6	4.3
50	0.0	0.0	0.0	0.0

<sup>1)</sup>Callus was inoculated on the regeneration medium, MS with 30g/L sucrose, 1.0% agar, just after radiation treatment.

<sup>2)</sup>Shooting and rooting means number of shoots or roots per 9 cm petri dish.



**Fig. 172.** Regeneration of garlic callus as affected by gamma radiation. A: MS with kinetin 3.0+NAA 3.0 mg/L, B: BA 1.0+NAA 3.0 mg/L. Dose of radiation: from left to right: 0, 1, 5, 10, 20, 50 Gy

#### 라. 방사선과 자외선에 대한 고추식물체 및 배양세포의 반응차 구명

종자처리 및 초기생장은 다음과 같다. 건조 종자와 침적종자에 방사선과 자외선을 처리하였다. 자외선 처리는 자외선 등에 노출된 시간별로 처리하였다.

그림 173는 방사선과 자외선을 처리한 고추 종자의 발아율을 나타내었다. 방사선조사에서 건조종자보다 침적종자가 방사선 조사에 더욱 민감하였다. 침적종자의 50 Gy조사를 제외하곤 최종 발아율은 차이가 없으나 발아속도는 차이가 나는 것으로 관찰되었다. 자외선의 처리에서는 고추종자의 발아율에 큰 차이를 보이지 않았다.

발아한 묘의 초장을 보면 방사선조사에서 10 Gy조사까지는 무조사에 비해 초장이 증가하는 경향이였다. 초장도 침적종자에 50 Gy 조사한 유묘는 현저히 감소하였다. 자외선 처리는 초장의 증가효과가 관찰되지 않았다(그림 174).

방사선을 조사한 종자로부터 발아한 유묘의 엽수는 무조사에 비해 감소하였고, 침적종자의 50 Gy 조사에서는 잎의 발생이 거의 되지 않았다. 자외선 처리에서는 처리시간에 관계없이 무처리와 비슷하였다(그림 175).

엽면적은 방사선 조사에 의해 감소하였고 침적종자의 50 Gy조사에서는 현저히 감소하였다(그림 176). 자외선의 처리는 유묘의 엽면적에 영향을 미치지 못하였다.

유묘의 건물중은 저선량의 방사선조사에 의해 증가하였는데, 침적종자는 1 Gy, 건조종자는 5 Gy 조사에서 가장 높았다. 자외선의 처리는 24시간 처리에서 약간 감소하나 유묘의 건물중에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(그림 177).

이상의 실험에서 방사선과 자외선의 종자처리 후 발아율과 초기 유묘의 생장을 보면 자외선보다 방사선 조사가 종자의 발아나 초기 생장에 민감하였으며, 건조 종자보다 침적종자가 더 민감하게 반응하였다. 저선량의 방사선을 종자에 조사할 경우 초장의 증가와 건물중의 증가효과가 있었다.

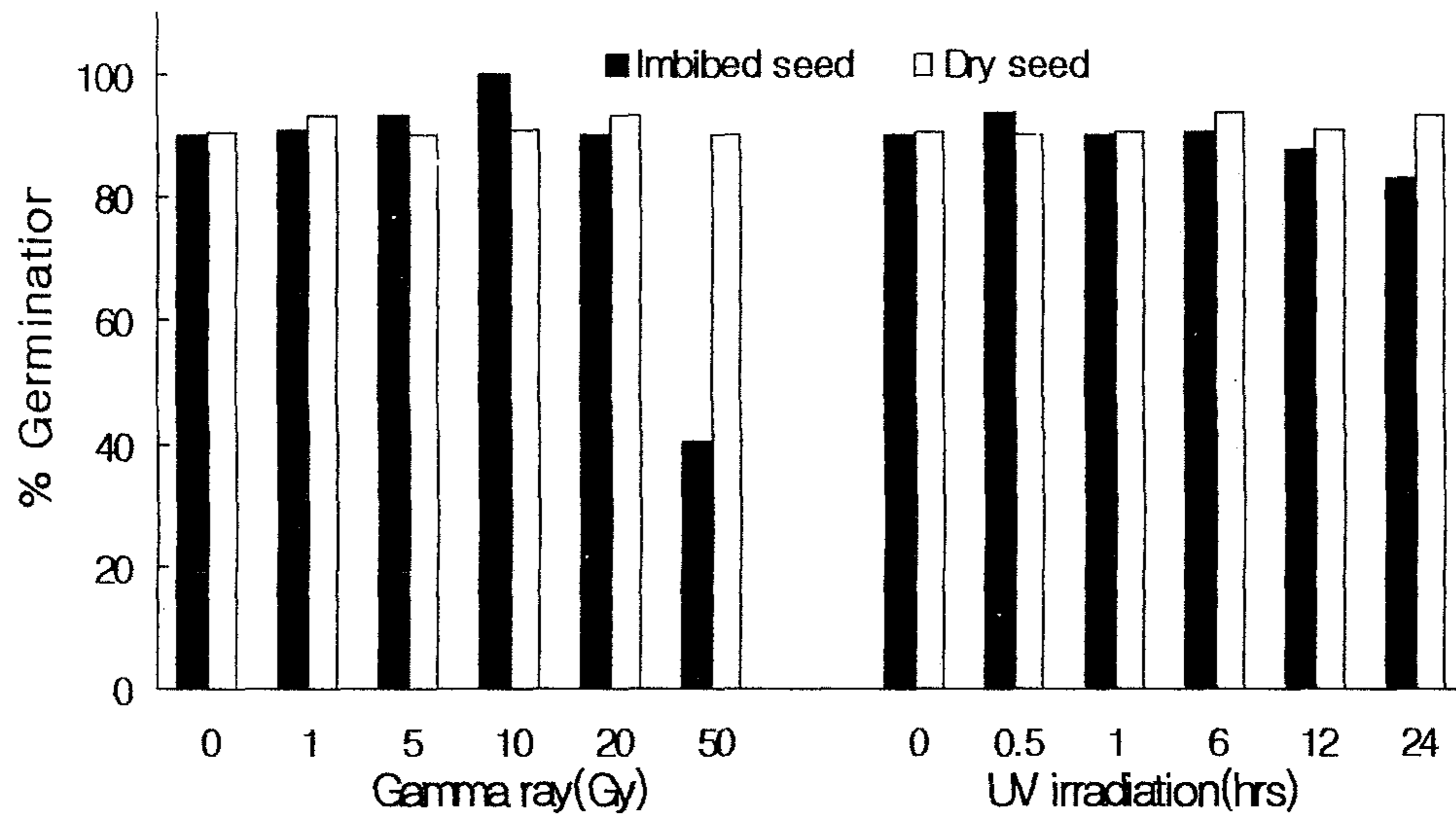
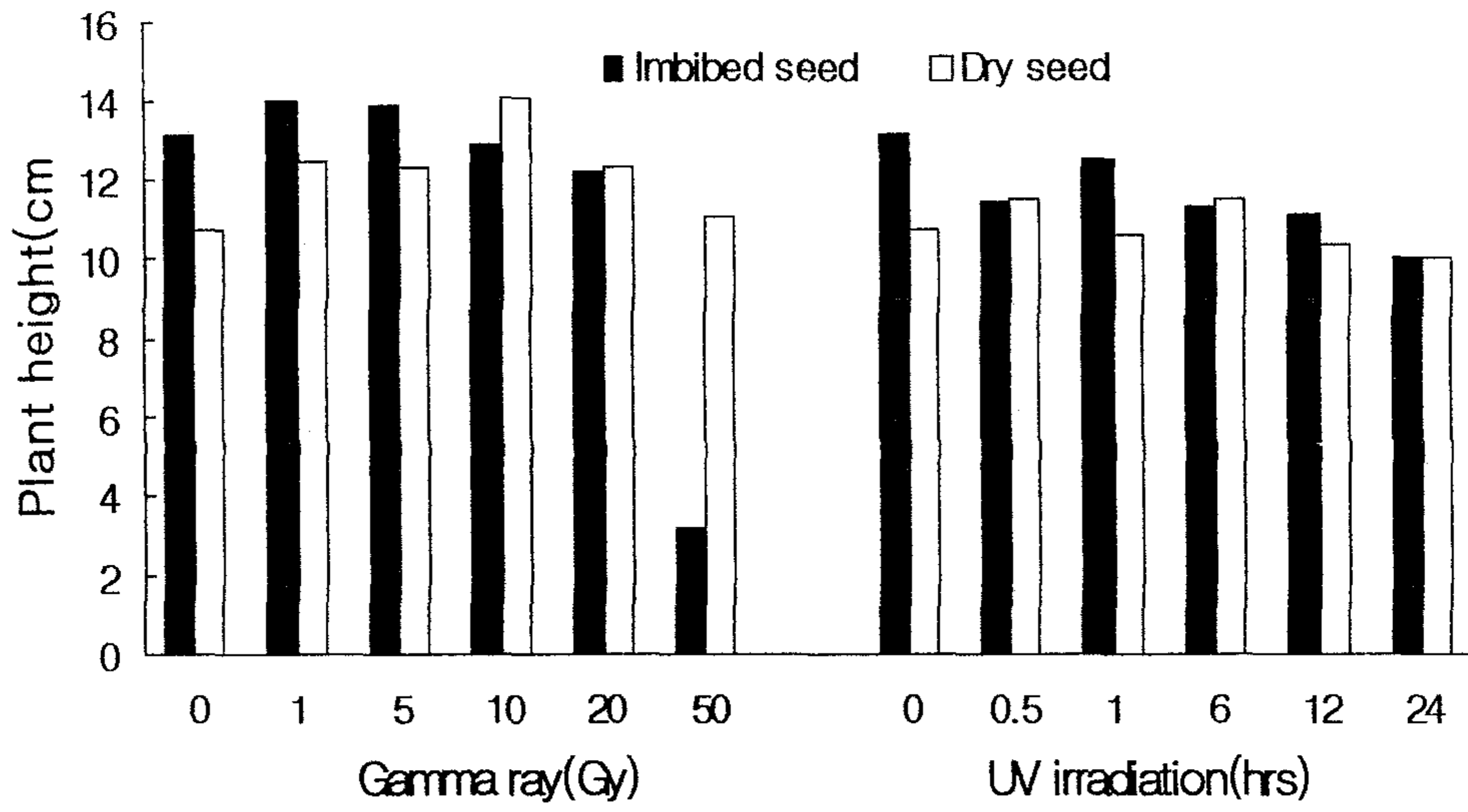


Fig. 173. Germination of pepper seed as affected by gamma and UV irradiation to imbibed and dry seed.



**Fig. 174.** Plant height of pepper seedling as affected by gamma and UV irradiation to imbibed and dry seed.

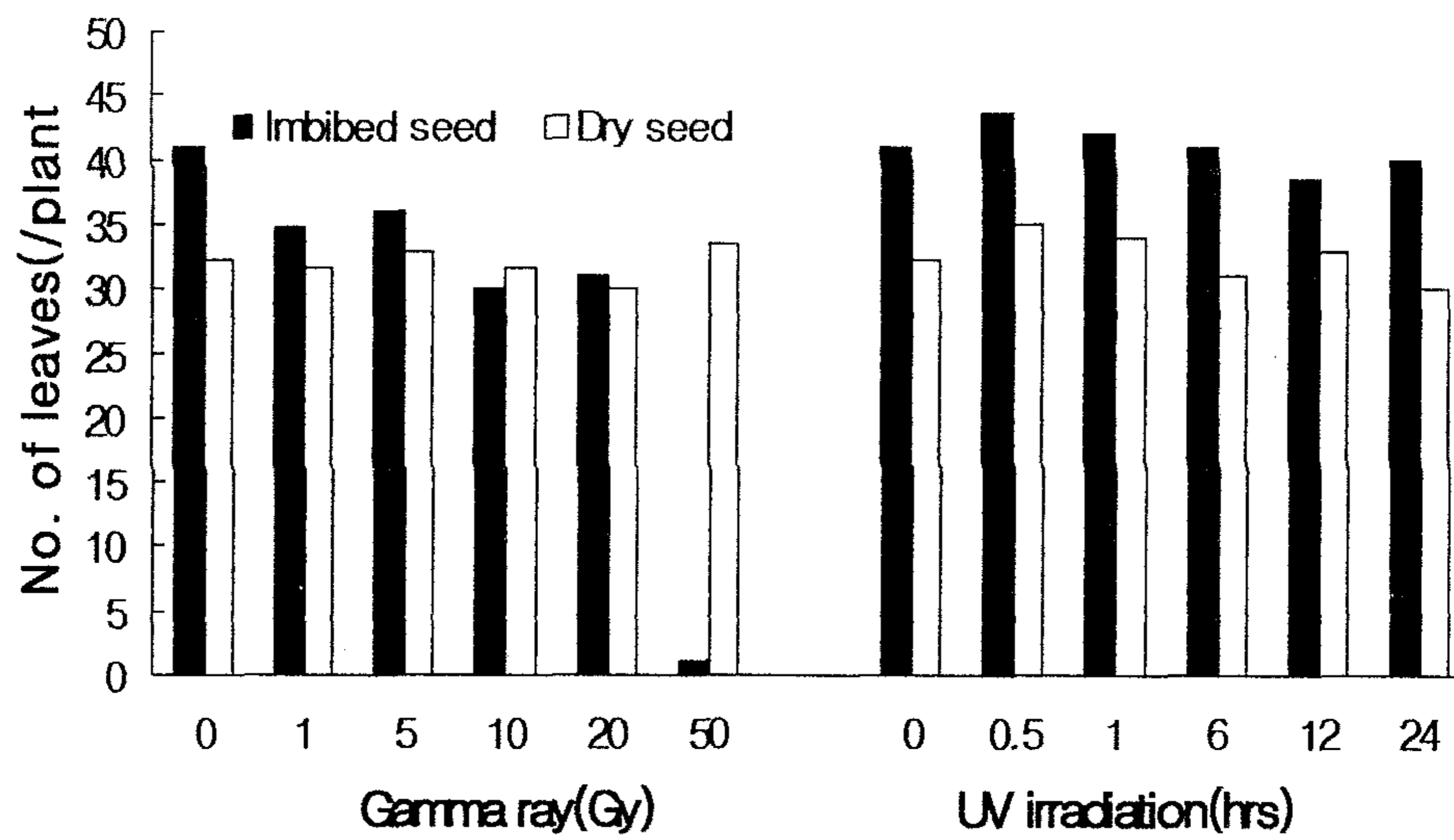


Fig. 175. Leaf number of pepper seedling as affected by gamma and UV irradiation treated to imbibed and dry seed.

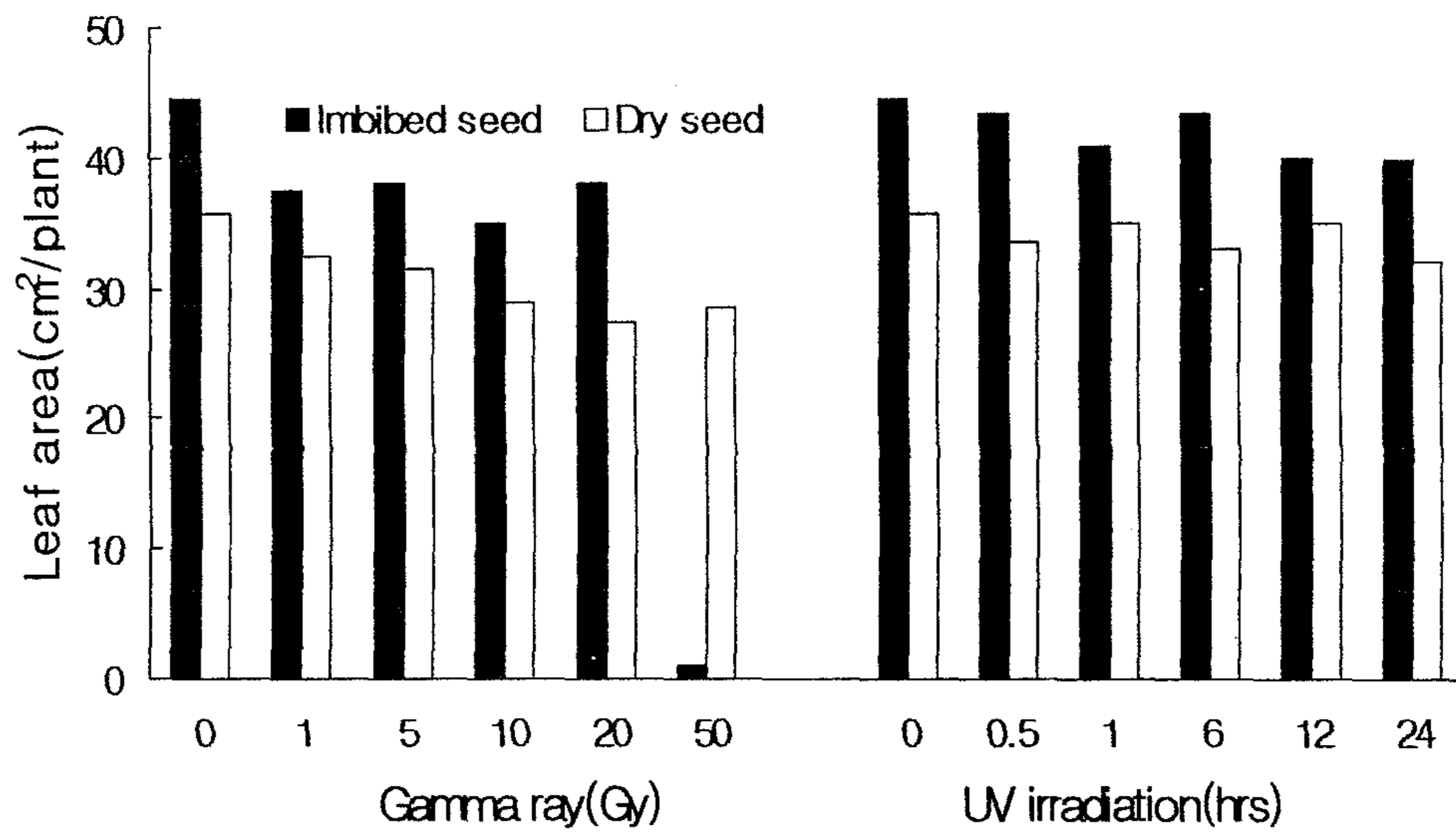


Fig. 176. Leaf area of pepper seedling as affected by gamma and UV irradiation treated to imbibed and dry seed.

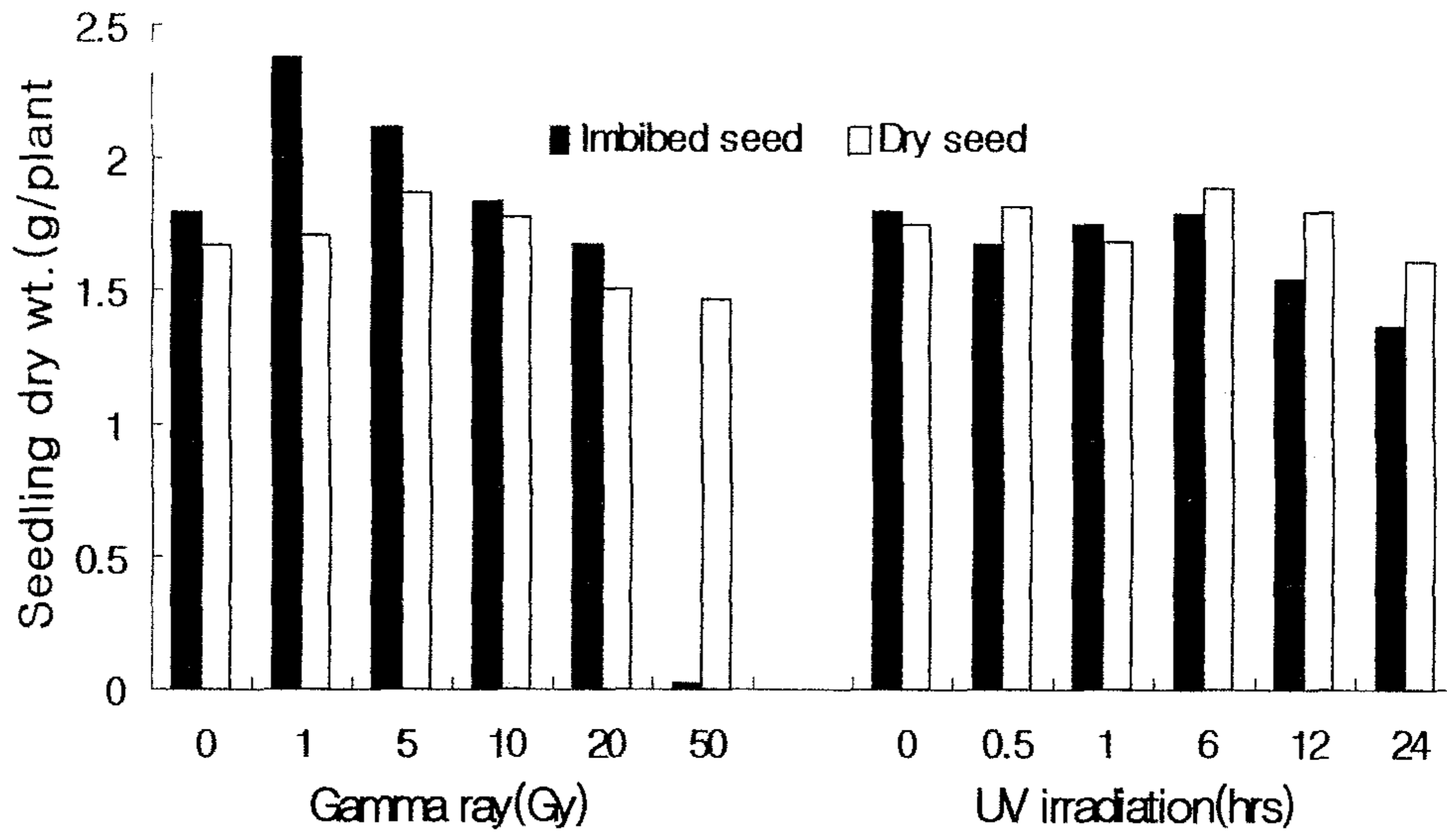


Fig. 177. Dry weight of pepper seedling as affected by gamma and UV irradiation treated to imbibed and dry seed.



식물체 및 배양세포 처리는 다음과 같이 수행하였다. 종자처리와 달리 식물체에 방사선을 조사하면 조사 후 시간에 경과함에 따라 가시적 피해 정도는 자외선이 방사선보다 훨씬 심각하게 나타났다. 방사선 조사는 조사 후 시간이 경과함에 따라 가시적 피해 정도가 증가하지만 조사 10일 이후부터는 더 이상 진전되지 않고 피해를 받은 상태로 식물체가 계속 생존해 있으나, 자외선을 처리한 식물체는 짧은 시간을 처리해도 그 이후부터 계속적으로 피해 정도가 심해져 결국 식물체가 고사하는 것으로 나타났다. 즉 자외선에 30분간을 처리한 식물체와 6시간을 처리한 식물체의 가시적 피해 정도는 처리 20일 후에는 동일하며 90%이상의 식물체가 고사하는 것으로 관찰되었다(그림 178).

자외선과 방사선을 조사한 후 잎과 배양세포로부터 누출되는 전해물질의 양을 측정하였다. 방사선 조사는 잎 및 캘러스 모두 전해물질의 누출정도가 무조사와 차이가 없으나 자외선 처리는 잎으로부터의 전해물질 누출정도가 무처리에 비해 수십배가 증가하였다(그림 179).

캘러스에 자외선을 처리한 경우에도 잎에 비해서는 낮으나 자외선의 처리 시간이 증가함에 따라 전해물질의 누출량이 증가하였다. 전해물질의 누출량이 자외선 처리에서 증가하는 것과 그림 178에서 자외선 처리 후 피해 증상이 회복되지 않고 계속 심하게 진행되는 것과 관련이 있을 것으로 추정된다.

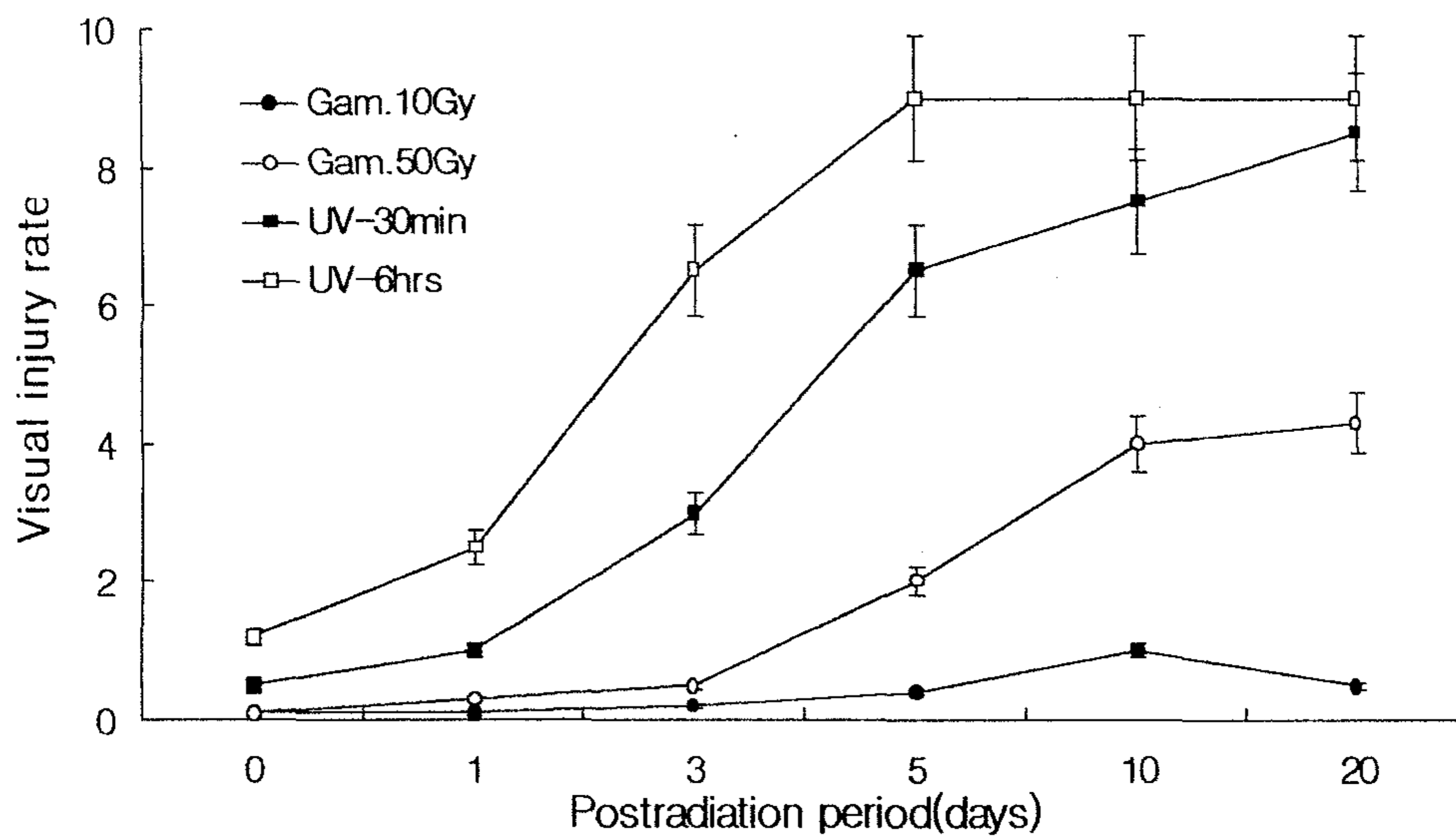
방사선과 자외선을 처리한 후 세포의 활력을 조사하였다(그림 180). 방사선 조사는 저 선량인 1, 5, 10 Gy조사에서 무조사보다 세포활력이 증가하였고, 고 선량인 20 및 50 Gy에서는 떨어졌다. 자외선 처리는 1시간 이상 처리부터는 세포활력이 방사선 처리보다 현저한 감소를 보였다.

식물세포를 방사선과 자외선에 노출시킨 후 경과 시간별로 세포 활력의 변화를 관찰하였다(표 77). 방사선 조사는 정상상태에서 시간이 경과함에 따라 세포의 활력이 회복되는 것을 뚜렷이 관찰 할 수 있었다. 그러나 자외선의 처리는 처리 후 시간이 경과함에 따라 세포의 활력이 현저히 감소하여 궁극적으로 세포가 고사하게 되어 방사선 조사에 대한 반응과는 대조적인 결과를 보였다.

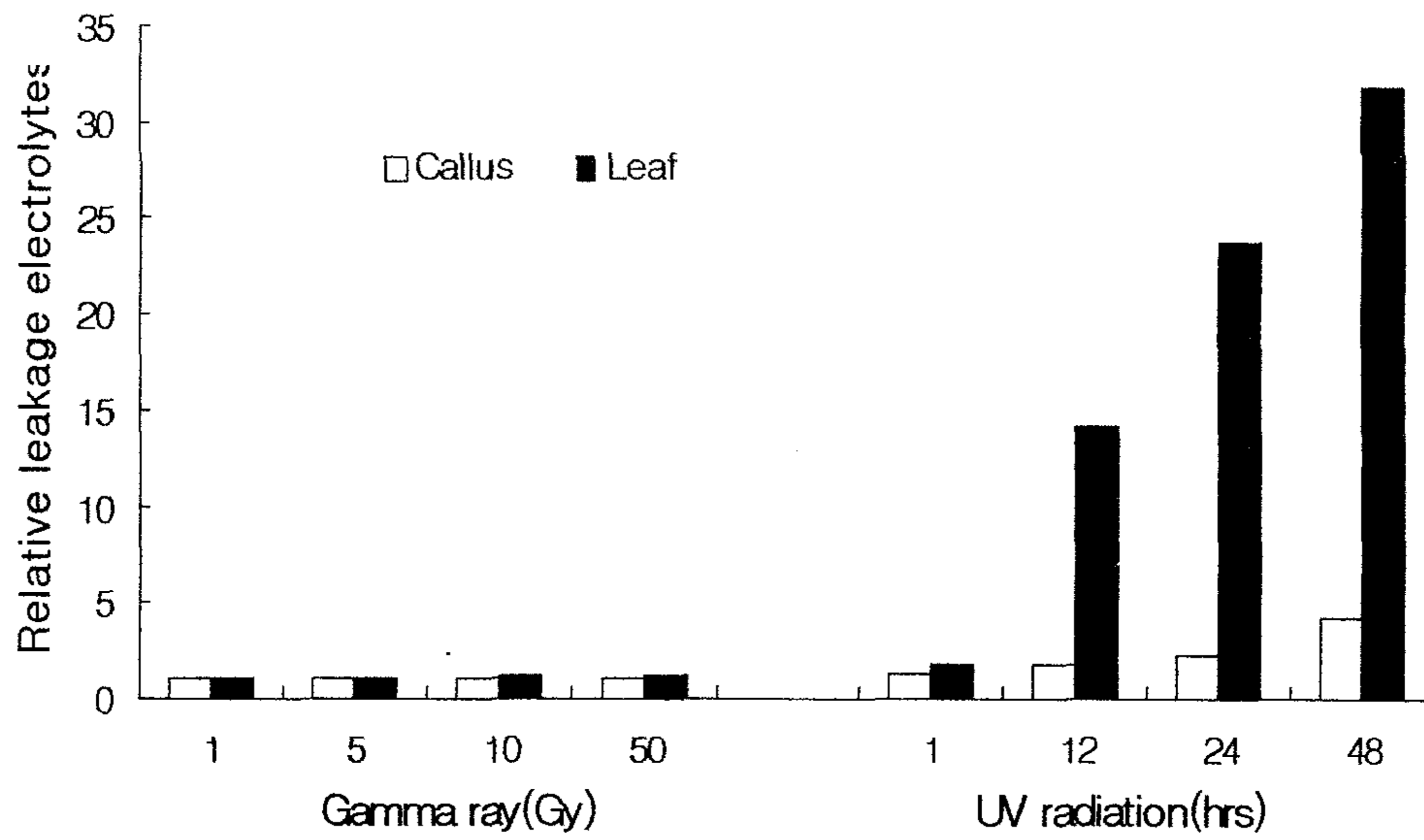
그림 181는 방사선과 자외선을 처리 한 후 0 및 24시간 후에 처리강도 별로 TTC에 의한 세포활력을 조사한 사진이다(붉게 보일수록 세포의 활력이 높음). 방사선 50 Gy를 조사한 세포를 보면 조사 직후에는 세포의 활력이 낮았으나 24시간 후에는 뚜렷이 회복되는 것을 볼 수 있으나 자외선의 처리는 오히려 48시간 후에 세포의 활력이 현저히 떨어지는 것을 볼 수 있었다.

방사선과 자외선의 처리 결과를 보면 종자처리에서는 방사선이 민감하게 작용하고, 식물체나 배양세포에 처리하면 자외선에 대한 반응이 방사선 보다 더욱 민감하였다. 즉 자외선을 처리하면 식물체나 배양세포는 정상상태에 두어도 계속적으로 피해정도가 심각하게 진전되나 방사선은 회복되거나 피해를 받은 상태로 계속 생존해 있는 경향을 보였다. 고선량의 방사선을 조사할 경우 식물체가 완전히 회복되는 것이 아니라 어느 정도의 가시적 피해가 진행되다가 더 이상 피해가 심화되지 않는으나 회복되지도 않은 상태로 식물체가 살아가는 것을 볼 수 있었다.

표 78은 고추식물체에서 여러 종류의 환경 스트레스 하에서 생합성되는 것으로 알려진 독성 phytoalexin인 capsidiol의 함량을 조사한 것이다. 방사선 조사에 의해서는 capsidiol의 생합성이 전혀 일어나지 않았으나 자외선 처리에 의해서는 현저히 증가하는 것을 알 수 있다. Capsidiol은 고추세포가 스트레스를 받을 경우 생합성되는 독성물질로 병원균 등에 강한 항균활성을 나타내나 과다 생성시 식물체 자신도 이 물질의 독성에 의해 고사하는 것으로 알려져 있다. 자외선 처리에 의해 capsidiol의 량이 증가하는 것이 앞의 실험 결과에서 자외선 처리 후 식물체가 고사하는 쪽으로 진행되는 것과 관련이 있을 것으로 추정된다.



**Fig. 178.** Progress of visual injury of pepper plant after gamma and UV irradiation. All data was an average of five independent plants.



**Fig. 179.** Effect of gamma and UV irradiation on the leakage of electrolytes from callus and leaf.

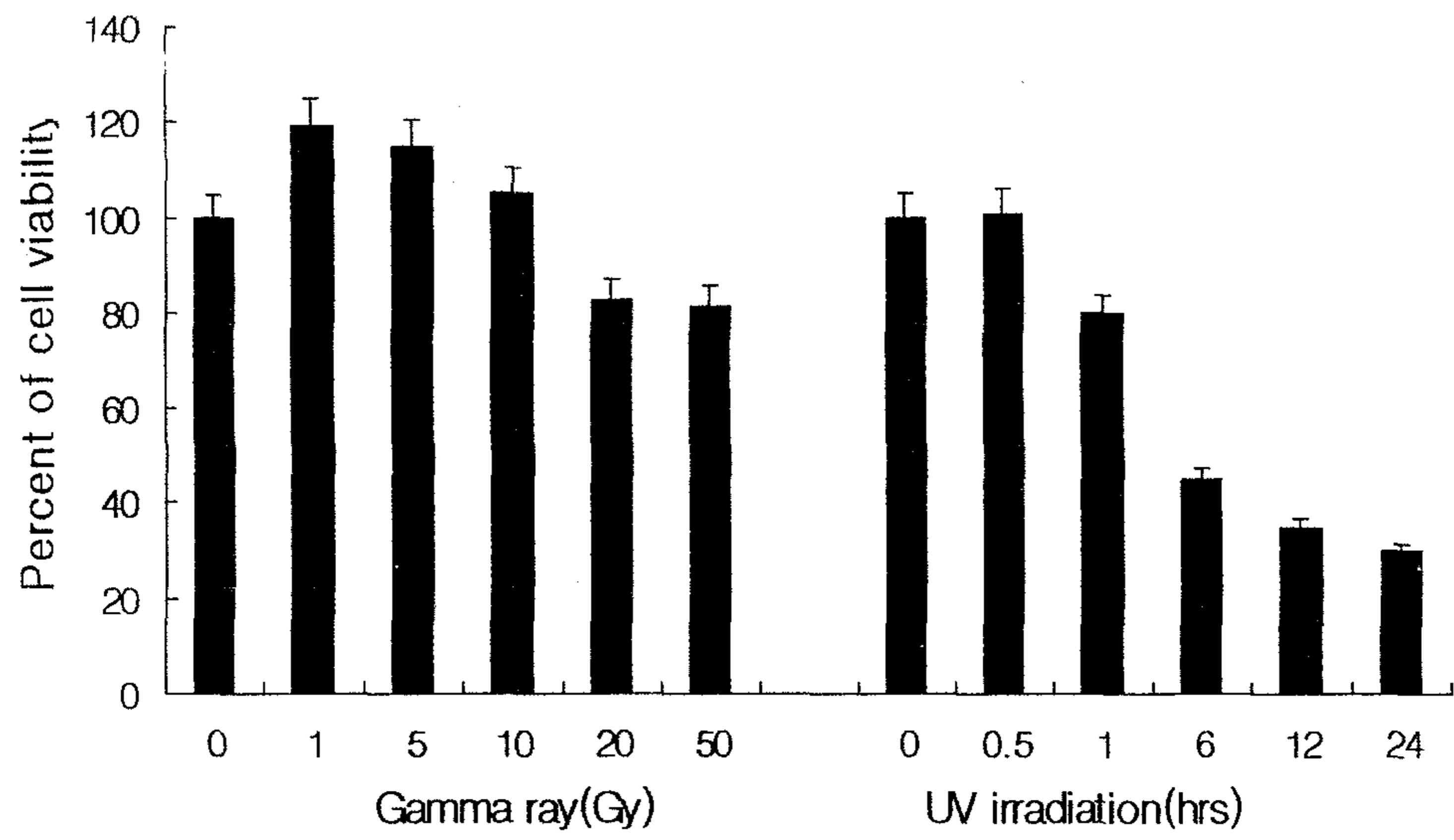


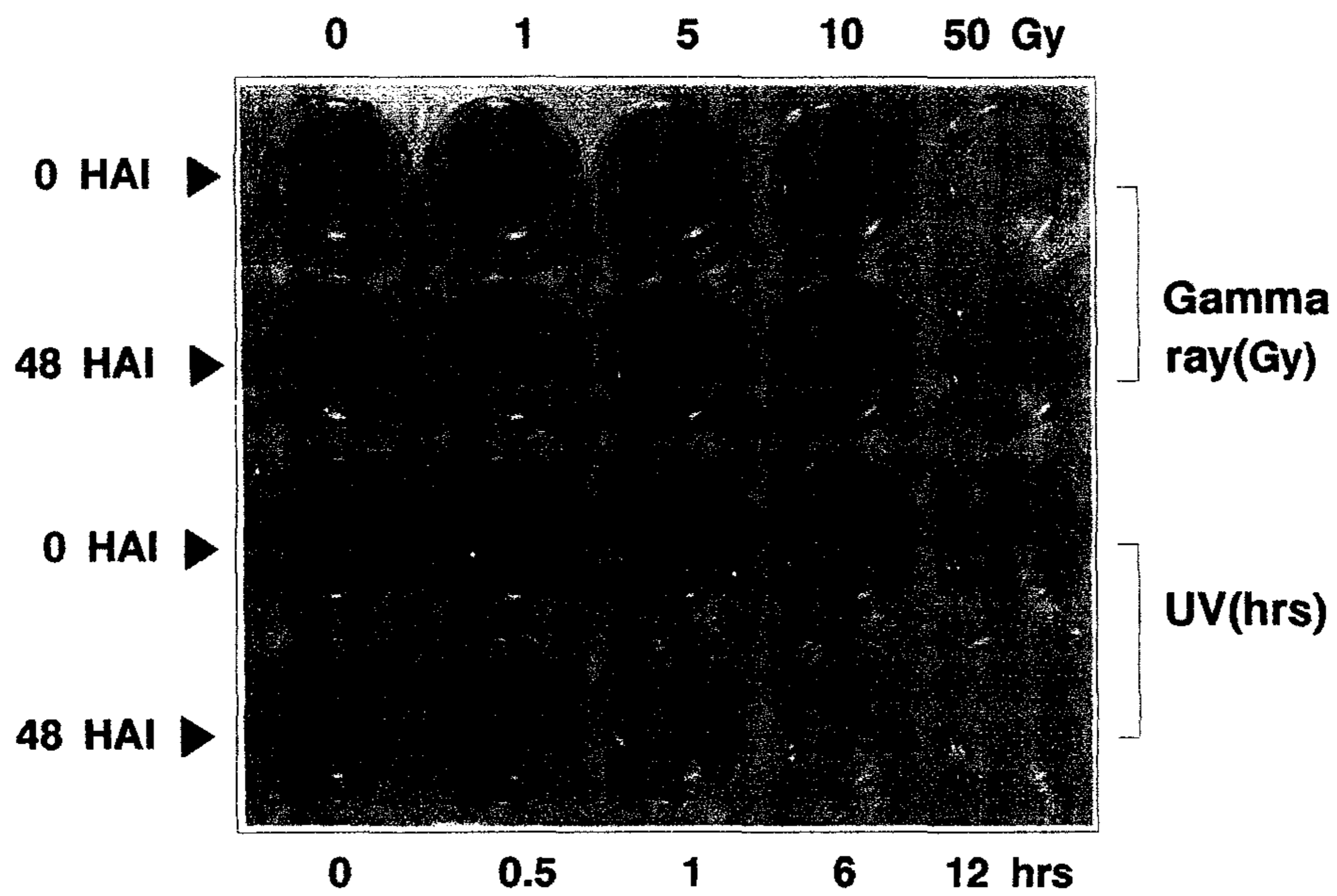
Fig. 180. Effect of gamma and UV irradiation on the viability of pepper callus.

**Table 77.** Changes in cell viability after gamma and UV irradiation to pepper cells.

Treatments	Cell viability(%) <sup>a</sup>			
	0	3	6	12 DAT <sup>b</sup>
Control	100.0	100.0	100.0	100.0
Gamma 10 Gy	62.0 ± 7.8	91.5 ± 5.7	110.4 ± 9.8	109.5 ± 11.7
50 Gy	58.4 ± 10.4	78.7 ± 6.8	78.5 ± 8.5	78.7 ± 10.8
UV 0.5 hrs	121.0 ± 15.7	60.3 ± 10.4	43.7 ± 5.8	12.8 ± 4.7
6.0 hrs	31.6 ± 6.8	19.7 ± 4.3	10.4 ± 3.3	7.5 ± 3.5

<sup>a</sup>Cell viability is based on TTC test and calculated as % of untreated control cells.

<sup>b</sup>DAT: days after treatment.



**Fig. 181.** Cell viability test of pepper callus after gamma and UV irradiation at 0 and 48 hours after irradiation(HAI).

**Table 78.** Effect of gamma and UV irradiation on the production of capsidiol in pepper callus and seedling.

Postradiation period(days)	Gamma ray 50 Gy		UV 6 hours	
	Callus	Seedling	Callus	Seedling
0	0	0	0	100±31 <sup>1)</sup>
1	0	0	29±17	254±53
5	0	0	39±11	187±23
10	0	0	33±14	118±15

<sup>1)</sup>Value means relative area of capsidiol spot on thin layer chromatography



## 제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

### 1. 연구개발 목표 및 달성도

구분	연구개발목표	달성도	연구개발목표
1차년도 ( '00)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○저선량 방사선의 작물 성장촉진효과 구명</li> <li>○저선량 조사 식물 환경 스트레스 반응 연구</li> <li>○방사선 유도성 인자 탐색 및 특성 조사</li> </ul>	100%	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 작물과 발아 저조 채종 종자의 발아율 12%, 생장 5% 증진</li> <li>- 유용 색소인 shikonin 생산을 위한 지치 세포 증식 저선량 수준 결정</li> <li>- 씨감자 멩아 12%, 포장 수량 12% 증가</li> <li>- 저선량 조사 식물의 후속 고선량 및 배추 무 사마귀 병 내성 증진</li> <li>- 저선량 조사 식물체의 생리활성(효소) 6% 증가</li> <li>- 고구마 배양세포 및 식물체에서 swpa1 유전자 발현 확인</li> <li>- 담배 현탁배양세포에서 감마선에 의해 유도되는 단백질 확인</li> <li>- 감마선 조사에 의해 APX와 SOD 등의 항산화 효소 활성 증가</li> </ul>
2차년도 ( '01)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○저선량에 의한 작물과 유용물질 생산성 향상</li> <li>○저선량의 식물 활성증진의 생리학적 해석</li> <li>○방사선 유도성 인자 분리 및 활용기술 개발</li> </ul>	100%	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 목은 종자 및 채소 종자의 발아율 20% 증가</li> <li>- 산업체 비교 실험에서 발아율 5% 증가 확인</li> <li>- 방사선이 조사된 고추 식물체의 항산화 효소활성 증가</li> <li>- 저선량 조사된 작물의 광합성능 및 효소 활성 8% 증대</li> <li>- 저선량 조사 식물체의 저온, 광 스트레스 및 후속 고선량에 대한 저항성 8% 증진 확인</li> <li>- shikonin 생산을 위한 지치의 세포 증식 적정선량 수준 결정</li> <li>- 감마선 조사에 의한 핵 DNA 손상 및 수선기작을 comet assay로 분석</li> <li>- 방사선 유도성 단백질 및 polypeptide 동정 결과 새로운 단백질 함량증가 확인</li> <li>- 방사선 유도성 유전자(cDNA) 탐색을 통해 방사선 유도성 유전자 확인</li> </ul>
3차년도 ( '02)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○작물과 유용물질 생산 저선량 방사선 처리 기술 개발</li> <li>○저선량 방사선의 식물자극 작용 반응기구 규명</li> <li>○방사선 유도성 인자분리 및 활용기술 개발</li> </ul>	100%	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 발아저조 채종종자의 발아율과 생육 10% 증가</li> <li>- 채종종자의 산업체와의 비교발아실험에서 5% 증가</li> <li>- 저선량에 의한 벼와 콩 당대수량 5% 증가 및 후대수량검정</li> <li>- 저장방법과 기간에 따른 인공씨감자의 멩아율 10% 증가</li> <li>- 고통지시험장과의 비교실험에서 감자수량 10% 증가확인</li> <li>- 저선량 방사선이 조사된 콩식물체의 지하부 활성 5% 증가</li> <li>- 저선량 조사에 의한 생육촉진 작물의 효소/호르몬/광합성능 5% 증가</li> <li>- 저선량에 의한 shikonin 생산성 향상 622 cell line 선발</li> <li>- 저선량 조사한 작물의 2-D분석을 통한 단백질 발현 확인</li> <li>- 저선량 조사 콩식물체의 UV 스트레스에 대한 5% 경감효과 확인 및 고추식물체의 후속고선량 저항성 5% 증진</li> <li>- 배추 유식물체의 배추·무 사마귀 병에 대한 저항성 4Gy에서 증가 확인</li> <li>- 저선량 조사 벼 당대와 후대식물체의 유전자변이성을 RAPD primer로 분석</li> <li>- 연속적인 방사선처리에 의한 고추식물체의 적응반응 규명</li> <li>- 방사선에 의해 유도되는 수종의 단백질과 cDNA 확인</li> </ul>

## 2. 대외기여도

- 작물과 채소 종자 및 밭아 저조 채종 종자의 발아율과 생장증대 기술 개발을 통하여 농업관련 기관 및 종묘 산업체와의 연계 기반 구축.
- 저선량 조사 작물의 광합성능 증진과 저온, UV 및 후속고선량 내성증진 기술개발을 통하여 비료, 농약 사용을 감소시키고 아울러 토양 및 하천 오염을 방지하는데 기여.
- 환경스트레스와 방사선이 조사된 작물의 유전자발현 분석기술 개발을 통하여 작물피해기작 기초연구 및 내성작물 개발에 활용 기대.
- 지치의 shikonin 생산성을 향상시킬 수 있는 세포배양법 개발을 통하여 관련 산업체 기술 이전 및 산업재산권 확보 기대.
- 방사선유도 단백질 및 polypeptide 탐색과 동정 기술 개발을 통하여 생명과학 기초연구, 신기능성 작물개발 및 관련 산업체의 실용화 연구에 기여.
- 저선량 방사선의 식물에 대한 유익효과의 확립과 이에 대한 국민홍보를 통하여 원자력에 대한 이해증진과 원자력의 안전성에 대한 문제제기에 효과적으로 대응.

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

저선량 방사선에 의한 묵은 종자의 발아력 증대와 종자의 휴면기간 조절 및 작물의 생산성 향상은 종묘 및 종서 산업에 크게 기여할 것으로 예상되며 저선량 방사선의 생물 유익 효과는 방사선의 양면성을 보여주므로 종자 발아와 포장생육에서 가시적인 효과를 보이는 실험자료를 언론매체 및 원자력을 이해하는 여성 모임 단체의 특별 강연을 통해 국민 홍보에도 주력할 계획이다.

작물과 채소종자 및 발아저조 채종종자의 발아율과 성장증대 기술개발은 농업관련기관 및 종묘산업체와의 연계로 실용화가 가능하며 씨감자의 휴면 조절은 특허 및 지적 재산권도 가능하다. 유용색소인 shikonin 생산성 향상 세포 배양법에 대한 향후 집중적인 연구가 수행되어 세포배양의 대량화가 이루어지면 관련 산업체에 기술 이전 및 산업재산권 확보의 가능성도 있다. 환경 스트레스 혹은 감마선이 조사된 작물의 광합성과 유전자 발현 분석은 환경 스트레스에 의한 식물의 피해를 감소시키고 내성 작물의 개발에 이용될 수 있다. 또한 방사선 유도성 단백질 및 polypeptide 탐색과 동정은 생명과학 기초연구와 관련 산업체의 실용화 연구에 기여할 것이며 향후 특허 출원 가능성이 있다.

생육 촉진과 수량 증가에 의한 농업 생산성을 향상시키고 저선량 조사 식물체의 광합성능 증진과 저온, UV 그리고 후속고선량에 대한 내성 및 병저항성 증대를 통한 비료 농약의 사용 절감으로 환경 오염을 줄일 수 있으며 방사선을 활용한 신 기능성 작물 개발은 농작물의 부가가치를 창출할 수 있다. 또한 생물자원의 이용 효율을 극대화시켜 저선량 방사선의 생물 활성 촉진에 의한 유익 효과를 발표함으로써 비발전 분야에 원자력의 평화적 이용 홍보에 크게 기여할 것으로 생각된다.

저선량 방사선의 식물 유익효과를 확립함으로써 국민들의 원자력 이해 증진과 원자력의 안전성 문제해결에도 기여할 것이다. 또한 지구 환경 변화로 인한 오존층 파괴와 자연 방사선 증가에 따른 식물 및 인간의 보호 방법이 개발될 수 있고 농작물의 안정적 생산을 위한 기반조성이 된다.

## 제 6 장 참고문헌

1. Stan, S. and A. Jinga 1966. The effects of low gamma ray dose of  $^{60}\text{Co}$  on bean and soybean plants. Ann. Inst. Cercet. Pentru, Cerale Plante The. Fundulea, 34:369.
2. Sparrow, A.H. and E. Christensen. 1950. Effect of X- ray, neutron and chronic gamma irradiation on growth and yield of potato. Am. J. Bot. 37:667-671.
3. Luckey, T.D. 1980. Hormesis with ionizing radiation. CRC press. Inc. Boca Raton. Fla.
4. 大山ハルミ, 山田 武. 1997. 底線量 放射線の 健康影響-放射線ホルミックス. *Radioisotopes* 46:360-370.
5. Kim, J. S., Lee, Y. K., Song, H. S., Park, H. S. and Kim, J. K. 1999. Effects of low dose ionizing radiation on the growth and yield of soybean cultivars, *Korean J. Environ. Agri.* 18:66-69.
6. Miller, M.W. and Miller, W.M. 1987. Radiation hormesis in plants. *Health Physics.* 52:607-616.
7. Ikushima, T., Aritomi, H. and Morisita, J. 1996. Radioadaptive response; Efficient repair of radiation induced DNA damage in adapted cells. *Mutation research.* 358: 193-198.
8. Feinendegen, L.E., Muhlensiepen, H., Bond, V.P. and Sonhaus, C.A. 1987. Intracellular stimulation of biochemical control mechanisms. *Health Physics.* 52: 663-669.
9. Maldney A. and J.R. Thouremine. 1898. On the influence of X-rays and germination: periods of acceleration and retardation. *Arch. Int. Phyiol.* 4:18-22.
10. Richet, C. 1906. The action of minute doses of materials upon lactic fermentation: periods of acceleration and retardation. *Arch. Int. Phyiol.* 4:18-22.
11. Simon, J., M. Digleria. and Z. Lang. 1981. Comparative studies on the effects of low doses X-ray and gamma irradiation on the amylase activity of maize seedling Proc. European Soc. for Nuclear Methods in Agriculture. Aberdeen. U.K.

12. Sheppard, S. C. and Evenden, W. G. 1986. Factors controlling the response of field crops to very low dose of gamma irradiation of the seed. *Can. J. Plant Sci.* 66:431-435.
13. Bhattacharjee D. 1996. Role of radioadaptation on radiation-induced thymic lymphoma in mice. *Mutation Research.* 358:231-235.
14. Yonezawa M., Misonoh J. and Hosokawa Y. 1996. Two types of X-ray induced radioresistance in mice, presence of 4 dose ranges with distinct biological effects. *Mutation Research.* 358:237-243.
15. UNSCEAR. 1994. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations scientific committee on the effects of atomic radiation, New York.
16. Nambi, K.S.V. and Soman S.D. 1987. Environmental radiation and cancer in India. *Health Physics.* 52:653-657.
17. Haunold, E. and J. Zebra. 1980. Nitrogen content of two spring wheat varieties as by seed irradiation. *Stim. Newsl.* 3:30-36.
18. Korosi, F. and Krakkai. 1983. Effect of gamma irradiation in *Phaseolus vulgaris* L. seed on  $^{32}\text{PO}_4^{-3}$  uptake of seedlings and its translocation pattern. *Enviro. Exp. Bot.* 23:149-152.
19. Biebl, R. and I.Y. Mostafa. 1965. Water content of wheat and barley seeds and their radiosensitivity. *Radiat. Bot.* 5:1-5.
20. Suess, A. and W. Grosse. 1968. The effect of low doses of  $\gamma$  radiation of plant growth. *Abt. Strahlennutzung.* December. 1.
21. Sparrow AH. 1960. Uses of large sources of ionizing radiation in botanical research and some possible practical application, in *Large Radiation Sources in Industry.* Intl. Atomic Energy Agency. Vienna 195-219.
22. Jaarma, M. 1958. Influence of ionizing radiation on potato tubers. *Ark. Kemi.* 13:97-101.
23. Avakyan TM, SP Semerdzhyan and RR Atayan. 1964. Results concerning the removal of newly gathered potato tubers for the dormant stage. *Radiobiology(USSR).* 4:463-466.
24. Johson, E. L. 1936. Susceptibility of seventy species of flowering plants to X radiation. *Plant Physiol.* 11:319-322.

25. Menyhert, Z. and A. Balint. 1965. Radiostimulation-experiments with potato. Bayer. Landwirtsch. Jahrb. 42:61-65.
26. Abdullaev, M.A. and N.M. Berezina. 1968. Radiostimulating effect in  $\gamma$  irradiated tomato seedlings. Dokl. Akad. Nauk az. SSR, 24: 38-40.
27. Bebawi, F.F. 1984. Effects of gamma irradiation on *Sorghum Bicolorstriga hermonthica* relation. Environm. and Exper. Botany. 24: 123-129.
28. Vlasyuk, P.A. 1964. Effect of ionizing radiation on the physiological biochemical properties and metabolism of agricultural plants. Inst. Fiziol. Biokhim. Rast. SSR. 24-31.
29. Pal, I. 1975. Investigation on the effects of seed irradiation of plants in a phytotron. I. Tomato. Stim. Newsl. 8: 23-36.
30. Nirale, A.S. and B.K. Gaur. 1973. Radiation-induced stimulation crop plant. INSA Symp. on Use of Iostopes and Radiation in Agriculture, Biology and Animal Sciences. Chandigarh, Jan. 1(2): 60-63.
31. Garg, C.K., B. Tirwari and O. Singh. 1972. Effect of presowing gamma irradiated seeds in relation to the germination behavior of Indian colza (*Brassica campestris* L.). Indian J. Agr. Sci. 42:553.
32. Kuzin, A.M., M.E. Vagobova, and A. F. Revin. 1976. Molecular mechanism of stimuiating action of an ionizing radiation on seeds. II. Activation of protein and high molecular weight RNA synthesis. Radiobiology(Moscow). 16:259.
33. Sax, K. 1955. The effect of ionizing radiation on plant growth. Amer. J. Botany. 42:360-364.
34. Breslavets, I.P., N.M. Berezina, G.L. Shchibria, M.L. Romanchikovam, V.A. Lazykova and Z.F. Milesenko. 1960. Increased yield of radishes and carrots by X or  $\gamma$  irradiation of seeds before sowing. Biophysics (USSR). 5:86-89.
35. Izvorska, N. 1973. The gamma ray effect on the growth, productivity and some biochemical changes of pepper. Inst. Fiziol. Rast. Bulg. Akad. Nauk. 18:79-83.
36. Yurina, A.V. and L.A. Kardashina. 1977. Presowing gamma

irradiation of seeds as a method to increase cucumber fruitfulness in the hot house.

37. Kuzin, A.M., E.K. Uzorin and V.I. Chirkovskii. 1963. Remote effects of  $\gamma$  irradiation of seeds on the development of various *Nicotina* plants. *Radiobiology*(Moscow). 3:903-904.
38. Denger, W. and W. Schacht. 1975. Examination of the specific effect of low doses of ionizing radiation on the seed of cultivated plants: 5 year production experiments with silo maize seed irradiated with  $^{60}\text{Co}$  gamma radiation. *Radiobiol. Radiother.* 16: 37-40.
39. Conter, A., D. Dupouy, C. Delteil, and H. Planel. 1986. Influence of very low doses of ionizing radiation on *Synechococcus lividus* metabolism during the initial growth phase. *Arch. Microbiol.* 144:286-290.
40. Allen, R.D. 1995. Dissection of oxidative stress tolerance using transgenic plants. *Plant Physiol.* 107:1049-1054.
41. Harlow, G.R., Jenkins, M.E., Pottalwala, T.S. and Mount, D.W. 1994. Isolation of *uvh1*, an *Arabidopsis* mutant hypersensitive to ultraviolet light and ionizing radiation. *Plant Cell* 6:227-235.
42. Jiang, C.Z., Yen, C.N., Cronin, K., Mitchell, D. and Britt, A.B. 1997. UV-and gamma-radiation sensitive mutants of *Arabidopsis thaliana*. *Genetics* 147:1401-1409.
43. Niels, W.H. and J.B. Roger. 1970. *Manual on Radiation Dosimetry* Mard Dekker Inc. New York.
44. Bradford, M.M. 1976. A rapid sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem.* 72:248-254.
45. Yun BW, HG Hue, SY Kwon, HS Lee, JK Jo and SS Kwak. 1998. Antioxidant enzyme in *Nicotiana* cells containing an *Ipomoea* peroxidase gene. *Phytochemistry* 48:1287-1290.
46. Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. *Methods Enzyme* 105:121-126.
47. Arnon, D.L. 1949. Copperenzymes in isolated chloroplasts polyphenoloxidase in *veta vulgaris*. *Plant Physiol.* 24:1-15.
48. Hodges, M, Cornic, G. and Briantais, J.M. 1989. Chlorophyll

- fluorescence from spinach leaves: resolution of non-photochemical quenching. *Biochim. Biophys. Acta.* 974:289-293.
49. Schreiber, U., Schliwa, U. and Bilger, W. 1986. Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer. *Photosynth. Res.* 10:51-62.
  50. Krause, G. H. and Weis, E. 1984. Chlorophyll fluorescence as tool in plant physiology, II. Interpretation of fluorescence signals. *Photosynth. Res.* 5:139-157.
  51. Krause, G. H. and Weis, E. 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basis. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42:313-349.
  52. Park, YI and Hong, YN. 1994. Phosphate-deficiency reduces the electron transport capacities of thylakoid membranes through limiting photosystem II in leaves of chinese cabbage. *J. Photosci.* 1:95-105.
  53. Havaux, M., Strasser, R. J. and Greppin, H. 1991. A theoretical and experimental analysis of the qP and qNP coefficients of chlorophyll fluorescence quenching and their relation to photochemical and nonphotochemical events. *Photosynth. Res.* 27: 41-55.
  54. Öquist, G., Chow, W. S. and Anderson, J. M. 1992. Photoinhibition of photosynthesis represents a mechanism for long-term regulation of photosystem II. *Planta* 186:450-460.
  55. Choi, SM, Jeong, SW, Jeong, WJ, Kwon, SY, Chow, WS and Park Y-I. 2002. Chloroplastic Cu/Zn-SOD is a highly sensitive site in cucumber leaves chilled in the light. *Planta.* 216:315-324.
  56. Corneille, S., Cournac, L., Guedeney, G., Havaux, M., Peltier G. 1998. Reduction of the plastoquinone pool by exogenous NADH and NADPH in higher plant chloroplasts. Characterization of a NAD(P)H-plastoquinone oxidoreductase. *Biochim Biophys Acta* 1363: 59-69.
  57. McCord, J. M. and I. Fridovich. 1969. Superoxide dismutase an enzymatic function for Erythrocyte protein. *J. Biol. Chem.* 244:



- 6049-6055.
58. Scandalios J.G. 1993. Oxygen stress and superoxide dismutase. *Plant Physiol.* 101: 7-12.
  59. Cuniff, P. 1995. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. pp 27-28 16th eds. Vol(I), AOAC International.
  60. McCord, J.M., Fridovich, I. 1969. Superoxide dismutase. An enzymatic function for erythrocyte hemocuprein (Hemocuprein). *J Biol Chem* 244:6049-6055.
  61. 김재성, 이영복. 1998. 저선량 전리방사선에 의한 작물의 활성증진. *한국환경농학회지* 17(1):76-85.
  62. 이은경, 김재성, 이영근, 이영복. 1998. 저선량 감마선 조사에 의한 고추의 발아와 생육. *한국원예학회지* 39(6):670-675.
  63. 김재성, 이영근, 박홍숙, 백명화, 정규희. 2000. 저선량 방사선이 참박의 초기생육과 생리활성에 미치는 효과. *한국환경농학회지* 19(2):142-146.
  64. Pal I. 1975. Investigation on the effects of seed irradiation of plants on a phytotron. I. Tomato. *Stim. News* 1. 8:23-36.
  65. Kim, J. S., Song, H. S., Kim, J. K., Lee, Y. K. and Lee, Y. B. 1998. Stimulation effect of early growth in crops by low dose radiation. *Korean J. of Environ. Agri.* 17(2):156-159.
  66. Stan, S. and A. Croitoru. 1970. Effect of low, moderate and high levels of gamma radiations ( $^{60}\text{Co}$ ) on soybean plants. I. Analysis of growth and yield. *Stim. Newsl.* 1:23-25.
  67. Gaur, B. I. and Desai, B. M. 1971. Screening of crop plants for radiation induced stimulation. I. Kidney bean, onion and lettuce. *Stim. Newsl.* 3.
  68. 김재성, 송희섭, 김진규, 이영근. 1998. 저선량  $\gamma$ 선 조사에 의한 곡물류와 채소류의 생육촉진효과. *한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집 (II)* pp 645-650.
  69. Izvorska, N. 1973. The gamma ray effect on the growth, productivity and some biochemical changes of pepper. *Inst. Fiziol. Rast. Bulg. Akad. Nauk.* 18:79-83.
  70. 김재성(1996) 고등식물에서의 방사선 hormesis. KAERI/AR-435/96. 한국원자력연구소.

71. Kuzin A.M., V.A. Kopylov and M.E. Vagobova, 1976a. On the role played by radiotoxins in stimulation of the growth and development of irradiated seeds. *Stim. Newsl.* 9:27-31. The utilization of ionizing radiation in agriculture. *Proc. Int. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy, United Nations, Geneva.* 12:149-151.
72. 김재성, 김진규, 이은경, 이영복. 1997. 전리방사선에 의한 배추와 무의 생육촉진 효과. *한국환경농학회지* 16(4):390-393.
73. 이은경, 김재성, 이영복. 1998a. 저선량  $\gamma$ -ray 조사에 의한 고추의 발아와 생육 촉진효과. *한국원예학회지* 39(6):670-675.
74. 김재성, 이은경, 백명화, 김동희, 이영복. 2000a. 저선량 감마선이 채소 발아종자의 생리활성에 미치는 영향. *한국환경농학회지* 19(1):58-61.
75. 김재성, 이영근, 백명화, 이영복, 박영선. 1999. 묵은 배추종자의 발아와 생육에 미치는 저선량  $\gamma$ 선 효과. *한국환경생물학회지* 17(1):11-15.
76. 김재성, 김진규, 이영근, 백명화, 김정규. 1998. 저선량  $\gamma$ 선 조사가 배추종자의 발아와 수량에 미치는 효과. *한국환경농학회지* 17(3):274-278.
77. 이은경, 김재성, 이영근, 이영복. 1998. 저선량 감마선 조사가 파종자의 발아에 미치는 영향. *한국환경농학회지* 17(4):215-219.
78. Kim, J.S., Kim, J.K., Lee, Y.K. and Back, M.W. 1998. Effect of low dose gamma radiation on the germination and yield components of Chinese cabbage. *Korean J. Environ. Agric.* 17(3):274~278.
79. Kaindl, K. and Fosner, M. 1965. The accelerating effect of small radiation doses on plants. *Bayer. Landwirtsch. Jahrb. Sonderh.* 42:11.
80. Berezina, N.M., Kornova, E.I. and Riza-Zade, R.R. 1962. Result of production testing maize seeds irradiated prior to sowing with  $^{137}\text{Cs}$  gamma rays. *Radiobiology (USSR).* 2:180.
81. Caldera, P.G. 1971. Gamma stimulation of maize. *Stim. Newsl.*, 2:5.
82. Degner, W. and Schacht, W. 1974. Specific effects of low doses of ionizing radiation on seed of cultivated plants. *Radibiol. Rodiother.* 15:661.
83. 김재성, 김동희, 백명화, 정혁, 이영복. 2001. 씨감자 “대지” 품종의 휴면타파와 생리활성에 미치는 저선량 방사선 효과. *한국환경농학회지.* 20(2):116-121.

84. Caldera, P.G. 1970. Gamma stimulation of potato tubers. *Stim. Newsl.* 1:6-7.
85. Metlitskii, L.V. 1967. Irradiation of potatoes and other vegetables to prevent sprouting *Radiat. Obrabotka Pisch. Prod. Izdatel. Ekon. Moscow, NSA* 23:12249.
86. Sprau, H. B. and Lenz, M. (1929) The effects of X-rays on potato tubers for "seed". *Science*, 69:606.
87. Zhezhel, N.G. 1958. Studies on the mechanism of the biological effect of small doses of ionizing radiation in plant. *Vestsel 'Skokhoz Nauk.* 8:123.
88. 이행순, 유순희, 권석윤, 김재성, 곽상수. 1999. 감마선에 의한 카사바 (*Manihot esculenta Crantz*) 배양세포의 항산화효소 활성 변화. *식물조직배양학회지* 26(1):53-58.
89. Sah N.K. and S.S. Pramanik. 1996. Peroxidase changes in barley induced by ionizing and thermal radiation. *Int. J. Radiat Biol.* 69:107-111.
90. F.B. Salisbury and C.W. Ross. 1991. *Plant Physiology*, Fourth ed., pp. 493-495, Wadsworth P Press, California.
91. Kim, J. S., Lee, Y. K., Back, M. H., Kim, D. H. and Lee, Y. B. 2000. Effects of low dose gamma radiation on the growth and antioxidant enzyme activities of chinese cabbage (*Brassica campestris L.*) seedlings. *Korean J. of Environ. Biol.* 18:247-253.
92. Kim, J. S., Back, M. H., Kim, D. H., Lee, Y. K., and Chung, K. H. 2001. Effects of gamma radiation on the germination, growth and enzyme (peroxidase and catalase) activities of old vegetable seed. *Korean J. of Environ. Biol.* 19:205-210.
93. Kim, J. S., Back, M. H., Lee, H. Y. and Lee, Y. K. 2001. Effects of low dose gamma irradiation on the germination and physiological activity of old red pepper (*Capsicum annum L.*) seed. *Korean J. of Associ. for Radi. Pro.* 26:409-415.
94. Gorlanov, N.A. 1973. Change in chlorophyll and its properties in the leaves of rotting kidney bean cuttings, grown from gamma irradiated seeds. *Radiobiology(Moscow)*, 13:634.
95. Anderson, J.M., W.S., Chow and D.J., Goodchild. 1988. Thylakoid

- membrane organisation in Sun/Shade Acclimation. pp.11-26. In Ecology of photosynthesis in Sun and Shade (Evans JR, SV Caemmerer and WW Adams III eds.). CSIRO. Melbourne.
96. Aro, E.M., E. Rintamäki, P. Korhonen and P. Mäenpää. 1986. Relationship between chloroplast structure and O<sub>2</sub> evolution rate of leaf discs in plants from different biotypes in south Finland. *Plant Cell Environ.* 9:87-94.
  97. Holzwarth, A.R. 1987. Picosecond fluorescence spectroscopy and energy transfer in photosynthetic antenna pigments. *In The Light Reactions*, J. Bafber (ed.). Elsevier, Amsterdam. pp. 95-158.
  98. Demmig, B. and W. Klaus. 1988. Characterization of three components of non-photochemical quenching and their response to photoinhibition. *In Ecology of photosynthesis in Sun and Shade*. J. R. Evans, S. von Caemmerer and W.W. Adams III (eds), CSIRO, Melbourne, pp. 163-177.
  99. Kuzin, A.M. 1955. The utilization of ionizing radiation in agriculture. *Proc. Int. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy*, United Nations, Geneva, 12:149-151.
  100. Skok, J., Chorny, W. and Rakosnik, E.J. 1965. An examination of stimulatory effects of ionizing radiation in plants. *Radiat. Bot.* 5:281-292.
  101. Lowell, W. Woodstock, Michael F. Combs. 1965. Effect of gamma-irradiation of corn seed on the respiration and growth of the seedling. *Amer. Jour. Bot.* 52(6):563-569.
  102. Kim, J. S., Kim, J. K., Back, M. H. and Kim, D. H. 1999. Effects of low dose  $\gamma$ -ray on the early growth of tomato and the resistance to subsequent high doses of radiation. *Korean J. of Asso. Radiat. Prot.* 24(3):123-129.
  103. Kim, J. S., Lee, E. K., Song, J. Y., Kim, H. G. and Lee, Y. B. 2000. Induction of resistance against *Plytophthora Blight* of pepper by low dose gamma ray radiation. *Korean J. of Environ. Bio.* 18(1):47-51.
  104. Kim, J. S., Lee, E. K., Lee, Y. K. and Lee, Y. B. 1999. Influence of artificial acid rain on the growth of soybean irradiated with

- low dose gamma radiation. Korean J. of Environ. Agri. 18(3):245-249.
105. Grisenko, G. V. and Mazhara, V. M. 1968. Ionizing and other types of radiation and their influence on the resistance of corn to stalk and root rot. *Tr. Vses. Sovesch. Immunitetu Rast.* 2:21-25.
  106. Lavorel, J. and Etienne, A. L. 1979. In vivo chlorophyll fluorescence. In *Processes of Photosynthesis*, J. Barber (ed.), Elsevier, Amsterdam, pp. 203-268.
  107. Papageorgiou, G. 1975. Chlorophyll fluorescence. An intrinsic probe of photosynthesis. In *Bioenergetics of Photosynthesis*, J. Amesz and Govindjee (eds.), Academic Press, New York, pp. 587-619.
  108. Imbrie, C. W. and Murphy, T. M. 1984. Mechanism of photoinactivation of plant plasma membrane ATPase. *Photochem. Photobiol.* 40:243-248.
  109. Lee, H. Y., Chow, W. S. and Hong, Y. N. 1999. Photoinactivation of photosystem II in leaves of *Capsicum annum*. *Physiol. Plant.* 105:377-384.
  110. Renger, G. and U. Schreiber. 1986. Practical applications of fluorometric methods to algae and higher plant research. pp.587-619. In *Light Emission by Plants and Bacteria* (Govindjee D, J. Amesz and DC Fork eds.). Academic Press. New York.
  111. Briantais, J.M., C. Vernotte, M. Picaud and G.H. Krause. 1979. A quantitative study of the slow decline of chlorophyll a fluorescence in isolated chloroplasts. *Biochim. Biophys. Acta* 548:128-138.
  112. Critchley, C. and R.M. Smillie. 1981. Leaf chlorophyll fluorescence as an indicator of high light stress(photoinhibition) in *Cucumis sativa* L. *Aust. J. Plant Physiol.* 8:133-141.
  113. Isabelle, B.J., S.K. Dube, A.D. Jansen, M. Edelman, and A.K. Mattoo. 2000. Ultraviolet-B radiation impacts light-mediated turnover of the photosystemic reaction center heterodimer in *Arabidopsis* mutants altered in phenolic metabolism. *Plant Physiol.* 124:1275-1283.
  114. Larkum, A.W.D. and W.F. Wood. 1990. The effect of UV-B radiation

- on photosynthesis and photosystem II of phytoplanktonic and benthic algae and seagrass. *Curr. Res. Photosyn.* 2:385-388.
115. Kwon, S. T., E. A Jung and J. S. Kim. 2001. Effect of  $\gamma$ -radiation on growth and antioxidant enzyme activities in red pepper. *Kor. J. Life Science* 11:612-617.
116. Kergonou J., Bernard P., Braquet M. and Rocquet, G. 1987. Effect of whole body gamma irradiation on lipid peroxidation in rat tissue. *Biochimie* 63:555-559.
117. Dubner D., Giscone P., Jaitovich I. and Perez M. 1995. Free radicals production and estimation of oxidative stress related to gamma irradiation. *Biol Trace Elem Res* 47:265-270.
118. Campos, F. F. and E. G. Velasco. 1962. Comparative effect of cobalt<sup>60</sup> on plant character of two recommended Philippine lowland rice varieties. *Philipp. Agric.* 46:93-95.

서 지 정 보 양 식

<b>수행기관보고서번호</b>	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/RR-2340/2002			
<b>제목 / 부제</b>	방사선이용 생물활성 증진효과 연구		
<b>연구책임자 및 부서명 (AR, TR 등의 경우 주저자)</b>	김 재 성 (방사선이용연구부)		
<b>연구자 및 부서명</b>	이영근, 이상재, 임용택, 이해연, 백명화, 유준철, 장준혁, 황혜연, 황보준권, 임지혁(한국원자력연구소, 방사선이용연구부) 박연일(충남대), 권순태(안동대)		
<b>출판지</b>	대전	<b>발행기관</b>	한국원자력연구소
<b>페이지</b>	418 p.	<b>도표</b>	있음( ● ), 없음( )
<b>발행년</b>	2003 년	<b>크기</b>	21x29.7 cm
<b>참고사항</b>			
<b>비밀여부</b>	공개( ● ), 대외비( ), 급비밀	<b>보고서종류</b>	연구보고서
<b>연구위탁기관</b>		<b>계약번호</b>	
<b>초록 (15-20줄내외)</b>	<p>본 연구에서는 저선량 감마선 조사에 의한 작물의 발아와 초기 생육 및 포장에서의 수량 증가 효과를 다양한 품종과 방법을 통해 조사하였고, 항산화 효소, 광합성 능, 및 양분 흡수 등 생리적 활성을 분석하여 저선량에 의한 생육 촉진 효과를 설명하고자 했다. 저선량 방사선의 생물활성 자극 효과를 이용하여 지치의 유용색소물질인 shikonin 생산을 유도함으로써 저선량 방사선의 새로운 활용방안을 모색하였고, 천연자연방사선을 방출하는 세라믹을 연구에 도입하여 저선량 방사선과 비교 실험을 함으로써 저선량 방사선의 생물유익효과를 검증하고자 하였다. 그리고 종묘 산업체와 연계하여 저선량 방사선을 이용한 폐기종자 활성화 및 그 활용방안에 관한 연구를 진행하였다. 이러한 연구를 기초로 저선량 조사 식물의 광, 온도, UV-B 스트레스 등 다양한 환경 스트레스에 대한 내성 변화를 조사하고 동시에 감마선 조사에 의한 핵 DNA의 손상과 수선 기작 및 단백질 발현을 2-D, Comet assay 등 다양한 분자생물학적인 방법을 통해 확인하고자 하였다.</p>		
<b>주제명키워드 (10단어내외)</b>	<p>방사선호르메시스, 저선량방사선, 감마선, 종자발아, 초기생육, 수량증가, 생리적 활성, 환경스트레스, 단백질발현</p>		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET							
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/RR-2340/2002							
Title / Subtitle		Radiation Hormesis in Plant					
Project Manager and Department (or Main Author)		Jae-Sung Kim (Radiation Application Research Div.)					
Researcher and Department		Young Keun Lee, Sang Jae Lee, Yong Taek Lim, Hae Youn Lee, Myung Hwa Baek, Jun Cheol Yoo, Jun Hyuk Chang, Hae Youn Hwangb, Jun Kwon Hwangbo, Jee Hyuk Lim (Radiation Application Research Div.), Youn Il Park(Chungnam Nat'l Univ.), Soon Tae Kwon(Andong Univ.)					
Publication Place	Taejon	Publisher	Korea Atomic Energy Research Institute		Publication Date	2003	
Page	418 p.	Ill. and Tab.	Yes(●), No ( )		Size	21x29.7 cm	
Note							
Classified	Open(●), Restricted( ), Class Document		Report Type		Research Report		
Sponsoring Org.				Contract No.			
Abstract (15-20 Lines)		<p>This research was performed to investigate the effects of low dose gamma radiation on germination, early growth and yield in a wide range of vegetable crops. The stimulating effects of gamma radiation was evaluated through investigating germination rate, early growth and physiological activities such as enzyme activities, hormones and photosynthetic responses etc. Induction of increased shikonin production in the plants by low dose gamma radiation was challenged to open up the possibility of applying radiation hormesis to the industrial mass production system of the natural materials useful to humans. Effects of natural radiation emitted from solid ceramics was compared on the plants with those of low dose gamma radiation. Finally, activation of aged seeds by low dose gamma radiation, probably facilitating their commercial circulation in the agriculture, was challenged in association with an industrial seed company. Moreover, the shift in resistance of the crops to environmental stresses including UV and low temperature was addressed as well as DNA damage, repair and protein expression after gamma irradiation.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Gamma radiation, hormesis, germination, low dose radiation, early growth, yield increasing, physiological activity, environmental stress, protein expression					