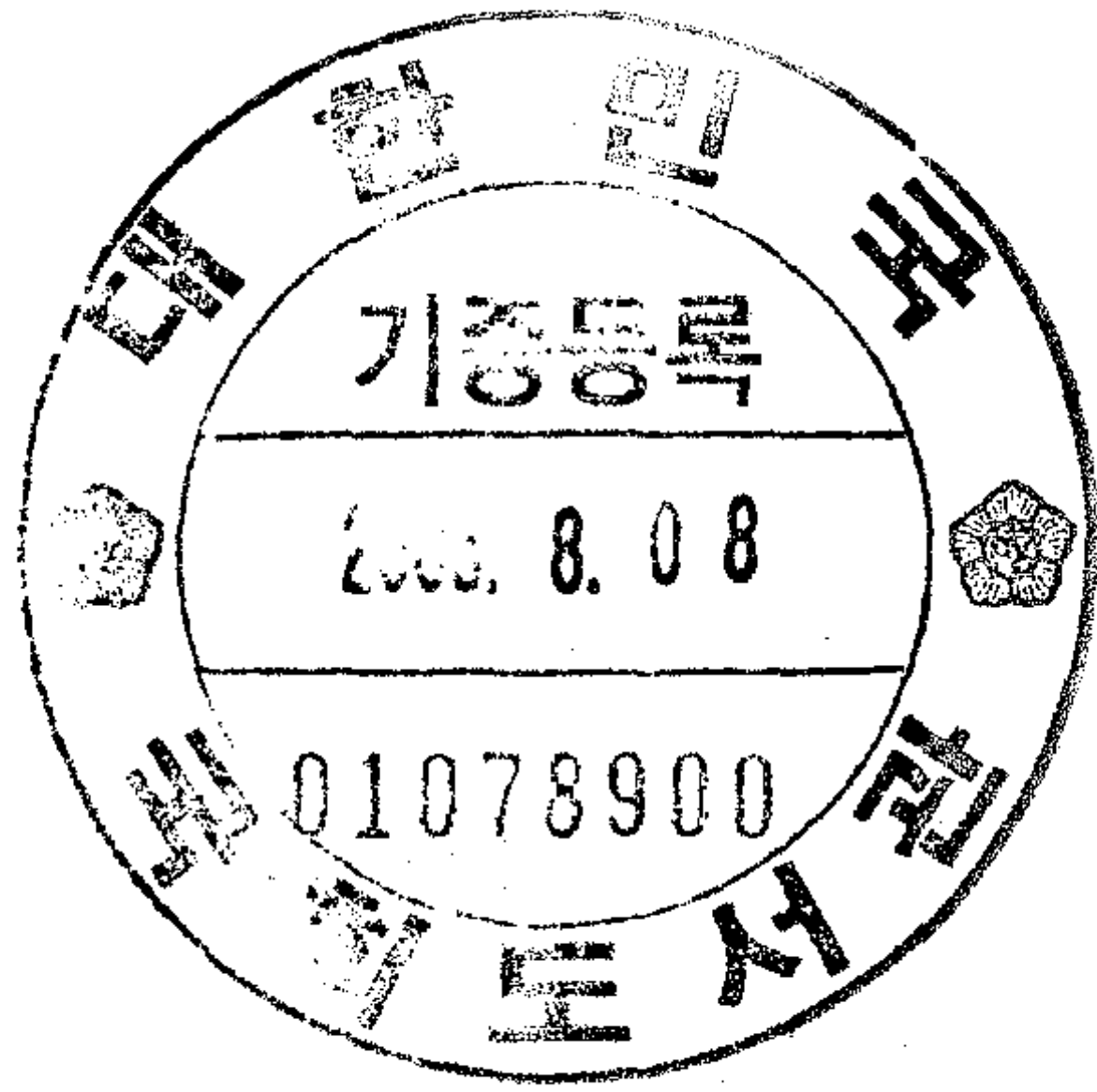


제어발파기법을 이용한 구조물 발파해체기술 개발

Development of Controlled Blasting Techniques
for Structure Demolition

한국지질자원연구원

과 학 기 술 부



제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “제어발파기법을 이용한 구조물 발파해체기술 개발”과제의 보고서로 제출합니다.

2003. 6.

주관연구기관명 : 한국지질자원연구원

주관연구책임자 : 류 창 하

연 구 원 : 정 소 결

연 구 원 : 선 우 춘

연 구 원 : 김 민 규

연 구 원 : 신 중 호

연 구 원 : 최 병 희

연 구 원 : 천 대 성

여 백

보고서 초록

과제 관리번호	2000-N-NL-01-C-183(M1-0001-00-0010)	해당단계 연구기간	2000.6. - 2003.6.	단계 구분	1단계/1단계
연구사업명	중 사업명	특정개발연구사업			
	세부사업명	국가지정연구실사업			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	제어발파기법을 이용한 구조물 발파해체기술 개발			
연구책임자	류 창 하 (柳 暢 夏)	해당단계 참여연구원수	총 : 8 명 내부 : 7 명 외부 : 1 명	해당단계 연구비	정부: 760,900 천원 기업: 천원 계: 760,900 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국지질자원연구원 제어발파연구실		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명 : 서울대학교		연구책임자 : 전 석 원		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
					260
<p>1. 기술자료의 축적</p> <ul style="list-style-type: none"> - 건축구조물 발파해체 설계 및 시공자료, 암굴착 설계 및 시공자료, 계측자료 수집 - 기술자료의 DB 구축(BlastMan), 용어의 표준화 <p>2. 제어발파설계 해석적 방법 정립</p> <ul style="list-style-type: none"> - 수치해석적 기법의 발파연구에의 적용성 분석(유한요소법, 유한차분법, 개별요소법) - 수치해석법의 입력자료 산정과 parameter study를 통한 설계변수 모델링 특성분석 <p>3. 동적거동 실험개념의 정립 및 실험시스템 구축</p> <ul style="list-style-type: none"> - Split Hopkinson 효과를 이용한 실험실 동적실험법 개념정립 및 실험장치 시제품 제작 <p>4. 붕괴거동 시뮬레이션 기법</p> <ul style="list-style-type: none"> - 불연속체 암반의 해석을 위한 개별요소 모델링 기법의 적용성 분석 - 붕괴거동에 대한 개별요소 모델링 입력변수 분석, 실험실 붕괴거동 모델개발 - 실험실 모델 실험 <p>5. 발파로 인한 지반진동 및 충격진동 발생특성 규명</p> <ul style="list-style-type: none"> - 춘천 저층아파트 해체발파 진동 및 충격진동 계측, 국내 전역에서의 발파진동 계측 - 계측자료처리 프로그램 개발(Vib10), 해체에 의한 지반진동의 주변영향 예측식 도출 - 환산거리 개념에 의한 진동예측기법 보완 모델개발(2종), 지하철발파 영향평가 현장적용 <p>6. 균열제어 발파기법 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - air deck 및 split tube를 이용한 균열제어발파법의 개발 및 적용시험 - 철골구조 해체를 위한 성형폭약 기술분석 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	발파해체, 제어발파, 균열제어, 동적거동, 붕괴거동, 지반진동, 충격진동, 환산거리			
	영 어	Explosive demolition, Controlled blasting, Fracture control, Dynamic behavior, Collapse behavior, Ground vibration, Impact vibration, Scaled distance			

여 백

요 약 문

I. 제 목

제어발파기법을 이용한 구조물 발파해체기술 개발

II. 연구개발의 배경 및 목적

화약을 이용한 발파방법은 일찍이 광업분야에서 지하 석탄의 채굴이나 석회석 노천채광과 같이 유용광물자원의 채취를 위한 수단으로 적용되어 왔으며 산업의 발달과 함께 댐, 도로사면, 도로터널이나 지하철 터널, 지하유류비축기지 등 토목, 건설 분야에서 토목구조물 및 암반구조물 건설을 위한 암반 굴착 방법으로 널리 이용되어 오고 있다. 최근에는 남산외인아파트 철거에서 볼 수 있듯이 노후되었거나 재개발을 위한 대규모 건축물의 철거에도 적용되는 등 다양한 적용범위를 갖고 있다. 그러나 발파에 의해 수반되는 진동, 소음, 비산과 같은 발파공해로 인하여 빈번한 민원의 대상이 되고 있으며, 건축물 발파해체의 경우 기술의 공개가 전혀 이루어지고 있지 않는 분야로서 소수의 외국 전문회사에 의해 세계시장이 독점되고 있는 실정이다.

구조물 발파해체기술은 토목, 건설, 환경, 자원 분야에 해당하는 기술로서 건축물의 철거, 토목 구조물의 해체, 암반 구조물의 제거 등 노후되었거나 재개발 또는 특수한 목적으로 대상 구조물을 제거하는데 적용되는 기술이다. 과거 건축물의 철거나 소규모 구조물의 해체를 위해서는 브레이커나 강구(鋼球) 등 기계력을 이용하여 부분적 제거로부터 점진적으로 전체 구조 해체에 이르는 방법이 적용되어 왔다. 그러나 이러한 방법은 다음과 같은 적용 한계를 제약을 갖고 있다.

- 기계식 해체기술의 특성상 대상 구조물에 중장비와 인력이 투입되어야 할 공간 필요
- 구조적 불안정한 상태에서의 작업에 따른 안전사고문제
- 장기적인 진동·소음·분진의 발생으로 인한 공해문제로 민원의 대상
- 고층 건축물이나 대형 콘크리트 구조물, 철골구조 등에는 사실상 적용할 수 없는 근본적인 기술적 한계를 갖고 있음

따라서 구조물의 외형적 규모나 재질에 따라 적용 한계를 극복할 수 있는 기술이 필요하다. 특히 도심지의 인구, 건물들이 밀집한 지역이나 주변에 보호받아야 할 시설들이 있는 지역에서는 주어진 공간에서 주변 건물, 시설물, 인체에 피해를 주지 않고 경제적으로 작업이 가능한 특수한 기술이 요구되고 있다.

국내의 경우 지난 60년대부터 건축된 아파트들이 재건축 주기를 맞고 있으며, 재개발을 위한 노후 산업공장 건물이나 대형 콘크리트 구조물의 해체, 지하공간개발에 따른 대규모 암반굴착 등 여러 산업분야에서 해체기술이 요구되고 있다. 그러나 이 분야 국내기술은 연구투자의 미흡, 전문인력의 부족으로 외국에 비해 매우 낙후되어 있다. 이론적, 실험적 기초연구를 비롯한 기술개발의 필요성은 인식되어 왔으나 단기적 연구투자에 그쳤고 과거 시장규모가 작은 시점에서 중장기적 투자로 연결되지 않았으며, 특히 IMF하에서 대부분의 민간기업들은 단기적으로 시장규모가 불투명하여 기술확보에 대한 투자가 어려운 상황이며 전문기술인력이 많이 이직한 상태이다. 발파해체기술의 수요가 급증하는 시점에서 발파기술의 고도성을 고려하여 볼 때 국내 기술축적을 위한 연구가 시급히 요구되고 있다.

본 연구의 목적은 브레이커나 강구 등 기계력에 의한 기존의 방법들을 사용하여 해체하기 불가능한 고층화된 건물, 대형 콘크리트 구조물 등에 적용하기 위한 발파해체기술과 암반구조물 건설을 위한 암굴착 기술로서 경제성, 안정성을 높이고 주위 환경에 대한 피해를 방지할 수 있는 환경친화적인 고도의 제어발파기술을 확립함을 최종 목표로 하고 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구는 당초 5개년 계획으로 착수되었으나 축소 조정됨에 따라 구조물 해체를 위한 제어발파 기초기술의 체계화 연구와 기술의 실용화 및 고도화를 위한 기반을 정립하기 위한 연구로서 다음과 같은 내용으로 수행되었다.

- 기술자료들의 체계적인 수집 및 축적, 활용을 위한 설계·시공·계측자료의 수집, 표준화, 자료처리기법 개발, 데이터베이스화
- 발파해체 메커니즘에 대한 이론적 고찰, 기초이론의 정립
- 파쇄도 분석모델, 발파패턴설계 모델 등 경험적 방법에 의한 설계 모델 개발
- 실험실 동적거동특성 실험시스템 확립
- 수치해석법을 이용한 응력장 변화양상, 손상영역 등 제어발파효과 분석
- 진동, 소음 특성 규명 및 예측모델 개발
- 붕괴거동 시뮬레이션 기법개발
- 고속촬영과 현장계측을 통한 붕괴거동 및 파괴거동 분석, 설계변수의 영향 분석
- 새로운 제어발파 개념의 정립 및 기술 개발

IV. 연구개발결과

1) 기술자료축적

- 건축구조물 해체 설계 및 시공자료, 암굴착 설계 및 시공자료, 계측자료 수집
- 기술자료의 데이터베이스 구축
 - ▷ DB 시스템 "BlastMan" 개발
- 용어 표준화

2) 제어발파설계 해석적 방법 정립

- 유한요소모델링, 유한차분모델링, 개별요소모델링 등 수치해석적 기법의 발파 연구에의 적용성 분석
- 수치해석 도구 : ANSYS, FLAC, DYNA3D, UDEC, PFC 외
- 수치해석적 방법의 입력자료 산정과 변수분석(parameter study)을 통한 설계변수들의 영향, 모델링 특성 분석 : 공간격, 지연시차, 절리효과, 하중경계조건, 지반조건 등의 영향 고찰
- 균열제어를 위한 발파방법의 수치해석적 고찰

3) 동적거동 실험개념정립 및 실험시스템 구축

- Split Hopkinson 효과를 이용한 실험실 동적 실험방법 개념정립; Dynamic impact를 이용한 동적거동실험장치 개념도 작성
- 동적거동 실험장치 시제품 제작 :

4) 붕괴거동의 시뮬레이션 기법 분석 및 실험실적 연구

- 불연속체 암반의 해석을 위해 제안된 개별요소모델링 기법의 적용성 검토
- 붕괴 거동에 미치는 개별요소 모델링 입력변수 분석
- 실험실 붕괴거동 모델 개발
- 실험실 모형 실험

5) 발파진동 및 충격진동 발생특성 규명

- 국내 주요 석회암 지역(강원도 동해 및 삼척 지역), 고속철도경주구간 채석장 3개소, 청도-밀양의 안산암 지역 등에서 발파진동 계측; 시추공 이용 시험발파를 통한 진동계측 등을 실시하여 자료를 확보하였으며 춘천 5층 아파트 해체시 발파 및 충격진동 계측

- 계측자료로부터 환산거리를 이용한 발파진동 예측식을 구하는 프로그램 개발
 - ▷ 프로그램명 : VIB10
- 기존의 환산거리 개념을 이용한 진동 예측방법을 보완하는 새로운 2종류의 모델 개발
- 현장적용 : 지하철 9공구 서울 지하철 9공구 현장 발파 예측 및 인근 주요 지장물에 대한 영향평가
- 건물해체시 발생하는 지반진동의 인근 환경영향을 검토하기 위한 예측식 도출 : 발파에 의한 진동과 충격에 의한 진동을 구분하여 예측하고 평가할 수 있는 경험식 도출

6) 구조물 절단을 위한 균열제어발파 기술 개발

- 균열제어를 위한 새로운 발파방법의 개념 정립 및 현장적용시험
- 화약발파시 발생하는 고온 고압에 대한 손상을 최소화시키고 원하는 균열을 얻기 위한 제어발파기술로서 ①공기층을 이용한 발파 개념과 ②split tube를 이용한 균열제어기법 개발
- 철골 구조 해체를 위한 성형폭약 기술 분석

V. 연구개발결과의 활용계획

국내 건축물 해체분야는 60년대말, 70년대 초에 건축된 아파트들이 재건축 주기를 맞고 있으며 과거 국내 산업발전과 함께 건설되었던 산업공장 건물, 발전소 등 많은 구조물들이 노후하여 철거시점에 도달하고 있으며 도심지 재개발사업, 국토재개발사업이 활발해짐에 따라 수명이 다하지 않은 구조물도 해체대상이 되고 있어 시장규모는 급격히 성장할 것으로 추정된다. 본 기술은 앞으로 급증할 고층빌딩, 대형 구조물 등 재래식 공법으로 해체가 어려운 기술적 난제들을 해결할 수 있다. 2008년부터 노후 원자력발전소 2기를 비롯하여 수명이 다한 원전발전소가 단계적으로 폐쇄될 예정이며 본 기술이 적용될 수 있을 것이다.

또한 에너지 비축기지 건설, 지하 상하수도 처리장, 지하농산물저장고, 도로 및 철도터널 건설 등 지하공간을 활용하기 위한 암반 굴착공사가 증가할 것으로 예측됨에 따라 기술수요가 급증할 전망이다. 향후 폐기물을 위한 지하 영구 처분장 건설시 안전성에 치명적인 영향을 미치는 처분공동 주벽의 균열발생을 억제하기 위한 손상대 제어발파 기술로서도 활용이 가능하다. 광물자원, 석·골재 자원개발을 위한 발파기술, 각종 암반 구조물 건설에 활용되어 효율증대, 굴착공간의 안정성 및 사면 안정성 제고 등의 기술향상을 가져올 것이다.

국민의식 및 문화수준의 향상과 함께 발파작업에 의한 안전성 등 공해문제는 심각한 사회 문제로 대두되고 있으며 발파재해측면에서 환경기술과 관련하여 고도의 제어발파기술에 대한 수요가 급증할 전망이다 따라서 도심지 작업시 진동, 소음, 분진공해를 최소화하고 환경피해 및 발파공해를 방지함으로써 최근 높은 생활의 질을 요구하는 국민의식을 충족시키고 건설업계 개방으로 야기되는 외국업체의 국내시장 잠식에 대처할 것이다. 본 기술은 전 세계적으로도 기술력을 갖고 있는 나라가 제한되어 있으므로 향후 동남아 개발도상국을 비롯하여 외국에서도 경제성장과 함께 발파해체시장이 상당한 수준으로 증가할 것으로 예상됨에 따라 국외로의 기술수출도 기대된다.

여 백

S U M M A R Y

I. Title

Development of Controlled Blasting Techniques for Structure Demolition

II. Background and Objective of the Research

Explosive blasting is widely used in the field of mining, civil and construction engineering as a tool of rock excavation for the recovery of earth resources such as underground coal or open pit limestone mine, and construction of rock structures such as subway tunnels, rock slopes, earth dams, underground cavern for oil storage, etc. As shown in the removal of 16 and 17 story Namsan apartment buildings, it also can be applied to the demolition of high story buildings of which technique is called 'explosive demolition'. Although it is very useful tool, blasting works by explosives in urban area may give some unexpected damages to the structures in the neighborhood. Blast-induced ground vibration and air-overpressure often become a source of public complaints by the imprudent treatment. Many technical know-hows in explosive demolition have been kept secret. World markets are now governed by only a few companies. Explosive demolition here covers a broad concepts of technology that can be applied to the breaking of rock mass to construct various rock structures such as tunnel or roadway slope as well as the removal of high story buildings and civil structures such as heavy industrial structures, or bridges. In the traditional demolition methods, the whole structure is removed progressively by breaking up the structural parts using the mechanical tools like breaker or steel ball. Such a method, however, has limitations as follows:

- need to secure a space for installing heavy construction equipments like hydraulic concrete-breakers or drills,
- may produce serious safety problem for workers because the structure becomes unstable as removal of component parts proceeds,
- increase public complaints due to vibration, noise and dust produced from a time-consuming operation,
- cannot be applied to the demolition of high story buildings or a very large scale of concrete structures, and so on.

A new technology is therefore required to overcome such limitations. Explosive blasting provides a fast and economic method for demolishing reinforced concrete buildings when conditions permit their use, and for breaking rock as well. However, due to the lack of specialized personnel and investment in R&D, domestic technology lags far behind the advanced nations, often resulting in serious impact on urban environment. As far as the blasting technique called explosive demolition concerned, the demand is expected to be increased drastically in the near future because a large apartment complex built in 60 and 70s should be reconstructed and redevelopment in urban area becomes more and more active. Rock excavation works have been also increasing as the increase of utilization of underground space and construction of rock structures. In this regard, it is urgent to develop and build up our own techniques for explosive demolition.

Explosive demolition requires high level of controlled blasting techniques, but has mostly been dependent on the trial and error method so far. The main objective of the research is to develop a core technology for controlled blasting to remove a large scale of concrete structures, high story buildings, and rock mass where the conventional methods cannot be applied. The technology will provide major advantages of fast process, low cost and safe working condition over a traditional method. Environmental impact of vibration, noise, and dust generation can also be minimized. The first stage of the research aims to develop a fundamental technology based on sound algorithm so as to extend the technology to a higher level, and to come into practical use.

III. Research Strategy

The research is focused on the development of a core technology based on the scientific background. Both laboratory and field study are performed in which new testing apparatus is designed and precision instruments such as dynamic measurement system and high speed camera are used to investigate the mechanism quantitatively; Plug-in type models for assessment of DOF and pattern design are developed from the analysis of extensive technical data on the empirical basis; Design parameters are analyzed using sound theoretical and numerical methods; Developed is predictive technique of ground vibration and noise induced by explosive demolition in order to prevent environmental impact of blasting; Computer simulation technique is developed to predict the collapse behavior and to design blast pattern for effective and safe demolition, which

provide a rational method of assessing the validity of the demolition method in advance.

IV. Results

The major results of the first stage of research are classified as follows:

- 1) Data acquisition and development of data base system
 - data collection of design and construction
 - development of data base system: "BlastMan"
 - analysis of jargon
- 2) Analysis of numerical and analytical tools
 - analysis of modeling characteristics of numerical and analytical tools
 - parametric study
 - numerical study of basic concept for fracture controlled technique
- 3) Development of laboratory testing system for dynamic behavior of materials
- 4) Simulation technique for collapse behavior
 - analysis of modeling characteristics of distinct element algorithm
 - parametric study
 - development of laboratory testing system
- 5) Investigation of blast- and impact-induced ground vibration
 - field measurements
 - development of predictive software of blast vibration: "VIB10"
 - development of predictive techniques for both vibration level and frequency characteristics
- 6) Development of fracture controlled blasting technique

V. Potential Value

The research meets the increasing demands of a high-level technology for the removal of various structures that conventional mechanical methods cannot be applied. The technology also provides a fast process as well as low cost and safe working condition, and is expected to increase stability of rock structures. Public complaints will be minimized by preventing blasting hazards and by reducing an environmental impact. As the technical demands are also increased rapidly in developing countries, securing the technical know-hows allows us to advance into the world market.

여 백

C O N T E N T S

Chapter 1. Outline of the Research Project	19
Chapter 2. State of Art	23
Chapter 3. Results	25
Section 1. Data Base of Technical Data and Standardization of Jargon	25
1. Data Acquisition	25
2. Construction of Data Base	27
3. Standardization of Jargon	34
Section 2. Analytical Methods for Design of Controlled Blasting	50
1. Outline	50
2. Modelling by Finite Element Method	51
3. Modelling by Finite Difference Method	61
4. Modelling Techniques of Implicit Type and Explicit Type of Distinct Element Method	87
5. Modelling by Distinct Element Method - Bench and Tunnel Blasting	100
6. Modelling of Fracture Propagation by PFC	110
Section 3. Laboratory Testing System for Dynamic Behavior of Materials	129
1. Outline	129
2. Basic Concept	129
3. Dynamic Testing System	131
Section 4. Simulation Technique of Collapse Behavior	133
1. Outline	133
2. Simulation by PFC	134
3. Simulation by UDEC	143
4. Experimental Apparatus for Modelling Building Collapse	158
5. Physical Modelling - Lab. Experiment	166

Section 5. Characteristics of Blast- and Impact-induced Ground Vibration	174
1. Outline	174
2. Predictive Technique of Blast Vibration	175
3. Program for Data Processing of Blast Vibration - VIB10	202
4. Predictive Technique of Impact Vibration	222
5. Measurement Data	224
Section 6. Development of Fracture Controlled Blasting Technique	228
1. Two Face Simultaneous Blasting Using Air Decking	228
2. Fracture Control Using Paper Split Tube and Air Decking	235
Chapter 4. Attainment of the Goal and Contribution to Related Fields	243
Chapter 5. Application of the Results	244
Chapter 6. Technical Information from Abroad	246
Chapter 7. References	249

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	19
제 2 장 국내·외 기술개발 현황	23
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	25
제 1 절 기술자료의 DB 구축 및 용어 표준화	25
1. 기술자료의 축적	25
2. DB 구축	27
3. 용어 표준화	34
제 2 절 제어발파설계의 해석적 방법	50
1. 개요	50
2. 유한요소법을 이용한 발파 모델링	51
3. 유한차분법을 이용한 발파 모델링	61
4. Implicit type 및 explicit type의 개별요소 모델링 특성 비교 분석	87
5. 개별요소법을 이용한 발파 모델링 - 벤치 및 터널 발파 모델링	100
6. PFC를 이용한 균열전파 모델링	110
제 3 절 동적거동 실험개념정립 및 실험시스템 구축	129
1. 개요	129
2. 기본 원리 및 적용 개념	129
3. 동적거동시험장치	131
제 4 절 붕괴거동 시뮬레이션 기법 및 실험실적 연구	133
1. 개요	133
2. PFC를 이용한 붕괴거동 시뮬레이션	134
3. UDEC을 이용한 붕괴거동 시뮬레이션	143

4. 실험실 붕괴거동 실험 장치 개발	158
5. Physical Modelling - 실험실 모형실험	166
제 5 절 발파진동 및 충격진동 발생특성	174
1. 개요	174
2. 발파진동 예측기법	175
3. 발파진동 자료처리 프로그램 개발 - VIB10	202
4. 충격진동 예측기법	222
5. 계측 사례	224
제 6 절 구조물 절단을 위한 균열제어발파기술 개발	228
1. 공기층을 이용한 양면발파기술	228
2. 종이 스플릿튜브와 공기층을 이용한 균열제어발파기술	235
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	243
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	244
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	246
제 7 장 참고문헌	249

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발 개요 및 목적

구조물 발파해체기술은 토목, 건설, 환경, 자원 분야에 해당하는 기술로서 건축물의 철거, 토목 구조물의 해체, 암반 구조물의 제거 등 노후하였거나 재개발 또는 특수한 목적으로 대상 구조물을 제거하는데 적용되는 기술이다. 과거 건축물의 철거나 소규모 구조물의 해체를 위해서는 브레이커나 강구(鋼球) 등 기계력을 이용하여 부분적 제거로부터 점진적으로 전체 구조 해체에 이르는 방법이 적용되어 왔다. 그러나 이러한 방법은 대상 구조물의 외형적 규모나 재질에 따라 적용 한계가 있으며 많은 공해문제를 유발한다.

본 연구팀에서 개발하고자 하는 기술은 브레이커나 강구 등 기계력에 의한 기존의 방법들을 사용하여 해체하기 불가능한 고층화된 건물, 대형 지상 및 지하 콘크리트 구조물, 철골 구조물, 암반 구조물 등의 해체에 적용하기 위한 특수기술이다. 본 기술은 고도의 제어발파기술을 핵심기술로 하여 공간적, 시간적 제약 하에서 주위 환경에 대한 피해를 방지하고 원하는 목적대로 구조물을 제거하는 기술을 확립함을 목표로 하고 있다.

제 2절 연구개발의 필요성

1. 연구개발의 경제·사회·기술적 중요성

가. 기술적 측면

▷ 기반기술로서의 구조물 해체기술 : 노후 아파트 건물, 재건축 대상 건물 등 건축물의 철거; 대형 콘크리트 구조물로 구성된 산업용 공장과 원자력발전소 등 노후 산업시설의 철거; 터널, 사면, 댐, 지하공간 건설을 위한 대규모 암반 굴착; 노후 선박, 교량, 사일로, 대형 굴뚝 등 특수 구조물의 해체, 용광로 및 그 내부의 침전물제거 등에서 요구되는 기술

▷ 과거 사용되어 왔던 브레이커나 강구 등의 타격에 의한 충격에너지로 파괴하

는 기계식 해체기술은 저층건물과 규모가 작은 건축물의 해체에 경제적인 방법으로 적용되어 왔고 암괴(岩塊)의 분할이나 소규모 암반의 제거작업에 적용되고 있으나 최근의 기술 수요는 철거건물의 대형화 및 고층화, 시공 작업의 대형화로 이러한 방법의 적용이 점차 어려워지고 있음

▶ 기존 기술의 제약 : 현 기술상태의 취약성

- ✓ 기계식 해체기술의 특성상 대상 구조물에 중장비와 인력이 투입되어야 할 공간 필요
- ✓ 구조적 불안정한 상태에서의 작업에 따른 안전사고문제
- ✓ 장기적인 진동·소음·분진의 발생으로 인한 공해문제로 민원의 대상
- ✓ 고층 건축물이나 대형 콘크리트 구조물, 철골구조 등에는 사실상 적용할 수 없는 근본적인 기술적 한계를 갖고 있음

▷ 구조물의 외형적 규모나 재질에 따라 적용 한계를 극복할 수 있는 기술 필요

▷ 특히 도심지의 인구, 건물들이 밀집한 지역이나 주변에 보호받아야 할 시설들이 있는 지역에서는 주어진 공간에서 주변 건물, 시설물, 인체에 피해를 주지 않고 경제적으로 작업이 가능한 특수한 기술 필요

▶ 제안된 기술의 핵심 :

- 강구(steel ball)나 브레이커와 같은 기계력에 의한 방법이 아닌 화약발파를 주 에너지원으로 하여 토목, 건설, 자원기술분야에서 요구되는 다양한 형태의 구조물 해체에 적용되는 기술
- 대상 구조물의 형태, 재질, 작업 목적에 따라 발파해체기술의 적용방법이 다양하게 나타날 수 있지만 핵심기술이 되는 고도의 제어발파기술은 적절한 동적 에너지를 선정하여, 해체대상의 대형 구조물과 특수 구조물의 적정한 위치에 적정한 양을 적정한 형태로 배치하고, 기폭시차를 조절하여, 파쇄대 형성, 파쇄물 크기, 붕괴방향, 비산·진동발생 등을 제어함으로써 주위 환경에 피해를 주지 않고 목적에 따라 경제적으로 해체하는 기술

▷ 그러나 이 분야 국내기술은 연구투자의 미흡, 전문 인력의 부족으로 외국에 비해 매우 낙후되어 있으며 발파해체수요와 발파기술의 고도성을 고려하여 볼 때 국내 기술축적을 위한 연구가 시급히 요구되고 있음

나. 경제·산업적 측면

- ▷ 국내의 경우 지난 60년대부터 건축된 아파트들이 재건축 주기를 맞고 있으며, 재개발을 위한 노후 산업공장 건물이나 대형 콘크리트 구조물의 해체, 지하공간개발에 따른 대규모 암반굴착 등 여러 산업분야에서 해체기술이 요구됨
- ▷ 최근 국내에서 고층 빌딩의 발파해체가 몇 차례 실시되었으나 모두 선진외국의 폭파해체공법 전문업체의 기술도입 등 직·간접적인 참여로 이루어져 왔음
- ▷ 건축물해체에 화약발파를 이용하는 기술은 재래식 방법으로는 해체가 어려운 구조물에의 적용성외에도 작업공정의 단기화로 공해문제 감소 및 경제성을 향상시킬 수 있는 기술임
- ▷ 도로사면, 도로 및 철도터널, 지하공간개발과 관련된 대규모 토목 구조물의 안정성 제고와 재해예방을 위해 고도화된 발파기술이 요구됨
- ▷ 국내의 많은 암반굴착 현장에서 시공시 기본발파설계의 문제점으로 빈번한 설계변경이 발생하고 공사기간 및 공사비 증대의 원인이 되고 있음
- ▷ 발파관련 설계자료 및 시공 자료의 축적이 제대로 이루어지지 않아 대부분의 자료가 활용되지 못하고 사장되고 있음
- ▷ 국내 건설시장의 개방과 함께 외국 기업의 국내시장 진출이 활발해 질 것으로 예상되고 있으며, 외국기업의 국내시장 잠식에 대처하기 위해서는 국내기술의 자체개발 및 축적 시급

다. 사회·문화적 측면

- ▷ 국민의 사회적, 문화적 의식 수준이 높아짐에 따라 발파작업에 의한 안전성, 발파공해문제는 심각한 사회 문제로 대두
- ▷ 기계력을 이용한 기존의 해체방법은 장기적인 작업을 요함에 따라 진동·소음·분진 공해의 발생으로 대체기술 필요
- ▷ 건물해체에 화약발파를 이용하는 기술은 해체자체에 걸리는 시간이 짧으므로 장기간 작업에 따라 야기될 수 있는 문제를 최소화시킬 수 있는 기술
- ▷ 조절되지 않은 발파는 주위에 피해를 야기하고 있으며 이로 인한 민원발생이 끊이지 않고 있음
- ▷ 민원 발생시 해결근거의 미비로 분쟁이 계속되고 있음
- ▷ 일반인들의 발파개념에 대한 이해부족, 기술수준에 대한 불신으로 발파시공을 기피함

- ▷ 도심지 인구, 건물밀집 지역이나 주변에 보호받아야 할 문화재나 시설들이 있는 지역에서 주어진 공간 하에서 주변 건물, 시설물, 인체에 피해를 주지 않고 경제적으로 작업이 가능한 특수 기술 필요

제 3 절 연구 내용 및 범위

본 연구는 당초 5개년 계획으로 착수되었으나 축소 조정됨에 따라 구조물 해체를 위한 제어발파 기초기술의 체계화 연구와 기술의 실용화 및 고도화를 위한 기반을 정립하기 위한 연구로서 다음과 같은 내용으로 구성되었다.

- 기술 자료들의 체계적인 수집 및 축적, 활용을 위한 설계·시공·계측자료의 수집, 표준화, 자료처리기법 개발, 데이터베이스화
- 발파해체 메커니즘에 대한 이론적 고찰, 기초이론의 정립
- 파쇄도 분석모델, 발파패턴설계 모델 등 경험적 방법에 의한 설계 모델 개발
- 실험실 동적거동특성 실험시스템 확립
- 수치해석법을 이용한 응력장 변화양상, 손상영역 등 제어발파효과 분석
- 진동, 소음 특성 규명 및 예측모델 개발
- 붕괴거동 시뮬레이션 기법개발
- 고속촬영과 현장계측을 통한 붕괴거동 및 파괴거동 분석, 설계변수의 영향 분석
- 새로운 제어발파 개념의 정립 및 기술 개발

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

구조물 발파해체기술 분야 중에서 고층건물을 주 대상으로 하는 건축물 발파해체 분야는 현재 미국 CDI, 영국 CDG 등이 세계적으로 알려진 전문기관이고 스웨덴, 캐나다, 호주, 이태리, 중국, 일본 등은 자국에서 적용한 사례가 보고 되고 있다. 그러나 실패사례도 많이 있는 것으로 알려져 있지만 공식적으로 보고 되지 않아 기술력 수준의 평가가 용이하지 않다. 본 기술은 주로 trial & error의 시행착오적인 경험적 방법에 의존하여 왔기 때문에 소수의 전문가들을 통하여 know-how로 전수되고 있는 실정이며 핵심기술의 공개가 거의 이루어지고 있지 않는 분야이다. 이러한 점들이 세계 발파해체시장이 몇 개 소수의 전문회사에 의해 독점되고 있는 원인이 되고 있다. 대규모 암반을 제거하는 암반굴착 발파기술분야는 노르웨이, 스웨덴, 핀란드 등 지하공간개발과 광산개발이 비교적 활발한 나라를 중심으로 컴퓨터를 이용한 발파설계기법, 자동화 천공장비 개발, 비전기식 뇌관과 같은 화공품류의 개발들이 이루어지고 있다.

국내의 경우 구조물 발파해체기술은 90년대 초 토목·건설·자원 등 분야에서 근간이 되는 기술로서 기술개발에 대한 중요성이 인식되어 1993년 당시 과학기술처 특정과제로 한국자원연구소에 1년간 8,000만원의 연구비가 지원되어 처음으로 기초연구가 수행된 바 있으며, 이를 기반으로 건설교통부 및 민간투자의 참여로 1995-1996년도에 산·연 공동연구로서 건축물 해체분야에 정부지원 1억6천만원, 민간투자 1억6천만원의 연구개발비가 투자된 바 있다. 이후 지하공간개발에 대한 관심이 높아짐에 따라 과학기술부 특정과제 및 정부출연연구비 형태로 대형화된 과제 하에서 암반구조물 건설을 위한 굴착기술분야에 국한하여 부분적으로 지원되었다.

민간부문의 투자는 (주)한화, 대림건설, 한국중공업, 코오롱건설 등 산업체에서 관심을 갖고 자체기술확보를 위해 연구개발비 투자가 이루어졌으나 연구 인력의 부족과 함께 과거 발파해체 시장규모가 작은 시점에서 중장기적 투자로 연결되지 않았으며 특히 IMF하에서 민간기업들은 단기적 시장규모가 불투명한 기술 확보에 대한 투자를 포기하였다. 이제 발파해체기술의 수요가 급증하는 시점에 와 있으나 민간기업의 많은 전문기술인력이 이직하였고 또한 향후 외국사를 활용코자하는 전략에만 의존함에 따라 기업주도의 기술 확보는 어렵게 되었다. 따라서 수년 내에 기술 확보 노력을 기울이지 않을 경우 외국사에 시장을 독점당할 우려가 있다.

건축구조물 해체의 경우 1991년 8월 국내 최초로 발파해체공법을 적용하여 육사 1층 건물을 시험해체한 이후 (주)한화, 대림엔지니어링(주), 동부건설, 코오롱건설 등에서 총 19차례 이상 일반건물, 굴뚝, 고가수조 구조, 싸일로 등 구조물을 발파해체한 것으로 보고 되고 있다. 주로 외국사들이 직·간접적 참여되었고 16층, 17층의 남산아파트 2개동과 17층 여의도 소재 라이프빌딩 등 고층건물 철거에 발파해체기술을 적용하는 등 시공에 참여함으로써 기초기술은 어느 정도 축적되어 있다고 평가할 수 있으나 기술의 고도화 및 주요 핵심기술의 확보가 이루어지지 못하고 있다. 암반굴착의 경우 최근 발파기술 개선을 위한 노력이 많이 경주되고 있으나 발파공해문제가 심각하여 발파진동 제어기술에 초점을 맞추고 있다. 또한 국내 대규모 지하비축기지 건설초기 외국사 자문에 의해 발파설계가 제시된 바 있으나 국내 암특성 및 화약류에 부적합한 것으로 나타났으며 향후 추가기지 건설에서는 자체 표준설계를 개발하여 적용하려는 노력이 진행되고 있다.

구조물 발파해체기술은 기술의 특성상 단순히 외국기술을 활용하는 것으로는 기술전수나 국내기술축적이 용이하지 않다. 일본의 경우 과거 외국기술에 의존하던 한계를 절감하고 자원환경총합연구소를 중심으로 중장기적인 연구비 투자가 이루어진 바 있으며 이를 바탕으로 최근 국내에도 진출을 시도하고 있다. 국내의 경우 기초연구가 이미 수행된 바 있고 현장시공자료, 실험자료, 연구 자료들이 어느 정도 축적되어 있으나, 현재 사장되었거나 과학적으로 분석되지 못하고 연구비 부족으로 기초연구단계에서 축적된 기술이 고도화되지 못하고 있는 실정이다. 그러나 기술인력과 기초기술이 확보되어 있는 연구팀을 중심으로 이 분야 연구에 집중할 수 있도록 지원이 이루어진다면 향후 대등한 위치에서 경쟁이 가능할 수 있는 선진국 수준의 핵심기술을 축적할 수 있을 것이다.

현재 기술 선진국에 비해 실적을 통한 경험적 측면에서는 부족하지만 지반충격진동 발생특성, 예측기술 및 영향평가, 붕괴거동과 암반파괴의 컴퓨터시뮬레이션기술 분야 등은 외국도 개발초기단계이거나 과거수준에서 정체되어있는 분야로서 선도기술수준에까지 이를 수 있을 것으로 판단된다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 기술자료의 DB 구축 및 용어 표준화

1. 기술자료의 축적

1단계 연구를 통하여 축적된 기술 자료들은 다음과 같다.

가. PC용 자료들(DB 자료)

- 그림자료 : 고층아파트 발파해체 작업 사진 (남산외인아파트, 여의도라이프빌딩 해체), 설계자료 등 1060여개 자료
- 동영상자료 : 건물해체 동영상, 벤치발파 동영상, 수치해석결과 동영상 등 14개
- 텍스트 자료 : 발파메커니즘, 해체공법 기본이론, 플라즈마 파암공법 등
- 논문 PDF 및 JPG scan 파일

나. 문서자료

- 여의도 (구)라이프 빌딩 발파 해체 설계도
- 개봉동 삼보 아파트 폭파 해체 설계도
- 남산 외국인 APT 해체공사 설계도
- 조선무약 제일공장 철거공사 설계도
- 지하유류비축기지 저유동굴 설계도
- 지하유류비축기지 터널 설계도
- 도로터널 설계도 등

다. 영상물

- 남산외인아파트 해체 시공
- 국내 발파해체시공 사례
- 성형폭약실험
- 국외 철골구조물 해체사례
- 발파해체실패사례
- CDI 발파해체
- 중국과학원 발파자료
- 플라즈마 파암 장비 및 파암 시공
- 노천벤치발파

- 벤치발파 고속촬영물
- 채석장균열제어발파
- 교육용 Video tape :

Proper utilization of explosive energy presented by Calvin J. Konya (1ea)
Blast masters extreme explosives (6ea)

라. 문헌 및 논문 자료

▷ 주요문헌 목록 예

- Structures under shock and impact I & II (P.S.Bulson, 1989 & 1992)
Site characterization for probabilistic ground shock prediction (J. G. Jackson, 1982)
Evaluation of in-structure shock prediction techniques for buried structures (Richard C.dove, 1991)
Blasting damage and other structural cracking (Lawrence M.Zippen, 1990)
Fragmentation by blasting (W.L.Fourney , R.R.Boade, 1985)
A study of explosive wave propagation in granular materials with micro structures (Martin H.Sadd , Mohammad Hossain, 1986)
Rock fragmentation by blasting (Hans-Peter Rossmannith, 1993)
Rock breakage by blasting (M.I.Petrosyan, 1994)
Fundamentals of shaped charges (William P.Walters, Jonas A.Zukas, 1989)
Rock excavation handbook (Matti Heinio, 1999)
Demolition Safety Manual
The effects of vibrations and environmental forces, Lewis L. Oriard
17th Blasters' handbook (ISEE, 1994)
High speed photography in open pit blasting
Rock blasting terms and symbols (Agne Rustan, 1992)
First international concrete blasting conference, Erik K. Lauritzen et al.
Modern trends in tunnelling and blast design, John Johansen et al.
The J. of explosives engineering V.1 No.1(1983) - V17. No.5(2000) 외

▷ 국내외 주요 논문자료

마. 기타

Macintosh용 Tunnel 굴착자료 DB (FileMaker를 이용한 DB 자료)

2. DB 구축

가. 개요

발파기술자료 DB 프로그램은 발파 및 구조물해체와 관련된 수집된 자료를 바탕으로, Visual Basic 6.0을 이용하여 개발되었다. 프로그램과 데이터베이스의 연결은 DAO(Data Access Object)방식을 사용하였다. 수집된 자료의 입력은 MS사의 Access를 이용하여 MDB 형식의 파일로 저장되어 본 프로그램을 통한 접근이외에도 Access나 기타 도구에 의해서 접근이 가능하다.

발파기술자료 DB 프로그램은 여러 형태의 자료 - GIF, JPG, BMP 등과 같은 그림, Text, AVI, MPEG와 같은 동영상 - 를 하나의 프로그램에서 검색, 보기, 실행이 가능하도록 DB기능 이외에 MultiViewer의 기능과 출력기능을 가지도록 하였다. 윈도우 형식의 인터페이스를 이용하여 사용자의 활용 용이도를 증가시켰으며, 추가적인 도움말 기능을 두어 문제점을 해결할 수 있도록 하였다.

나. 프로그램 구축

(1) 설계

발파기술자료 DB 프로그램 주요구성은 Fig. 3.1.2.1과 같이 3개의 모듈과 각각을 구성하는 하부 항목으로 이루어져 있다. 본 프로그램은 데이터베이스 시스템이 갖는 기본적인 기능인 입력, 보관, 검색 기능 외에 여러 형식의 자료를 나타내기 위한 Multiviewer의 기능과 출력기능을 갖도록 하였다.

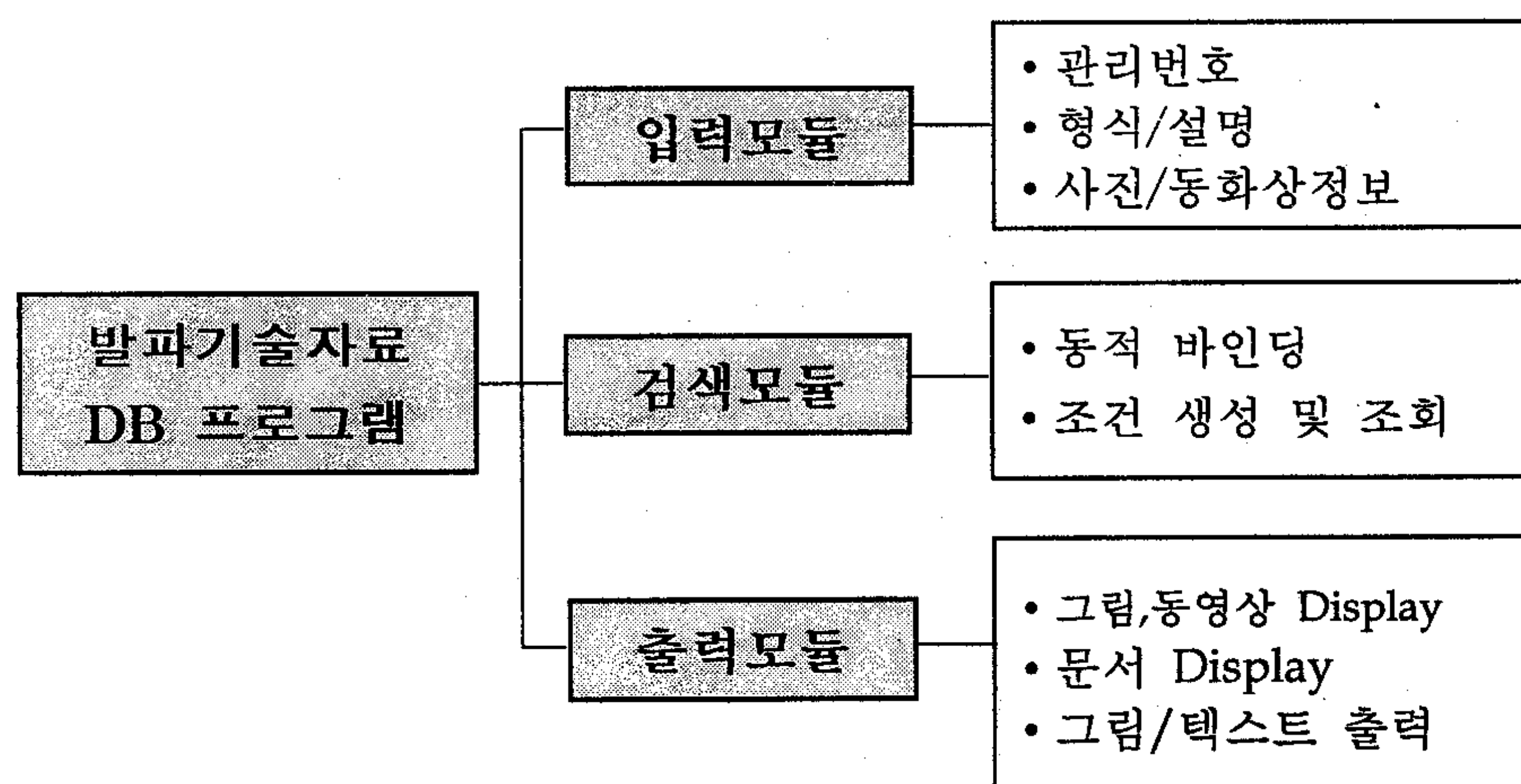


Fig. 3.1.2.1 프로그램의 구성

(2) 데이터베이스 연결방식(DAO)

Visual Basic에서는 데이터베이스와 애플리케이션 사이에 효과적으로 연결해 주는 역할로 DAO(Data Access Object), RDO(Remote Data Object), ADO(ActiveX Data Object)가 있다. DAO는 Microsoft사의 Access에서 출발하였으며, Access에서 사용된 데이터베이스 엔진이 Jet 데이터베이스 엔진을 사용하고 있다. Visual Basic에서는 DAO의 기능 중에서 데이터처리 언어부분을 간단한 컨트롤로 만들어서 쉽게 사용할 수 있도록 DAC(Data Access Control)를 제작하였다. Fig. 3.1.2.2는 본 프로그램에서 사용된 DAO의 구조이다.

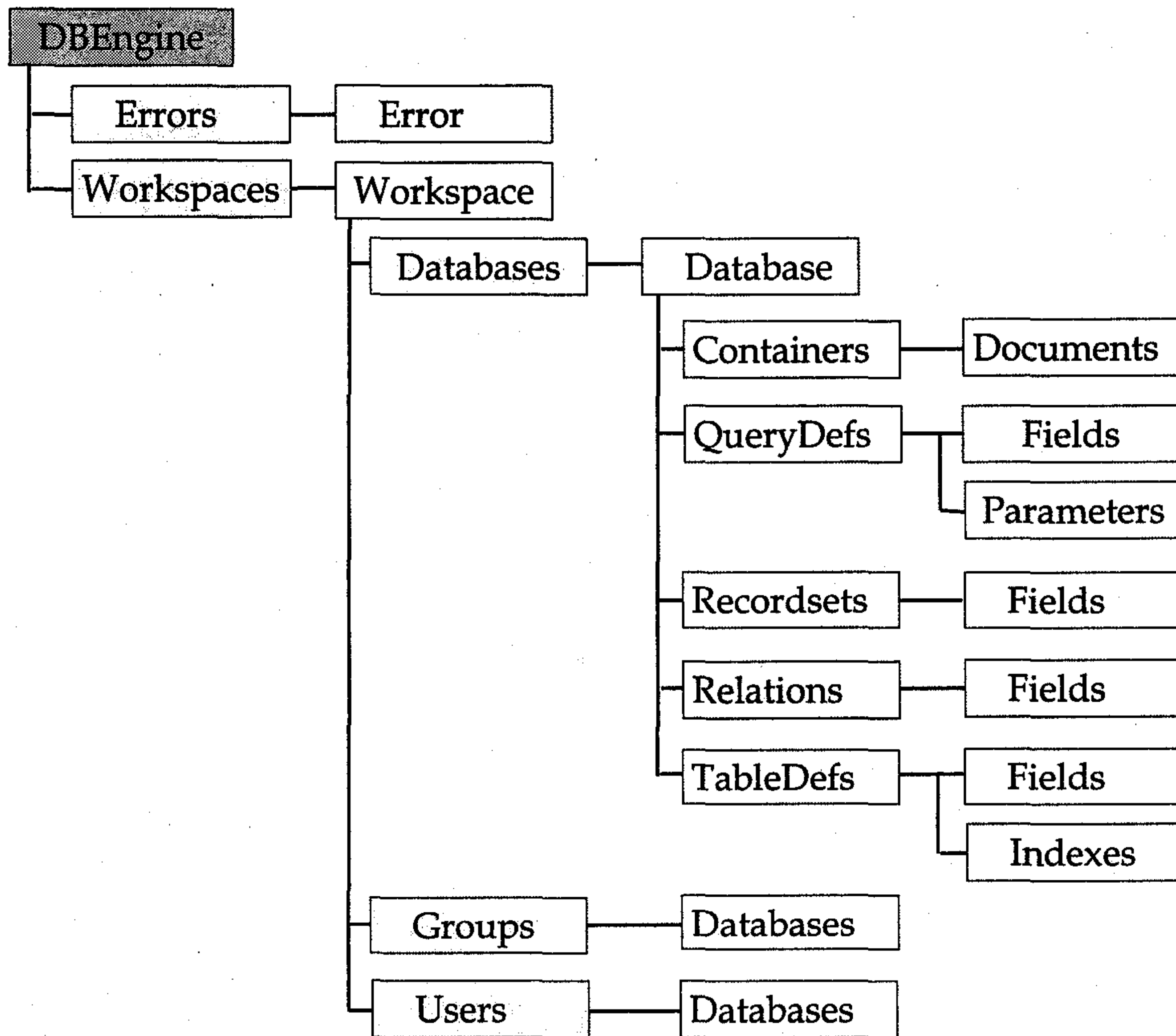


Fig. 3.1.2.2. DAO의 개략적인 구조

(3) 메뉴 구성

메인화면은 SDI(Single Document Interface)형식의 3개의 프레임으로 구성되어있으며, 각각의 기능들이 메뉴에서 구현될 수 있다. 또한 좌측 프레임에는 툴바 기능으로 인해 메뉴바에서 실행되는 기능이 그림버튼형식으로 나타난다. DB의 내용과 검색된

자료의 실행은 우측 상하단의 프레임에서 구현되도록 하였다. 발파기술자료 프로그램에서 제공되는 메뉴는 아래와 같은 형식으로 구성되어진다.

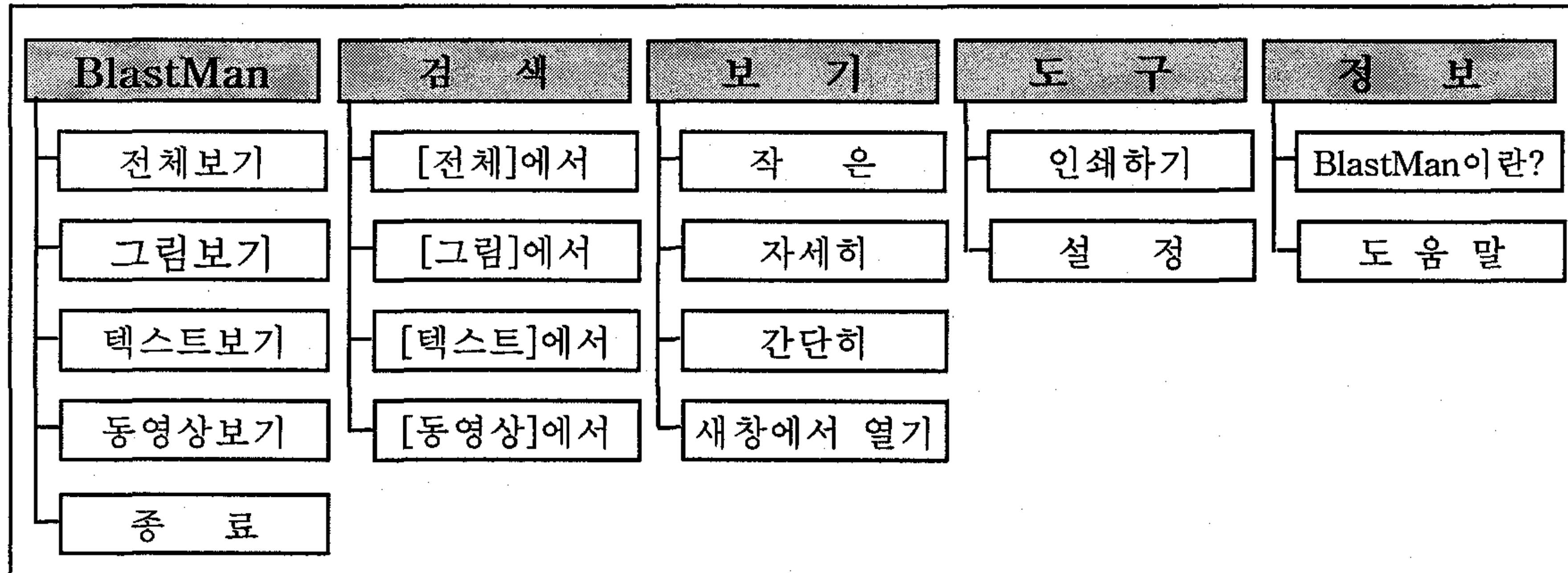


Fig. 3.1.2.3. 메뉴 구성도

(4) 화면구성

아래 Table 3.1.2.1과 Fig. 3.1.2.4는 발파기술자료 프로그램의 기본적인 작업화면과 각각의 기능에 대한 설명을 나타낸다.

Table 3.1.2.1. 프로그램 항목별 기능

항 목	기 능
메 뉴	프로그램에서 수행되는 모든 명령들
도구모음	자주 사용되는 메뉴들을 사용이 편리하도록 아이콘으로 만들어 표시.
자료관리	데이터베이스화된 자료를 보여주는 프레임. 전체보기가 기본 옵션으로 설정되어 있으며, 항목을 선택함에 따라 하단 프레임의 Display창에서 실행된다.
Display창	자료관리에서 선택된 항목의 형식에 따라 자료의 내용을 보여주는 프레임. 자료의 창을 더블 클릭하는 경우 추가기능을 가진 각각의 프로그램이 구동된다.
상태 표시줄	현 상태에 대한 간략한 설명 및 날짜, 시간이 표시.

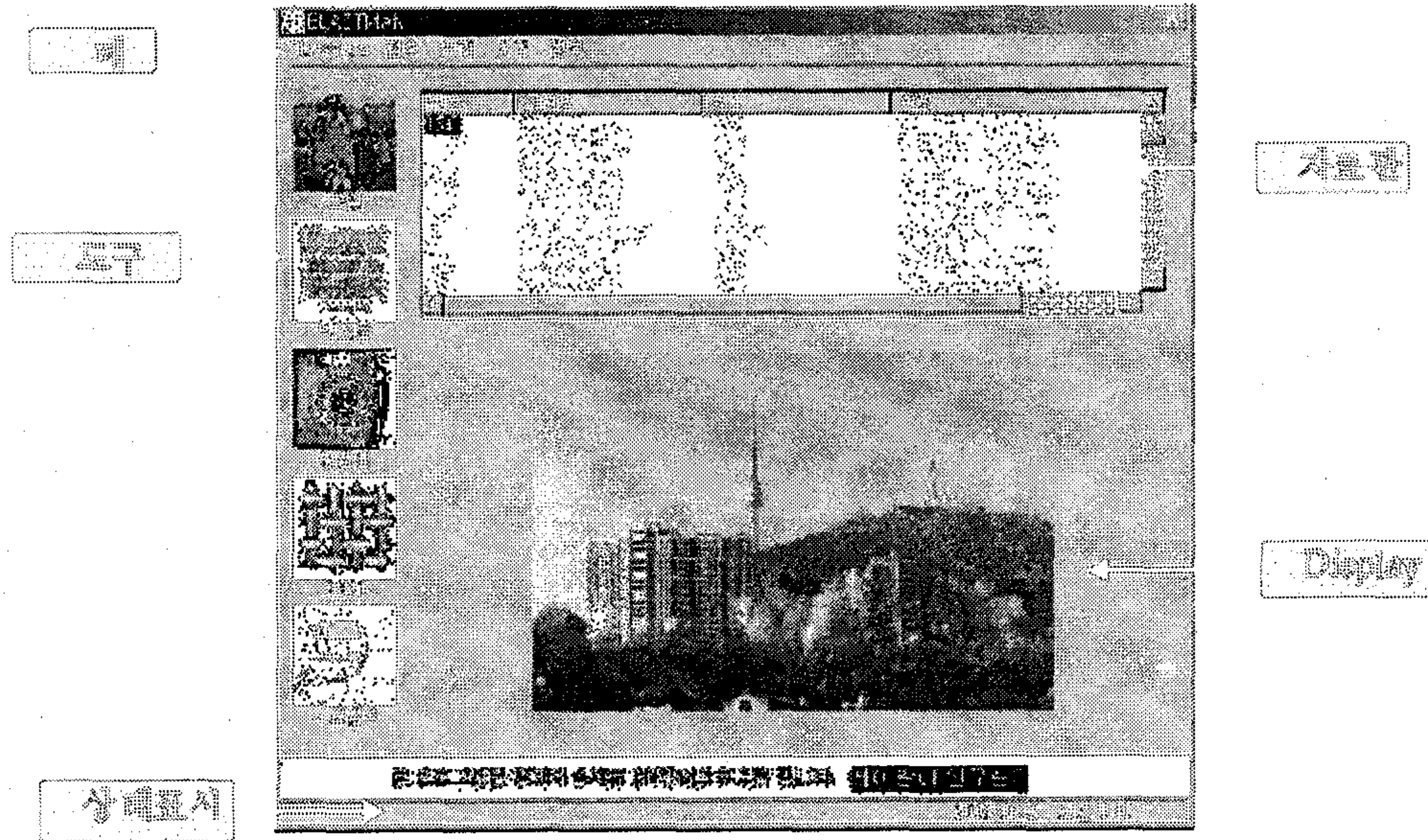


Fig. 3.1.2.4. 기본화면구성

(5) 주요기능

(가) 자료관리

MS Access에 저장된 MDB형식의 자료에 대해 원하는 형식의 자료를 리스트뷰 컨트롤을 이용하여 보여주며, 각 항목을 선택함에 따라 하부 프레임에 나타나도록 하였다. 아래 Fig. 3.1.2.5는 텍스트 형식의 파일이 선택되었을 때 하부 프레임에 나타나는 모습을 보여준다.

(나) MultiViewer

전체보기, 그림보기 등에 의해 나타난 자료에 대한 상세정보 및 실행을 위해 각 형식에 대해 다른 프로그램의 구동 없이 새롭게 생성된 창을 통해 구현할 수 있도록 하였으며, 이는 각 항목을 더블클릭하거나 하단 프레임을 더블클릭 함으로써 구현되도록 하였다. 각 형식에 따라 서로 다른 화면이 생성되며, 아래 Fig. 3.1.2.6은 그림형식의 자료에 대한 상세정보 화면으로 보인 것이다.

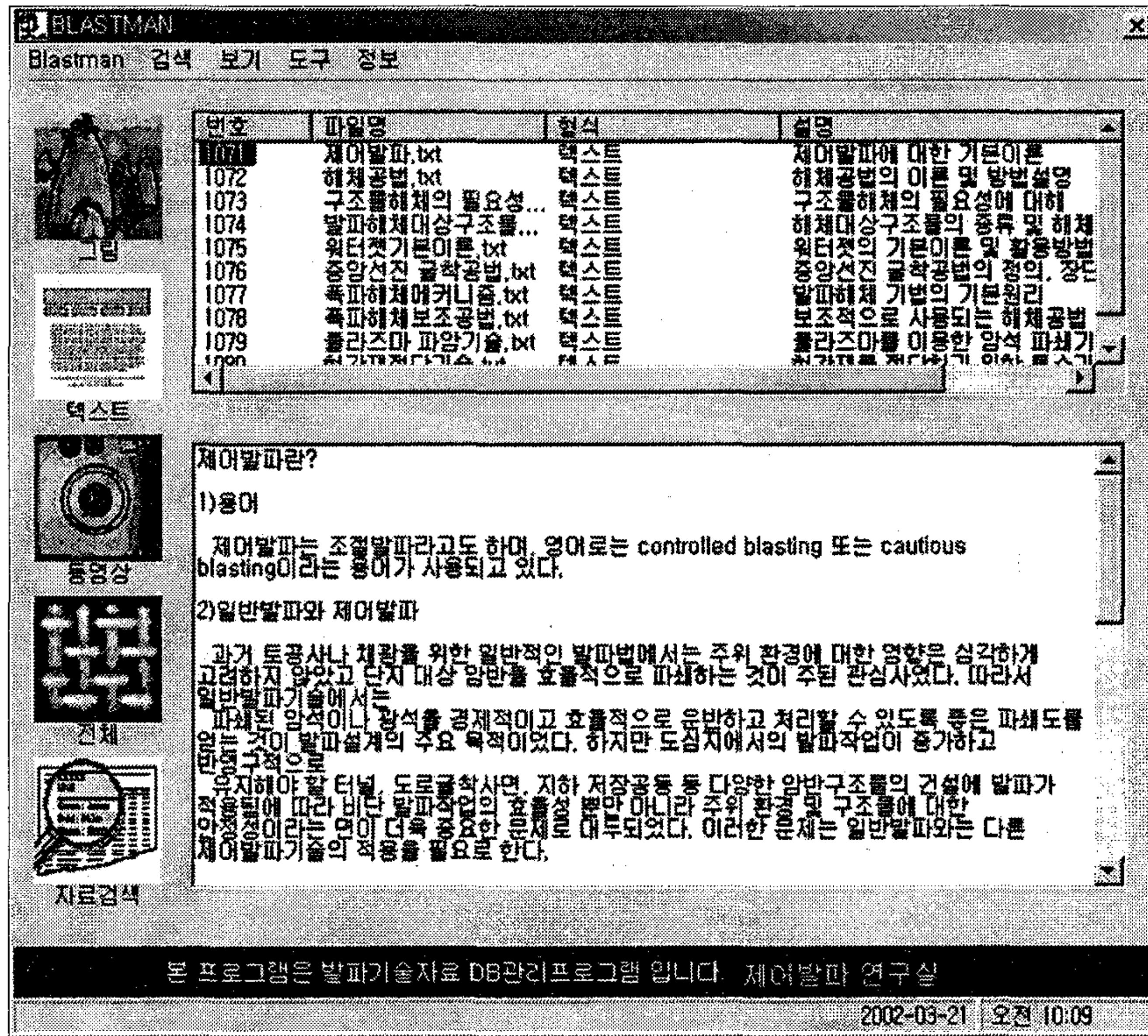


Fig. 3.1.2.5. 텍스트형식의 Display가 나타난 화면

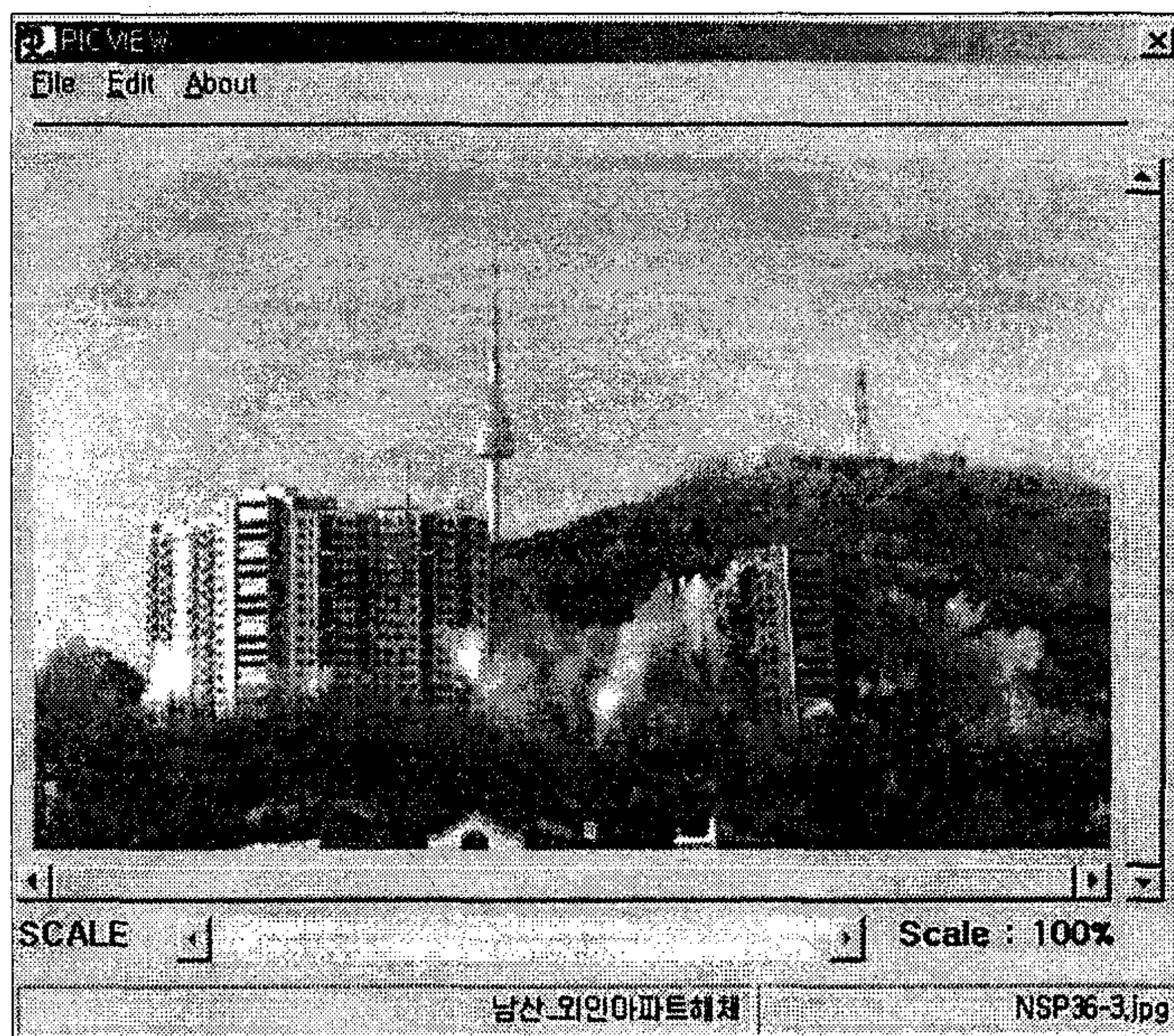


Fig. 3.1.2.6. 그림형식 상세 Viewer 화면

(다) 검색

데이터베이스 프로그램에 있어 검색은 매우 중요한 역할을 하는 기능이다. 본 프로그램의 경우 좌측 프레임의 툴 바에 [자료검색]이라는 명령버튼(commander)을 두어 사용자 쉽게 이용 가능하도록 하였다. [자료검색]기능의 검색항목은 데이터베이스 자료의 내용 중 3개의 항목의 입력자료에 의해 검색할 수 있도록 하였으며, 보다 빠른 검색을 위해 자료형식에 따라 3개의 체크박스(그림, 텍스트, 동영상)를 두었다. 아래의 Fig. 3.1.2.7은 검색조건으로 파일명을 '발파'로 포맷을 'txt', 체크박스를 모두라고 하였을 때 나타나는 검색화면을 보여준다.

검색된 자료의 이동은 기본화면에서와 같이 선택항목을 더블클릭할 경우 새로운 화면이 형식에 맞게 실행되도록 하였다.

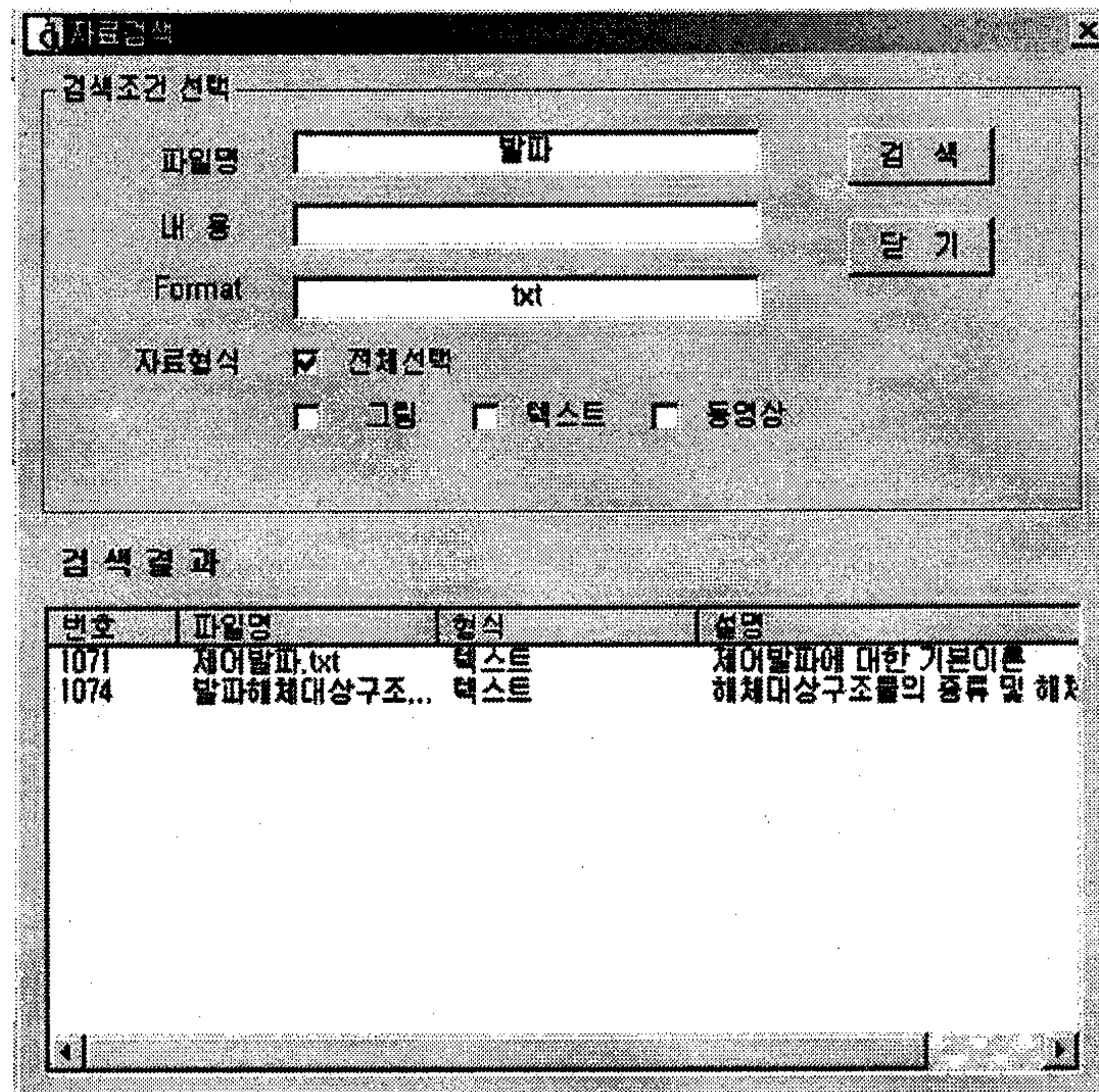


Fig. 3.1.2.7. 검색화면

(라) 기타

발파기술자료 DB 프로그램은 사용자가 활용의 용이성을 높이기 위해 도움말 기능을 추가하였으며(Fig. 3.1.2.8 참조), 도움말은 목차/색인으로 나뉘어져 사용상 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위한 수단과 Tutorial의 기능을 가지고 있다(Fig. 3.1.2.9 참조). 또한 Multiviewer 기능에 의해 새롭게 생긴 그림보기와 텍스트보기 화면에서는 출력

기능을 추가하여 자료의 인쇄를 가능하도록 하였다.

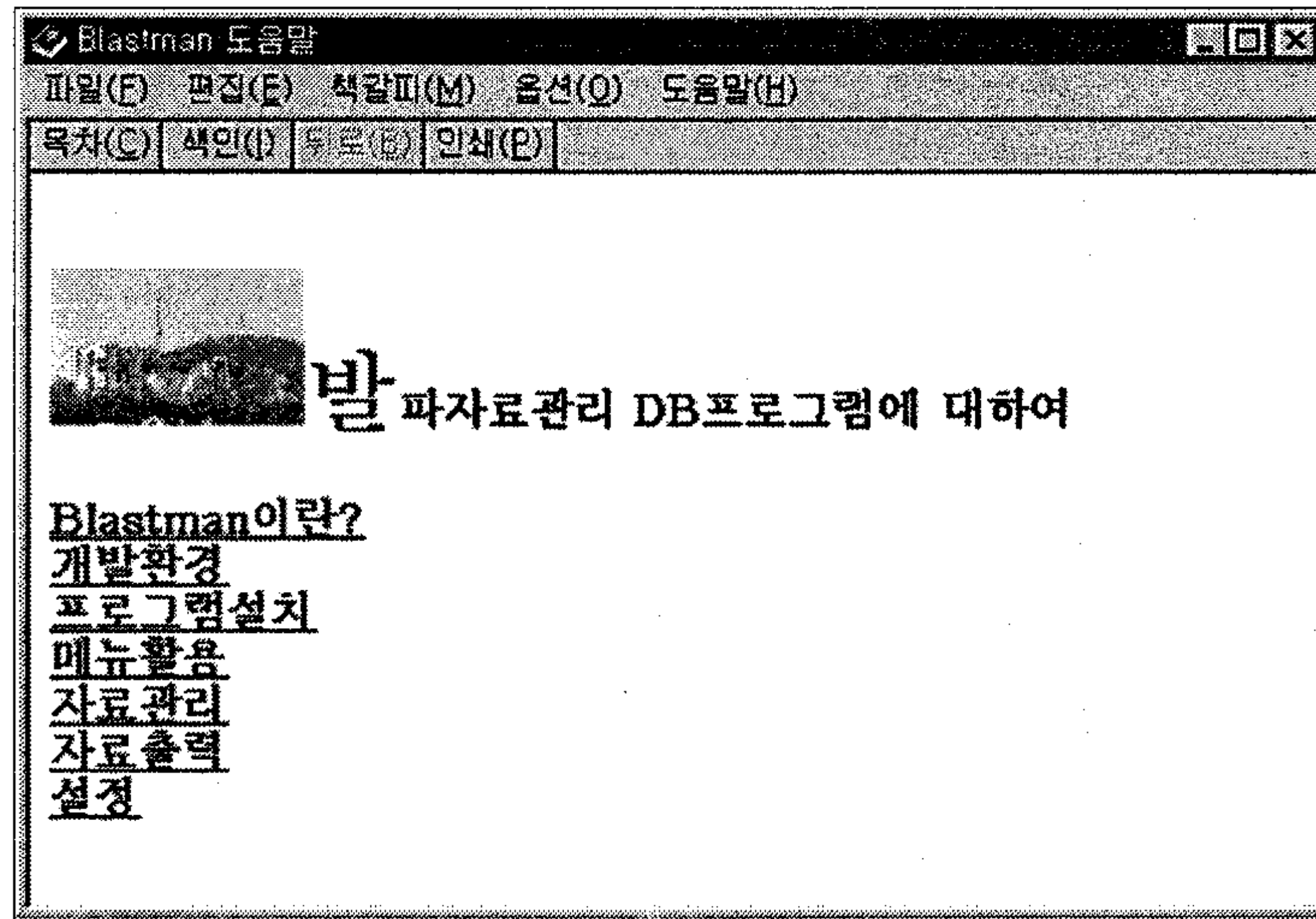


Fig. 3.1.2.8 도움말

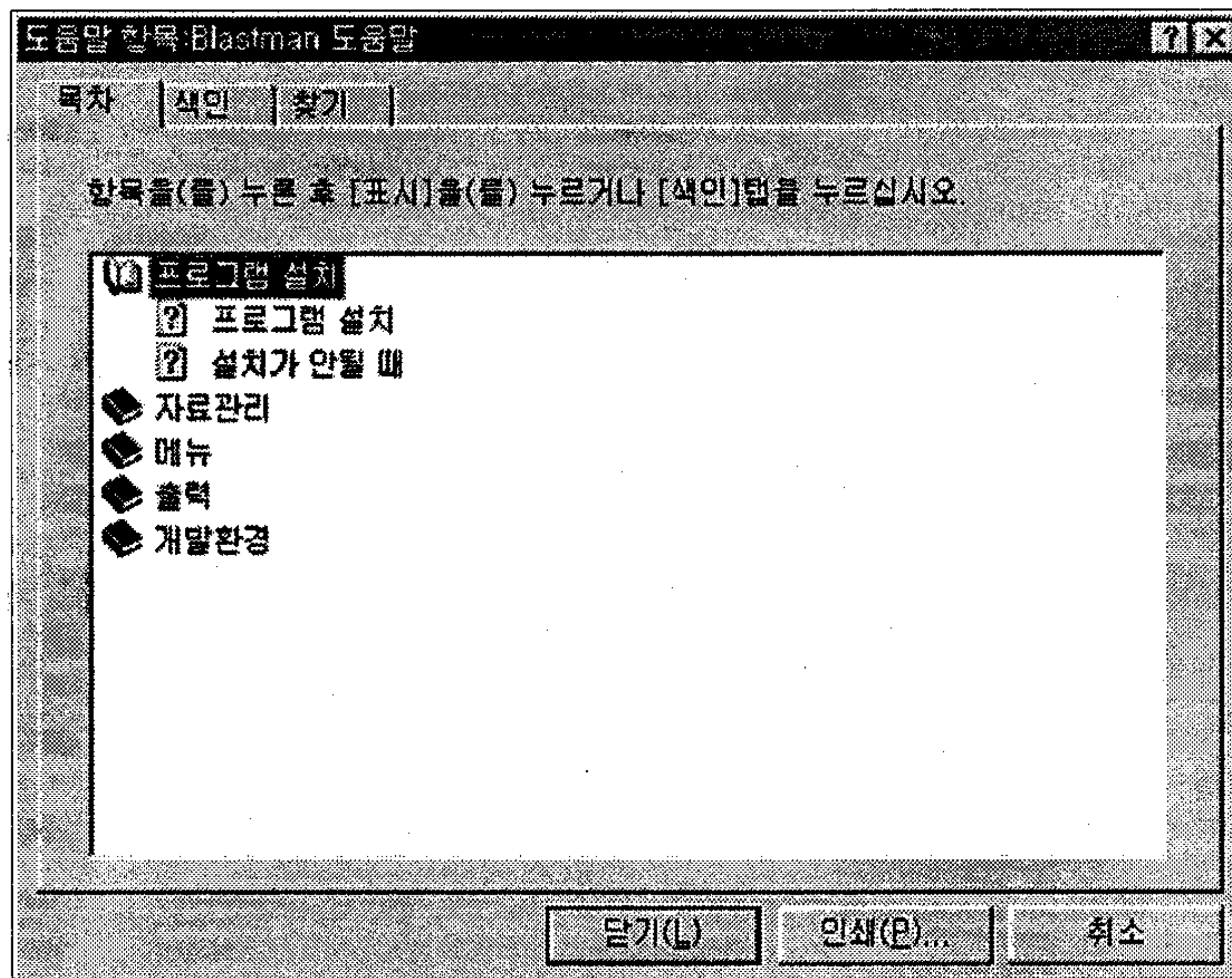


Fig. 3.1.2.9 도움말의 목차, 색인, 찾기 기능

추가적인 부분으로 자료를 보여주는 리스트뷰 컨트롤 부분의 경우 메뉴의 보기 항목의 세 형식(아이콘으로 보기, 간략하게 보기, 상세하게 보기)에 따라 다르게 볼 수 있다. 정보란에는 본 프로그램의 간략 소개와 함께 Version을 표시하고 있다.

3. 용어 표준화

가. 배경

과학기술에 있어 용어란 어떤 물리현상의 개념을 정의하고 나아가 이론과 법칙을 유도하는 중요한 요소가 되며, 또 개발된 이론과 기술에 대한 교류와 발전이라는 측면에서도 더욱 중요한 의미를 지닌다. 그러나 화약발파분야의 전문용어들은 산업 현장에서는 과거 일제시대의 용어들이 무분별하게 사용됨은 물론이고 교육용 자료에서도 일관되지 않고 그 개념이 모호하거나 외국의 용어를 받아들이는 과정에서 저마다 정의를 달리하여 사용하고 있는 어휘들이 많이 있는 등 용어 정립의 필요성이 절실한 실정이다. 필요성은 제기되고 있으나 학회나 교육기관에서 아직 착수하지 못하고 있는 전문용어 정립을 위하여 국내 발파연구를 선도하는 연구실로서 1단계 연구목표의 하나로 설정하여 결과를 도출하였다.

나. 혼용되는 용어들

(1) 기폭약(primer)과 전폭약(booster)

기폭(initiation)이란 어떤 화약류의 폭발(폭굉 또는 폭연)을 일으키는 행위로서 그 방법은 불문으로 하는 광의의 기폭인 반면, 기폭(priming)은 어떤 폭약을 사용하여 다른 폭약[화약류]을 기폭 시킬 때 주로 사용한다. 이로부터 다른 폭약을 기폭 시킬 목적으로 사용하는 폭약을 기폭약(primer (charge))이라 하고, 「연소를 일으킨다」는 뜻의 점화(ignition)에 비유하여 「폭굉을 일으킨다」는 의미에서 점폭약이라고도 한다. 이러한 기폭약이 약포의 형태로 되어 있으면 기폭약포 또는 점폭 약포라 부른다. 이와 같이 기폭약에는 「폭굉을 최초로 일으킨다」는 의미가 담겨 있으므로 반드시 뇌관(detonator) 또는 뇌관이 붙은 도폭선(detonating cord)을 포함하는 개념이라는 점에 주목해야 한다. 한편, 충격 등에 매우 민감한 폭약으로서 일단 점화되면 폭연에서 시작하여 폭굉까지 이어지는 폭약도 기폭약(primary explosive)이라 하며, 그 가루를 뇌관에 사용한 것을 폭분(primer charge)이라 하므로 유의해야 한다.

기폭약과 자주 혼동되어 사용되는 용어로 전폭약(booster)이 있다. 전폭약은 둔성 폭약류를 기폭 시키는데 사용하는 고폭속, 고폭력의 폭약을 지칭한다는 점에서는 기폭약과 동일하나 뇌관을 배제한다는 점에서 서로 다르다. 즉, 전폭약에는 「폭굉을 최초로 일으킨다」는 개념이 포함되지 않고 단지 「폭굉을 다른 폭약으로 전달한다」는 의미만 담겨있다. 전폭약의 대표적 용례로는 장공발파에서 주장약이 되는 ANFO의 중간쯤에다 다이너마이트와 같은 고폭속의 폭약을 둬으로써 기폭지점이

되는 뇌관 또는 기폭약포로부터 거리가 멀어짐에 따른 ANFO의 폭력감소 문제를 해결하는 경우가 있다. 물론 이 때에도 중간부분의 다이너마이트에 뇌관을 꽂아 사용하면 다이너마이트는 「기폭약포」의 역할을 하게 된다. 이와 유사한 형태로 하나의 발파공에 여러 개의 기폭약포를 사용하는 경우를 보통 분산장약(deck charge, decking)이라 한다. 현재 「OO 부스터」란 이름의 제품들이 많이 시판, 사용되고 있으나 그 상표명과는 관계없이 거기에 뇌관을 꽂아 사용하면 「기폭약포」가 되고 뇌관 없이 사용하면 「전폭약포」가 된다.

물론 넓은 의미에서는 기폭약도 폭굉을 전달하는 것이므로 전폭약의 특수한 경우로 간주하여 기폭약포를 전폭약포라 부를 수도 있으나 분산장약에서와 같이 뇌관에 의한 기폭이 중시될 때는 이를 분명하게 구분하는 것이 좋을 것이다.

(2) 후굴(back break)과 과굴(over break)

후굴(back break)이란 문자 그대로 다열 발파시 발파공의 최후 열 또는 발파예정선의 뒤쪽에서 발생된 파괴를 의미하며, 과굴(over break)도 발파예정선을 넘어 지나치게 발생된 파괴를 의미하므로 서로 동일한 개념으로 볼 수 있다. 이 외에도 'out break'이라는 용어도 같은 뜻으로 사용된다. 이에 반해 우리가 관습적으로 많이 사용하는 여굴(餘掘)이란 용어는 그냥 「지나치다」는 의미보다는 많아서 「남다」는 뜻이 강하여 원래 의도하는 예정선을 넘어 「뒤쪽까지」 내지는 「지나친」 파괴란 개념에는 오히려 부적합한 것으로 여겨진다.

(3) 저항선(burden)과 최대저항선(maximum burden)

저항선과 최대저항선은 여러 문헌에서 애매하게 정의되어 사용되는 용어에 속한다.

먼저, 저항선(burden)이란 i) 발파공에 장전된 폭약의 중심으로부터 가장 가까운 자유면까지의 거리, ii) 다열 발파 등에서 공간격(spacing)과 직각방향으로 측정된 발파공 사이의 거리, iii) 하나의 공에 의해 발파되는 암석의 총량(단위: ton, yd³) 등으로 정의된다. 그런데 저항선에 대한 i)과 ii)의 정의에도 불구하고 'line of the least resistance'에서 기원된 「최소저항선」을 굳이 「minimum burden」이라는 용어로 사용하는 경우가 있다. 저항선에는 이미 「최소거리」라는 개념이 들어 있으므로 「최소」라는 용어를 중복하여 사용하는 것은 사족에 다름 아니다.

다음으로, 최대저항선(max. burden)은 위의 「minimum burden」의 반대가 아니

라 발파설계상의 용어로서 주어진 발파조건하에서 파괴할 수 있는 저항선의 최대치를 말한다. 이는 주어진 장약량으로 주어진 저항선을 의도한대로 떼어낼 수 있는 저항선의 최대값을 말하는 것으로, 만일 저항선이 이보다 길어지면 약장약이 되어 성공적인 발파가 될 수 없음을 의미한다. 발파를 설계할 때는 작업 도중에 발생할 수 있는 오차들(천공오차 및 착점오차)을 감안하여 최대저항선에서 이들 오차를 뺀 값을 설계 저항선으로 하는 것이 보통이다.

따라서 주의할 것은 장약공에서 가장 가까운 자유면까지의 거리를 최소저항선, 가장 먼 자유면까지의 거리를 최대저항선으로 생각하여 단편적으로 사용해서는 안 된다는 점이다.

(4) 폭약의 밀도(density of explosive)와 장전밀도(loading density)

일반적인 물질의 밀도(density)를 말할 때와 마찬가지로 폭약에 있어서도 밀도(density)는 주어진 폭약의 단위 부피당 질량[중량]을 말하며, 단위는 g/cm^3 또는 pcf(pound per cubic foot)이다. 반면, 장약(charge)이란 약실[발파공]에 「폭약을 켜다[장전한다]」 내지 「켄[장전된] 폭약」의 뜻이므로 폭약 그 자체와는 성질이 달라진다. 예를 들어 발파공에 장전된 폭약은 장전방식에 따라 폭약이 원래 지니던 밀도가 변화될 수 있다.

물론, 광의에 있어서는 제품 상태에 있는 폭약의 밀도나 발파공에 장전되어 밀도가 변화된 폭약의 밀도나 모두 밀도임에는 틀림없으나 장약에 있어서는 일반적으로 「발파공 단위길이당 질량」이란 개념을 도입하여 장약밀도(charging density) 또는 장전밀도(loading density)를 사용하는데, 이는 발파설계에 있어 중요한 요소가 되기 때문이다.

Langefors는 장전방식의 차이에 따른 폭약의 밀도변화를 고려하여 kg/dm^3 단위의 압입도(degree of packing)를 도입하여 발파설계에 이용하였으며, 장약밀도와 같은 개념으로는 장약집중도(concentration of charge)를 사용하였다.(Langefors & Kihlstrom, 1978) 이 외의 여러 문헌들에서 정의되어 있는 장약밀도와 관련된 용어들을 간추려 보면 표 3.1.3.1과 같다. 표 3.1.3.1에서 보면 미국에서는 폭약의 밀도(density of explosive)와 장전밀도(loading density)를 사용하는데, DuPont 사의 경우에는 편의상 폭약의 밀도를 「기준 무게당 기준규격의 약포개수」로 표시하나 이는 결국 「단위 부피당 중량」의 차원과 같은 것이다. 한편, 스웨덴에서는 장전된 폭약의 밀도를 의미하는 압입도(degree of packing)와 「발파공 단위 길이당 장약량」을 의미하는 장약집중도(concentration of charge)를 사용한다. 하지만

Gustafsson의 경우에는 압입도와 장약집중도를 서로 같은 개념으로 사용하여 kg/dm³ 및 kg/m를 혼용하고 있음에 유의해야 한다.(Gustafsson, 1981) 국내의 경우 몇몇 문헌에서는 장약밀도와 장전밀도를 폭약의 밀도와 같은 개념으로 사용하는데 비해 다른 문헌들이나 현장에서는 「발파공 단위 길이당 장약량」의 뜻으로 사용하는 경우가 많아 혼란의 여지가 있다. 또 「장전비중」이라는 용어를 사용하는 사람들도 많다.

Table 3.1.3.1 장약밀도와 관련된 용어들

문헌	단위 부피당 질량의 차원		단위 길이당 질[중]량의 차원	
	용어	단위	용어	단위
산업화약과 발파공학 ¹⁾	장약밀도	g/cm ³	장약밀도 발파공 단위길이당 장약량	kg/m
신화약발파해설 ²⁾	장약밀도(charging density) 장전밀도(loading density)	g/cm ³		
Explosives and Rock Blasting ³⁾	Density of explosive	g/cm ³	Loading density Charge weight of foot of explosive	kg/m 또는 lb/ft
Blasters' Handbook ⁴⁾	Density of explosive	no. exp./lb	Loading density Pound of explosive per foot of borehole	lb/ft
The Modern Technique of Rock Blasting ⁵⁾	Degree of packing	kg/dm ³	Concentration of charge	kg/m

1) 김재극, 1992; 2) 윤철현, 1994; 3) Atlas Powder Co., 1994; 4) DuPont, 1952; 5) Langefors & Kihlstrom, 1978

결국 유럽과 미국에서는 「폭약의 밀도」와 「발파공 단위 길이당 장약량」에 대하여 각각 별개의 용어를 사용하고 있으므로 오해의 소지가 크게 없음에도 이들의 도입단계에서 언어의 차이에 의한 혼동이 발생된 것으로 판단된다. 따라서 이들 혼란을 없애고 유럽과 미국의 독특한 설계방식을 있는 그대로 이해하기 위해서는 다음의 표에 제시된 것과 같은 용어의 재정립이 필요하다고 본다.

구분	단위 부피당 질[중]량의 차원 (g/cm ³ , lb/ft ³ , kg/dm ³)	단위 길이당 질[중]량의 차원 (kg/m, lb/ft)
미국식	폭약의 밀도(density of explosive)	장전[장약] 밀도(loading[charging] density)
유럽식	압입도(degree of packing)	장약집중도(concentration of charge)

(5) 연시(delay time), 단수(delay period) 및 단차(delay interval)

지연시간(delay time)이란 주어진 지발뇌관(delay detonator)에서 기폭신호의 적용과 첨장약(base charge)의 폭발 사이에 걸리는 시간을 말하며, 지발[지연] 시간[초시] 또는 간단히 연시라고도 한다.

한편 지발뇌관의 계열(series)에는 기본적으로 MS 계열과 LP 계열이 있다. MS 계열은 연시가 밀리세컨드(millisecond) 단위로서 대개 20~25 ms 정도이고, LP 계열은 데시세컨드(decisecond) 단위로서 대개 0.1~0.5 sec 정도이다.

지발단수(delay period)는 종종 지연시간과 같이 사용되기도 하지만 엄밀히 말하면 어떤 계열 내의 뇌관들이 지니는 상대적 혹은 절대적 지연시간을 표시하기 위해 각 뇌관에 붙인 「이름(designation)」을 말한다. 대개는 단수(period number)라 하여 1번, 2번 등의 번호로 표시하거나 각 뇌관의 지연시간으로 표시하거나 이 둘을 함께 사용하기도 한다.

지발단차(delay interval)는 i) 어떤 주어진 지발뇌관 계열에서 인접된 지발단수의 뇌관들 사이의 폭발 시차를 말하거나 ii) 어떤 발파에서 주어진 뇌관들의 연속적인 폭발 사이의 시차를 말하며, 지발간격 또는 지발시차라고도 한다.

(6) 커플링(coupling)과 디커플링(decoupling)

커플링(coupling)이란 폭약이 발파공의 단면을 채우고 있는 정도를 말하며, 디커플링(decoupling)은 이와는 반대로 발파공의 단면상에서 폭약이 공벽과 떨어져 있는 정도를 말한다. 따라서 커플링과 디커플링은 역수의 관계에 있으며, 대개 아래와 같이 디커플링(d)을 약경(ϕ_e)에 대한 공경(ϕ_h)의 비로 정의하여 사용한다.

$$d = \frac{\phi_h}{\phi_e}$$

(7) 전폭(propagation)과 순폭(sym pathetic propagation)

전폭(propagation)은 「접촉 또는 근접」한 폭약으로부터 받은 충격으로 인한 폭약의 폭굉으로 정의되며, 순폭(sym pathetic propagation)은 「공기, 물 또는 땅속을 통해 전파」된 다른 폭약의 폭굉충격으로 인한 인접한 폭약의 폭굉으로 정의된다. 즉, 전폭은 폭약간의 「일반적인」 폭굉의 전파를 말하는 포괄적인 의미인 반면, 순폭은 일반적인 전폭현상이 아니라 「서로 떨어져 있는」 내지는 「함께 폭굉하지

않도록 의도된」 폭약 사이에서 발생하는 전폭현상을 말한다. 순폭의 뜻으로 사용되는 'flashover'는 장약간 또는 장약공간에 발생하는 순폭으로 정의되며, 함께 폭굉하지 않도록 설계된 장약 또는 장약공이 주변의 장약 또는 장약공의 폭굉충격으로 「덩달아 터지는」 현상을 말한다.

한편, 다른 폭약에 충격을 가하는 폭약을 유도폭약(donor)이라 하고, 폭발하는 유도폭약으로부터 충격을 받는 폭약을 감응폭약(acceptor; receptor)이라 한다. 일반적으로 유도폭약을 유폭약 또는 여폭약이라 하고, 감응폭약을 감폭약 또는 수폭약이라 한다.

순폭도(gap sensitivity)는 표준규격의 유도폭약과 순폭성을 시험코자 하는 감응폭약 사이에서 전폭이 발생할 수 있는 최대거리를 말하는 것으로 폭약의 순폭 가능성을 예측하는데 사용된다.

(8) 기타

지금까지 살펴본 몇몇 용어들 외에도 많은 다른 어휘들이 명확하게 정의되지 않은 채 사용되고 있으며, 특히 위의 여폭약, 수폭약 등에서와 같이 일본식 용어가 걸러지지 않고 그대로 사용되어 어색한 경우가 허다하다. 이와 같은 문제는 화약기술을 처음 배우고자 하는 사람이나 자신의 경험을 전달코자 새로운 문헌을 집필하는 전문가 모두에게 걸림돌이 될 뿐만 아니라 나아가서는 국내 발파분야의 저변확대와 기술발전을 저해하는 요소가 될 수 있으므로 하루빨리 해결해야 할 문제라 생각한다.

다. 화약발파 용어정의

- 기폭¹ initiation: 어떤 화약류의 폭발(폭굉 또는 폭연)을 일으키는 것; 방법은 불문
- 기폭² priming: 어떤 폭약을 사용하여 다른 폭약을 기폭¹시키는 것
- 기폭약¹ primary explosive: 충격 등에 매우 민감한 폭약; =일차화약류; cf.이차화약류
- 기폭약² primer (charge): 기폭²을 목적으로 하는 폭약; =전폭약, 점폭약
- 기폭약포 primer (charge/cartridge): 기폭약²의 다른 말; 뇌관 포함
- 전폭약(포) booster: 다른 폭약을 기폭¹시키는데 사용하는 고폭속의 폭약; 뇌관 제외
- 폭분 primer charge: 기폭약¹의 가루로서 뇌관에 사용된 것
- 전폭 propagation: 인접한 폭약의 폭발로 다른 폭약이 기폭¹되는 것

Acceptor	감폭약; 수폭약	Receptor; 폭발하는 유폭약으로부터 충격을 받는 폭약; cf. Donor
Adit	통동; 횡갱	광산에서 작업이나 배수의 통로가 되는 수평갱도; 갱도가 반대편으로 개통되면 터널이 됨

Adobe Charge	표면장약	Bulldoze; Mudcapping; 외부장약발파시 발파공을 천공하지 않고 암석표면에 접촉시켜 진흙으로 밀폐하거나 밀폐하지 않은 폭약
Air Blast	폭풍; 발파풍	폭발에 의해 발생하는 공기 중의 충격파
Ammonium Nitrate ANFO	질산암모늄; 초안 초유폭약; 안포; 안포	질산암모늄(NH ₄ NO ₃) Mixture of Ammonium Nitrate and Fuel Oil의 두문자어; 질산암모늄과 연료유로 만들어진 폭약;
Back Break	과굴	Over Break; Out Break; 발파시 발파공의 최후 열의 뒤쪽에서 부서진 암석 또는 그 현상; 후굴; 과굴
Ballistic Mortar	탄동구포시험기	탄동시험과 구포시험의 장점을 띤 탄동구포시험에서 화약류의 상대적인 강도를 측정하는데 사용되는 실험기기
Base Charge	침장약	뇌관에 장전되어 있는 주 폭약
Bench		계단; 벤치벽에서 돌출되어 있거나 벽의 윗면을 이루는 수평턱; 보통이 수평면에서 하부로 천공하여 발파함
Bench Blasting	계단발파; 벤치발파	2개 이상의 자유면을 가진 계단의 발파
Bench Height	계단고; 벤치고	계단의 수평단에서 다음 계단의 수평단까지의 수직거리
Black Powder	흑색화약	폭연 혹은 낮은 폭발성을 가진 혼합물로서 유황, 목탄, 질산칼륨/나트륨으로 제조됨
Blast	발파	Blasting; 암석이나 다른 물질의 파괴나 이동, 혹은 탄성파의 발생 등을 목적으로 화약류를 폭발시키는 일
Blast Area	발파지역	비산, 가스 또는 진동의 영향을 받을 수 있는 발파장소 근접지역
Blast Pattern	발파패턴	계단발파에서의 천공계획; 저항선과 공간격 및 이들 상호간의 관계에 대한 표현
Blast Site	발파장소	장약을 하는 장소; 장약(예정)공에서 사방 15m 이내; 지하채광발파에서 두께 4.5m의 기둥은 15m 거리로 간주함
Blaster	발파계원	Shot Firer; 발파 자격을 갖춘 자로서 장약 및 발파에 대한 책임과 의무를 지닌 자
Blasthole	발파공	Borehole; Drill Hole; 장약을 위해 발파대상 물질에 뚫은 공
Blasting Agent	화공품	화약류를 사용목적에 맞도록 섬유나 플라스틱으로 피복하거나 통이나 관에 장전하거나 하여 가공한 것에 대한 총칭
Blasting Cap	(공업)뇌관	Fuse Cap; Fuse Detonator; 도화선부 뇌관; 도화선에 의해 기폭되는 뇌관; 통상적인 "뇌관"
Blasting Crew	발파조원	장약, 결선, 기폭 작업시 발파계원을 보조하는 인원
Blasting Galvanometer	발파저항측정기	Galvanometer; 전기발파회로를 시험하기 위하여 특별히 제작된 전기저항 측정기

Blasting Machine	발파기	전기발파회로에서 뇌관에 전기에너지를 공급하여 기폭시키도록 제작된 전기식 혹은 전기기계식 장치
Blasting Mat	방호덮개	발파시의 비석을 방지할 목적으로 발파공을 덮어주는 물질이나 구조물; 예) 페타이어, 통나무, 철망
Block-Holing	소할발파	대괴를 깨뜨리기 위해 소구경의 천공과 적은 장약량으로 발파하는 일
Blown-out Shot	공발	폭약이 암석을 파괴하지 못하고 공구로 터져 나오는 것
Booster	전폭약	둔성폭약류의 기폭을 돕기 위해 사용되는 고폭속, 고폭력의 폭약; 뇌관을 포함하지 않은 개념임; cf. Primer
Bootleg	잔류공	폭발력의 부족으로 암석이 공바닥까지 완전히 부서지지 않아 발파 후에도 남아있는 천공된 발파공의 일부분
Borehole	발파공	Blasthole; Drill Hole; 장약을 위해 발파대상 물질에 뚫은 공
Bottom Charge	기저/하부/바닥장약	발파공의 바닥부에 집중하여 넣는 장약; cf. Column Charge
Boulder Blasting	옥석발파	농경지 등에서 지중에 그 일부 혹은 전부가 묻혀 있는 암석을 깨뜨리는 발파; 천공발파법보다 사혈법을 많이 사용함; cf. Snakeholing Method; 전회의 발파에서 나온 대괴(옥석)를 적절한 크기로 파쇄하기 위한 발파; 이차발파; 소할발파
Bridge Wire	전교(선)	전기뇌관 내부에서 두 각선의 끝을 연결하고 있는 전기 저항선을 말하며 점화약 속에 끼워져 있음
Brisance	맹도	어떤 폭약이 갖고 있는 잠재적인 총일량과는 별도로 그 폭약의 파괴력의 정도를 말함
Bulk Strength	체적강도	Cartridge/Volume Strength; 폭약의 단위체적당 강도; 폭약의 중량강도 및 밀도로부터 계산함
Bulldoze	표면장약	Adobe Charge; Mudcapping 참조
Burden	(최소)저항선	Minimum Burden; 발파공에 장전된 폭약의 중심으로부터 가장 가까운 자유면까지의 거리; 공간격과 직각방향으로 측정된 발파공 사이의 거리; 하나의 공에 의해 발파된 암석의 총량(단위 ton, yd ³)
Capped Cartridge	(뇌)관부 약포	공업뇌관 또는 전기뇌관을 장착한 약포; cf. Primer
Capped Fuse	(뇌)관부 도화선	공업뇌관을 결합한 도화선; 발파에서 약포에 삽입하기 직전의 것을 일컬음
Cap Sensitivity	뇌관기폭성	뇌관에 의한 기폭에 대한 폭약의 민감한 정도; 폭약이 6호 뇌관에 의해 기폭되면 뇌관기폭성이 있는 것으로, 기폭되지 않으면 뇌관기폭성이 없는 것으로 간주함
Cartridge	약포	원형의 단면으로 날개 포장된 폭약
Cartridge Strength	체적강도	Bulk/Volume Strength 참조

Charge¹	장약	발파에서 공 속에 넣는 폭약
Charge²	장약; 장전	Loading; 폭약을 공에 집어넣거나 표면 등에 붙이는 행위
Charging Density	장약밀도; 장전밀도	약실용적에 대한 약량; cf. Loading Density
Collar	공구	발파에 있어서 천공된 발파공의 입구나 상단; 수갱의 입구 혹은 상단 부근에 설치된 지주시설이나 콘크리트를 가리키는 용어
Column Charge	주상장약; 상부장약	발파공 내에서 길고 연속된 형태로 장전된 폭약; cf. Bottom Charge
Confined Blasting	내부장약발파	발파공에 폭약을 장전하고 공의 입구를 메지물로 막고 행하는 발파방법; cf. Unconfined Blasting
Connecting Wire	보조모선	전기발파회로에서 각선들이나 발파모선을 연장하는데 사용되는 피복전선
Connection of Wire	결선	전기발파에서 각선과 각선, 각선과 보조모선, 보조모선과 발파모선 등을 연결하는 것
Core load	심약량	도폭선에 들어있는 폭약의 양; 단위 길이당 중량으로 표시함
Coupling	커플링	폭약이 발파공의 단면을 채우고 있는 정도
Cross-linking Agent	가교제	슬러리폭약에서 점조제의 점조화를 촉진하고 기포를 고정하기 위해 사용하는 재료
Cushion Blasting	정밀발파; 쿠션발파	정확한 경사면을 만들기 위한 발파기술; 주상장약보다 나중에 발파되며 공간격을 좁히고 디커플링 시킴
Cutoff	컷오프	인접공의 폭발에 의한 비석이나 지반이동 등에 의해 각선이 절단되거나 하여 기폭이나 기폭이 중단되는 것
Deck Loading	분산장약	Decking; 동일한 발파공내에서 전색이나 공기쿠션으로 폭약을 여러 단으로 나누어 장약하는 방법
Decks	덱장약; 분산장약	Deck Charge; 분산장약 방법으로 장약된 각단의 폭약
Deflagration	폭연	화약류를 따라 진행되는 폭발적인 연소반응으로서 해당 화약류를 매질로 했을 때의 음속보다 낮은 속도로 진행되는 급속한 연소와 같은 반응
Delay	지발	여러 폭약들을 별도로 발파하기 위해 미리 정한 시간간격을 두고 기폭충격을 가하는 것 또는 그 시간동안 후속 폭발이 유보되는 것
Delay Blasting	지발발파; 단발발파	지발뇌관을 사용하여 정해진 시간간격을 두고 deck 별, 발파공별, 발파공열별로 기폭시키는 발파법; 이 방법은 모든 발파공을 동시에 기폭시키는 동시발파와 대비되는 개념임
Delay Detonator	지발뇌관	기폭신호의 적용 후 정해진 시간만큼 침장약의 폭발이 지연되는 전기식 혹은 비전기식 뇌관
Delay Element	연시약; 연시장치	지발뇌관에서 기폭신호의 적용후 정해진 시간만큼 침장약의 폭발을 지연시키는 역할을 하는 화약류/장치

Delay Interval	지발시차	지발발파에서 인접한 지발연시를 갖는 두 뇌관의 폭발시차
Delay Period	지발연시	지발결선에서 각 뇌관에 주어진 상대적 혹은 절대적 연시
Delay Series	지발계열	특별한 발파조건에 맞추기 위하여 설계된 지발뇌관들의 계열
Delay Tag	지발표식	뇌관의 지발계열, 지발연시 및 혹은 연시를 표시하여 붙여둔 표식
Delay Time	연시	지발뇌관에서 기폭신호의 적용과 침장약의 폭발 사이에 걸리는 시간
Density	밀도	폭약의 단위 부피당 질량; 일반적인 단위는 g/cc, pcf
Detonating Cord	도폭선	고성능폭약을 심약으로 한 유연성 있는 피복선을 말하며 다른 폭약의 기폭용으로 사용됨
Detonation	폭굉	화약류를 따라 진행되는 폭발적인 반응으로서 해당 화약류를 매질로 했을 때의 음속보다 높은 속도로 진행되는 반응
Detonation Pressure	폭굉압	폭굉하는 폭약의 반응대에서 발생하는 압력
Detonation Velocity	폭굉속	폭약중에서 진행되는 폭굉의 속도; 폭굉파의 파속
Detonator	뇌관	화약이나 폭약을 폭발시키기 위한 목적으로 사용되는 장치로서 기폭약이나 침장약을 관체속에 장전한 것
Ditch Blasting	도랑발파	일련의 폭약을 폭발시켜 도랑이나 수로를 형성시키는 발파
Donor	유폭약; 여폭약	감폭약에 충격을 가하는 폭약; cf. Acceptor
Drill Hole	착암공; 발파공	Borehole; Blasthole 참조
Drilling Pattern	천공패턴	발파공 상호간 혹은 자유면과의 위치 관계
Dynamite	다이내마이트	발파용 고성능 폭약으로서 주로 니트로글리세린, 니트로셀룰로오스, 질산암모늄, 질산나트륨, 함탄물질의 혼합물임
Electric Blasting Circuit	전기발파회로	전기뇌관 및 관련 회선들로 구성되는 전기회로
Electric Detonator	전기뇌관	전류에 의해 기폭 되도록 설계된 뇌관
Electric Fuse	전기도화선	전류에 의해 도화선을 점화하는 화공품으로서 전기뇌관의 기폭부를 도화선 삽입공간으로 사용하는 형태임
Electric Storm	전기폭풍	강렬한 전기작용, 낙뢰, 강한 전자기장 등을 동반한 대기의 불안정한 상태
Emulsion	에멀션폭약	상당량의 산화제가 용해되어 있는 물방울 입자들이 다시 불용성 연료에 둘러싸인 형태의 폭약; 유중수적형이며 합수폭약의 일종

Explosion	폭발	극도로 빠른 가스팽창을 보이는 화학적 연소반응을 말하며 대개 열의 발생을 동반함
Explosive¹	화약	폭발을 통해 기능하는 것이 그 주요 목적이거나 일반적인 목적인 어떤 화합물, 혼합물 또는 장치를 일컬음; 주어진 하나의 화약, 폭약 혹은 화공품을 말함
Explosive²	폭약	high explosive 참조
Explosive Charge	장약량	발파공, 코요태 터널 혹은 폭발성 장치에 사용되는 폭약의 양
Explosive Loading Factor	비장약량	Powder Factor; Specific Charge; 암석 단위체적당 사용되는 장약량
Explosive Materials	화약류	화약, 폭약 및 화공품에 대한 총칭; explosives
Explosives	화약류	explosive(화약)에 대한 총칭; explosive materials참조
Explosive Strength	폭발강도	폭약이 폭발할 때 발생하는 에너지량을 말하며, 이는 그 폭약의 일량에 대한 지표가 됨
Extraneous Electricity	이상전기	발파전류나 발파저항측정기에서 나온 시험용 전류외에 발파현장에 존재하는 전기에너지를 말하며 전기발파회로로 흘러들어갈 가능성이 있음
Fireworks	꽃불; 연화	Pyrotechnics; 가칭 혹은 가시효과를 낼 목적으로 설계, 제조된 연소성 혹은 폭발성 혼합물이나 제품
Firing Current	발파전류	하나 혹은 회로를 이루고 있는 전기회관에 충분한 에너지를 공급할 수 있는 크기와 지속시간을 가진 전류
Firing Line	발파모선	전기 발파회로와 전력원을 연결하는 전선
Flammability	가연성	폭발성 물질이 불꽃이나 열에 의해 용이하게 점화되는 성질
Flashover	순폭; 전폭	Sympathetic Propagation; 폭약간 혹은 장약 공간의 순폭
Flexible Explosive	가소성폭약	복잡한 형상의 물체에 밀착될 수 있도록 형상을 자유로이 변형시킬 수 있는 폭약
Flyrock	비석	폭발력에 의해 발파지역에서 튀어나가는 암석
Fragmentation	파쇄(도)	발파에 의해 고체가 조각으로 부서지는 것 혹은 부서지는 정도
Free Face	자유면	Open Face; 통상 장약을 하는 암반표면으로서 파쇄물의 팽창공간이 되는 공기나 물과 접촉하고 있는 면
Fumes	후가스	폭발에 의해 발생하는 가스; 후가스의 분류 시엔 유독가스들(일산화탄소, 황화수소, 산화질소 등)만 취급함
Fuse	도화선	Safety Fuse; 내부에 일정한 연소속도의 가연성 심약을 넣은 유연성 있는 피복선
Fuse Cap	(공업용)뇌관	Blasting Cap; Fuse Detonator; 도화선부 뇌관이라고도 함

Fuse Detonator	(공업용)뇌관	Blasting Cap; Fuse Cap; 도화선부 뇌관이라고도 함
Fuse Lighter	도화선 점화구	신속하고 정확한 도화선 점화기구
Gauge	게이지	전선의 직경을 표시하는 미국식 표준규격; AWG(American Wire Gauge)
Galvanometer	발파저항측정기	Blasting Galvanometer 참조
Gap Sensitivity	전폭도	표준규격의 유폭약과 감폭약 사이의 최대 전폭거리; 전폭가능성을 예상하는데 사용
Gelatin Dynamite	젤라틴 다이너마이트	교질의 다이너마이트로 높은 방수성을 지님; 교질다이너마이트
Grain	그레인	중량의 단위; 7,000 grains = 1 lb = 16 oz = 0.45kg; 밀납알의 무게에서 유래
Ground Vibration	지반진동	발파에 기인한 탄성파에 의한 지반의 흔들림; 통상 입자속도를 mm/s, ips 로 표시
Hangfire	지발	예정된 발파시각 이후의 비정상적 폭약의 폭발
High Explosive	폭약	매우 높은 반응속도, 높은 압력의 전개 및 폭발파의 전파를 특징으로 하는 고급 화약; explosive
Hole Diameter	공경	발파공의 단면상에서의 공의 직경
Initiation	기폭	화약류의 폭발 혹은 폭연을 일으키는 행위
Initiator	기폭약; 뇌관	폭약의 폭발을 일으키기 위하여 사용되는 뇌관이나 도폭선
Instantaneous Detonator	순발뇌관	지발뇌관의 수 ms에서 수 sec의 연시에 비교하여 0 sec의 연시를 갖는 뇌관
Kalium Nitrate	질산칼륨; 초석	질산칼륨(KNO ₃)
Leading Lines/Wires	발파모선	Lead Lines/Wires; Firing Line; 전력원과 전기발파회로를 연결하는 전선
Legwire	각선	전기뇌관에 달려 있는 전선
Loading	장약; 장전	Charge ² 참조
Loading Density	장약밀도; 장전밀도	cf. Charging Density; 발파공 단위길이당 장전된 폭약의 중량; kg/m
Low Explosive	화약	폭연 또는 낮은 반응속도와 낮은 압력의 전개를 특징으로 하는 저급 화약으로서 로켓트 등의 추진약이나 총포 등의 발사약으로 사용됨
Magazine	화약고; 저장고	폭약의 저장이 승인된 모든 건물, 구조물, 용기 등을 말하며 폭약 제조용 건물은 예외임
Misfire	불발	기폭후 폭발되지 않은 발파 혹은 계획대로 폭발되지 않은 폭약 그 자체
Muck	버럭; 쇄석	발파나 케이빙으로 원위치에서 이동된 깨진 암석이나 광체
Mucking	버럭처리; 쇄석운반	발파에서 나온 쇄석들을 다음 장약 등을 위해 처리 또는 운반하는 일

Muckpile	버럭; 쇠석/버럭 더미	버럭의 무더기
Mudcapping	복토법	Adobe Charge; Bulldoze 참조
Munroe Effect	먼로효과	성형폭약에서 폭발작용이 집중되는 효과
Nitrogel	니트로겔	Nitroglycerin Gel; NG Gel; 니트로글리세린 (현재의 다이너마이트용 NG는 모두 니트로글리콜을 함유하고 있음)에 니트로셀룰로스가 혼합되어 겔상으로 된 것
Nitroglycerin	니트로글리세린(NG)	다이너마이트의 예감제로 사용되는 질산에스테르계의 민감한 폭발성 화합물
No. 8 Test Cap	8호 뇌관	IME(미국 및 캐나다의 화약제조자 협회) 8호 뇌관은 1.4 g/cc의 비중으로 다져진 0.40-0.45g의 PETN을 첨가약으로 사용하며, 기폭약은 제조회사 고유의 표준 중량 및 종류를 사용함
Nonelectric Detonator	비전기뇌관	뇌관의 기폭에 전기에너지나 도화선을 사용하지 않는 뇌관
Open Face	자유면	Free Face 참조
Overburden	복토	발파에서는 발파대상 암반 위를 덮고 있는 표토; 일반적으로는 유용한 물질의 위를 덮고 있는 무용한 물질
Oxidizer	산화제; 산소공급제	Oxidizing Material; 산소나 산화성 물질을 발생시켜 유기물이나 다른 연료의 연소를 촉진하는 역할을 하는 물질; 예) 질산염, 염소산염
Oxygen Balance	산소평형	폭약의 재료나 성분중에 존재하는 이론적인 산소량으로서 이상적인 반응물들을 생성시키는데 필요한 양보다 많거나 (+) 적은(-) 경우가 있음
Parallel Blasting Circuit	병렬발파회로	Parallel Connection; 전기발파회로에서 각 뇌관의 각선들이 직접 모선에 연결된 형식의 결선법
Parallel Connection	병렬결선	Parallel Blasting Circuit 참조
Parallel-Series Circuit	직병렬회로	Parallel-Series Connection; 전기발파회로에서 일단의 직렬결선들을 다시 병렬로 연결한 결선법
Parallel-Series Connection	직병렬결선	Parallel-Series Circuit 참조
Particle Velocity	입자속도	지반진동의 세기를 표시하는 하나의 척도로서 지반 진동폭의 시간에 대한 변화율
Pellet Powder	환형화약	흑색화약을 압력을 가해 높이 2 in, 직경 1.25 in의 원통형의 환으로 만든 것
Permissible Explosives	검정폭약; 안전폭약 광산	갱내용품 검정규칙 시험에 합격한 폭약으로 가연성 가스 또는 탄진이 존재하는 탄광에서 안전하게 사용될 수 있는 폭약
PETN	펜트리트	Pentaerythritoltetranitrate의 두문자어로서 폭발성 화약류의 일종
Pneumatic Loading	공압식 장전	발파공의 장약시 압축공기를 사용하여 폭약을 운반, 장전하는 행위

Powder	화약	Low explosives; 저급 화약류 혹은 완성 화약류
Powder Factor	비장약량	Explosive Loading Factor; Specific Charge 참조
Preblast Survey	발파예비조사	발파예정지역의 주변 구조물의 현상태에 대한 조사 및 기록
Premature Firing	부발	예정된 발파시각 이전의 비정상적 폭약의 폭굉
Presplitting	선균열발파	Preshearing; 외곽공들을 먼저 발파하여 외곽선을 따라 균열을 발생시킨 후 나머지 공들을 발파하는 제어발파의 한 방법
Preshearing	선균열발파	Presplitting 참조
Primary Blast	주발파; 일차발파	물체를 원래위치로부터 파쇄, 이동시켜 이후의 처리나 분쇄를 용이하게 하려는 발파
Primary Explosives	일차화약류; 기폭약	스파크, 불꽃, 충격, 마찰, 열 등에 의한 단순한 점화에도 거의 항상 폭굉하는 민감한 폭약류, 뇌관의 첩장약을 점폭시키는 폭분으로도 사용됨; 점화되면 폭연에서 폭굉으로 전이되는 폭약류를 말함
Primer	전폭약(포); 기폭약(포); 점폭약(포)	다른 폭약을 기폭하기 위해 사용되는 폭약/약포; 뇌관 혹은 뇌관이 붙은 도폭선을 포함한 개념임; cf. Booster
Priming Tube	화관	군용으로 발사약의 점화에 사용되는 화공품; 예) 전기화관, 격발화관, 마찰화관
Propagation	전폭	접촉 혹은 근접한 폭약으로부터 받은 충격으로 인한 폭약의 폭굉; 순폭은 전폭의 일종임
Propellant Explosive	추진약; 발사약	통상 폭연하며 물체의 추진을 목적으로 사용되는 폭약; 예) 무연화약
Pyrotechnics	꽃불; 연화	Fireworks; 통상 pyrotechnics을 일컬어 fireworks라고 함
Receptor	감폭약; 수폭약	Acceptor 참조; cf. Donor
Relief	릴리프	발파공으로부터 가장 가까운 자유면까지의 유효거리
Round	라운드	지하채굴의 어떤 단계에서 동시발파되거나 지발발파되는 일단의 천공, 장약된 발파공
Safety Fuse	도화선	Fuse; 내부에 일정한 연소속도의 가연성 심약을 넣은 유연성 있는 피복선
Scaled Distance	환산거리	지발당 장약량에 대한 폭원과 진동계측 지점간의 거리를 말하며, 발파진동을 다루는데 효과적인 개념임; 예) 삼승근 환산거리, 자승근 환산거리
Secondary Blasting	소할발파; 이차발파	일차발파에서 나온 대괴의 크기를 작게 만들기 위한 발파
Secondary Explosives	이차화약류	니트로화합물, 다이너마이트 등의 일반폭약을 기폭약(일차화약류)과 같이 감도가 매우 예민한 폭약류와 구분할 때 사용하는 용어; cf. Primary Explosive

Seismograph	진동계	지반진동을 계측하는 기기로서 일반적으로 입자의 속도, 변위 또는 가속도를 측정하며 삼축방향에서의 값을 기록함
Sensitiveness	(순폭)감도	특정 시험조건하에서 어떤 폭약의 약포 대 약포간 전폭능력의 정도; 일반적으로는 sensitivity와 같은 의미
Sensitivity	(기폭)감도	폭약의 폭발적 분해를 일으킬 수 있는 충격, 불꽃, 마찰 등이 외부에서 가해졌을 때 어떤 폭발성 물질의 기폭능력을 나타내는 물리적 성질
Series Balancing	분로균형	직렬결선에서 모든 직렬 분로의 저항을 일치시켜 균등한 전류를 흐르게 하는 것
Series Blasting Circuit	직렬발파회로	Series Connection ; 전기발파회로에서 인접한 뇌관의 각선들을 연결하고 처음과 끝 뇌관의 각선을 모선에 연결한 형식의 결선법
Series Connection	직렬결선	Series Blasting Circuit 참조
Shaped Charge	성형폭약	폭약에 금속이나 플라스틱제의 라이너로 임의 형상의 공동을 준 것으로 특히 절단 혹은 관통을 목적으로 폭발시 라이너의 미립자 혹은 슬래의 고속분사를 일으키도록 설계된 폭약
Shelf Life	내용년수	화약류가 충분한 성능을 유지하며 저장될 수 있는 기간
Shock Wave	충격파	초음속으로 전파되는 과도 압력파동
Short-Delay Blasting	밀리세컨드 발파	연속되는 두 폭공 사이의 시차가 ms 단위인 지발발파
Shot Anchor	고정장치	폭약을 발파공내에 고정시켜서 다른 폭약의 폭공에 의해 튀어나가지 않도록 해주는 장치
Shot Firer	발파계원	Blaster 참조
Shot Hole	장약공	화약류를 장전한 공
Slurry (Explosive)	슬러리폭약	많은 양의 액체, 산화제 및 연료에 점조제가 첨가된 폭약; 액체성분으로 물이 사용되고 있어 함수폭약이라고도 함
Snakehole	사혈	계단발파에서 계단의 수평면으로부터 약간 아래쪽으로 뚫은 공; 옥석발파를 위해 옥석의 하부에 근접하여 쇠막대 등으로 뚫은 공
Snakeholing Method	사혈법	사혈을 뚫고 장약하여 발파하는 방법; 주로 농경지 등의 옥석발파에 이용됨; cf. Boulder Blasting
Sodium Nitrate	질산나트륨; 칠레초석	질산나트륨(NaNO_3)
Spacing	공간격	발파공 사이의 거리; 벤치발파의 경우 자유면에 평행하고 저항선에 직각인 방향에서의 거리
Squib	도화폭관	흑색화약이나 환형화약의 점화에 사용되는 장치
Stability	안정도	화약류가 정해진 조건하에서 특정한 시간동안 노출되었을 때 제조자가 제시했던 원래의 물리적, 화학적 성질을 유지하는 능력

Steady State Velocity	정상폭속	주어진 직경의 폭약이 폭굉할 때 각 폭약이 보여주는 고유의 폭속
Stemming (Material)	전색(물); 메지(물)	발파공내에 삽입된 폭약을 메우는 불활성 물질; 폭약을 밀폐하거나 동일 발파공내의 폭약들을 분리시키는 목적으로 사용됨; cf. Tamping
Storage	저장	화약류 보관을 위해 특별히 설계된 저장고에서 화약류를 안전하게 보관하는 일
Stray Current	미주전류	절연된 도체로 구성된 시스템의 밖에서 흐르는 전기
Subdrilling	보조천공	계단발파에서 발파공 하부의 암석을 확실하게 파쇄하기 위해 계획된 바닥면 이하까지 천공하는 일
Sympathetic propagation	순폭	공기, 물 또는 땅속을 통해 전파된 다른 폭약의 폭굉충격으로 인한 인접한 폭약의 폭굉
Tamping	전색; 메지	발파공내의 폭약이나 전색물을 메우거나 다져주는 행위; 전색물, 전색하는 행위 또는 양자 모두를 가리키는 용어로도 사용됨; cf. Stemming
Tamping Bag	전색주머니	발파공내의 폭약을 밀폐하기 위한 전색물로 채워진 원통형 주머니
Tamping Pole	전색봉; 장전봉; 다짐대	폭약이나 전색물을 다지는데 사용되는 나무 막대나 플라스틱 막대
Test Blasting Cap No. 8	8호 뇌관	No. 8 Test Cap 참조
Thickener	점조제	물이 주입되었을 때 겔(gel)의 형성이 농후하게 잘 되도록 해주어 점도를 증가시키는 재료
Tight Loading	밀장전	발파공 벽면과 폭약과의 사이에 틈이 없도록 폭약을 채워 장전하는 것
Toe	바닥저항선	계단발파 용어로서 계단의 바닥면상에서 측정된 자유면과 발파공 사이의 거리
Unconfined Blasting	외부장약발파	발파대상 물체의 표면에 폭약을 장착하고 행하는 발파방법; cf. Confined Blasting
Unconfined Detonation velocity	개방폭속	밀폐하지 않은 상태에서의 폭약의 폭굉속도
Volume Strength	체적강도	Bulk Strength; Cartridge Strength 참조
Warning Signal	발파경보	발파 직전에 발파지역 주변의 사람들을 경각시키기 위해 사용하는 가시 혹은 가청 신호
Water Gel (Explosive)	워터젤	많은 양의 물, 산화제, 연료에 가교제가 첨가된 폭약; 물을 함유하므로 함수폭약의 일종
Water Stemming Bags	전색 물주머니	전색용으로 사용하기 위해 물로 채워진 비닐 주머니
Weight Strength	중량강도	화약류의 단위중량당 에너지로서 표준규격의 폭약의 단위중량당 에너지에 대한 백분율로 표시

제 2 절 제어발파설계의 해석적 방법

1. 개요

현지암반은 절리, 층리, 단층, 틈 등 구조적인 불연속면을 포함하고 있다. 절리와 같은 불연속면이 발달하여 있는 암반의 역학적 거동은 암석 자체의 역학적 특성보다는 불연속면의 역학적 특성에 의해 더 많은 영향을 받으며, 암반에 관련된 공학적 문제들을 처리하는데 있어서 이러한 불연속면들을 이해하고 해석하는 문제는 매우 중요하다.

불연속암반의 역학적 거동해석을 위하여 slide line을 사용하는 유한차분 해석방법이나, 절리요소나 절리의 영향이 고려된 요소를 사용하는 유한요소 해석방법 등이 사용되어 왔다. 그러나 이들 방법은 연속체역학의 범주 내에서 문제를 다루므로 불연속면으로 인한 큰 변위가 예측되는 문제들에 적용하기에는 어려운 점이 있다. 한편 강성 블록 개념에 기초한 개별요소법(Distinct Element Method)은 심도가 깊지 않거나 자유면 부근의 절리가 매우 발달한 불연속체의 모델링 경우 매우 능률적이어서 불연속 암반을 위한 새로운 수치해석 방법으로 정착되어가고 있다.

개별요소법은 서로 다른 알고리즘에 기초하여 개발된 두 가지 형태의 수치해석 방법으로 발전해 왔다. 하나는 유한요소법과 같이 강성매트릭스를 구성하여 implicit 알고리즘을 이용하여 해를 구하는 방법을 채택하고 있고 다른 하나는 시간 적분에 의한 explicit 알고리즘으로 해를 구하는 방법을 채택하고 있다. 강성 매트릭스를 형성하여 처리하는 implicit type에 의한 접근 방법은 Belytschko, Plesha 등에 의해 절리 암반의 안정성 해석이나 균열문제에 적용된 바 있으며, explicit type 해석방법은 Cundall 에 의해 개념이 정립되어 개발 초기 속도가 느리고 용량이 크지 못한 컴퓨터에서의 처리를 위해 기계어를 사용하여 첫 소프트웨어가 발표된 이후 UDEC 에 이르기까지 개선이 이루어져 왔다.¹⁾⁻⁶⁾ 이와 같은 강성 블록 개념에 기초를 둔 접근방법은 관련 분야에 이용되기 시작하여 BLOCK, DBMS, CBLOCK 등 여러 컴퓨터 모델이 개발되었다.

본 연구에서는 두 가지 해석 방법의 모델링 특성을 고찰하기 위하여 Plesha 등에 의해 개발된 implicit 알고리즘에 기초한 NURBM과 저자에 의해 개발된 explicit 알고리즘에 기초한 CBLOCK을 이용하여 불연속체 암반의 기초적인 거동 특성을 수치해석적으로 고찰하고 모델링상의 문제점들을 비교 분석하였다.

2. 유한요소법을 이용한 발파 모델링

본 절에서는 발파해체 공법에서 기둥 발파시 가장 효율적으로 기둥을 파괴할 수 있는 기준이 될 수 있는 적정 장약량에 대하여 유한 요소법을 이용한 수치 실험을 수행하고 실제 실험 결과와 비교를 통하여 검증하였다. 여기서 적정 장약량은 기둥의 경계부까지 균열을 확장시키는데 필요한 최소한의 장약량으로 하였다.

가. 적정 장약량

시멘트 몰탈 및 콘크리트 발파는 재료의 강도 특성 때문에 일반적인 암석 또는 암반 발파와는 장약량뿐만 아니라 재료의 반응거동이 완전히 다르다.

콘크리트 기둥 발파에서 과장약이 될 경우 소음 진동 비산 등의 문제로 인하여 적정 장약량을 구하기 위하여 시험 발파를 선행하게 된다. 기둥 발파의 목적은 폭약을 이용하여 기둥의 일부분을 제거하여 줌으로써 기둥이 더 이상 구조물을 지지할 수 있는 힘을 없애주기 위한 것이다. 일반 발파에 비하여 기둥 발파의 경우 발파 후 적정 장약량을 조절하는 것이 매우 중요하다.

Gustafsson은 보강 콘크리트 기둥 발파시에 대하여 기둥의 단면적과 길이에 따른 적정장약량을 제시하였으며, Table 3.2.1.1에 정리하였다. (Gustafsson, 1981)

Table 3.2.1.1 보강 콘크리트 기둥 발파시의 적정 장약량

	기둥 폭 (m)	공 깊이 (m)	공간격 (m)	천공 열	장약량 (kg)
보강 콘크리트 기둥	0.30	0.20	0.30	1	0.05
	0.40	0.30	0.30	1	0.10
	0.50	0.40	0.35	2	0.085
	0.60	0.45	0.35	2	0.125
	0.70	0.55	0.35	2	0.17

Gustafsson이 제시한 적정 장약량은 현장에서 여러 발파 기술자들이 기둥을 발파하고자 할 때의 기준으로 사용되고 있으나, 경험식이므로 수치 실험적인 방법으로 적정 장약량의 타당성에 대하여 검증하였다.

나. 수치 실험

본 해석에서 사용한 유한 요소 해석 프로그램은 발파의 동적인 폭굉 반응과 암석의 특성인 탄소성 변형 거동, 발파시 발생하는 공벽 주위의 crushing과 cracking

을 동시에 묘사할 수 있으며, 세계적으로 결과의 적합성이 검증되어 있는 ANSYS program package(Swanson Analysis System Inc. revision 5.3)로 본 연구의 목적에 적합하다고 판단된다.

본 수치 실험은 시멘트 몰탈 기둥을 해체한 것에 대하여 해석 하였으며, 발파 시 기둥 내에서 발생하는 균열 양상과 응력 분포에 대하여 해석하였다.

본 해석의 입력 물성으로 실제 기둥폭과 실험에 사용한 시멘트 몰탈 기둥의 물성을 사용하였다. Table 3.2.2.1은 수치 실험의 입력 변수로 사용된 시멘트 몰탈 기둥의 물성 표이다.(류창하 외, 1995)

Table 3.2.2.1 시멘트 몰탈 기둥 물성

Specific gravity	1,800
Uniaxial compressive strength (MPa)	33
Tensile strength (MPa)	4
Young's modulus (10^3 MPa)	4
Poisson's ratio	0.2
Damping	0.02

해석에 적용된 기둥의 제원은 가로 45 cm, 세로 45 cm, 높이 180 cm의 시멘트 몰탈 기둥으로 공경 36 mm의 3개 공을 공 간격 40 cm로 배열하였으며, 30cm 깊이로 천공된 상태이다. 전색장은 20 cm이고, 폭약은 공저 부분 10 cm에 장약 되었으며, Fig. 3.2.2.1에 나타내었다.

사각형 기둥의 한 면 중앙에서 중심축과 평행한 방향으로 천공을 하고 발파를 하였으므로 모델의 대칭성을 이용하여 1/2 부분만 해석 하였다. 발파 압력은 공 중심으로부터 공 벽면에 수직인 방향으로 작용하는 형태이다. 기둥 발파에 대한 수치해석의 경우이므로 기둥의 상부 및 하부면은 변위를 구속하였다. Fig. 3.2.2.2는 해석에 사용된 기둥 모델과 수치 실험에 사용한 요소망을 나타낸 것이다. 8절점 요소를 사용하였으며, 모델은 총 7,965개의 절점과 34,339개의 요소로 이루어져있다. Fig. 3.2.2.3은 기둥에 작용하는 발파압력과 구속 조건을 나타낸 것이다.

기둥 발파에 대하여 수치 해석을 실시하였던 대부분의 연구에서 모델링의 어려움 등으로 공 벽면에 수직인 방향에 대하여 평면 변형의 상태로 수치해석을 실시하였으나, 실제 발파 거동을 고려하여 3차원 실제 발파와 같은 조건으로 수치해석을 실시하고 응력 및 균열 분포를 서로 비교하였다.

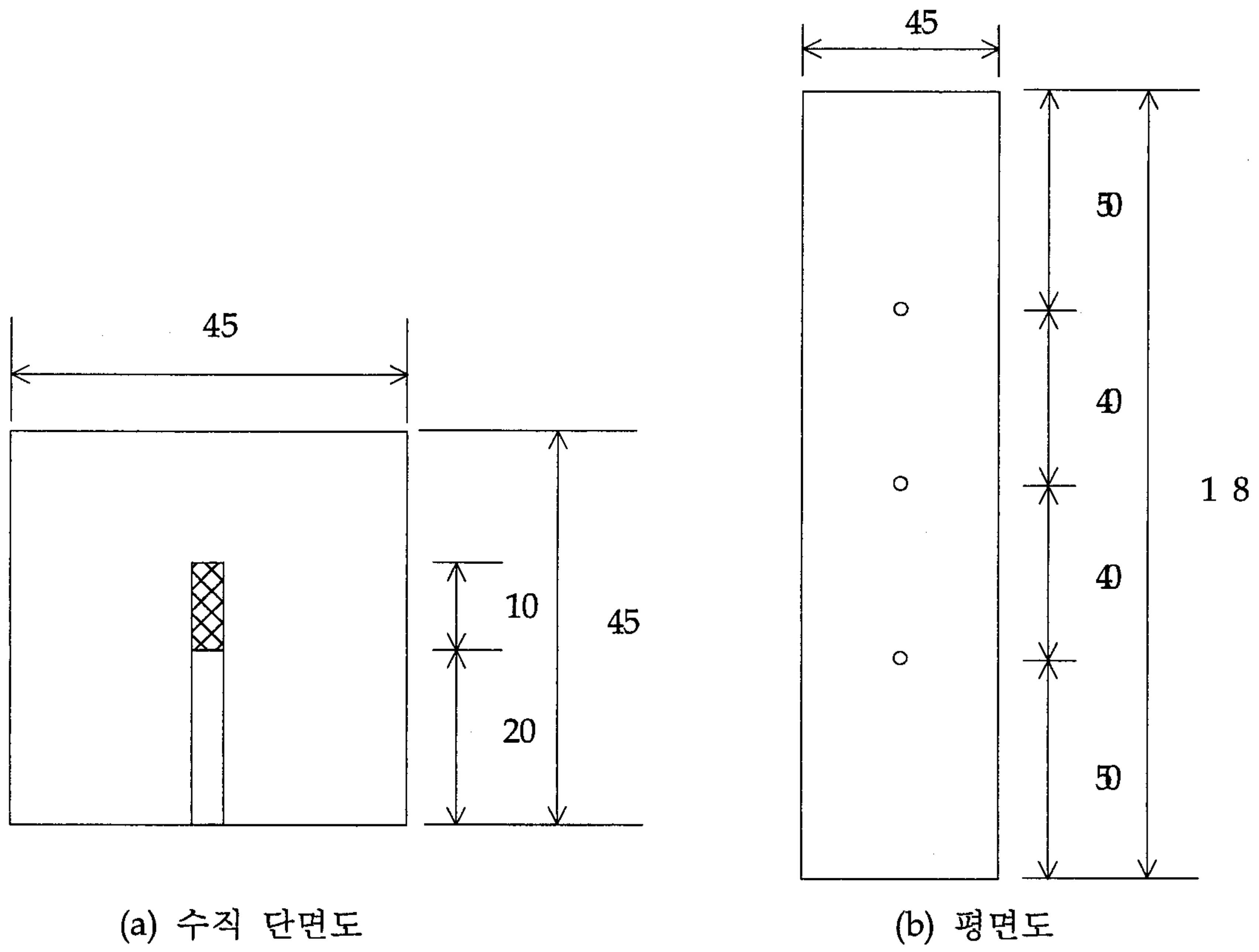


Fig. 3.2.2.1 시멘트 몰탈 기둥

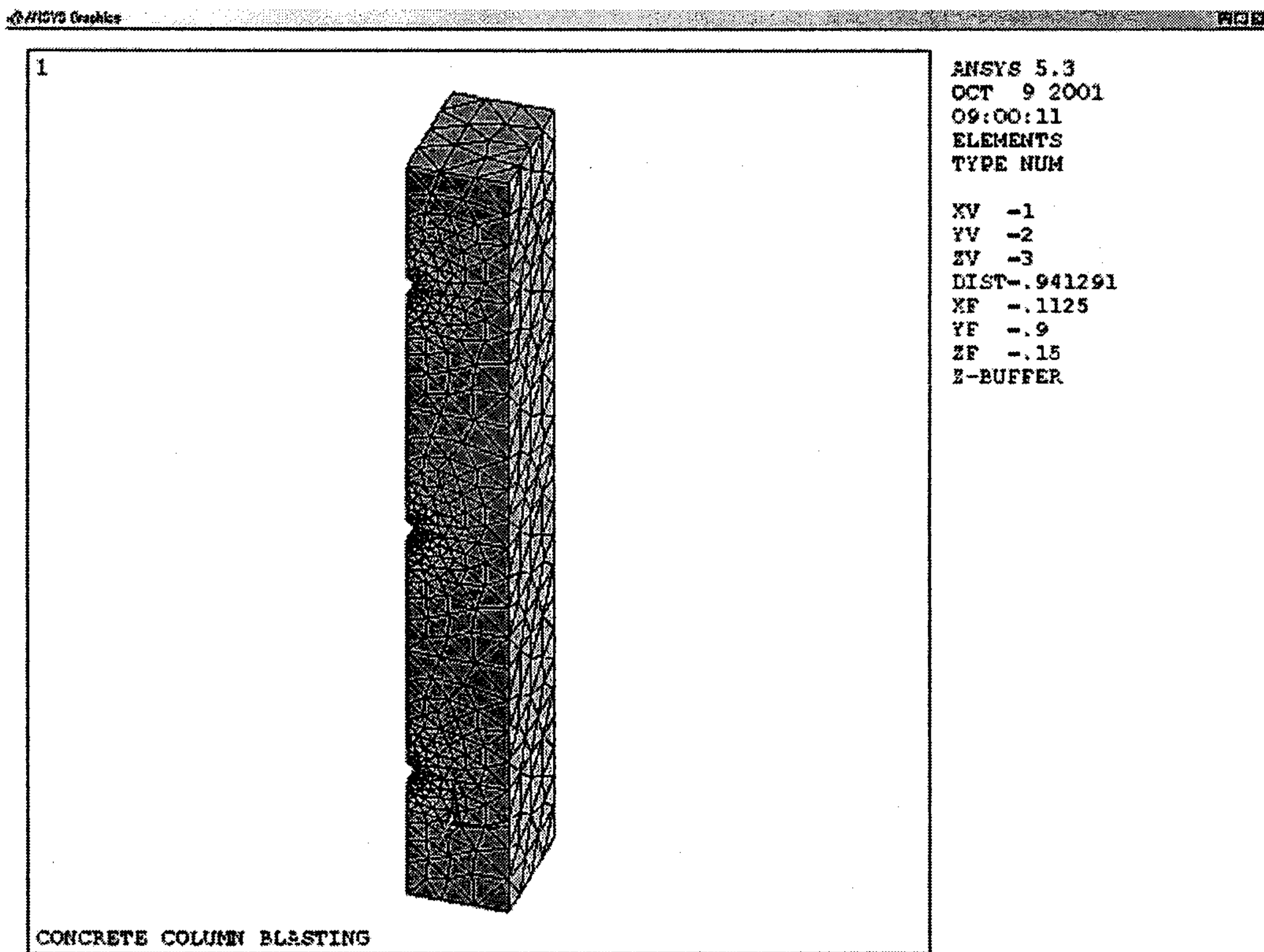


Fig 3.2.2.1 기둥 요소망 (절점수 79,65개, 요소수 34,339개)

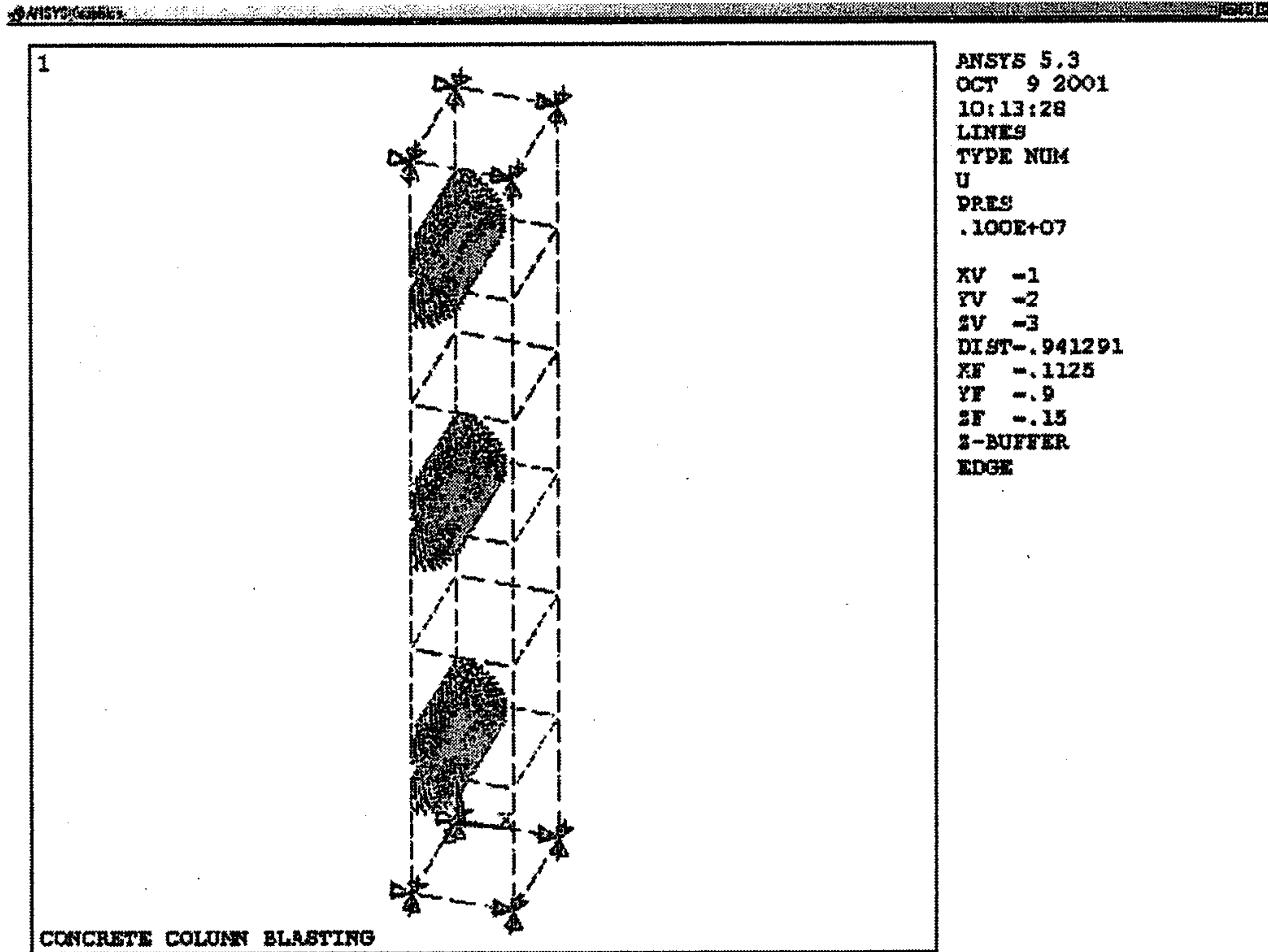


Fig. 3.2.2.3 구속조건 및 경계조건

수치 해석에서 발파공 벽면에 가해지는 발파 압력을 계산하기 위하여 식(3.2.2.1) 및 (3.2.2.2)를 사용하였다.(Persson, 1993; U.S.A National Highway Institute NHI, 1991)

발파 압력은 공 중심으로부터 공 벽면에 수직인 방향으로 작용하도록 하였으며, 삼각파의 형태로 하였으며, 최대 압력까지의 도달 시간은 0.01초로 하였다.

$$P_D = \frac{4.18 \times 10^{-7} \times SGe \times V_e^2}{1 + 0.8 SGe} \quad (3.2.2.1)$$

$$P_B = P_D \times \left(\frac{d_c}{d_h} \right) \quad (3.2.2.2)$$

P_D = Detonation pressure (kbar)

SGe = specific gravity of the explosive

V_e = Detonation velocity (ft/sec)

P_B = decoupled detonation pressure (kbar)

d_c = charge diameter

d_h = borehole diameter

실험에 사용한 질산암모늄(Ammonium Nitrate) 폭약의 주요 특성은 Table 3.2.2.2와 같다.

Table 3.2.2.2 폭약 특성

폭 약 직 경	32 mm
밀 도	0.95-1.1 g/cm ³
폭 속	3286 m/sec

실제 발파 조건과 유사한 결과를 모사하기 위하여 수치 실험에서 적절한 모델 구성과 응력 및 구속 조건 등 세 가지 조건을 바꾸어 주며 기둥 발파 수치 해석을 실시하였다.

첫 번째 조건은 적정 장약량을 구하기 위하여 발파 압력을 계산식 (3.2.2.1), (3.2.2.2)를 이용하여 계산하고, 균열이 공 벽면으로부터 개시하여 점차 확장되어 기둥의 경계면에 다다를 때의 압력을 구하고 이를 적정 장약량으로 결정하였다.

두 번째 조건은 건축물 구조의 일부분인 기둥은 상층부를 지지하며, 수직 하중이 상부면에 가해지는 형태이므로 기둥에 하중이 가해질 경우와 기둥에 하중이 가해지지 않는 경우의 발파에 대하여 기둥 내 응력분포 및 균열과 변형 거동 해석을 실시하였다.

세 번째 조건은 발파 압력은 전색장을 제외한 발파공 일부분에 가해지지만 모델 구성의 어려움 등으로 인하여 이를 3차원으로 해석한 연구는 거의 없으므로 발파공 전체에 압력이 작용하는 경우와 공의 일부에 압력이 작용하는 경우에 대하여 해석을 하고 비교하였다. Fig. 3.2.2.4는 발파공 일부에 작용하는 발파압력과 구속 조건을 나타낸 것이다.

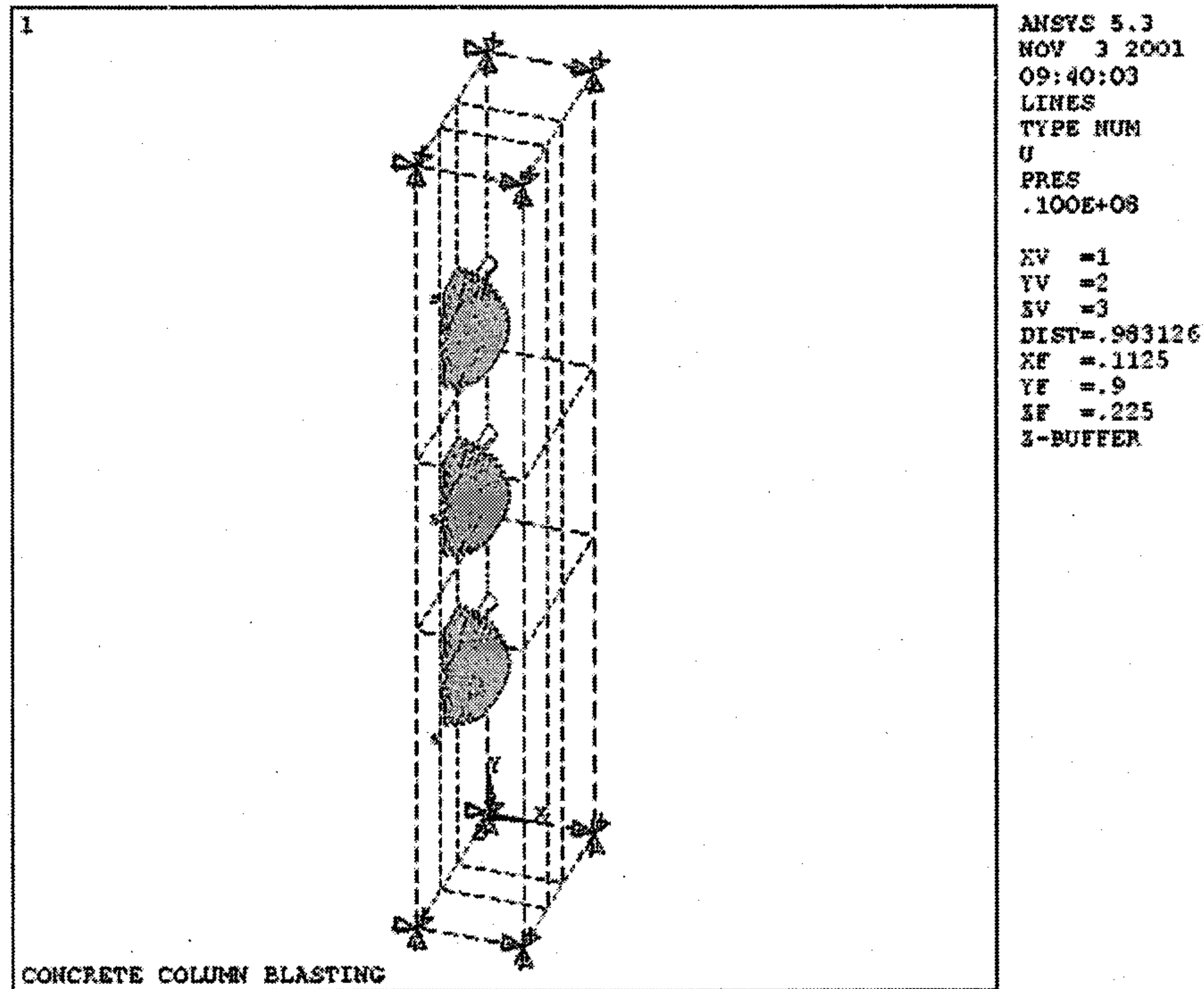


Fig. 3.2.2.4 공벽 일부에 발파압력이 작용할 경우의 구속조건 및 경계조건

다. 해석 결과 및 고찰

기둥 발파시 가장 효율적으로 기둥을 파괴할 수 있는 기준이 될 수 있는 적정 장약량에 대하여 수치 실험으로 검증하였다. 본 연구에 사용된 탄소성 해석 모델은 각 요소의 적분점(integration point, Gauss point)에서 계산된 주응력 중 최대 주응력의 크기가 인장 강도보다 클 경우 cracking이 발생하며, 주응력 중 최소 주응력의 크기가 압축 강도 이상일 경우에는 crushing이 발생한다.

라. 장약량

식 (3.2.2.1), (3.2.2.2)를 이용하여 계산된 발파 압력을 해석의 입력 변수로 사용하였다. 발파 압력의 크기를 변화 시키며 기둥 내 균열의 전파 정도를 확인하여 기둥을 파괴할 수 있는 발파 압력을 확인한 후 그에 해당하는 장약량을 계산하는 역산 방법으로 장약량을 검증하였다.

해석 결과 기둥 내에서 공 벽면에 작용하는 발파압력에 의해 발파공 주변에서 응력이 집중되어 균열이 발생하기 시작하였으며, 발생된 균열은 기둥의 경계면으로 성장하였으며, 발파압력이 110 MPa 이상일 경우 발파공 주변에서 발생한 균열이 성장하여 기둥을 벗어나며 해석을 수행할 수 없었다. 발파 압력의 계산식에 의하면 110 MPa은 장약량 약 57g이었다. Gustafsson은 보강 콘크리트 기둥 발파에서 60g

을 적정 장약량으로 제시하였으며, 수치 해석 결과와 근사한 값을 보이며, 장약량 60g은 발파압력 계산식으로 계산할 경우 115 MPa의 발파 압력으로 계산된다.

또한 실제 실험결과 발파 공당 57g의 장약량을 사용하여 기둥을 파괴 하였으며, 공당 장약량 57g은 수치해석 결과와 같은 장약량이었다.(류창하 외, 1995)

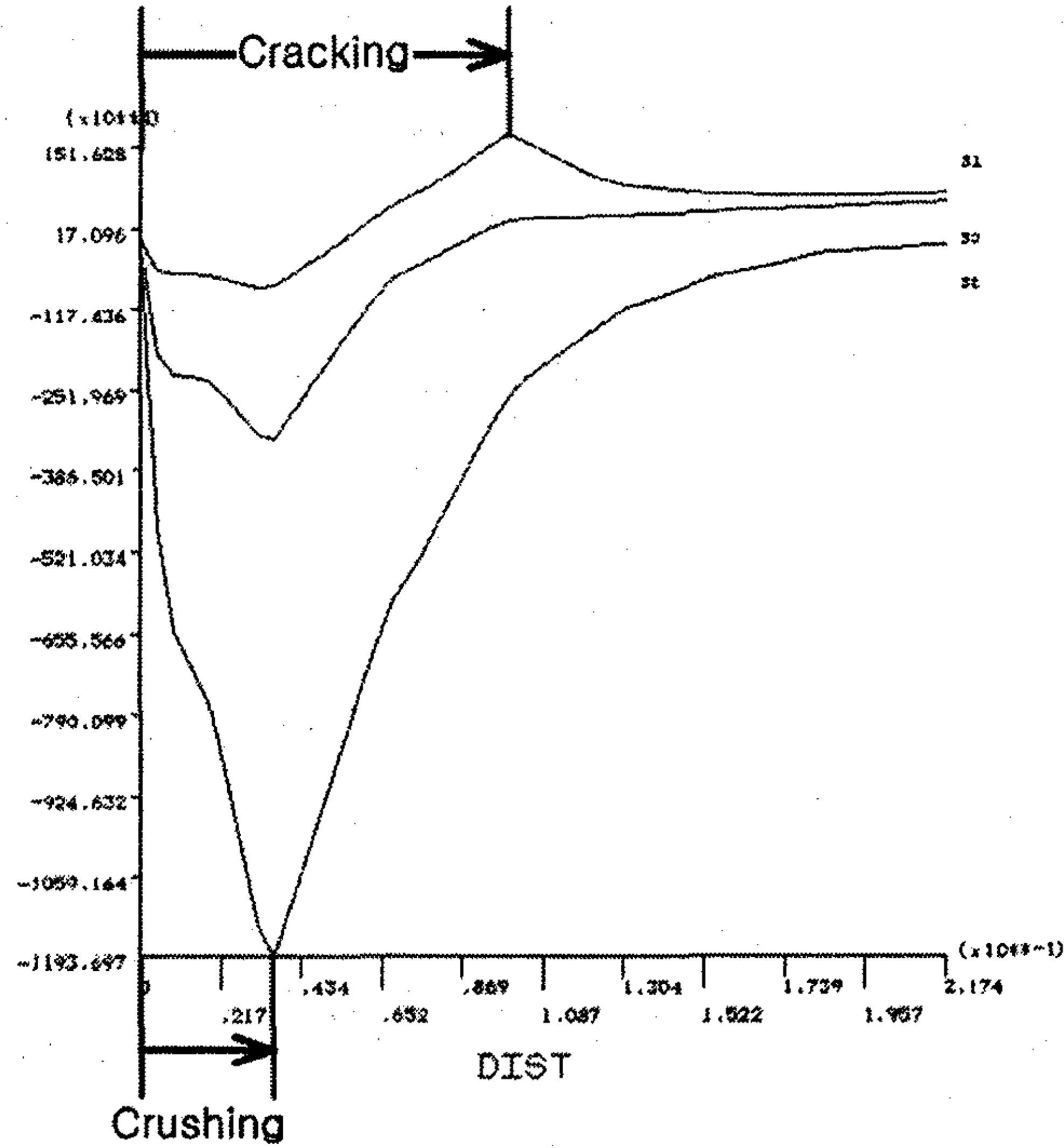


Fig. 3.2.2.5 발파공 주위의 주응력 수준

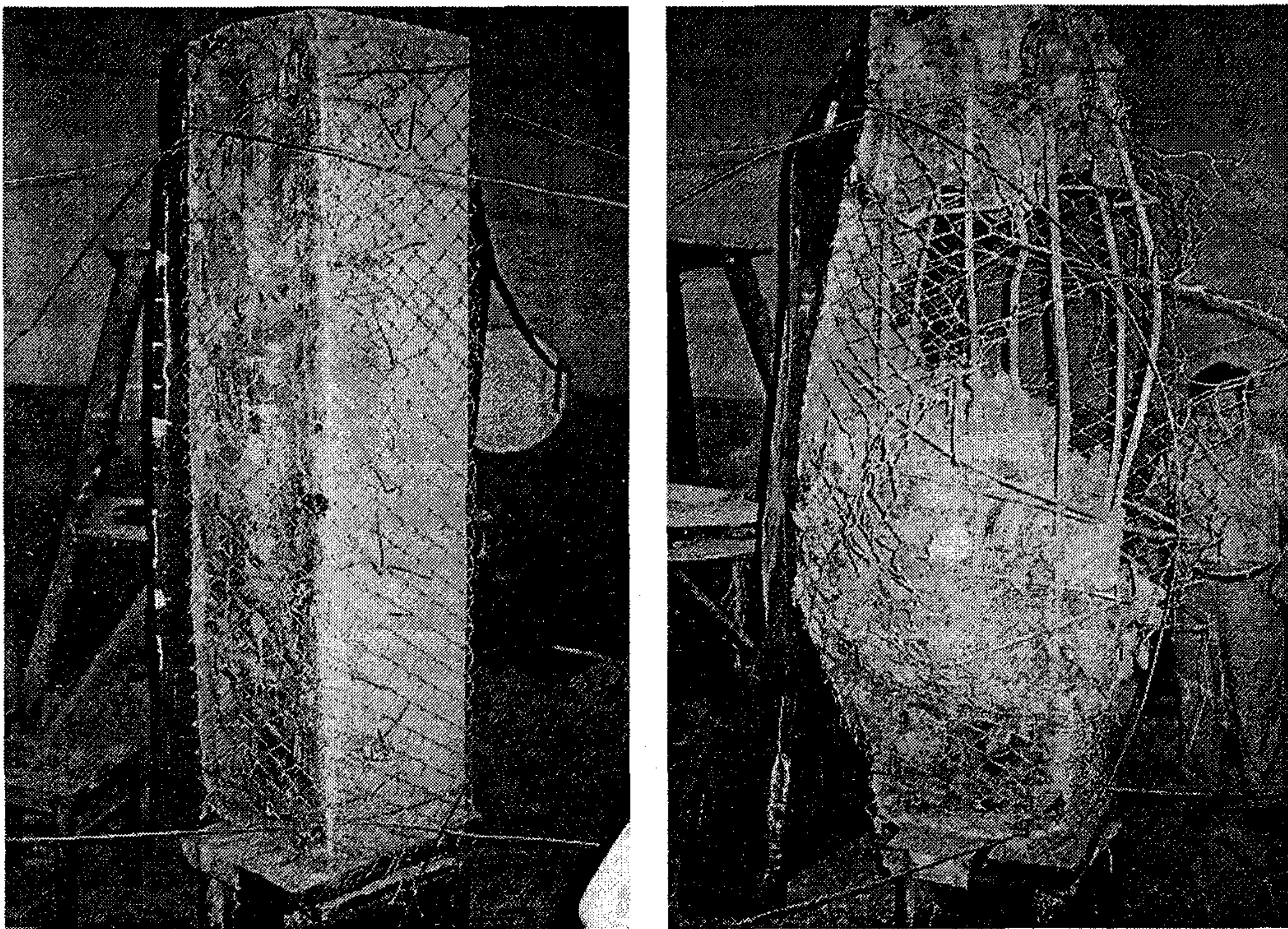


Fig. 3.2.2.6 실물 크기의 콘크리트 기둥 시험에 대한 결과

다. 상재 하중이 작용할 경우 적정 장약량

구조물내의 기둥에는 상부 구조물 등으로 인해 기둥 상부에 하중이 작용하게 된다. 상부면에 작용하는 하중의 영향을 알아보기 위하여 하중이 작용하고 있을 경우와 하중이 작용하지 않을 경우에 대하여 수치 해석을 실시하였다.

해석결과 기둥 상부 면에 10 MPa의 하중이 작용할 경우 96 MPa이상의 발파압력에서 기둥의 외부 경계면으로 균열이 전파되었으며, 이 발파 압력을 역산하여 장약량을 계산하면 장약량은 50g이 되므로 기둥에 하중이 작용할 경우 장약량은 50g으로 판단할 수 있다.

기둥에 상부로부터 하중이 작용하고 있을 경우 Gustafsson이 제시한 적정 장약량보다 적은 장약량으로도 기둥을 파괴시킬 수 있음을 나타낸다. Gustafsson이 제시한 적정 장약량 60g 보다 약 20% 작은 50g의 장약량으로도 기둥을 파괴할 수 있다고 판단된다.

Fig. 3.2.2.7은 해석결과를 나타낸 것이다. 상부로부터 가해지는 하중의 영향으로 공벽 주변의 응력 등고선이 매우 복잡한 형태로 나타나는 것을 알 수 있다.

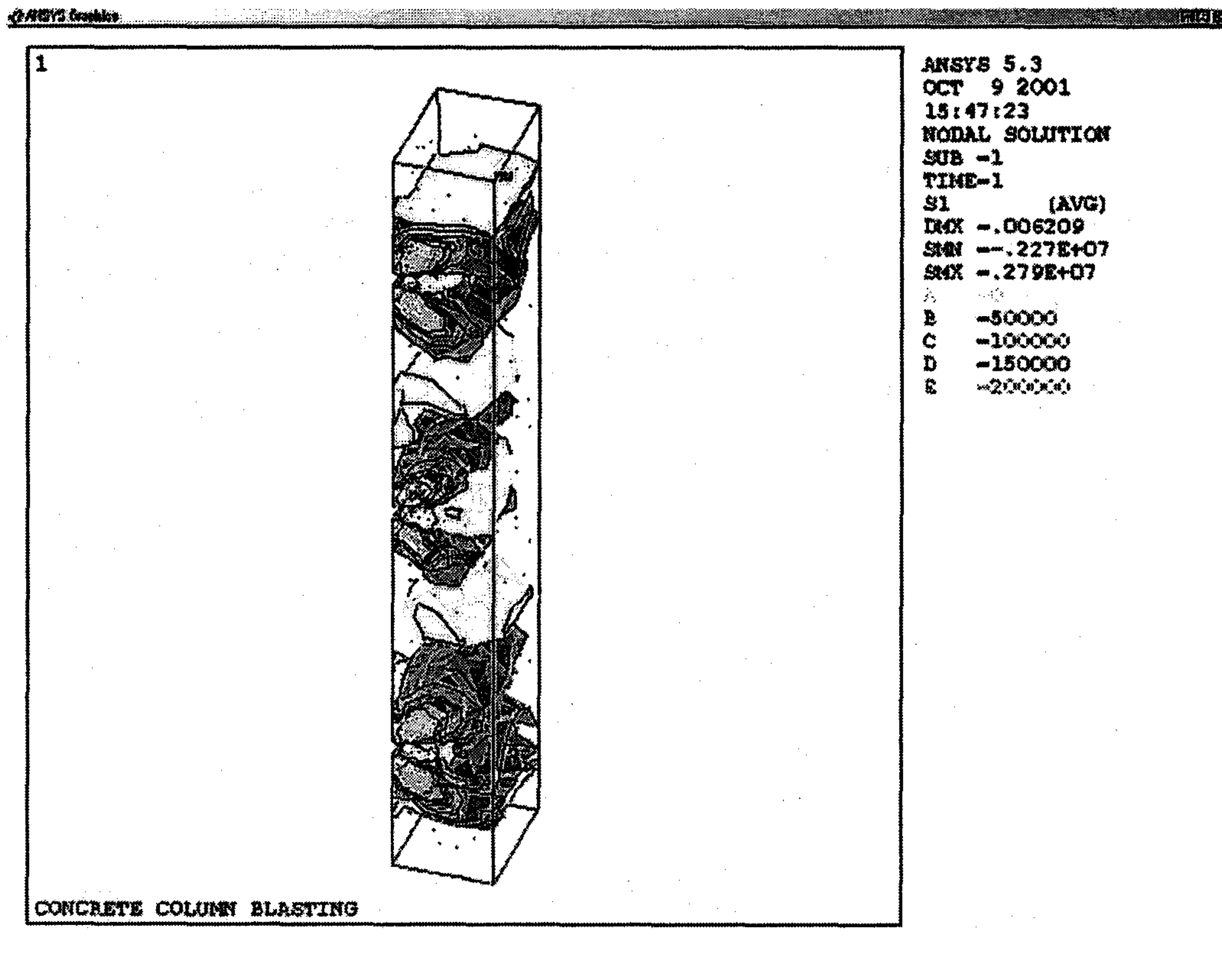
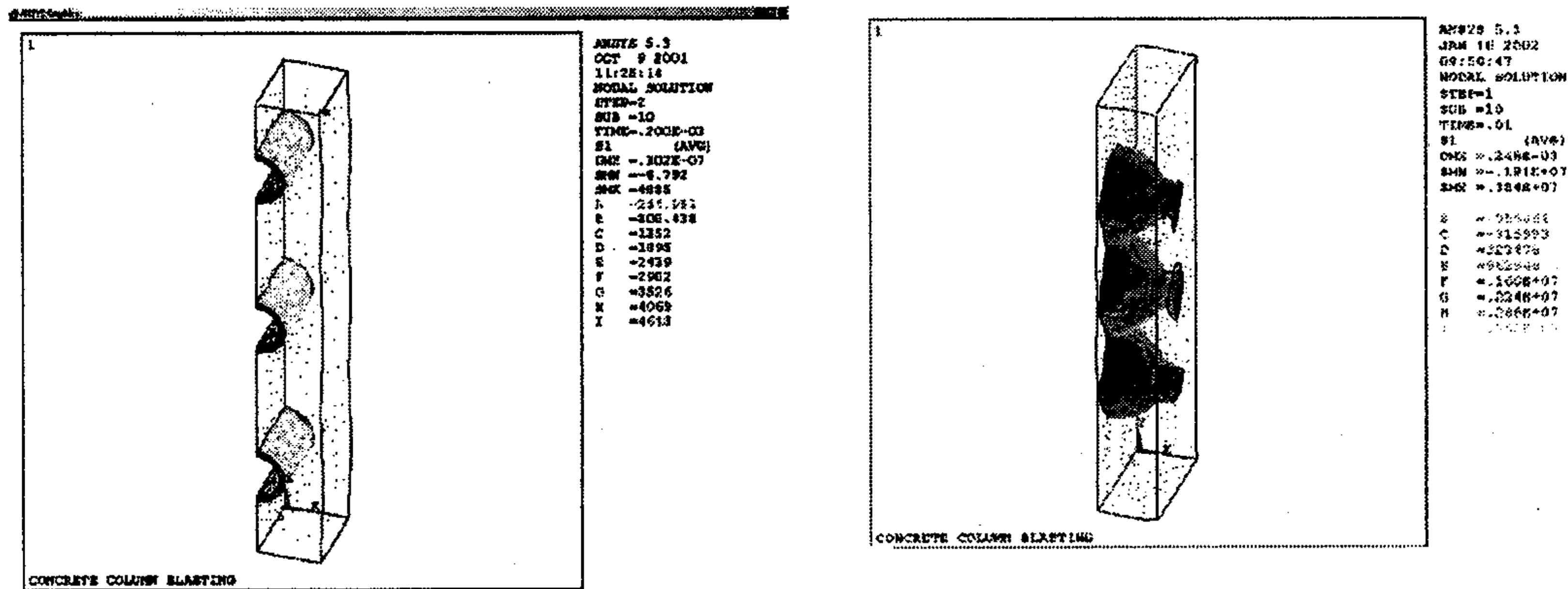


Fig. 3.2.2.7 상부에 하중이 작용할 경우의 응력 등고선

바. 발파압력이 공 일부에 작용할 경우의 적정 장약량

모델링의 어려움 등으로 인하여 실제 발파 거동과는 다른 2차원 평면 변형을 상태로 해석하였을 경우와 3차원으로 해석하였을 경우의 변형거동 및 응력분포 특성을 알아보기 위하여 공저부터 공 입구까지 발파공 전체에 발파압력이 작용한 경우와 공저부터 공 입구방향으로 10 cm의 장약 부분에만 발파 압력이 작용할 경우에 대하여 수치해석을 실시하였다.

Fig. 3.2.2.8은 발파공 전체에 발파압력이 작용하는 경우와 발파공 일부에 작용하는 경우의 해석 결과를 응력 등고선으로 나타낸 것이다.



(a) 공벽 전체에 압력이 가해질 경우 (b) 공벽 일부에 압력이 가해질 경우

Fig. 3.2.2.8 해석 결과 (응력 등고선)

발파공 전체에 발파 압력이 작용할 경우, 응력 분포는 발파공과 평행한 실린더 형태의 응력이 분포하였으며, 발파공에서 전색장을 제외한 장약부분에 발파 압력이 작용하는 경우에는 공내 압력이 작용하는 부분을 중심으로 하는 구형의 형태로 응력 등고선이 분포되는 것을 알 수 있었다.

발파공의 일부에 압력이 작용하는 경우 86 MPa 이상의 압력일 경우 균열이 기둥의 경계면까지 전파되었으며, 86 MPa의 압력은 장약량 45g이 된다. 그러므로 실제 기둥을 파괴하기 위한 적정 장약량은 45g으로 판단할 수 있다.

기둥 발파를 모사하기 위하여 2차원 평면 변형의 상태 또는 3차원 해석의 경우 공이 기둥을 관통된 형태로 수치해석을 실시하였으나, 실제 기둥 발파의 경우 공이 기둥을 관통한 형태가 아니며, 폭약의 폭굉압이 작용하는 범위 역시 공의 일부분이므로 이를 정확하게 묘사하기 위해서는 발파공 일부분에 발파압력이 작용하는 형태의 해석이 타당하다고 판단된다.

사. 요약

기둥 발파시 기둥과 발파공 주변의 응력 분포 및 균열면 발생 및 전파 양상을 확인하여 적정 장약량을 구하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 실제 발파 조건과 유사한 조건을 모사하기 위하여 여러 경계조건들을 바꾸어주며 적정 장약량을 구하였다. 여러 경계조건들에 따른 해석 결과들을 요약 정리하면 다음과 같다.

1) 발파압력이 110 MPa 이상일 경우 발파공 주변에서 발생한 균열이 기둥의 경계면까지 성장하여 기둥이 파괴되었다. 발파 압력의 계산식에 의하면 110 MPa은 장약량 약 57g으로 Gustafsson이 제시한 보강 콘크리트 기둥 발파의 적정 장약량 60g과 근사함을 알 수 있다. 또한 실제 실험결과 발파 공당 57g의 장약량을 사용하여 기둥을 파괴 하였으며, 공당 장약량 57g은 수치해석의 해석결과와 같은 장약량 이므로 수치 해석에서 구해진 57g과 동일한 장약량이었다.

2) 해석결과 기둥 상부 면에 10 MPa의 하중이 작용할 경우 96 MPa이상의 발파 압력에서 기둥의 외부 경계면으로 균열이 전파되었으며, 이 발파 압력을 역산하여 장약량을 계산하면 장약량은 50g이 된다. 기둥의 상부면에 하중이 작용할 경우 기둥을 파괴하는데 필요한 장약량은 50g으로 판단할 수 있다. 기둥에 상부로부터 하중이 작용하고 있을 경우 Gustafsson이 제시한 장약량 60g 보다 약 20% 작은 50g의 장약량으로도 기둥을 파괴할 수 있다고 판단된다.

3) 발파공 전체에 발파 압력이 작용할 경우, 응력 분포는 발파공과 평행한 실린더 형태의 응력이 분포하였으며, 발파공에서 전색장을 제외한 장약부분에 발파 압력이 작용하는 경우에는 공내 압력이 작용하는 부분을 중심으로 하는 구형의 형태로 동일한 크기의 응력이 분포되는 것을 알 수 있었다. 발파공의 일부에 발파압력이 작용하는 경우 86 MPa 이상의 압력에서 균열이 기둥의 경계면까지 전파되었으며, 86 MPa의 압력은 장약량 45g이 된다. 실제 기둥의 발파시 필요한 적정 장약량은 45g으로 판단할 수 있다.

3. 유한차분법을 이용한 발파 모델링

가. 개요

제어발파 설계변수 분석을 위한 연속체 해석은 지반공학적 문제 해석에 널리 사용되고 있는 수치해석 프로그램인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)의 dynamic option을 이용하여 수행하였다. FLAC은 ITASCA Consulting Group에서 개발한 유한차분 해석프로그램으로서 소성변형을 하는 지반 및 구조물의 거동을 모형화하고 해석하기 위한 프로그램이다. FLAC에서는 다층구조의 지반과 동역학적 지반-구조물의 상호작용을 위해 explicit 기법과 비선형 모델을 사용한다. 해석 대상은 격자로 구분되어진 요소로서 구성되어지고, 각각의 요소는 선형 또는 비선형의 응력-변형률 관계를 가해진 하중과 경계조건하에서 계산한다(Itasca, 1995).

FLAC은 동적해석 기능을 가지고 있으므로 발파나 지진 등 외부에서의 동적하중이 가해지는 문제에서 해석을 수행할 수 있다. FLAC을 사용하여 동적해석을 수행하기 위해서는 외부하중과 경계조건, 지반의 감쇠비, 해석모형에서의 파의 전파에 대한 고려가 있어야 한다. Fig. 3.2.3.1은 본 해석에서 적용된 동적 입력치와 Quiet boundary를 도식적으로 나타내고 있다. 발파공의 내부에서 발파가 일어나며 자유면이 없는 상태를 가정하였으므로 모든 외부 경계를 감쇠경계인 Quiet boundary로 설정하였다.

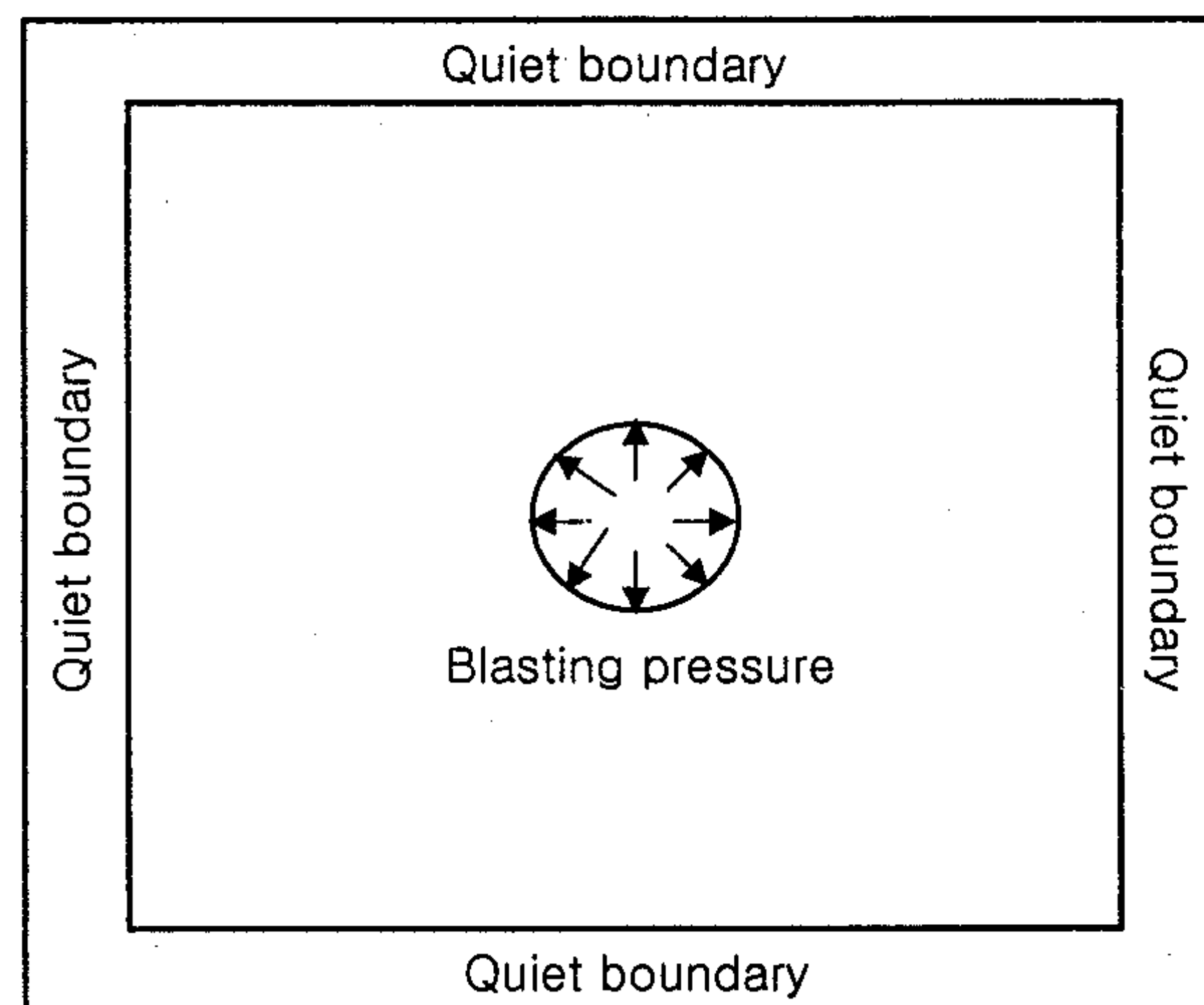


Fig. 3.2.3.1 동적해석을 위한 경계 조건 모식도

본 해석에서는 지반 조건이나 발파 특성 등 제어발파의 설계 변수들이 발파에 미치는 영향에 대하여 해석하였다. 지반 조건 및 발파압의 파형에 의한 영향을 해석

하기 위해서는 단일공 모델을 사용하였고, 공간격이나 시차 등의 발파 특성이 미치는 영향을 해석하기 위해서는 두 개의 발파공이 있는 모델을 구성하였다. Table 3.2.3.1에 본 해석에 이용된 지반 및 발파특성의 입력변수가 요약되어 있다.

Table 3.2.3.1 연속체 해석 사례

	발파압력	폭약종류, 감쇠특성
Single Hole	지반물성	탄성계수, 포아송비, 마찰각, 점착력, 밀도
	초기지압	심도, 축압계수
	시차	0, 2, 5, 10 ms
Double Hole	공간격	0.5, 0.75, 1.0 m

나. 입력 발파파형의 산정

일반적으로 발파를 모사하기 위한 수치해석의 경우 발파압력이 공벽에 수직한 반경방향으로 가해지도록 작용시킨다. 본 해석에 사용된 발파압력은 Liu and Tidman 이 이론적 모델을 기초로 하여 구성한 경험식을 이용하였으며(Liu and Tidman, 1995), 이는 식 3.2.3.1과 같다. 이 반경험식(semi-empirical equation)을 이용하면 폭약과 암반의 물성에 따라 발파공에 작용하는 최대압력을 계산할 수 있으며, 또한 시간에 따른 감쇠 정도를 반영하기 위해 식 3.2.3.2로 표현되는 감쇠함수(decay function)를 적용하였다.

$$P = P_m \left(\frac{R}{R_0} \right)^\alpha$$

$$P_m = 1.62 (\rho_0 D^2) \left(\frac{\rho_r \times C}{\rho_0 \times D} \right)^{0.25} \quad (3.2.3.1)$$

$$\alpha = -1.54 \left(\frac{C}{D} \right)^{-0.33}$$

$$F_{decay} = \exp\left(1 - \frac{t}{t_0}\right) \times \frac{t}{t_0} \quad (3.2.3.2)$$

여기서, P_m 은 발파공 최대압력(kbar), α 는 압력감쇠계수이며 R_0 는 발파공의 반지름이다. ρ_0 , ρ_r 은 각각 폭약과 암석의 밀도(g/cm^3)이며 C 는 암석의 탄성과 속도(km/s), D 는 폭약의 폭굉속도(km/s)이다.

본 해석에서는 기본적으로 화강암($\rho_r=2.70 \text{ g/cm}^3$, $C=4.82 \text{ km/s}$)에 굴착된 직경 100 mm의 발파공에서 Gelatine dynamite($\rho_0=1.59 \text{ g/cm}^3$, $D=4.3 \text{ km/s}$)를 사용하여 발파할 때 발생하는 압력을 적용하였으며, 폭약 종류에 따른 영향을 분석하기 위해서는 세 가지 각기 다른 폭약의 파형을 입력하였다.

Fig. 3.2.3.2, 3.2.3.3은 각각 폭약 및 암석 종류에 따른 발파압력을 나타내고 있다.

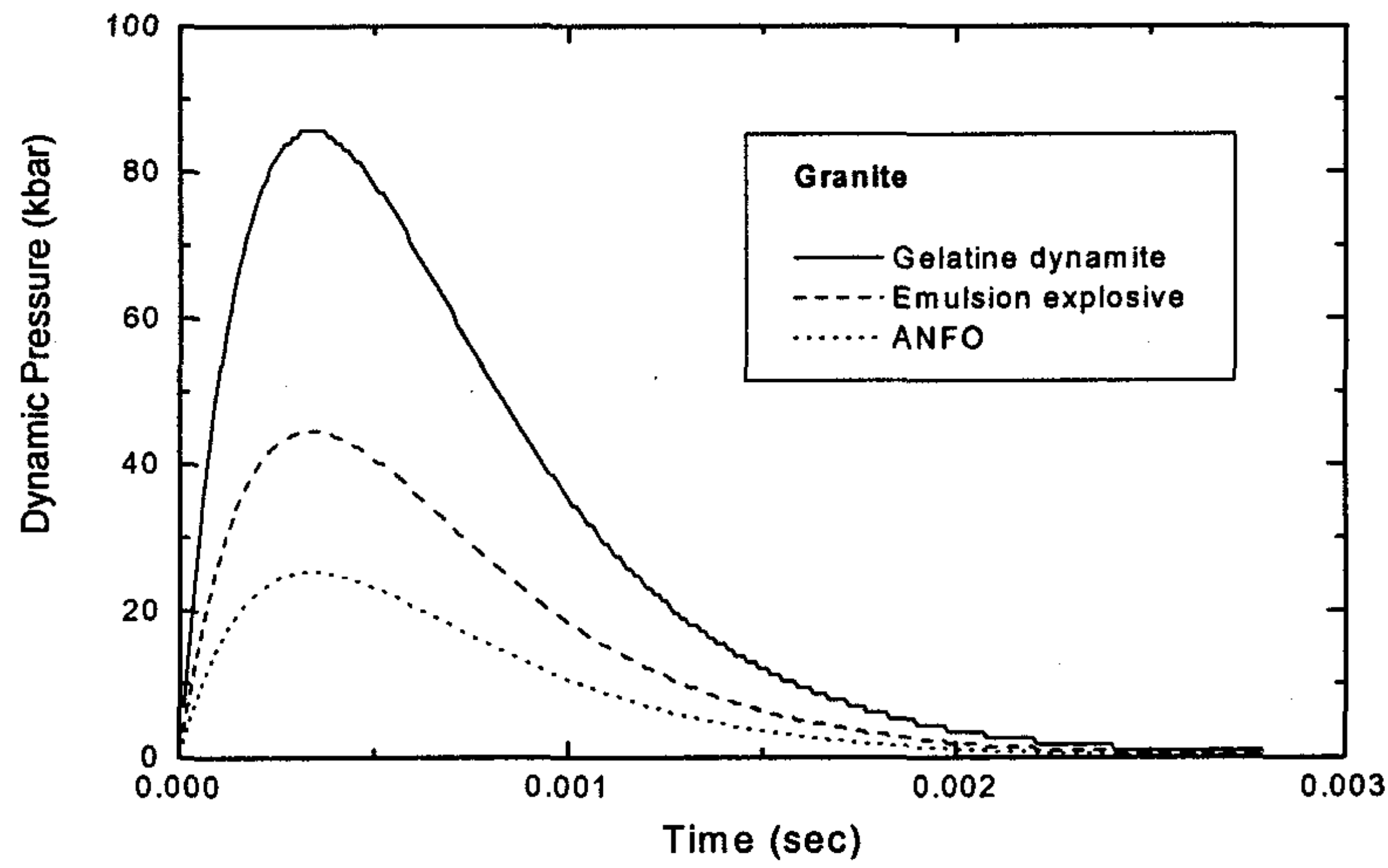


Fig. 3.2.3.2 폭약 종류별 발파압력

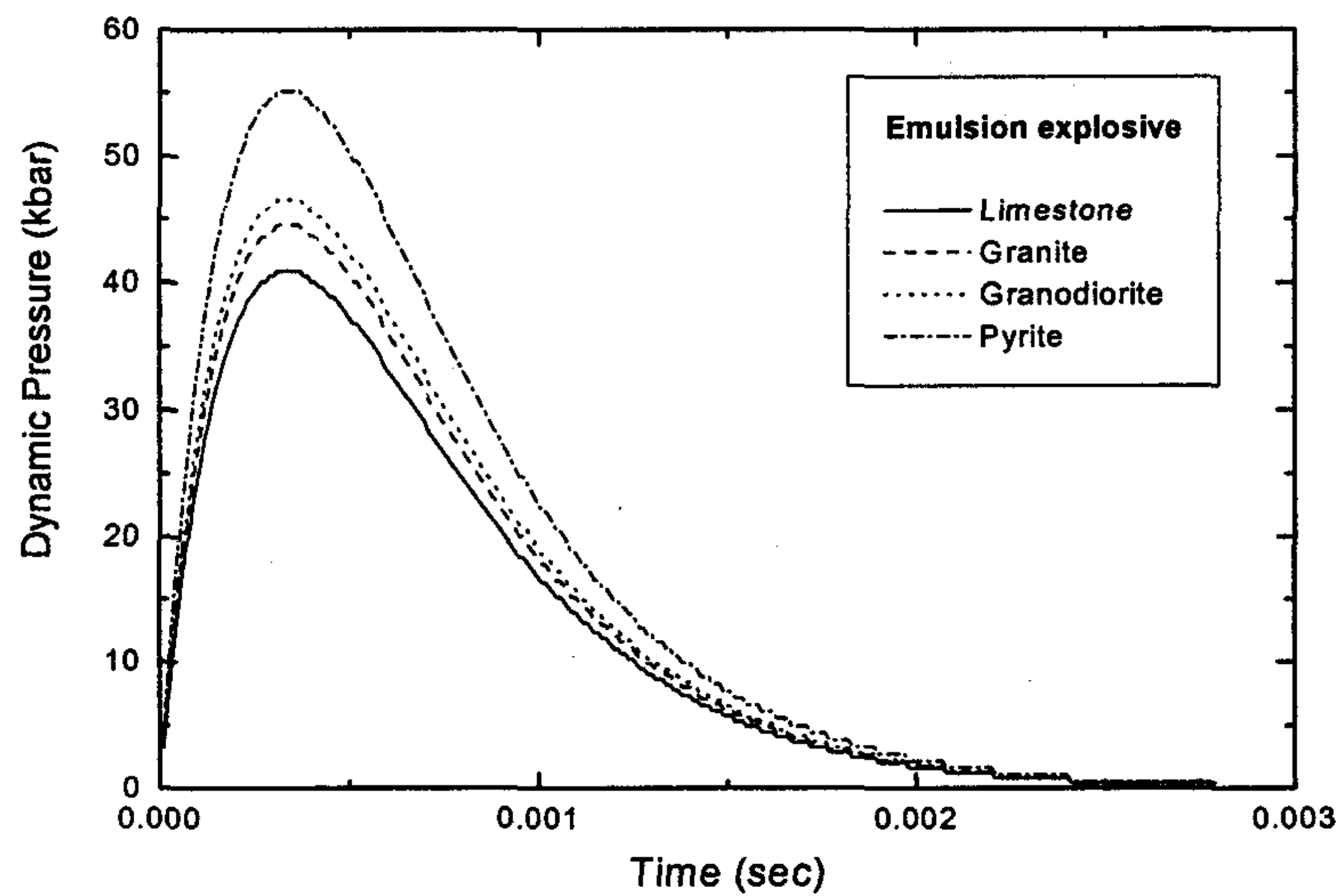


Fig. 3.2.3.3 암석 종류별 발파압력

다. 단일공을 이용한 지반조건 및 발파 파형의 영향 분석

(1) 해석모델

지반조건 및 발파 파형의 영향을 알아보기 위해 구성한 단일공 모델은 Fig. 3.2.3.4와 같다. 해석상의 편의를 위해 원형 발파공의 대칭성을 이용하여 사분면만을 해석단면으로 설정하였다. 대칭면은 롤러경계조건을 사용하여 고정하였고, 외부 감쇠경계면에는 초기지압이 작용하고 있다. 해석단면의 가로, 세로 길이는 2 m이며, 발파공의 반지름은 5 cm로 하였다. 한편, 구성모델은 소성 해석이 가능하며 점착력과 마찰각의 영향을 검토하기 위해 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였다.

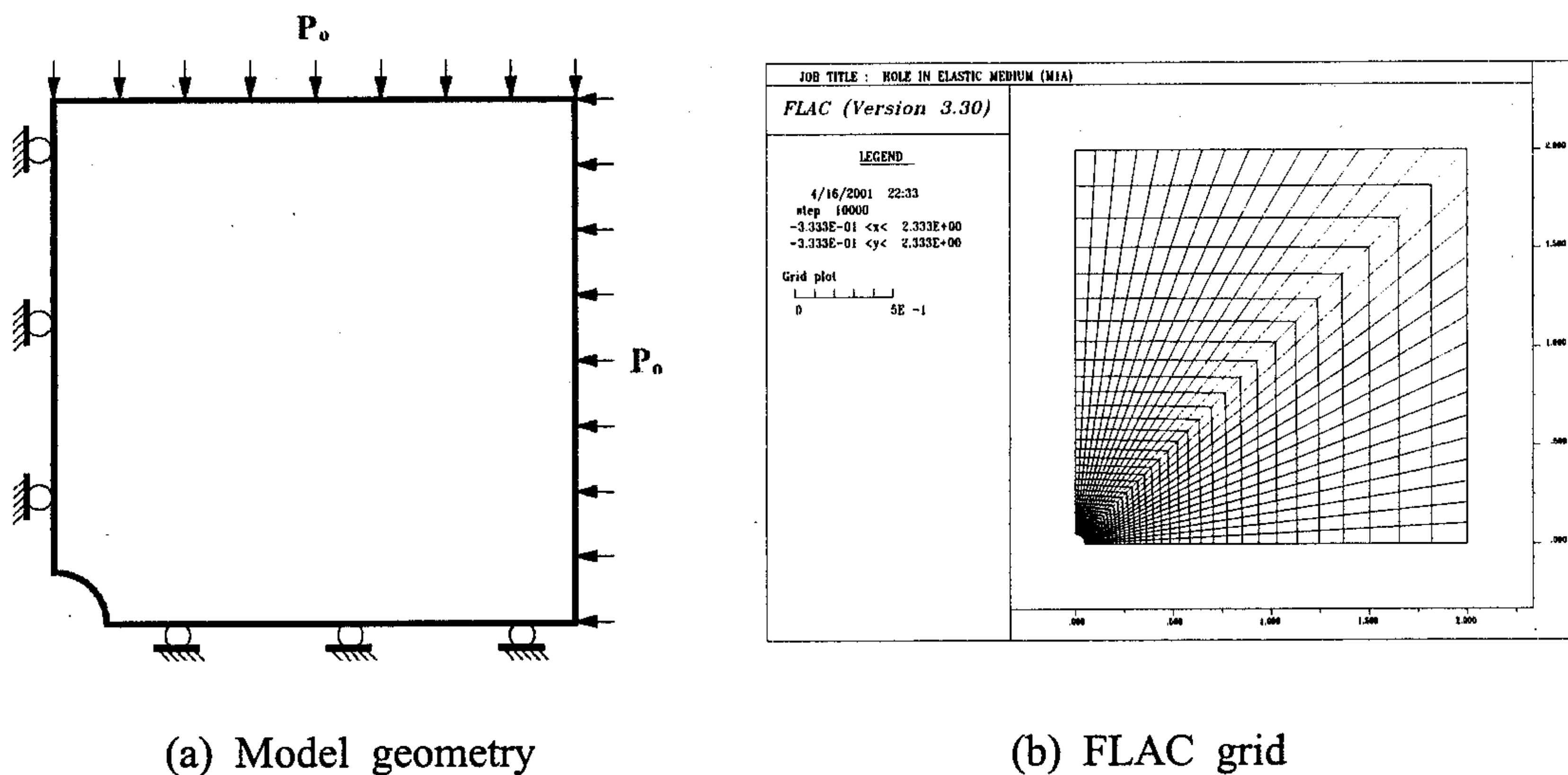


Fig. 3.2.3.4 단일공 모델의 해석 단면

(2) 입력변수

Mohr-Coulomb 모델에 적용되는 지반 물성치인 탄성계수(E), 포아송비(ν), 점착력(C), 마찰각(ϕ), 밀도(ρ) 등을 변화시켜가며 각 변수들이 발파에 미치는 영향에 대한 해석을 수행하였다. 지반 물성 변수들은 여러 문헌 및 현장 자료들을 참고하여 결정하였으며, 적용된 변수의 범위가 Table 3.2.3.2에 제시되어 있다. 해석결과와의 비교를 용이하게 하기 위하여 특정 변수에 대한 분석 시 그 외의 변수들은 일정한 값으로 고정하였으며 그 기준이 되는 값은 Table 3.2.3.2의 첫 번째 열에 제시된 값이다.

Table 3.2.3.2 단일공 해석에 적용된 지반 물성값

	변수의 범위				
	20	10	5	2	0.6
탄성계수 (GPa)	20	10	5	2	0.6
밀도 (g/cm ³)	2.7	2.6	2.5	2.3	2.0
포아송비	0.18	0.20	0.24	0.27	0.30
점착력 (MPa)	1.5	1.0	0.8	0.5	0.1
마찰각 (°)	45	43	40	35	33

한편 초기지압조건의 변화에 따른 영향을 파악하기 위해 축압계수 K를 0.5, 1.0, 1.5로 변화시켜가며 해석하였고, 또한 심도가 100 m, 200 m, 500 m 일 때의 해석도 아울러 수행하여 지압조건이 발파에 미치는 영향을 분석하였다. 초기지압조건의 영향을 파악하기 위한 해석을 제외한 변수 분석에서는 축압계수 1.0, 해석 심도 200 m일 경우를 기본적인 조건으로 가정하였다.

발파 동하중의 감쇠를 모사하기 위해 Rayleigh 감쇠를 이용하였으며 감쇠계수는 지반에 대해 일반적인 5%를 적용하였다.

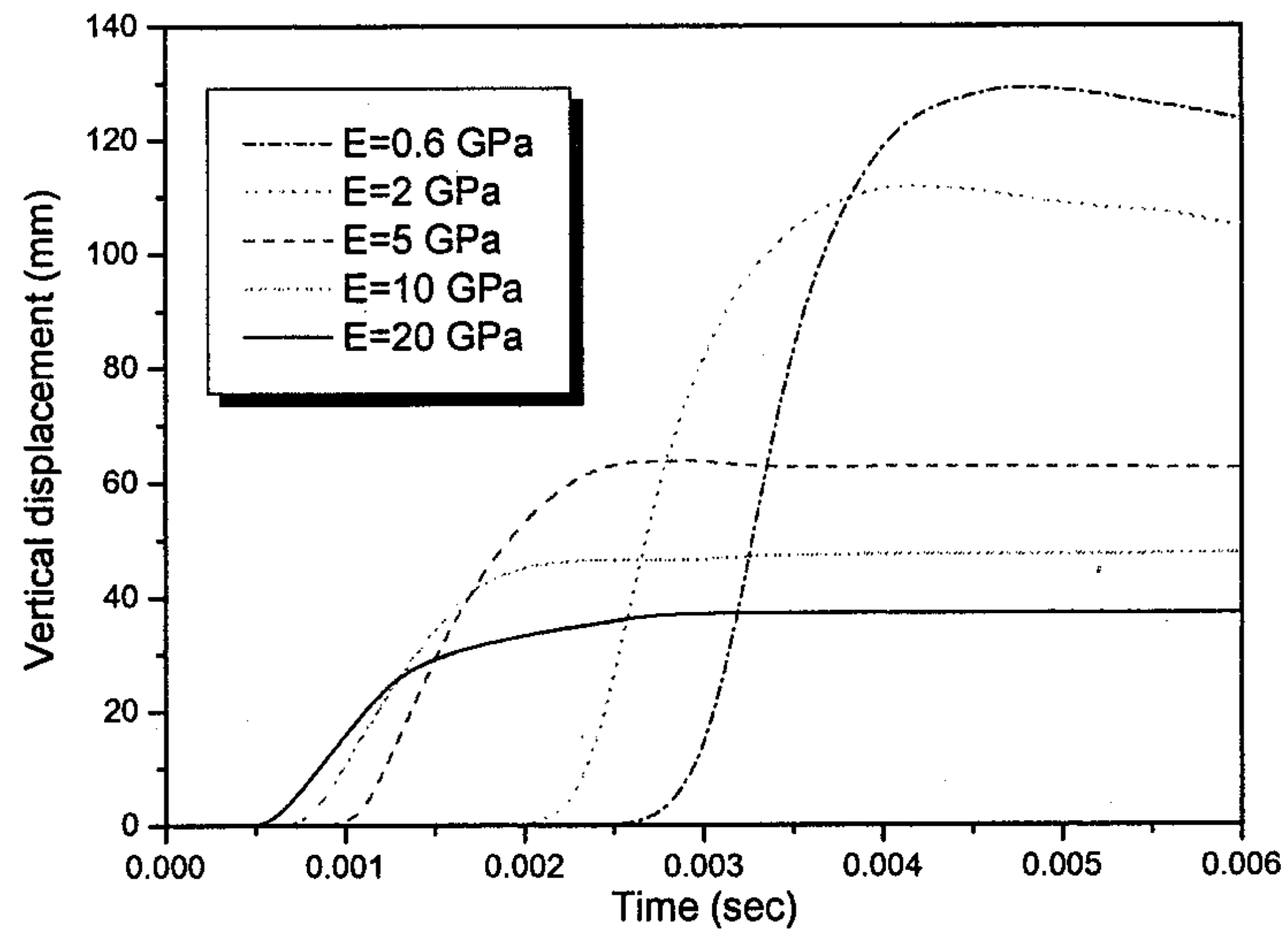
(3) 해석 결과

(가) 지반조건의 변화에 따른 영향

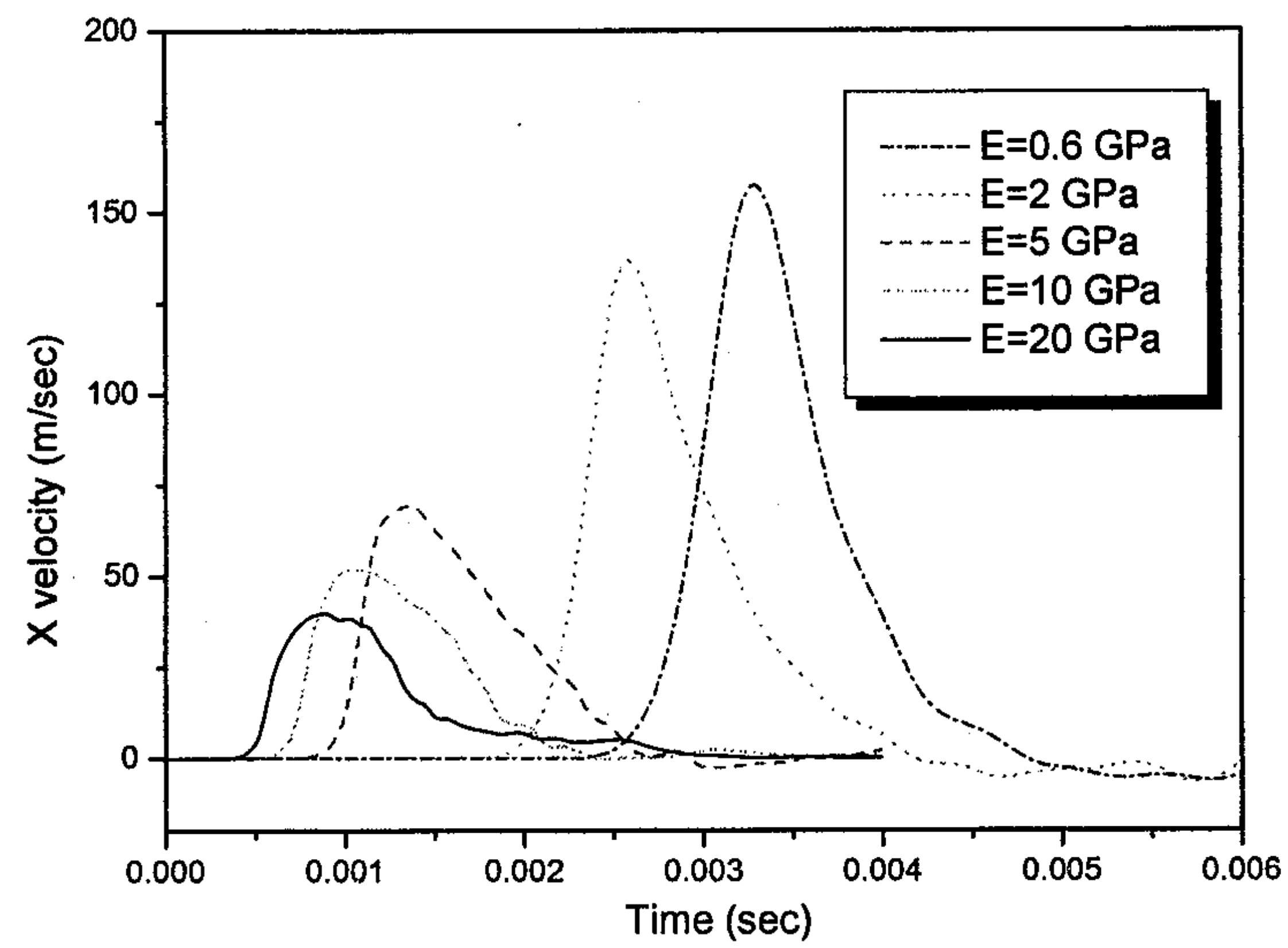
① 탄성계수의 변화에 따른 영향

모델의 탄성계수를 20 GPa에서 0.6 GPa까지 다섯 단계로 변화시켜가며 해석한 경우의 변위 및 입자속도 그래프가 아래의 Fig. 3.2.3.5에 도시되어있다. 측정지점은 발파공의 중심에서 x, y 방향으로 각각 1 m 떨어진 지점이다.

결과를 살펴보면 그래프에 도시된 바와 같이 탄성계수가 작아짐에 따라 발생 변위의 최대값이 증가하며 최대변위가 발생하는 시간은 대체적으로 길어짐을 알 수 있다. 입자 속도의 경우에도 변위와 같은 경향을 보인다. Table 3.2.3.3은 각 경우에 있어서의 최대변위와 최대속도를 정리한 결과이다.



(a) 수직 변위



(b) 입자 속도

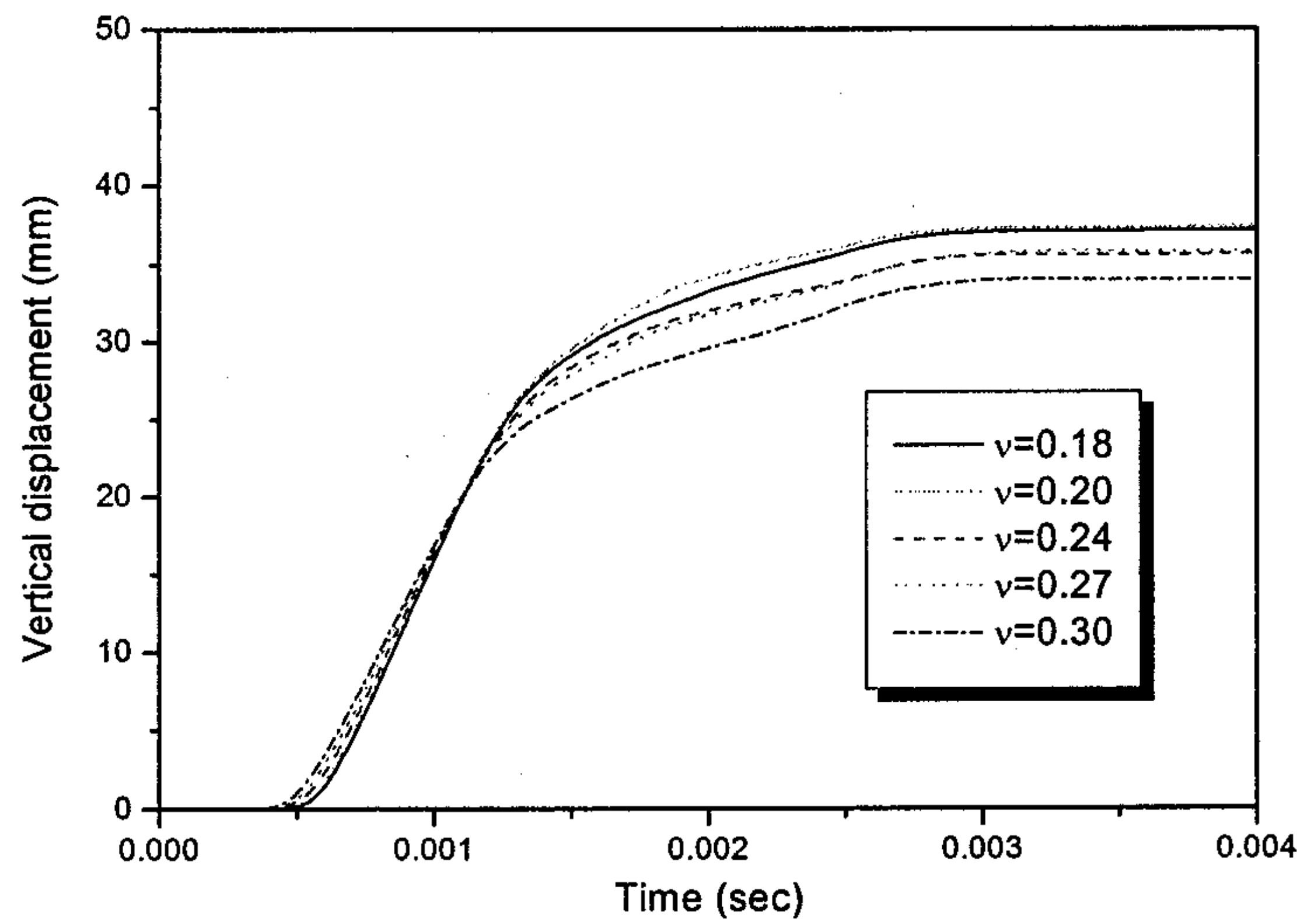
Fig. 3.2.3.5 탄성계수의 변화에 따른 변위 및 속도의 변화

Table 3.2.3.3 탄성계수의 변화에 따른 최대 변위 및 최대 입자속도

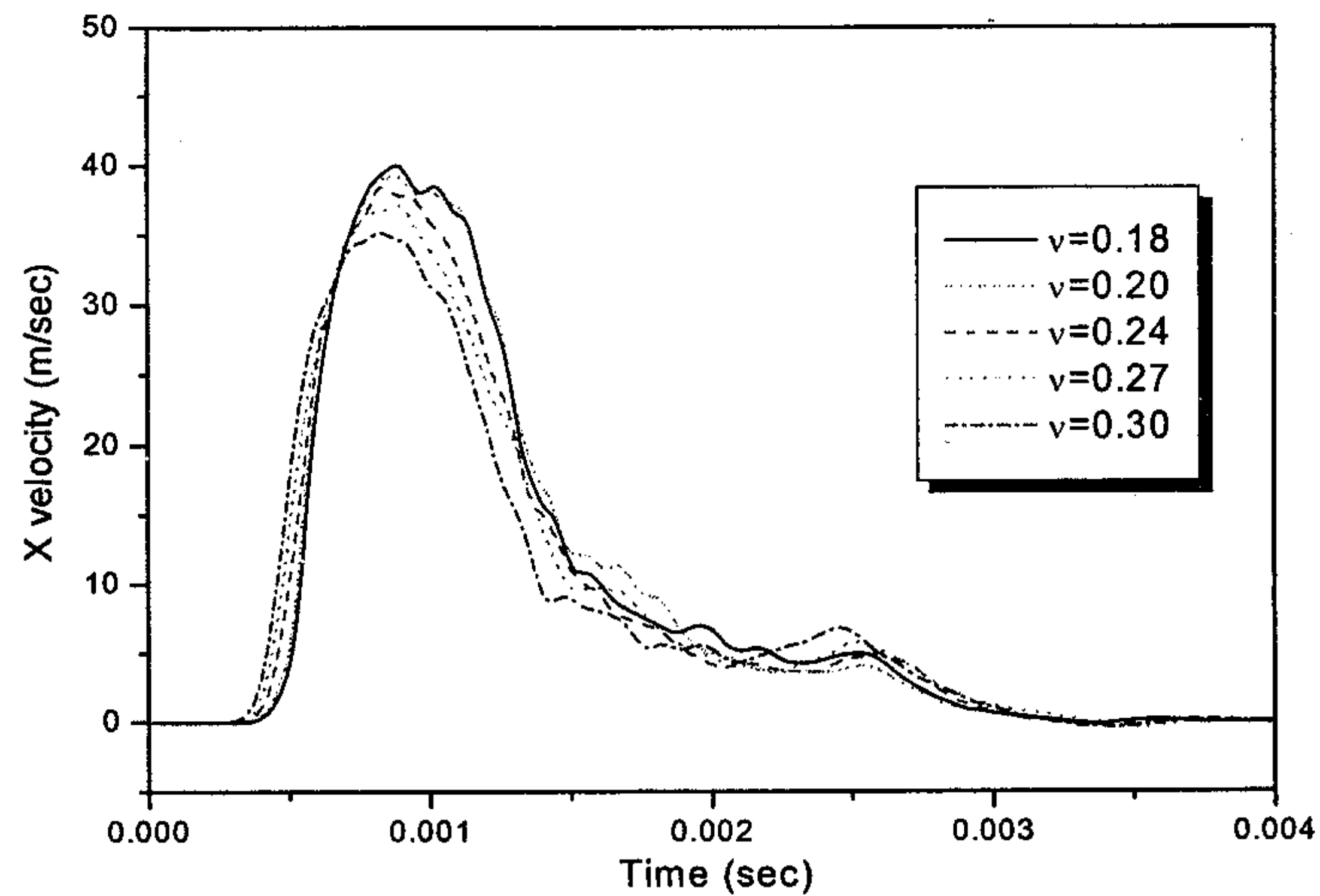
E(GPa)	0.6	2	5	10	20
결과					
최대변위 (mm)	129.1	111.7	63.8	47.5	37.1
최대속도 (m/sec)	157.3	136.5	69.5	51.9	40.0

② 포아송비의 변화에 따른 영향

다른 변수들은 일정하게 유지하면서 포아송비(ν)만을 0.18~0.30으로 변화시켜 해석한 결과의 그래프가 Fig. 3.2.3.6에 나타나 있다. 대체로 포아송비가 커질수록 발생 변위와 입자속도가 줄어드는 경향을 보이고 있으나 그 차이는 크지 않고 변위의 경우 일부 구간에서 반대의 결과를 나타내기도 하므로 포아송비에 의한 영향은 그다지 크지 않은 것으로 판단된다.



(a) 수직 변위



(b) 입자 속도

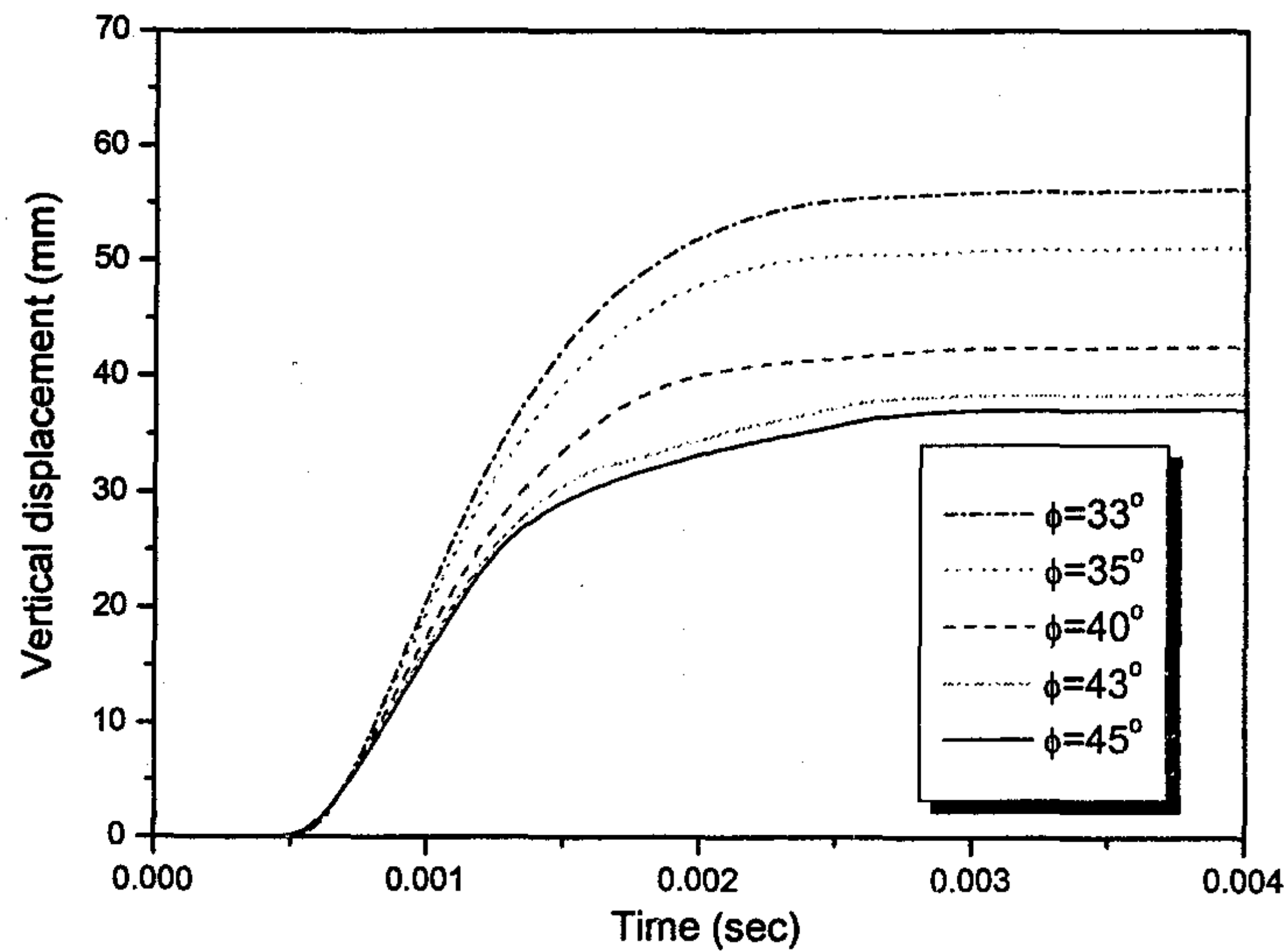
Fig. 3.2.3.6 포아송비의 변화에 따른 변위 및 속도의 변화

Table 3.2.3.4 포아송비에 따른 최대 변위 및 최대 입자속도

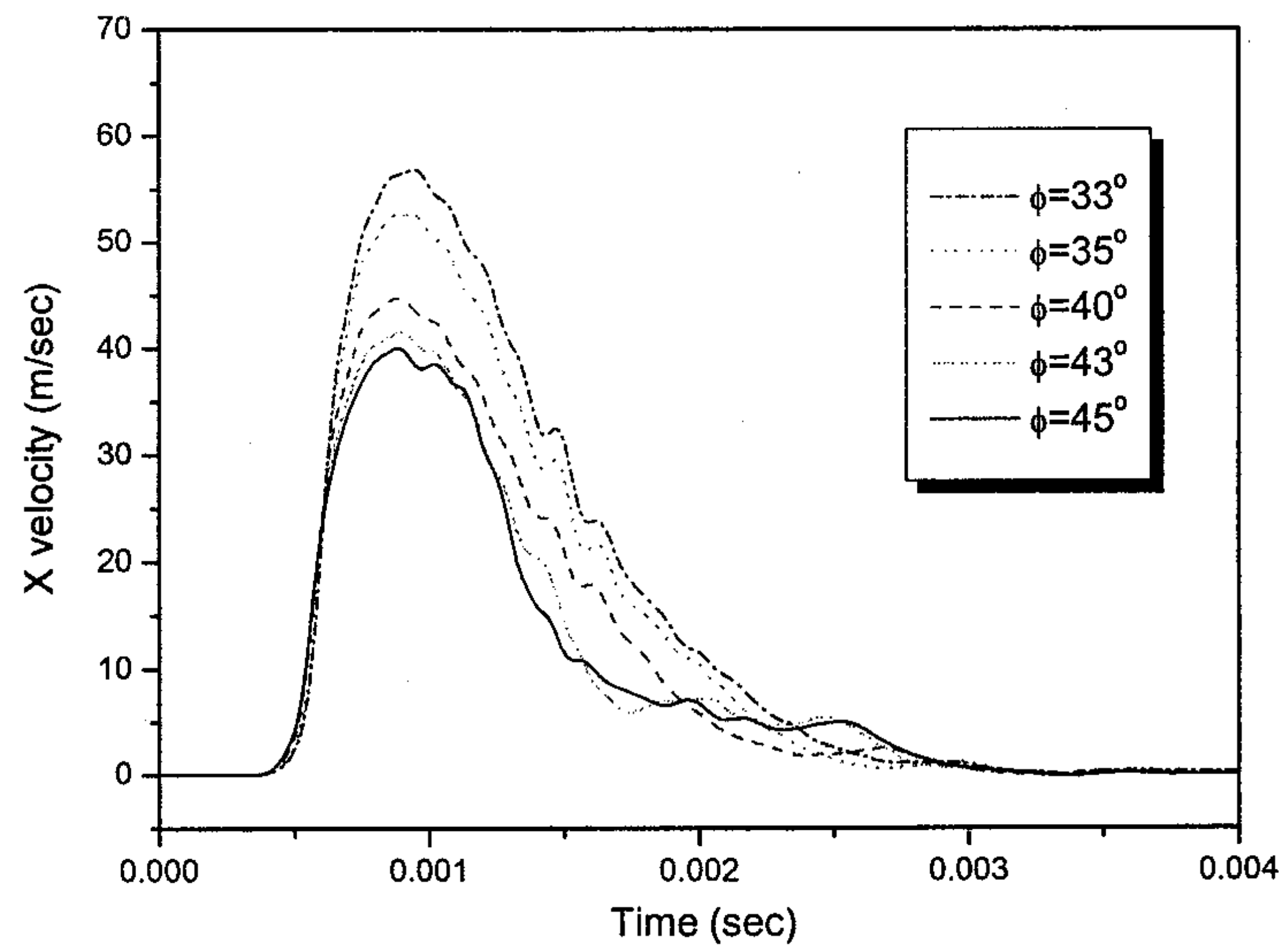
ν	0.18	0.20	0.24	0.27	0.30
결과					
최대변위 (mm)	37.1	37.3	35.6	35.8	34.1
최대속도 (m/sec)	40.0	39.3	38.5	37.1	35.2

③ 마찰각의 변화에 따른 영향

마찰각의 영향을 알아보기 위해 마찰각을 33~45°로 변화시켜가며 해석을 수행하였으며 그 결과가 Fig. 3.2.3.7 및 Table 3.2.3.5에 제시되어 있다. 해석 결과, 탄성계수에 의한 영향과 비슷한 경향을 보여 마찰각이 작아질수록 변위 및 속도가 현저하게 증가함을 알 수 있었다. 그러나 탄성계수를 줄여가며 해석했을 경우에는 최대값에 도달하는 시간이 길어지는 경향을 보이는 반면 마찰각을 줄였을 경우에는 거의 동시에 최대값에 도달하는 차이를 보였다.



(a) 수직 변위



(b) 입자 속도

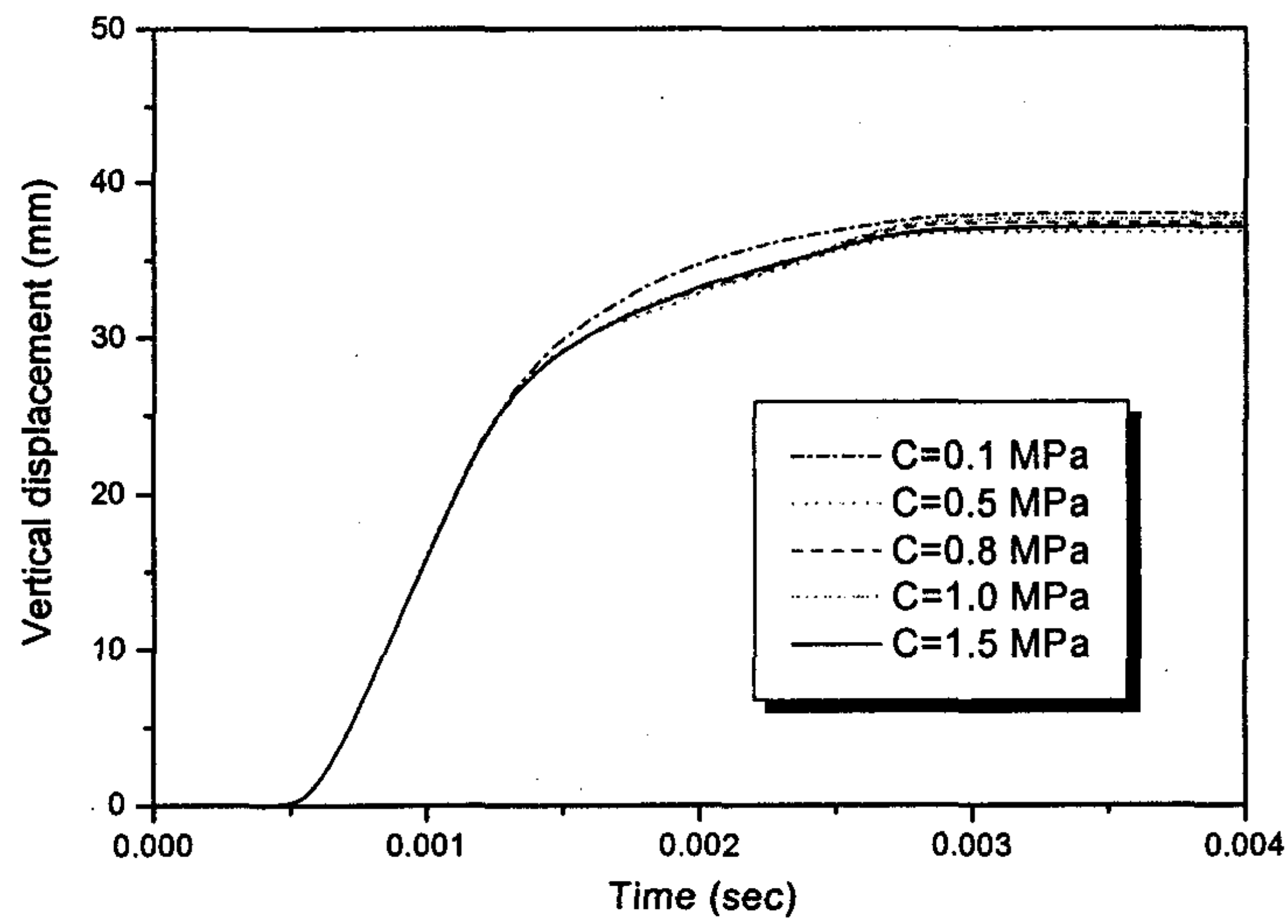
Fig. 3.2.3.7 마찰각의 변화에 따른 변위 및 속도의 변화

Table 3.2.3.5 마찰각의 변화에 따른 최대 변위 및 최대 입자속도

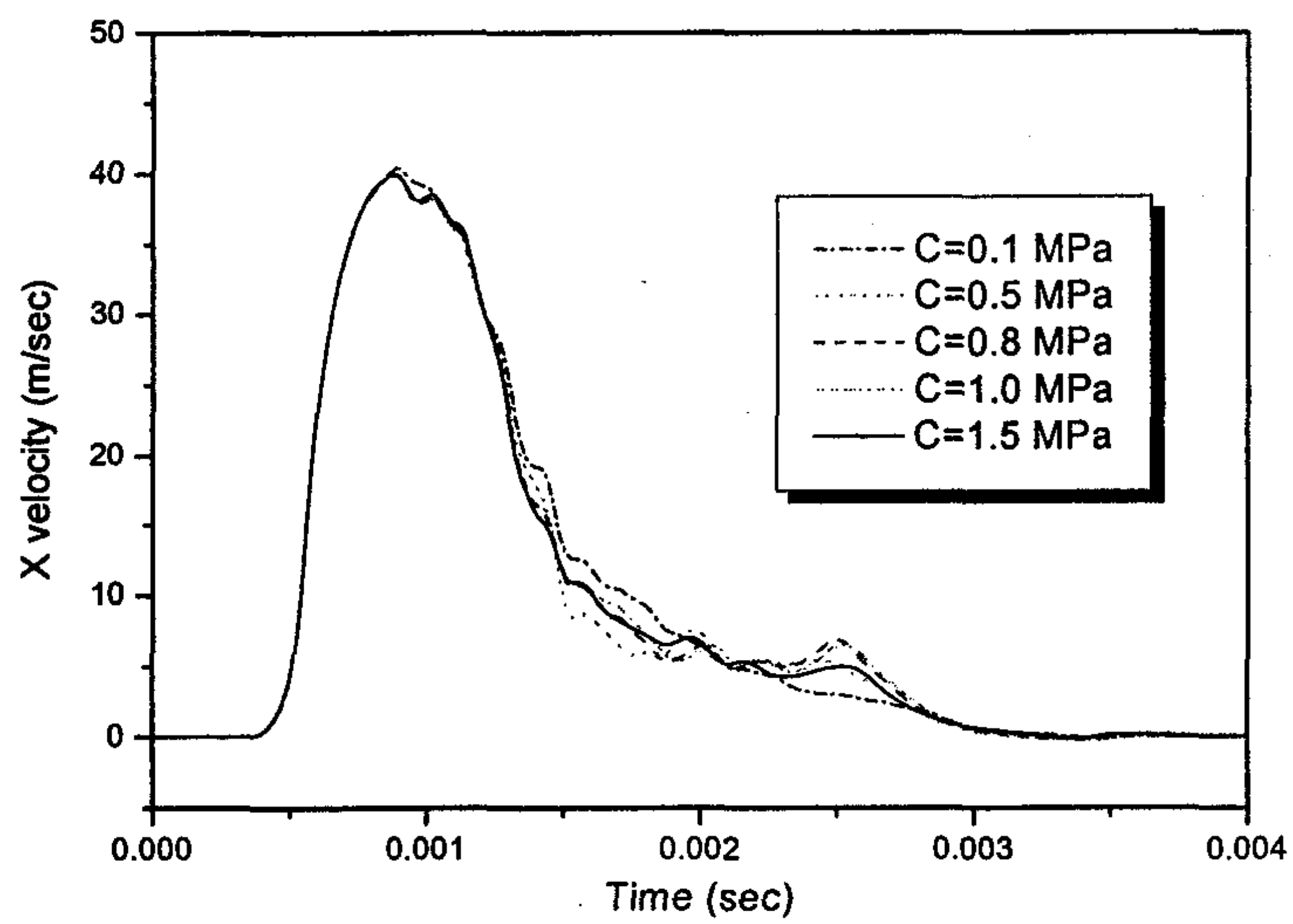
ϕ (°)	33	35	40	43	45
결과					
최대변위 (mm)	56.1	51.1	42.5	38.4	37.1
최대속도 (m/sec)	56.9	52.6	44.7	41.6	40.0

④ 점착력의 변화에 따른 영향

점착력은 1.5~0.1 MPa의 범위에서 변화시켜가며 해석하였으나 Fig. 3.2.3.8에 보이듯 별다른 차이를 나타내지 않아 점착력에 의한 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.



(a) 수직 변위



(b) 입자 속도

Fig. 3.2.3.8 점착력의 변화에 따른 변위 및 속도의 변화

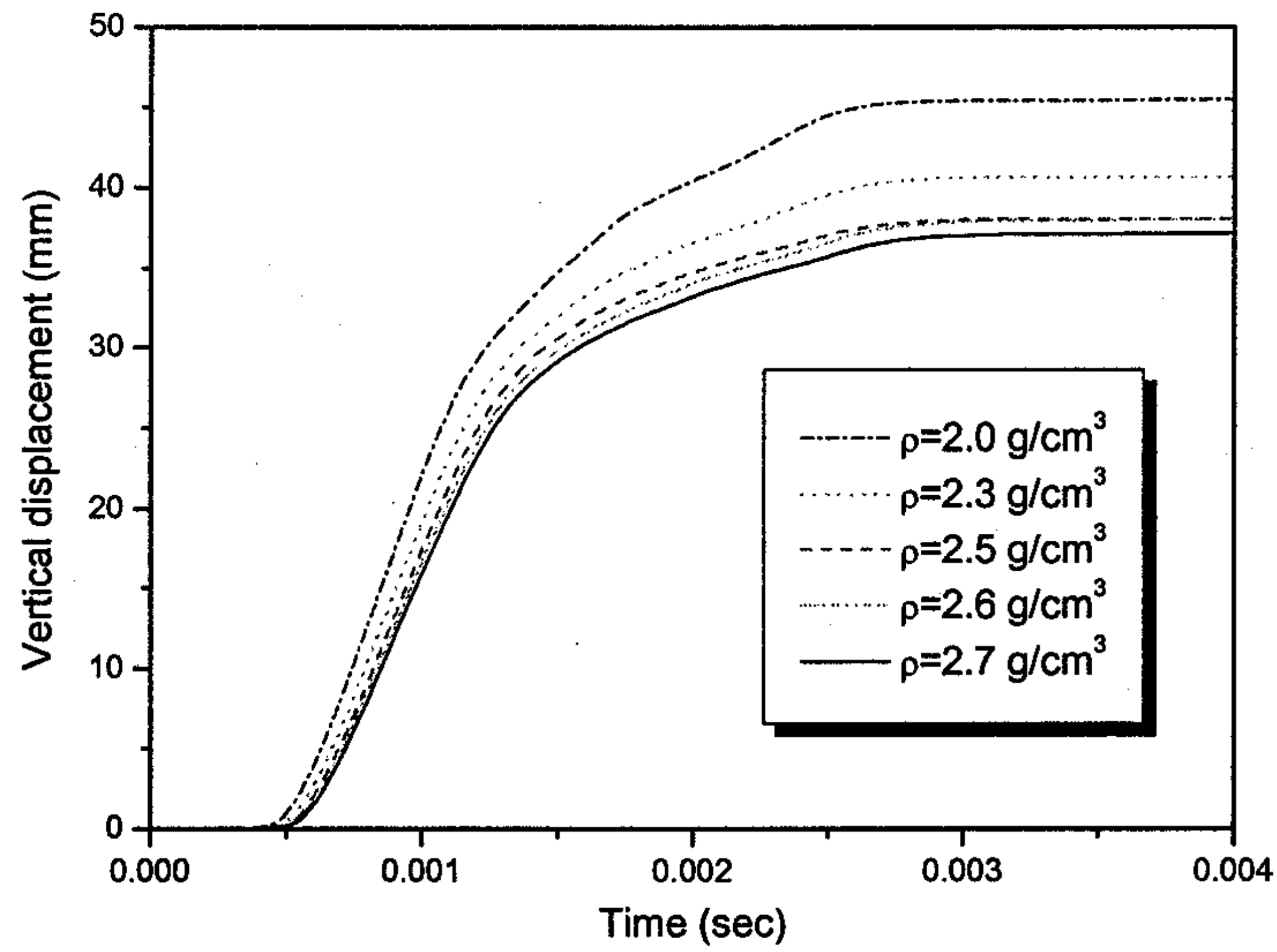
Table 3.2.3.6 점착력의 변화에 따른 최대 변위 및 최대 입자속도

C (MPa)	0.1	0.5	0.8	1.0	1.5
결과					
최대 변위 (mm)	37.9	36.8	37.4	37.7	37.1
최대 속도 (m/sec)	40.4	40.0	39.9	39.9	40.0

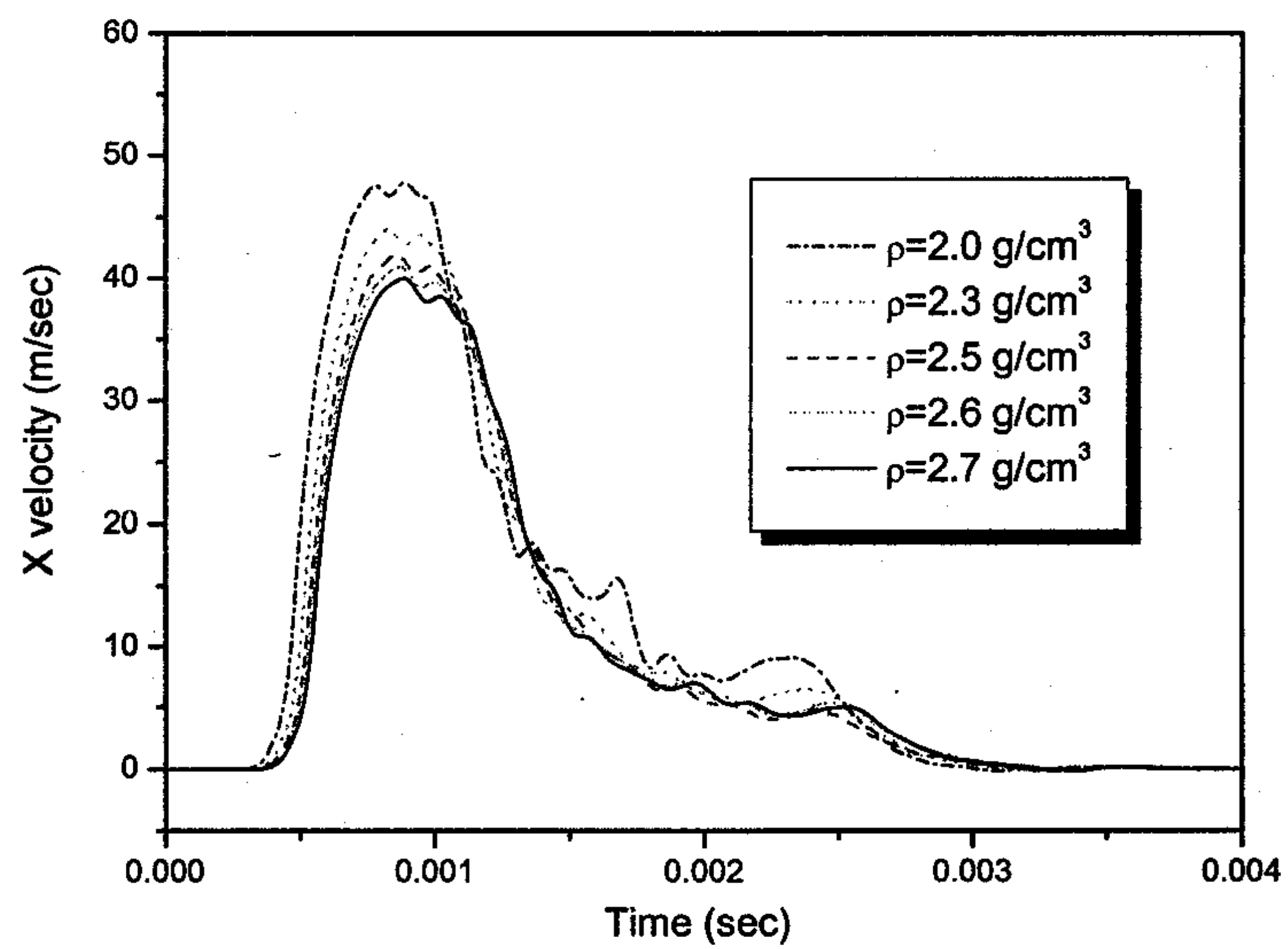
⑤ 밀도의 변화에 따른 영향

암반의 밀도를 2.0~2.7 g/cm³로 변화시켜가며 해석한 결과가 Fig. 3.2.3.9 및 Table 3.2.3.7에 나타나 있다.

해석결과 밀도가 줄어들수록 발생 변위 및 입자 속도가 커졌으며 마찰각을 변화시켰을 경우의 결과 그래프와 그 경향이 비슷하게 나타났다.



(a) 수직 변위



(b) 입자 속도

Fig. 3.2.3.9 밀도의 변화에 따른 변위 및 속도의 변화

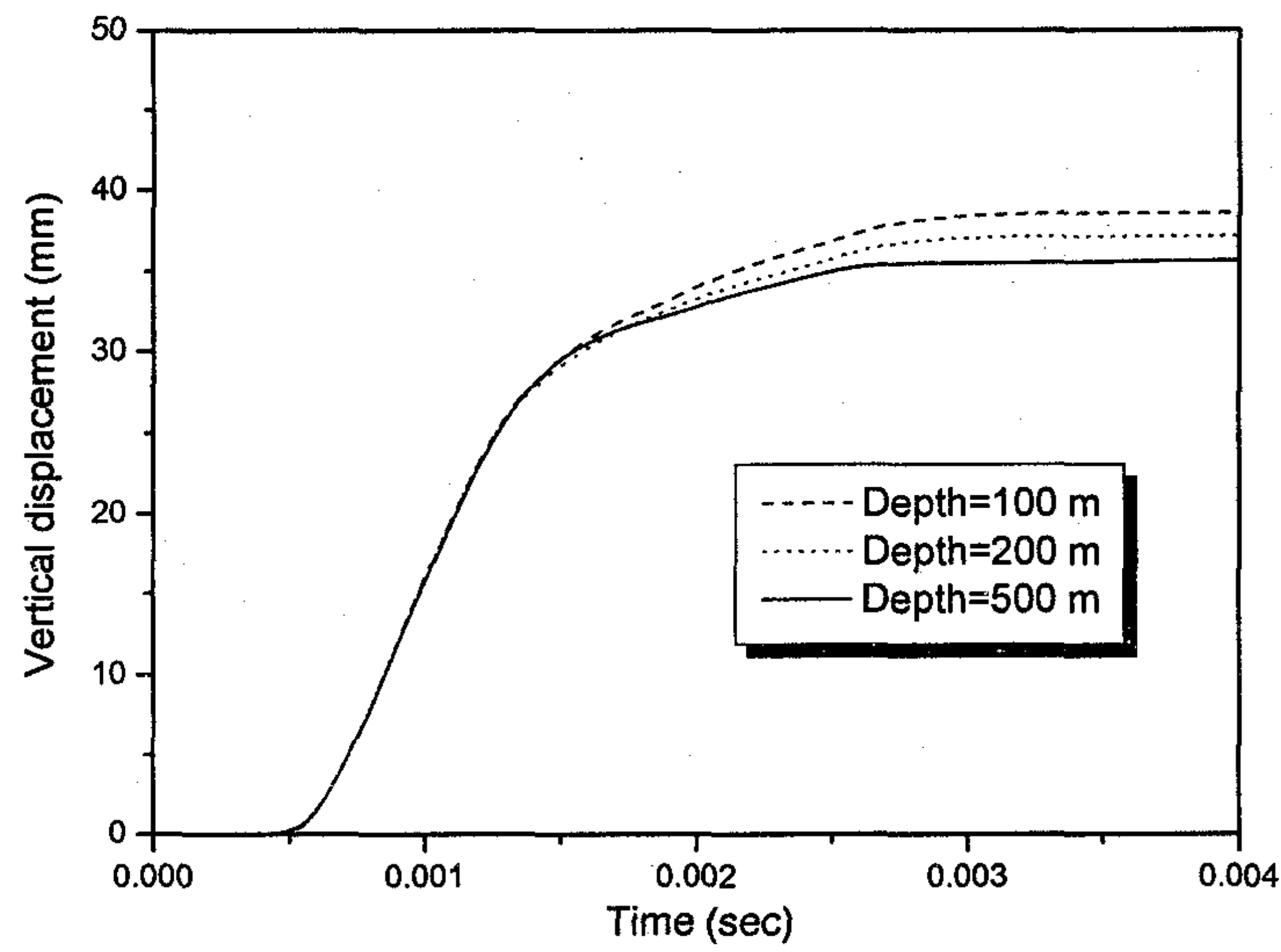
Table 3.2.3.7 밀도의 변화에 따른 최대 변위 및 최대 입자속도

ρ (g/cm ³)	2.0	2.3	2.5	2.6	2.7
결과					
최대 변위 (mm)	45.5	40.7	38.1	38.0	37.1
최대 속도 (m/sec)	47.8	44.1	41.9	41.0	40.0

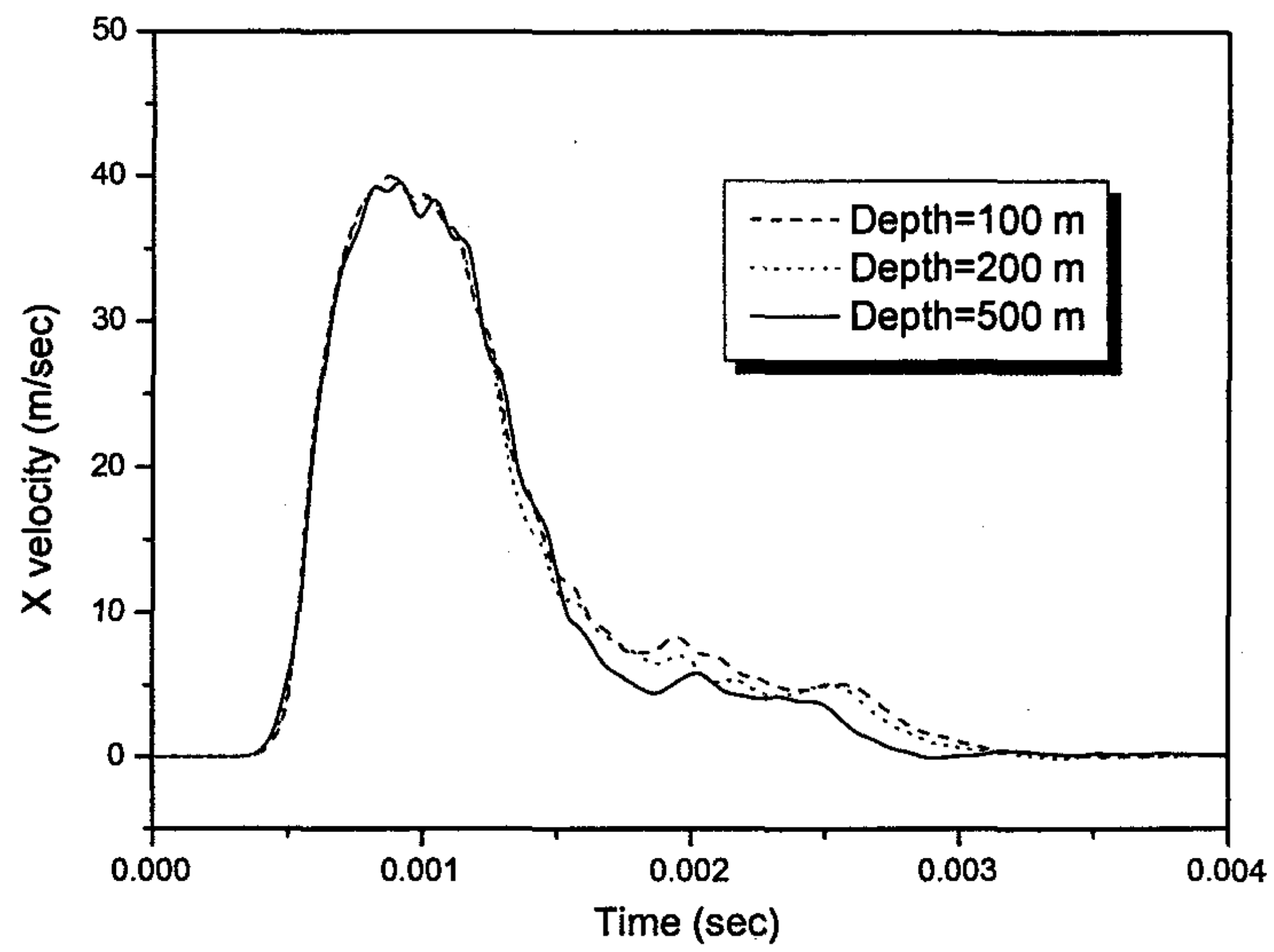
⑥ 심도(초기지압)의 변화에 따른 영향

초기지압조건의 영향을 살펴보기 위해 해석 심도를 100, 200, 500 m로 변화시켰으며 심도가 깊어짐에 따라 초기지압이 비례하여 증가하는 것으로 가정하였다. 이때의 축압계수 K는 1.0으로 고정하였고 이 때의 결과가 Fig. 3.2.3.10 및 Table 3.2.3.8에 제시되어 있다.

해석 심도가 깊어짐에 따라 발생하는 변위가 감소하였는데 이는 초기지압으로 인해 암반이 구속되기 때문인 것으로 판단된다. 반면 입자 속도는 지압조건에 상관없이 비슷한 값을 보였다.



(a) 수직 변위



(b) 입자 속도

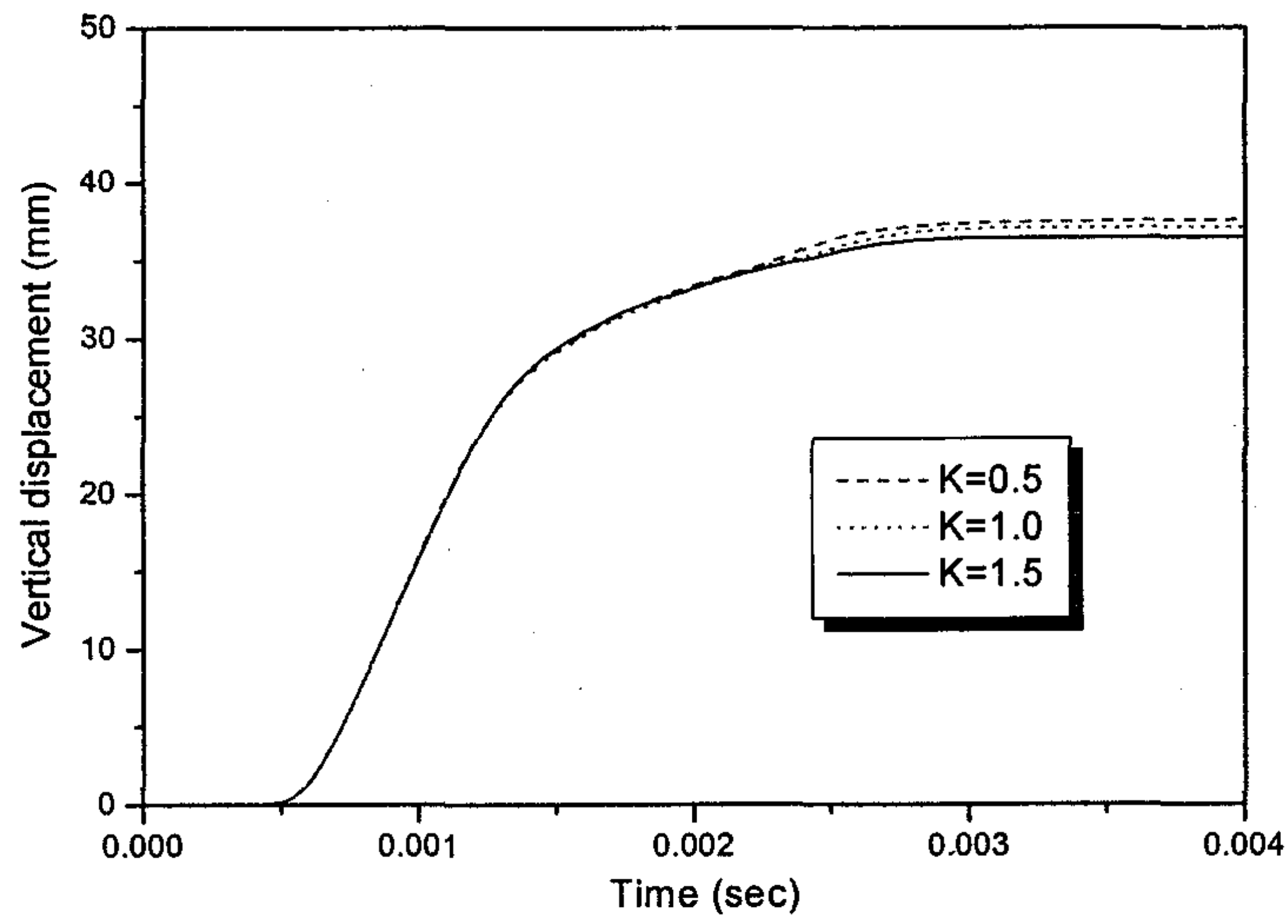
Fig. 3.2.3.10 지압조건(심도)의 변화에 따른 변위 및 속도의 변화

Table 3.2.3.8 심도의 변화에 따른 최대 변위 및 최대 입자속도

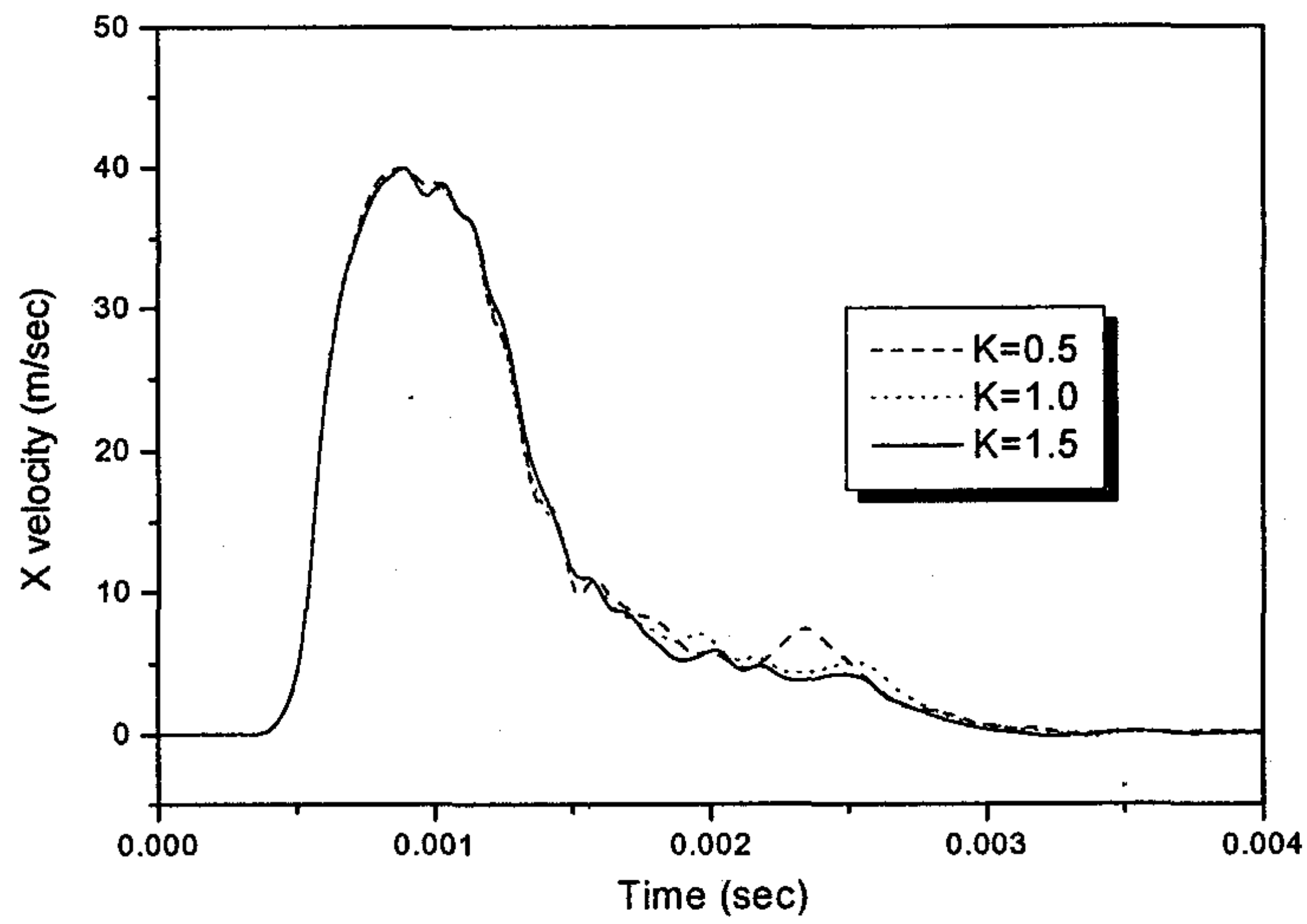
Depth (m)	100	200	500
결과			
최대변위 (mm)	38.6	37.1	35.6
최대속도 (m/sec)	40.0	40.0	39.5

⑦ 축압계수(K)의 변화에 따른 영향

해석을 위해 축압계수를 0.5, 1.0, 1.5로 변화시켰다. Fig. 3.2.3.11 (a)에서 보면 축압계수가 증가함에 따라 변위의 발생이 감소하였는데 이는 지압조건을 변화시킨 경우와 마찬가지로 수평압의 증가로 인해 변위가 구속되기 때문이다. 이 경우 역시 입자 속도에는 별다른 변화가 발생하지 않았다.



(a) 수직 변위



(b) 입자 속도

Fig. 3.2.3.11 측압계수의 변화에 따른 변위 및 속도의 변화

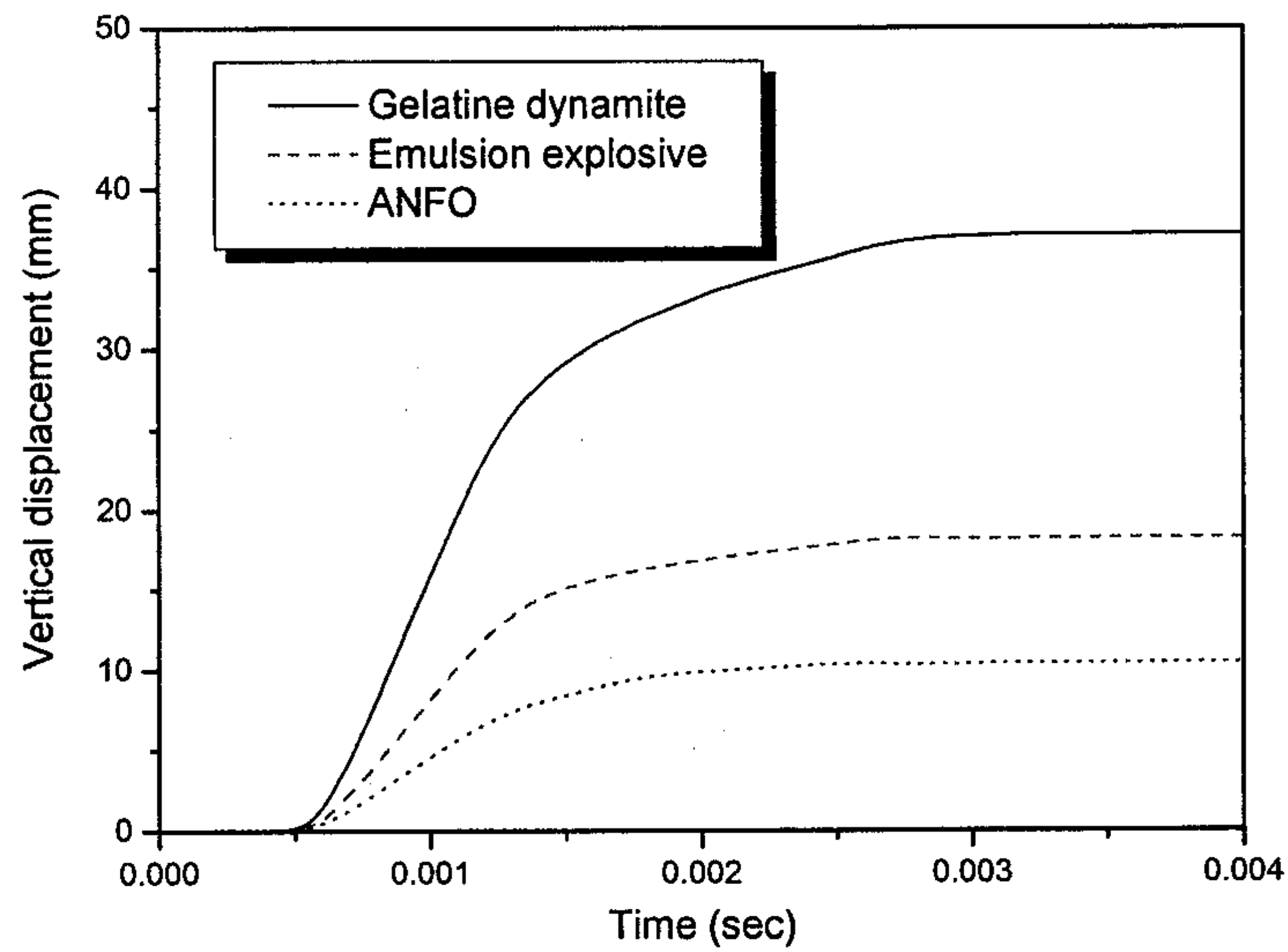
Table 3.2.3.9 측압계수의 변화에 따른 최대 변위 및 최대 입자속도

K	0.5	1.0	1.5
결과			
최대변위 (mm)	37.6	37.1	36.5
최대속도 (m/sec)	39.9	40.0	40.0

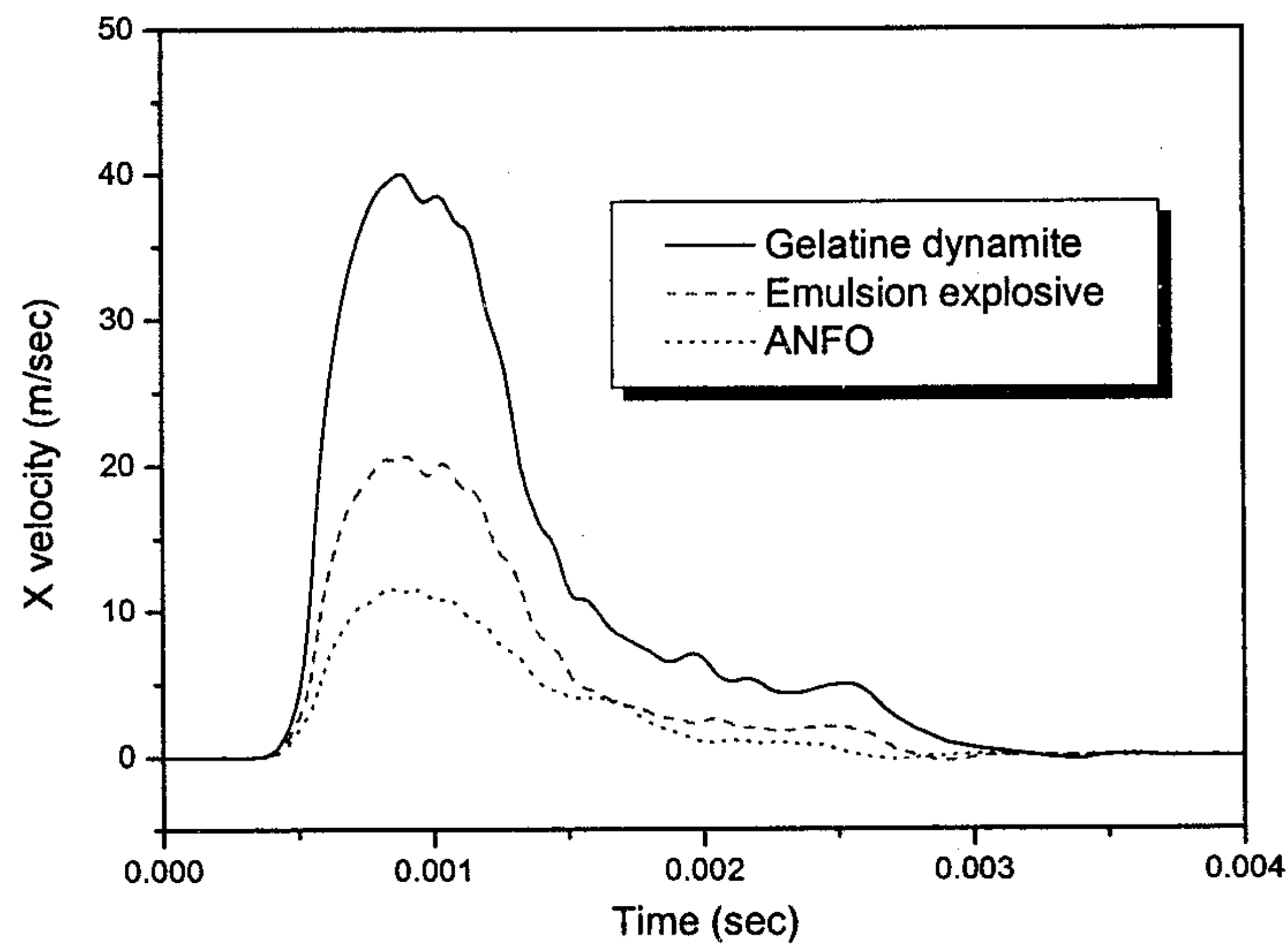
(나) 발파 파형의 변화에 따른 영향

① 폭약 종류의 변화에 따른 영향

Fig. 3.2.3.2에 제시된 세 가지 폭약(Gelatine dynamite, Emulsion explosive, ANFO)에 대한 발파 파형을 입력하여 그에 따른 영향을 분석하였으며 결과가 Fig. 3.2.3.12 및 Table 3.2.3.10에 제시되어 있다. 발생하는 변위 및 속도의 최대값은 입력파형의 최대값에 비례하는 결과를 보였으며, 입자 속도 그래프의 경우에는 약간의 시차가 있었으나 입력파형 그래프와 경향이 매우 유사하였다.



(a) 수직 변위



(b) 입자 속도

Fig. 3.2.3.12 폭약 종류의 변화에 따른 변위 및 속도의 변화

Table 3.2.3.10 폭약 종류의 변화에 따른 최대 변위 및 최대 입자속도

폭약	Gelatine dynamite	Emulsion explosive	ANFO
결과			
최대변위 (mm)	37.1	18.3	10.4
최대속도 (m/sec)	40.0	20.6	11.6

② 발파압의 감쇠 특성에 따른 영향

발파압의 감쇠 특성이 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 3.2.3.13과 같이 최대 압력은 같지만 각기 다른 감쇠 특성을 가지는 세 가지 파형을 모델에 적용하였다. 발파압력 곡선 A는 감쇠 함수를 나타내는 식 3.2.3.2에서 t_0 가 $8.4025e-5$ sec인 경우이고, 곡선 B는 t_0 가 $3.361e-4$ sec인 경우이며 본 해석에서 기본적인 발파압력 곡선으로 사용된 파형이다. 한편 곡선 C는 감쇠가 일어나지 않는 경우를 나타내고 있는데, 이는 실제와는 거리가 있으나 다른 결과와의 비교를 위해서 가정한 경우이다.

Fig. 3.2.3.14에서 보듯 감쇠가 천천히 진행될수록 변위 및 입자 속도의 최대값이 증가하며 최대값에 이르는 시간 역시 증가하는 경향을 보인다. 감쇠가 없는 곡선 C의 경우 일정한 값에 수렴하지 않고 계속 증가하는 양상을 보인다.

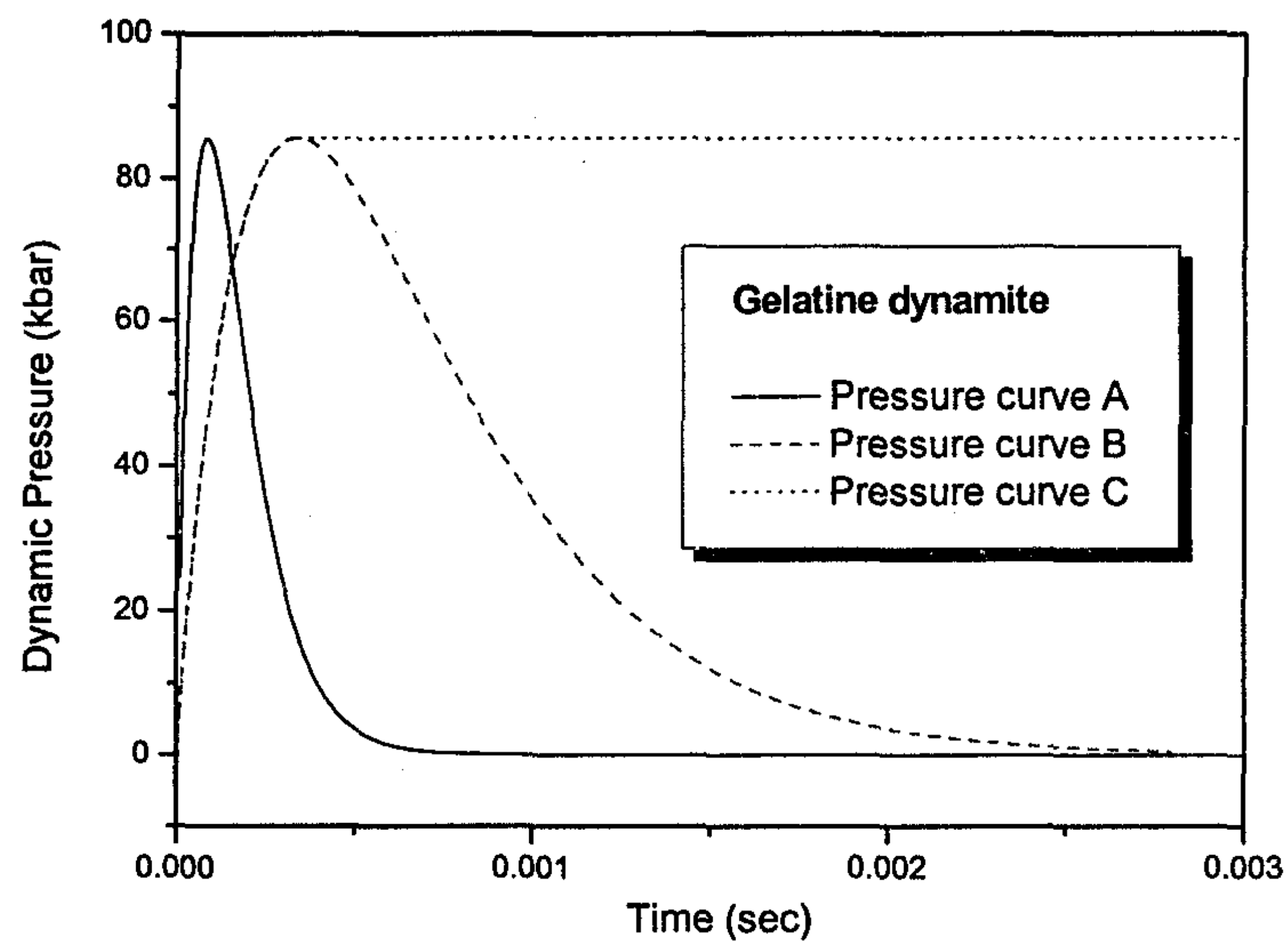
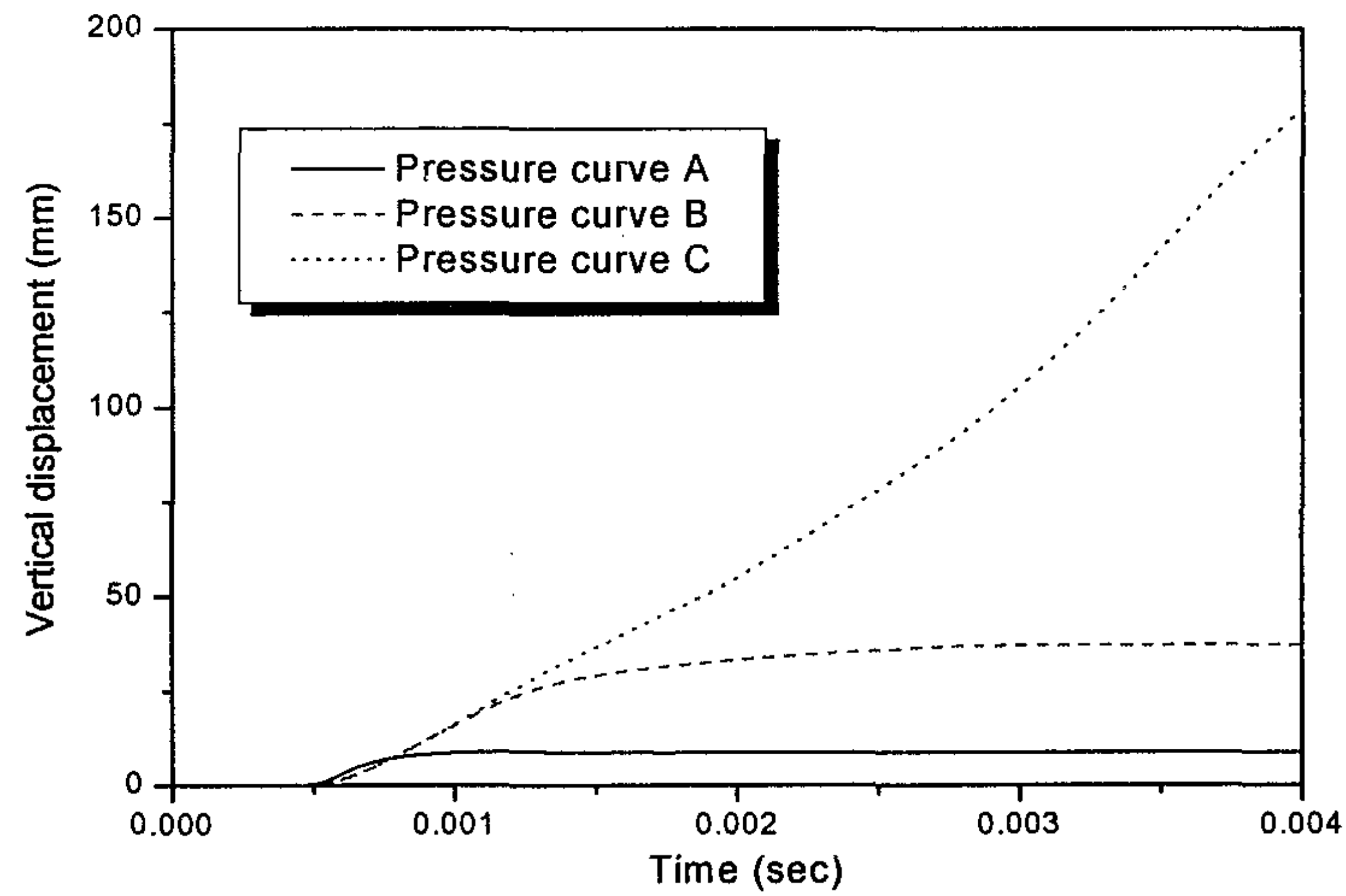
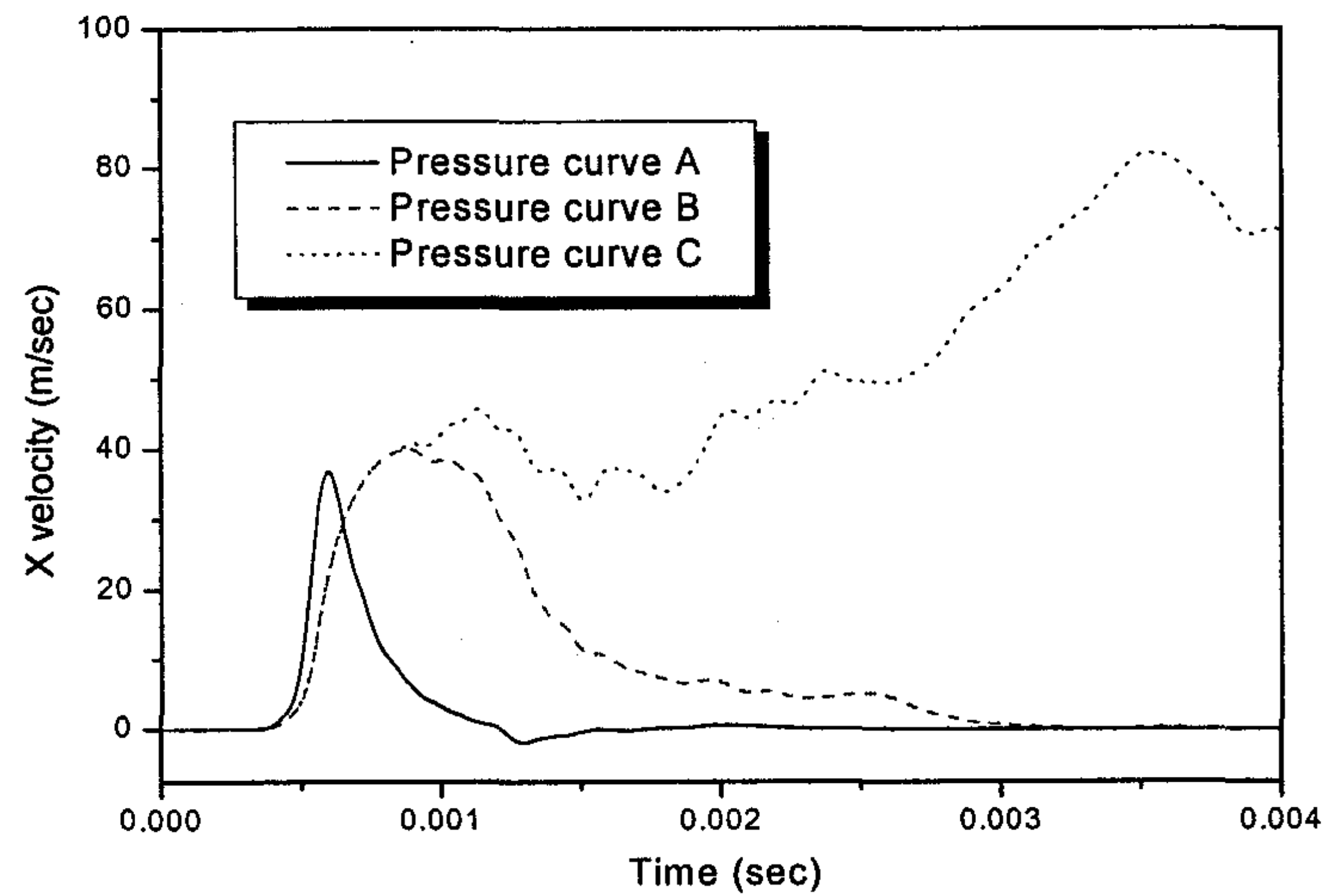


Fig. 3.2.3.13 감쇠 특성이 다른 세 가지 발파 압력 곡선



(a) 수직 변위



(b) 입자 속도

Fig. 3.2.3.14 발파압의 감쇠 특성에 따른 변위 및 속도의 변화

라. 두 공을 이용한 공간격 및 지연시차의 영향 분석

(1) 해석모델

공간격이나 지연시차 등의 발파 특성이 발파에 미치는 영향을 파악하기 위해서 두 개의 발파공이 있는 모델을 구성하였으며 Fig. 3.2.3.15에 도시되어 있다. 해석단면 외부 경계의 가로, 세로 길이는 4 m이며, 반지름 5 cm인 두 개의 발파공이 단면의 중앙 부분에 위치하고 있다. 초기조건이나 경계조건은 단일공 해석에서와 같으며 구성 모델 역시 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였다.

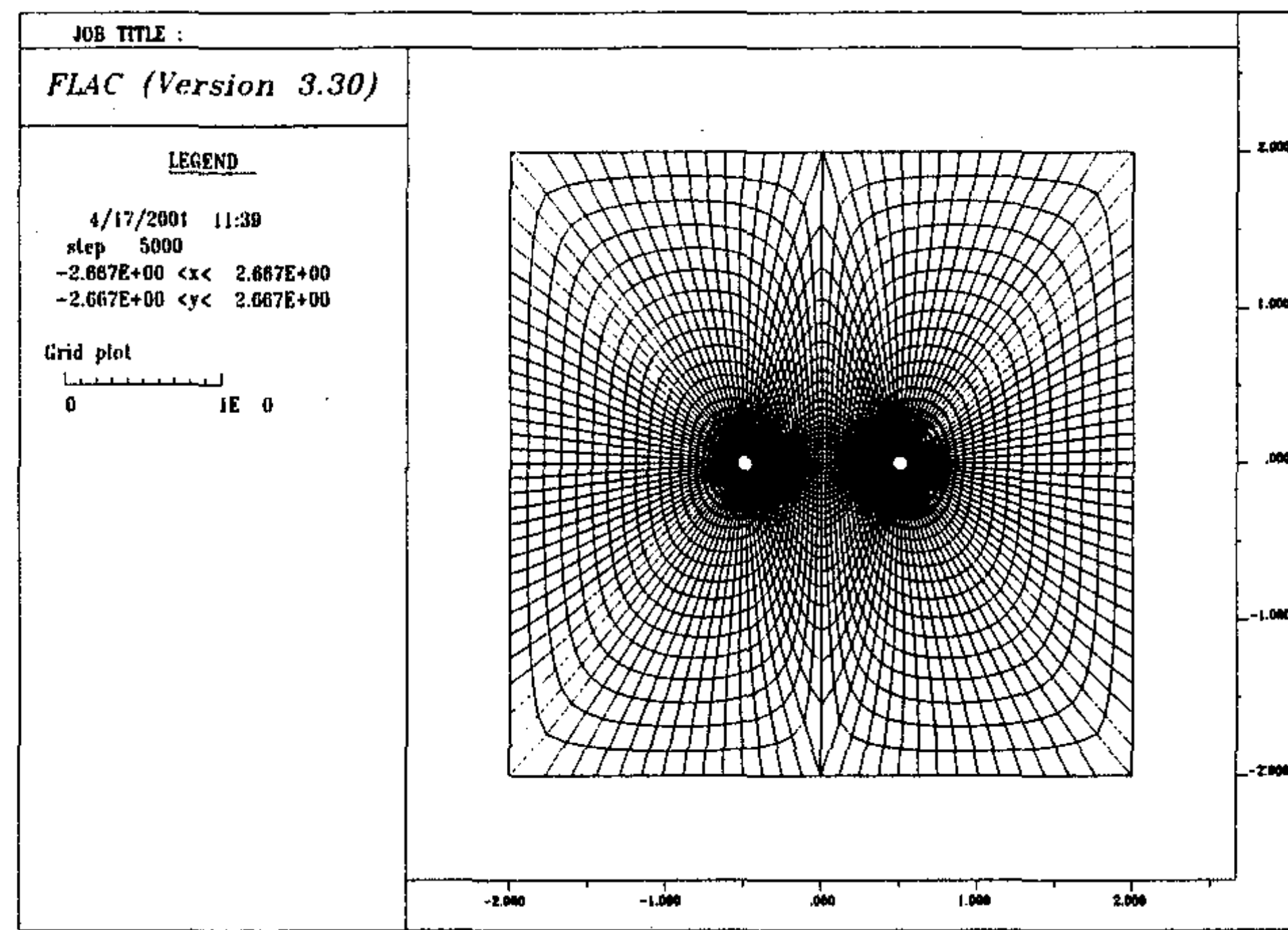


Fig. 3.2.3.15 발파 특성에 따른 영향 해석을 위한 two-hole mesh

(2) 입력변수

공간격에 따른 영향 분석을 위해서 공간격을 0.5, 0.75, 1.0 m로 변화시켜가며 해석을 수행하였으며 이때는 두 개의 발파공에서 동시에 발파가 일어나는 것으로 가정하였다.

지연시차의 영향을 알아보기 위해서는 두 개의 공에서 각각 0, 2, 5, 10 ms의 시차를 두고 발파가 일어나는 것으로 가정하여 해석하였다.

발파하중은 단일공 해석시 적용하였던 시간-발파압력 곡선(Gelatine dynamite)을 이용하였고 입력 지반 물성치는 단일공 해석에 적용되었던 물성치를 토대로 Table 3.2.3.11에 요약되어 있다. 그 외, 축압계수는 1.0, 해석 심도는 200 m로 가정하였다.

Table 3.2.3.11 Two-hole 해석에 적용된 지반 물성값

E (GPa)	ν	ρ (g/cm ³)	C (MPa)	ϕ (°)
20	0.18	2.7	1.5	45

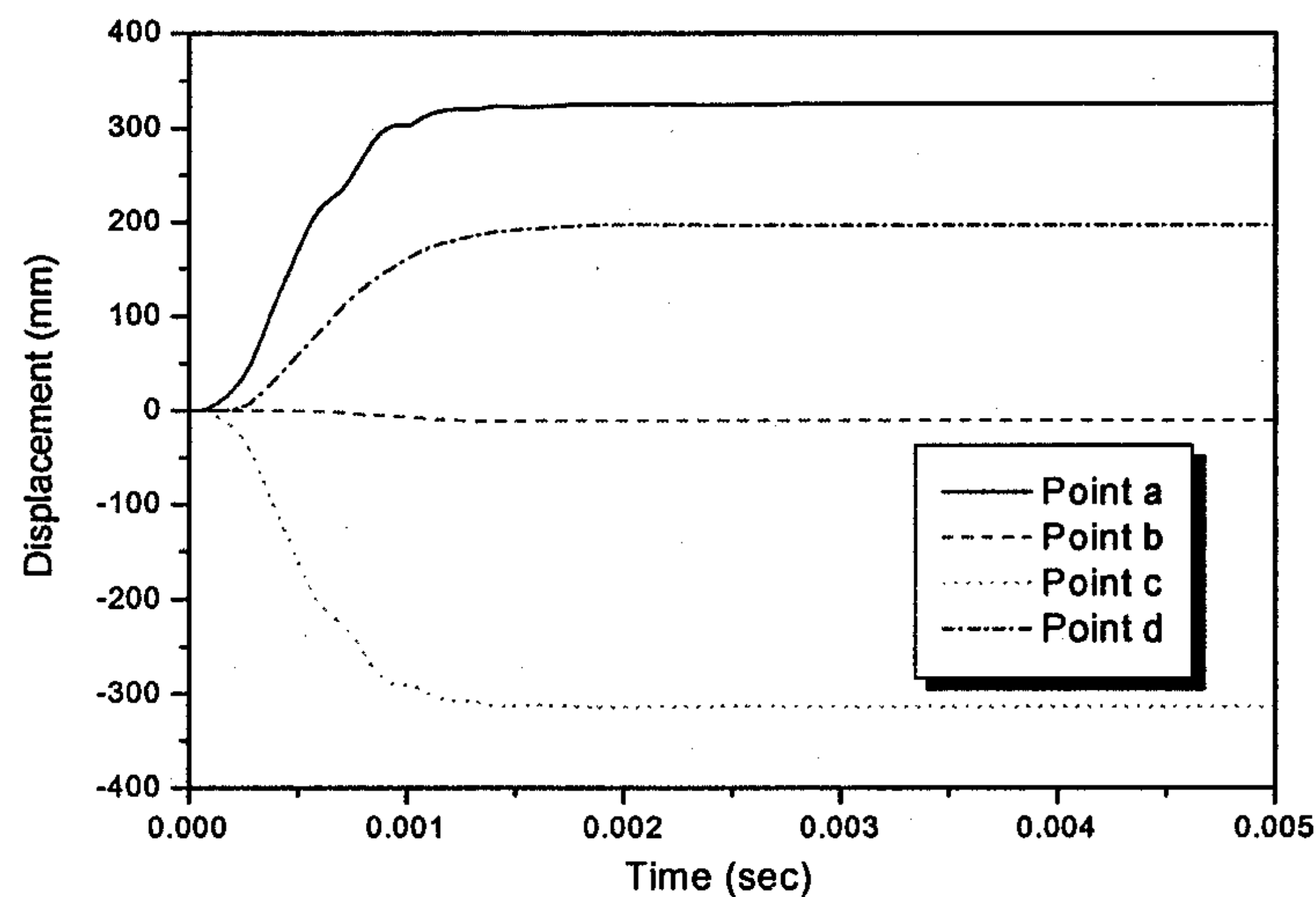
(3) 해석 결과

(가) 공간격의 변화에 따른 영향

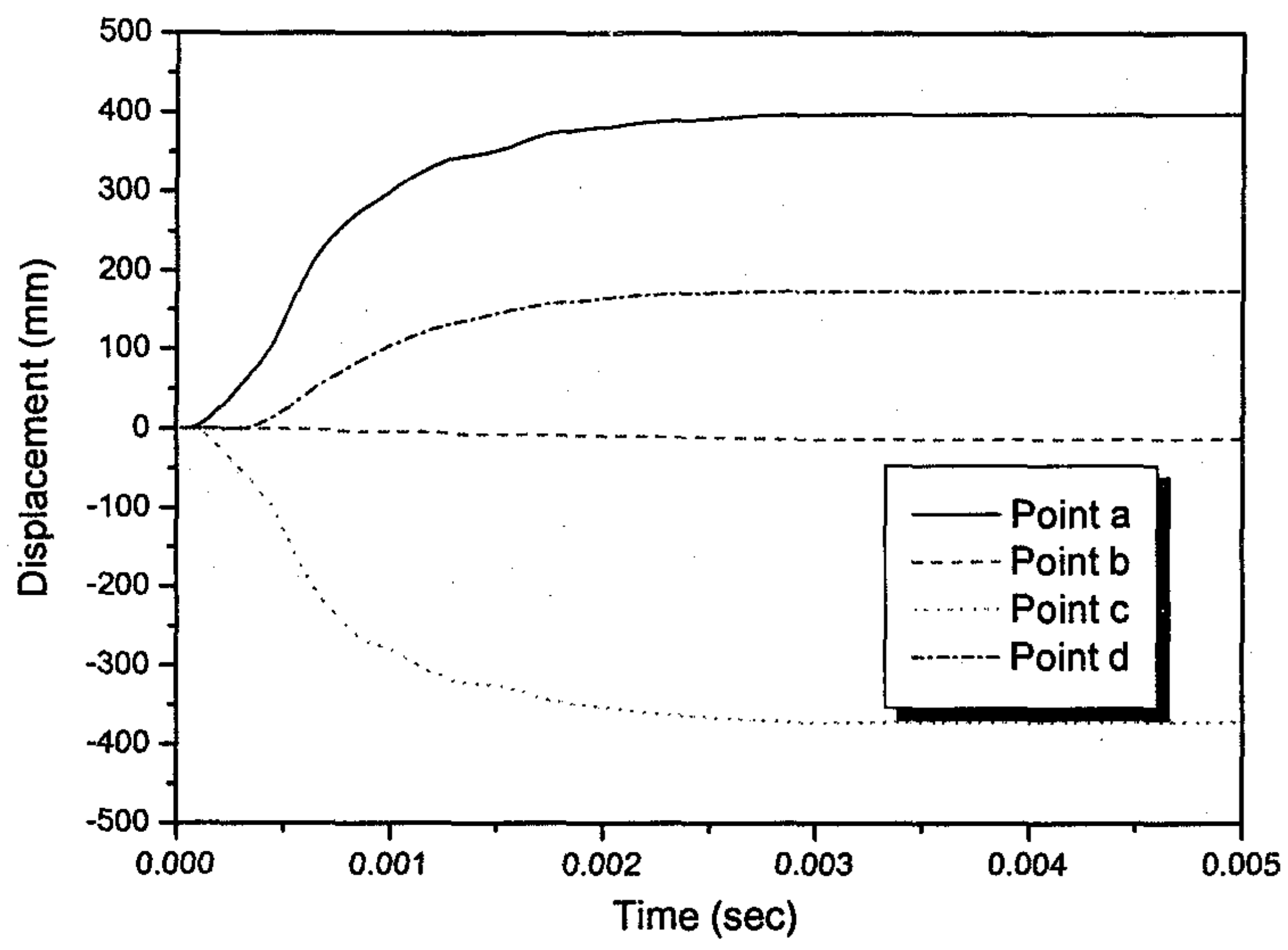
발파특성이 미치는 영향을 해석하기 위해 두 발파공의 중심점을 연결한 직선을 사등분한 지점(a, b, c 지점)과 모델의 중심(b 지점)에서 y축 방향으로 1 m 상부에 위치한 지점(d 지점)을 해석 지점으로 선정하였다. a, b, c 지점에서는 수평방향(x 방향)의 변위 및 속도를 측정하였으며, d 지점에서는 수직방향(y 방향)에 대해 측정하였다. Fig. 3.2.3.16은 공간격을 각각 0.5, 0.75, 1.0 m로 변화시켰을 때의 해석 지점별

변위 그래프이다. 그래프에서 보면 공간격이 커짐에 따라 발생하는 변위가 증가하며 최대변위에 도달하는 시간이 길어지고 있다. 이는 두 공에서 동시에 발파가 일어나면 두 공의 사이 부분은 발파압에 의해 압축되게 되는데 공간격이 커지면 그만큼 압축되는 영역도 커지고 그에 따라 변위도 더 크게 발생할 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 해석지점별로 보면, 모델의 중심에서 서로 대칭인 a, c 지점(발파공 인접 지점)에서는 같은 크기이면서 반대 방향의 변위가 발생하였고(수평 방향 기준), 모델의 중심인 b 지점에서는 두 발파공에서 동시에 발파가 일어남에 따라 그 값이 상쇄되어 거의 변위가 발생하지 않았으며 d 지점에서는 수직방향의 변위가 발생하는 양상을 보였다.

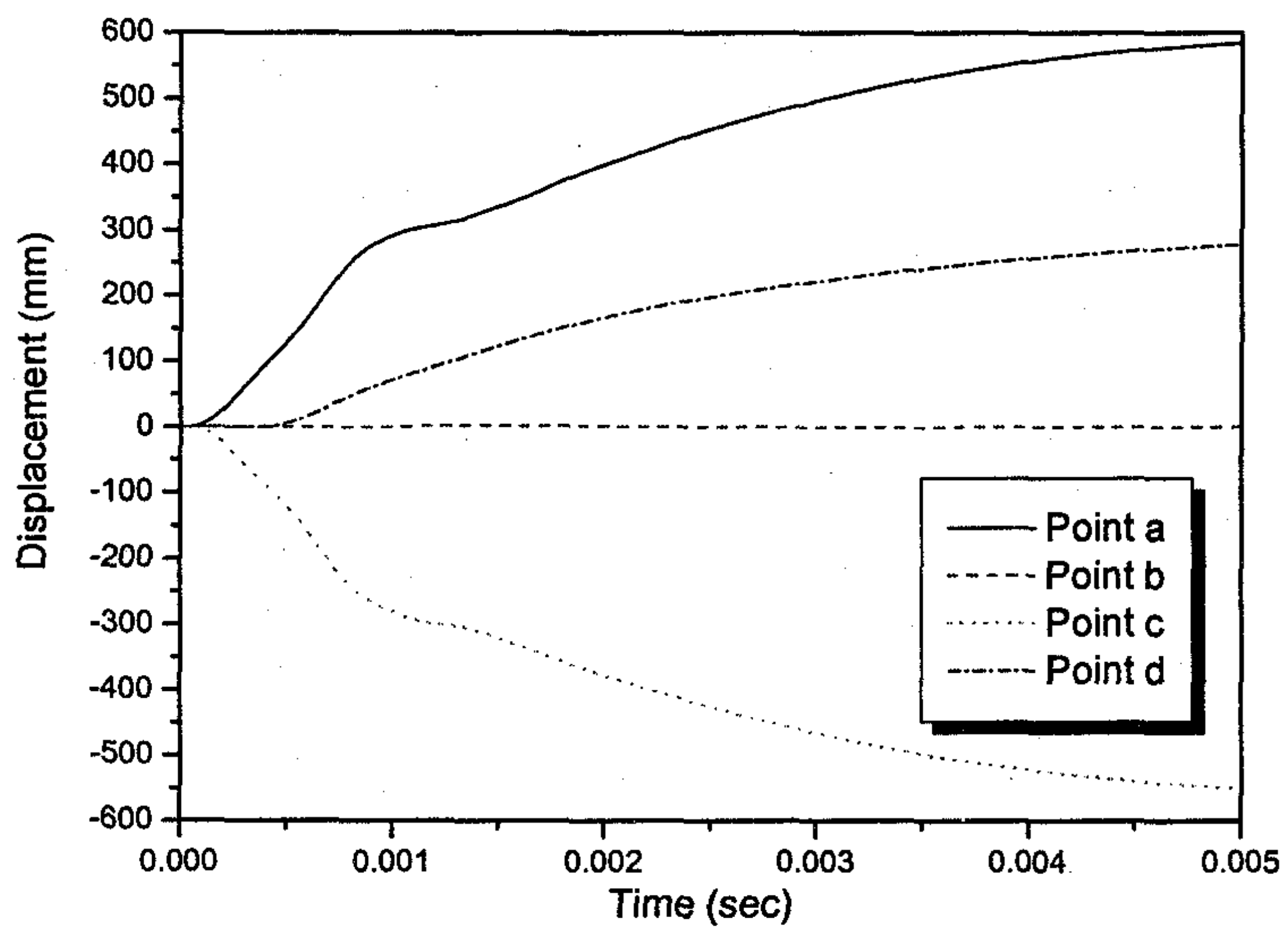
Fig. 3.2.3.17은 공간격의 변화에 따른 입자속도의 그래프이다. 입자속도의 경우 공간격이 줄어들수록 최대값이 다소 증가하며 지속시간은 짧아진다. 또한 두 발파공에서 발생하는 파형의 중첩으로 인해 다소 복잡한 양상을 보이게 된다.



(a) 공간격 0.5 m

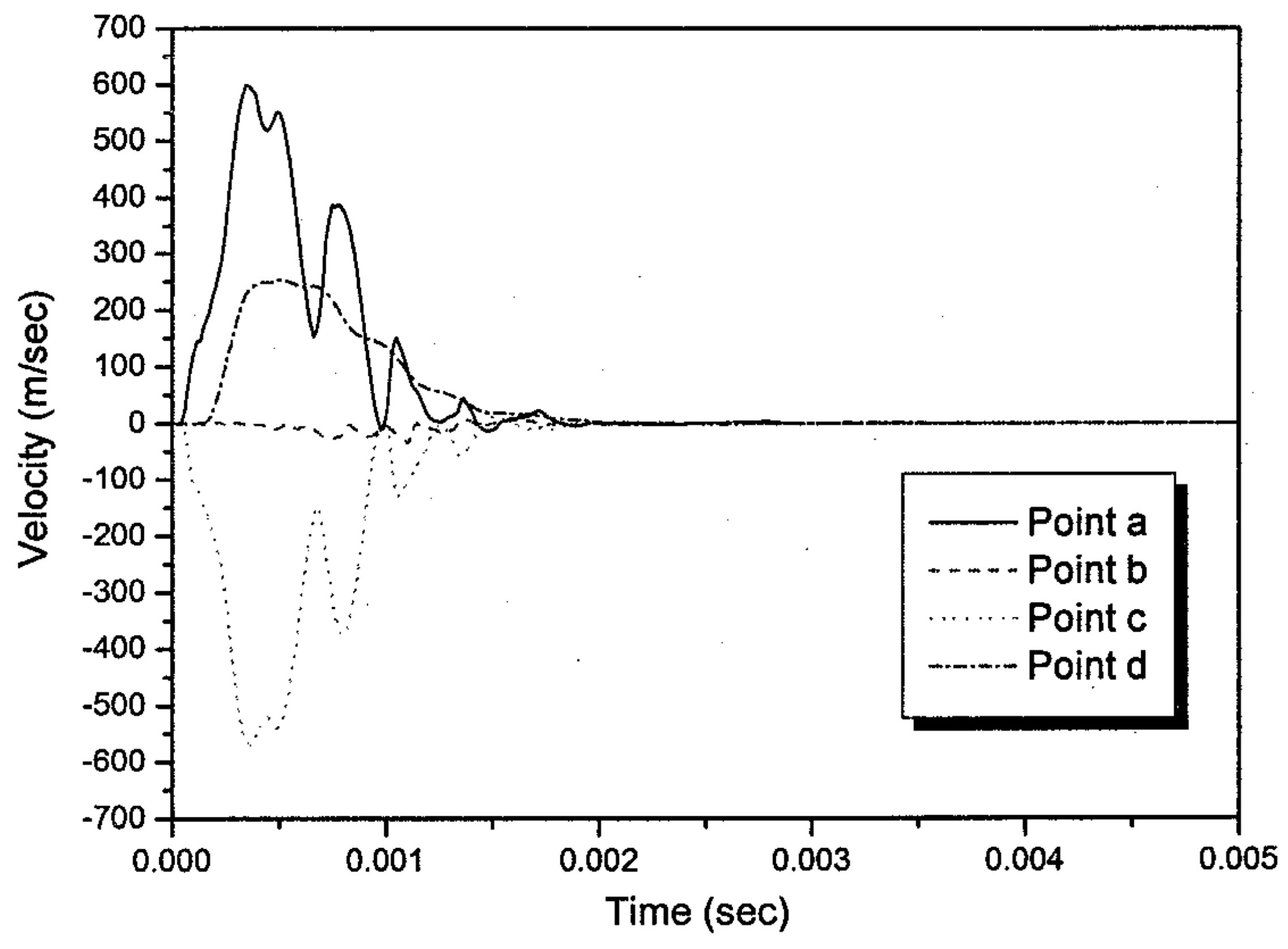


(b) 공간격 0.75 m

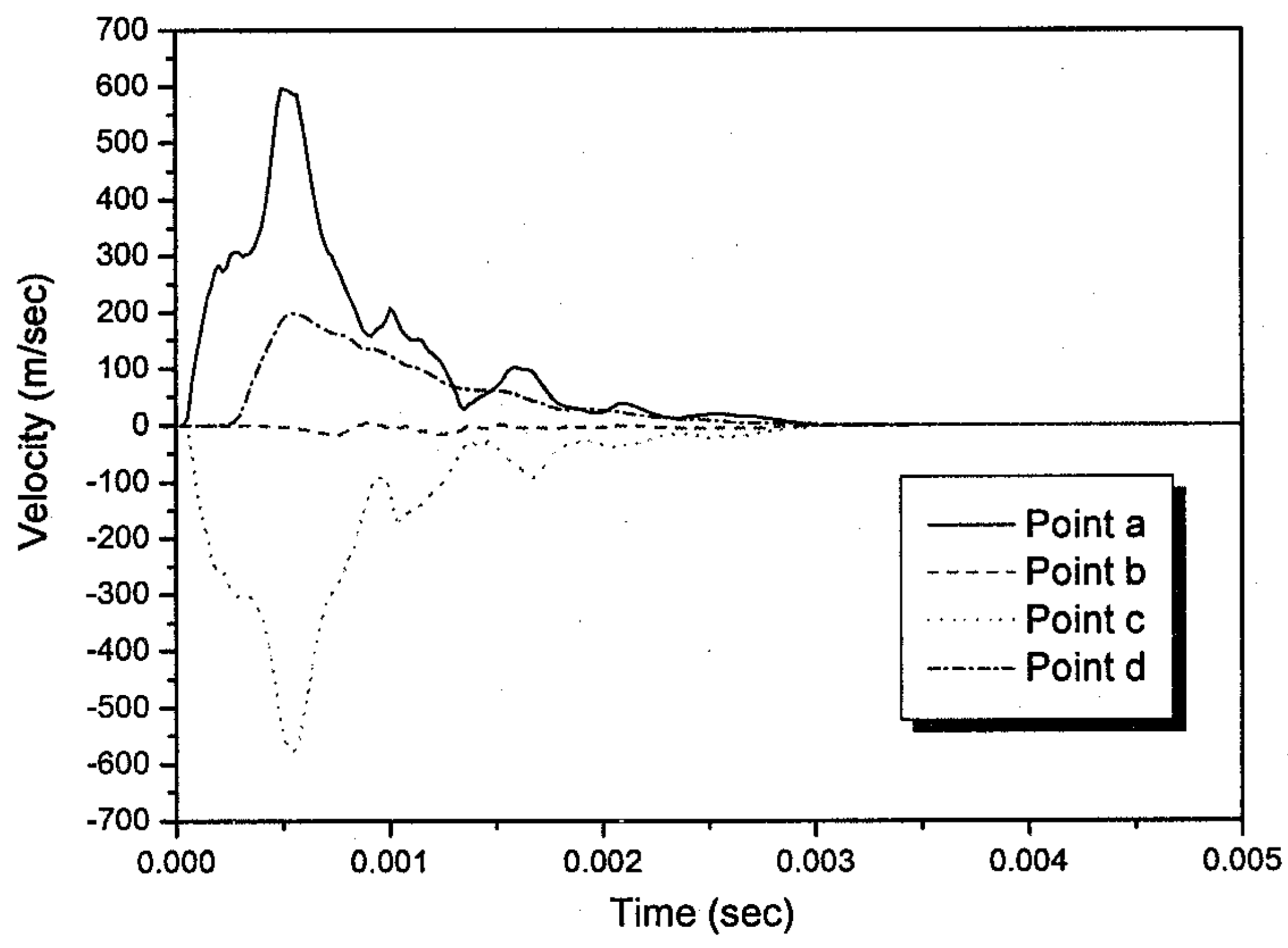


(c) 공간격 1.0 m

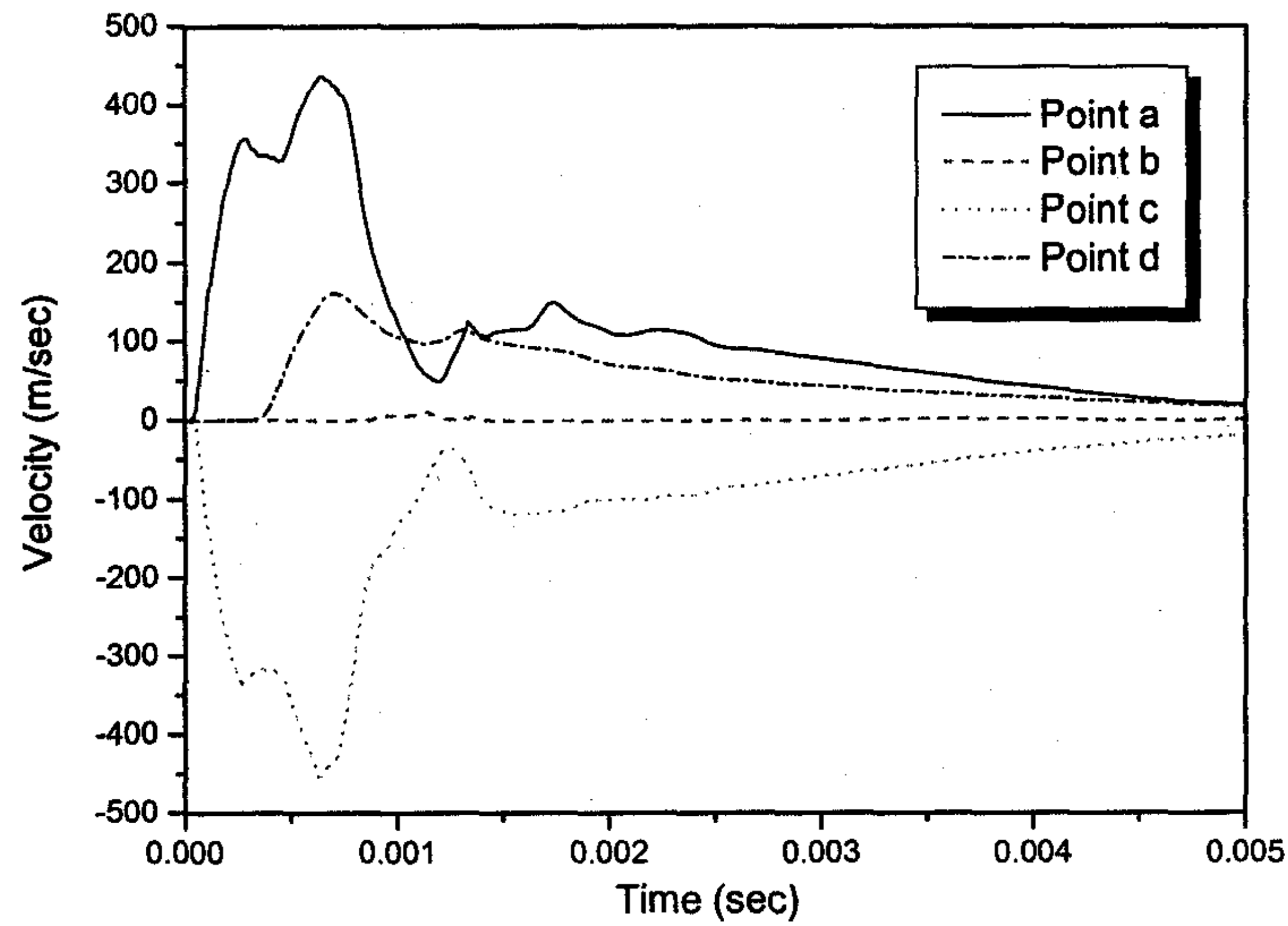
Fig. 3.2.3.16 공간격의 변화에 따른 변위의 변화



(a) 공간격 0.5 m



(b) 공간격 0.75 m



(c) 공간격 1.0 m

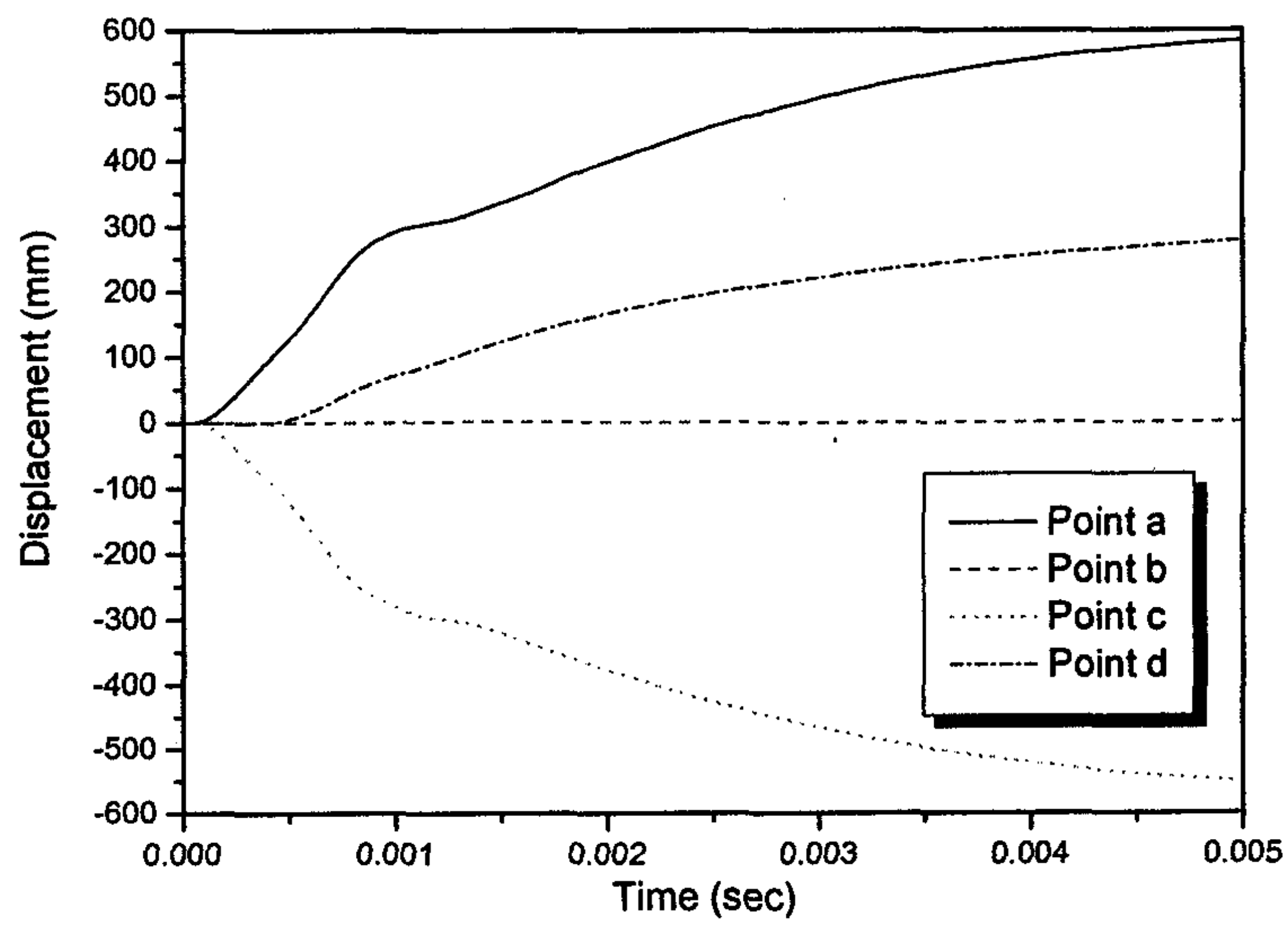
Fig. 3.2.3.17 공간격의 변화에 따른 입자속도의 변화

(나) 지연시간의 변화에 따른 영향

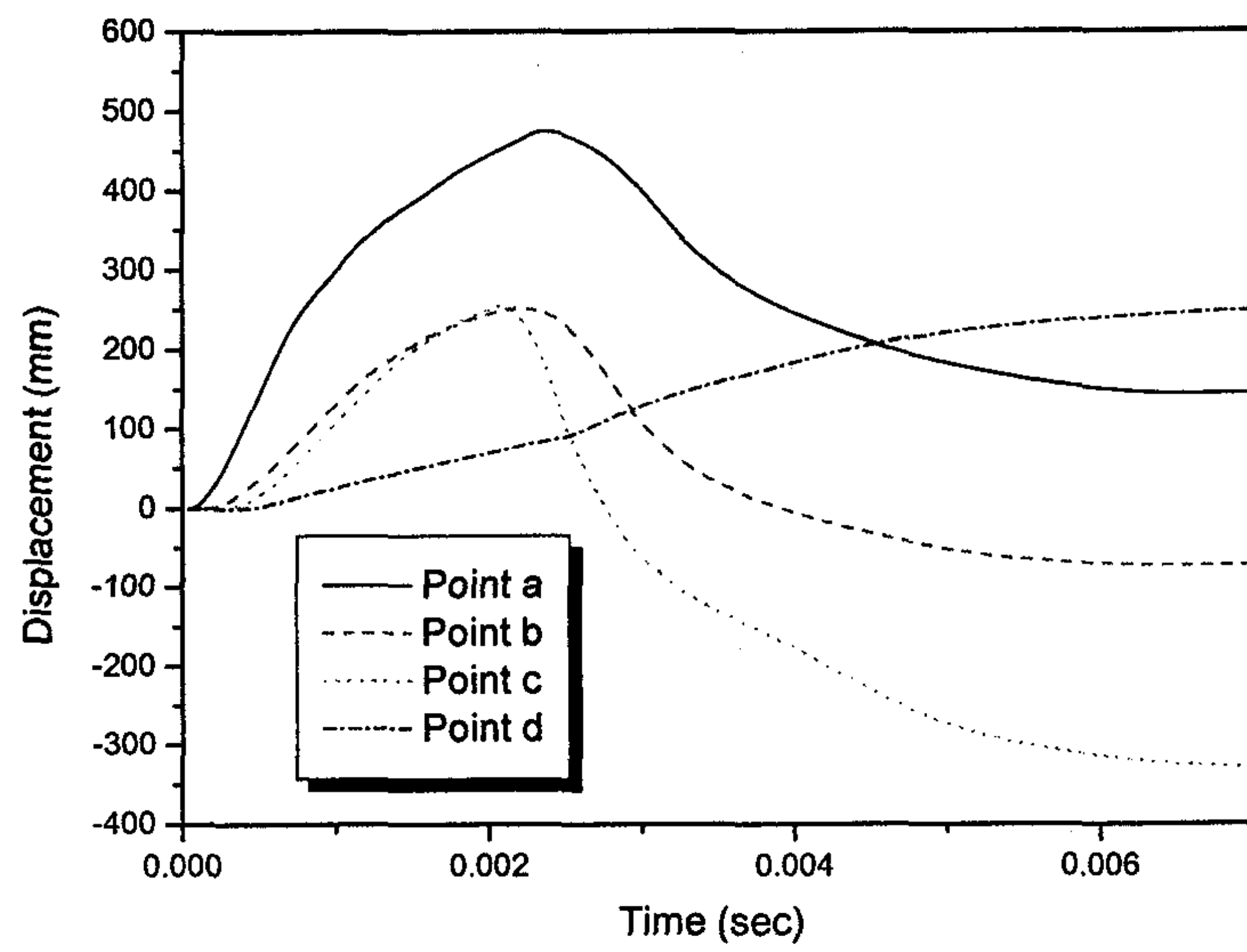
두 공의 발파시차가 없을 때와 2, 5, 10 ms의 시차를 가질 때의 변위 및 입자속도 그래프가 각각 Fig. 3.2.3.18, 3.2.3.19에 도시되어 있다. 발파공 간격은 1 m일 때를 기준으로 하였다.

변위 그래프인 Fig. 3.2.3.18을 보면, 10 ms의 시차를 가지는 경우(d), 첫 번째 공에서 발파가 일어났을 때 한 쪽 방향으로 변위가 치우쳐 발생하여 일정한 값에서 수렴하는 경향을 보이다가 두 번째 공에서 발파가 일어나면 다시 반대방향으로의 변위가 발생하여 결국 최종변위 상태에 이르는 양상을 보이게 된다. 한편 첫 번째 공 발파시 c 지점(두 번째 공 인접 지점)의 변위가 b 지점(중앙)의 변위보다 큰 이유는 두 번째 공의 영향으로 인해 공 내부(자유면)로의 변위가 발생하기 때문이다. 5 ms 나 2 ms의 시차를 가지는 경우에도 첫 번째 공의 발파에 의한 최대값의 도달 여부 차이만 있을 뿐 변위의 발생 경향은 10 ms의 경우와 동일하였다.

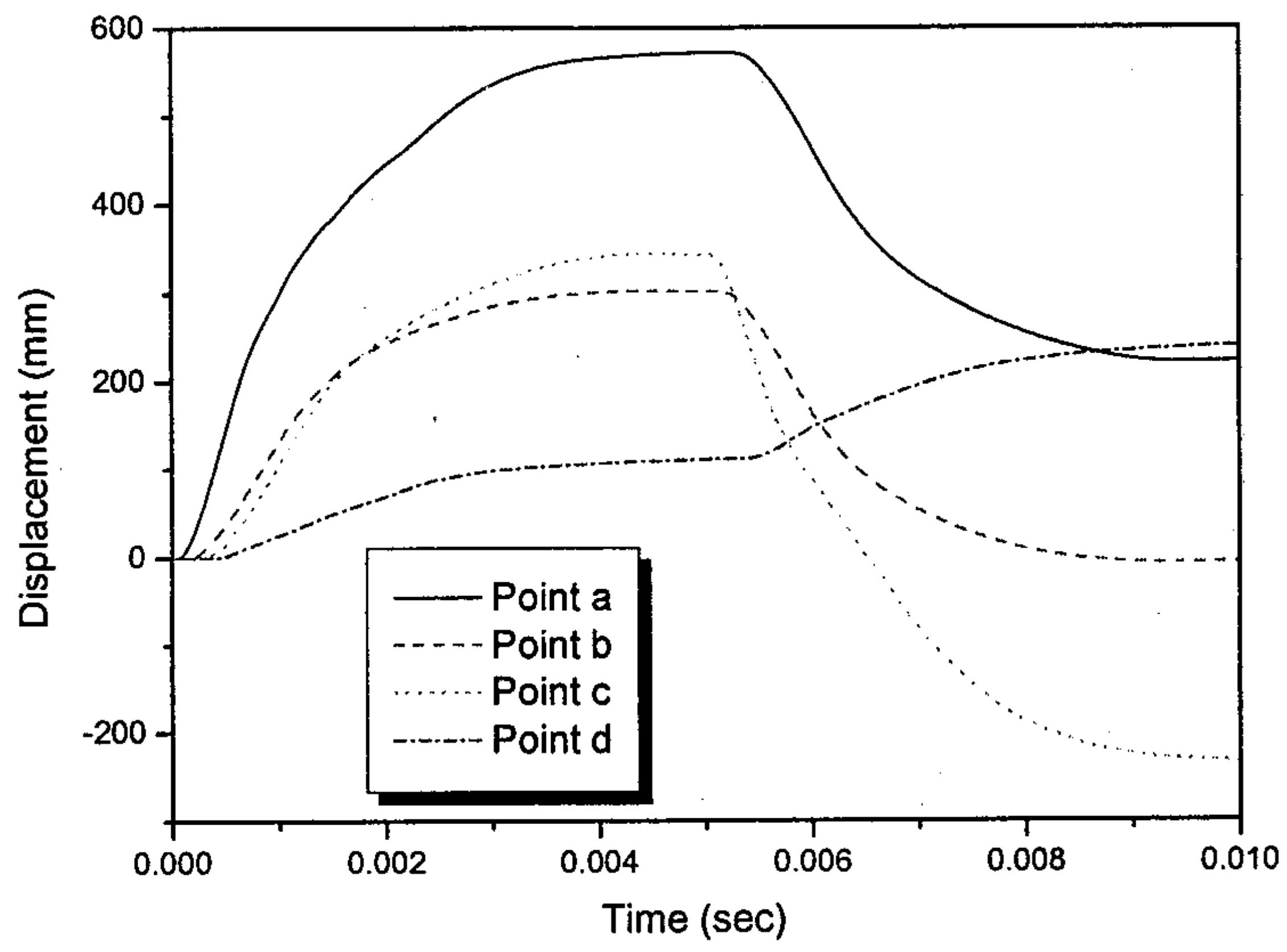
입자속도의 경우에도 경향은 비슷하여 첫 번째 공의 발파시 속도벡터가 한쪽 방향으로 치우쳤다가 두 번째 공의 발파시에는 다시 반대방향으로 향한 뒤(속도의 방향이 반대) 수렴하는 경향을 보인다. 발파시차가 없을 경우에는 두 공에서 동시에 발생하는 발파압의 중첩으로 인해 입자 속도 그래프의 초기 부분에 상호 간섭을 일으키는 현상이 일어났다. 시차의 간격에 따른 현저한 변화는 보이지 않았다.



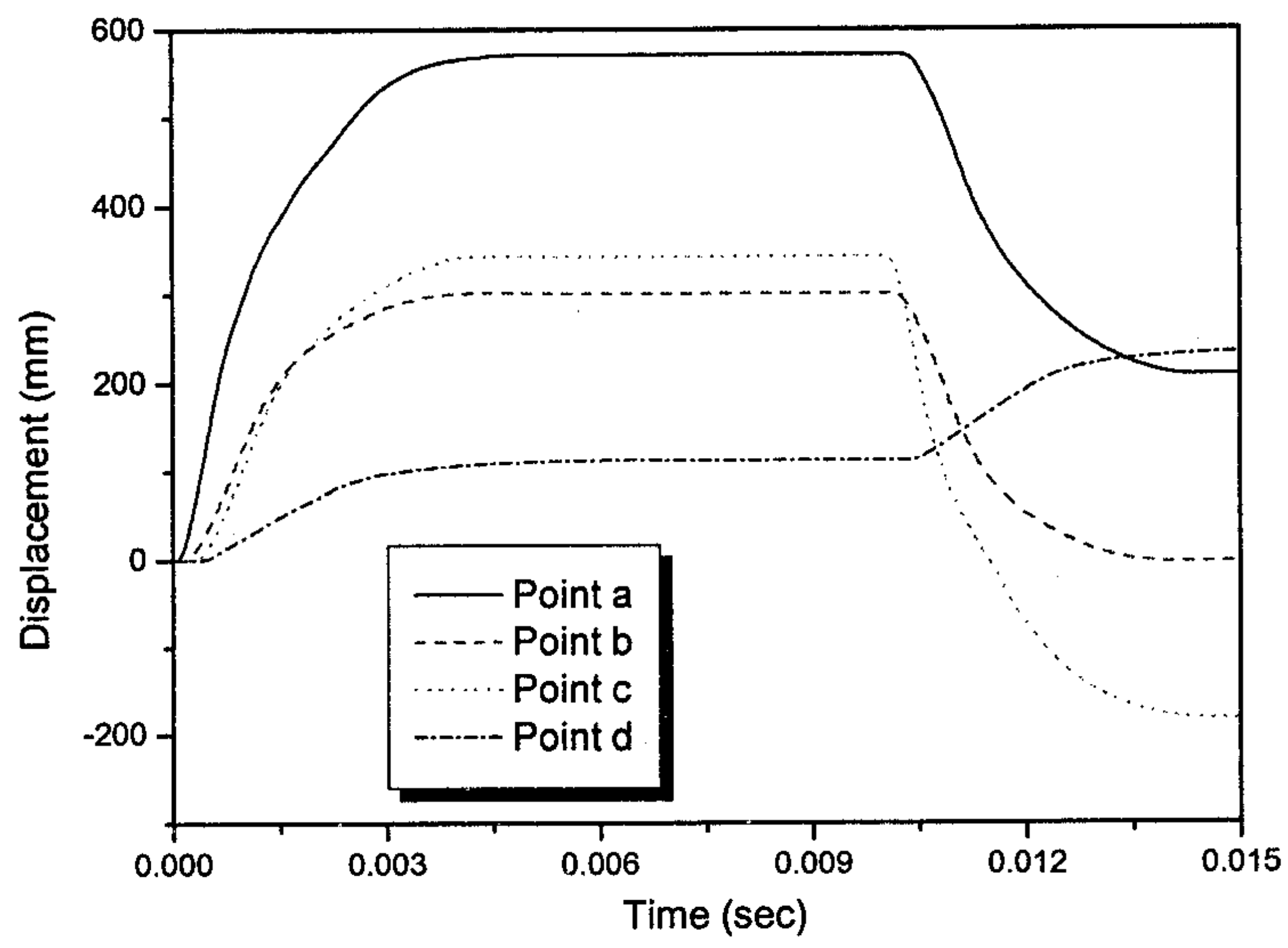
(a) 발파시차가 없을 경우



(b) 발파시차가 2 ms일 경우

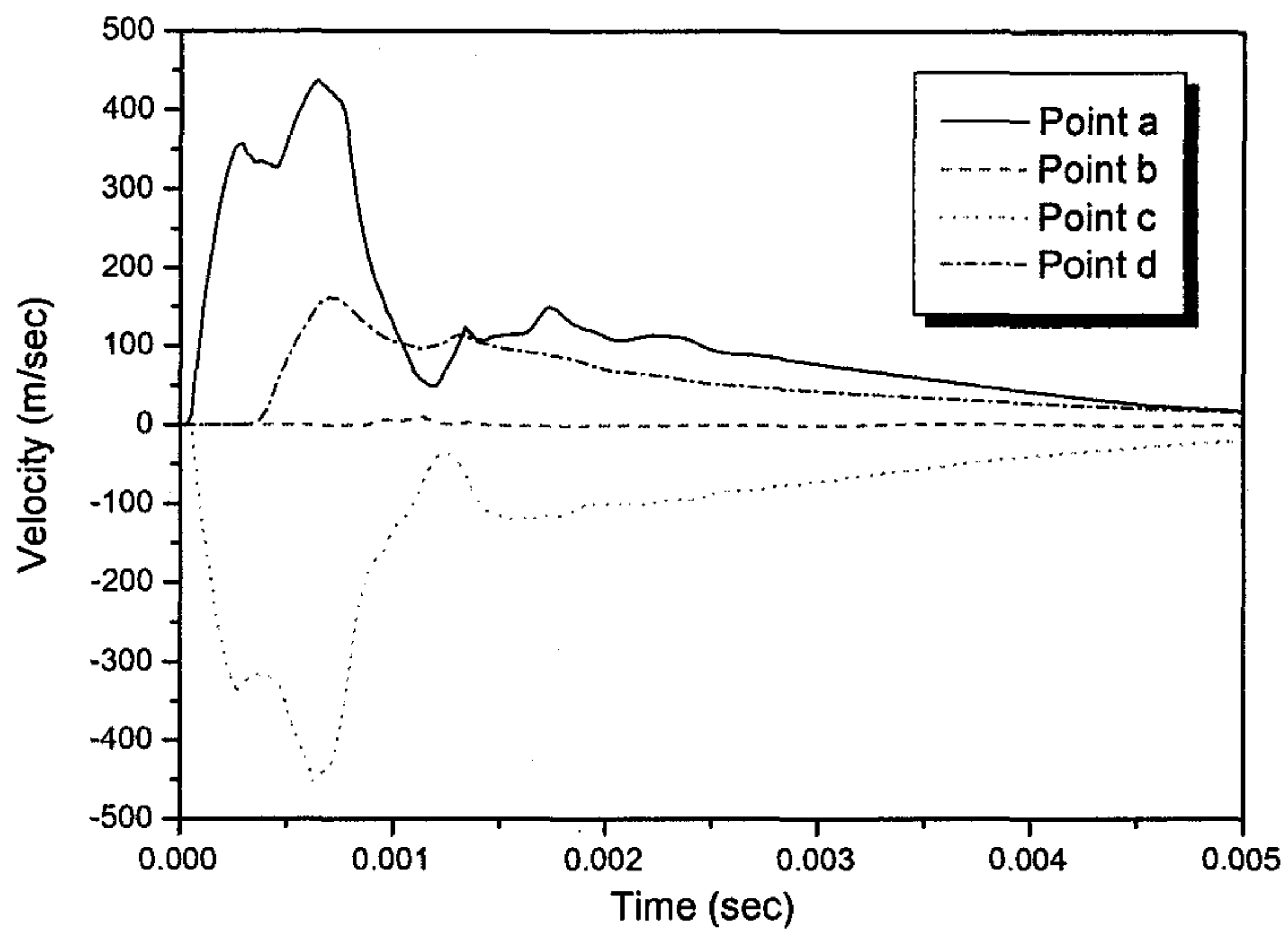


(c) 발파시차가 5 ms일 경우

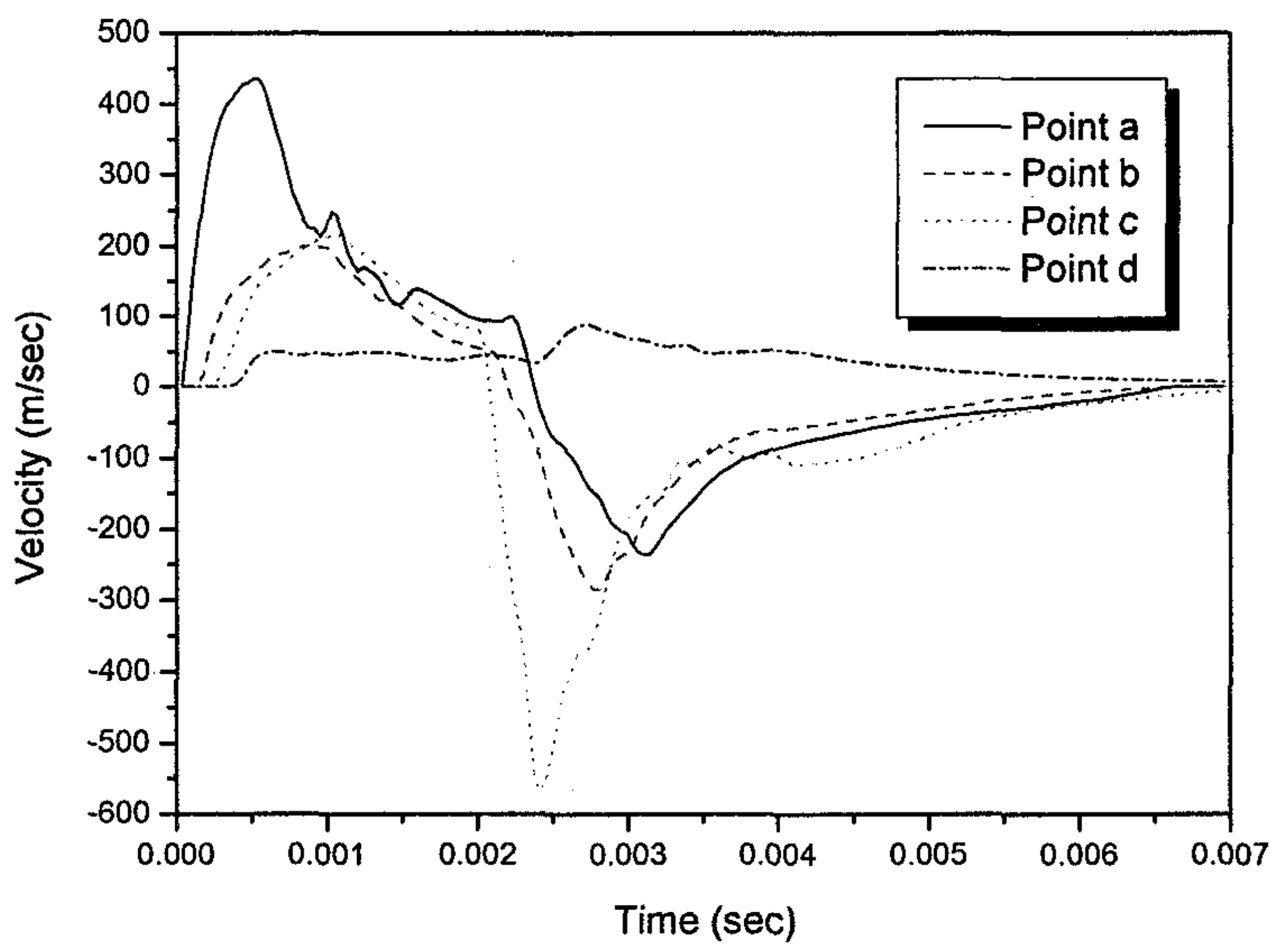


(d) 발파시차가 10 ms일 경우

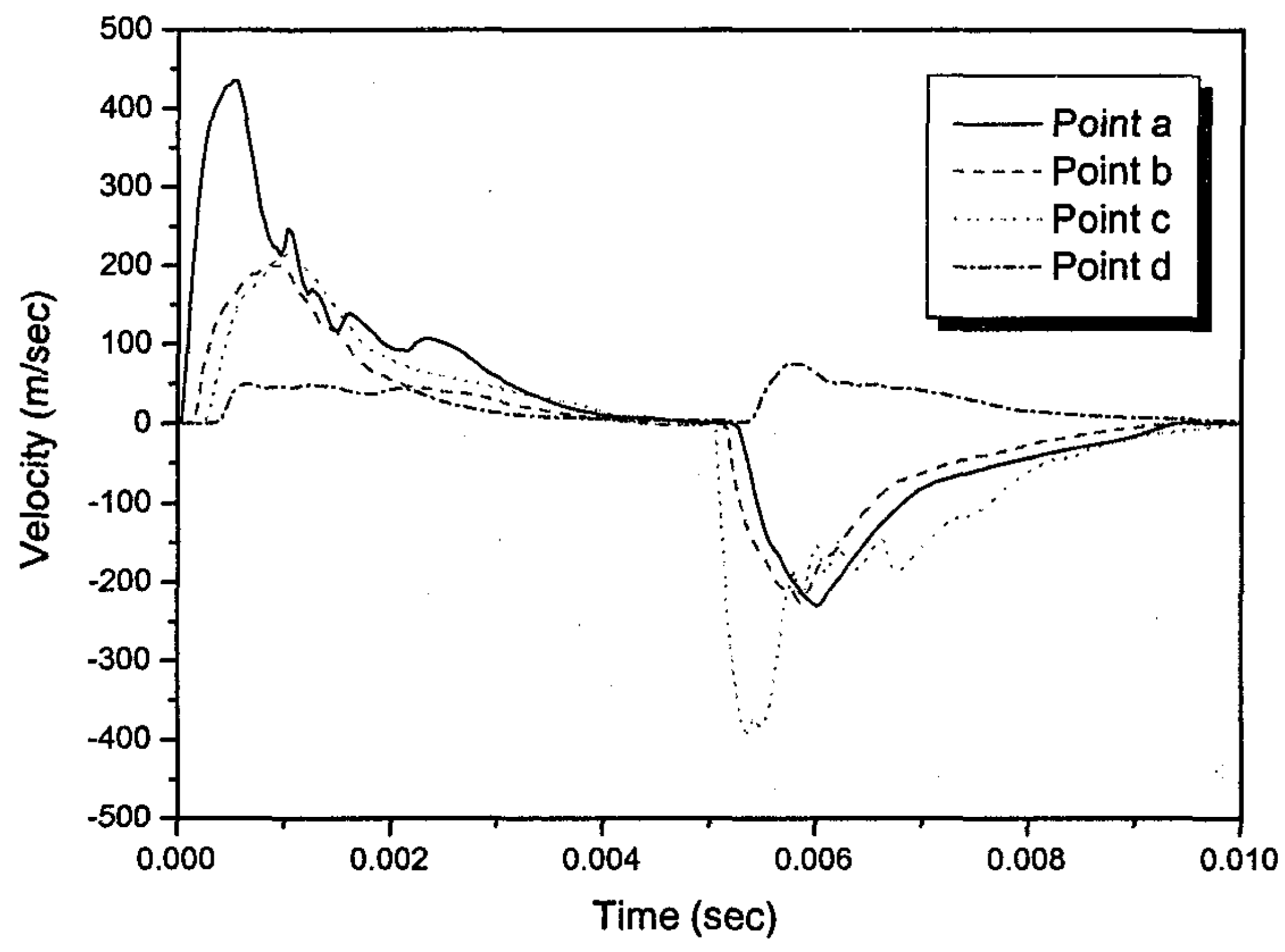
Fig. 3.2.3.18 발파시차의 변화에 따른 변위의 변화



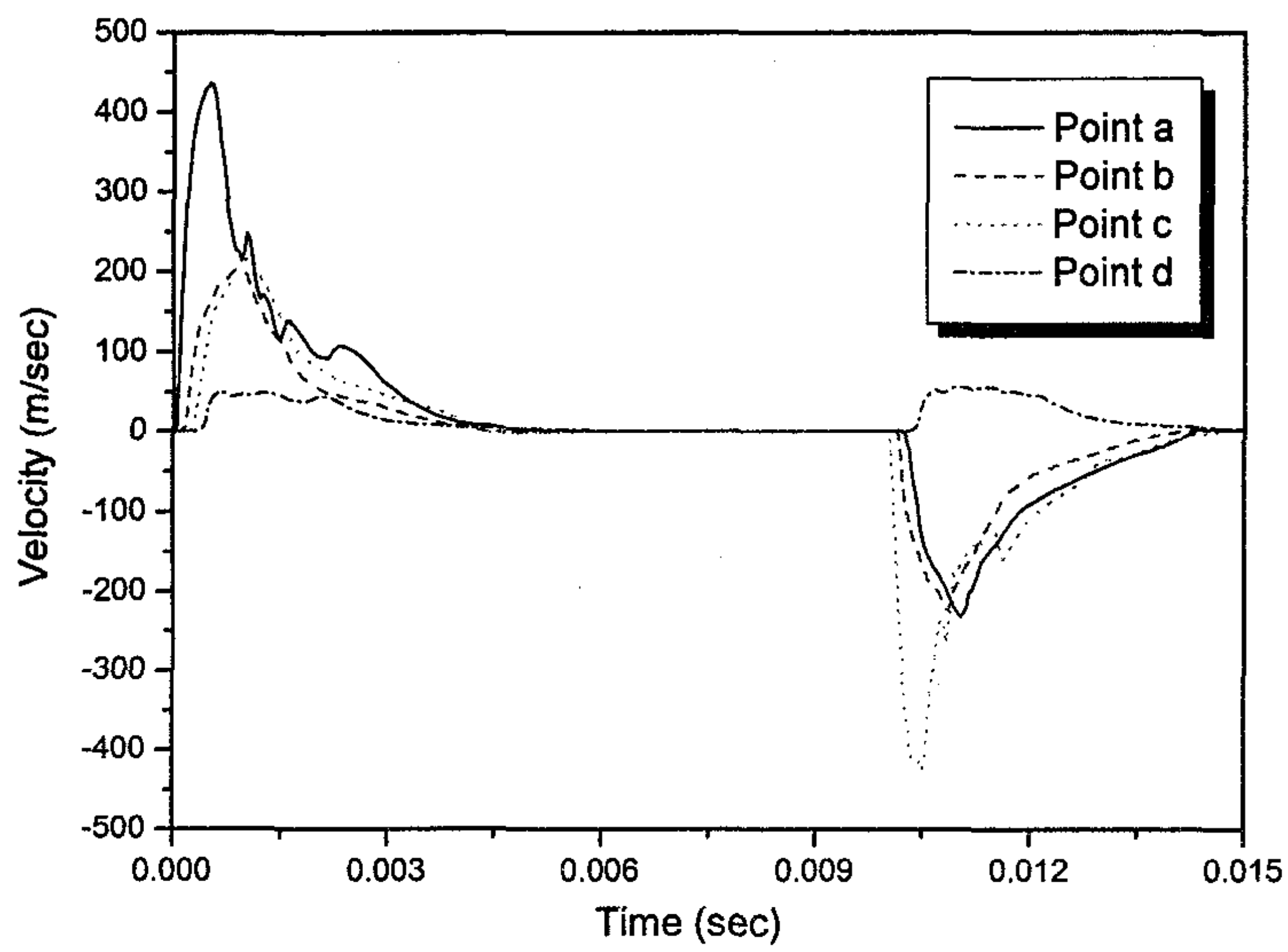
(a) 발파시차가 없을 경우



(b) 발파시차가 2 ms일 경우



(c) 발파시차가 5 ms일 경우



(d) 발파시차가 10 ms일 경우

Fig. 3.2.3.19 발파시차의 변화에 따른 입자속도의 변화

4. Implicit type 및 explicit type의 개별요소 모델링 특성 비교 분석

가. 서론

현지암반은 절리, 층리, 단층, 틈 등 구조적인 불연속면을 포함하고 있다. 절리와 같은 불연속면이 발달하여 있는 암반의 역학적 거동은 암석 자체의 역학적 특성보다는 불연속면의 역학적 특성에 의해 더 많은 영향을 받으며, 암반에 관련된 공학적 문제들을 처리하는데 있어서 이러한 불연속면들을 이해하고 해석하는 문제는 매우 중요하다.

불연속암반의 역학적 거동해석을 위하여 slide line을 사용하는 유한차분 해석방법이나, 절리요소나 절리의 영향이 고려된 요소를 사용하는 유한요소 해석방법 등이 사용되어 왔다. 그러나 이들 방법은 연속체역학의 범주 내에서 문제를 다루므로 불연속면으로 인한 큰 변위가 예측되는 문제들에 적용하기에는 어려운 점이 있다. 한편 강성 블록 개념에 기초한 개별요소법(Distinct Element Method)은 심도가 깊지 않거나 자유면 부근의 절리가 매우 발달한 불연속체의 모델링 경우 매우 능률적이어서 불연속 암반을 위한 새로운 수치해석 방법으로 정착되어가고 있다.

개별요소법은 서로 다른 알고리즘에 기초하여 개발된 두 가지 형태의 수치해석 방법으로 발전해 왔다. 하나는 유한요소법과 같이 강성매트릭스를 구성하여 implicit 알고리즘을 이용하여 해를 구하는 방법을 채택하고 있고 다른 하나는 시간 적분에 의한 explicit 알고리즘으로 해를 구하는 방법을 채택하고 있다. 강성 매트릭스를 형성하여 처리하는 implicit type에 의한 접근 방법은 Belytschko, Plesha 등에 의해 절리 암반의 안정성 해석이나 균열문제에 적용된 바 있으며(Belytscho et. al, 1984; Plesha, 1983), explicit type 해석방법은 Cundall 에 의해 개념이 정립되어 개발 초기 속도가 느리고 용량이 크지 못한 컴퓨터에서의 처리를 위해 기계어를 사용하여 첫 소프트웨어가 발표된 이후 UDEC에 이르기까지 개선이 이루어져 왔다(Cundall, 1971, 1974, 1980). 이와 같은 강성 블록 개념에 기초를 둔 접근방법은 관련 분야에 이용되기 시작하여 BLOCK, DBMS, CBLOCK 등 여러 컴퓨터 모델이 개발되었다.

본 연구에서는 두 가지 해석 방법의 모델링 특성을 고찰하기 위하여 Plesha 등에 의해 개발된 implicit 알고리즘에 기초한 NURBM과 저자에 의해 개발된 explicit 알고리즘에 기초한 CBLOCK을 이용하여 불연속체 암반의 기초적인 거동 특성을 수치해석적으로 고찰하고 모델링상의 문제점들을 비교 분석하였다.

나. 이론적 배경

개별요소법에 의한 수치해석에 있어서 절리 암반은 절리면에 의해 구별되는 요소 (distinct element)의 집합체로 모델링 된다. 각 요소는 강성체로 간주되나 인접한 요소들 사이의 겹침(overlap)으로 인한 수치적 접촉을 허용한다. 본 연구에 사용된 수치해석 프로그램은 NURBM과 CBLOCK으로서 각각 implicit 및 explicit 알고리즘에 기초하고 있으며, 각 해석방법의 특성은 다음과 같다.

(1) IMPLICIT 알고리즘에 기초한 NURBM

NURBM에서 블록과 블록 사이의 상호 작용은 edge-to-edge 접촉에 의해 형성되는 것으로 가정한다. 접촉면상의 수직 및 접선방향의 변위 g_n, g_t 는 Fig. 3.3.4.1에서 slave node의 변위를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\underset{\sim}{g} = \underset{\sim}{B} \underset{\sim}{\hat{u}} \quad (3.2.4.1)$$

여기서,

$$\underset{\sim}{g}^T = [g_n(\hat{x}), g_t(\hat{x})] \quad (3.2.4.2)$$

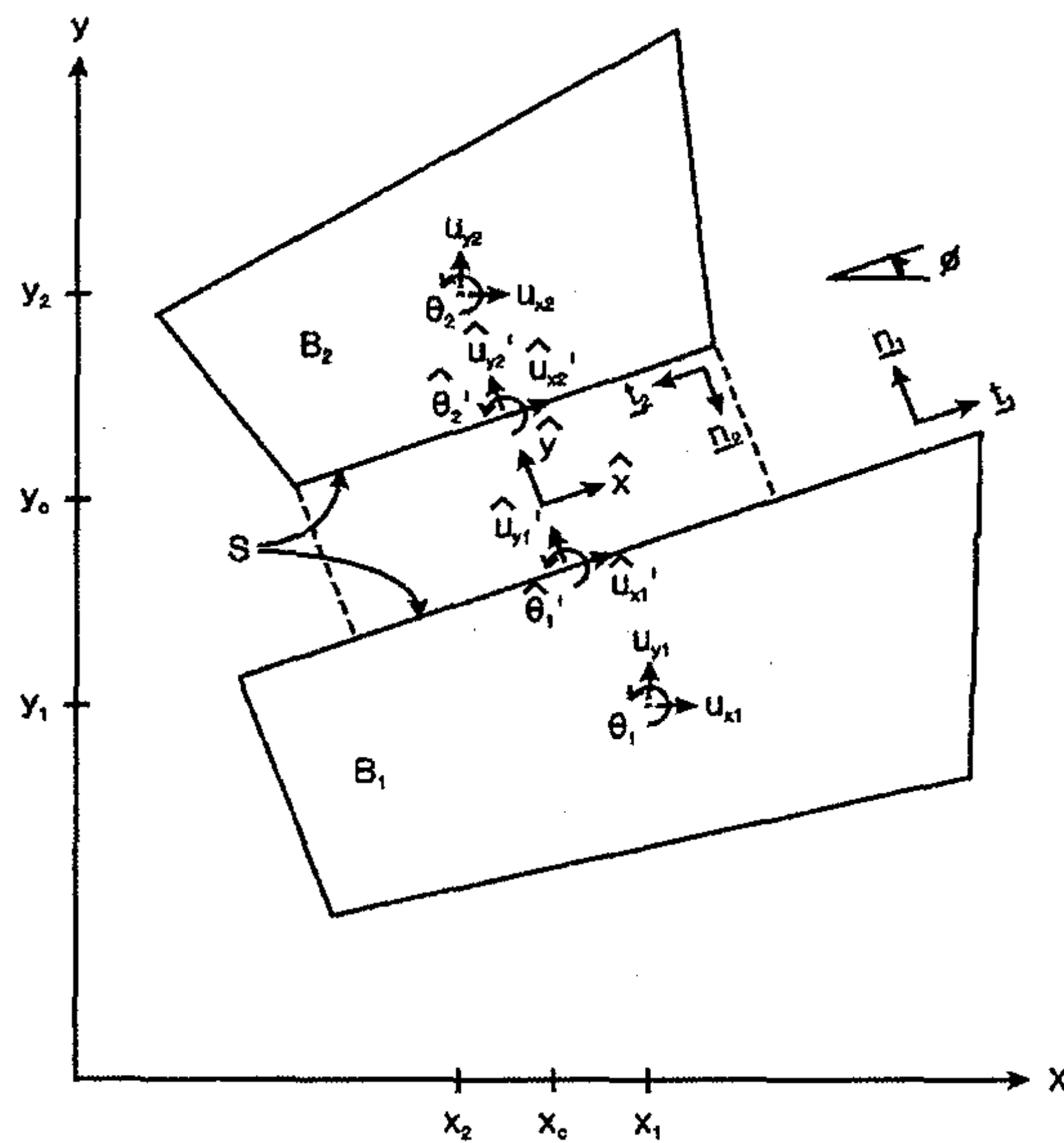


Fig. 3.3.4.1 Edge-to-edge contact

$$\underset{\sim}{\hat{u}}^T = [\hat{u}_{x1}, \hat{u}_{y1}, \hat{\theta}_1, \hat{u}_{x2}, \hat{u}_{y2}, \hat{\theta}_2] \quad (3.2.4.3)$$

$$\underset{\sim}{B} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -\hat{x} & 0 & 1 & \hat{x} \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2.4.4)$$

표면력을 절리 강성으로 표시하면,

$$\underset{\sim}{\sigma} = \underset{\sim}{k} \underset{\sim}{B} \underset{\sim}{\hat{u}} \quad (3.2.4.5)$$

여기서,

$$\underset{\sim}{\sigma}^T = [\sigma_n, \sigma_t] \quad (3.2.4.6)$$

$$\underset{\sim}{k} = \begin{pmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{pmatrix} \quad (3.2.4.7)$$

S 상의 표면력 분포는 다음 식과 같이 slave node에서의 등가 절점력으로 변환할 수 있다.

$$\int_{l_s} \underset{\sim}{B}^T \underset{\sim}{\sigma} d\hat{x} = \underset{\sim}{\hat{f}} \quad (3.2.4.8)$$

여기서,

$$\underset{\sim}{\hat{f}}^T = [\hat{f}_{x1}, \hat{f}_{y1}, \hat{m}_1, \hat{f}_{x2}, \hat{f}_{y2}, \hat{m}_2] \quad (3.2.4.9)$$

(3.2.4.8)식을 절점 변위로 표현하면,

$$\underset{\sim}{\hat{k}} \underset{\sim}{\hat{u}} = \underset{\sim}{\hat{f}} \quad (3.2.4.10)$$

여기서,

$$\underset{\sim}{\hat{k}} = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 & -k_s & 0 & 0 \\ & k_n & 0 & 0 & k_n & 0 \\ & & \frac{k_n l^2}{12} & 0 & 0 & -\frac{k_n l^2}{12} \\ & & & k_s & 0 & 0 \\ \text{symmetric} & & & & k_n & 0 \\ & & & & & \frac{k_n l^2}{12} \end{bmatrix} \quad (3.2.4.11)$$

(3.2.4.10)식을 master node 변위로 표현하면,

$$\begin{pmatrix} \underset{\sim}{T}^T & \underset{\sim}{\hat{k}} & \underset{\sim}{T} \end{pmatrix} \underset{\sim}{u} = \underset{\sim}{f} \quad (3.2.4.12)$$

$$\underset{\sim}{u}^T = [u_{x1}, u_{y1}, \theta_1, u_{x2}, u_{y2}, \theta_2] \quad (3.2.4.13)$$

$$\underset{\sim}{f}^T = [f_{x1}, f_{y1}, m_1, f_{x2}, f_{y2}, m_2] \quad (3.2.4.14)$$

$$\underset{\sim}{T} = \begin{bmatrix} c & s & (-\bar{y}_1 c + \bar{x}_1 s) \\ -s & c & (\bar{y}_1 c + \bar{x}_1 s) \\ 0 & 0 & 1 \\ & & & c & s & (-\bar{y}_2 c + \bar{x}_2 s) \\ & & & -s & c & (\bar{y}_2 c + \bar{x}_2 s) \\ & & & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2.4.15)$$

$$\bar{x}_I = x_c - x_I \quad (3.2.4.16a)$$

$$\bar{y}_I = y_c - y_I \quad (3.2.4.16b)$$

$$C = \cos\theta, S = \sin\theta \quad (3.2.4.16c)$$

평형방정식은 다음과 같이 유한요소법과 같은 전형적인 형태로 표시된다.

$$\sum_s \left(\begin{array}{c} \tilde{T}^T \\ \tilde{\sim} \end{array} \tilde{k} \begin{array}{c} \tilde{T} \\ \tilde{\sim} \end{array} \right)^s \tilde{u} = \tilde{f} \quad (3.2.4.17)$$

각 요소와 전체 시스템의 질점 매트릭스는 질량 m 과 모멘트 I 로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M_I = \begin{bmatrix} m_I & & \\ & m_I & \\ & & I_I \end{bmatrix} \quad (3.2.4.18)$$

$$\tilde{M} = \sum_I \tilde{M}_I \quad (3.2.4.19)$$

(2) EXPLICIT 알고리즘에 기초한 CBLOCK

CBLOCK에서 요소간의 접촉은 요소의 절점과 상대 요소의 면과의 상호 위치로부터 고려되며 모든 변형은 절점과 면과의 국부적인 접촉에 의한다고 가정한다. 요소 경계를 이루는 절리면의 stiffness에 의한 변형을 고려한다. 요소간의 상호작용은 절점과 요소면의 접촉조건에 따라 이를 지배하는 구성방정식(friction and stiffness laws)에 의해 결정된다. 구성방정식은 응력과 변형률의 개념보다는 힘과 변위의 개념을 사용하여 요소간의 상호작용을 나타내는 관계로 구성되며 각 요소에 대해 계산된 합력과 모멘트로부터 요소들의 반응이 계산된다. 이 때 각 요소의 정적 및 동적응력 조건에 대한 반응은 시스템을 지배하는 미분방정식의 해를 수치적으로 구함으로써 얻어진다. Fig. 3.3.4.2는 계산과정의 모식도이다.

블록과 블록 사이의 상호 작용은 edge-to-corner 접촉에 의해 형성되는 것으로 가정한다. 접촉력의 계산은 Fig. 3.3.4.3과 같은 접촉 상태에서 다음과 같이 계산된다

접촉이 발생하면, 접촉점의 주어진 시간 간격에 대한 변위는,

$$\Delta Y_c = \Delta Y_i - \Delta Y_j + \Delta\theta_j (X_c - X_j) - \Delta\theta_i (X_c - X_i) \quad (3.2.4.20)$$

$$\Delta X_c = \Delta X_i - \Delta X_j - \Delta\theta_i (Y_c - Y_i) + \Delta\theta_j (Y_c - Y_j) \quad (3.2.4.21)$$

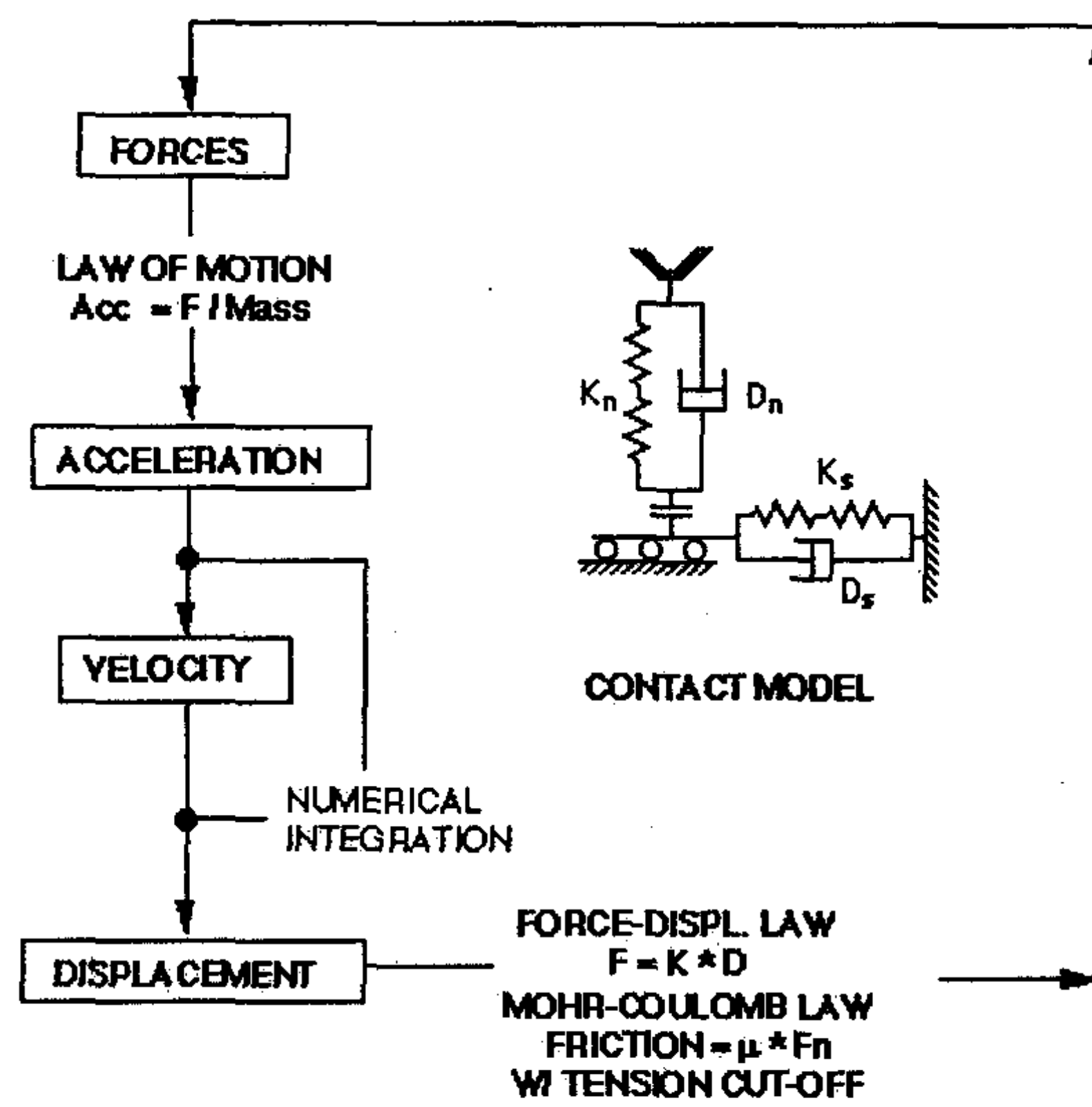


Fig. 3.3.4.2 Calculation cycle of CBLOCK

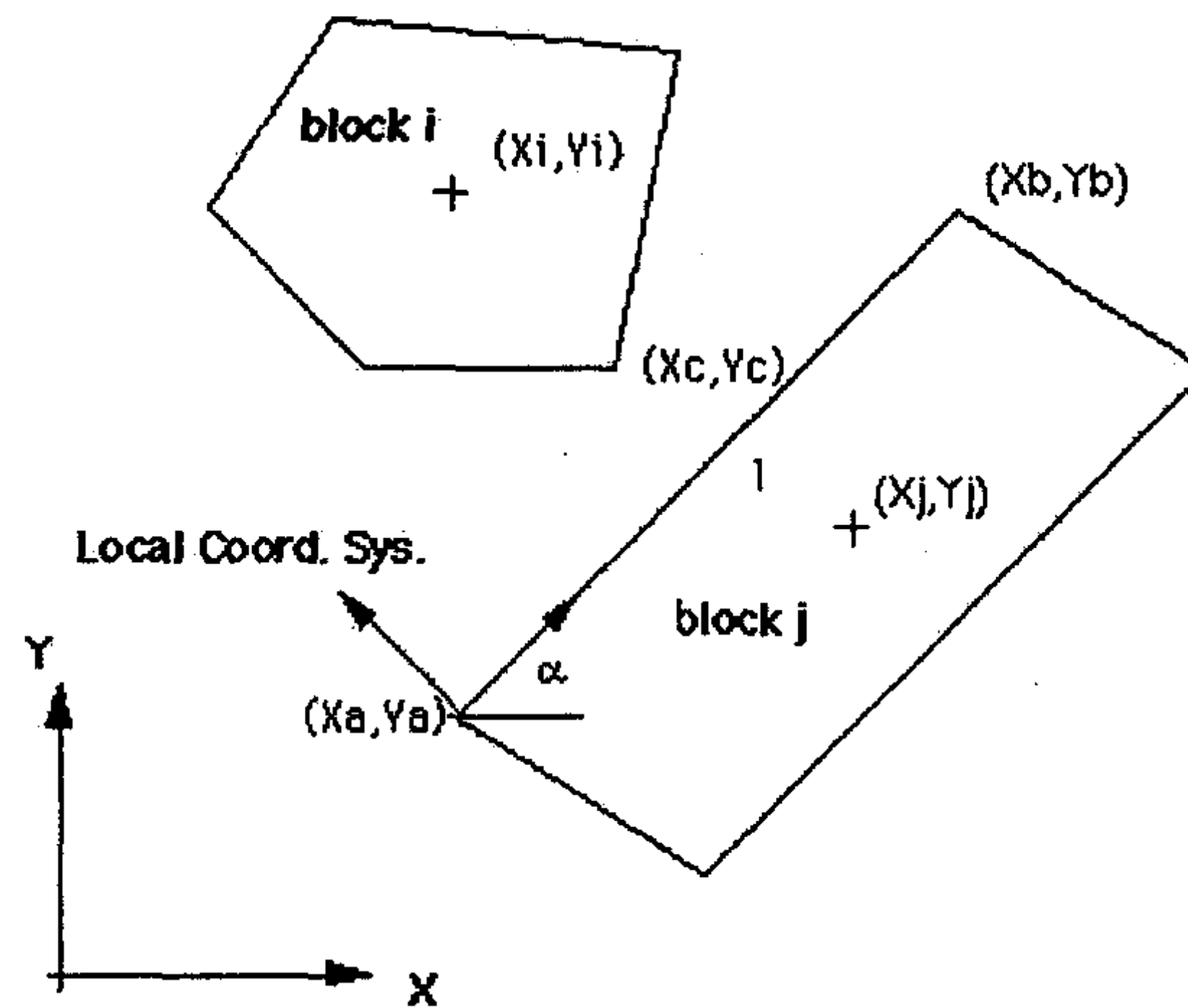


Fig. 3.3.4.3 Corner-to-edge contact

블록 j의 변에 대한 수직 및 접선 변위는,

$$\Delta s_c = \Delta X_c \cos \alpha + \Delta Y_c \sin \alpha \quad (3.2.4.22)$$

$$\Delta n_c = \Delta Y_c \cos \alpha - \Delta X_c \sin \alpha \quad (3.2.4.23)$$

수직 및 접선력은,

$$F_n = F_n - \Delta n k_n ; D_n = -\Delta n \beta_n \quad (3.2.4.24)$$

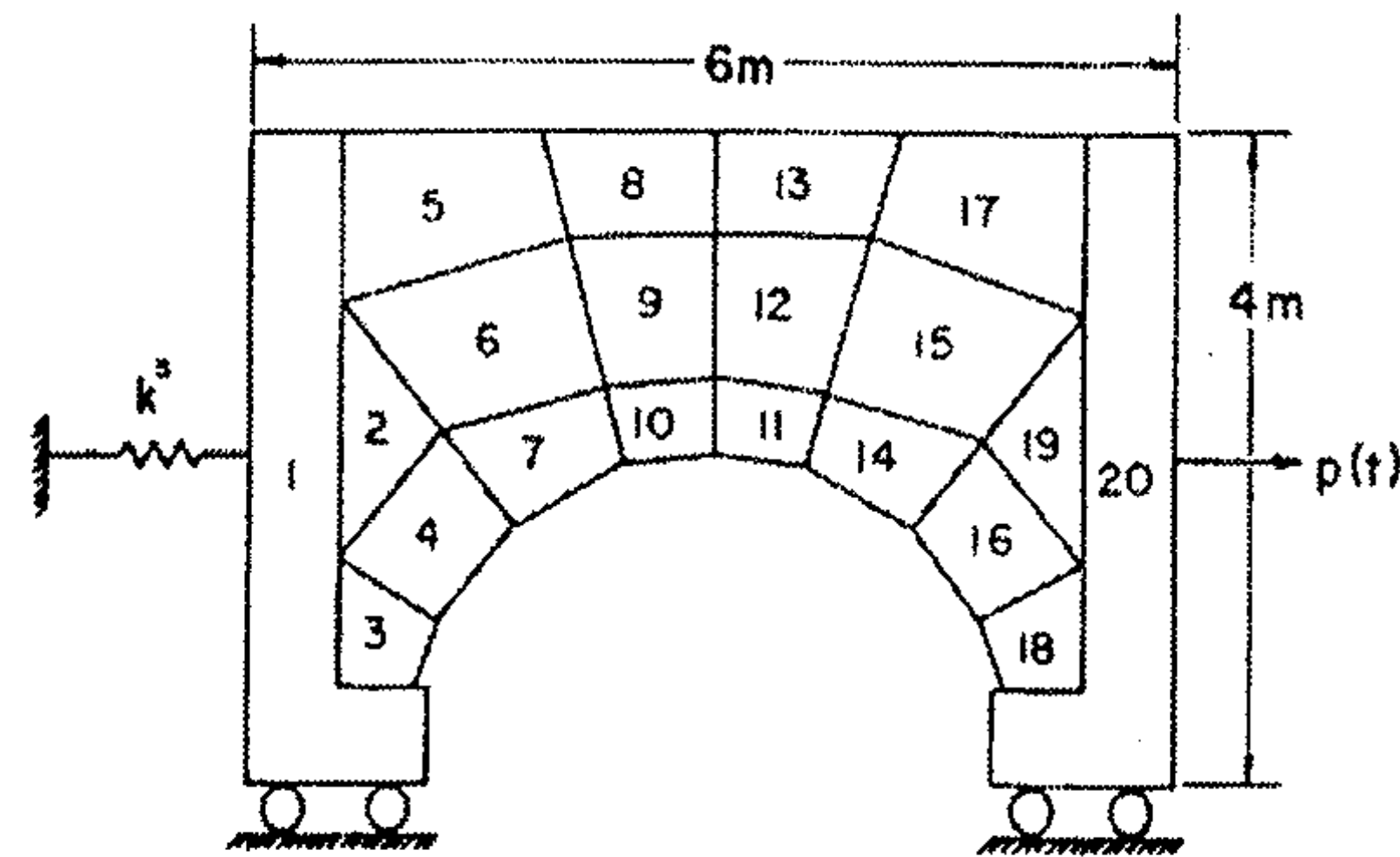
$$F_s = F_s + \Delta s k_s ; D_s = \Delta s \beta_s \quad (3.2.4.25)$$

$F = \text{spring}$ for ce ; $D = \text{dashpot}$ for ce ;
 $k, \beta = \text{spring}$ and dashpot constant

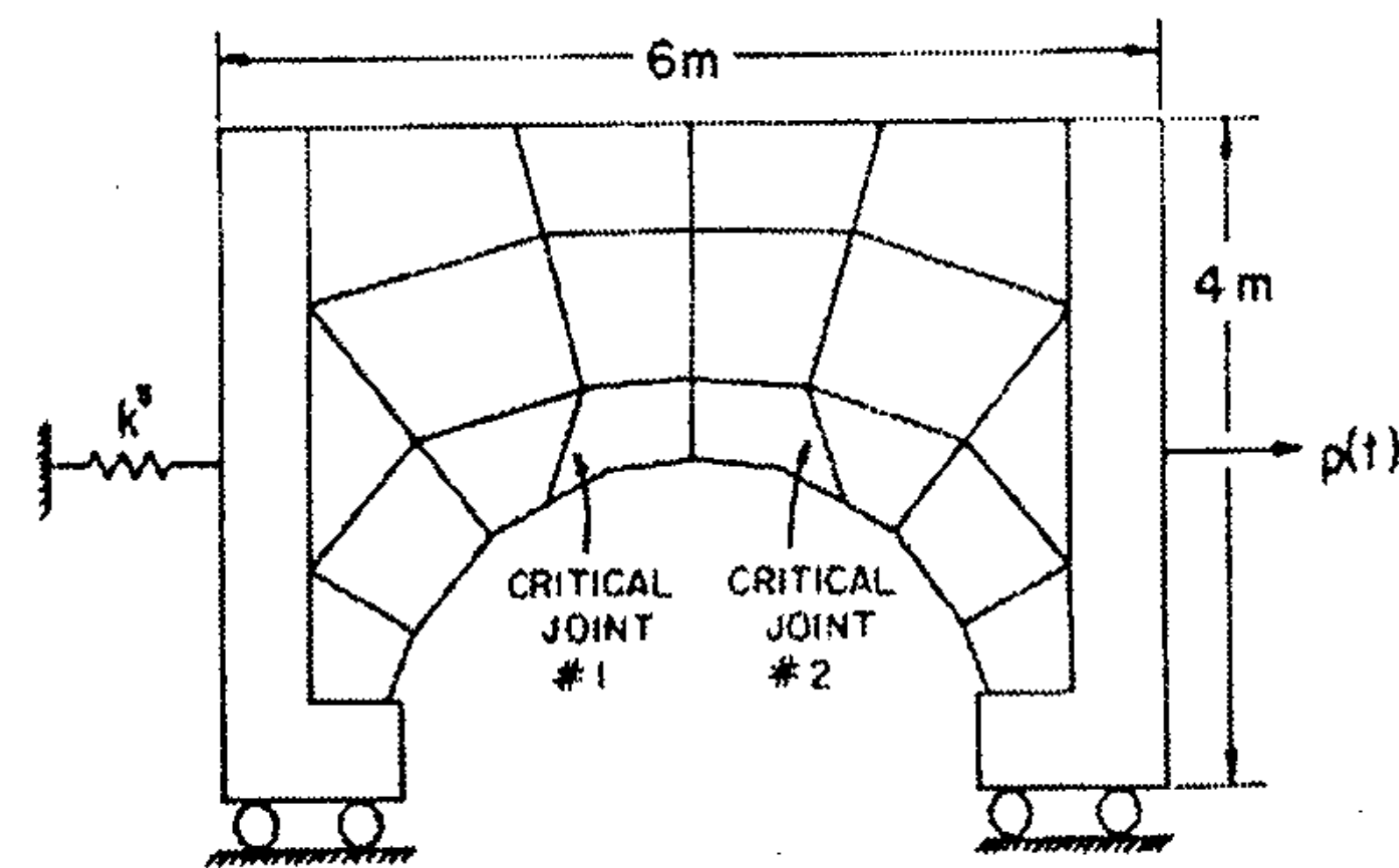
한 블록에 대해 각 접촉점에서 발생한 접촉력을 모두 합하고 이로부터 주어진 시간 간격에 대한 블록의 운동이 계산되며 새로운 변위가 발생한 후 변화된 접촉 상태에 따라 계산이 반복된다.

다. 해석에 사용된 예제 및 입력변수

Implicit 및 explicit 알고리즘에 기초한 수치해석모델의 모델링 특성을 비교 분석하기 위하여 사용된 예제는 Belytschko 등이 사용하였던 Fig. 3.3.4.4와 같은 간단한 형상을 가진 두 가지 아치 터널 형태이다(Belytschko et al, 1984).



a) Stable arch tunnel (P1)



b) Unstable arch tunnel (P2)

Fig. 3.3.4.4 Examples of arch tunnel

Table 3.3.4.1은 기본 계산에 사용된 입력변수들로서 두 형태의 예제에 공통적으로 적용되었고 Table 3.3.4.2는 동적 경계조건에 대한 입력변수이다.

Table 3.3.4.1. Model parameters

COMMON PARAMETERS :

Density (ρ)	2.0 g/cm ³
Friction Coefficient(μ)	0.5
Gravity (G_y)	1,000 cm/s ²

JOINT PROPERTIES :

CASE J1 $K_n / K_s = 320$	
Normal Stiffness (K_n)	32 GPa/cm
Shear Stiffness (K_s)	0.1 GPa/cm
CASE J2 $K_n / K_s = 320$	
Normal Stiffness (K_n)	320 MPa/cm
Shear Stiffness (K_s)	1.0 MPa/cm
CASE J3 $K_n / K_s = 1$	
Normal Stiffness (K_n)	32 GPa/cm
Shear Stiffness (K_s)	32 GPa/cm
CASE J4 $K_n / K_s = 1$	
Normal Stiffness (K_n)	320 MPa/cm
Shear Stiffness (K_s)	320 MPa/cm

LOADING CONDITION :

- CASE L1 Two abutments are fixed in all direction
CASE L2 Left abutment is fixed and load is applied to the other: $F_x = 1.6$ Gdynes
-

Table 3.3.4.2. Model parameters for transient analysis

MATERIAL PROPERTIES :

DENSITY (ρ)	2.0 g/cm ³
GRAVITY (G_y)	1,000 cm/s ²
FRICTION COEFFICIENT (μ)	0.5
FRICTION ANGLE (ϕ)	26.6°
NORMAL STIFFNESS (K_n)	3.2 GPa/cm
SHEAR STIFFNESS (K_s)	10 MPa/cm
FOR ABUTMENT:	$K_n = 3.2$ GPa/cm
	$K_s = 0, \mu = 0$

LOADING CONDITION :

$$P(t) = -1/2 \rho g d^2 - A \sin at \quad 0 \leq t \leq 2T$$
$$-1/2 \rho g d^2 \quad t \geq 2T$$

$$1/2 \rho g d^2 = 160 \text{ Mdynes}$$

$$A = 80 \text{ Mdynes}$$

$$a = 1380 \text{ rad/s}$$

$$T = 0.0045 \text{ sec}$$

라. 결과 및 고찰

NURBM의 계산 결과 중에서 P2 절리 모델의 동적 경계조건에 대한 블록 거동은 Fig. 3.3.4.5와 같다. 아치 천장 부분 블록의 속도는 0.03초 후 약 6 cm/s로 계산되었으며, 자유낙하를 가정한다면 30 cm/s에 해당한다. CBLOCK 계산 결과의 예는

Fig. 3.3.4.6 및 Fig 7과 같다. P1, P2 절리모델에 대해 각각 0.87초 및 0.018초 후의 모습이다.

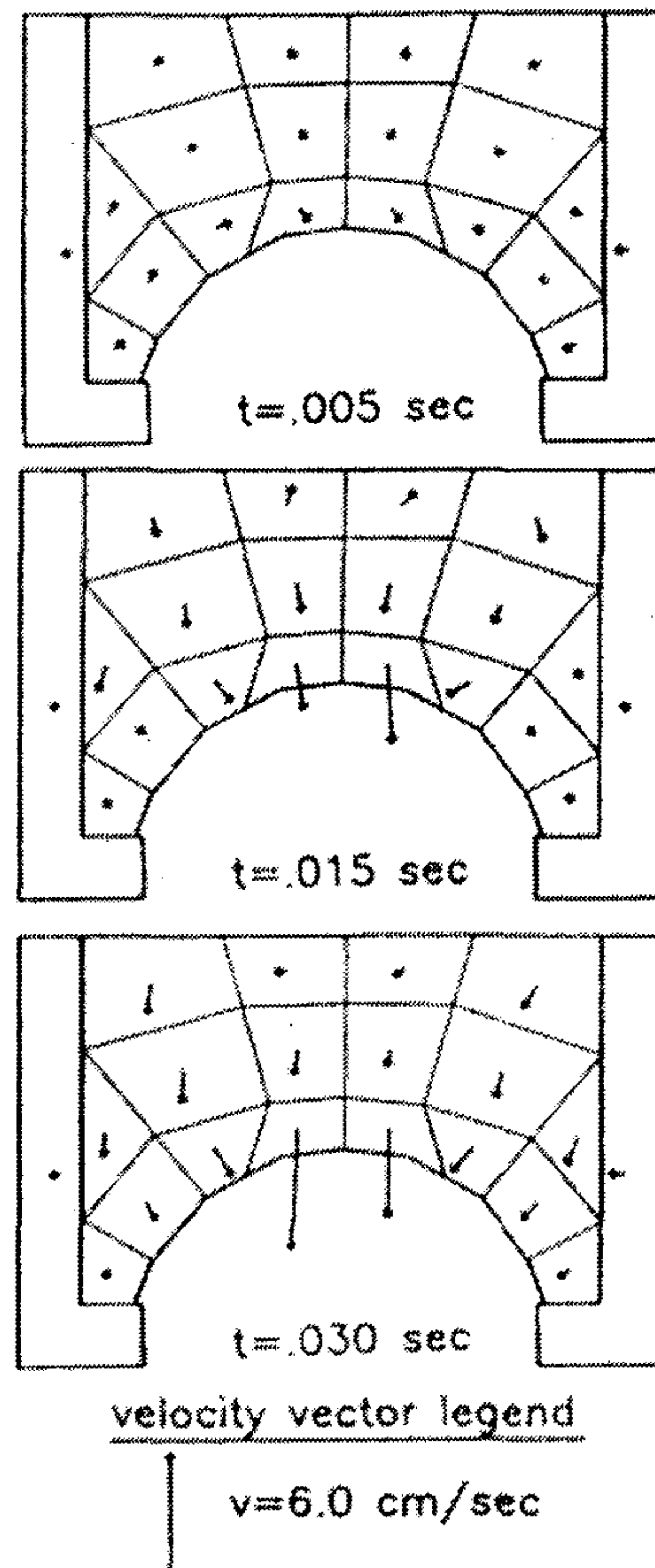


Fig. 3.3.4.5 Results of NURBM calculation for transient boundary condition

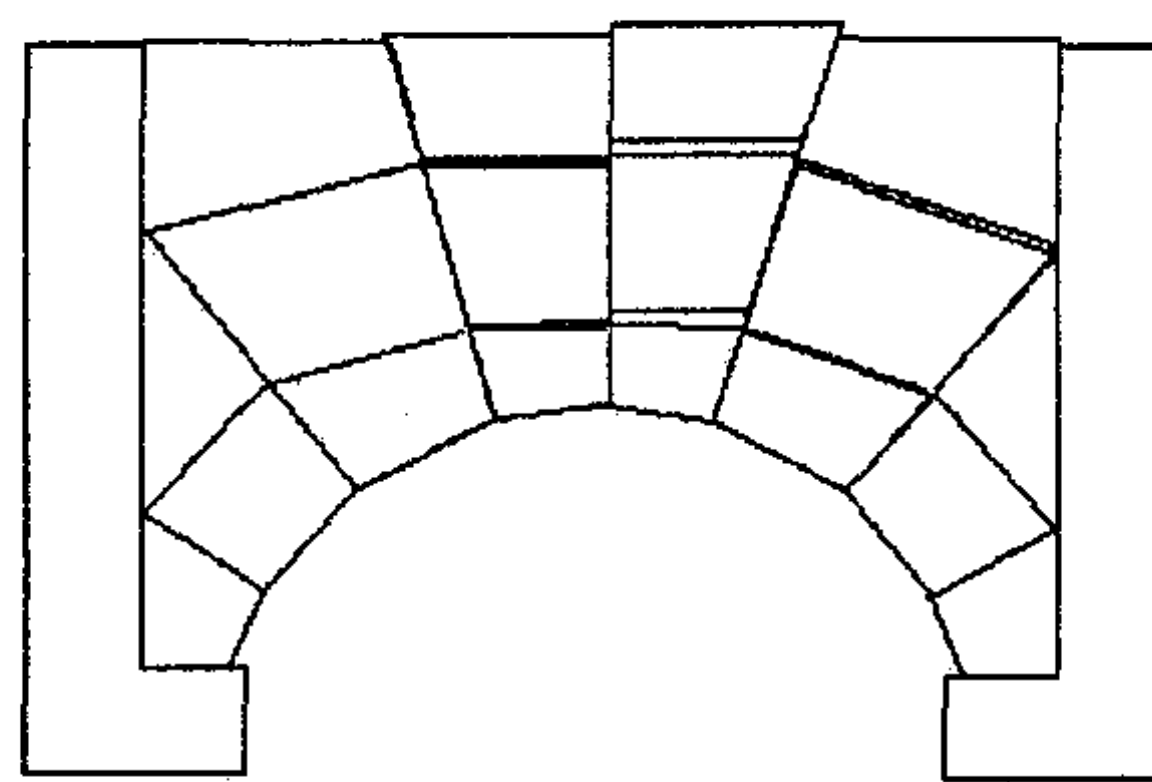


Figure Stable Arch Problem
 after 1000 cycle (0.87 sec)
 $P(t)=1.6 \text{ dynes}$

Fig. 3.3.4.6 Result of CBLOCK calculation for P1

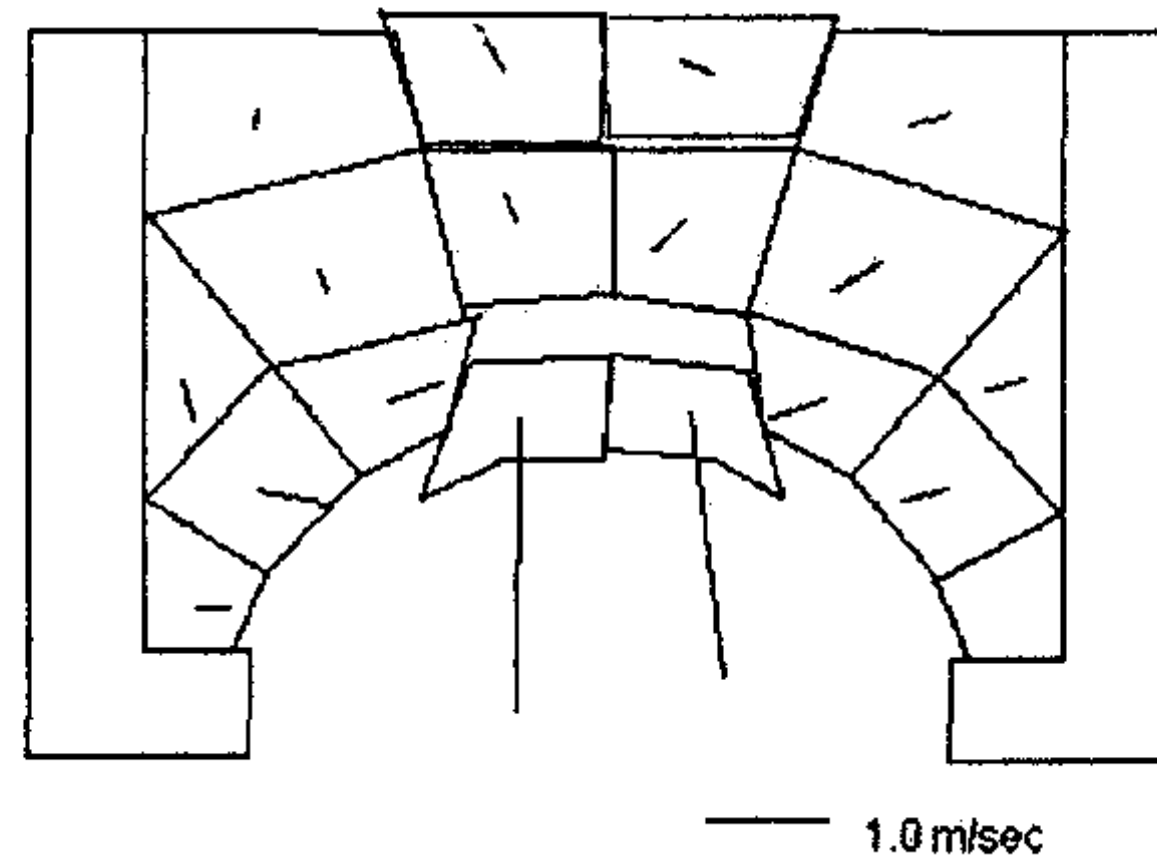


Figure Unstable Arch Problem after 18.2 ms

Fig. 3.3.4.7 Result of CBLOCK calculation for P2

두 수치해석방법의 계산 결과를 비교하기 위하여 하중 조건과, 절리 분포에 따른 절리의 인장파괴 및 미끄럼 파괴 양상을 Table 3.3.4.3에서 Table 3.3.4.7과 같이 정리하였다. NURBM의 결과는 마찰계수 초기 입력치와 미끄럼이 발생하지 않는 상한치로 계산된 마찰계수의 비로 나타낸 안전계수(Factor of Safety)를 지수로 사용하여 표시하였고, 인장파괴에 대하여는 Table 3.3.4.3의 참고사항에 기재한 바와 같이 4가지 파괴형태로 분류하여 기술하였다.

Table 3.3.4.3. Effects of joint configuration (Joint property: J1)

LOADING CONDITION	L1		L2	
JOINT CONFIGURATION	P1	P2	P1	P2
<u>CBLOCK</u>				
SLIDING ¹⁾	NO	NO	NO	NO
TENSION	NO	NO	NO	NO
<u>NURBM</u>				
SLIDING	NO	NO	NO	NO
	(2.75) ²⁾	(2.36)	(1.78)	(1.55)
TENSION	YES	YES	YES	YES
	(T1) ³⁾	(T2)	(T1)	(T2)

- 1) Sliding means that shear failure of joint occurs.
- 2) The number indicates factor of safety defined as the ratio of given friction coefficient to calculated friction coefficient to prevent sliding.
- 3) The notation means following conditions ;
 - T1: local tensile failure zone < half length of joint
 - T2: local tensile failure zone > half length of joint
 - T3: complete joint separation but no roof fall
 - T4: complete joint separation and roof fall

Table 3.3.4.3, 3.3.4.4, 3.3.4.6 및 3.3.4.7의 결과에서 보는 바와 같이 CBLOCK 계산 결과는 절리 강성과 같은 절리의 특성은 절리암반에 구축된 구조물의 안정성에 중요한 변수가 되며 수직절리강성과 전단절리강성의 비는 안정성을 판단하는 척도로서 사용될 수 있음을 나타내고 있다.

Table 3.3.4.4. Effects of joint configuration (Joint property: J3)

LOADING CONDITION	L1		L2	
JOINT CONFIGURATION	P1	P2	P1	P2
<u>CBLOCK</u>				
SLIDING	YES	YES	YES	YES
TENSION	YES (T3)	YES (T3)	YES (T3)	YES (T4)
<u>NURBM</u>				
SLIDING	YES (0.01)	YES (0.05)	YES (0.05)	YES (0.07)
TENSION	YES (T3)	YES (T3)	YES (T2)	YES (T2)

Table 3.3.4.5. Effects of loading condition

JOINT CONFIGURATION	P1		P2		
JOINT PROPERTY	J1	J3	J1	J3	
<u>CBLOCK</u>					
SLIDING	L1:	NO	YES	NO	YES
	L2:	NO	YES	NO	YES
TENSION	L1 :	NO	YES (T3)	NO	YES (T3)
	L2 :	NO	YES (T3)	NO	YES (T4)
<u>NURBM</u>					
SLIDING	L1 :	NO (2.75)	YES (0.01)	NO (2.36)	YES (0.05)
	L2 :	NO (1.78)	YES (0.05)	NO (1.55)	YES (0.07)
TENSION	L1 :	YES (T1)	YES (T3)	YES (T2)	YES (T3)
	L2 :	YES (T1)	YES (T2)	YES (T2)	YES (T2)

수직절리강성과 전단절리강성의 비를 강성비(stiffness ratio)로 표시할 때 주어진 예제와 같은 구조물의 경우 낮은 강성비는 구조물의 불안정한 상태를 심화시키는 것으로 계산되었다. 이와 같은 계산 결과는 Belytschko 등이 NURBM을 이용하여 계산한 결과로서 구조물의 안정성 확보를 위한 안전계수의 최소치는 강성비와 관계 없는 것으로 나타난 결과와 비교할 때 매우 흥미있는 사실을 보여준다. (Fig. 3.3.4.8 참조)

Table 3.3.4.6. Effects of joint properties

LOADING CONDITION		L1		L2	
JOINT CONFIGURATION		P1	P2	P1	P2
<u>CBLOCK</u>					
SLIDING	J1 :	NO	NO	NO	NO
	J3 :	YES	YES	YES	YES
TENSION	J1 :	NO	NO	NO	NO
	J3 :	YES (T3)	YES (T3)	YES (T3)	YES (T4)
<u>NURBM</u>					
SLIDING	J1 :	NO (2.75)	NO (2.36)	NO (1.78)	NO (1.55)
	J3 :	YES (0.01)	YES (0.05)	YES (0.05)	YES (0.07)
TENSION	J1 :	YES (T1)	YES (T2)	YES (T1)	YES (T2)
	J3 :	YES (T3)	YES (T3)	YES (T2)	YES (T2)

Table 3.3.4.7. Effects of joint properties

LOADING COND.	L1 & P2		L1 & P1	
JOINT CONFIG.	J1	J2	J3	J4
<u>CBLOCK</u>				
SLIDING	NO	NO	YES	YES
TENSION	NO	NO	YES (T3)	YES (T3)
<u>NURBM</u>				
SLIDING	NO (2.88)	NO (2.88)	YES (0.01)	YES (0.01)
TENSION	YES (T2)	YES (T2)	YES (T3)	YES (T3)

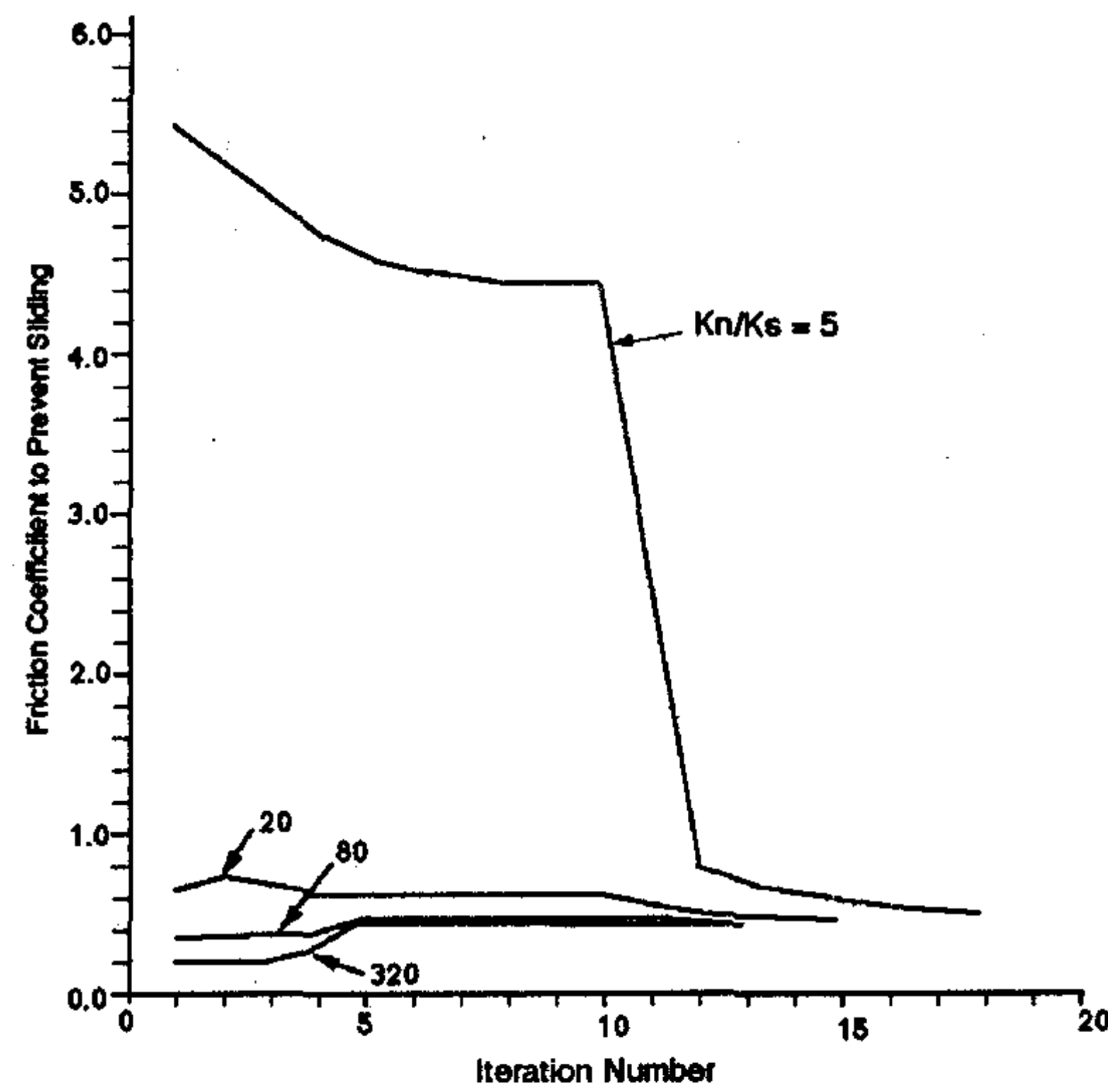


Fig. 3.3.4.8 Analysis of limiting friction state for the unstable arch mesh

Fig. 3.3.4.9는 CBLOCK 계산의 타당성을 살펴보기 위하여 사면상 블록 구조의 미끄럼, 전도 등 기본적인 거동을 해석적 방법인 limit equilibrium 해와 비교한 것으로서 잘 일치하고 있다.

강성비가 같을 때 NURBM의 계산 결과는 Table 3.3.4.7에서 보는 바와 같이 차이가 없으나 CBLOCK의 계산 결과는 파괴 패턴에서 약간의 차이를 보이고 있다. Implicit 알고리즘에서는 초기에 설정된 블록과 블록 경계의 절리면들을 통하여 상호작용이 발생하며 타 절리와의 새로운 접촉을 허용하지 않는다. 따라서 절리의 매우 작은 상대 변위가 나타나는 경우에 적용 가능하며 블록의 거동에 따라 새로운 접촉이 형성될 수 있는 경우에는 수치적인 불안정성을 초래할 수 있다.

하중조건 역시 안정성 해석에 영향을 주는 중요한 변수이며, 이는 절리의 기하학적 분포 특성과 함께 고려되어야 한다. 암반 구조물의 안정성과 거동 특성은 Table 3.3.4.5에서 볼 수 있듯이 절리군의 분포에 좌우된다. 절리암반에서의 지보 조건을 연구한 결과도 연구 대상 암반에 존재하고 있는 특정한 절리 분포 조건에 적용될 수 있으며 절리의 분포 양상이 약간만 변하여도 그 결과는 전혀 다른 양상을 보일 수 있다. (Voegele & Fairhurst, 1982)

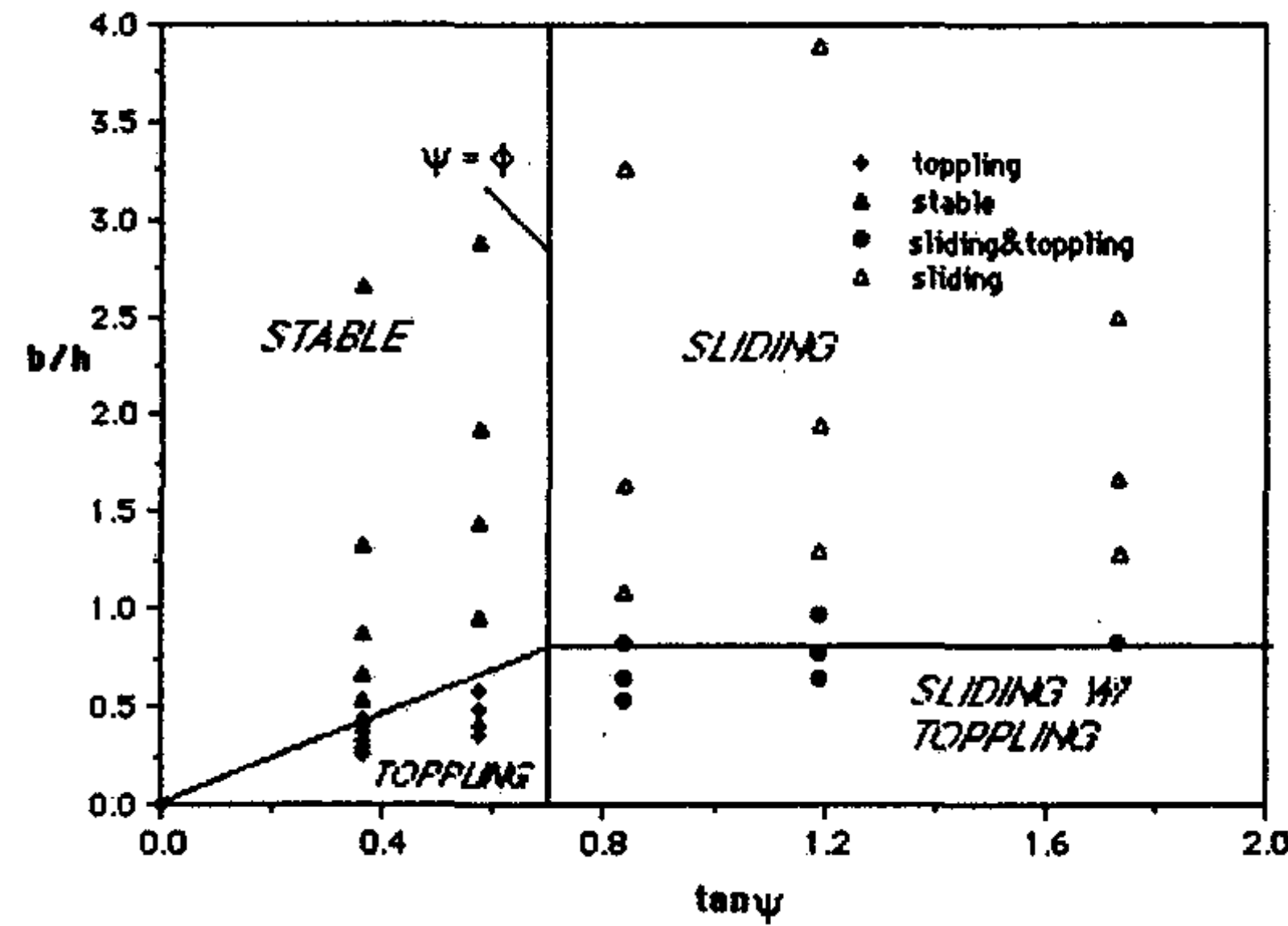


Fig. 3.3.4.9 CBLOCK calculations vs. limit equilibrium solutions ($\phi = 35^\circ$)

또 하나 지적되어야 할 사항은 절리 암반의 안정성과 국부적인 파괴와의 관계이다. NURBM에 의해 계산된 상한치는 절리의 국부적인 파괴에 기초하나 국부적인 파괴가 천반의 붕락과 같은 구조적인 불안정성으로 항상 연결되는 것은 아니라는 사실이다. CBLOCK 모델은 구조물이 불안정한 상태가 될 경우 안정성 또는 불안정성 여부를 판별이 가능하도록 화면상에서 광역적인 파괴양상을 육안으로 관찰할 수 있다는 장점이 있다.

마. 요약

개별요소법으로서 implicit 알고리즘에 기초한 NURBM과 explicit 알고리즘에 기초한 CBLOCK의 모델링 특성을 고찰하기 위하여 절리암반내 아치 터널 예제를 대상으로 수치해석적으로 실시하였다. NURBM은 절리 구조계의 안정성을 확보할 수 있는 상한치의 계산이 용이한 반면 절리의 과도한 변형이 예상되는 경우 수치적 불안정성을 초래할 수 있다. CBLOCK은 절리 구조계의 평형상태 판별이 어렵고 계산 시간이 많이 걸리는 반면, 블록의 미끄럼, 회전 등 큰 변형의 처리가 가능한 이점이 있다. CBLOCK 계산 결과에 의하면 절리의 수직 및 접선 강성비는 절리 분포에 따라 불연속체 암반의 안정성을 판단하는 중요한 지표로서 사용될 수 있는 것으로 나타나고 있으나 NURBM 계산은 상이한 결과를 보였다. 또한 구조물의 안정성과 국부적인 파괴 거동의 해석에서 두 방법이 상이한 결과를 가져올 수 있는 것으로 나타났고 이는 수치해석적 모델링의 제약적 요소로 작용할 수 있음을 보여주었다

5. 개별요소법을 이용한 발파 모델링

가. 개요

(1) 목적

지표의 암반 벤치 발파 및 지하 터널 발파에 있어서 발파 패턴에 따른 암반의 동적 파괴 양상을 수치해석적으로 모델링하여, 발파 영향 요소 분석 및 적정 발파 설계 변수들을 도출함으로써 암반 굴착을 위한 제어발파의 기본 설계 기법을 정립하고자 한다.

(2) 수치해석 기법

PFC(Particle Flow Code)는 유한요소법이나 유한차분법 등과 같은 연속체 모델링 기법과는 달리 해석 대상을 개별적인 입자들의 집합체로 모델링하는 개별요소법의 원리를 기본으로 하여 개발된 입자유동해석 프로그램으로서 정적 및 동적거동 문제를 해석할 수 있다. 특히 암반 발파의 경우와 같이 해석 모델이 블록 형태로 파괴, 분리되어가는 진행 양상을 시각적으로 시뮬레이션할 수 있는 특징을 가지고 있다.

PFC 해석 프로그램의 기본적인 지배방정식 및 계산과정은 Fig. 3.2.5.1과 같으며, 전체적인 해석 흐름도는 Fig. 3.2.5.2와 같다.

(3) 발파 모델링 대상

- 암반 벤치 발파
- 터널 단면 발파

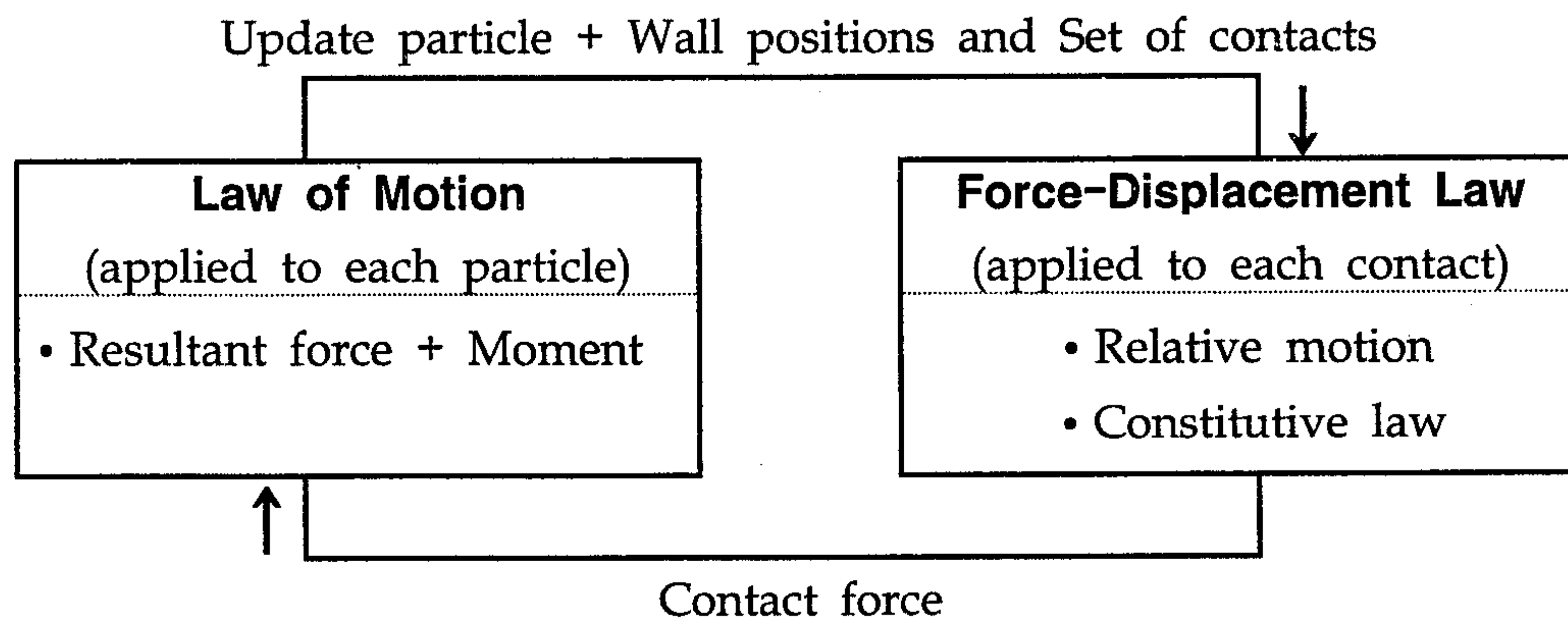


Fig. 3.2.5.1 PFC 해석 프로그램의 기본적인 계산 과정

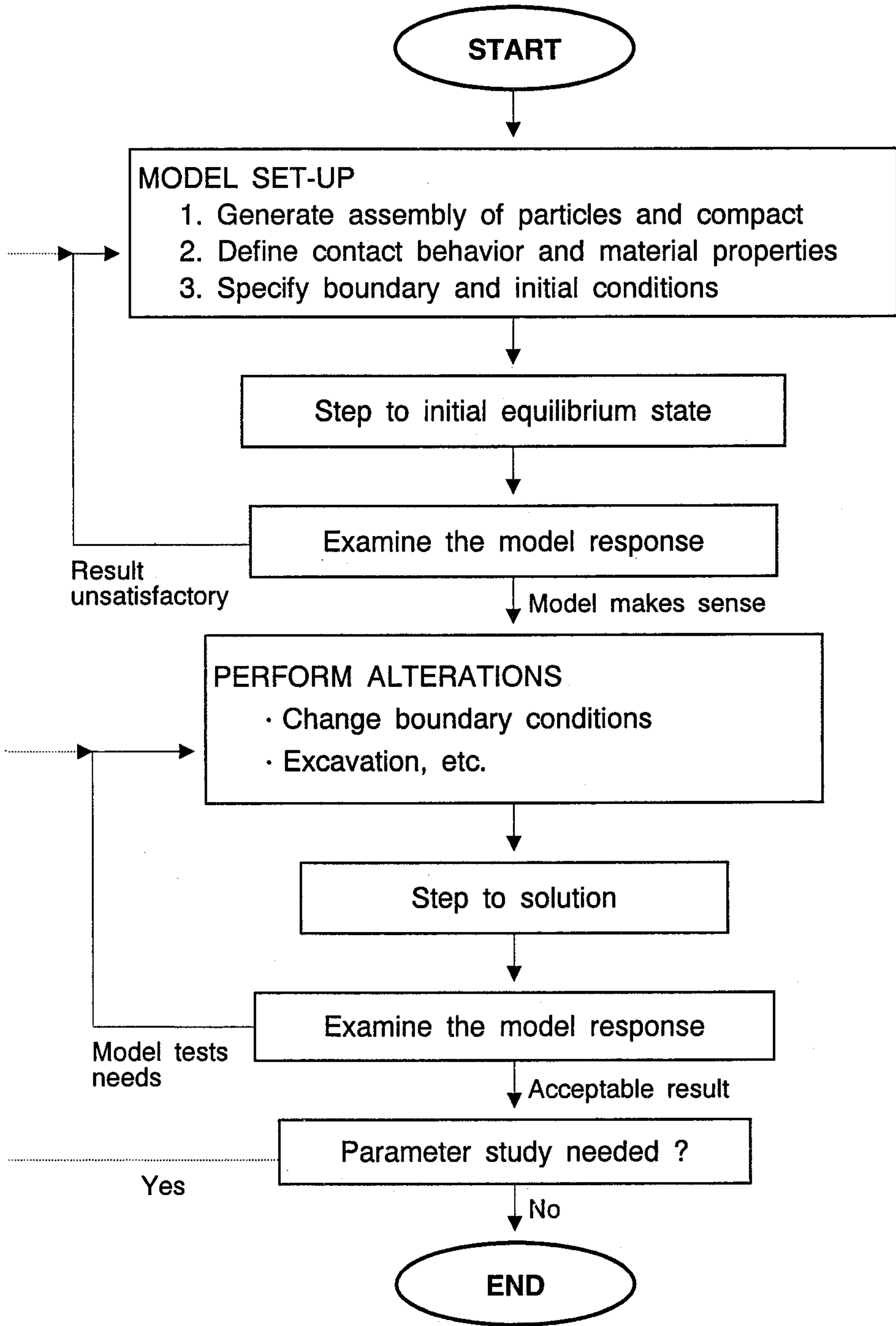


Fig. 3.2.5.2 PFC 프로그램의 해석 흐름도

나. 암반 벤치 발파 모델링

(1) 해석 모델

전형적인 암반 굴착 형태인 Fig. 3.2.5.3의 암반 벤치 모델을 대상으로 하였다.

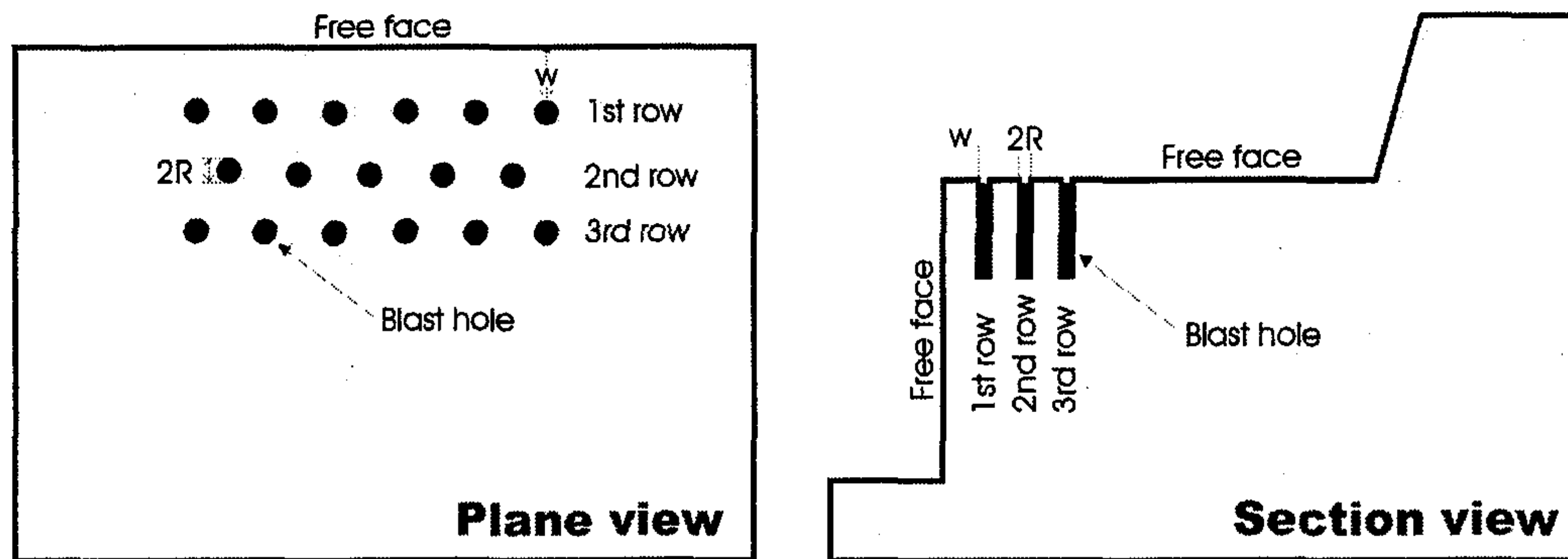


Fig. 3.2.5.3 암반 벤치 발파 모델

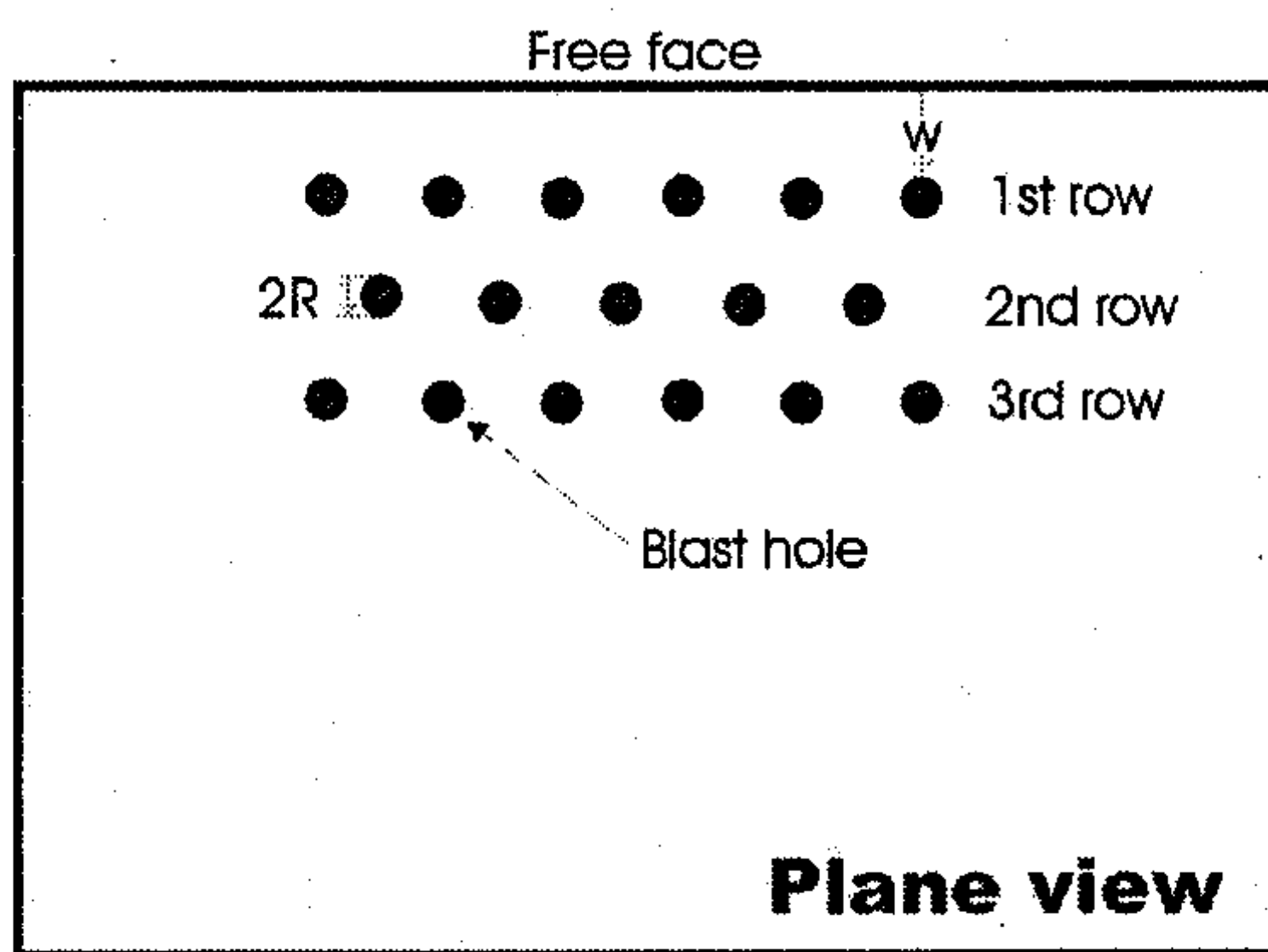
(2) 분석 요소

암반 벤치 발파에 있어서 적정 설계 변수 도출을 위하여 다음과 같은 발파 영향 요소에 대하여 수치해석적으로 분석하였다.

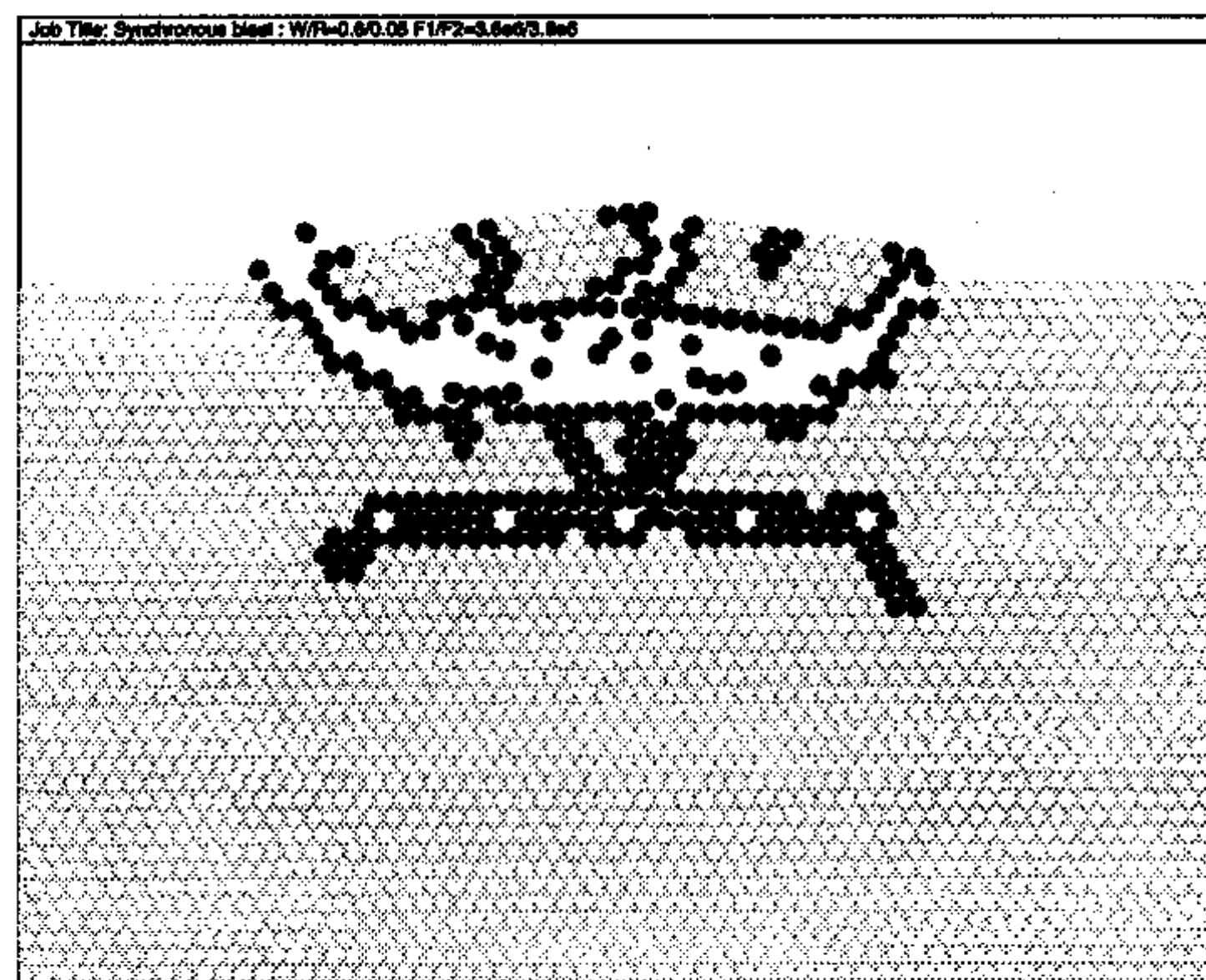
- 발파 대상 암반의 규모(발파공과 자유면 간의 최소저항선 거리, 발파공 간격 등) 및 장약량과 관련한 적정 파암에너지 수준 분석
- 암반 특성(강도, 변형계수)과 관련한 발파 충격파의 전파 및 감쇠 특성 분석
- 발파공 배열을 고려한 동시 발파 및 지발 발파의 효과 비교 분석
- 암반내 절리 존재 패턴에 따른 파암 영향 분석

(3) 주요 해석 결과

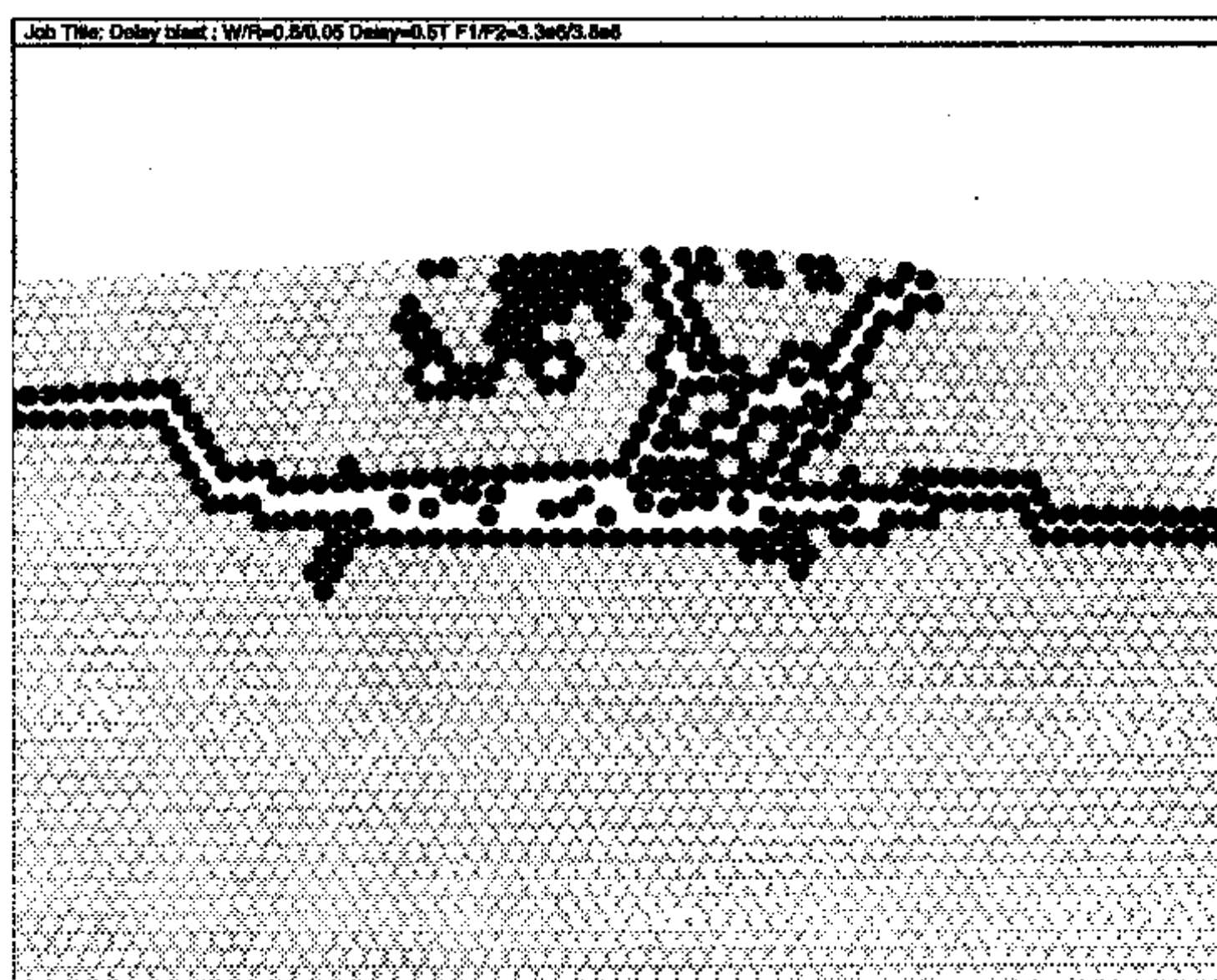
- 벤치 평면 및 단면 모델에 대한 발파공 배열간 지발 발파 시뮬레이션
 - 단일 발파공의 발파압력작용시간(주기, T)에 대해 제 2 열의 지발간격이 1 주기 내외에서 효율적인 파암 효과를 확인하였다(Fig. 3.2.5.4 및 Fig. 3.2.5.5).
 - 파쇄, 비산과 관련한 운동에너지, 변형률에너지 등의 분석을 통한 지발 발파 시의 적정 파암에너지 수준을 도출하였다. 지발발파공의 경우 10~15%의 장약량 저감 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 암반 절리 패턴(수평절리, 수직절리, 경사절리)에 따른 발파 시뮬레이션
 - 발파 충격파 전파방향과 절리방향과의 교차 각도에 따른 파암 효과 차이를 확인하였다(Fig. 3.2.5.6 및 Fig. 3.2.5.7).



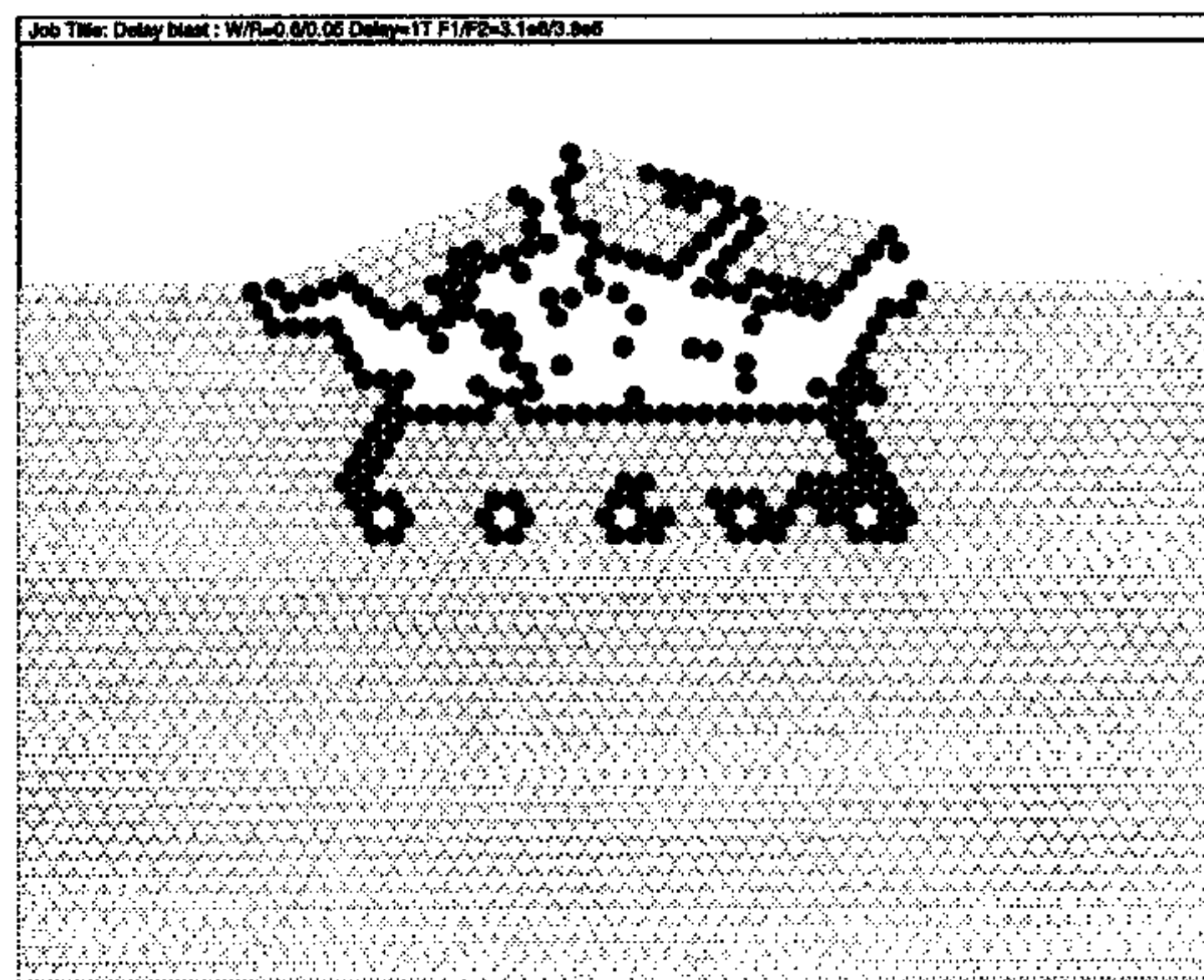
(a) 암반 벤치 발파 평면도



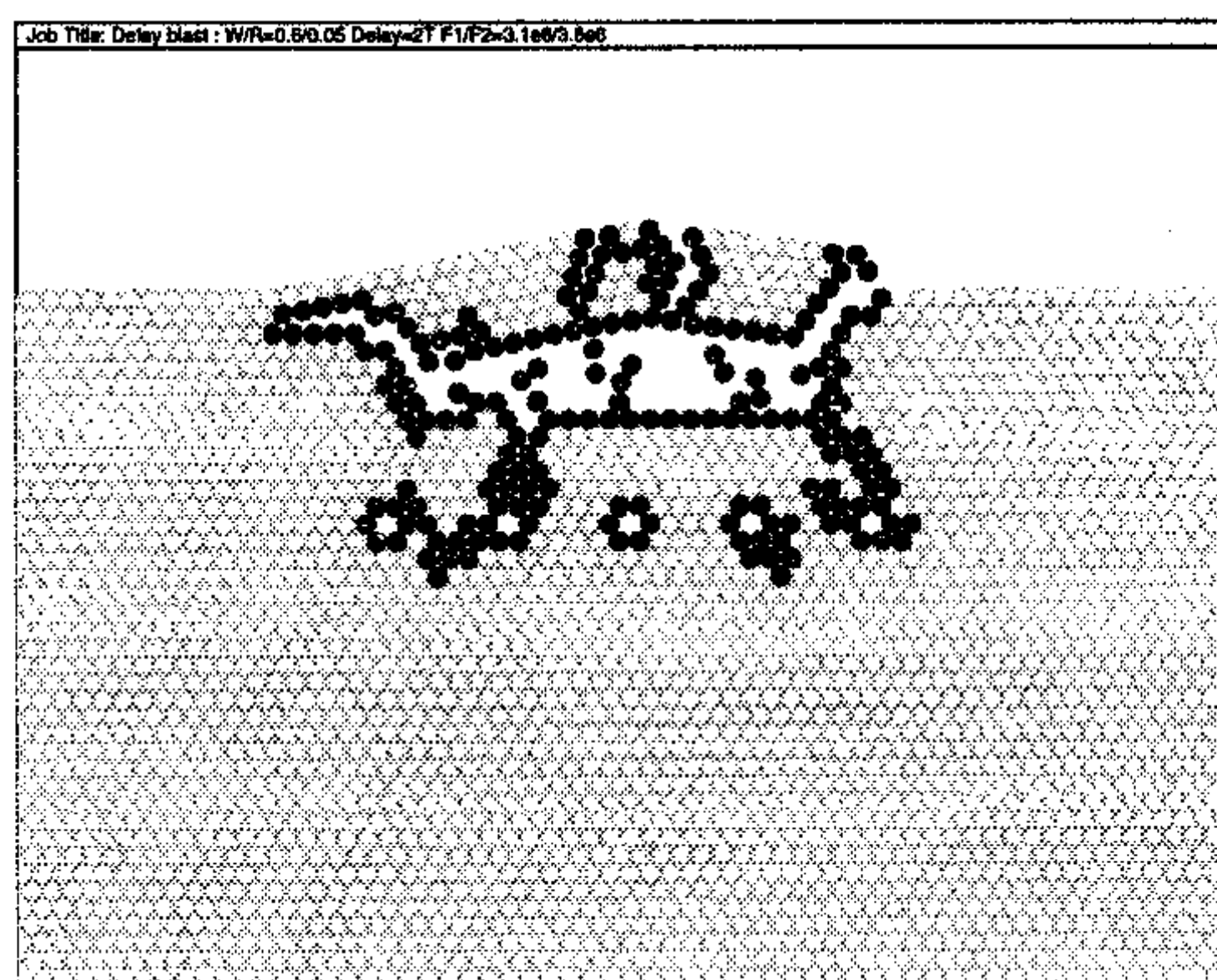
(b) 1-2열 동시발파



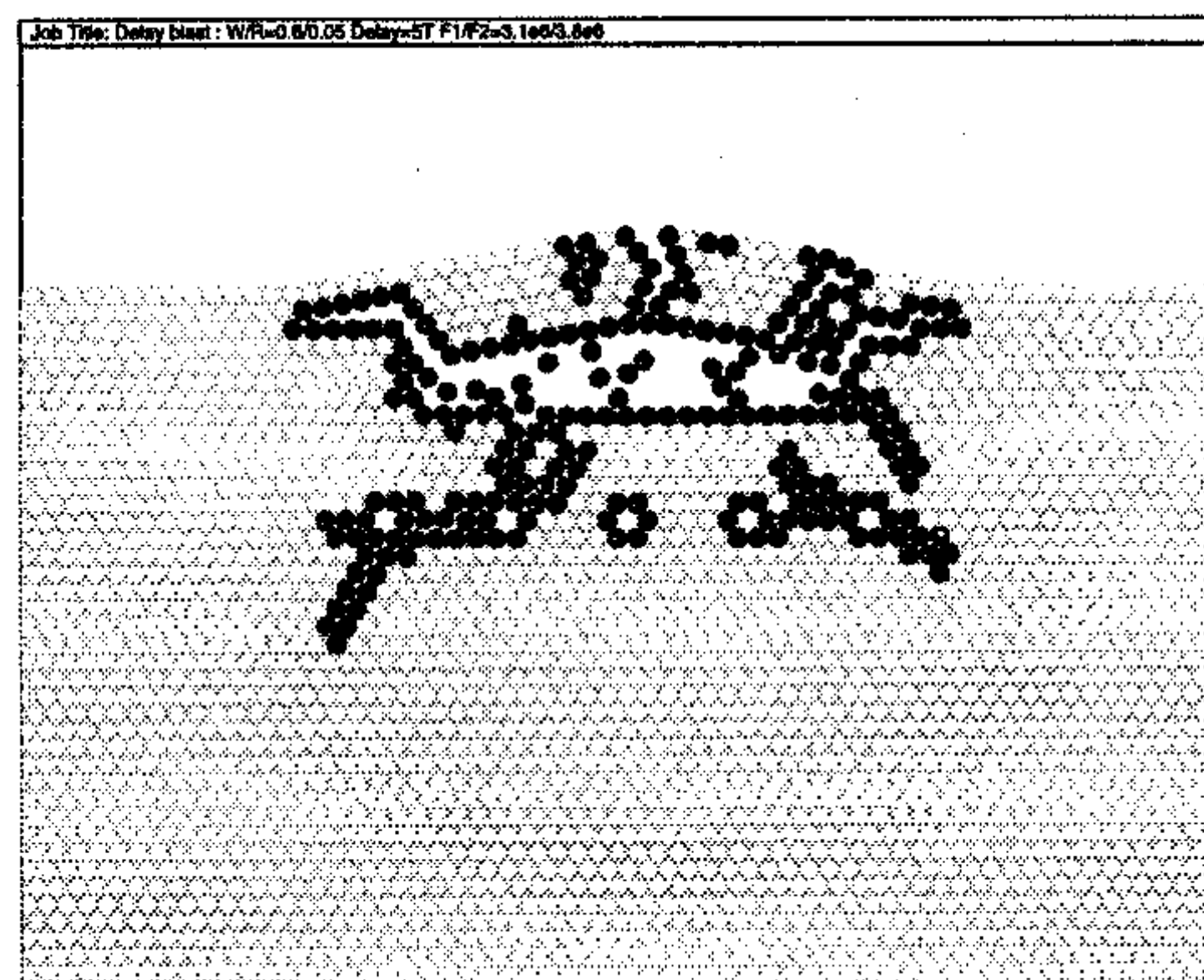
(c) 1-2열 지발발파간격 = 0.5 주기



(d) 1-2열 지발발파간격 = 1 주기

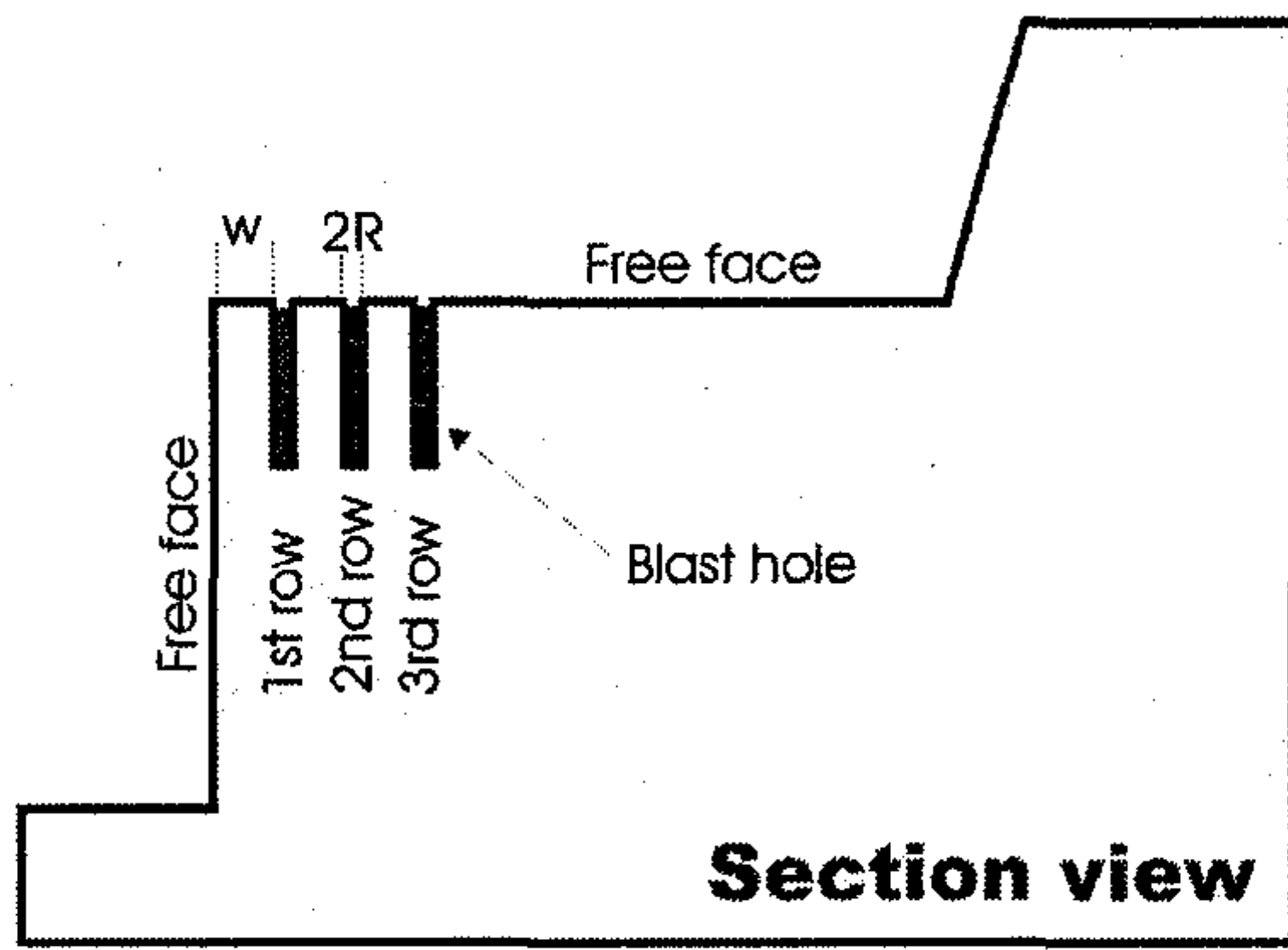


(e) 1-2열 지발발파간격 = 2 주기

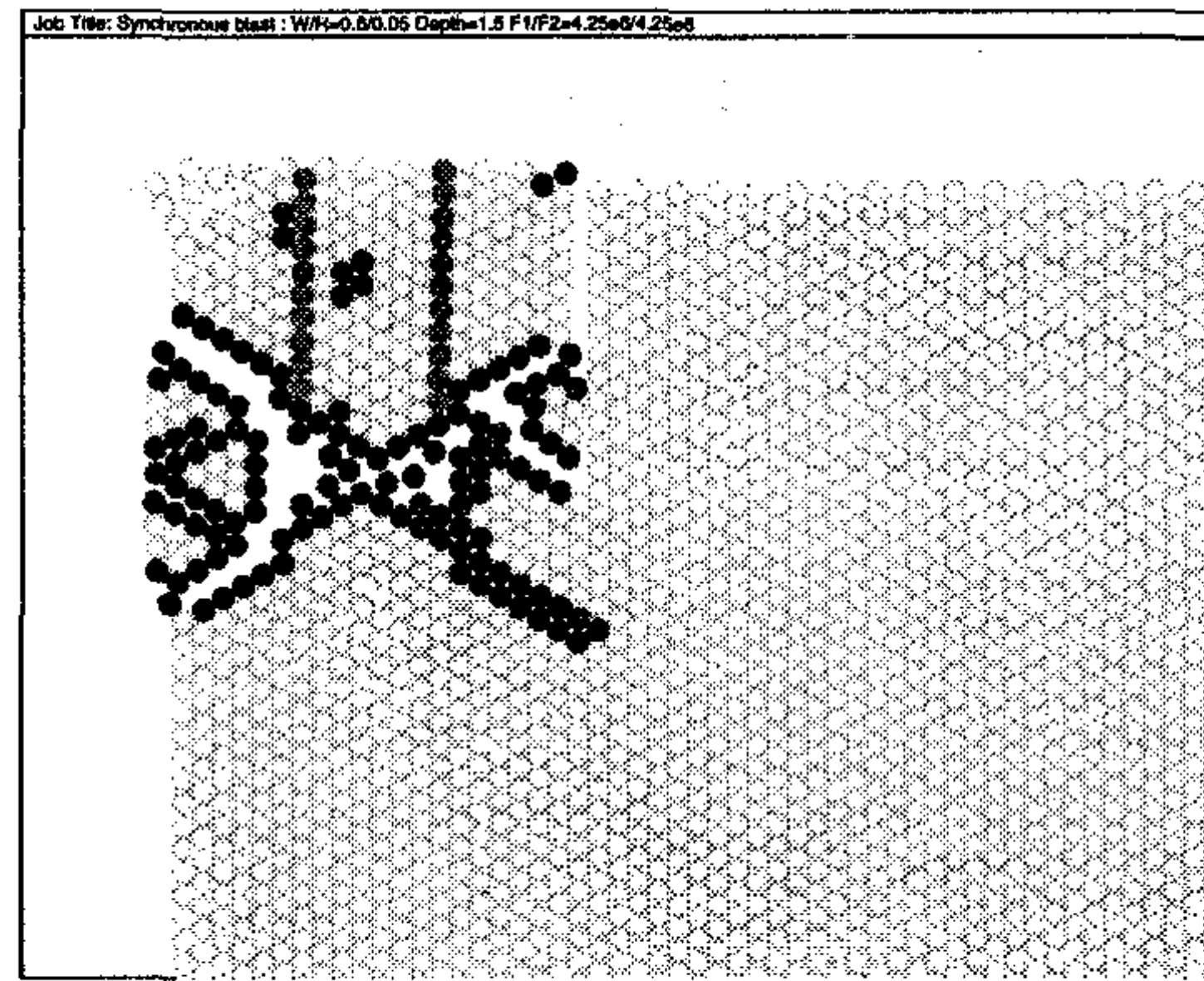


(f) 1-2열 지발발파간격 = 5 주기

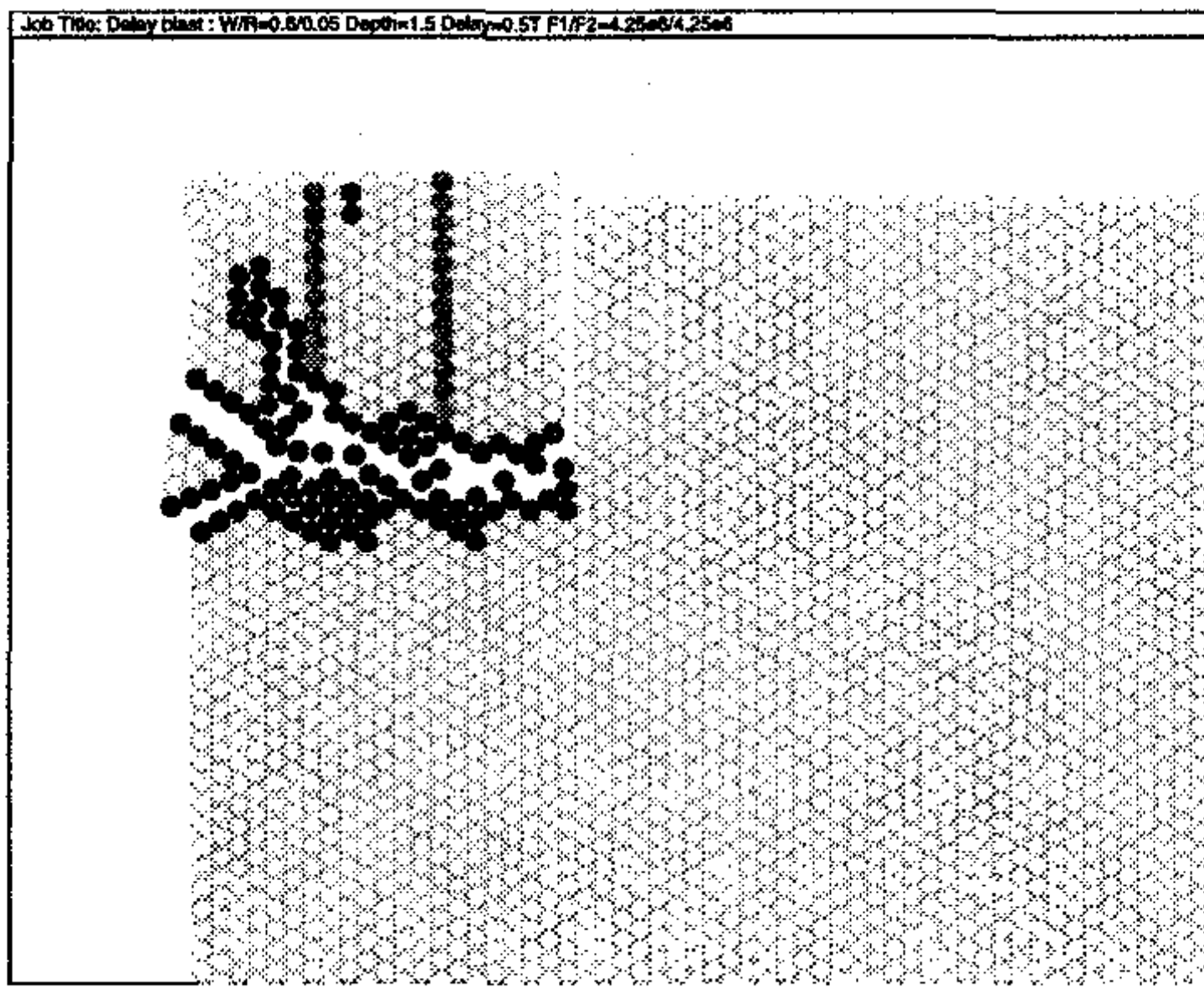
Fig. 3.2.5.4 벤치 평면 모델의 지발 발파 효과



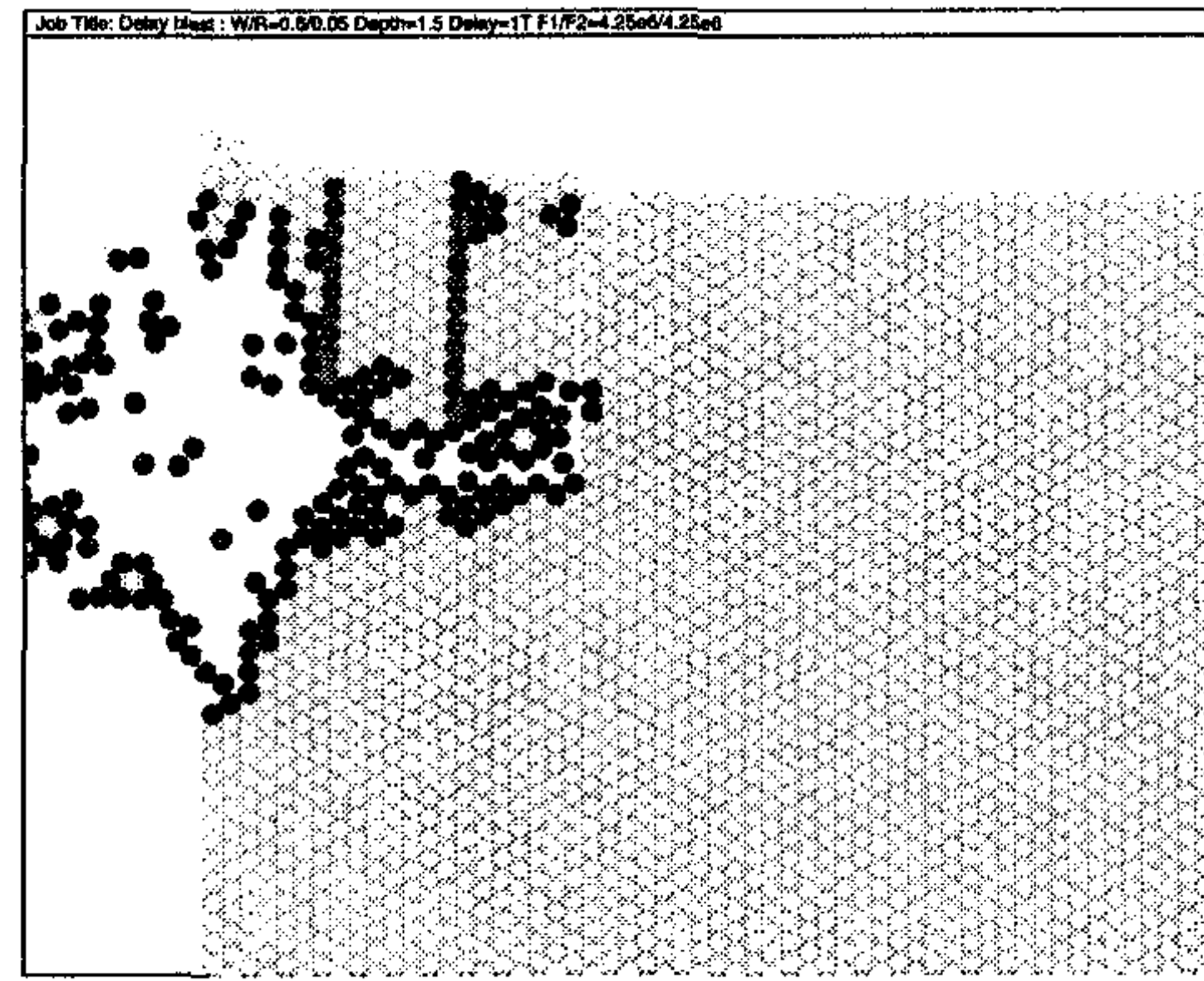
(a) 암반 벤치 발파 단면도



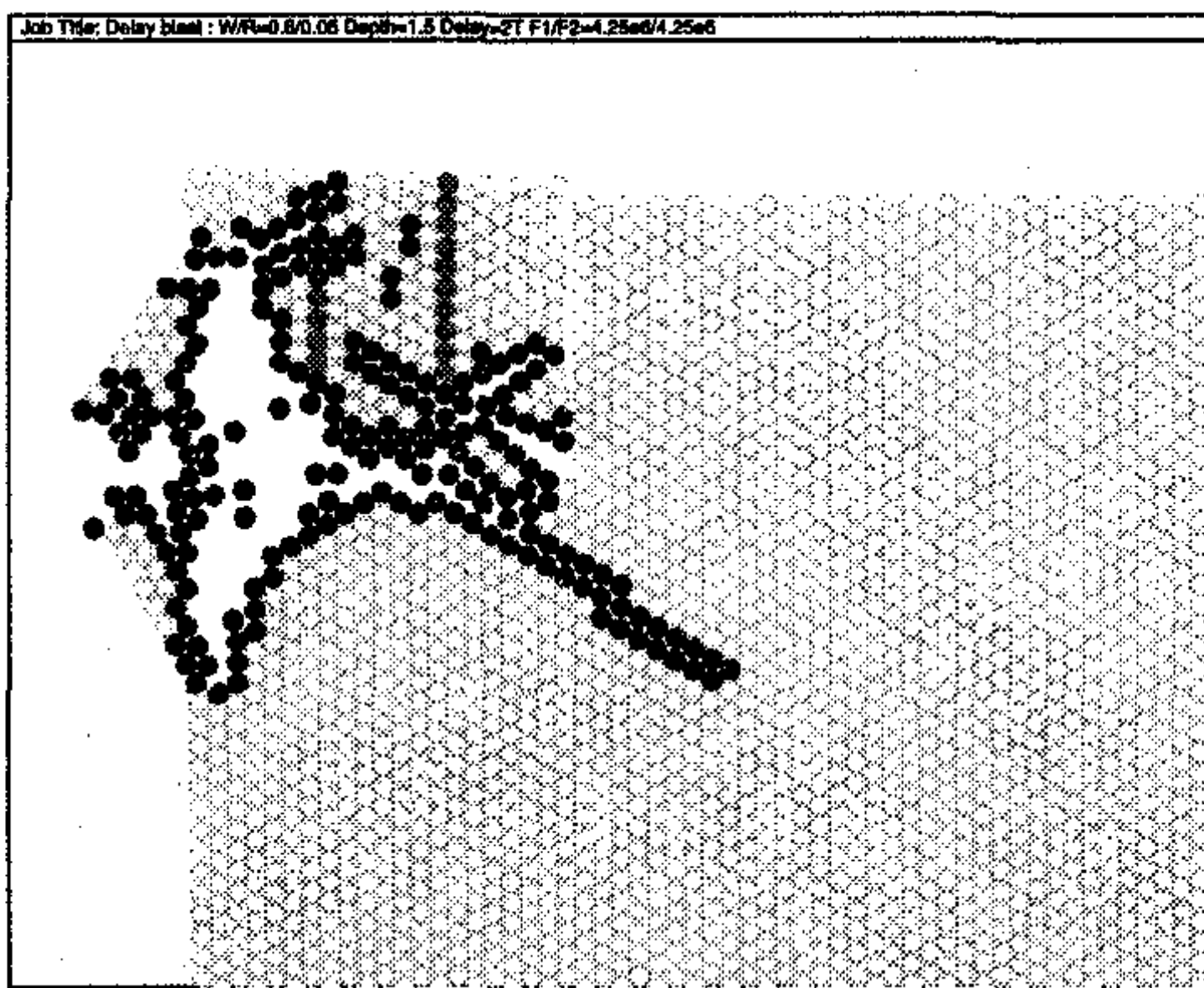
(b) 1-2열 동시발파



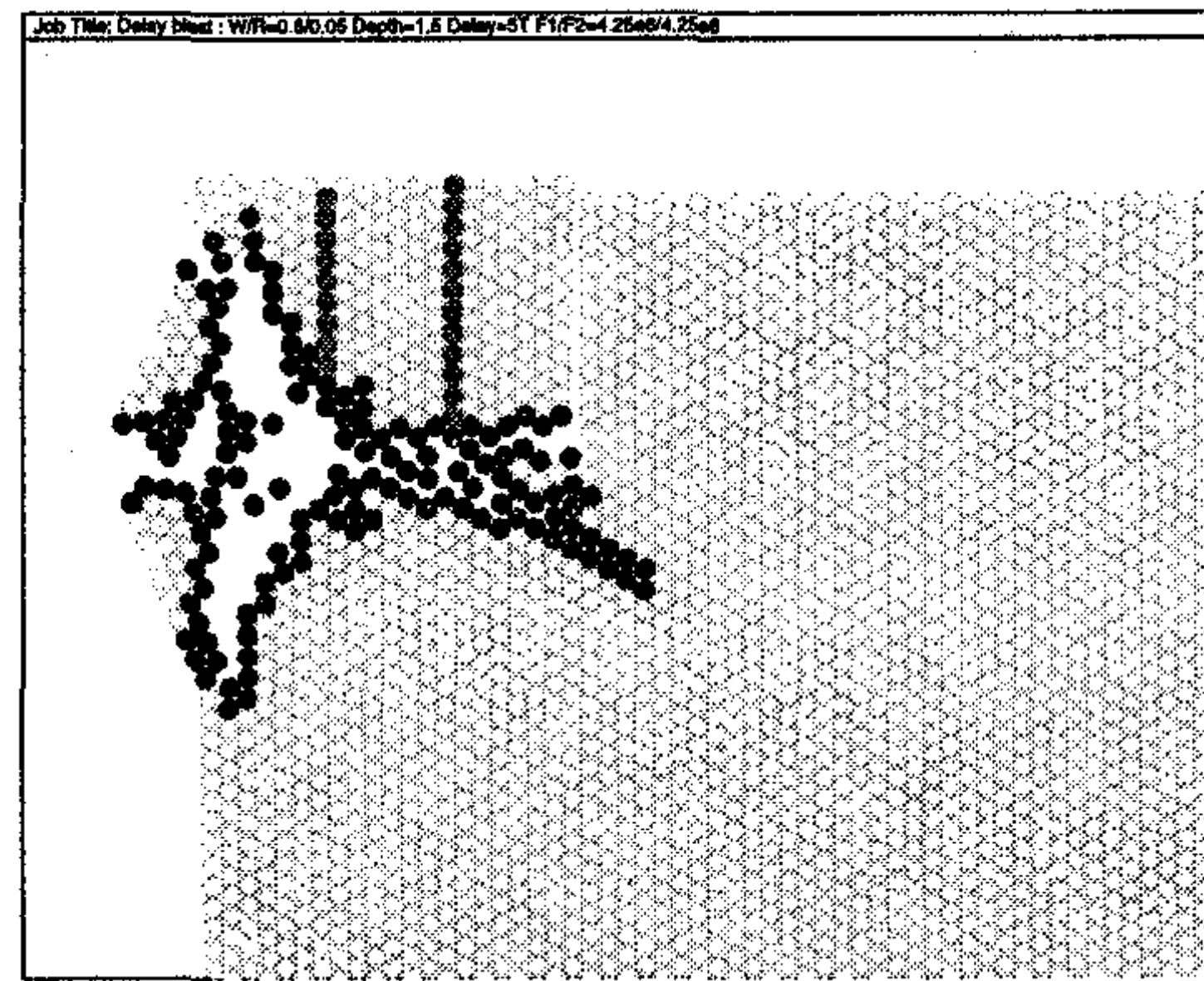
(c) 1-2열 지발발파간격 = 0.5 주기



(d) 1-2열 지발발파간격 = 1 주기

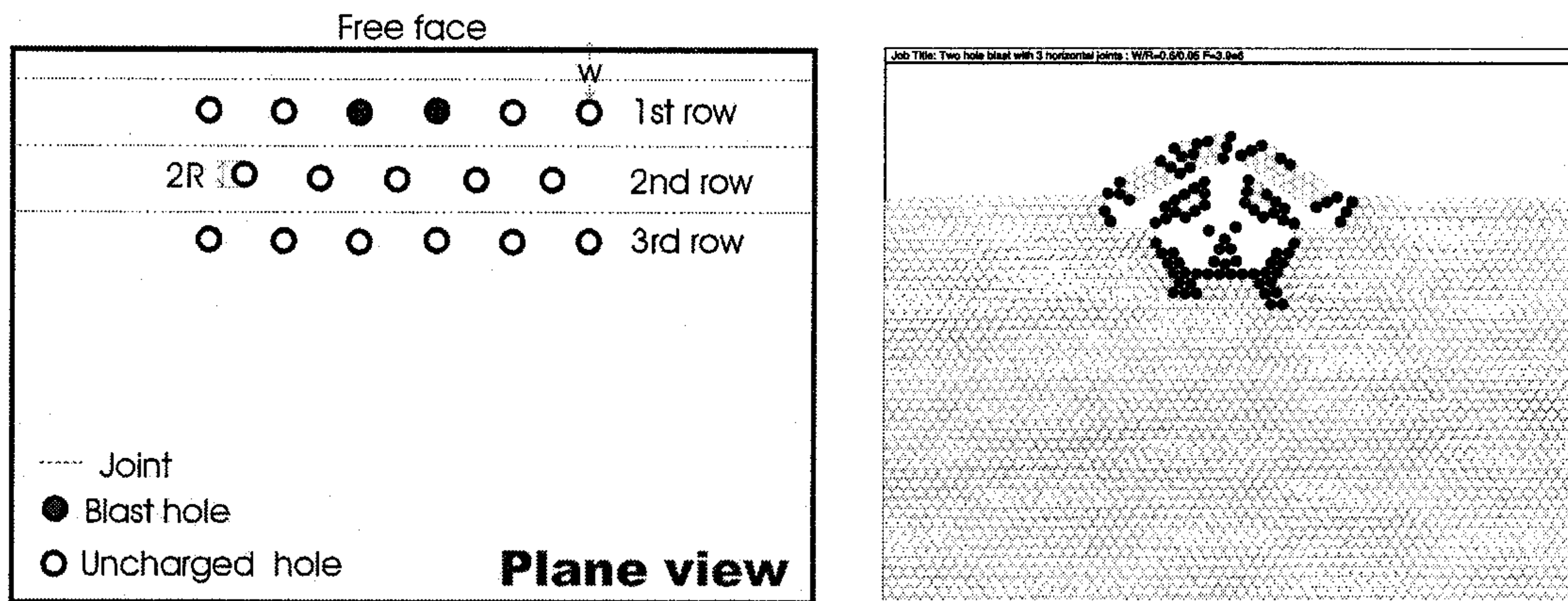


(e) 1-2열 지발발파간격 = 2 주기

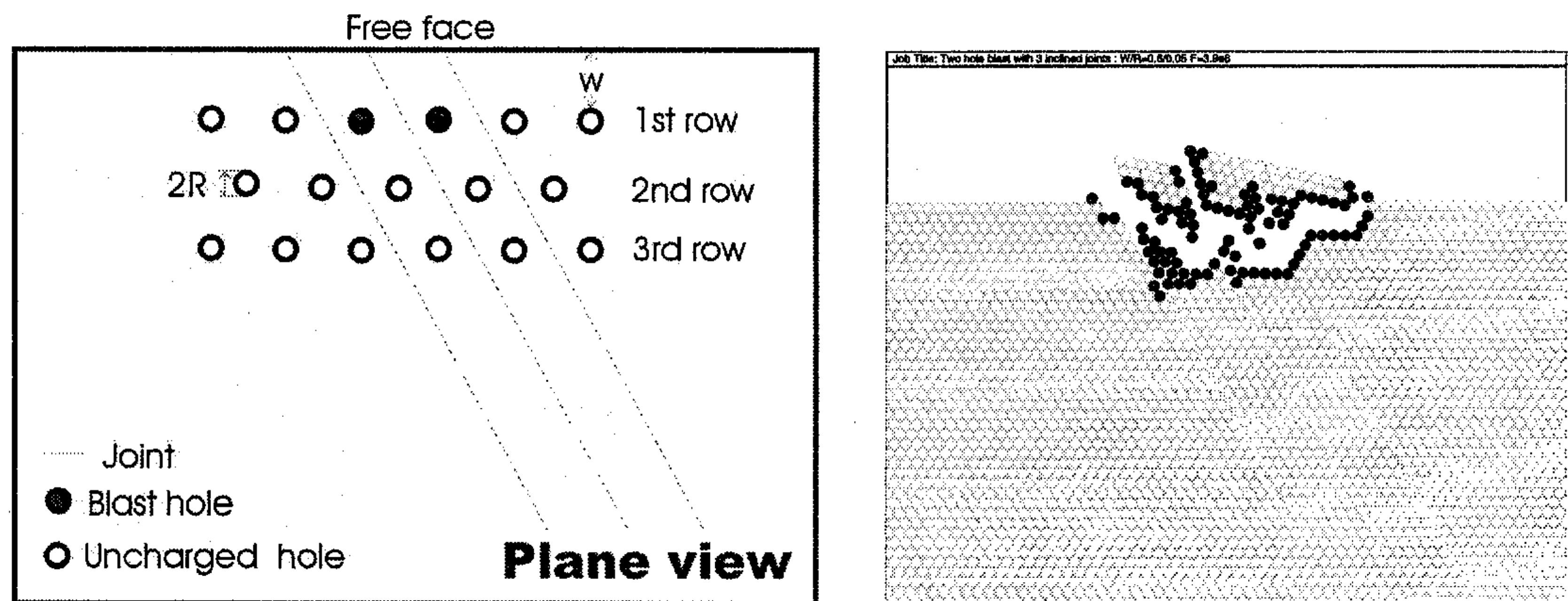


(f) 1-2열 지발발파간격 = 5 주기

Fig. 3.2.5.5 벤치 단면 모델의 지발 발파 효과

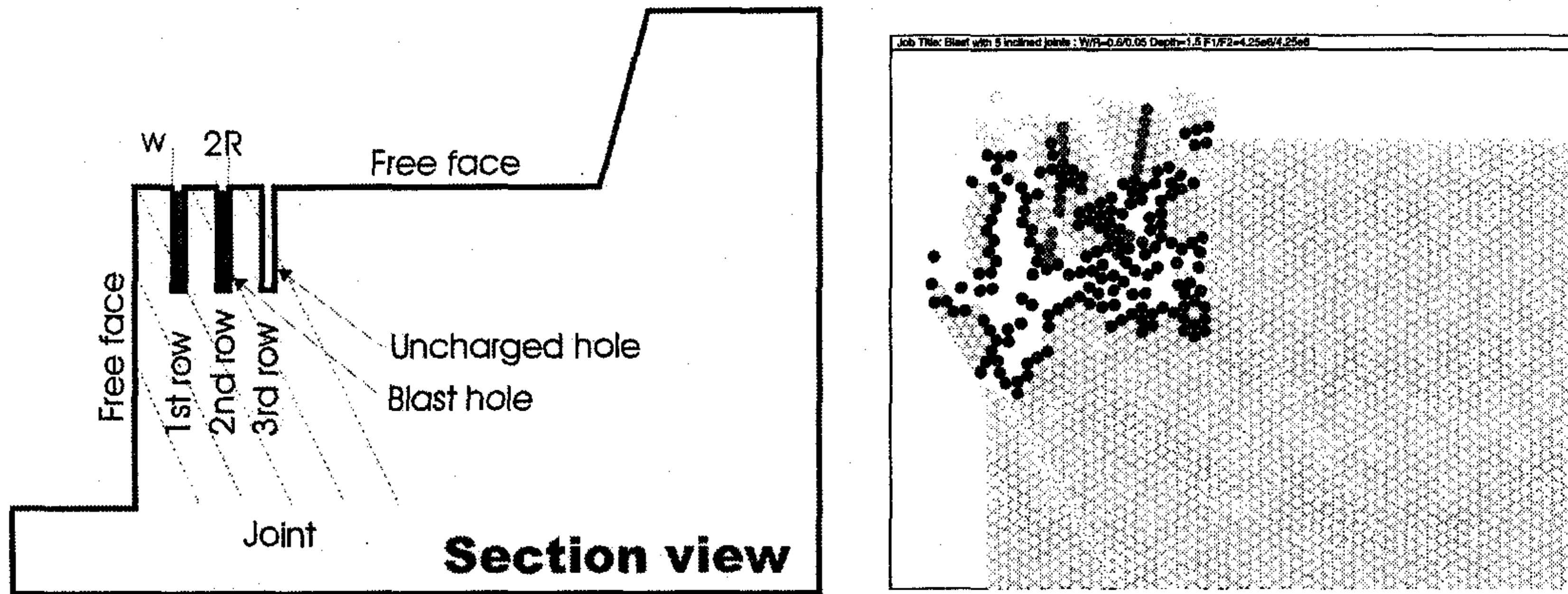


(a) 수평절리패턴 모델 및 파암 양상

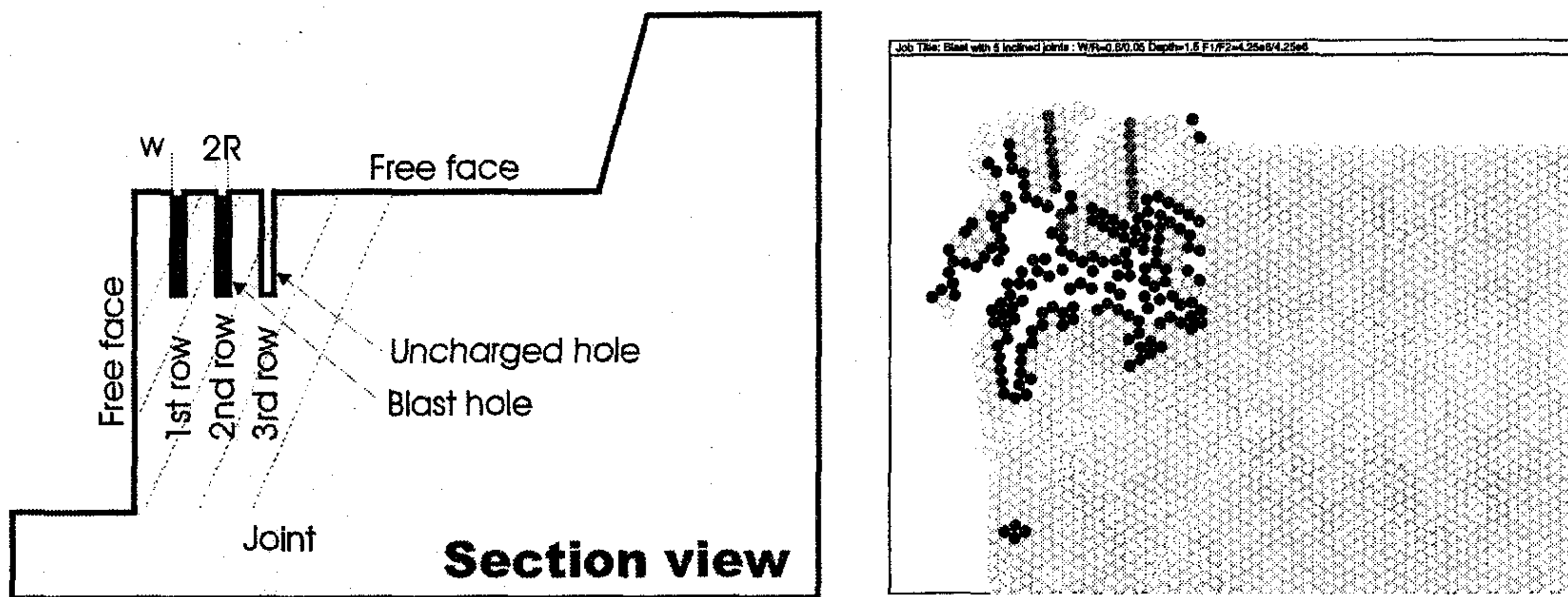


(b) 경사절리패턴 모델 및 파암 양상

Fig. 3.2.5.6 절리패턴에 따른 벤치 평면 모델의 발파 효과



(a) 우하향 경사절리패턴 모델 및 파암 양상



(b) 좌하향 경사절리패턴 모델 및 파암 양상

Fig. 3.2.5.7 절리패턴에 따른 벤치 단면 모델의 발파 효과

다. 터널 단면 발파 모델링

(가) 해석 모델

자유면이 제한되어 있는 다음 Fig. 3.2.5.8의 지하 터널 굴착 단면 모델을 대상으로 하였다.

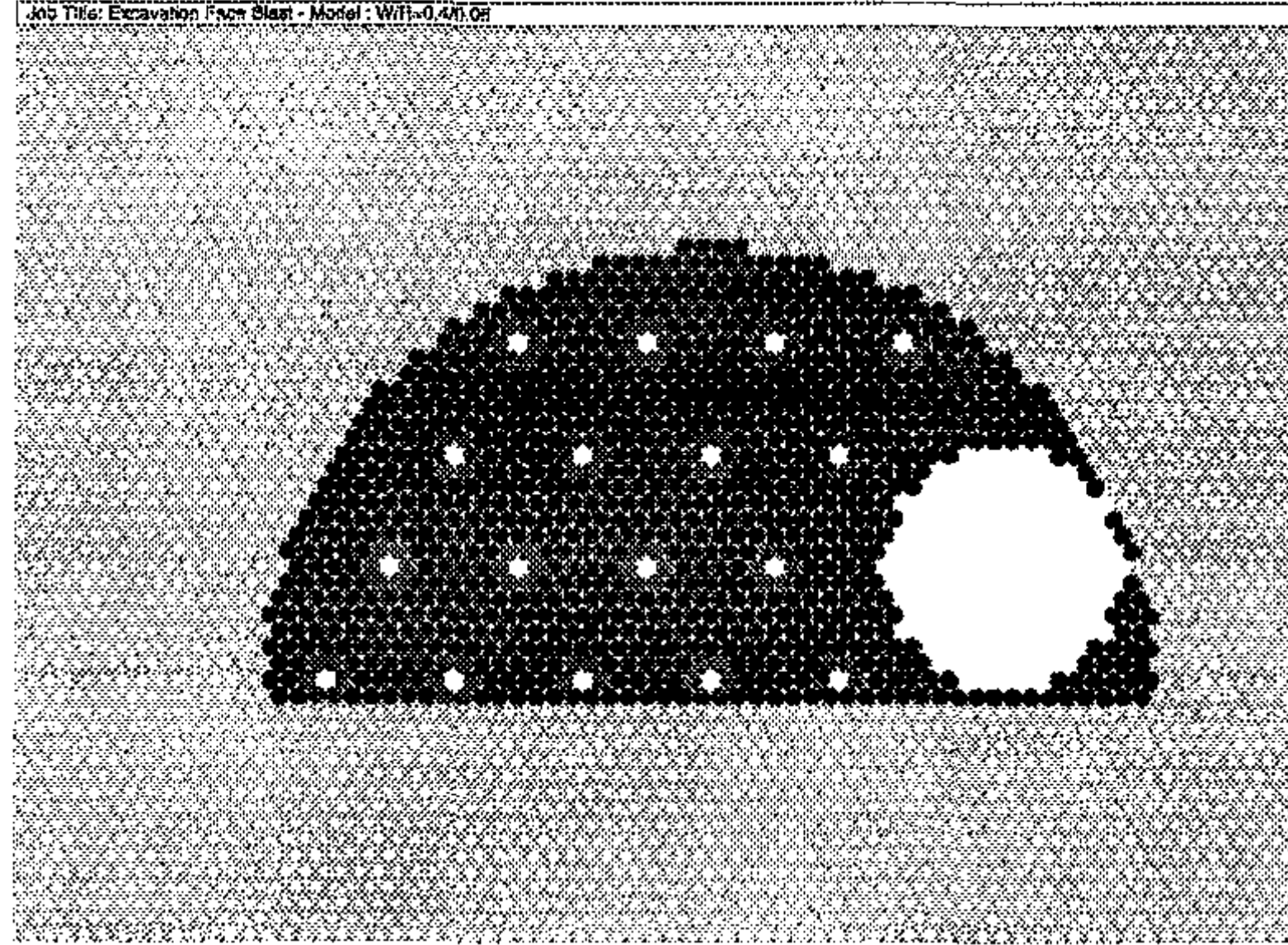


Fig. 3.2.5.8 지하 터널 발파 굴착 모델

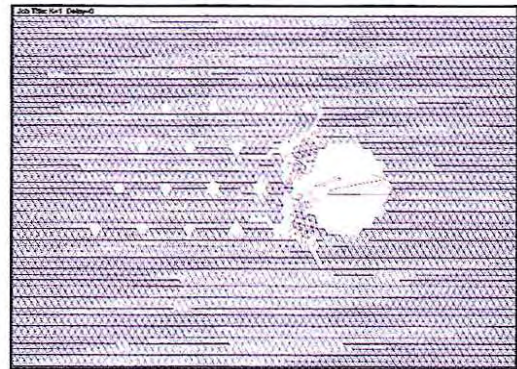
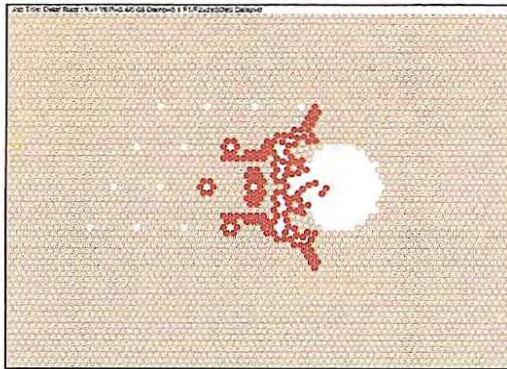
(나) 분석 요소

터널 발파 굴착에 있어서 적정 설계 변수 도출을 위하여 다음과 같은 발파 영향 요소에 대하여 수치해석적으로 분석하였다.

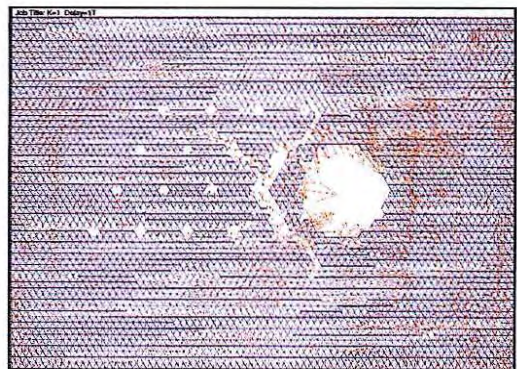
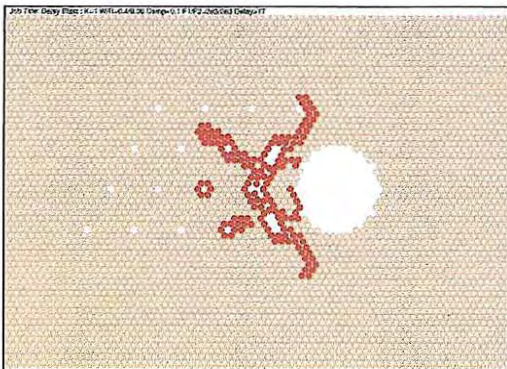
- 파일럿 터널을 유일한 자유면으로 가지는 1 자유면 조건의 발파 효과 분석
- 지하 암반내 지압조건(측압계수 즉, 수직 지압 대 수평 지압의 비)에 따른 발파 영향 분석
- 암반 특성(강도, 변형계수)과 관련한 발파 충격파의 전파 및 감쇠 특성 분석
- 발파공 배열을 고려한 동시 발파 및 지발 발파의 효과 비교 분석

(다) 주요 해석 결과

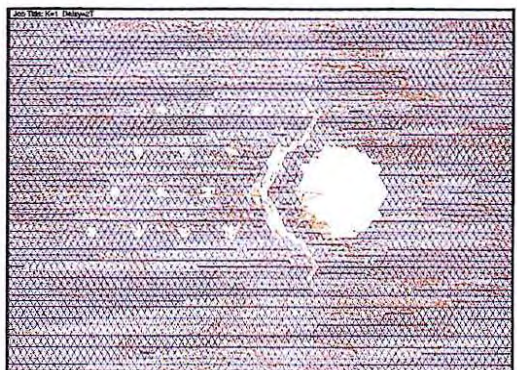
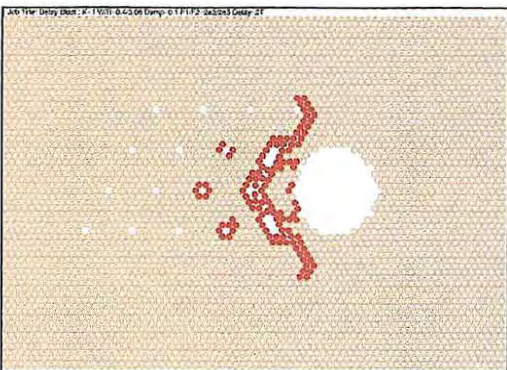
- 터널 단면 발파 모델링 조건으로 Fig. 3.2.5.9는 측압계수 = 1 및 지발간격 = 0, 1T, 2T 경우, Fig. 3.2.5.10은 측압계수 = 3 및 지발간격 = 0, 1T, 2T 경우이다.
- 지발간격 = 0.5T~1T 경우에 효과적 파암 양상을 보였으며(Fig. 3.2.5.9 및 Fig. 3.2.5.10), 지발간격 = 0.5T 경우에 최대 운동에너지가 발생하였다.
- 측압계수 = 3인 경우(Fig. 3.2.5.10)가 측압계수 = 1인 경우(Fig. 3.2.5.9)에 비해 파암 효과는 약 20% 정도 증대하였다. 이로부터 터널 발파시 지압조건 또한 발파의 영향 요소로 작용함을 확인하였다.



(a) 파암 양상 및 잔류결합력 분포 : 축압계수 = 1, 동시발파

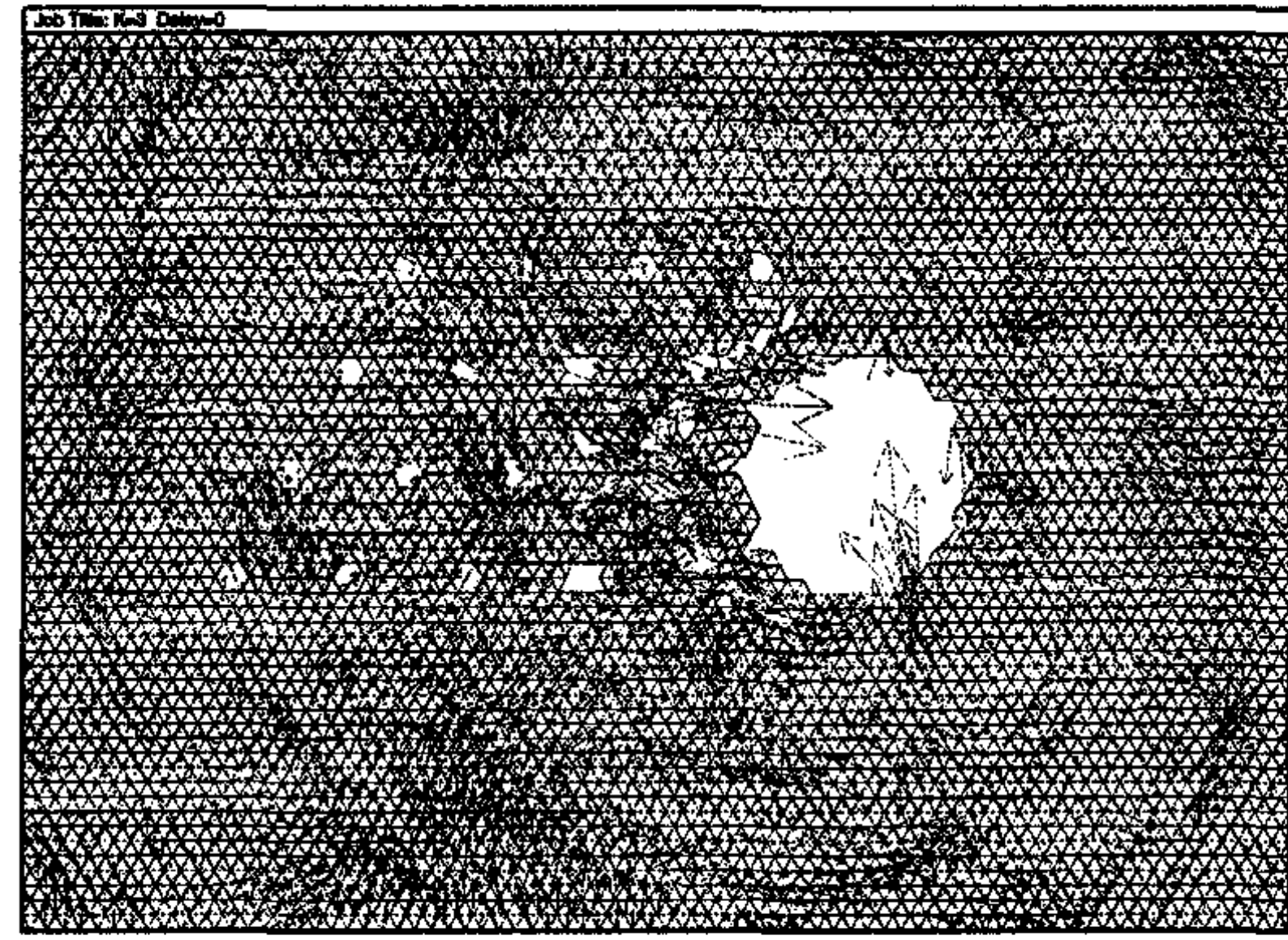
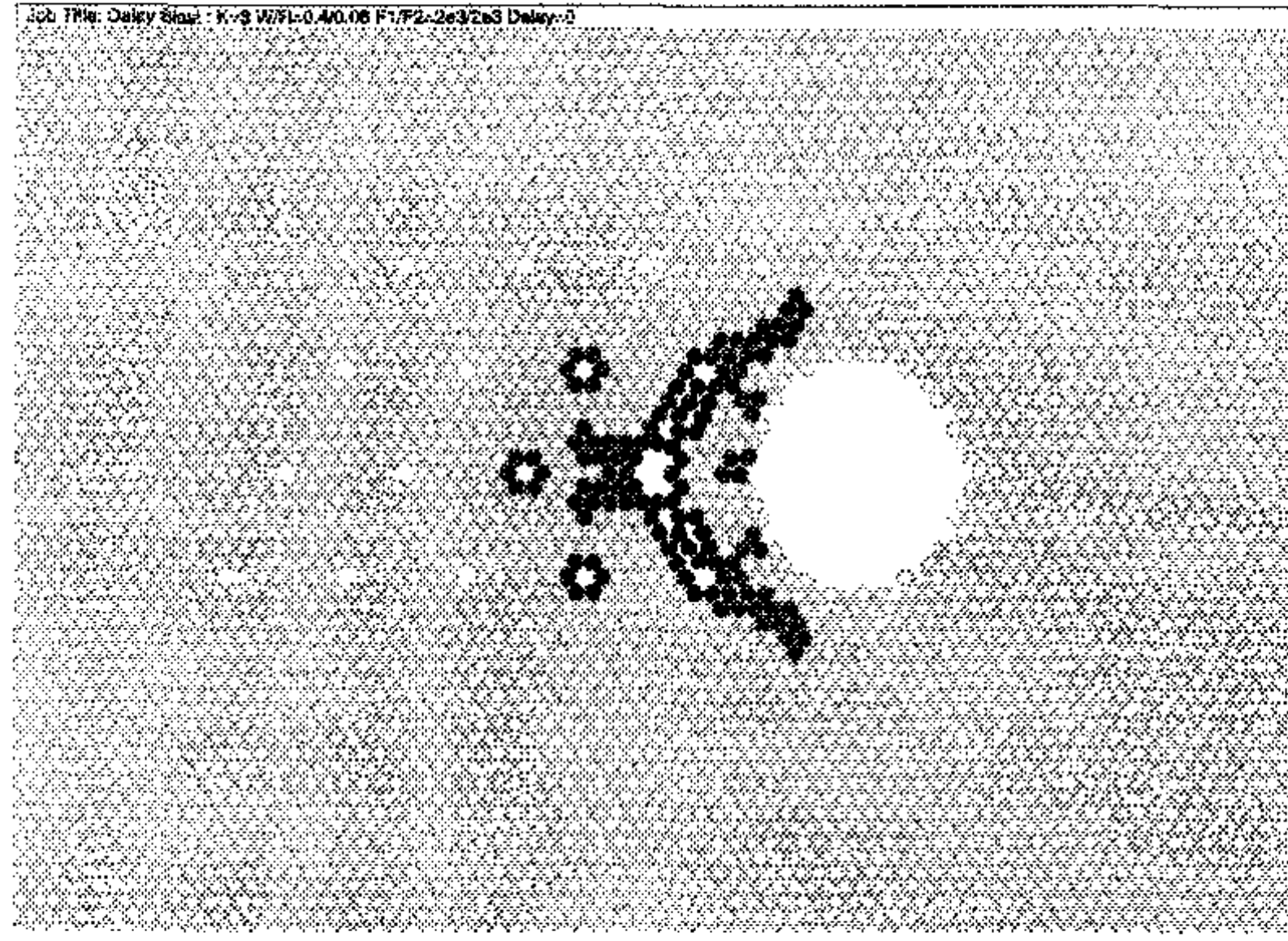


(b) 파암 양상 및 잔류결합력 분포 : 축압계수 = 1, 지발발파간격 = 1 주기

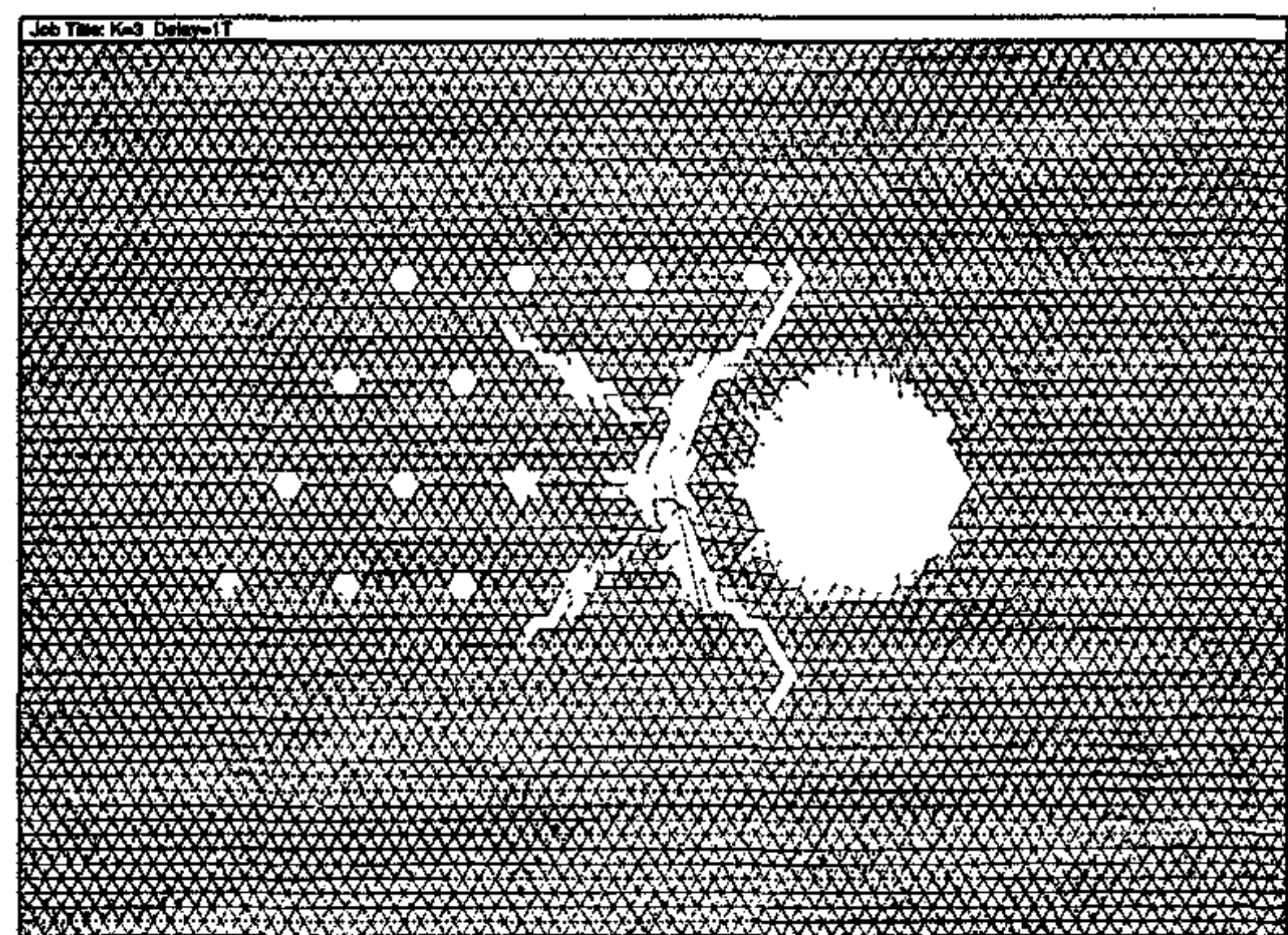
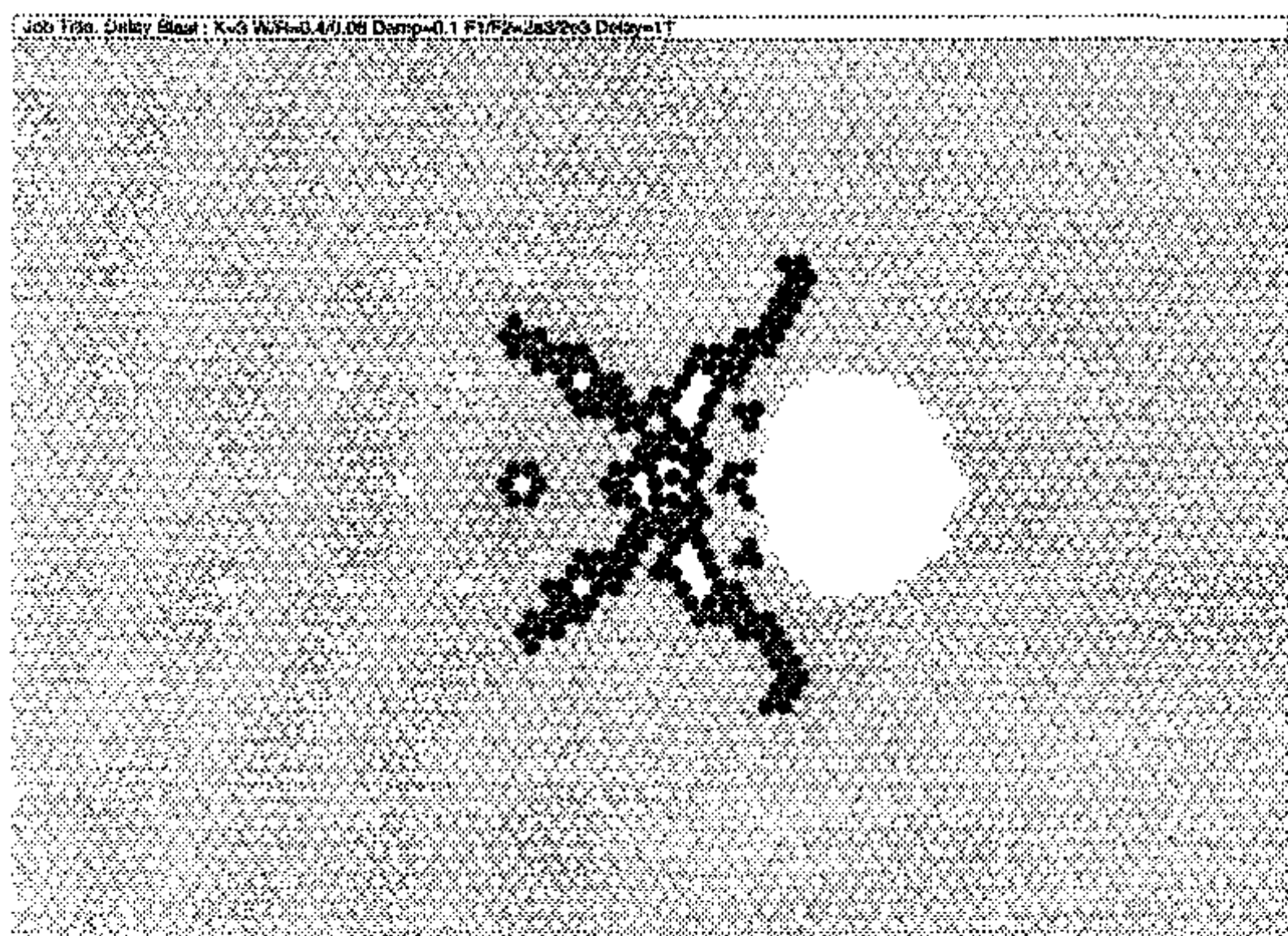


(c) 파암 양상 및 잔류결합력 분포 : 축압계수 = 1, 지발발파간격 = 2 주기

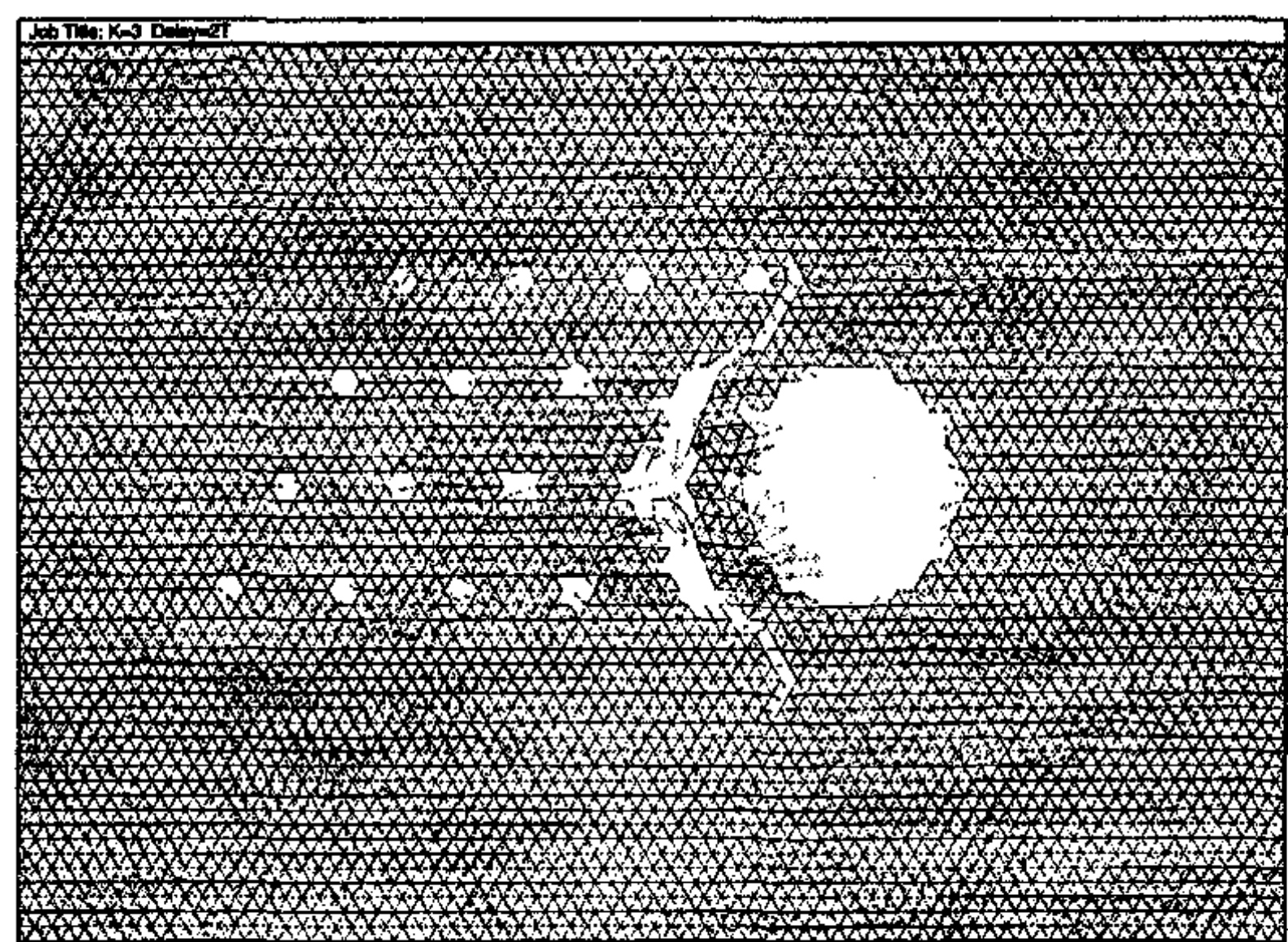
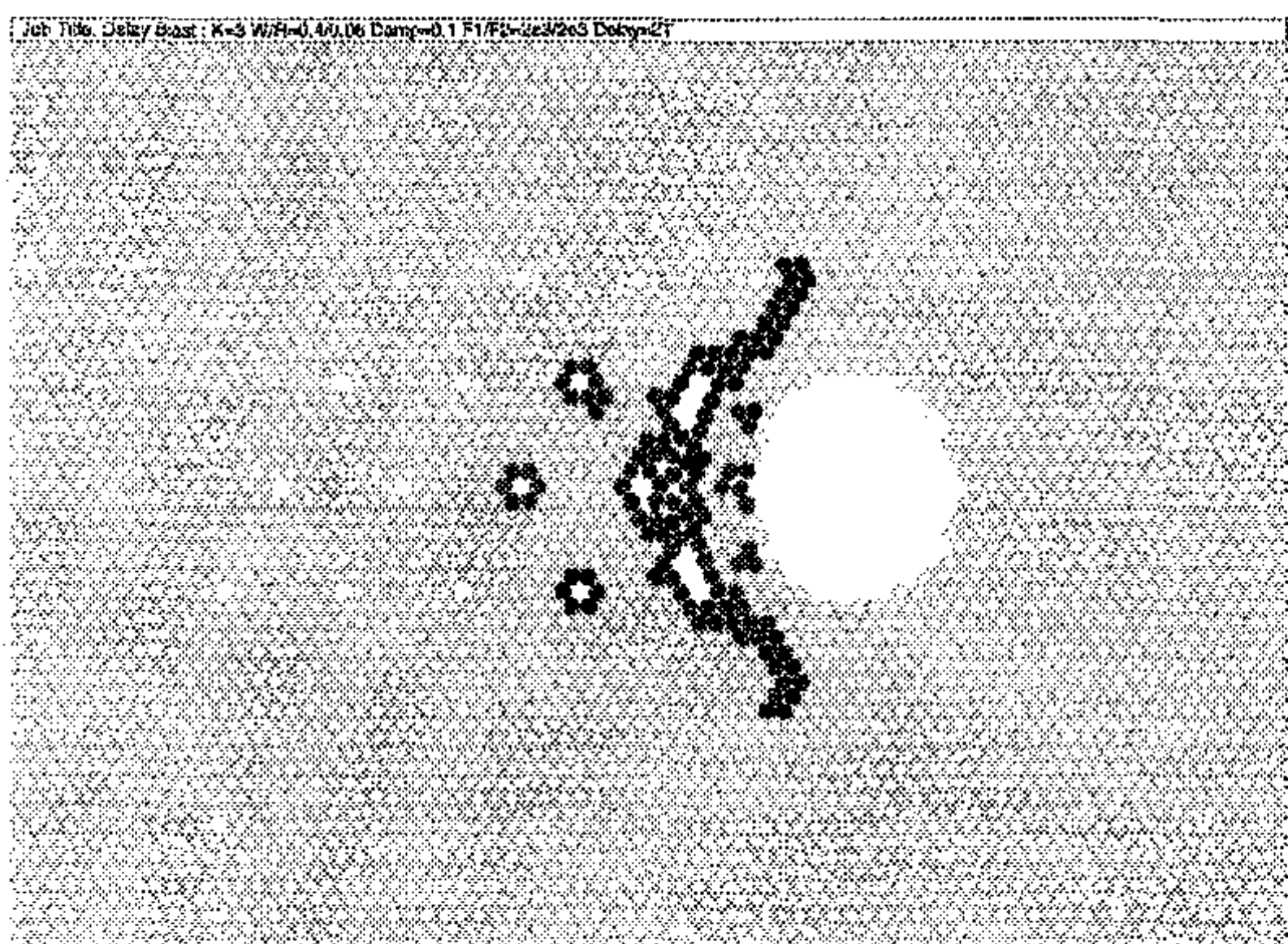
Fig. 3.2.5.9 축압계수=1인 터널 발파의 발파패턴에 따른 해석 결과



(a) 파암 양상 및 잔류결합력 분포 : 측압계수 = 3, 동시발파



(b) 파암 양상 및 잔류결합력 분포 : 측압계수 = 3, 지발발파간격 = 1 주기



(c) 파암 양상 및 잔류결합력 분포 : 측압계수 = 3, 지발발파간격 = 2 주기

Fig. 3.2.5.10 측압계수=3인 터널 발파의 발파패턴에 따른 해석 결과

6. PFC를 이용한 균열전파 모델링

가. 개요

발파에 의한 지반에서의 균열전파 및 파괴 메커니즘을 모델링하기 위하여 2차원적 입자유동해석 프로그램인 Itasca사의 PFC^{2D} (Particle Flow Code)를 사용하였다.

PFC^{2D} 는 기본적으로 개별요소법(Distinct Element Method, DEM)을 바탕으로 한 프로그램으로서, DEM에서는 계산을 통해 개별요소간의 접촉(contact)을 찾아내고 그에 따라 개별요소의 변위(displacement)와 회전(rotation)을 결정한다. PFC^{2D} 에서 모델을 구성하는 개개의 입자는 원판이거나 구의 형태를 띠고 있으며 각 입자는 강성체(rigid body)이다. 이러한 각 입자들은 독립적으로 이동하며 극히 작은 면적, 즉 점에서의 접촉을 통해 서로 상호 작용한다.

PFC^{2D} 에서의 계산은 시간단계별로 각 요소 입자의 운동방정식과 각 요소 입자간의 접촉점에서의 힘-변위 관계식의 반복적인 수행으로 이루어진다. 각 계산단계에서 먼저 입자들의 위치 좌표 값으로부터 입자간의 접촉상태를 알아낸다. 그런 다음 힘-변위 관계식으로부터 접촉력을 계산해 낸다. 구해진 접촉력과 물체력에 의한 외력, 그리고 모멘트를 운동방정식에 대입하여 각 입자들의 속도와 위치를 계산해 낼 수가 있게 된다. 이러한 과정이 매 계산단계마다 반복된다.

PFC^{2D} 에서는 입자들이 취할 수 있는 여러 형태의 거동을 나타내기 위해 크게 3가지 종류의 접촉모델(contact model) - 접촉강성모델(contact stiffness model), 미끄러짐 모델(slip model), 결합모델(bonding model) - 을 이용한다.

접촉강성모델은 접촉력과 상대변위 간에 탄성관계를 갖게 하며 linear model 혹은 Hertz-Mindlin model이 제시된다. 미끄러짐 모델은 입자 간에 미끄러짐(slip)이 발생할 경우, 즉 결합력이 작용하지 않을 경우에 전단접촉력과 수직접촉력 간의 관계를 제시한다. 그리고 결합모델은 입자가 지지할 수 있는 최대 접촉력의 한계를 결정한다. PFC^{2D} 에서는 접촉점에서 입자간을 결합시키는 모델로써 contact-bond model과 parallel-bond model을 제시하고 있다. Contact bond는 두 입자가 접하는 아주 작은 점에 작용하지만, parallel bond는 두 입자 사이에 존재하는 단면에 작용하게 된다. 또한 contact bond는 두 입자간에 오직 힘(force)만 전달할 수 있는 반면에 parallel bond는 힘뿐만 아니라 모멘트(moment)도 전달할 수가 있다. 이러한 bonding model은 입자간의 접촉력이 최대 결합력, 즉 강도를 초과해서 bond가 깨어지지 않는 한 존재하게 된다.

나. 입력물성 산정

PFC^{2D} 와 같은 입자결합모형을 구성하여 실제 암석의 거동을 모사할 경우 입자의 물성치를 결정하는 것은 매우 어려운 문제이다. 연속체 모델의 경우, 모델의 입력 물성치는 실내시험으로부터 얻어진 결과 값으로부터 직접적으로 얻어낼 수가 있다. 그러나 입자결합모형의 경우에는 입자들의 상호작용에 의해 개개의 입자들의 거동과 이 입자로 구성된 모델의 거동은 다른 양상을 보인다. 이로 인해 입자의 물성치를 결정하기 위해서는 여러 입자의 물성치를 반복적으로 입력하여 모델을 구성하고 이를 실제 암석의 거동과 비교하는 방법이 사용된다.

본 해석에서는 입자 물성치의 산정을 위해 실제 암석 시료의 크기를 가지는 이차원의 입자결합모형을 구성한 다음 PFC^{2D} 에서 제시하는 방법을 이용하여 단축 압축시험과 인장시험을 모사하였다. 모델을 구성할 때 접촉강성모델로는 선형모델을 적용하였으며, 결합모델로는 contact-bond 모델을 적용하였다. 입자의 거동을 나타내는 입력 물성치로는 입자의 법선·전단 강성, 입자의 인장·전단 결합력, 입자의 마찰계수가 있으며 이 중 입자의 강성과 결합력을 변화시키며 해석을 실시하였다. Table 3.4.2.1에 화강암 샘플 시료에 대한 실내 시험 결과(전체 모델의 요구물성)와 입력물성 산정을 위한 해석을 통해 얻어진 입자의 입력변수가 제시되어 있다.

Table 3.4.2.1 모델의 물성(실내시험 결과) 및 입자의 입력변수

Model property (macro-scale)		Particle property (micro-scale)	
Density	2660 kg/m ³	R_{max}/R_{min}	0.001 mm
Young's modulus	55.3 GPa	Density	1.66
Poisson's ratio	0.27	E_c	3170 kg/m ³
Compressive strength	165.1 MPa	k_n/k_s	103 GPa
Tensile strength	41.7 MPa	σ_c	3.4
		τ_c	110 MPa
		μ	220 MPa
		μ	0.25

다. 모델구성 및 해석조건

(1) 해석모델

균열전파 시뮬레이션을 위해 구성된 입자결합모델은 Fig. 3.4.2.1에 제시된다. 모델의 크기는 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 이며, 총 151,155개의 입자로 구성되어 있다. 입자결합모델을 생성한 후 발파공을 모사하기 위해 모델의 중심에서 반경 0.025 m 내에 위치하는 입자들을 제거하였고 입자가 제거된 공간에 반경방향으로 발파압 만큼의 압력을 받는 공벽의 역할을 하는 입자들을 배열하였다. 입자에는 응력이 아닌 힘을 가할 수 있기 때문에 공벽에는 재하 하고자 하는 발파압에 입자의 면적을 곱한 값을 가하여야 한다. 이 때 힘을 받는 입자는 원판(disk)의 형태이므로 힘을 받는 단면은 직사각형의 모양을 가지게 된다.

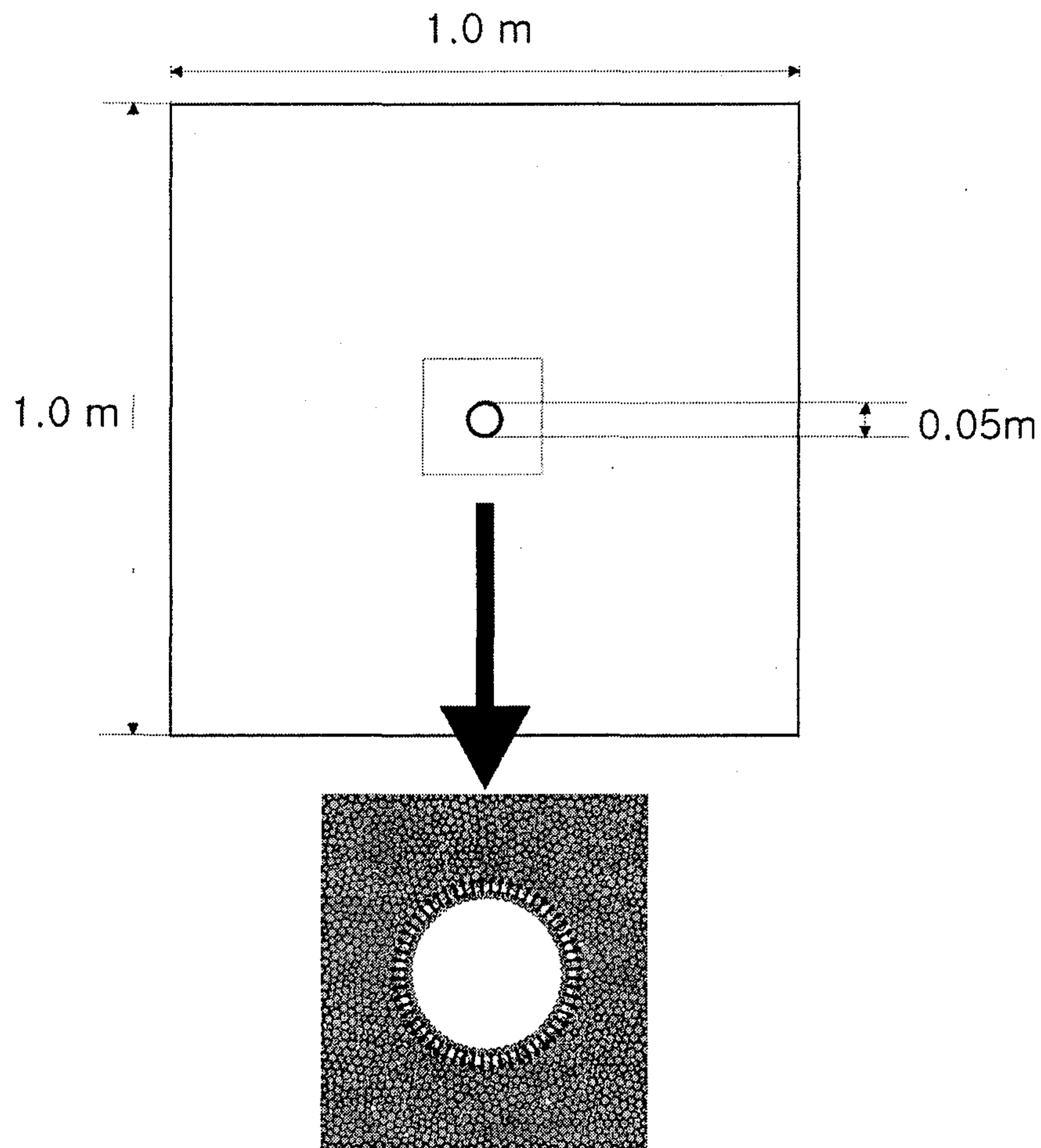


Fig. 3.4.2.1 발파균열전파 모사를 위한 입자결합모델

(2) 발파 압력

공벽을 이루는 입자에 입력되는 발파압으로는 Gaussian time 분포를 갖는 압력을 사용하였다. 발파압을 Gaussian 분포 형태로 사용한 것은 본 해석에서는 발파의 충

격파만 다루기 때문에 개스압 등의 잔여압력을 가지지 않는 발파압을 고려하기 위해서이다. 또한 발파압의 최대치와 지속시간을 제어하기 편리하기 때문이다.

본 해석에 적용된 공벽에 작용하는 발파압의 시간에 따른 크기 변화는 다음 식에 의해 구해지며 그 형태는 Fig. 3.4.2.2와 같다.

$$P(t) = P_{\max} \times \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{Z \times \left(1 - \frac{t}{t_0}\right)\right\}^2\right] \quad (3.4.2.1)$$

여기서, P_{\max} 는 최대발파압, t 는 경과시간, t_0 는 최대발파압이 작용하는 시간(지속시간의 1/2), Z 는 Gaussian 분포와 관련된 변수(여기서는 5.0)이다.

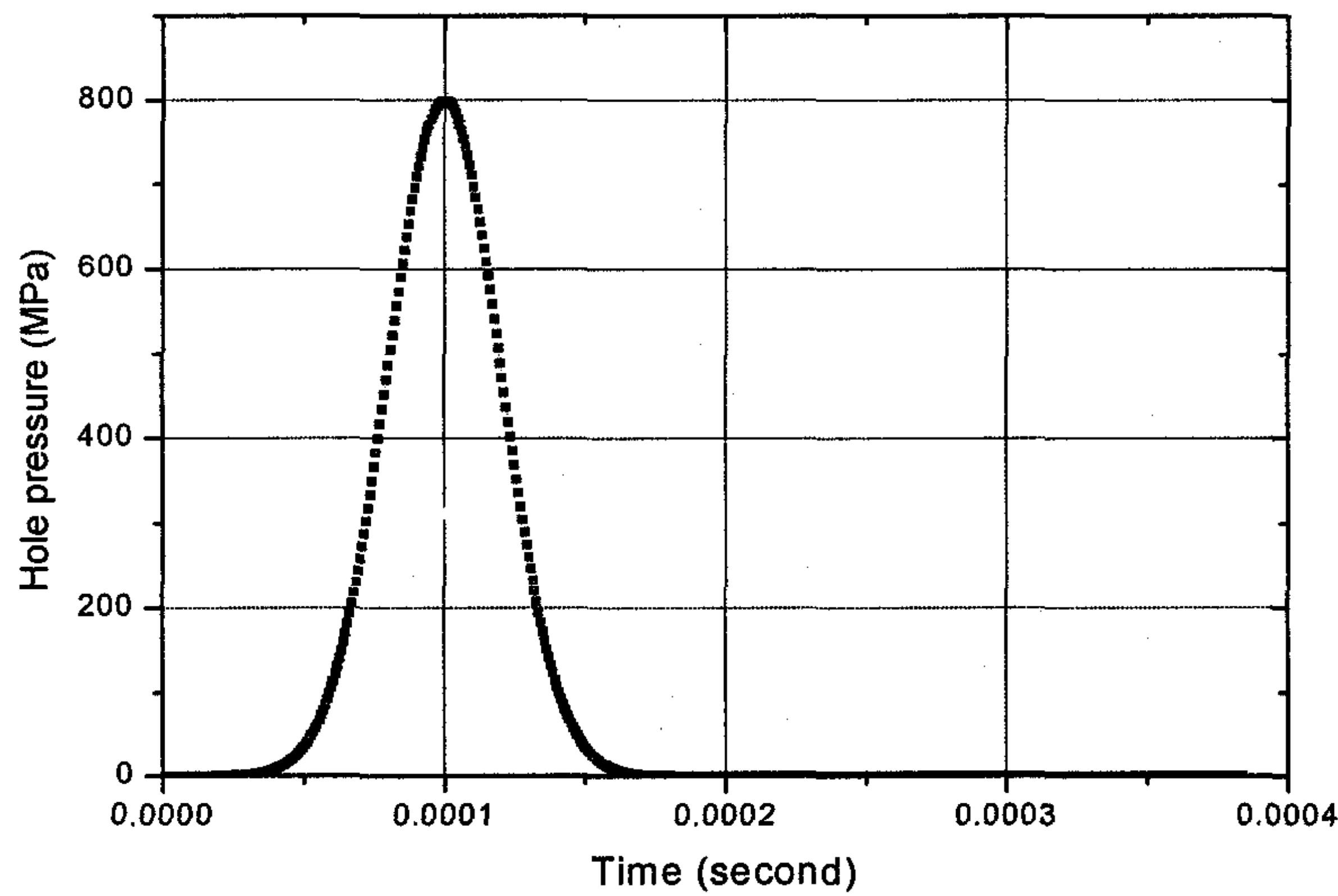


Fig. 3.4.2.2 Gaussian time 분포를 가지는 발파입력파형

라. 해석 결과

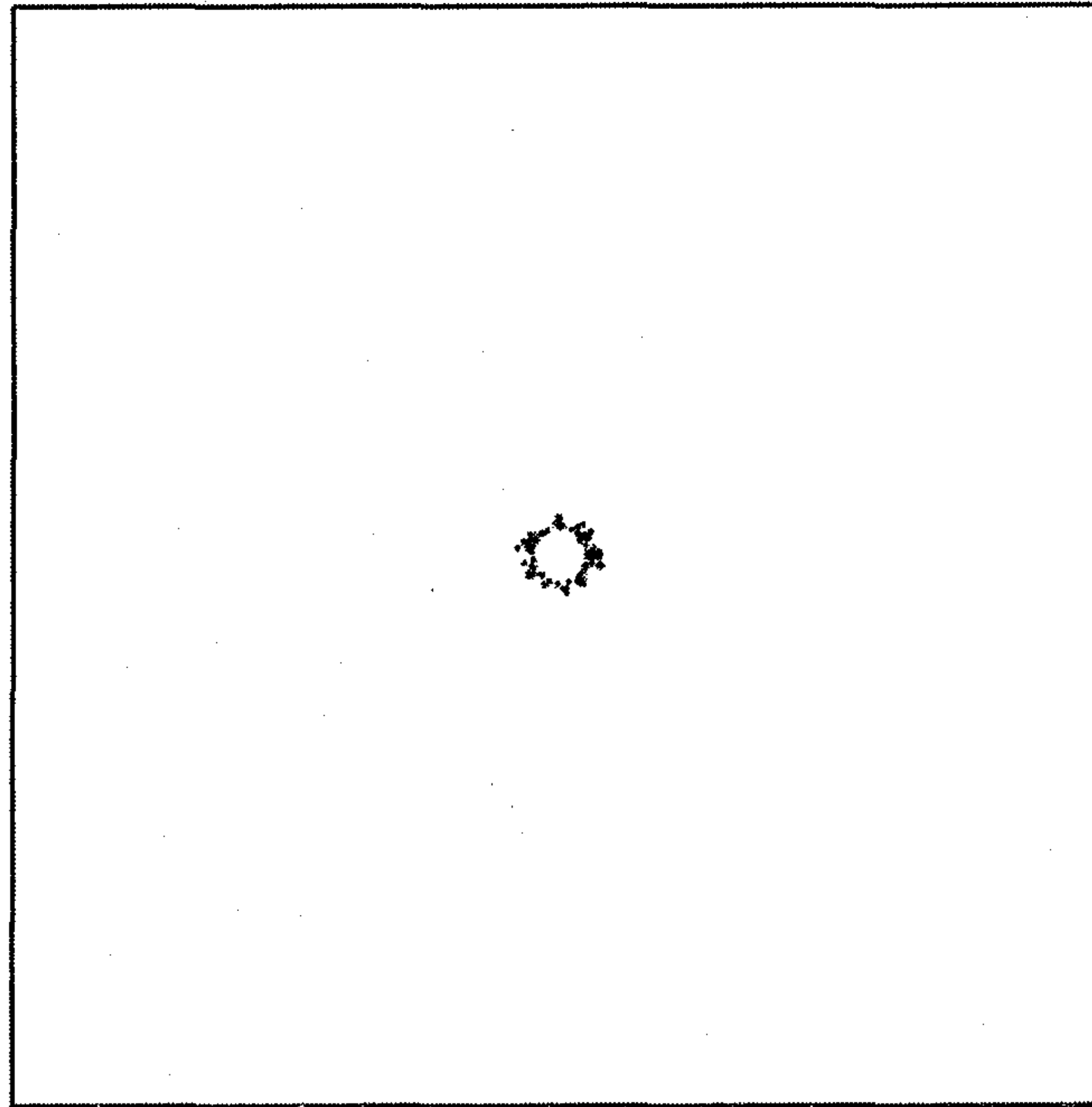
(1) 발파에 의한 균열전파특성

Fig. 3.4.2.3은 발파에 의한 균열의 전파 양상을 시간의 경과에 따라 도시한 그림이다. 공벽에 압력이 작용하자마자 공벽 바로 주위에는 압력이 입자의 강도를 초과하여 완전히 파쇄되고 입자간의 결합이 깨어지는데 이러한 영역을 파쇄대라 정의하였다. 파쇄대는 압력이 작용하고 나서 70 μ s이 지난 후부터 발생하기 시작하여 압력이 최대치에 이를 때까지 확장된다(Fig. 3.4.2.3 (a), (b)). 파쇄대의 반경은 대략 공

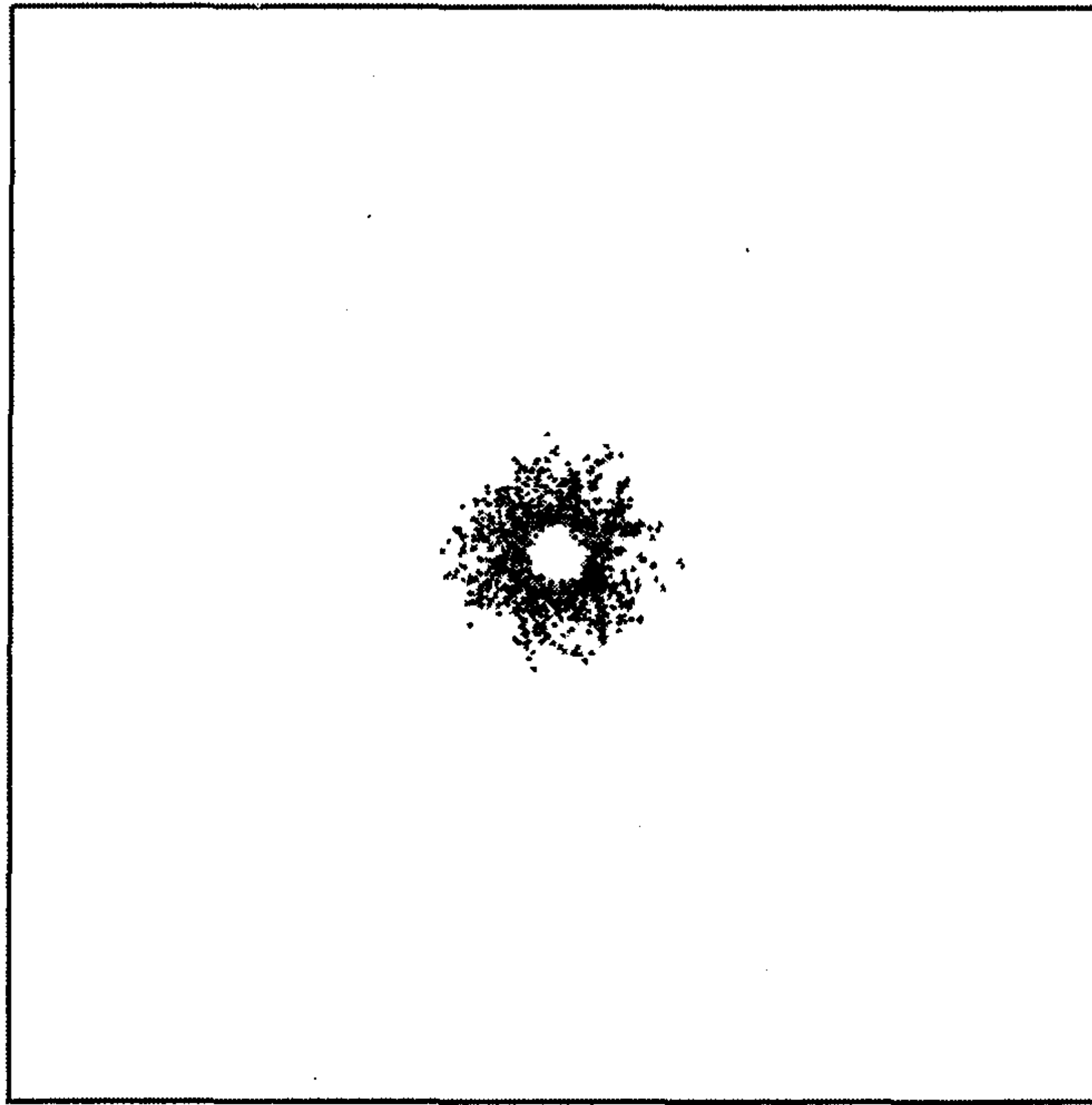
반경의 2배 정도이다.

파쇄대 영역 바로 주위에 밀도가 높은 반경방향균열(radial crack)들이 발생하였으며 이러한 밀도가 높은 반경방향균열의 첨단 부근에서부터 긴 반경방향 균열들이 생성되어 공 반경의 10 배 정도의 범위까지 확장되는 것을 볼 수 있었다. 또한 반경방향 균열들은 인장응력에 의해 생성되는 것을 관찰할 수 있었다. 긴 반경방향균열들은 높은 밀도의 반경방향 균열에서 일부가 확장하여 발생됨이 관찰되었는데, 이러한 균열들은 발파압이 감소하기 시작할 때부터 발생하여 압력 재하 이후 0.22 ms가 지난 후까지 성장이 지속되는 것을 관찰할 수가 있었다.

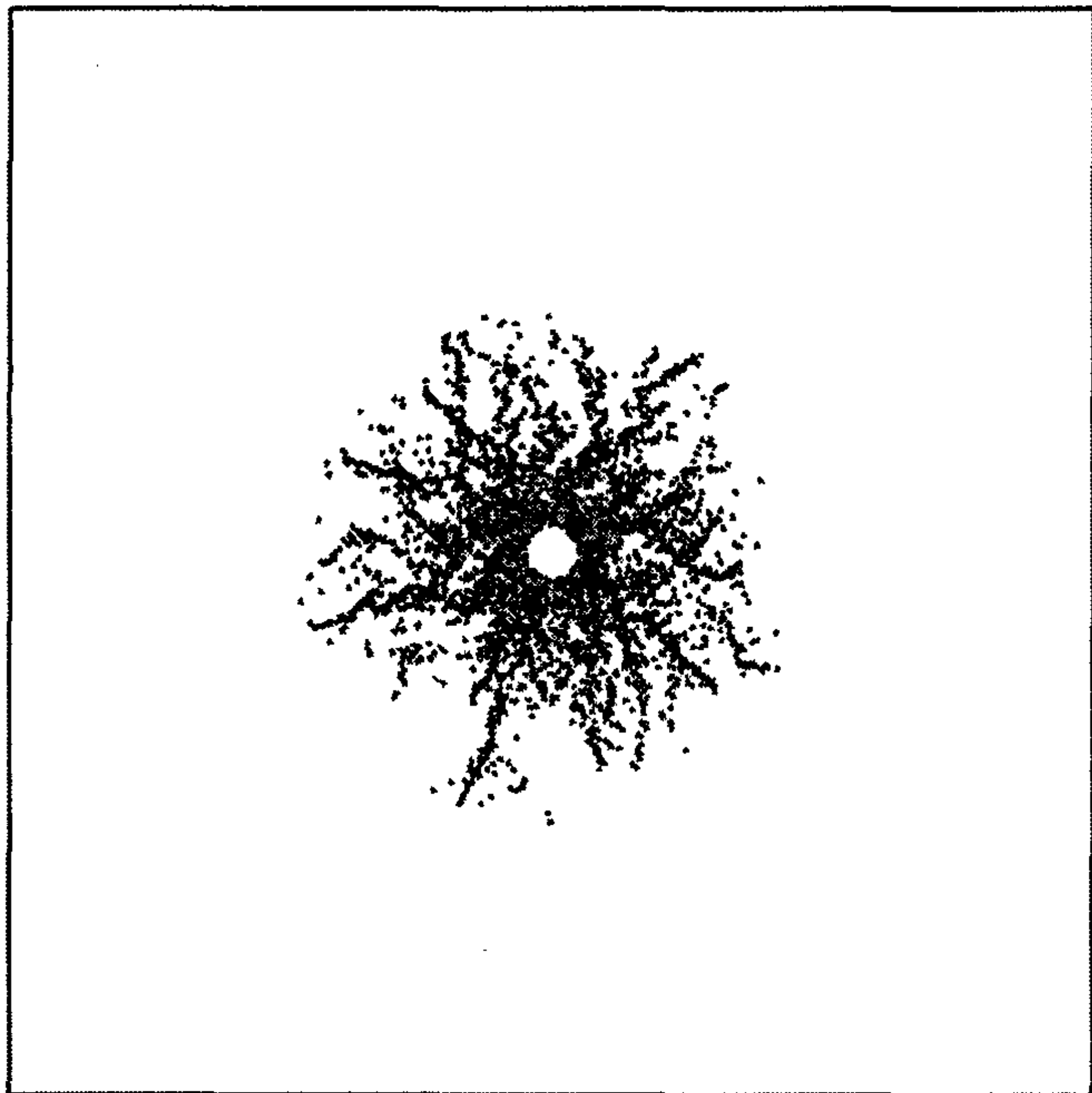
한편 긴 반경방향 균열들의 성장속도를 알아보기 위해 시간마다 길이의 변화를 조사하였다. Fig. 3.4.2.3 (d)에서의 A, B, C의 반경방향 균열에 대해 전파속도를 측정할 것을 Table. 3.4.2.3에 정리하였다.



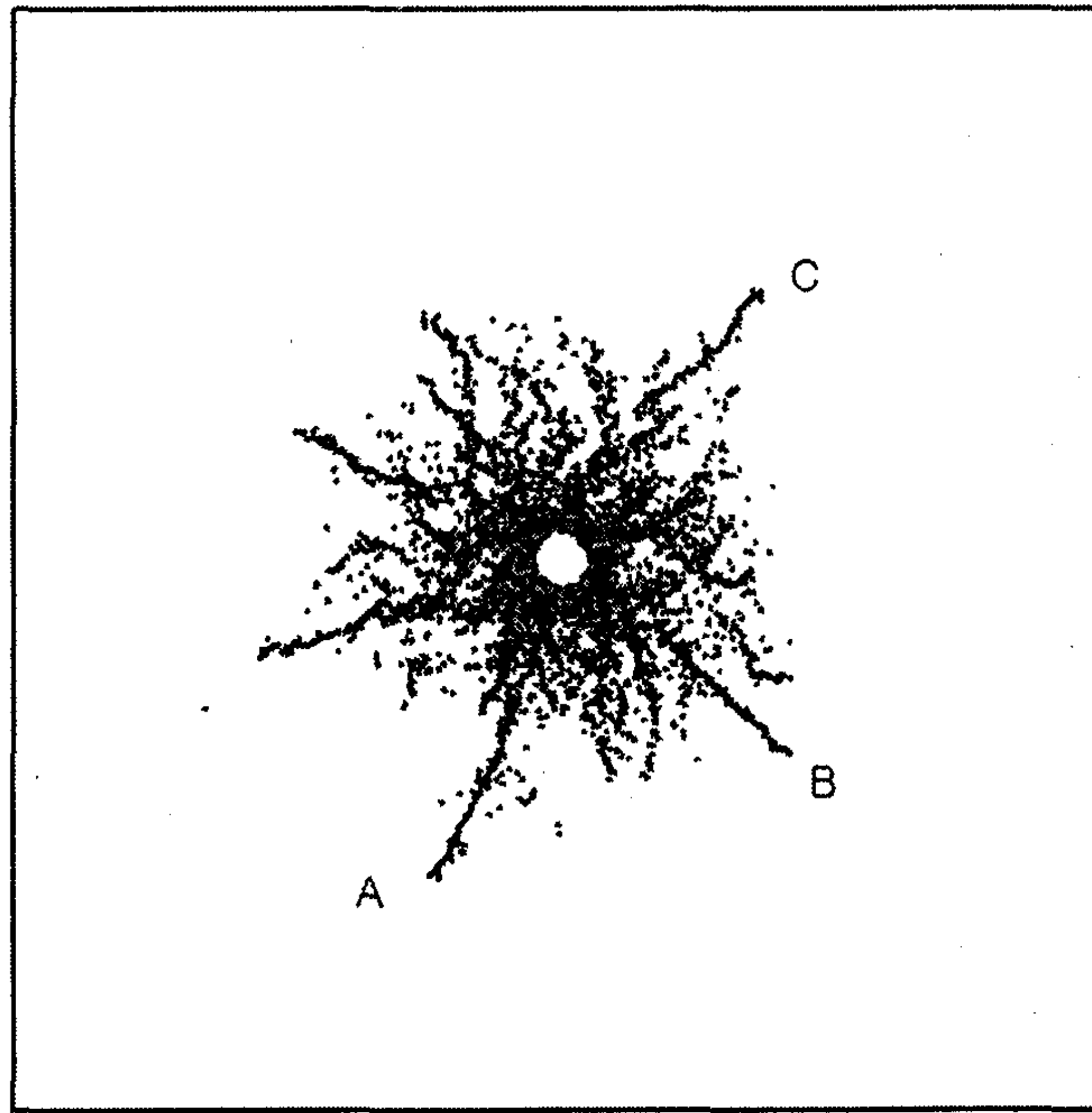
(a) at $t = 0.00007$ second



(b) at $t = 0.0001$ second



(c) at $t = 0.0002$ second



(d) at $t = 0.00022$ second

Fig. 3.4.2.3 시간에 따른 발파균열 전파양상

Table 3.4.2.2 반경방향 균열의 전파속도

Crack index	Velocity
Crack - A	1820 m/s
Crack - B	2500 m/s
Crack - C	2050 m/s

Aimone은 공내의 폭발로 인해 암반으로 전달되는 충격파가 발파공으로부터 멀어질수록 진폭이 급격히 감소하며 이러한 충격파는 반경방향과 접선방향의 응력 성분으로 나누어진다고 하였다(Aimone, 1992). Aimone에 의해 제시된 이상화된 응력 파형이 Fig. 3.4.2.4에 도시되어 있다. 발파공에 인접한 위치에서는 충격파의 반경성분이 암석의 강도를 훨씬 초과하는 압축응력을 가지고 있기 때문에 이 영역에서는 급격한 압축파괴가 일어난다. 발파공에서 멀어지게 되면 이 반경응력성분은 감소되어 암석의 강도보다 작아지게 된다. 접선성분의 경우는 인장응력이 급속히 증가하여 암석의 인장강도를 초과하게 된다. 따라서 암석의 인장파괴에 의해서 발파공 주변으로부터 반경방향의 균열이 생성된다. 이러한 인장응력 성분이 암석의 인장강도 이하로 감소되면 반경방향균열의 성장은 중지된다.

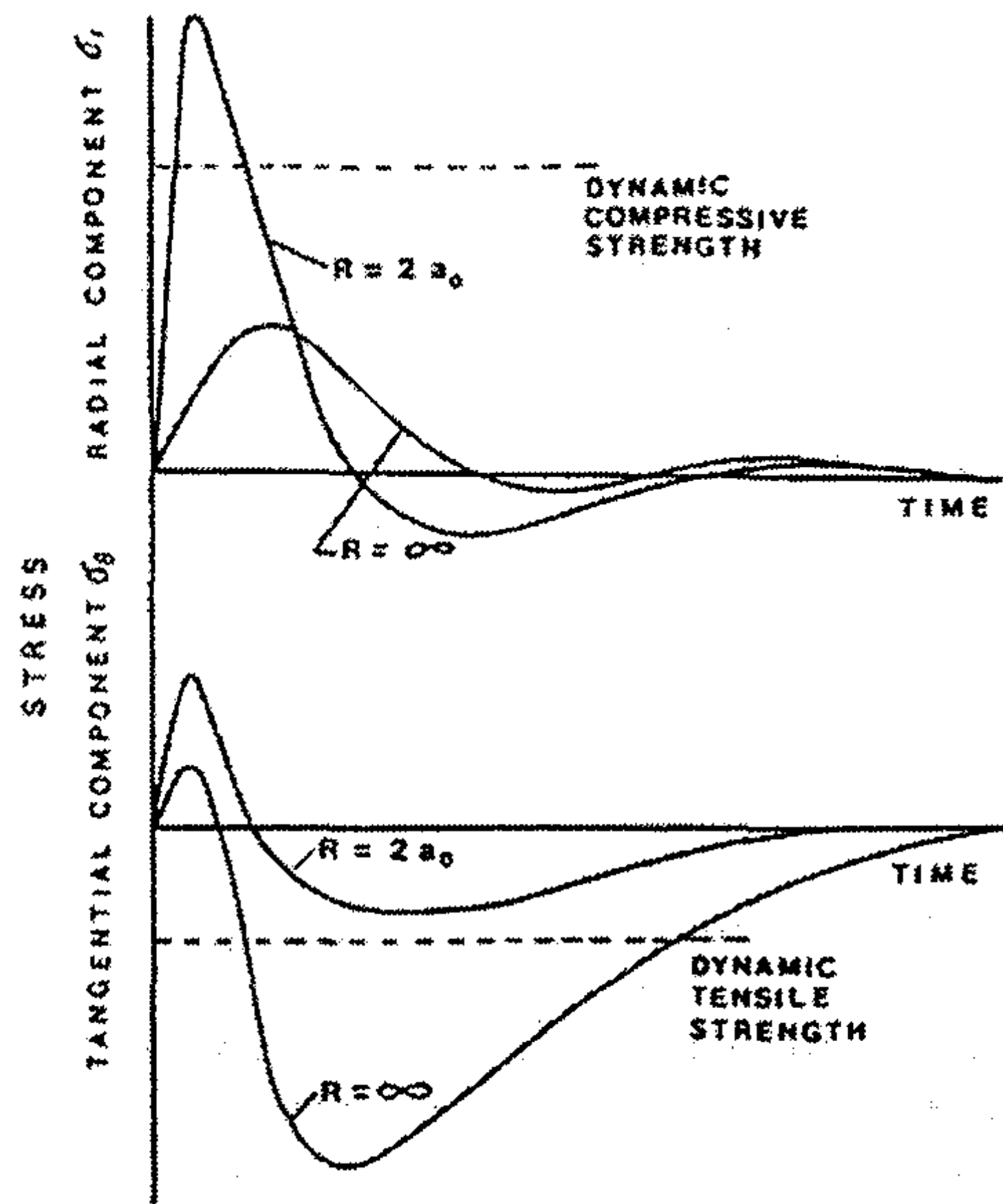


Fig. 3.4.2.4 이상화된 반경방향 및 접선방향 응력성분(after Aimone, 1992).

본 해석에서도 응력파의 영향을 알아보기 위해서 Fig. 3.4.2.5에서 도시되어 있는 것처럼 중심에서 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40 m 떨어진 지점에서 반경응력(radial stress)과 접선응력(tangential stress)을 측정하였다.

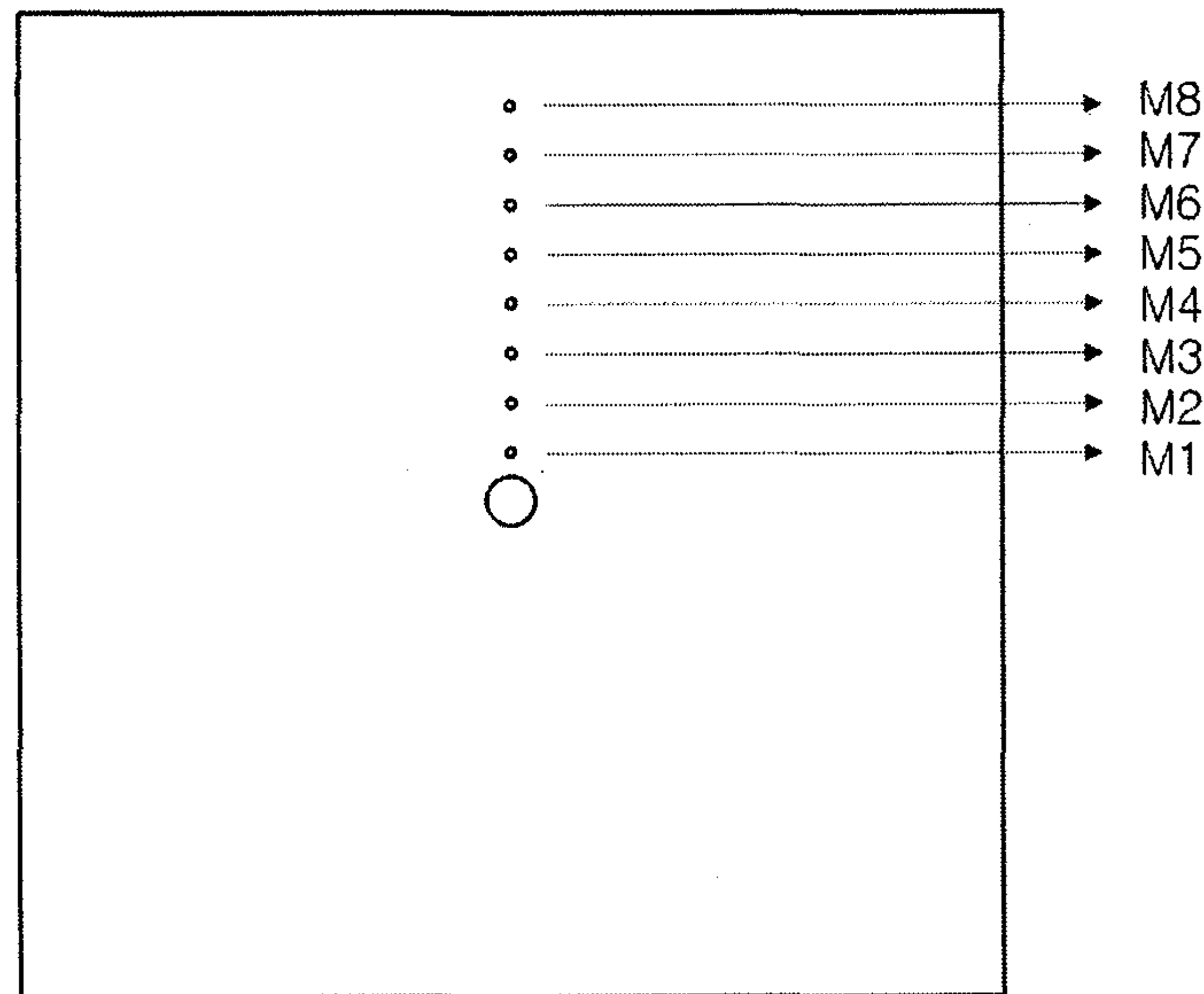


Fig. 3.4.2.5 모델 내부의 측정지점

Fig. 3.4.2.6의 (a)는 각 측정지점에서 시간에 따라 관찰한 반경응력이고 (b)는 접선응력이다. 각 지점에서 응력파가 도달하는 시간과 지점간의 거리를 이용해서 파의 전파 속도를 계산하면 압축파는 대략 6600 m/s이고 전단파는 3500 m/s의 값을 얻을 수가 있었다. Stacey는 균열의 전파속도가 전단파속도의 0.92배보다 작다고 하였는데(Stacey, 1992), 본 연구에서 얻어진 Table 3.4.2.2의 결과 역시 그러한 주장과 부합함을 알 수 있었다.

반경방향 응력의 경우 공 주위에서는 아주 큰 압축응력이 작용하지만 중심에서 멀어질수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 각 지점에서의 응력파를 살펴보면 Fig. 3.4.2.4에 이상화되어 제시된 것처럼 진동하는 형태를 띠는 것을 볼 수 있다.

접선방향의 응력의 경우에는 다소 복잡한 양상을 보인다. M1은 중심에서 0.05 m 지점으로 공과 아주 가까운 지점이다. Fig. 3.4.2.4에서의 이상화된 접선응력 파형과는 달리 아주 큰 압축응력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 지점은 Fig. 3.4.2.3에서 볼 수 있듯이 완전히 파쇄되는 영역으로서 반경방향의 압축응력이 모델의 강도를 초과하여 입자의 결합이 깨져 파괴가 일어난다. Donze 등의 해석에서도 이와 같은 결과를 보이는데 이는 파쇄대 내에 위치하는 깨어진 입자들이 다짐현상에 의해 모든 방향으로 압축응력을 받게 되기 때문이라고 설명하고 있다(Donze et al., 1997).

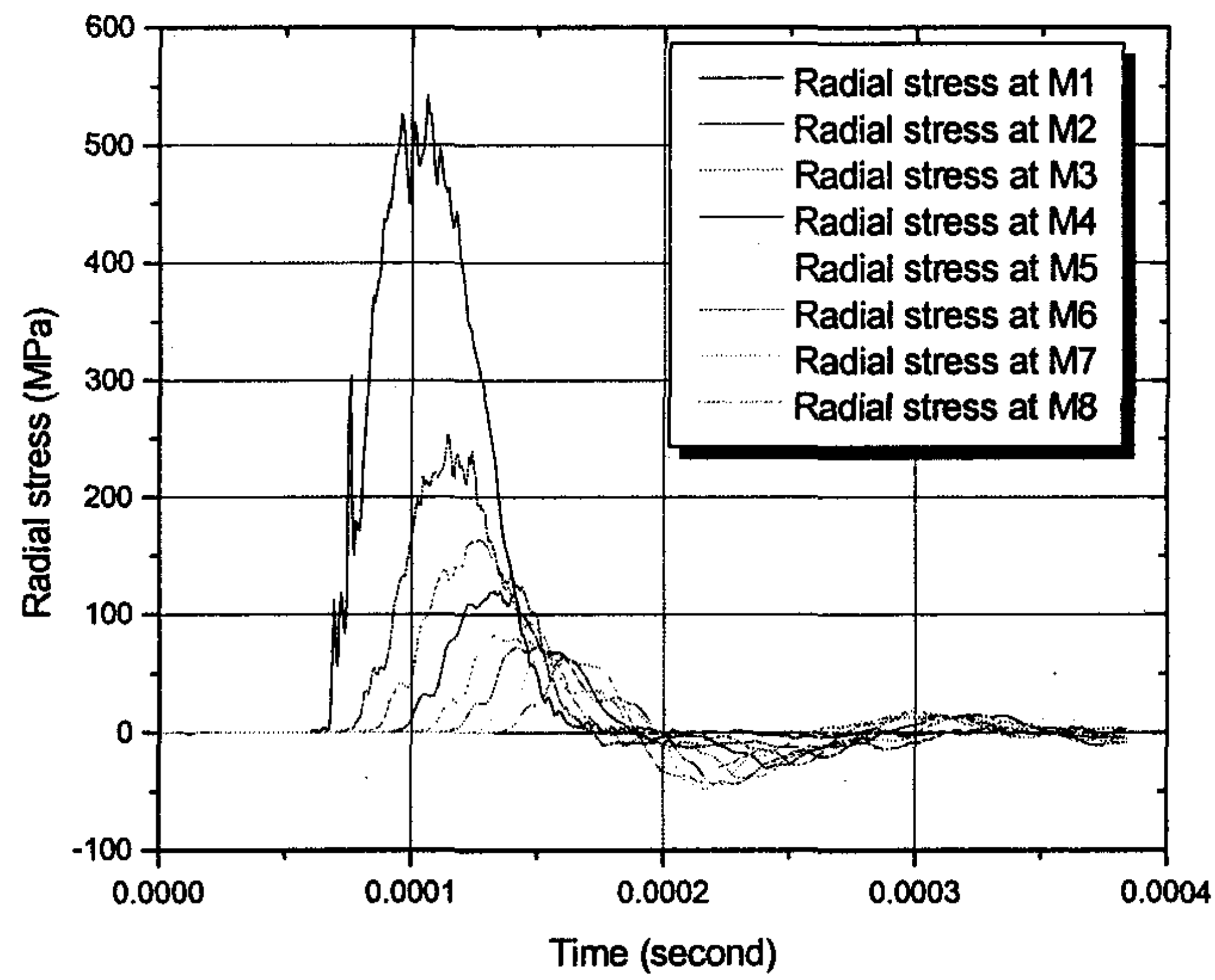
M2, M3, M4 지점에서는 Fig. 3.4.2.4에서처럼 접선방향으로 압축응력을 받다가 인장응력 상태로 변환한다. 이 인장응력 상태에서 이완이 발생하여 다시 압축상태로 변환하려 하는 양상을 보이는데 이러한 이완이 발생하는 시간은 반경방향의 균열이 이 지점을 통과하는 시간과 일치한다. 이는 반경방향의 균열이 응력파의 접선방향의 인장성분(hoop stress)에 의한 것이라는 이론모델의 결과와 일치한다(Kutter and Fairhurst, 1971).

Fig. 3.4.2.7은 M5, M6, M7, M8 지점에서 측정한 접선응력과 반경응력을 같이 도시한 그림이다. 모델에 작용하는 압력상태는 크게 세 가지의 단계로 구분할 수 있다. 반경방향, 접선방향 모두에서 압축응력이 발생하는 단계, 반경방향으로는 압축, 접선방향으로는 인장이 발생하는 단계, 마지막으로 모든 방향에서 인장이 작용하는 단계로 구분할 수 있다.

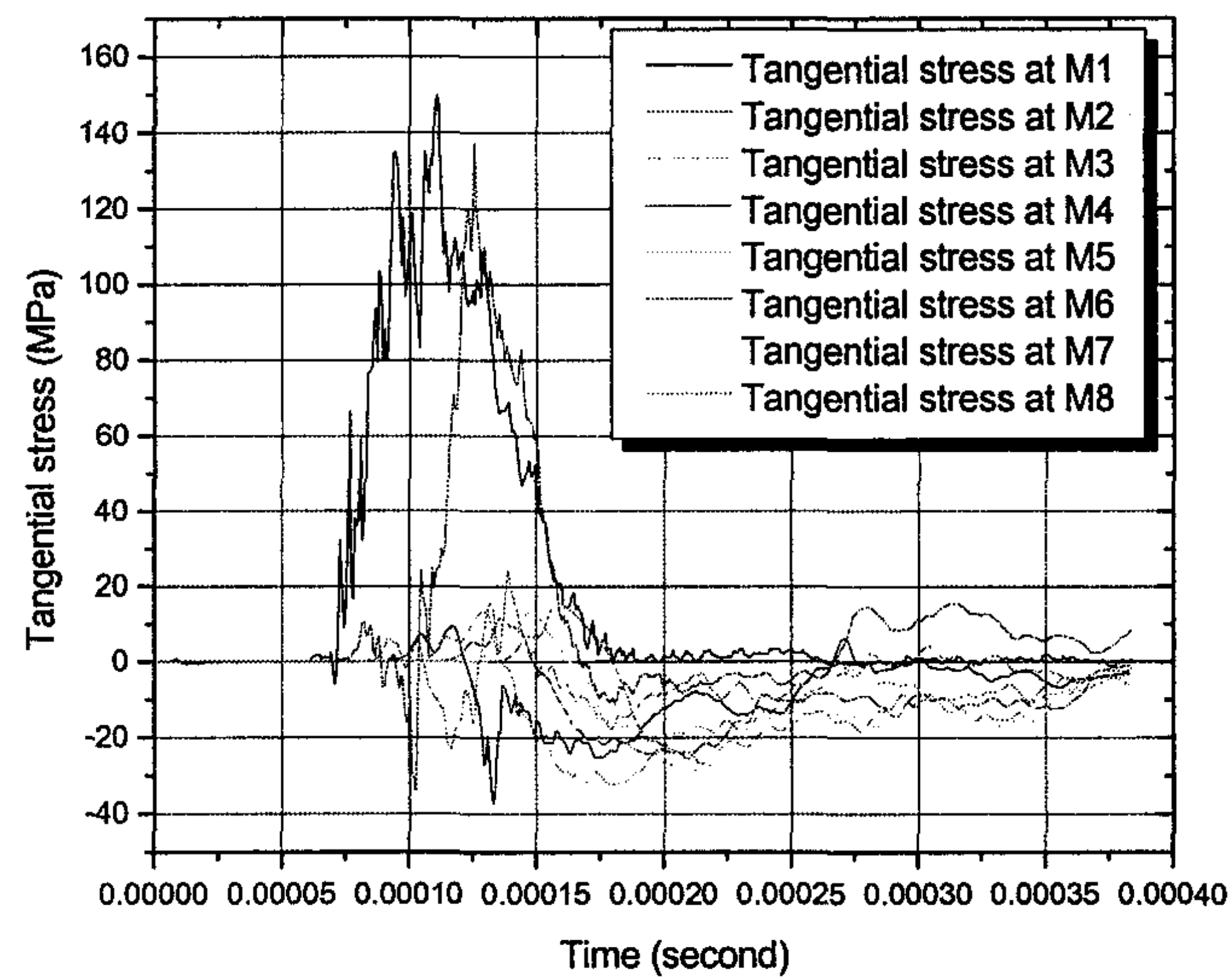
Fig. 3.4.2.8은 각 지점에서 측정한 반경, 접선방향 압력의 최대치와 내벽에 정수압이 작용하는 thick wall cylinder에서의 이론해를 같이 나타낸 그림이다. 동하중이 작용하는 해석에서의 값이 같은 압력이 작용하는 정수압이 작용할 때보다 크게 나타난다.

Fig. 3.4.2.9는 모델에 발생하는 입자의 파괴를 시간에 따라 도시한 그림이다. 발파 초기 단계에서는 인장에 의한 파괴와 전단에 의한 파괴가 같이 증가하지만, 최대발

파압을 지나고 나서 무렵부터는 전단에 의한 파괴는 변화하지 않고 인장에 의한 파괴만이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 발파압이 가해지는 초기에는 전단파괴에 의해 파쇄대가 형성된다는 Aimone(1992)의 이론과 일치한다.



(a) 반경방향 응력



(b) 접선방향 응력

Fig. 3.4.2.6 각 측정지점에서의 반경방향 및 접선방향 응력성분

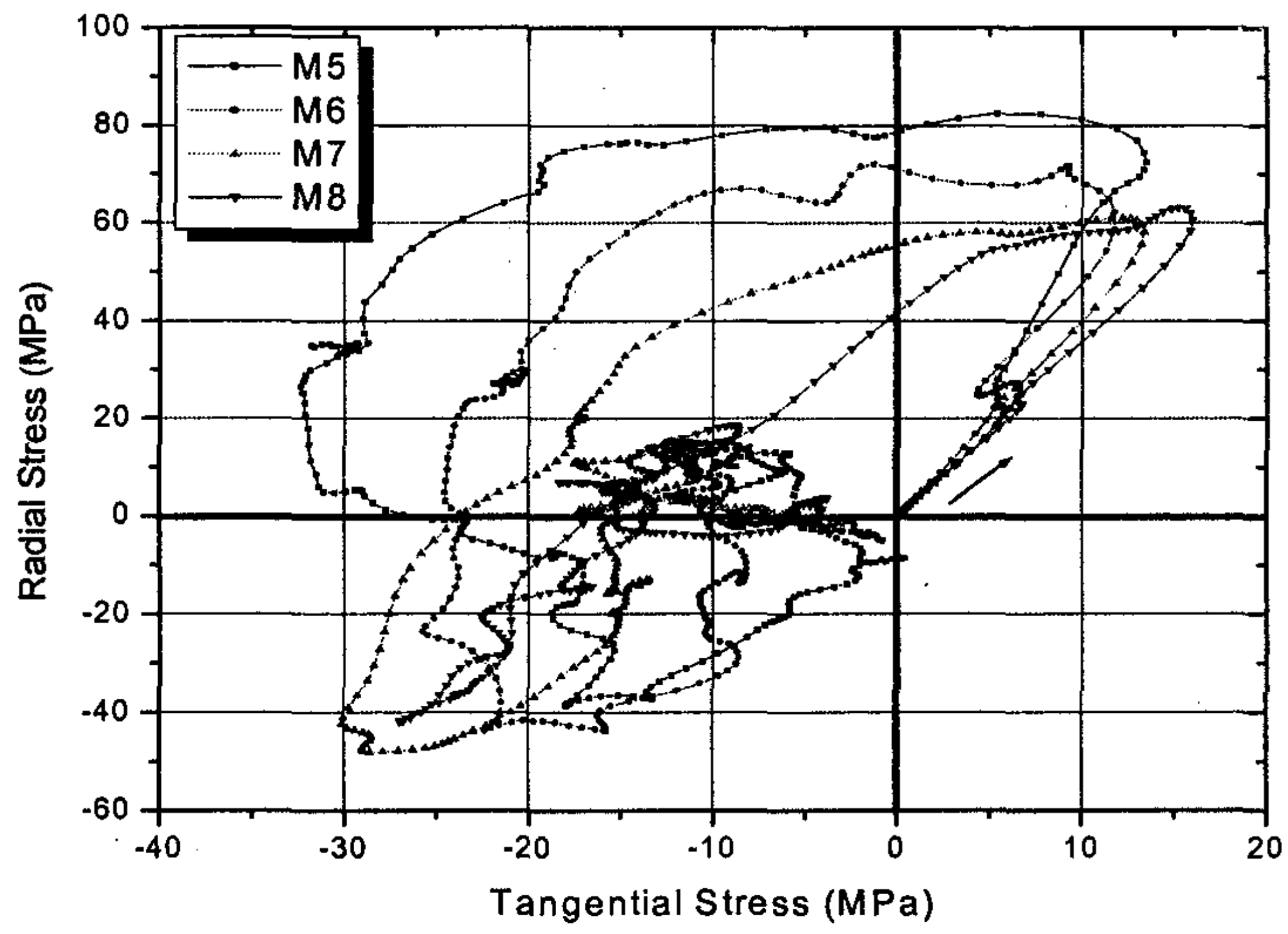


Fig. 3.4.2.7 접선방향 응력에 대한 반경방향 응력

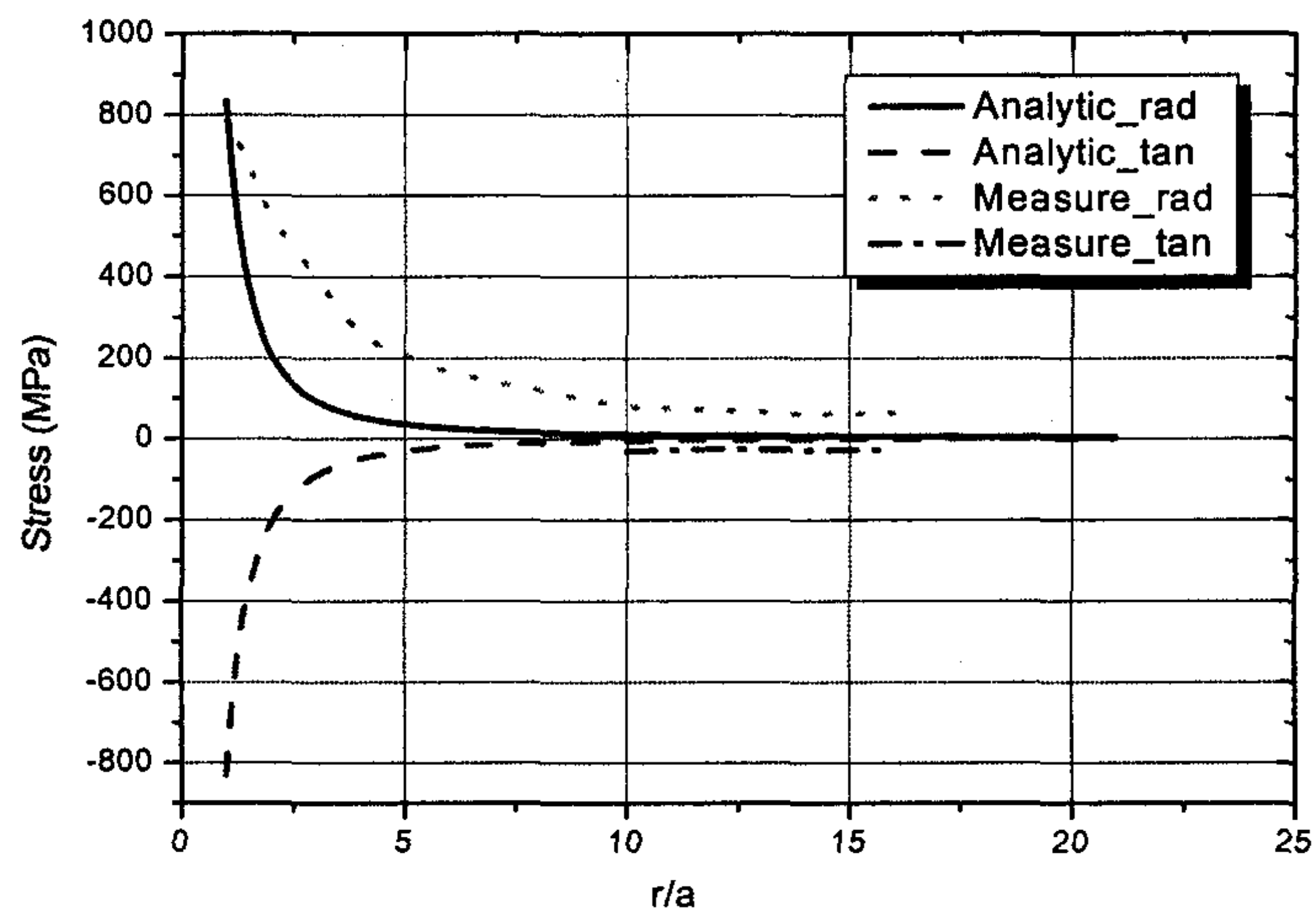


Fig. 3.4.2.8 측정된 응력과 이론해에 의한 응력의 비교

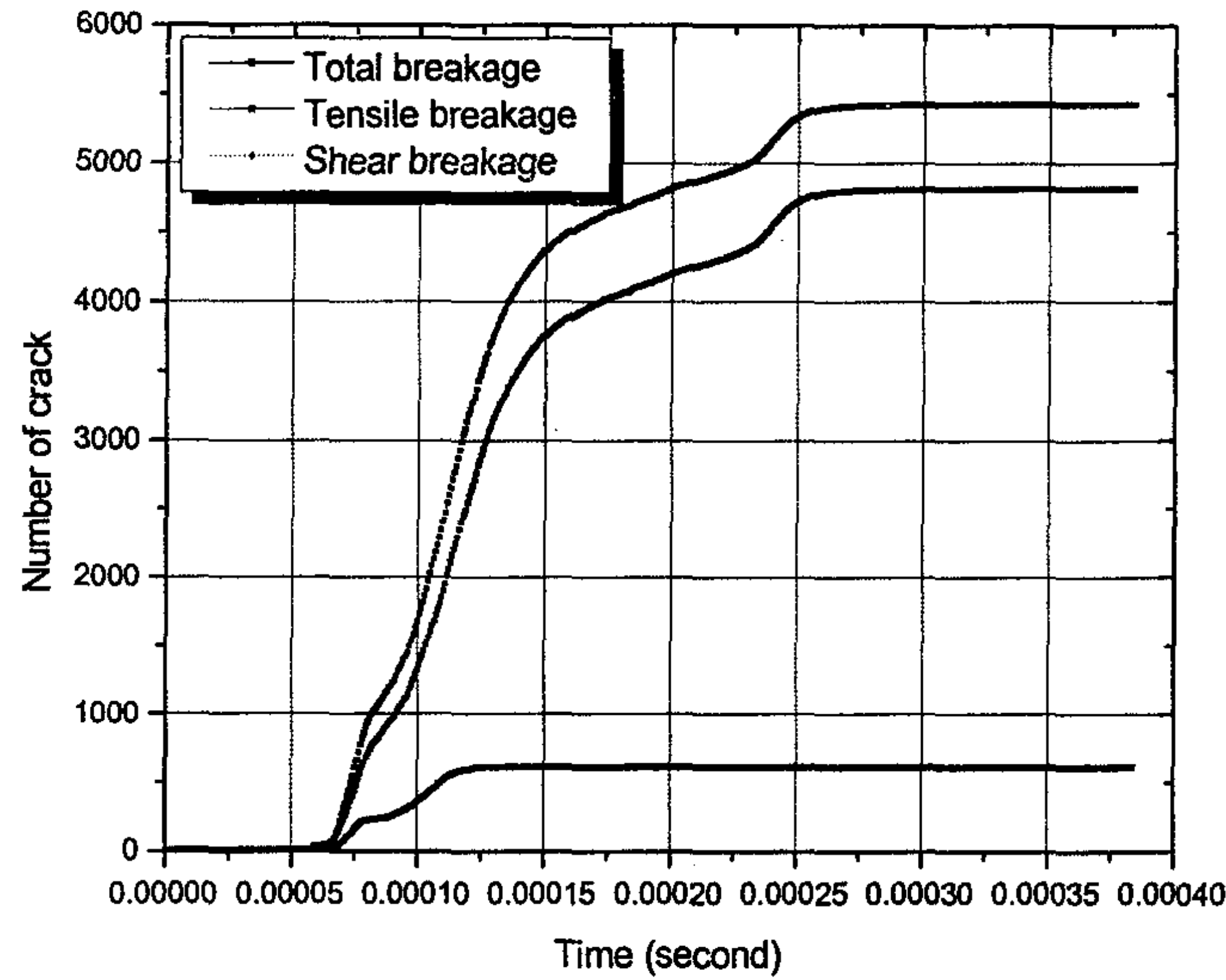


Fig. 3.4.2.9 시간에 따른 결합입자의 파괴모드 변화

(2) 발파압의 특성에 따른 영향조사

일반적으로 공벽에 작용하는 발파압의 크기와 지속시간을 변화시킴에 따라 공주면에 발생하는 균열을 제어할 수 있다고 알려져 있다. Sandia National Laboratory에서 시행한 실험에 의하면 짧은 지속시간을 가진 높은 압력을 공내에 재하하였을 경우 큰 파쇄대가 형성되고 상대적으로 짧은 반경방향 균열이 생성되며, 반대로 긴 지속시간을 가진 낮은 압력을 재하하였을 경우에는 상대적으로 작은 파쇄대와 함께 비교적 긴 반경방향균열이 생성된다고 하였다(McHugh and Keogh, 1982).

이러한 발파압의 유형에 따른 균열발전 양상을 모사하기 위해 발파압의 최대값과 지속시간을 변화시켜 해석을 수행하였으며 해석에 이용된 발파압의 최대값과 지속시간이 Table 3.4.2.3에 정리되어 있다.

Table 3.4.2.3 다양한 최대값과 지속시간을 가지는 발파압 유형

Duration time (sec)	P_{max} (GPa)		
	0.4	0.8	1.6
0.0004	P11	P12	P13
0.0002	P21	P22	P23
0.0001	P31	P32	P33

균열의 양상을 정량적으로 관찰하기 위해서 손상영역을 파쇄영역과 반경방향균열이 존재하는 영역으로 구분하였다. 전단에 의해 파괴가 일어나는 영역을 파쇄영역으로 설정하였으며 반경방향균열의 영역은 가장 긴 균열의 길이로 하였다.

대략적인 결과를 관찰하기 위해 P11, P22, P33(Fig. 3.4.2.10 참조)에 의한 균열 유형을 Fig. 3.4.2.11, Fig. 3.4.2.12, Fig. 3.4.2.13에 도시하였다. 공 주변의 파쇄영역에는 주로 전단에 의한 파괴가 발생하였고, 길게 발생된 균열은 인장에 의한 파괴이다. 세 가지의 발파유형중 최대압이 가장 작고(0.4 GPa) 지속시간이 가장 긴(0.0004 s) P11의 경우에는 파쇄영역이 공지름의 약 2배이고 반경방향균열은 공지름의 13배 정도의 영역에 걸쳐 있다. P22의 경우는 파쇄영역이 공지름의 3배이고 반경방향균열은 11배 정도이다. 그리고 최대압이 가장 크고(1.6 GPa) 지속시간이 가장 짧은(0.0001 s) P33의 경우에는 파쇄영역이 공지름의 5배 정도이고 반경방향균열은 9배 정도이다. 최대압이 작고 지속시간이 긴 경우에 상대적으로 파쇄대가 작고 반경방향균열이 크게 나타나는 반면에 최대압이 크고 지속시간이 작은 경우에는 파쇄대가 크며 반경방향균열의 영역이 작게 나타나는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 3.4.2.14와 Fig. 3.4.2.15는 얻어진 결과를 바탕으로 공지름에 대한 파쇄영역과 최대반경방향균열의 길이의 비를 각각 최대발파압과 지속시간의 증가에 따라 도시한 그림이다. 해석결과 최대발파압이 증가하면 모든 지속시간의 경우에 대해서 반경방향균열의 영역이 확대되고, 또한 파쇄영역도 확대되는 것을 관찰하였다. 그러나 지속시간이 증가할 경우에는 반경방향균열의 영역은 확대되는 반면에 파쇄영역의 크기는 그다지 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

실제 제어발파에서 효과적인 발파를 위해서는 파쇄영역을 최소화하고 긴 반경방향균열이 잘 성장하도록 제어해야 한다. 위의 결과를 바탕으로 제어 발파시 가장 적합한 발파유형은 긴 지속시간을 가지고 충분히 큰 공내압을 가져야 한다. 지속시간이 짧은 경우에는 대부분의 에너지가 공 주변에 파쇄영역을 생성시키는데 소비되는 반면에 지속시간에 길 경우에는 반경균열을 생성시키는데 이용되는 에너지의 비율이 더 높아진다. 실제 발파에서 이러한 효과는 decoupling에 의해 얻어질 수 있다. Decoupling을 적절히 이용할 경우 공내 압력은 완만히 증가하게 하고 또한 공내압력을 낮출 수도 있게 된다.

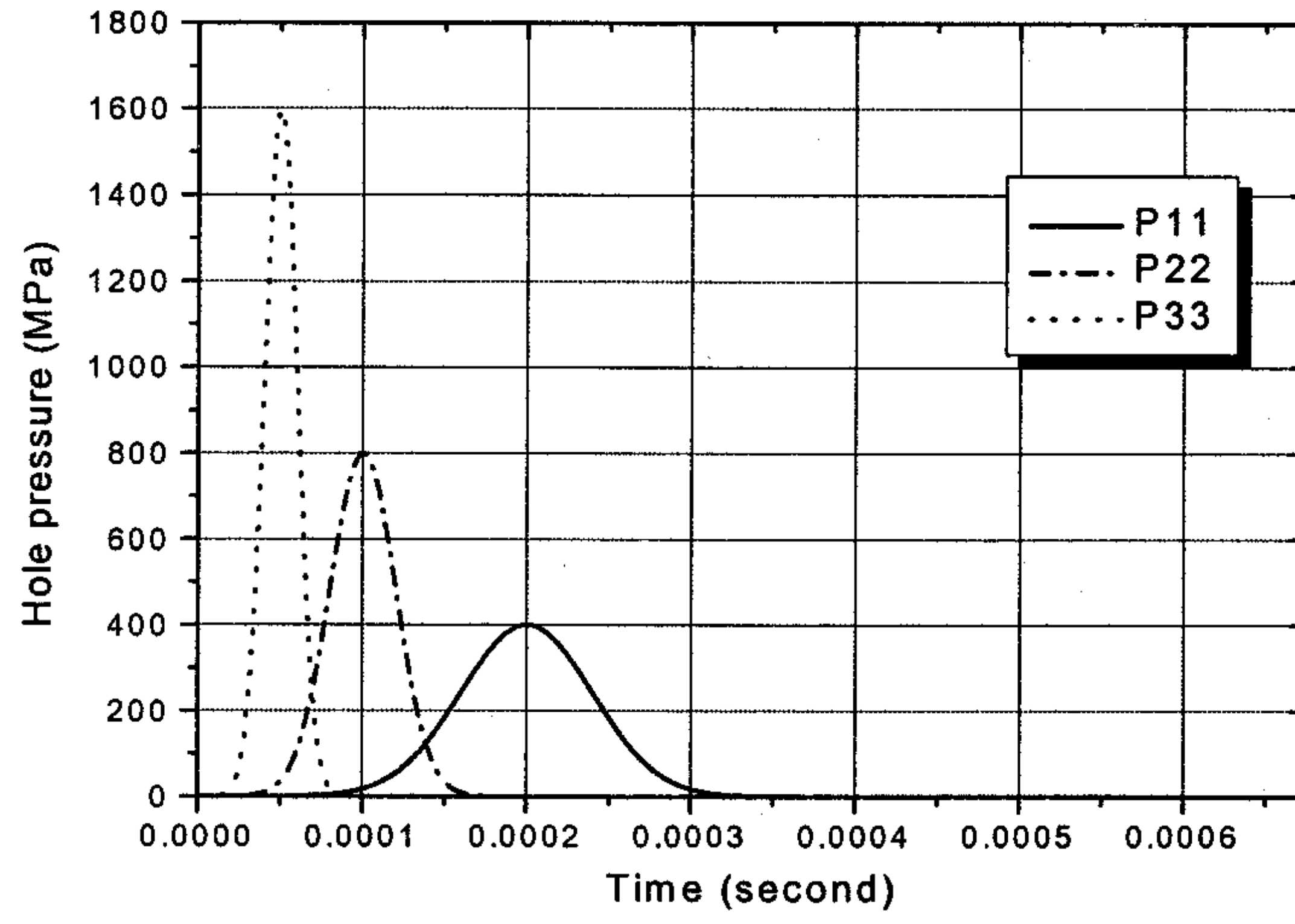


Fig. 3.4.2.10 각기 다른 특성을 가지는 발파압력곡선

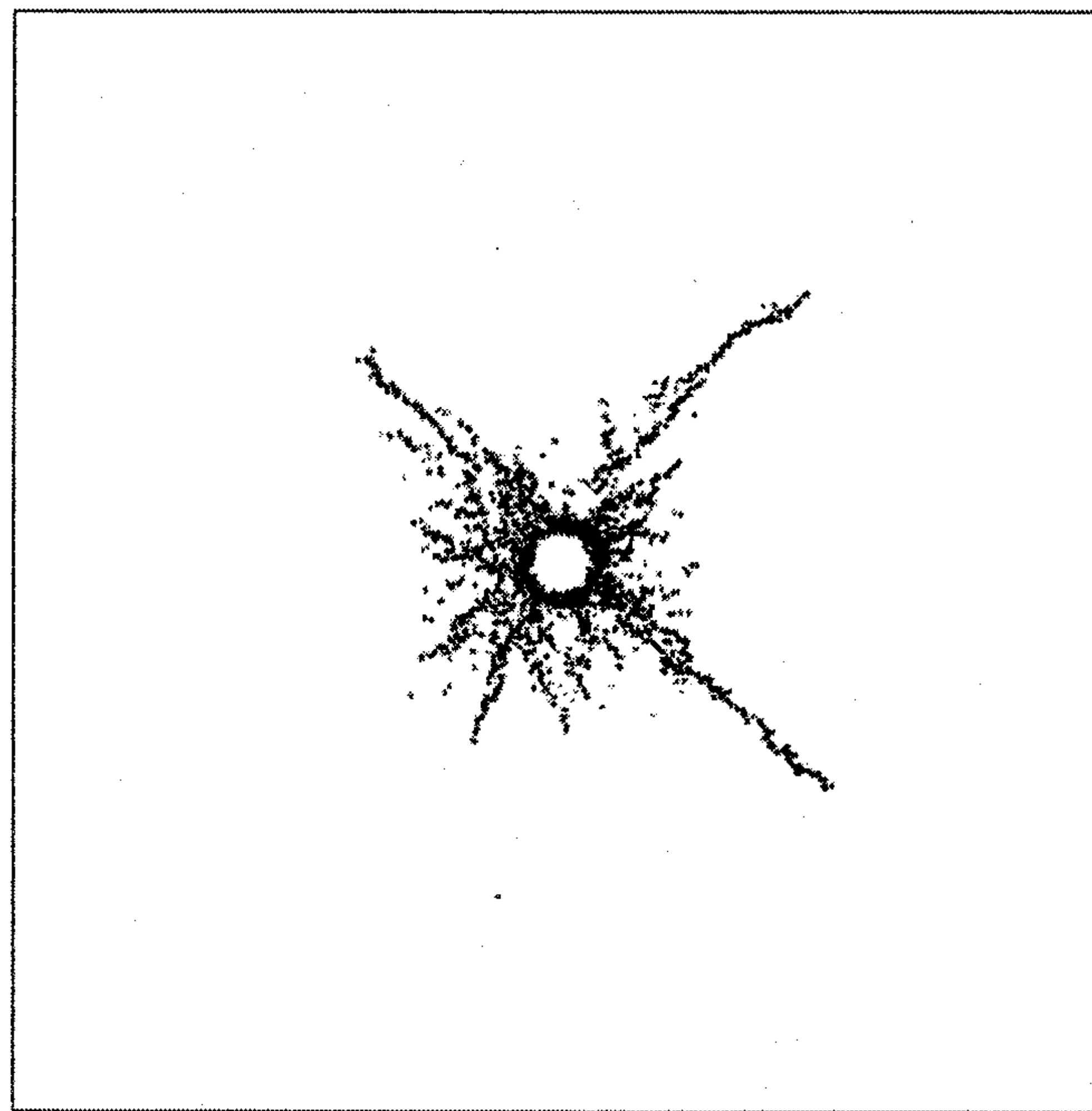


Fig. 3.4.2.11 발파압력 P11이 작용될 때의 손상영역분포
(최대압력 0.4 GPa, 지속시간 0.0004 sec)

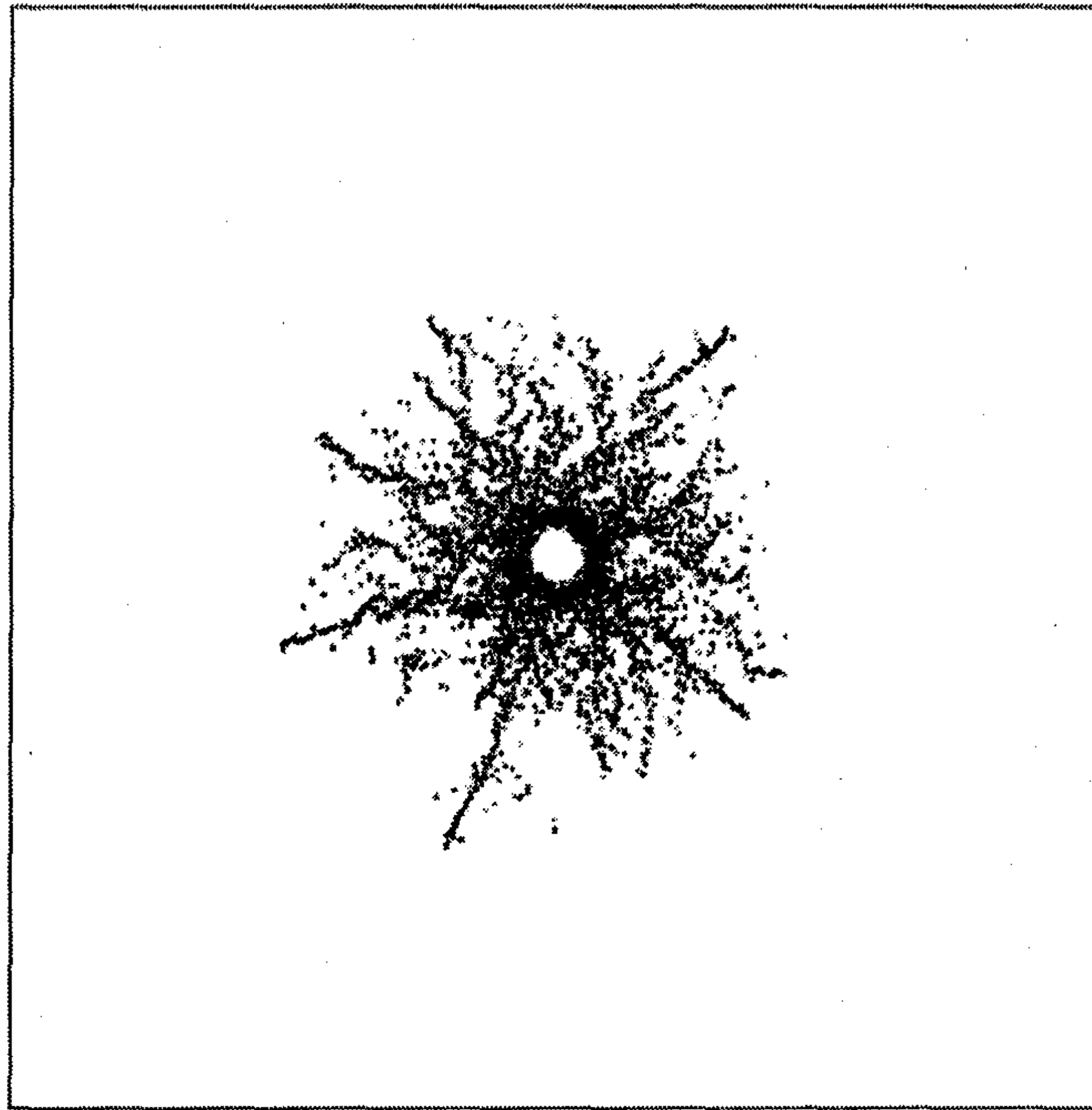


Fig. 3.4.2.12 발파압력 P22가 작용될 때의 손상영역분포
(최대압력 0.8 GPa, 지속시간 0.0002 sec)

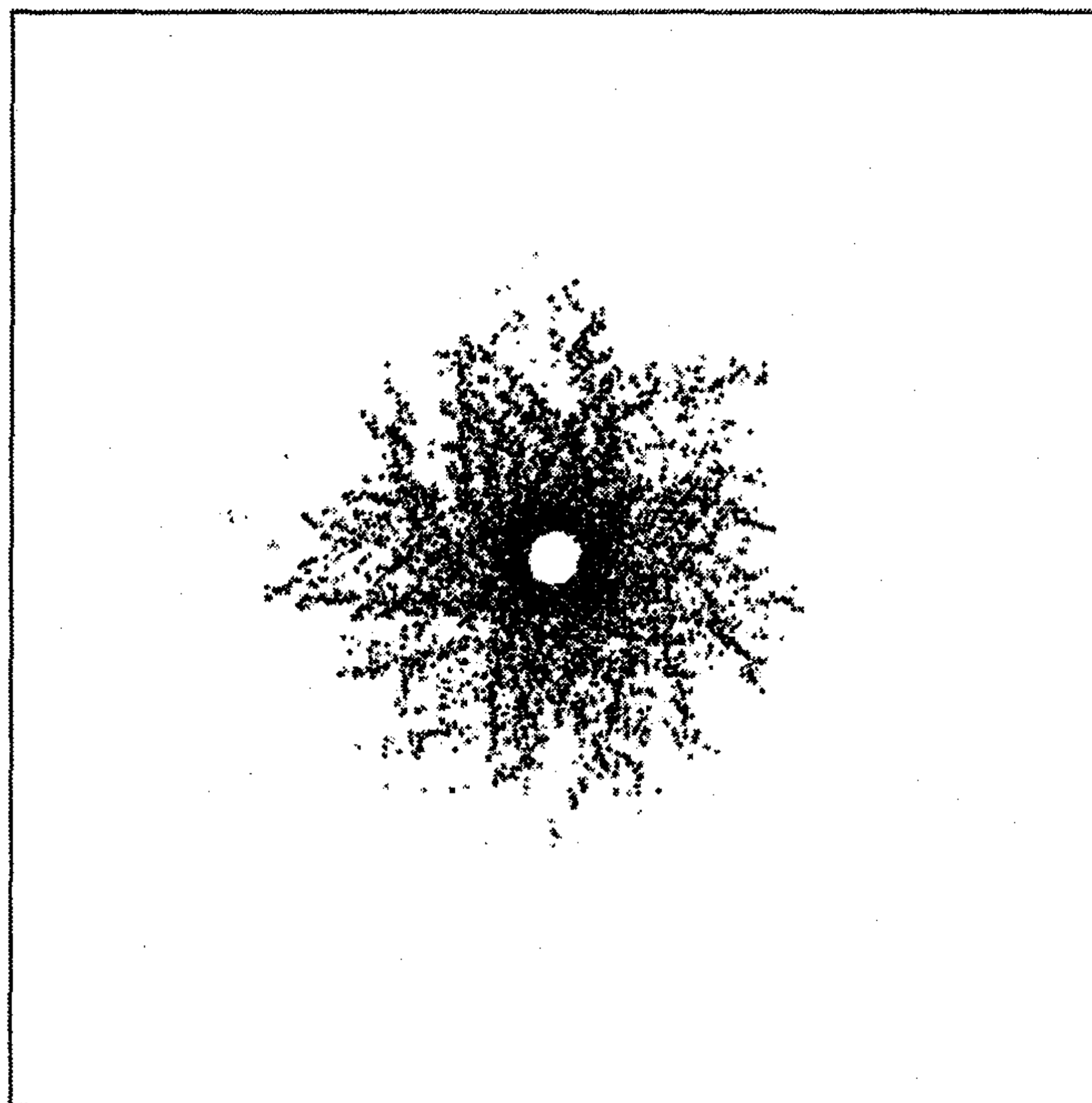
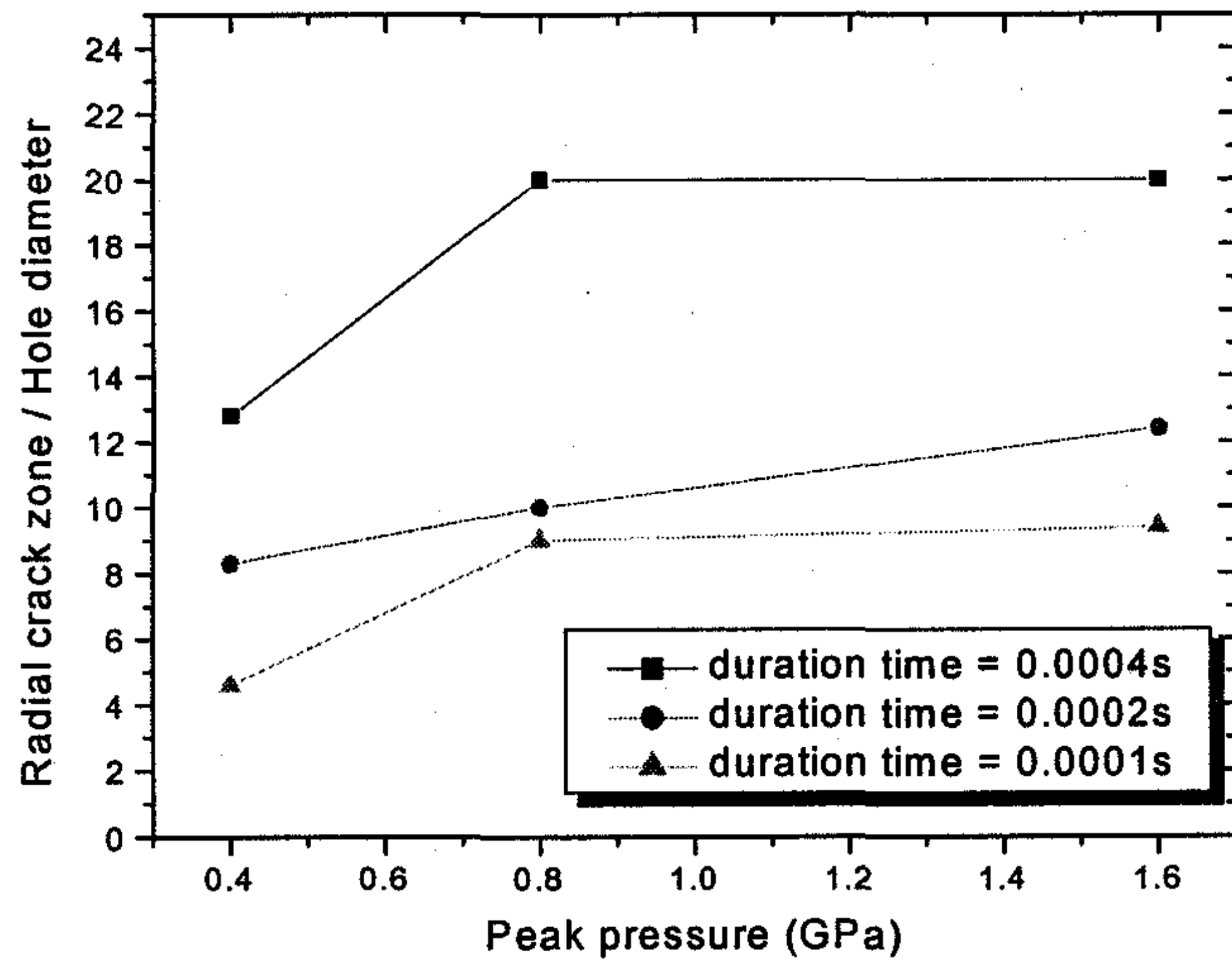
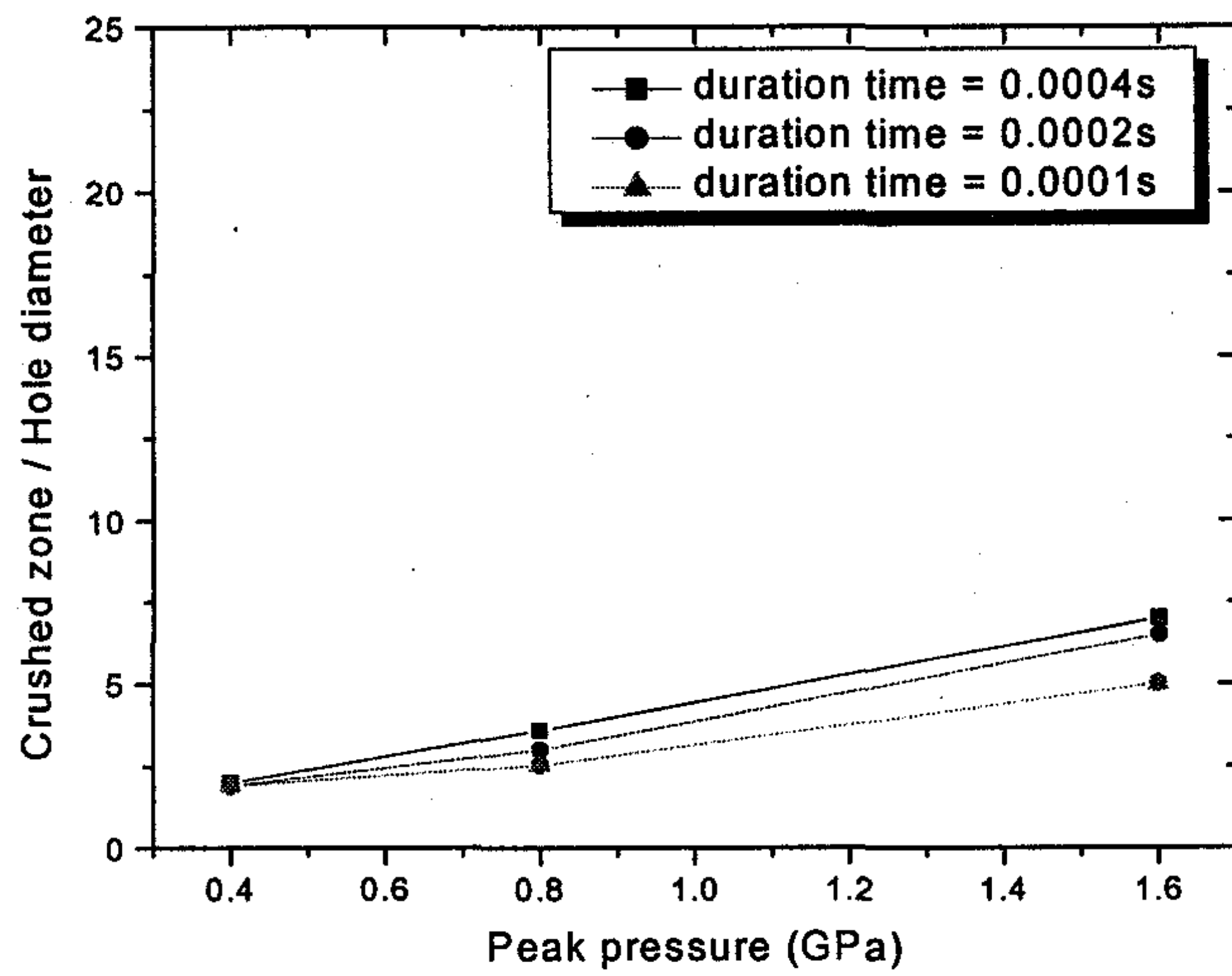


Fig. 3.4.2.13 발파압력 P33이 작용될 때의 손상영역분포
(최대압력 1.6 GPa, 지속시간 0.0001 sec)

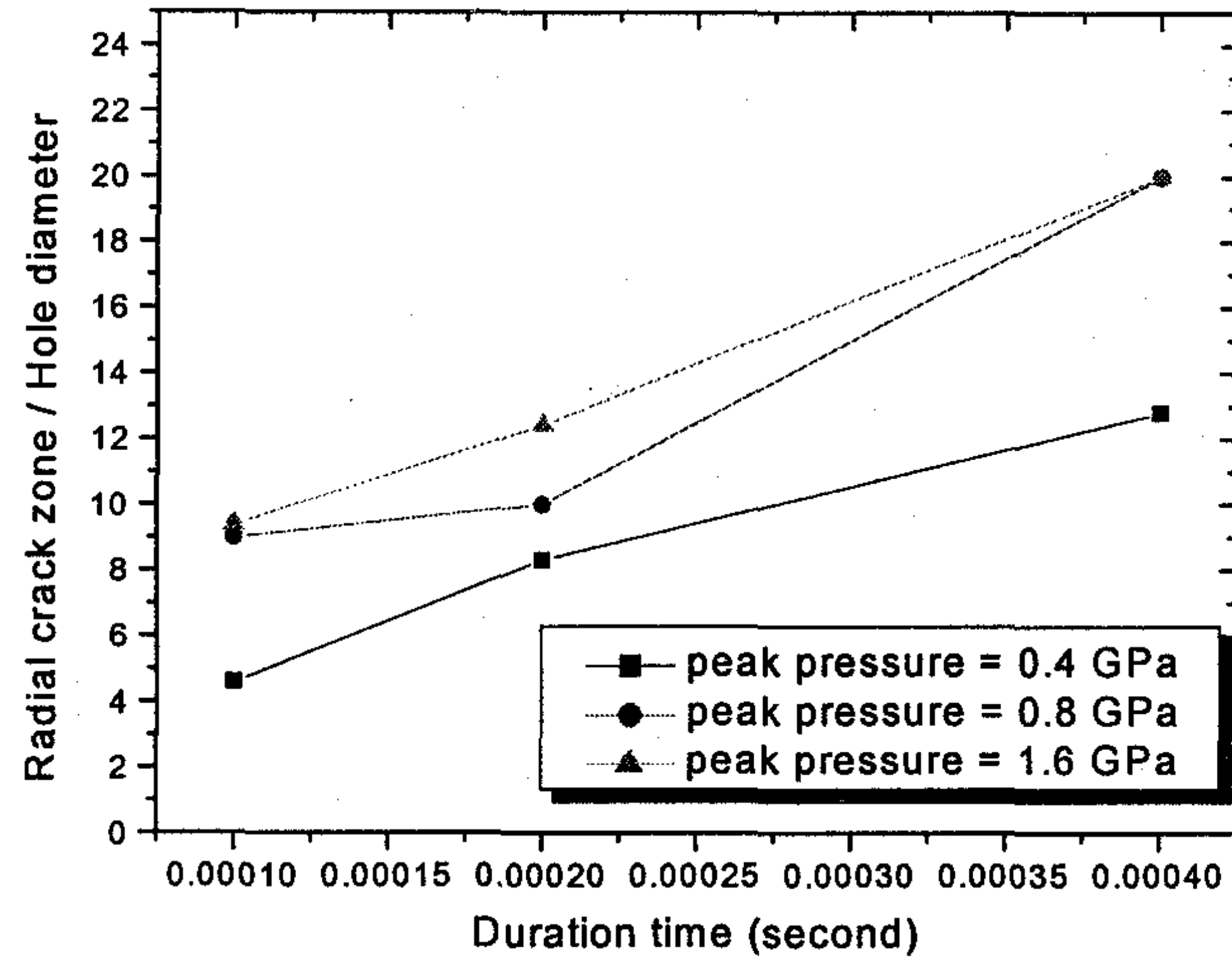


(a) 반경방향 균열발생영역

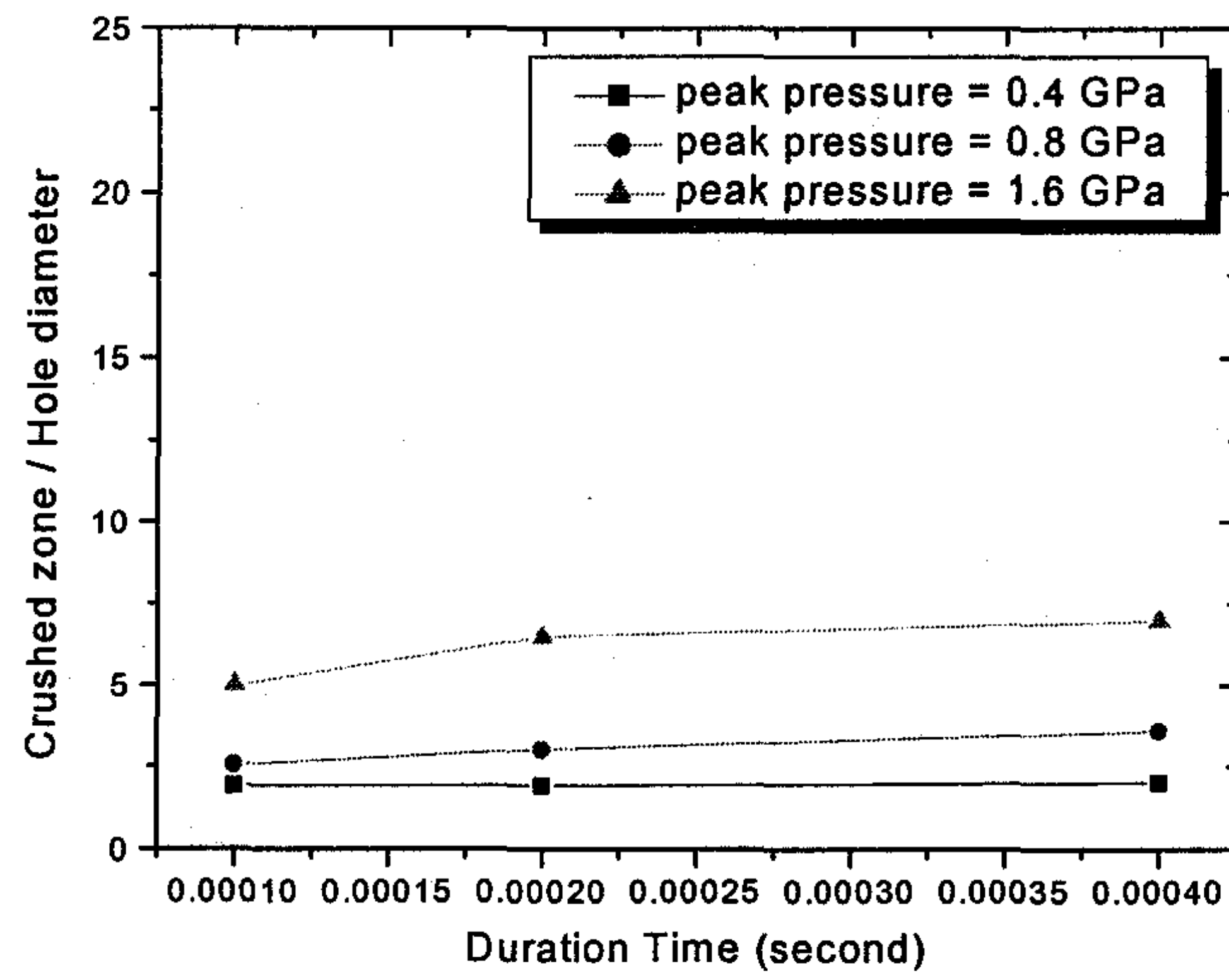


(b) 파쇄영역

Fig. 3.4.2.14 최대발파압력에 따른 손상영역의 변화



(a) 반경방향 균열발생영역



(b) 파쇄영역

Fig. 3.4.2.15 지속시간에 따른 손상영역의 변화

(3) 무장약공의 존재에 따른 영향

P22(최대발파압 0.8 GPa, 지속시간 0.0004 sec)의 발파유형을 이용하여 발파공 주위에 대구경의 무장약공이 존재하는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 무장약공의 직경은 10 cm 이며 공간격이 각각 15 cm, 20 cm일 경우에 대해 해석하였다. Fig. 3.4.2.16과 Fig. 3.4.2.17에 각각의 경우에 대한 파괴양상이 도시되어있다. 두 경우 모두 균열이 무장약공 방향으로 집중되는 것을 관찰할 수 있었으며 또한 무장약공 오른쪽으로 추가적인 균열이 발생하는 것을 볼 수 있었다.

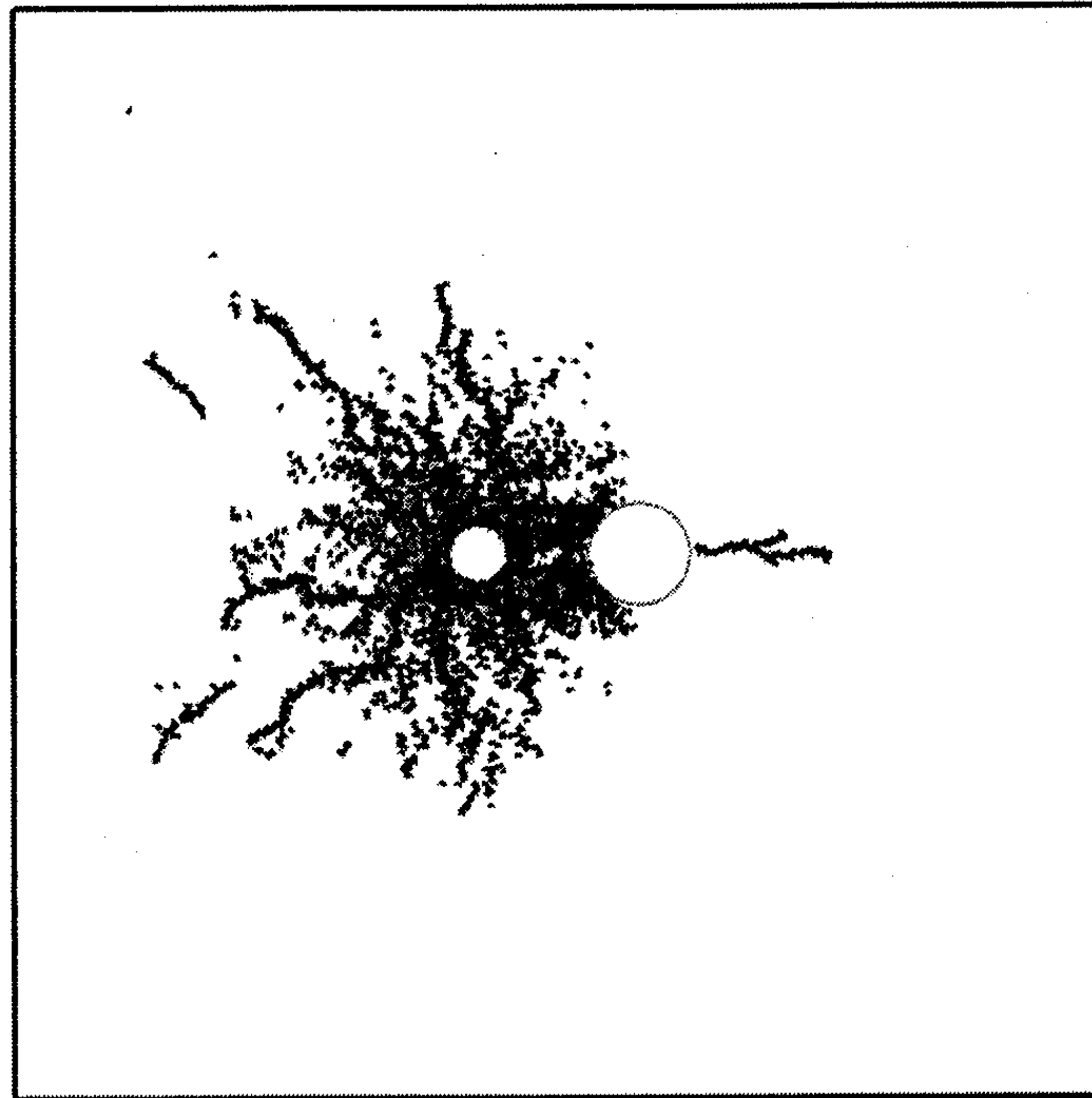


Fig. 3.4.2.16 무장약공이 1.5D 간격에 위치하고 있을 때의 균열전파양상

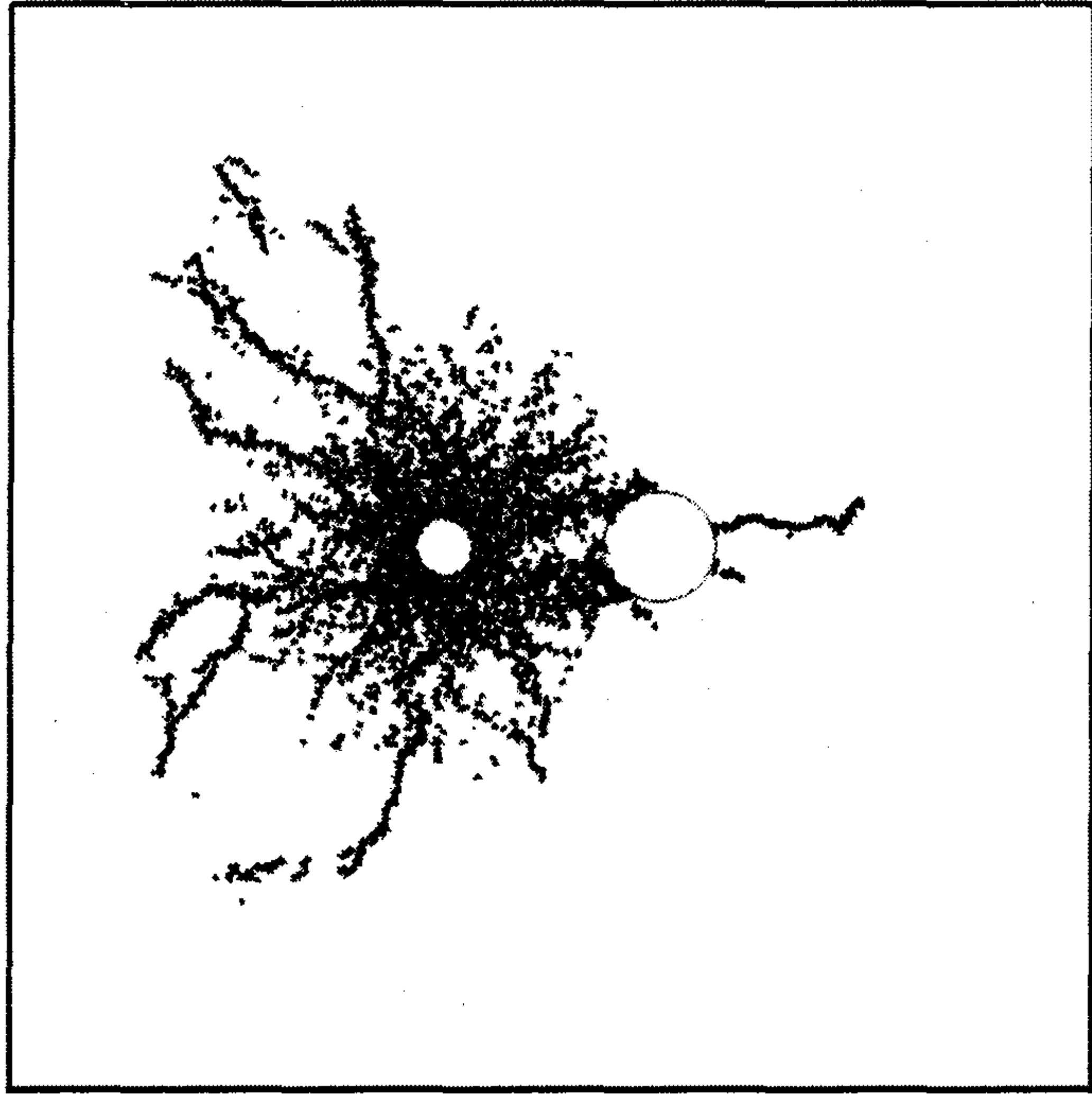


Fig. 3.4.2.17 무장약공이 2.0D 간격에 위치하고 있을 때의 균열전파양상

제 3 절 동적거동 실험개념정립 및 실험시스템 구축

1. 개요

발파연구에서 매우 중요한 분야의 하나는 발파와 같은 동적 응력하에서 매질의 거동특성(동적 구성방정식)을 규명하는 일이다. 이를 위하여 홉킨슨 효과를 이용한 동적 실험 개념을 정립하고, 실내 동적 거동 실험 장치의 시작품을 제작하였다.

2. 기본 원리 및 적용 개념

가. 개념도

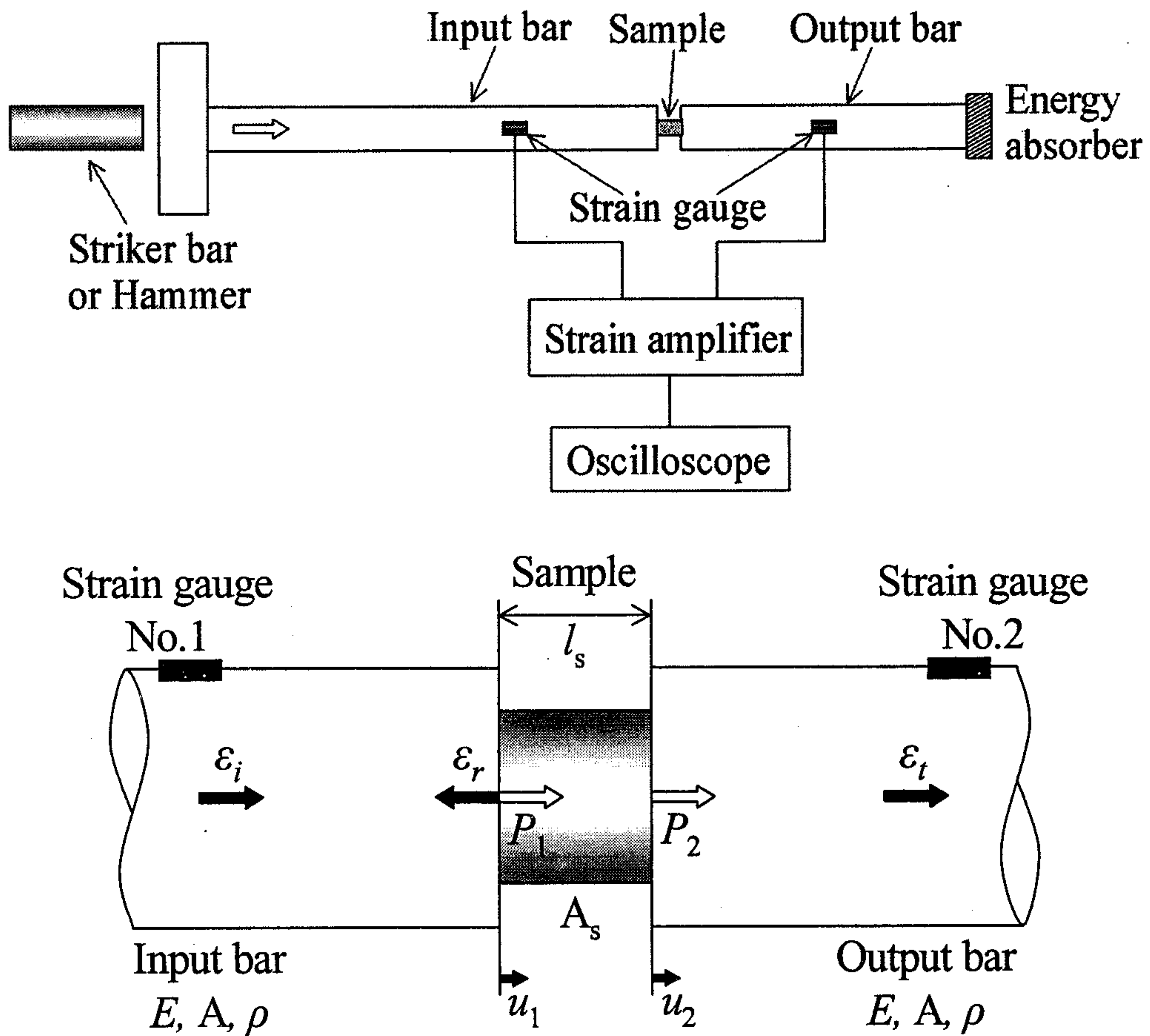


Fig. 3.3.2.1 시험장치의 개념도

나. 기초 이론

탄성봉 내의 변형률 :

$$\varepsilon(x, t) = \frac{\partial u}{\partial x} = c_0 \{f'(x - c_0 t) + g'(x + c_0 t)\} = \varepsilon_i + \varepsilon_r$$

샘플의 양끝면에서의 변위 u (x 축의오른쪽방향을 양으로 함)는, 입출력봉 내를 전파하는 입사, 반사, 투과 응력파에 의해서 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_1(t) = c_0 \int_0^t [\varepsilon_i(t') + \varepsilon_r(t')] dt'$$

$$u_2(t) = -c_0 \int_0^t \varepsilon_t(t') dt'$$

샘플안의 변형률, 변형률속도 :

$$\varepsilon(t) = \frac{u_2 - u_1}{l_s} = \frac{c_0}{l_s} \int_0^t [\varepsilon_i(t') - \varepsilon_r(t') - \varepsilon_t(t')] dt'$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{c_0}{l_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)]$$

샘플의 양끝면에 있어서의 하중, P :

$$P_1(t) = EA[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)]$$

$$P_2(t) = EA\varepsilon_t(t)$$

샘플내의 응력 :

$$\sigma(t) = \frac{P_1 + P_2}{2A_s} = \frac{EA}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)]$$

변형률, 변형률속도, 응력 :

$$\varepsilon(t) = \frac{-2c_0}{l_s} \int_0^t \varepsilon_r(t') dt'$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{-2c_0}{l_s} \varepsilon_r(t)$$

$$\sigma(t) = \frac{EA}{A_s} \varepsilon_t(t)$$

3. 동적거동시험장치

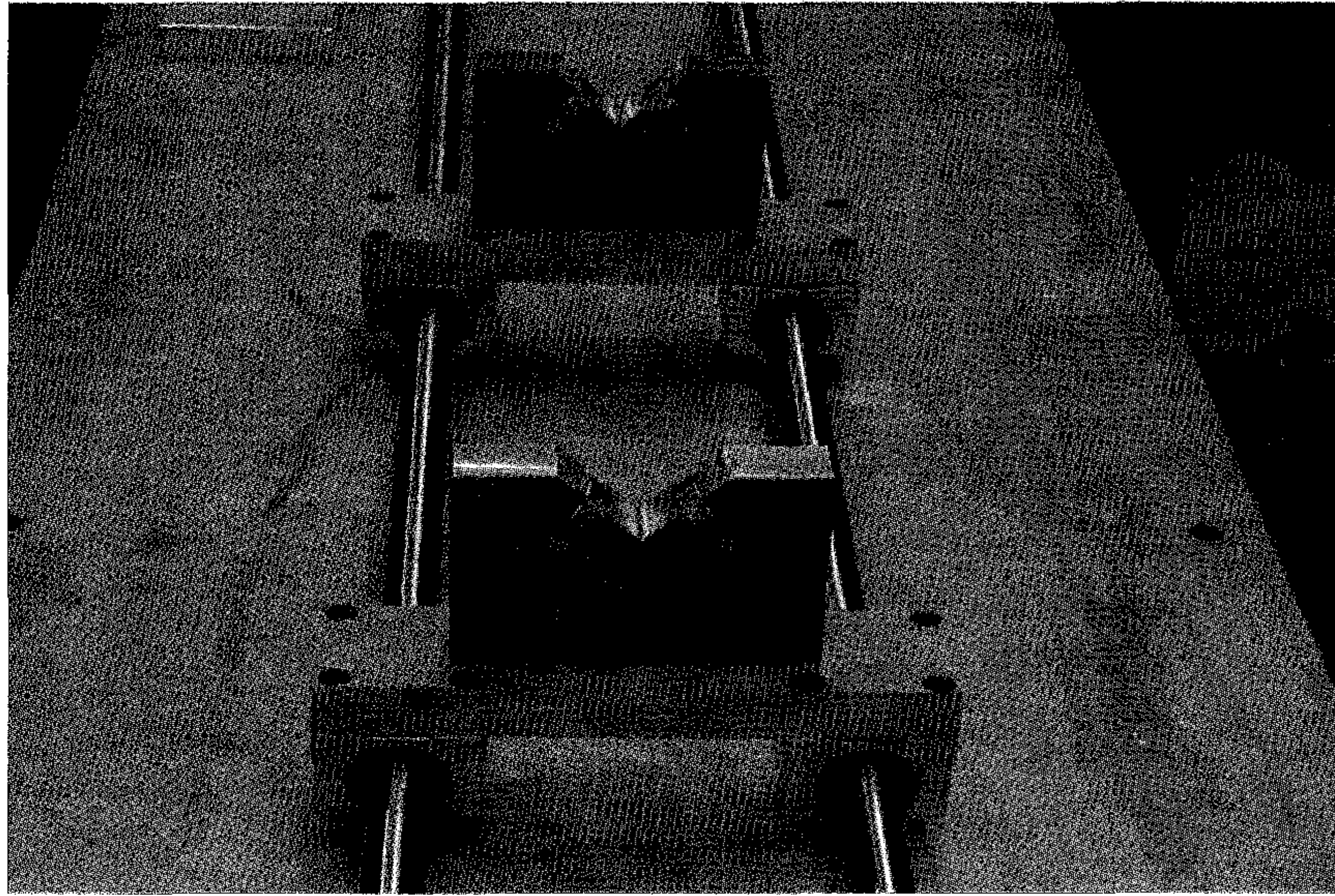


Fig. 3.3.3.1 Pressure bar 지지부

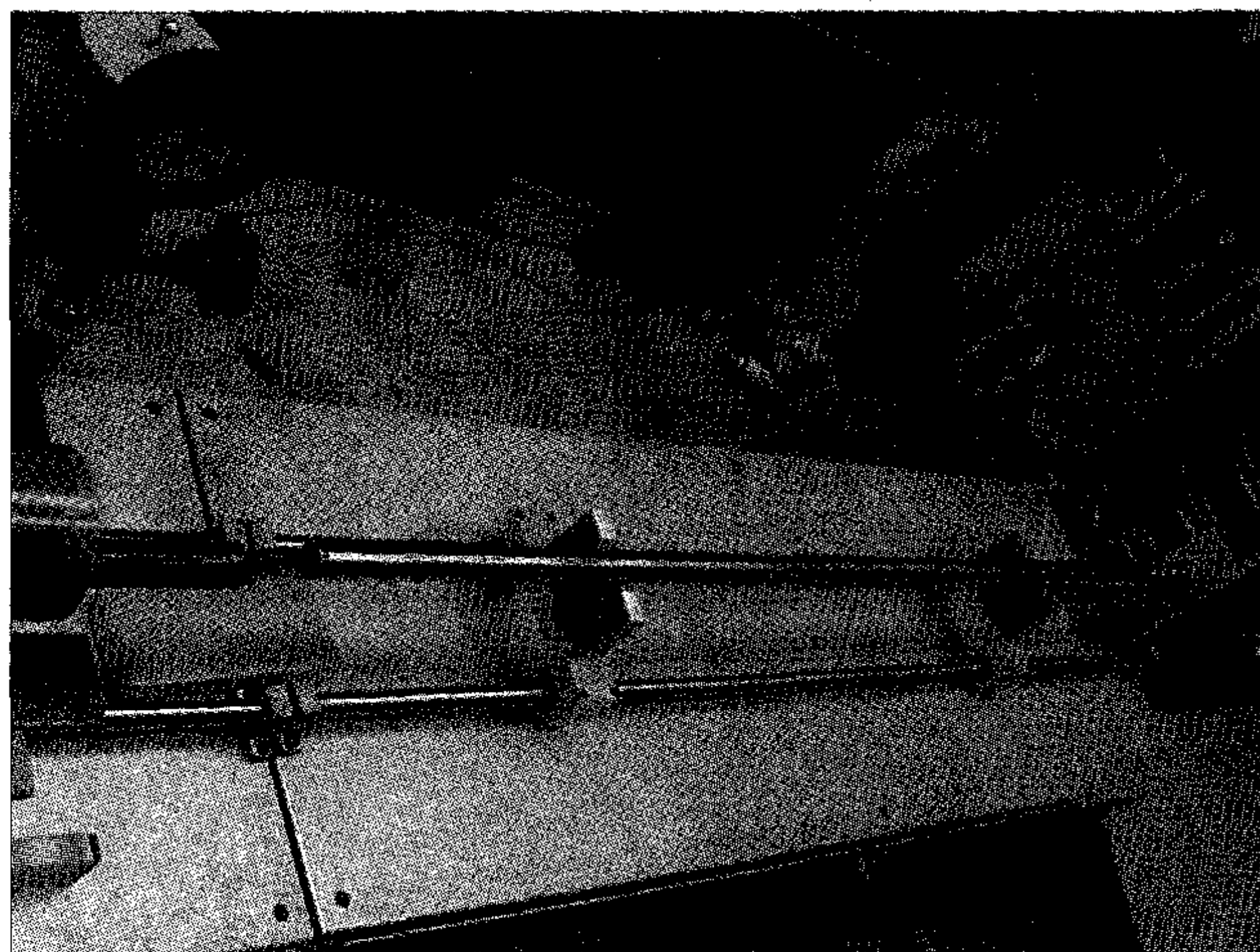
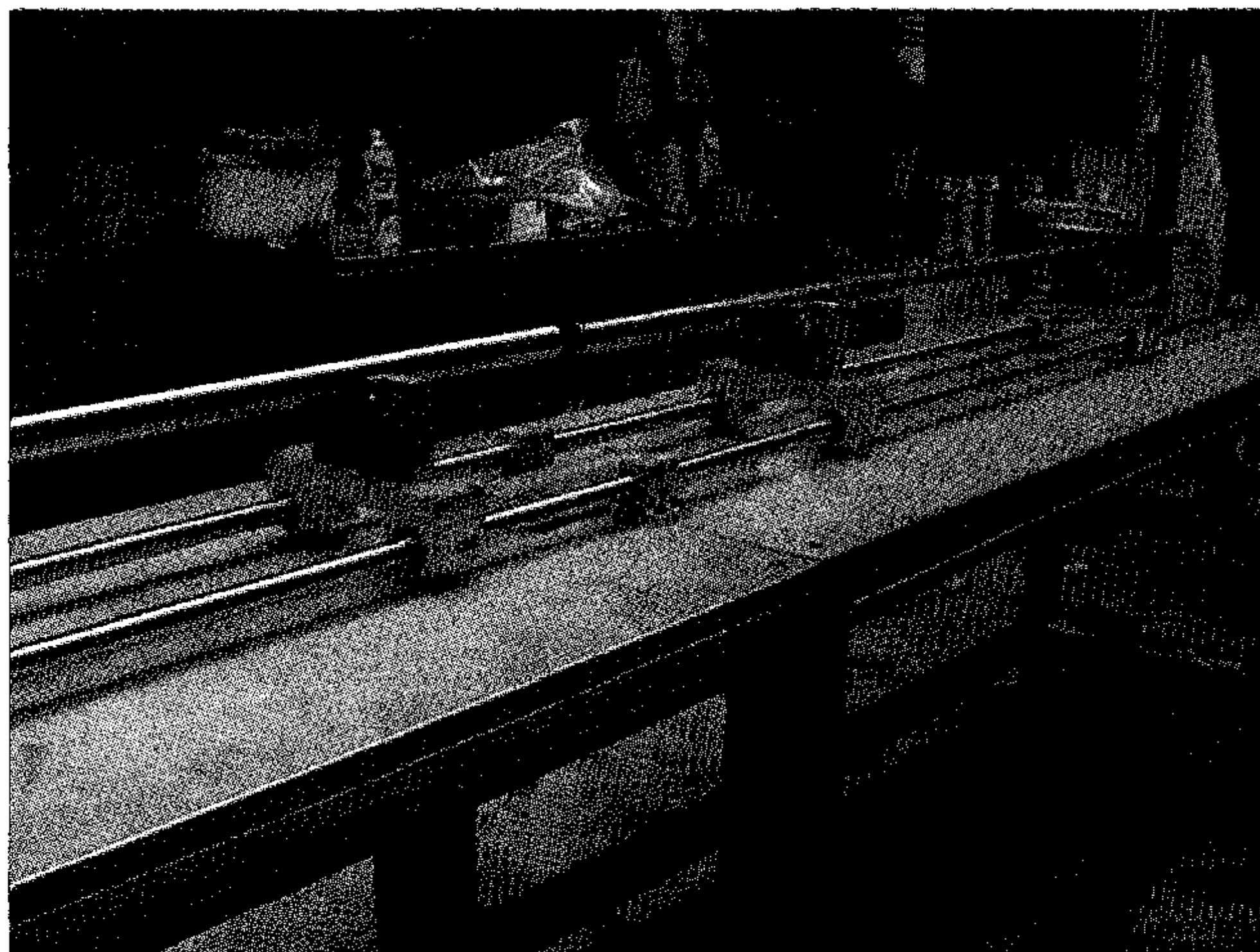


Fig. 3.3.3.2 Pressure bar: input bar와 out bar

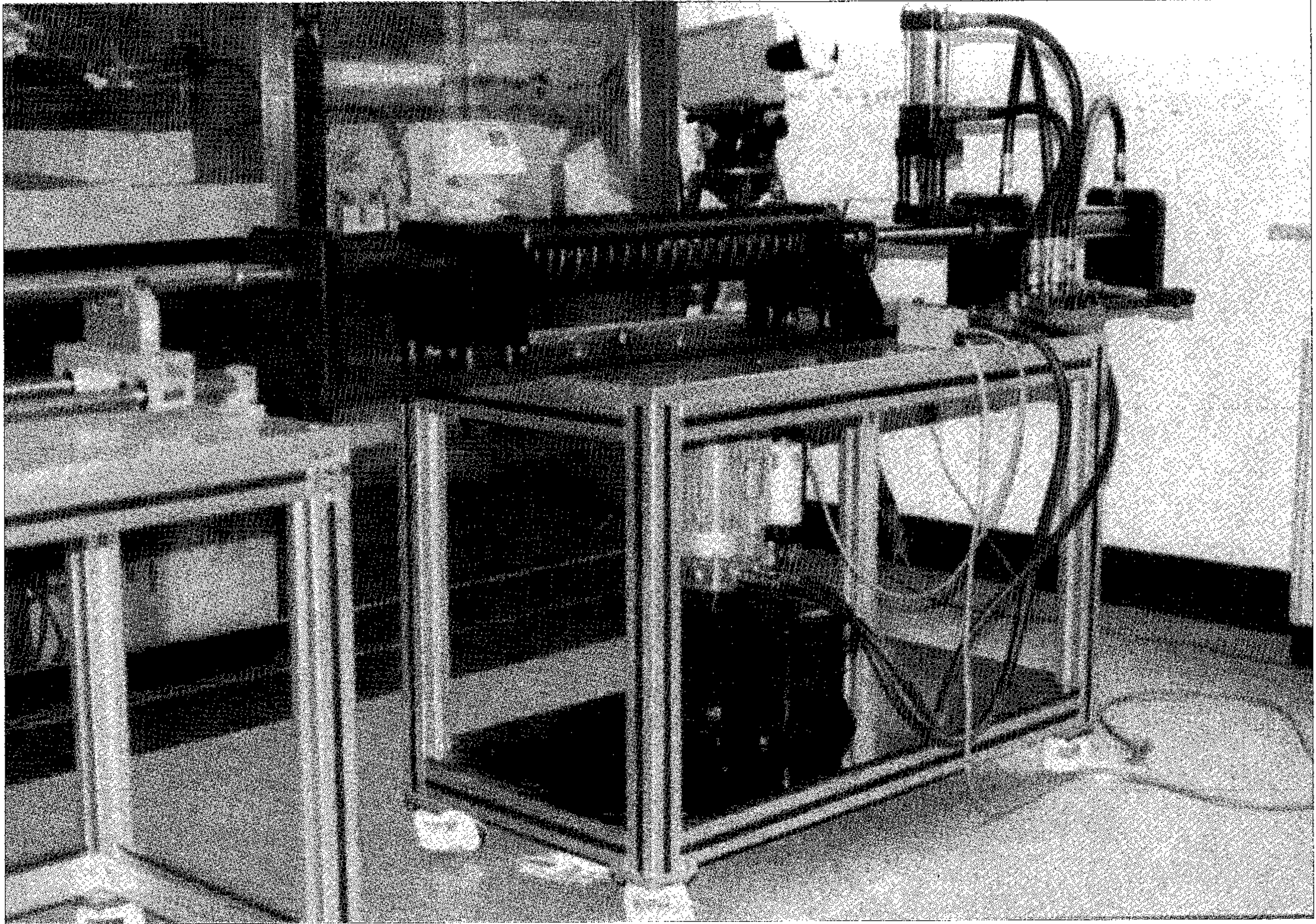


Fig. 3.3.3.3 충격 하중 전달 부분

제 4 절 붕괴거동 시뮬레이션 기법 및 실험실적 연구

1. 개요

구조물 발파해체시 붕괴거동을 예측하는 것은 설계에 대한 사전 검토를 통하여 안전성을 확보한다는 측면에서 매우 중요하다. 기존의 수치해석적 방법중 유한 요소법이나 유한 차분법과 같이 연속체 역학의 기초에서 개발된 기법들은 붕괴거동과 같이 큰 변위나 회전을 예측하는데는 적합하지 못하다. 본 연구에서는 불연속체 압반의 해석을 위해 제안된 개별요소모델링 기법의 적용성을 검토하고 향후 개발될 시뮬레이션 모델의 기초로 선택하였다.

분석에 사용된 개별요소 프로그램은 explicit algorithm에 기초한 두 종류의 상용 소프트웨어로서 P. Cundall이 개발한 UDEC(Cundall, 1990)과 입자 유동 해석용으로 개발했던 PFC이다. 이러한 수치해석 모델은 입력 자료들에 대한 이해와 함께 대상 구조물을 어떻게 모델링 하느냐에 따라 붕괴 거동 시뮬레이션에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 보인다.

또한 수치해석모델의 타당성 검증을 위해 실제측 자료와의 비교 검토 방법 외에 조건 변화 및 반복성이 가능한 실험실 모델을 개발하였고 석고를 이용한 physical 모델링을 통한 실험을 실시하였다.

실험실 붕괴모델은 쇠막대와 코일을 이용하여 전기적으로 절단효과를 줄 수 있도록 고안하였고 전기 공급의 delay를 이용하여 지발뇌관 시차 효과가 가능하도록 설계하였다.

또한, 본 연구에서 진행되고 있는 붕괴거동 시뮬레이션 해석기법과 관련한 중간 연구결과들을 실제 건물을 1/20의 축척으로 줄인 모형건물의 해체발파에 적용함으로써 연구결과들을 검증하고 이론적인 내용을 보완하기 위하여 석고모형에 대한 해체발파 실험이 실시되었다.

2. PFC를 이용한 붕괴거동 시뮬레이션

가. 개요

(1) 목적

다층 건물 구조물의 폭파 해체에 있어서 구조물의 동적 파괴 양상을 수치해석 시뮬레이션을 통해 구현하고 발파패턴에 따른 붕괴 영향을 분석함으로써, 구조물 해체 기술 개발의 기본 평가 기법을 정립하고자 한다.

(2) 수치해석 기법

구조물 붕괴거동 시뮬레이션에 이용한 PFC(Particle Flow Code)에 대해서는 앞의 제2절에 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다. 앞에서 기술한 바와 같이, 이 해석 프로그램은 시간경과에 따라 해석 모델의 변형, 분리, 파괴, 낙하 등 점진적 거동 양상을 시각적으로 표현할 수 있으므로, 본 구조물 붕괴거동 시뮬레이션에 있어서 적합한 해석 프로그램이다.

나. 해석 모델 및 결과

(1) 해석 모델

다층 구조물 폭파 해체 시뮬레이션 모델로서 다음의 Fig. 3.4.2.1과 같은 5층 구조물 모형을 대상으로 하였다.

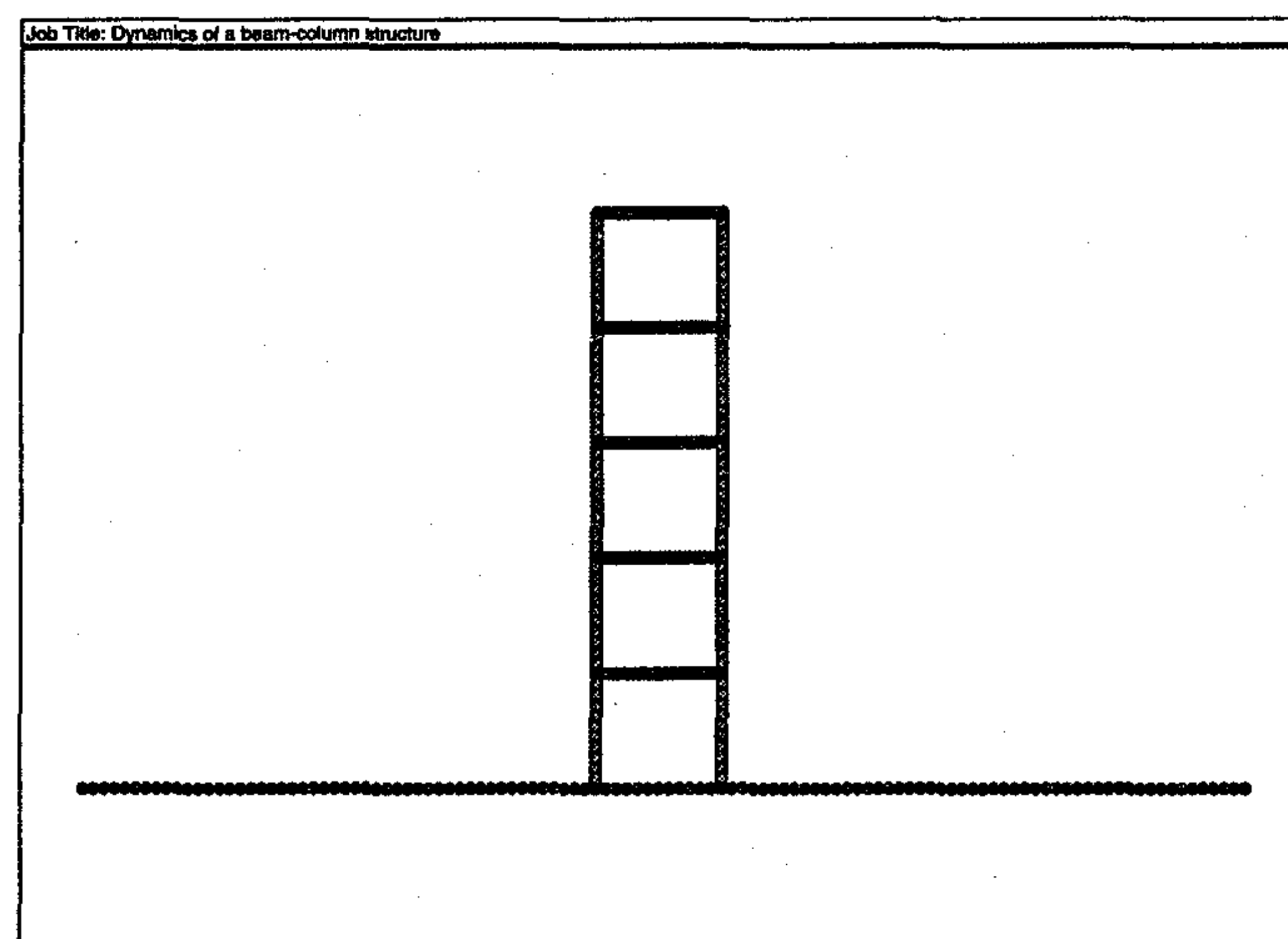


Fig. 3.4.2.1 구조물 붕괴거동 시뮬레이션 모델

(2) 분석 요소

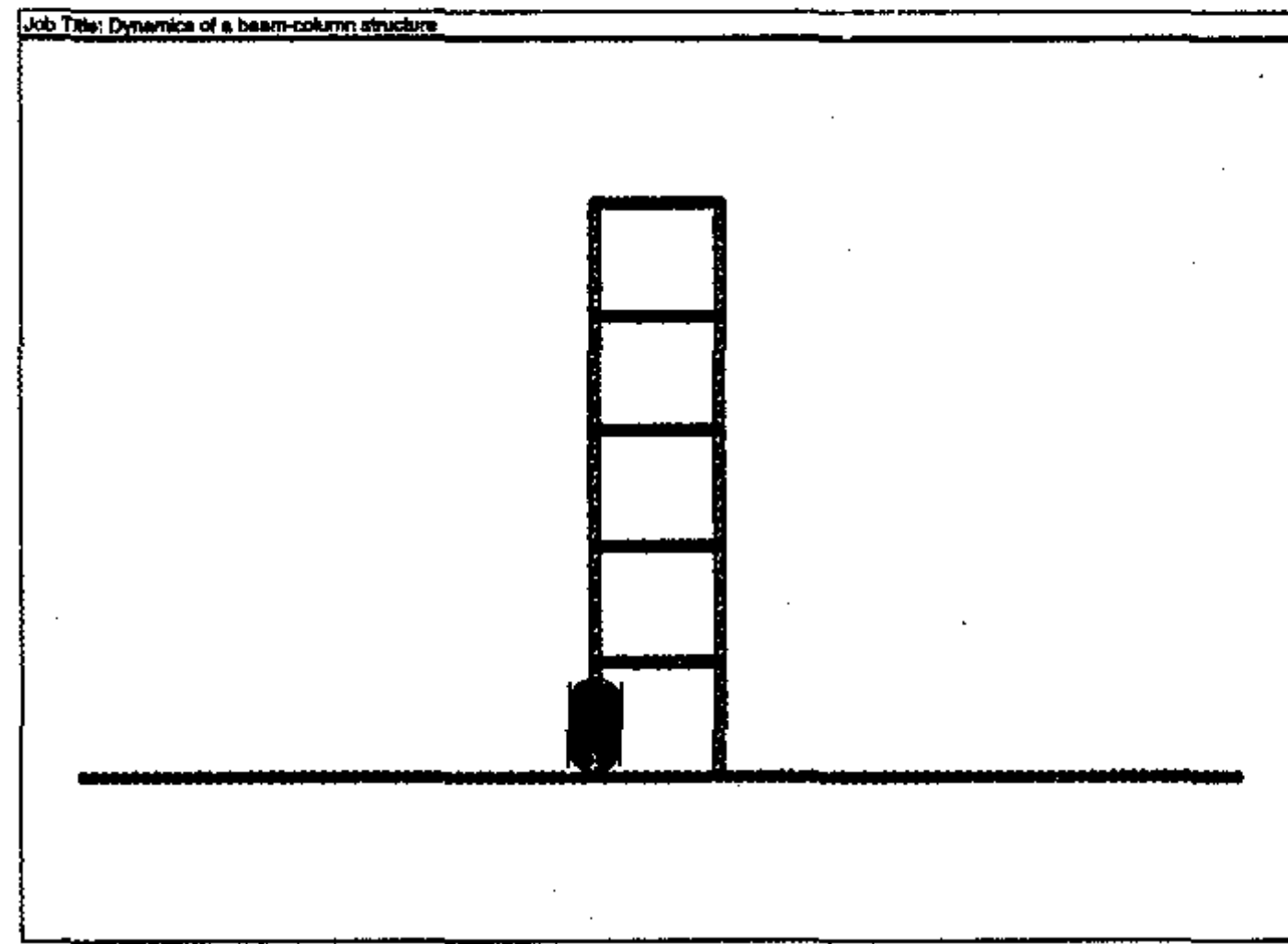
발파패턴에 따른 구조물 붕괴 양상을 파악하기 위하여 다음과 같은 발파 영향 요소를 중심으로 해석하였다.

- 구조물 구성 부재의 특성(강도, 변형성)에 따른 붕괴 양상 비교 분석
- 구조물 기둥 발파 개소 위치에 따른 붕괴 패턴 분석

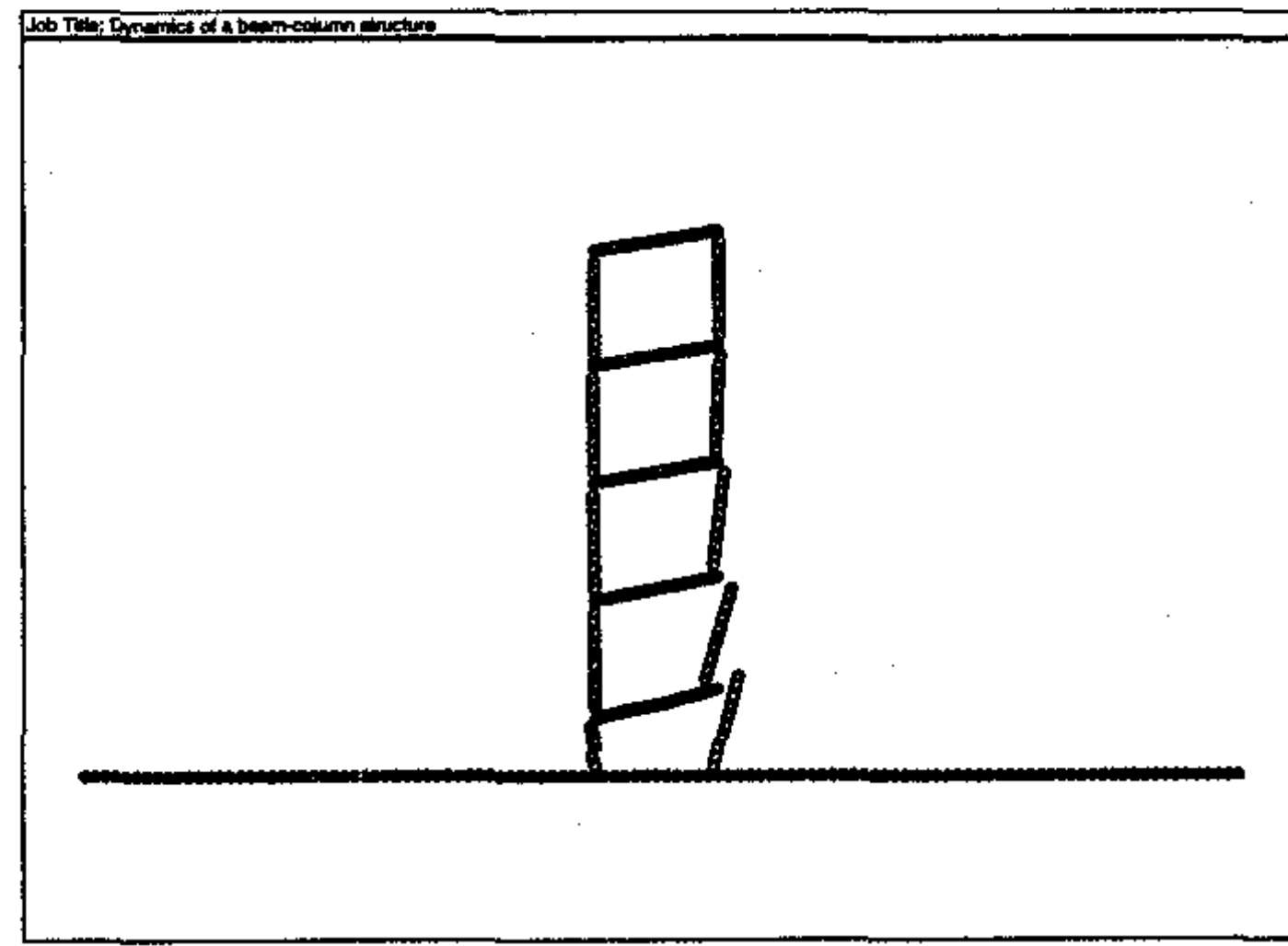
(3) 주요 해석 결과

상기 5층 구조물 모델을 대상으로 하여, 구조물 부재 특성(강성도와 강도) 및 기둥 발파개소에 따라 7개의 해석 조건에 대한 시뮬레이션 결과를 평가하였다. 주요 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

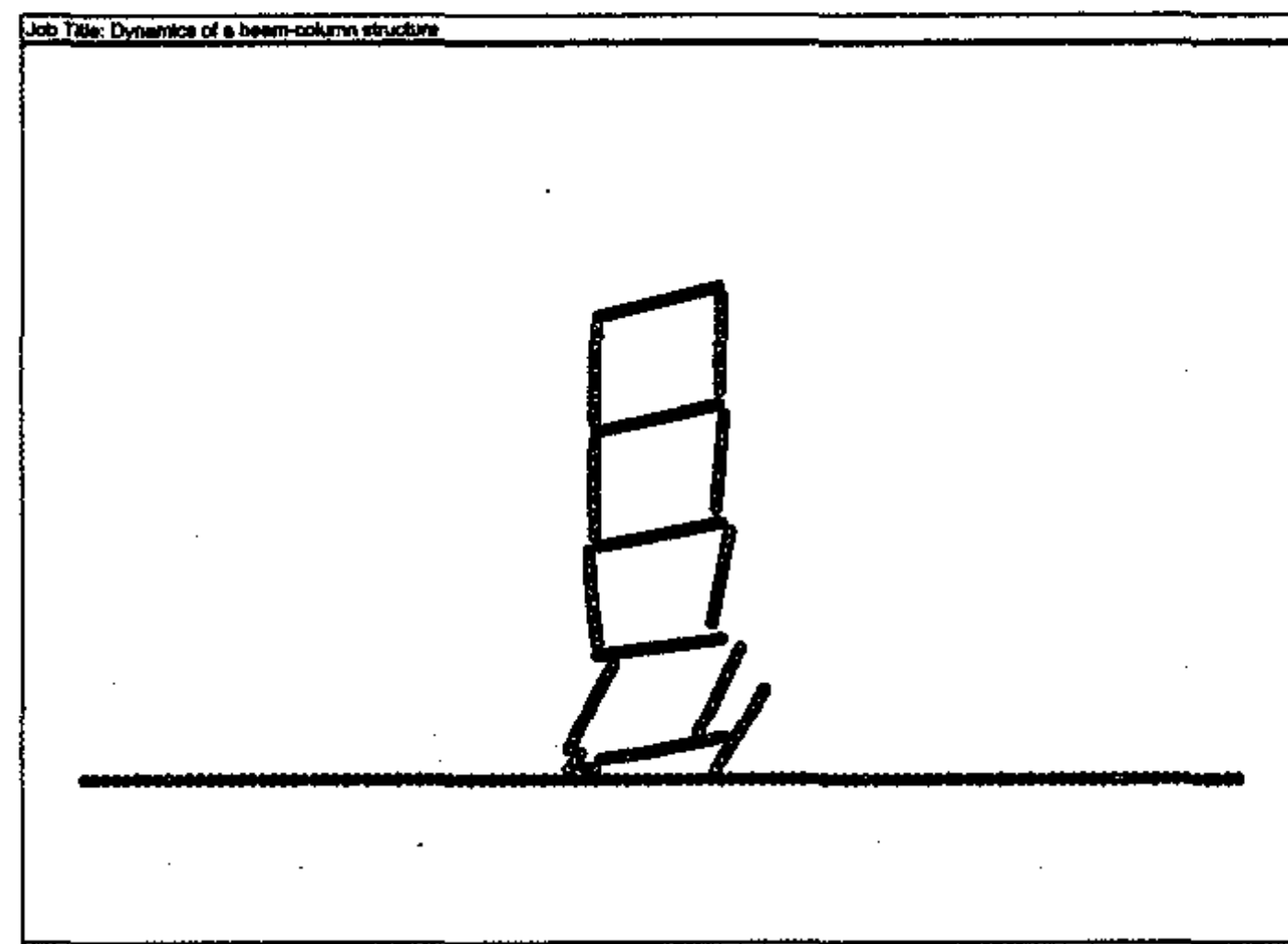
- Case 1 (Fig. 3.4.2.2) : 부재간 분리된 경우(기둥과 보 간의 결합력 = 0)
 - 부재간 결합력이 없는 관계로 1층 기둥 1개소 발파만으로 전체적으로 빠른 수직 붕괴가 발생하였다.
- Case 2 (Fig. 3.4.2.3) : 부재의 강성도 및 강도가 큰 경우
 - 1층 기둥 1개소 발파에 의해 구조물 전체가 전도 붕괴 양상을 나타내었다. 이 경우에 전도 붕괴 방지를 위한 발파개소 증가 및 지발발파 효과에 대해서는 다음의 Case 5 ~ Case 7에서 검토하였다.
- Case 3 (Fig. 3.4.2.4) : 부재의 강성도는 크고 강도가 약한 경우
 - 1층 기둥 1개소 발파에 의해 기둥과 보 사이의 파괴가 일차적으로 발생한 후 전체적으로 제자리에 붕괴되는 양상을 보였다.
- Case 4 (Fig. 3.4.2.5) : 부재의 강성도 및 강도가 약한 경우
 - 1층 기둥 1개소 발파에 의해 기둥과 보 사이의 파괴가 일차적으로 나타나고 이 충격에 의해 기둥의 자체 파괴로 연결되는 붕괴 양상을 나타내었다.
- Case 5 (Fig. 3.4.2.6) ~ Case 7 (Fig. 3.4.2.8) : Case 2의 전도 붕괴 모델에 대해 전도 붕괴 방지를 위한 기둥 2개소의 지발 발파 효과 시뮬레이션
 - 1층 양쪽 기둥 2개소에 대한 지발발파에 있어서, 지발시간 = 0.5초~1.0초 경우에 3층 이상의 전도 붕괴 방지 효과가 나타났다.
 - 이상의 구조물 특성 및 발파패턴(발파개소 선정 및 지발시간 조절)에 따른 구조물 붕괴양상 분석 결과는, 앞으로 다층복합구조물의 해체에 있어서 붕괴방향 조절 등의 설계 기법 개발로 이어지는 기반이 될 것이다.



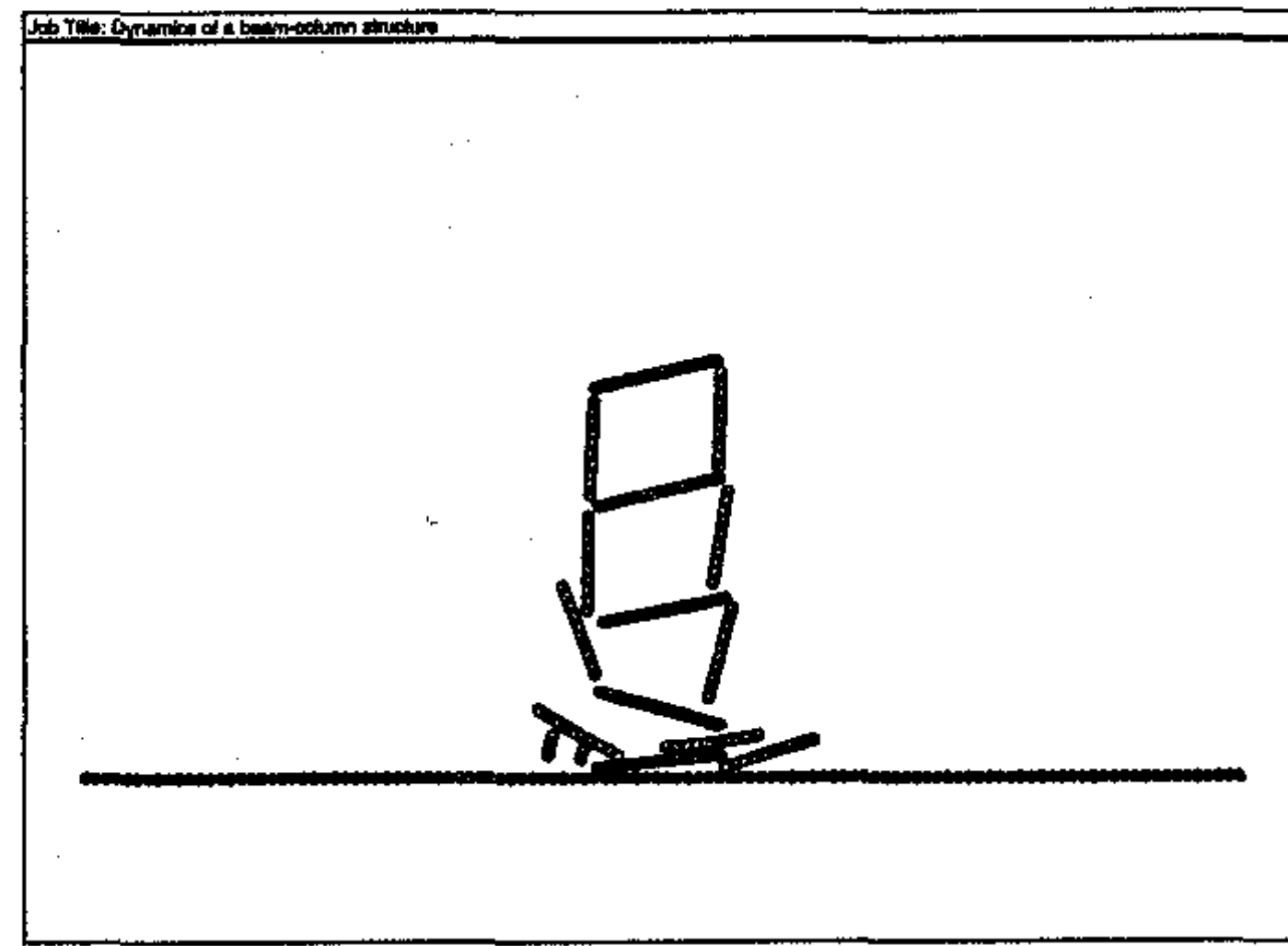
(Time = 0.0 sec)



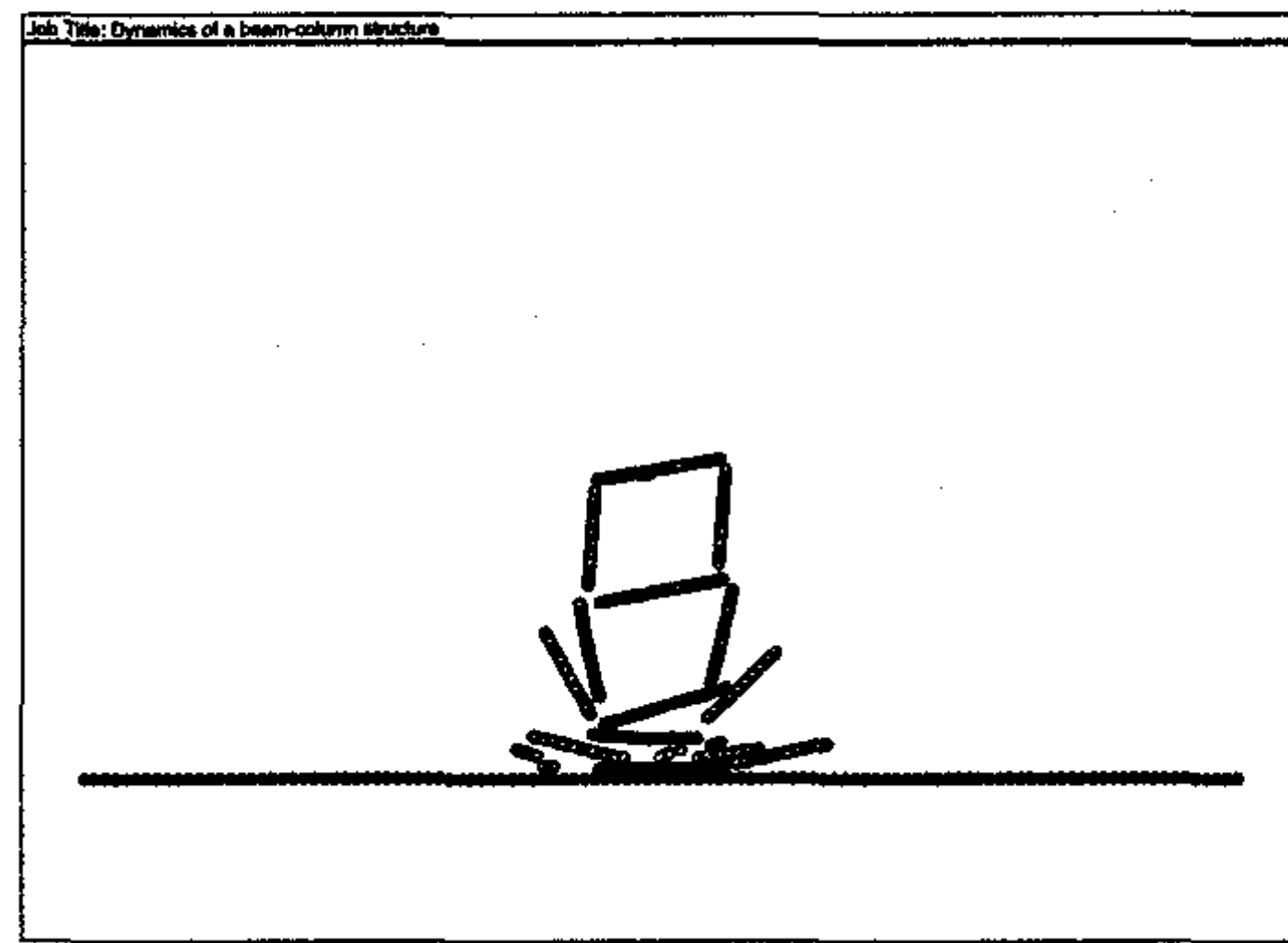
(Time = 1.0 sec)



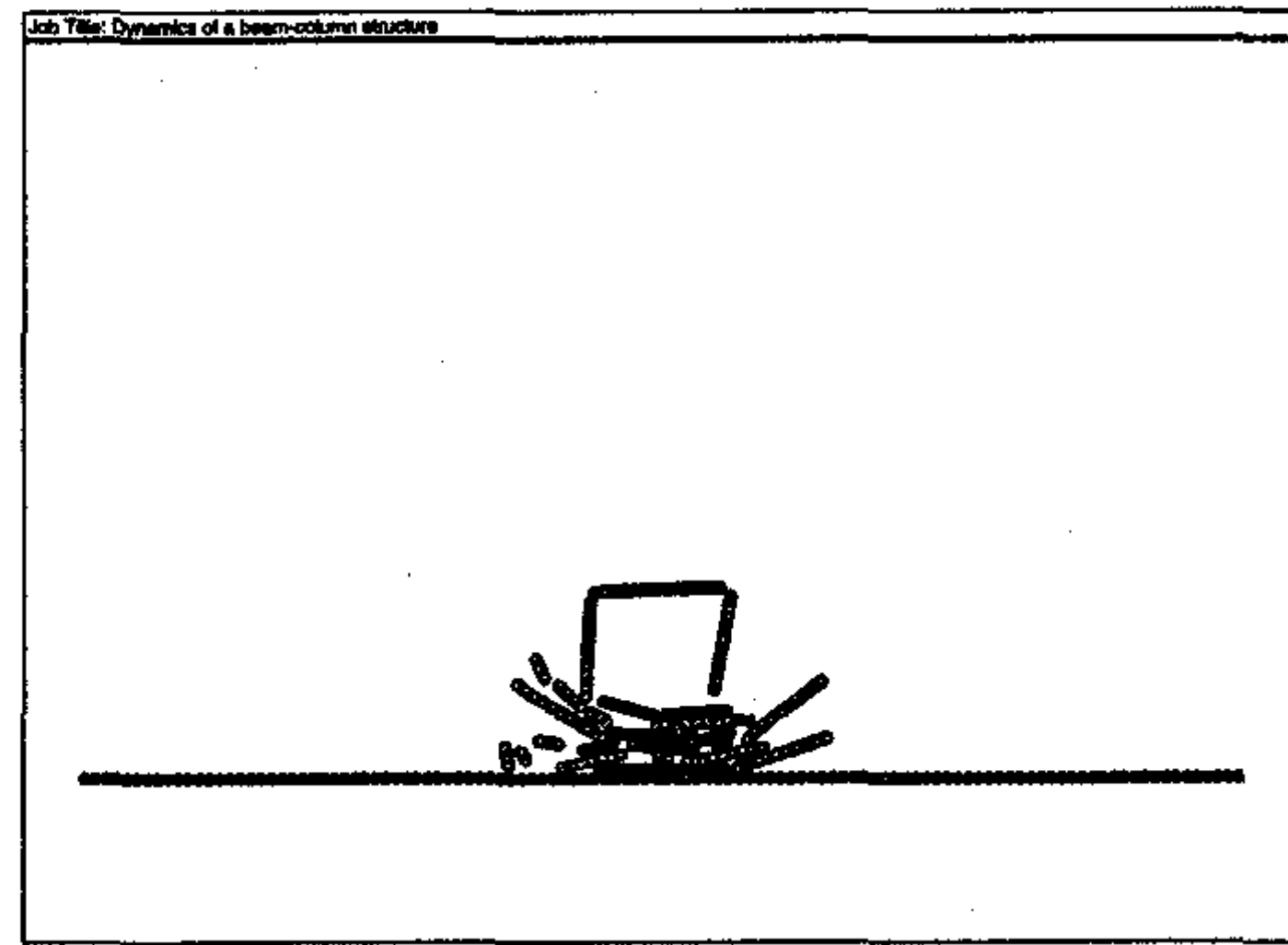
(Time = 1.5 sec)



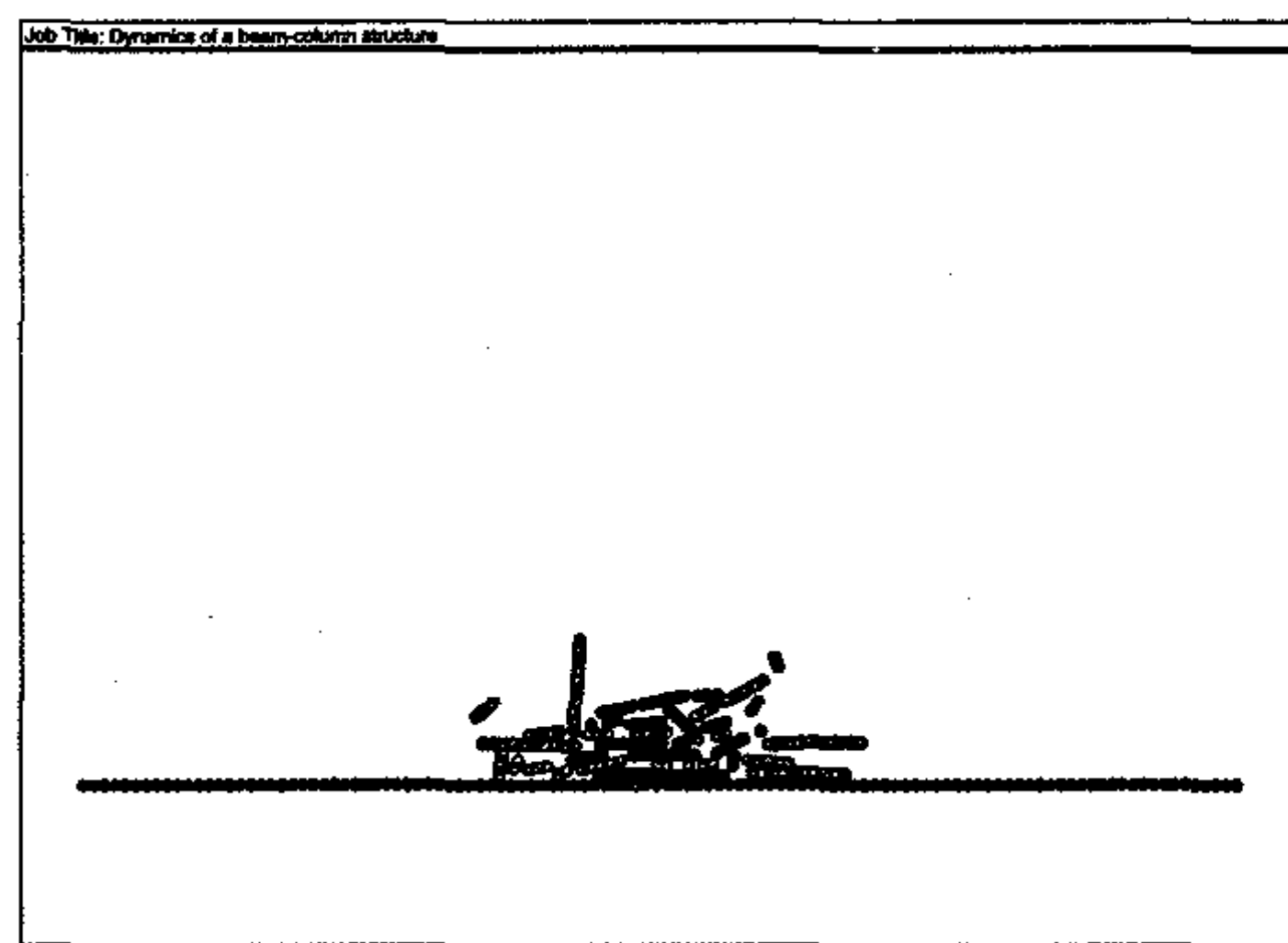
(Time = 2.0 sec)



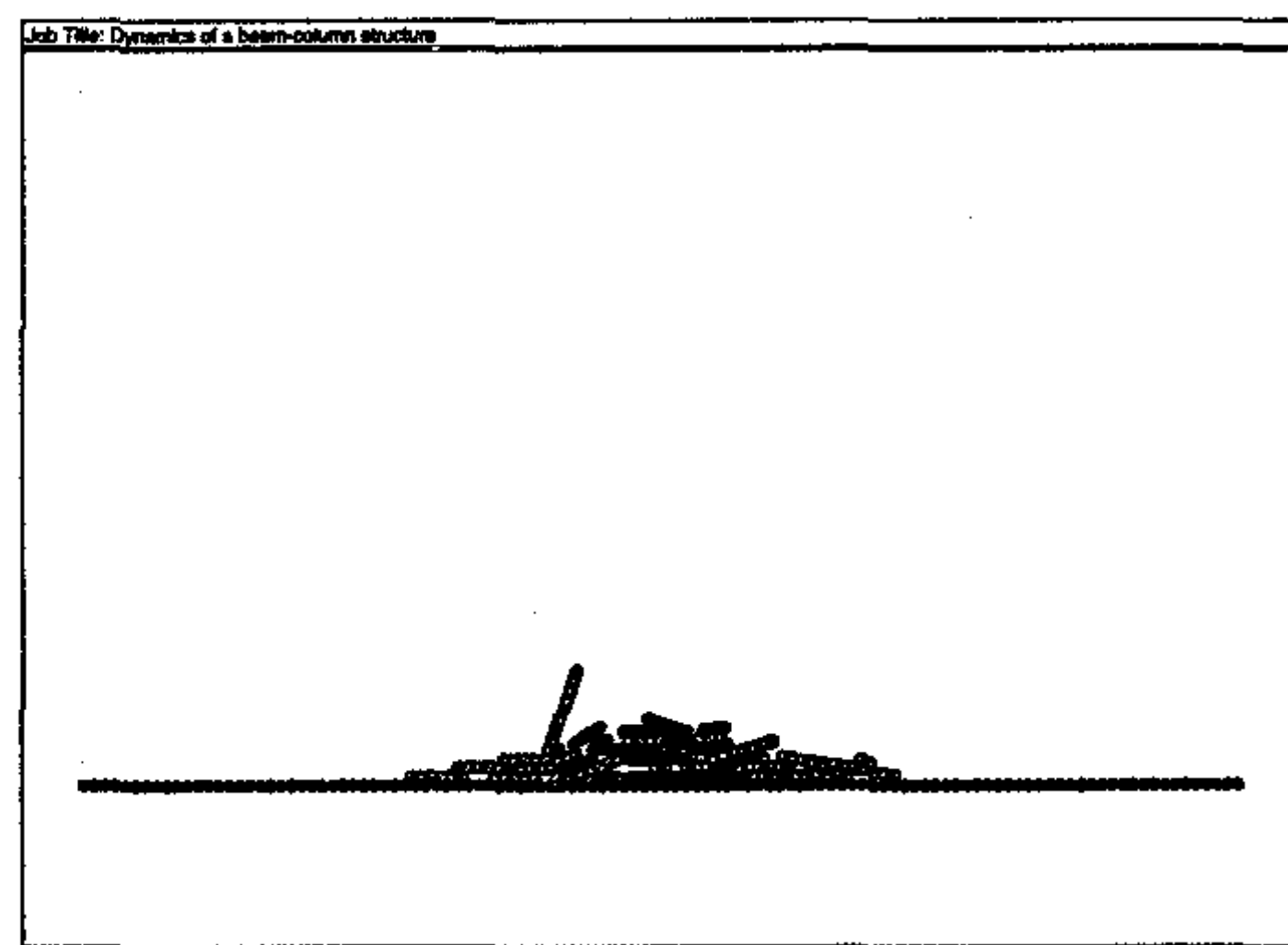
(Time = 2.5 sec)



(Time = 3.0 sec)



(Time = 3.5 sec)



(Time = 10.0 sec)

Fig. 3.4.2.2 부재간 결합력 = 0 경우의 기둥 1개소 발파 붕괴 양상

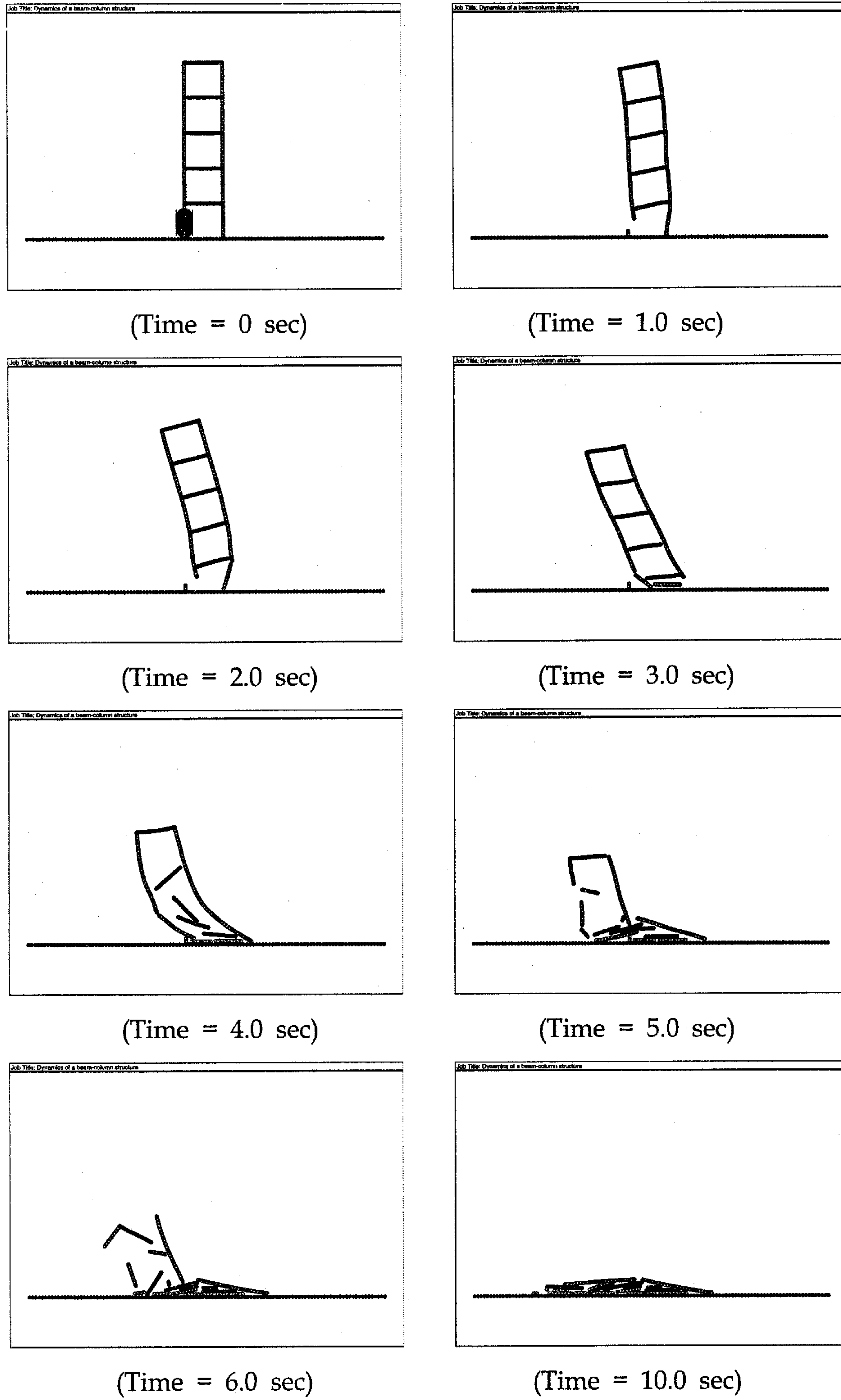


Fig. 3.4.2.3 부재 강성도 및 강도가 큰 경우의 기둥 1개소 발파 붕괴 양상

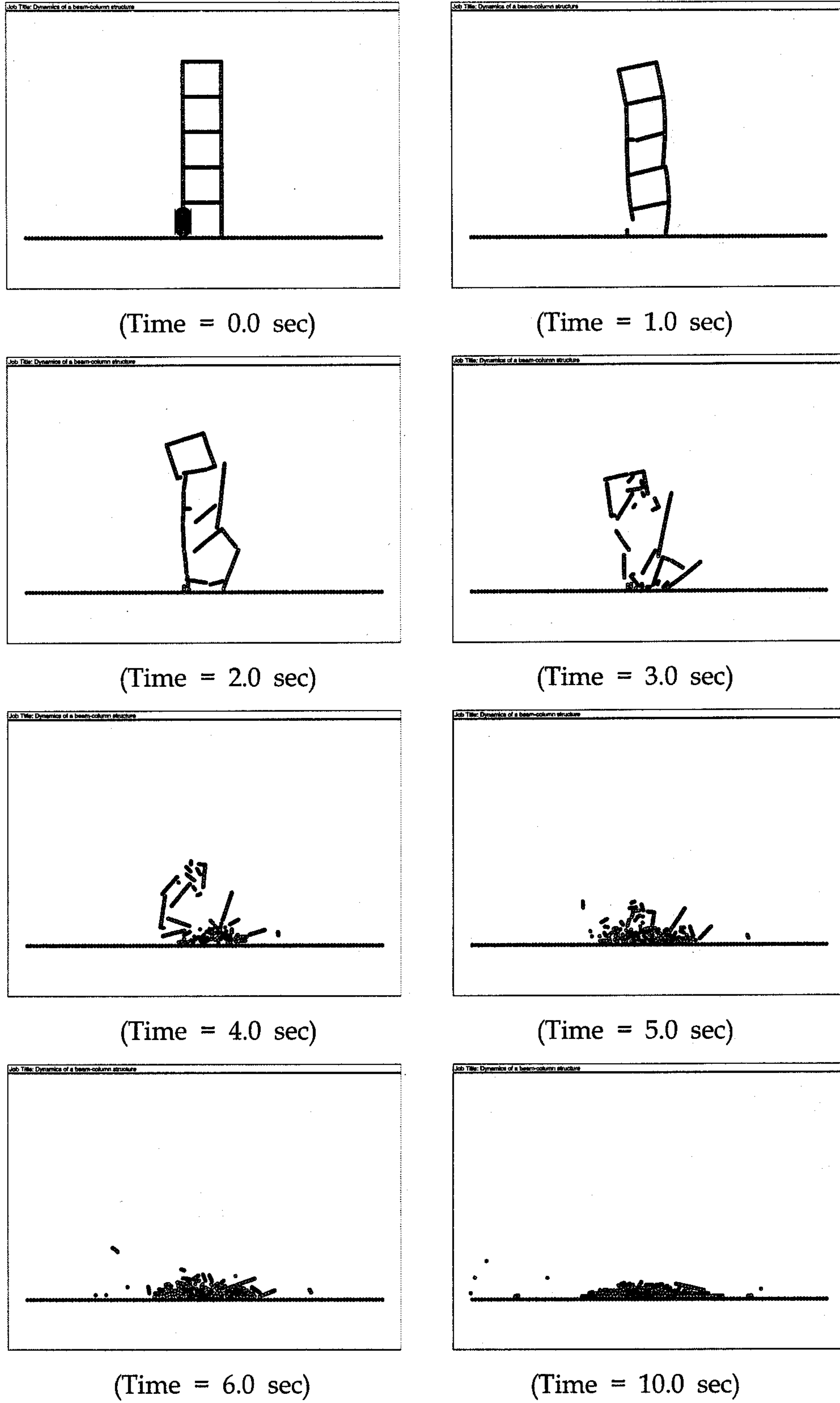


Fig. 3.4.2.4 부재 강성도는 크고 강도가 약한 경우의 기둥 1개소 발파 붕괴 양상

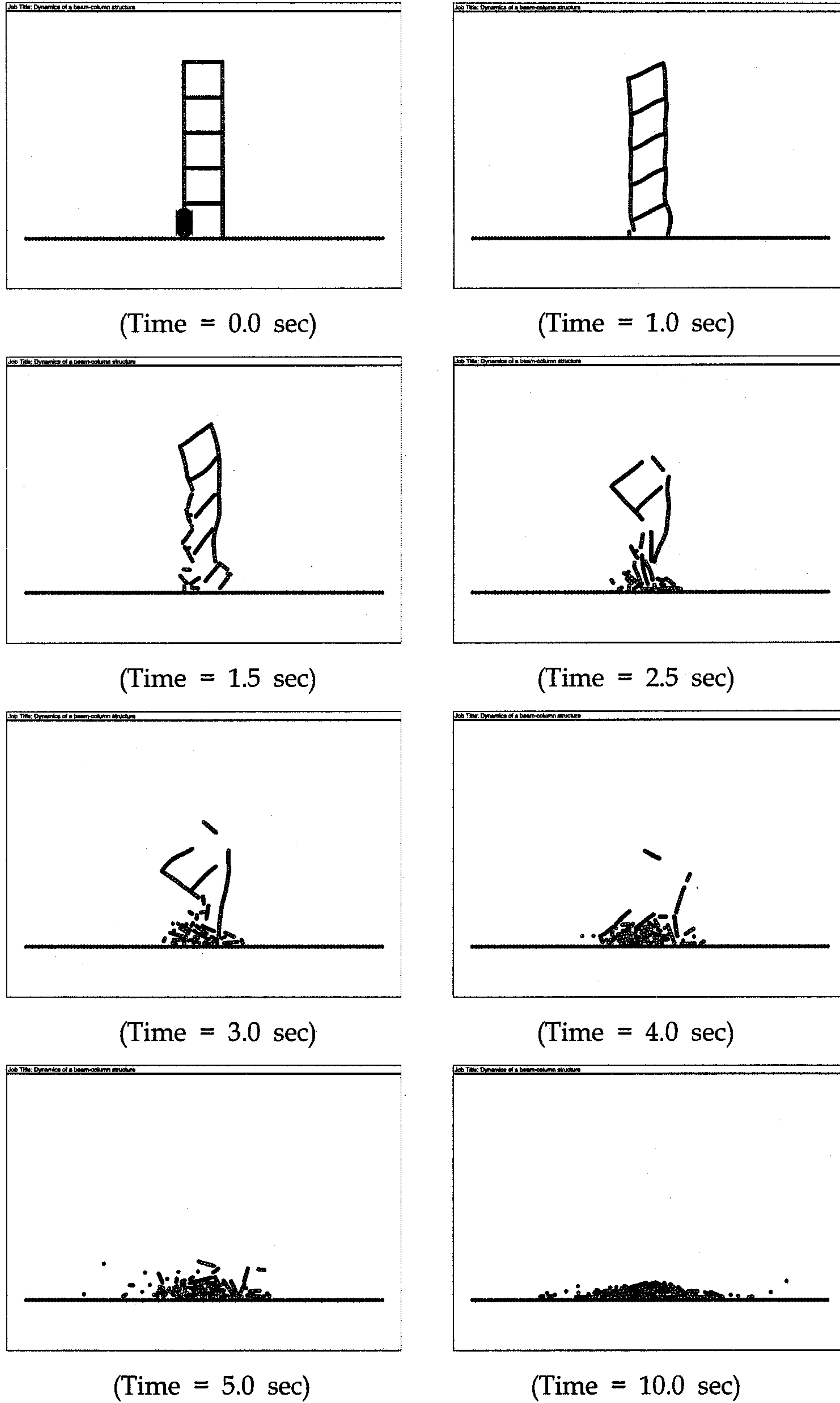
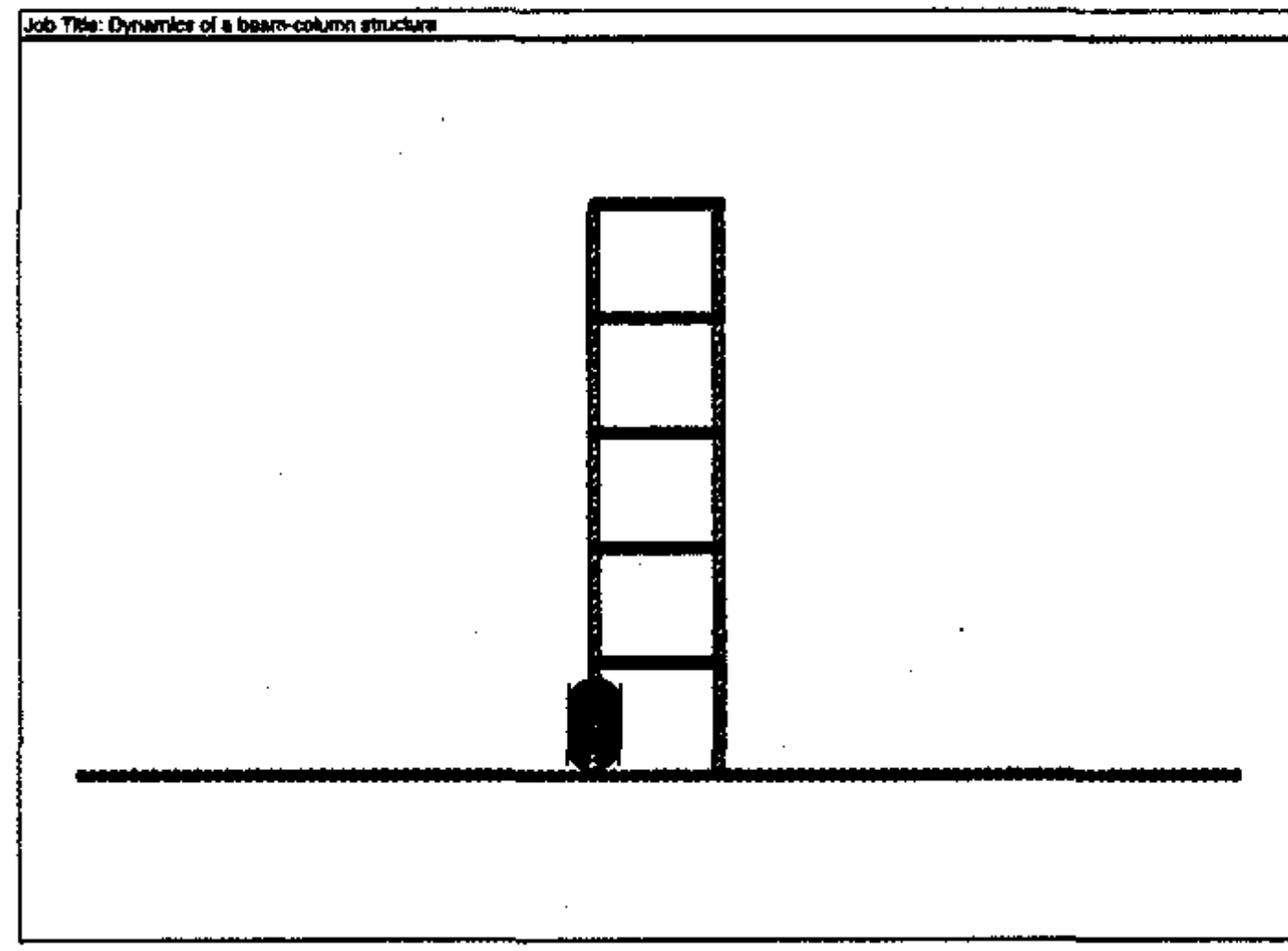
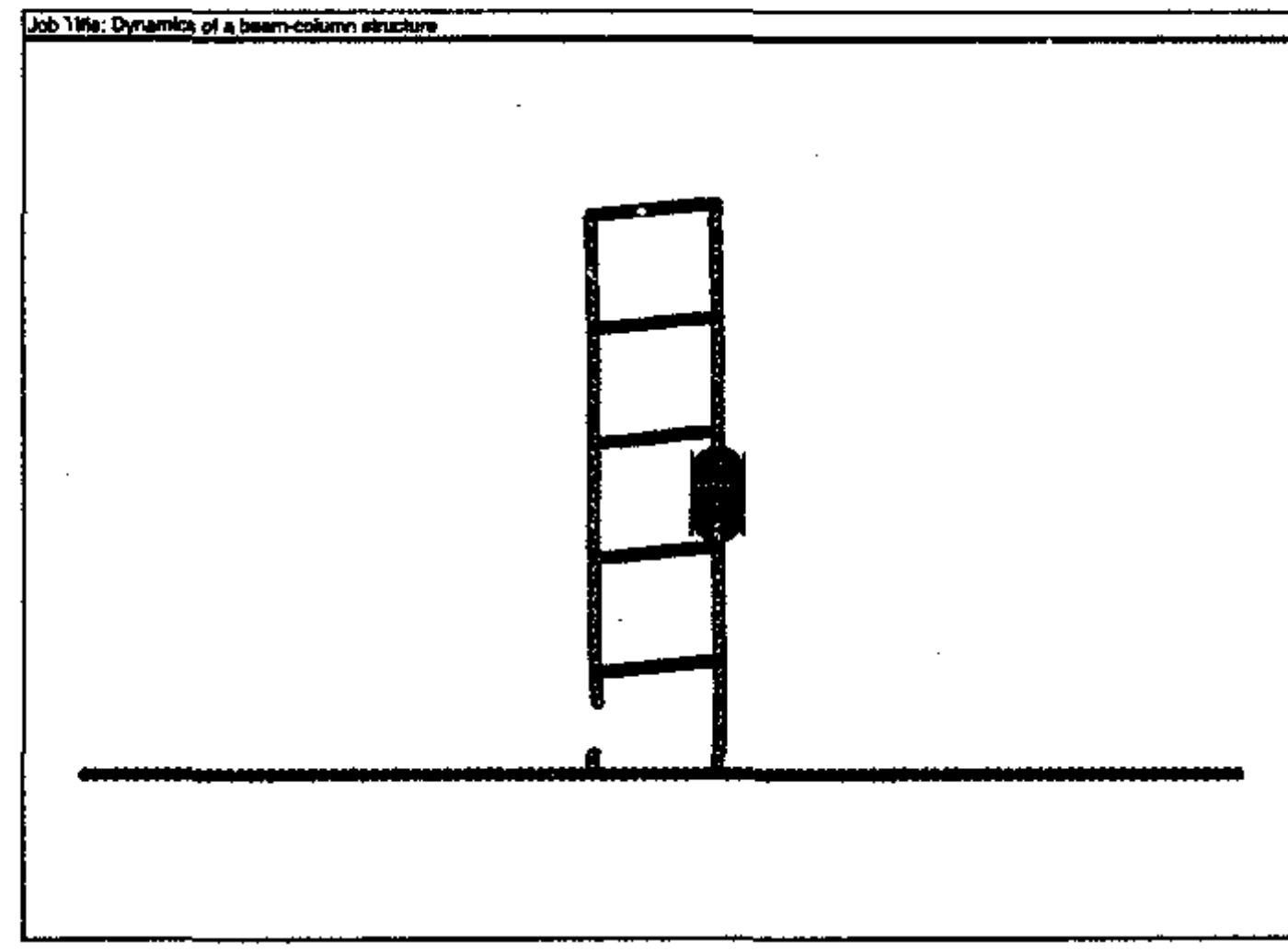


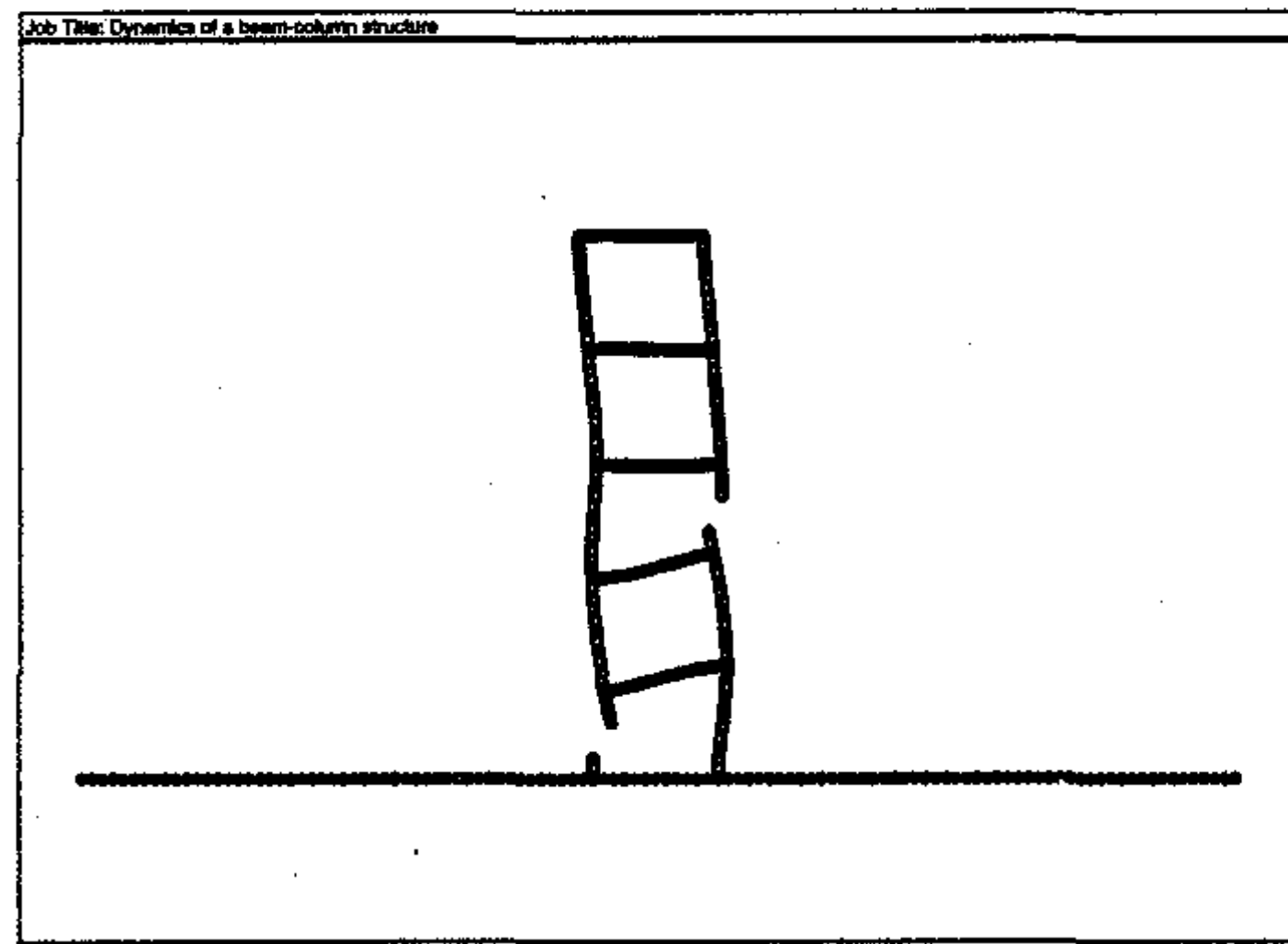
Fig. 3.4.2.5 부재 강성도 및 강도가 약한 경우의 기둥 1개소 발파 붕괴 양상



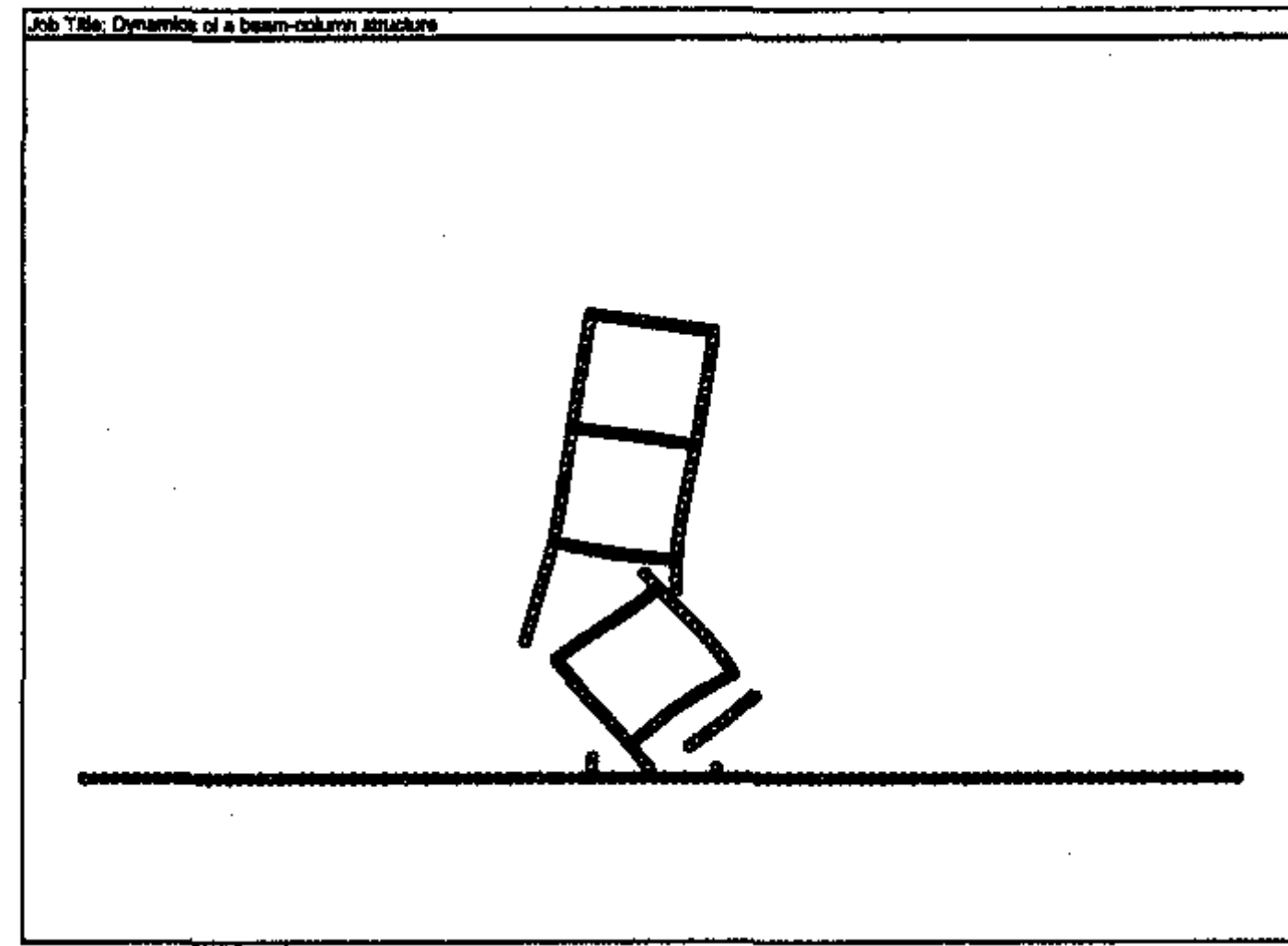
(Time = 0 sec)



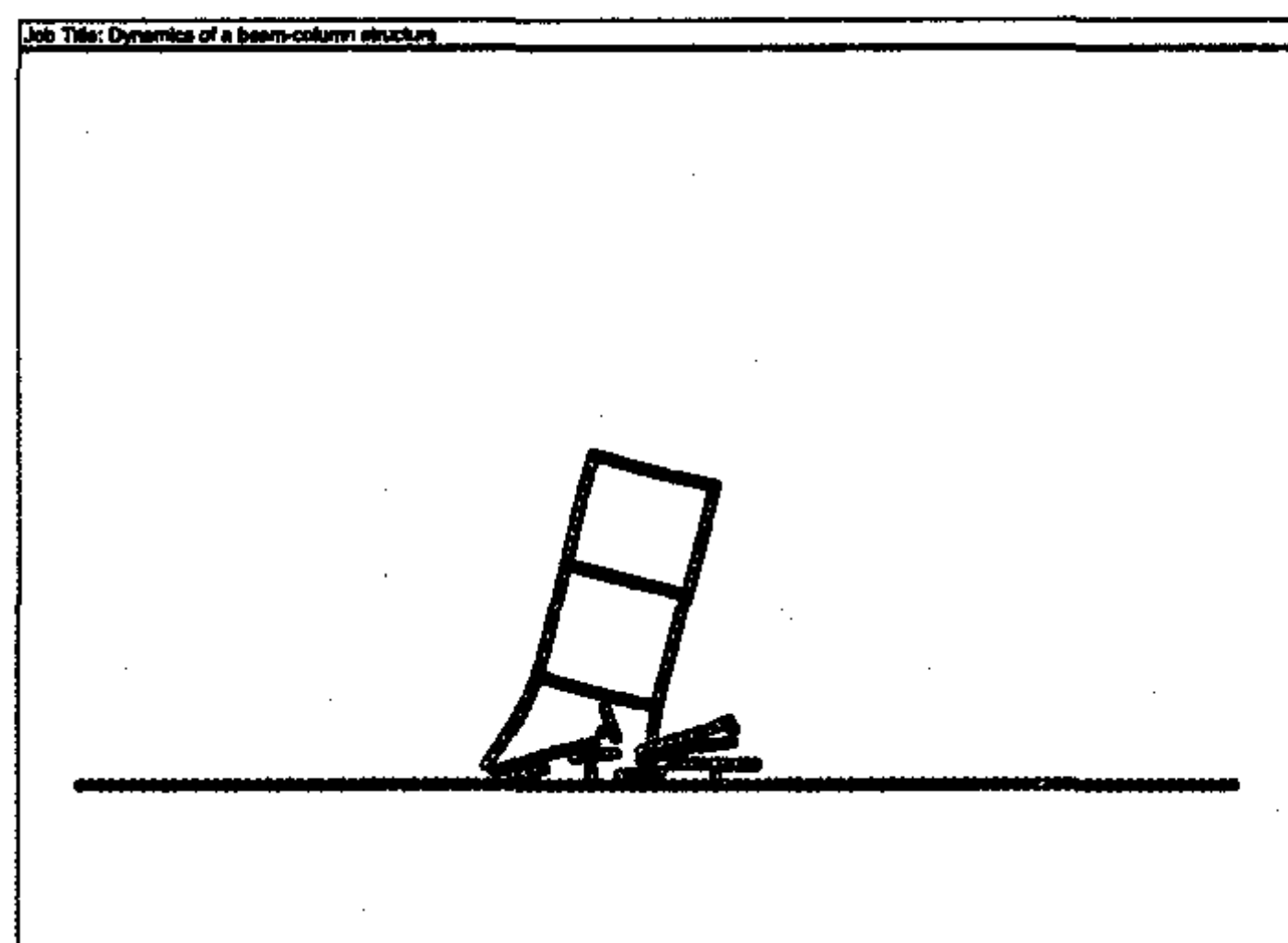
(Time = 0.5 sec)



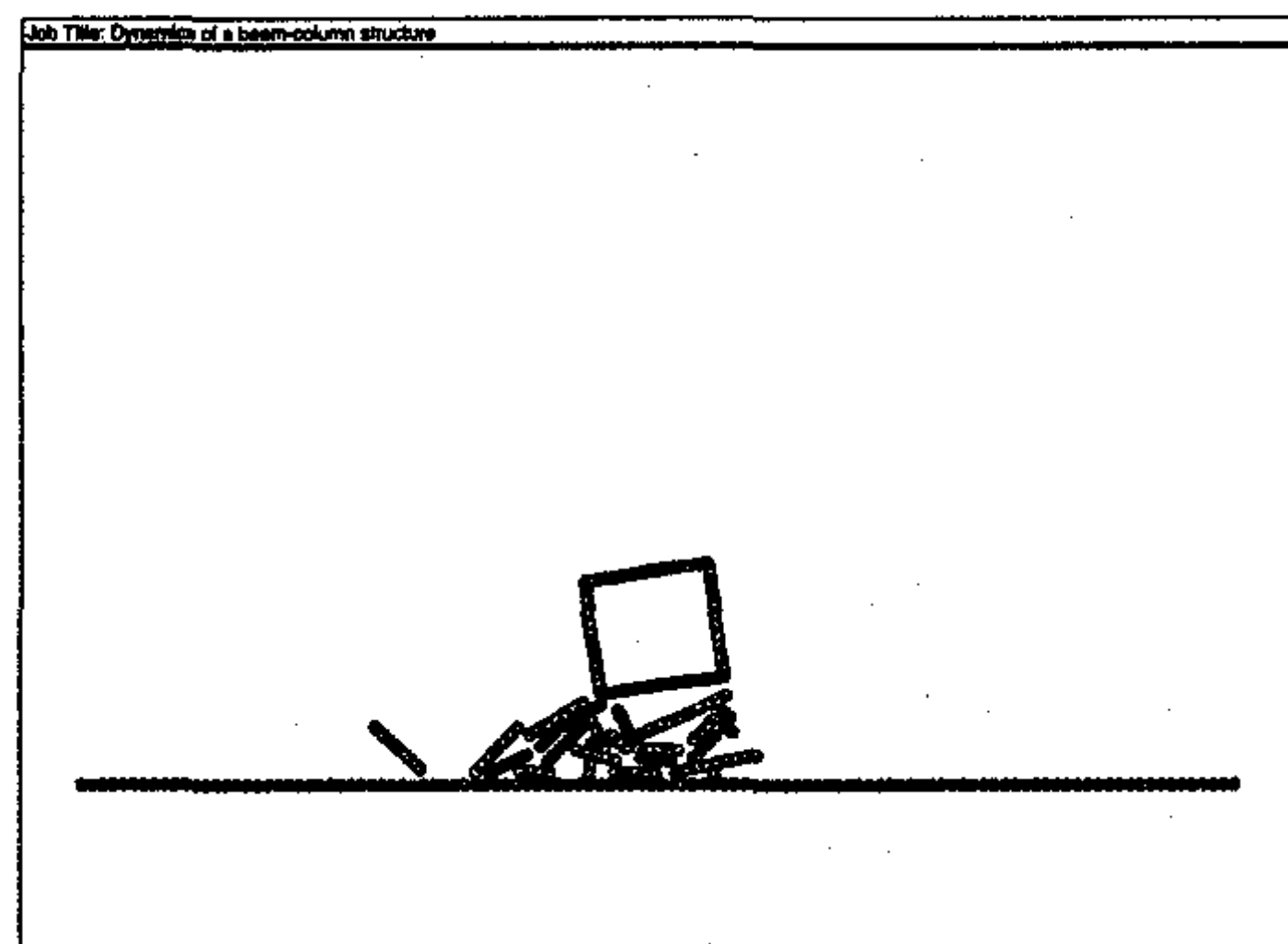
(Time = 1.0 sec)



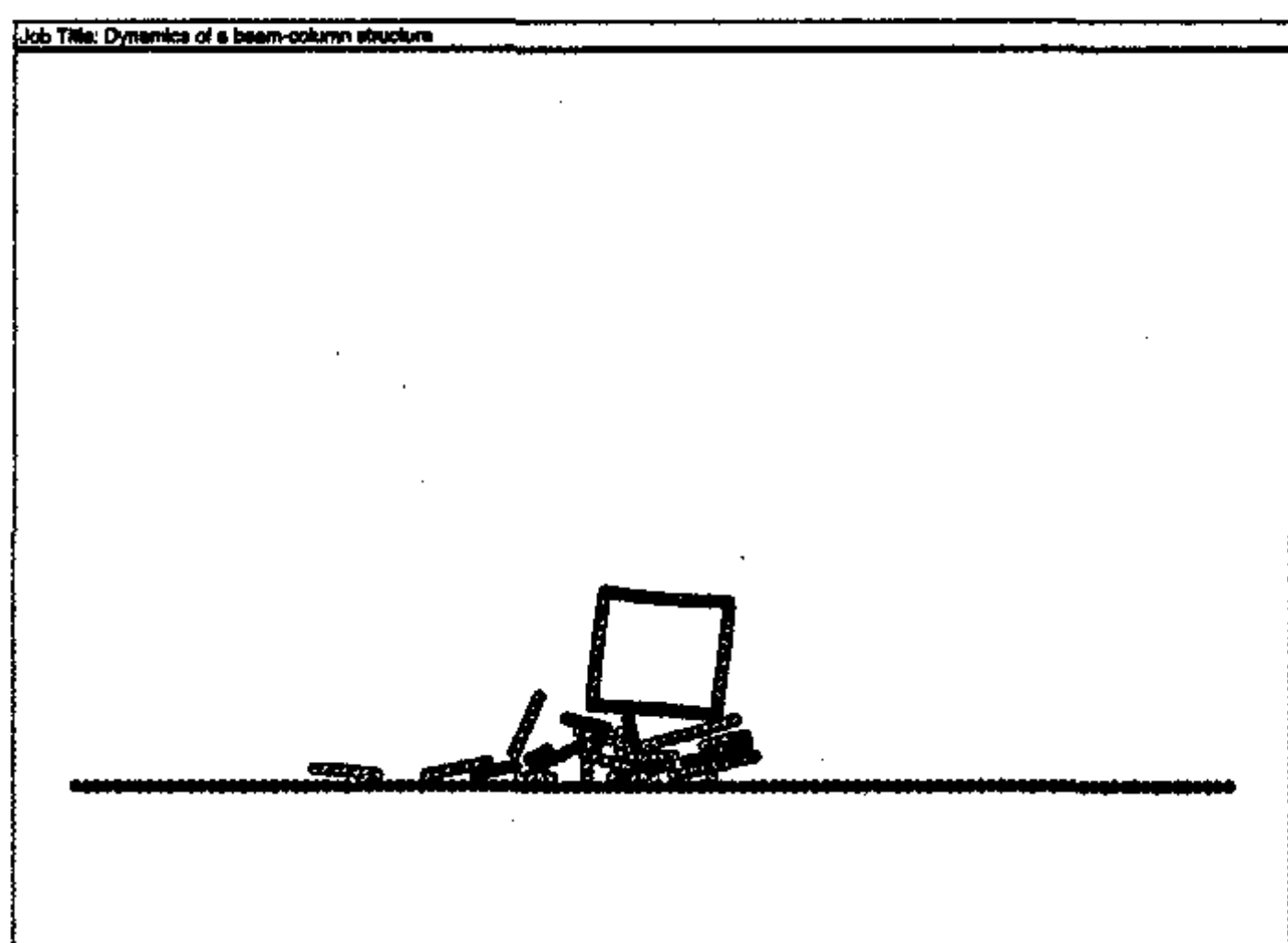
(Time = 2.0 sec)



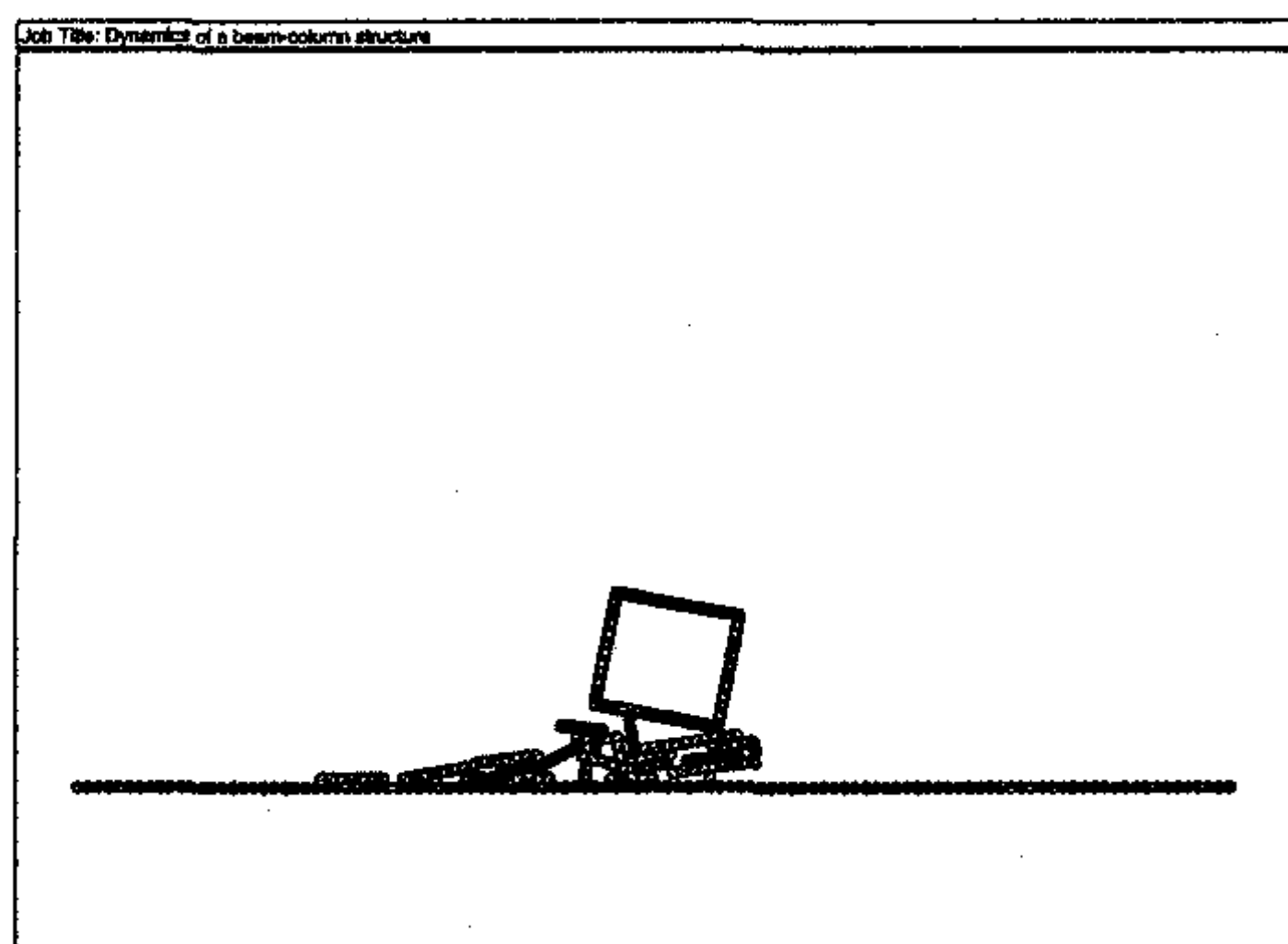
(Time = 3.0 sec)



(Time = 4.0 sec)

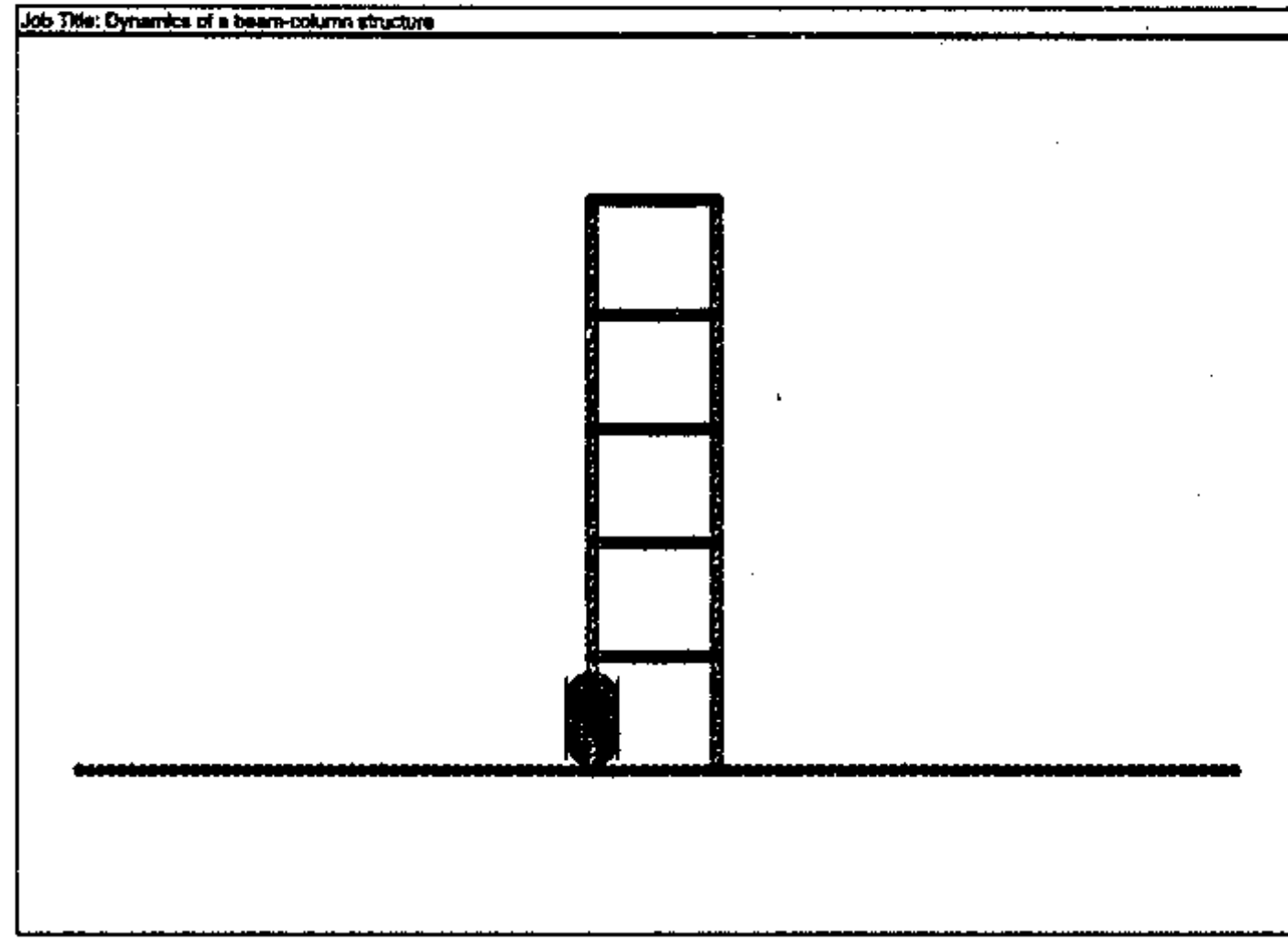


(Time = 5.0 sec)

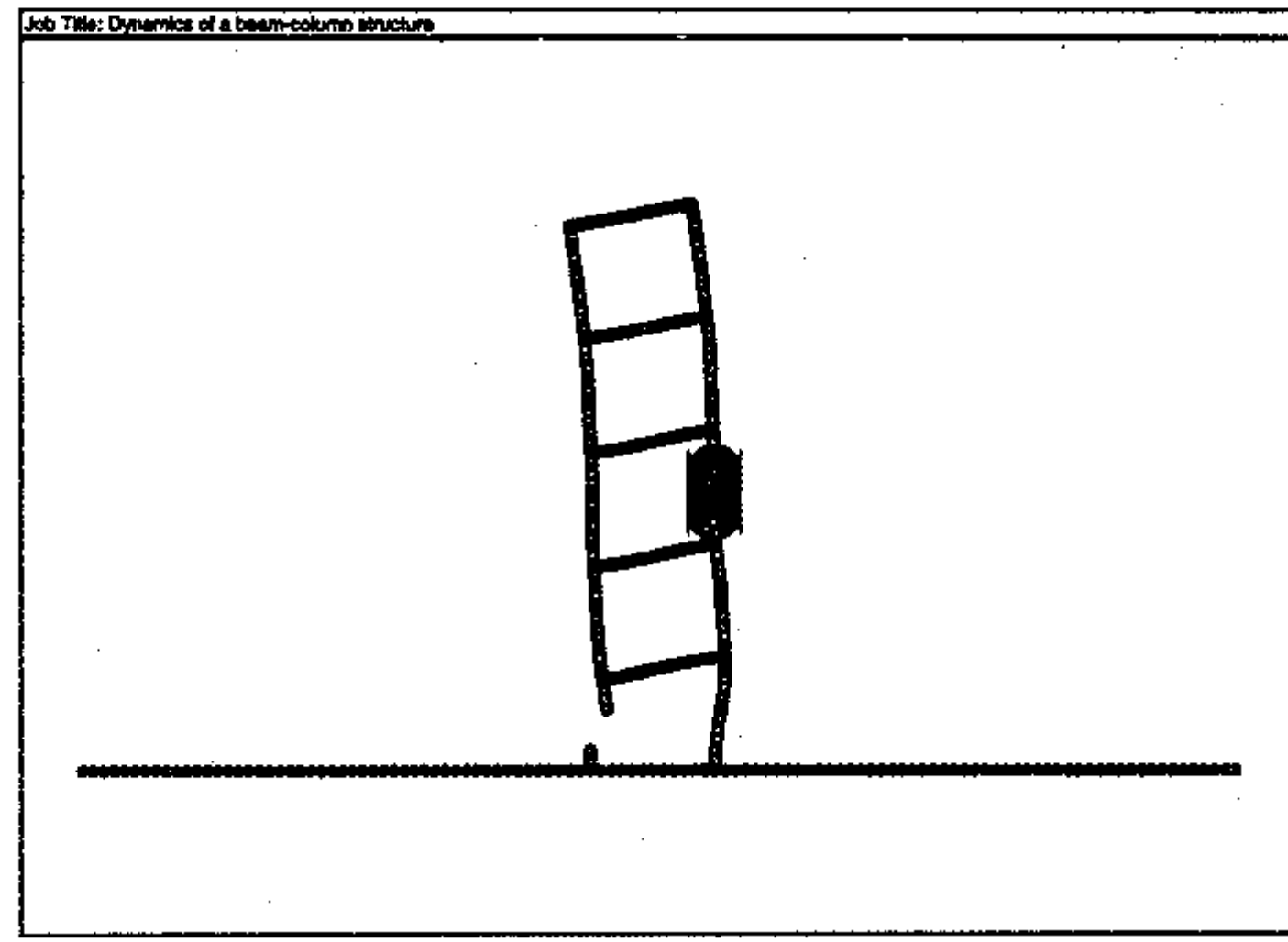


(Time = 10.0 sec)

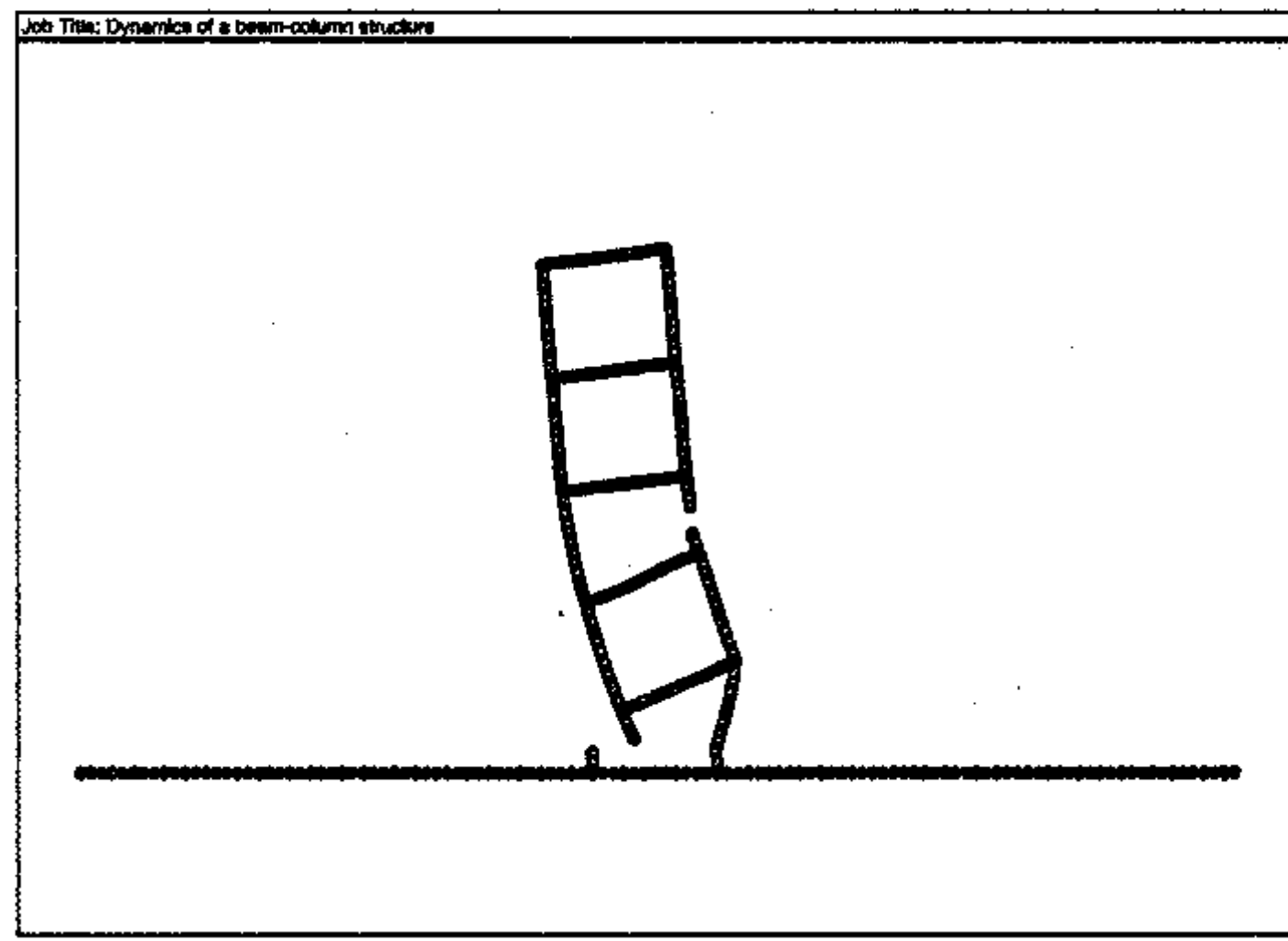
Fig. 3.4.2.6 지발발파시간 = 0.5초의 기둥 2개소 지발 발파 붕괴 양상



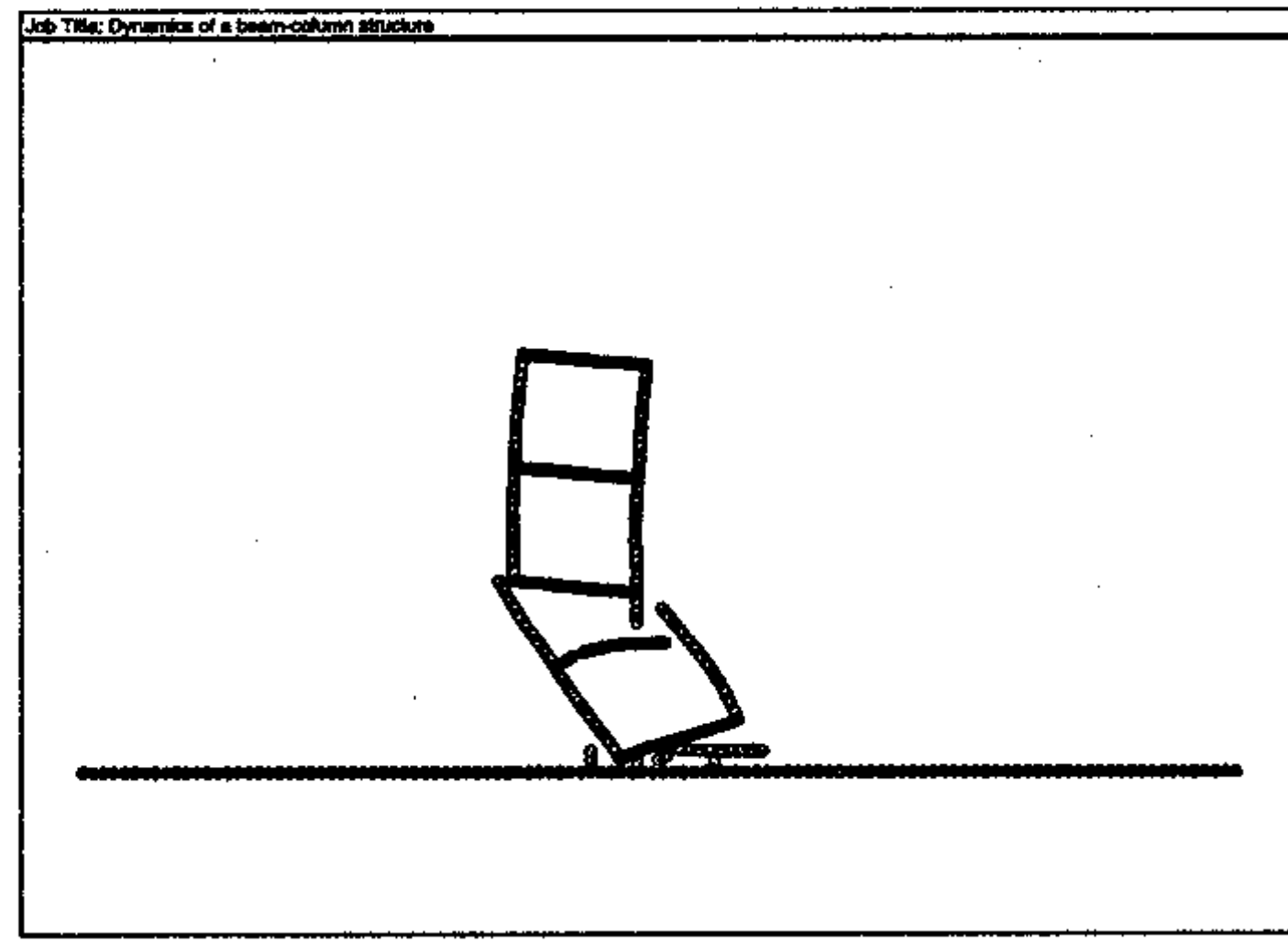
(Time = 0 sec)



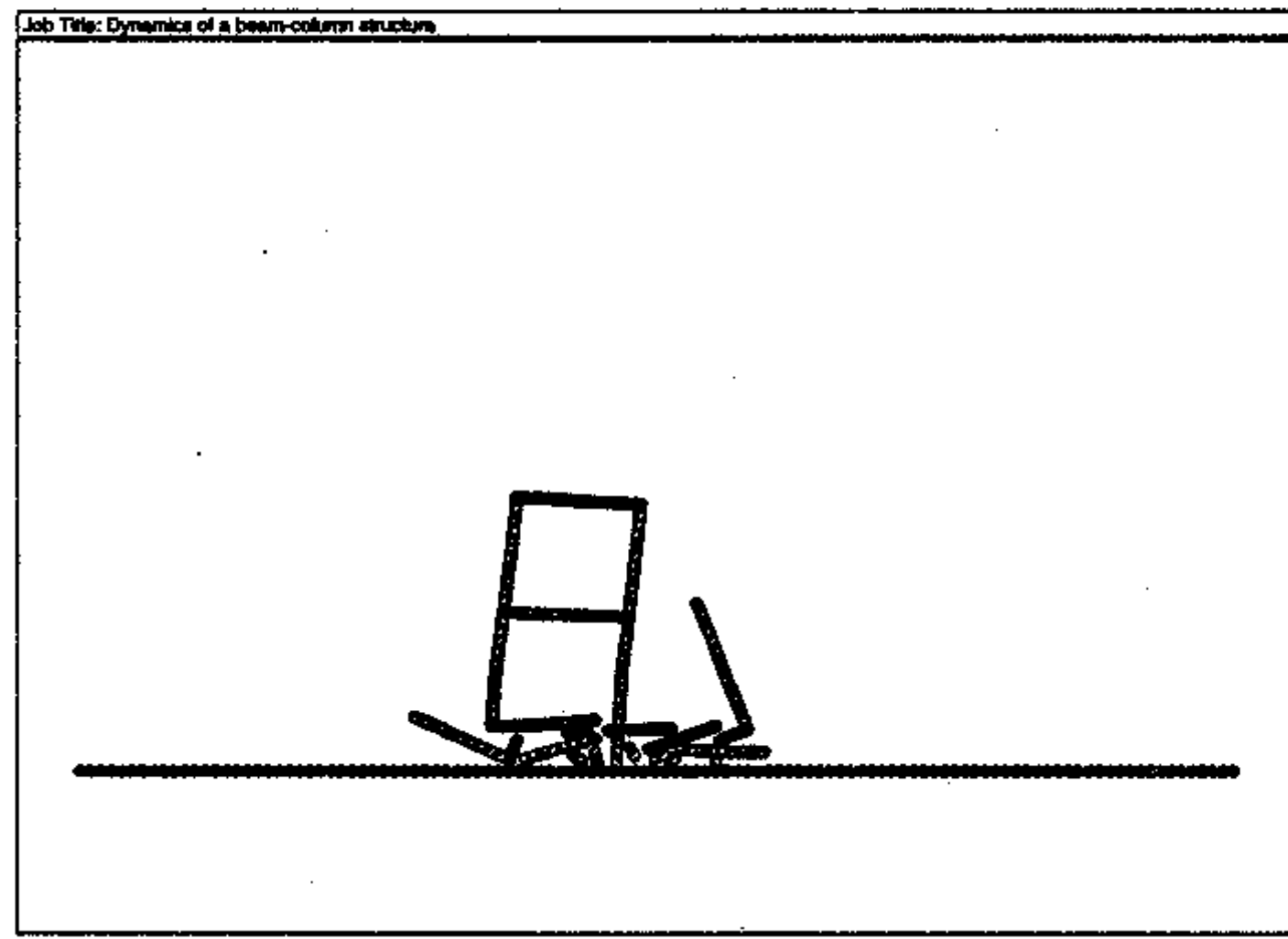
(Time = 1.0 sec)



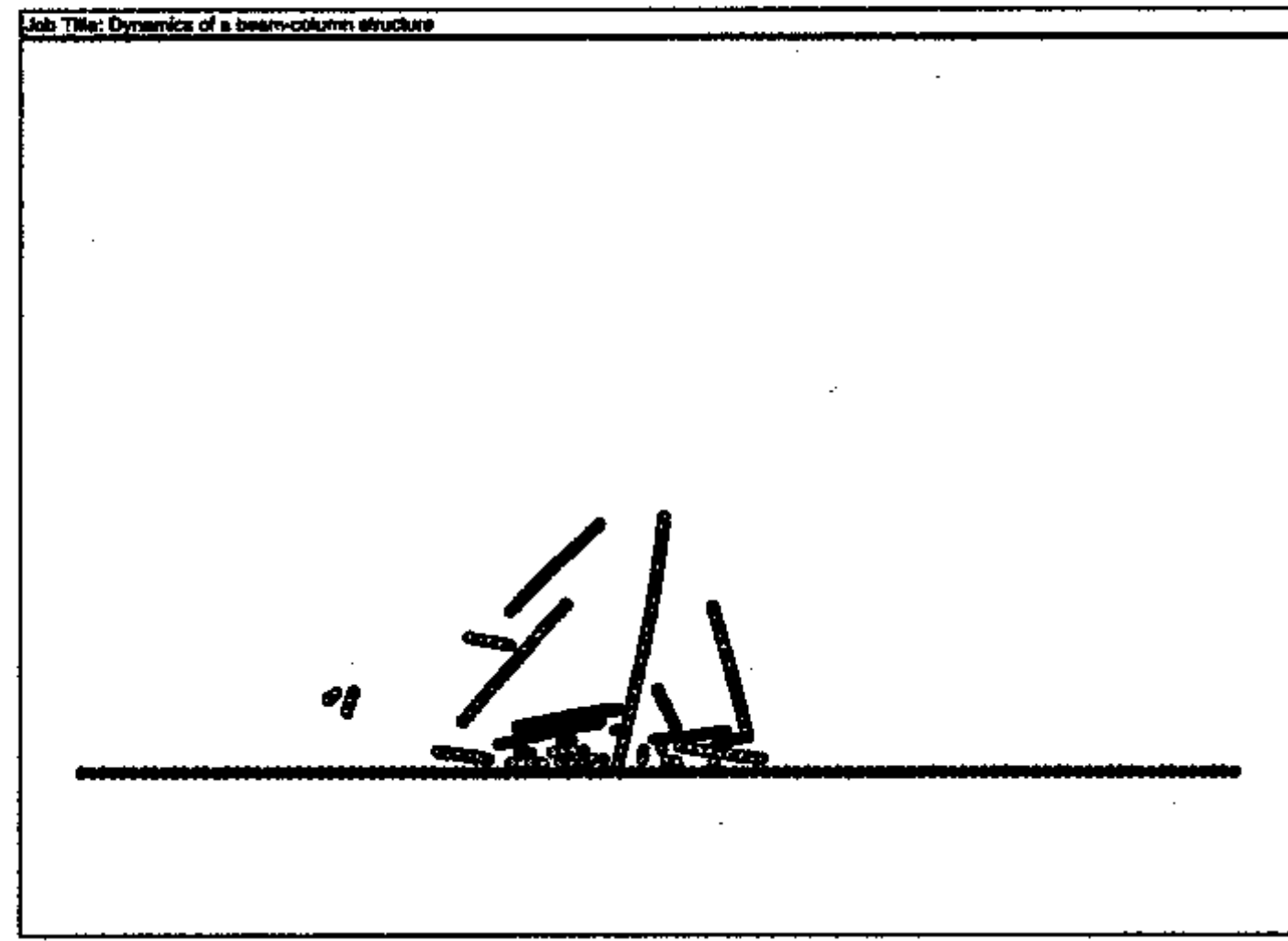
(Time = 2.0 sec)



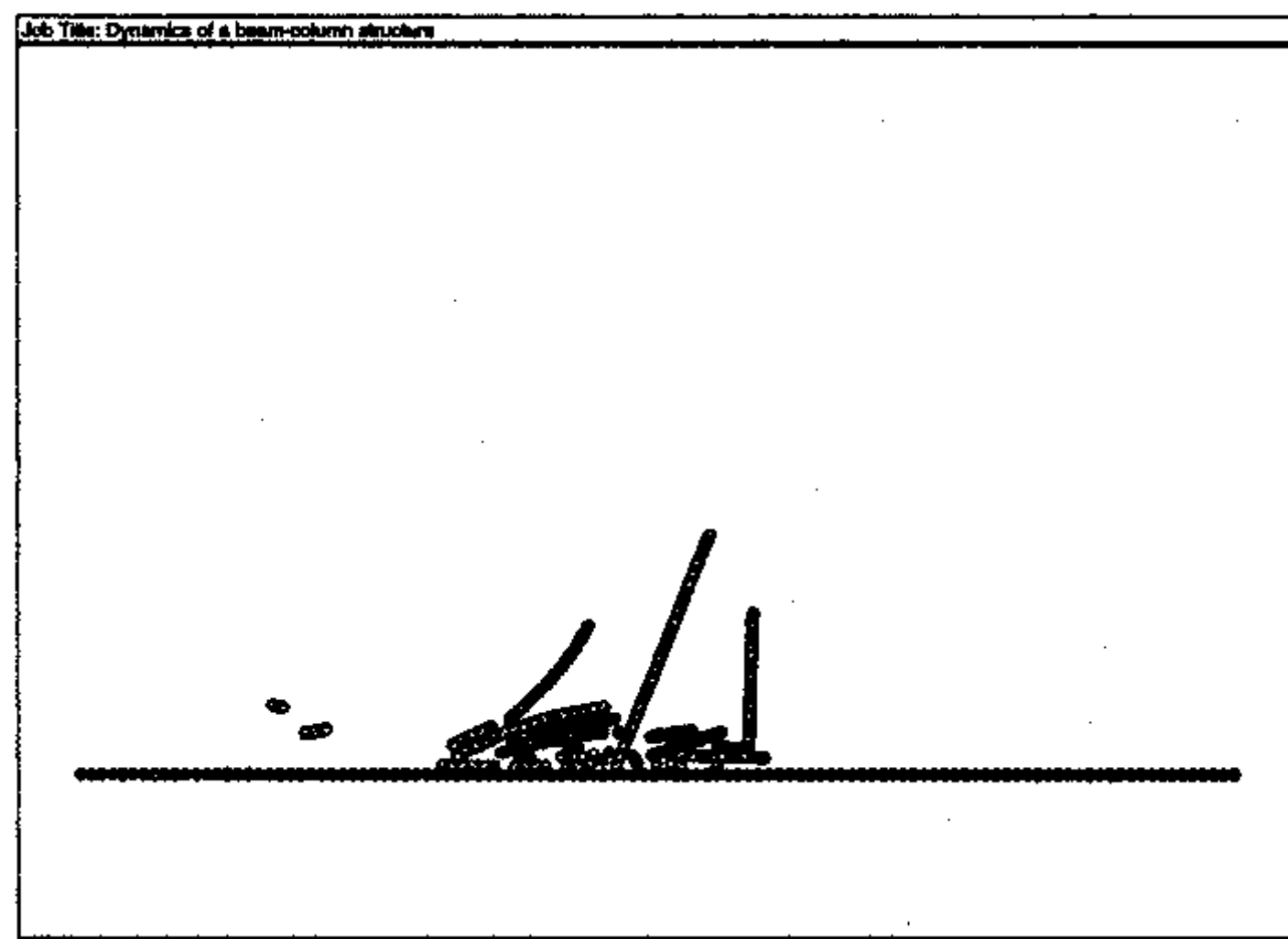
(Time = 3.0 sec)



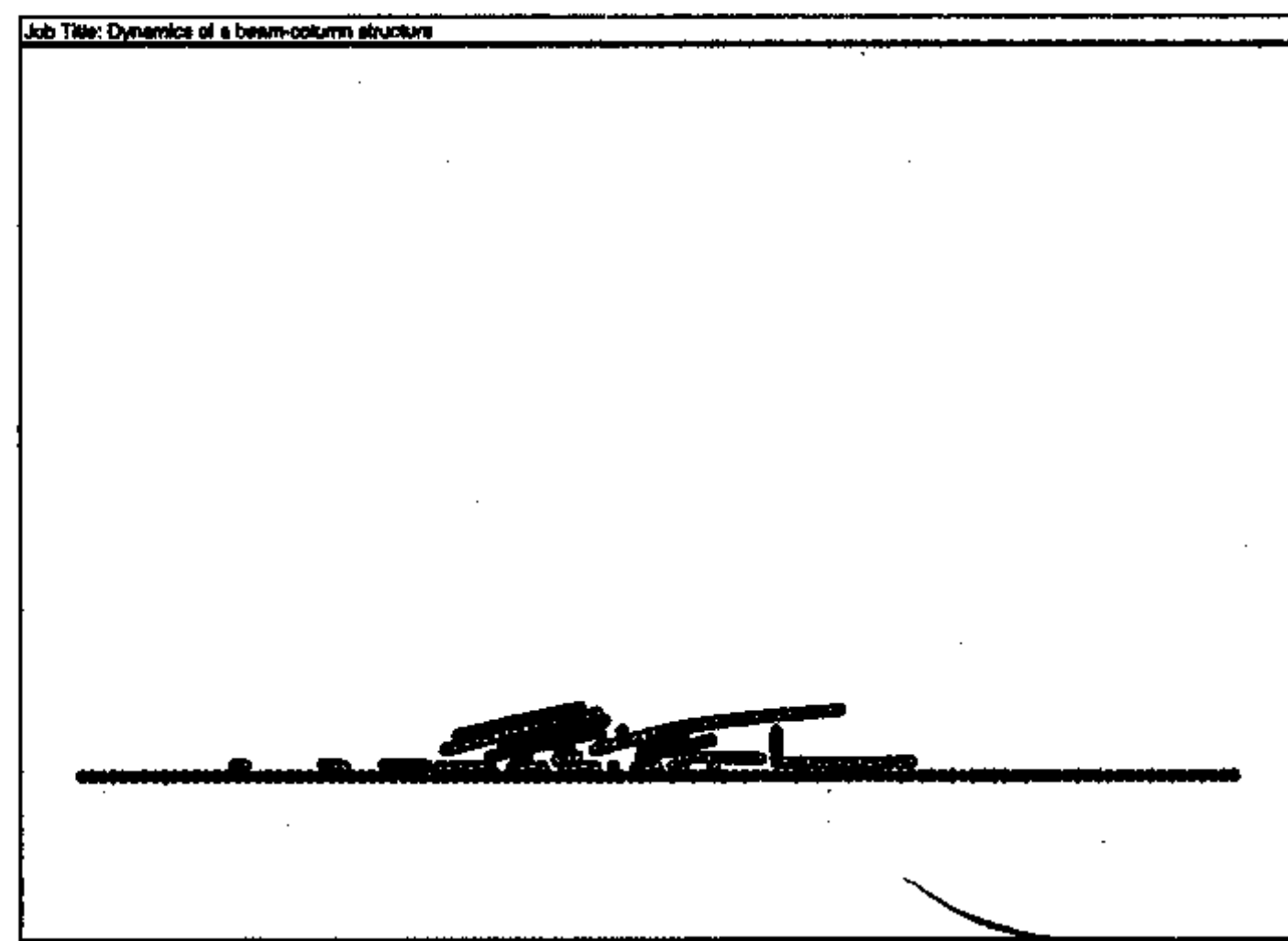
(Time = 4.0 sec)



(Time = 5.0 sec)

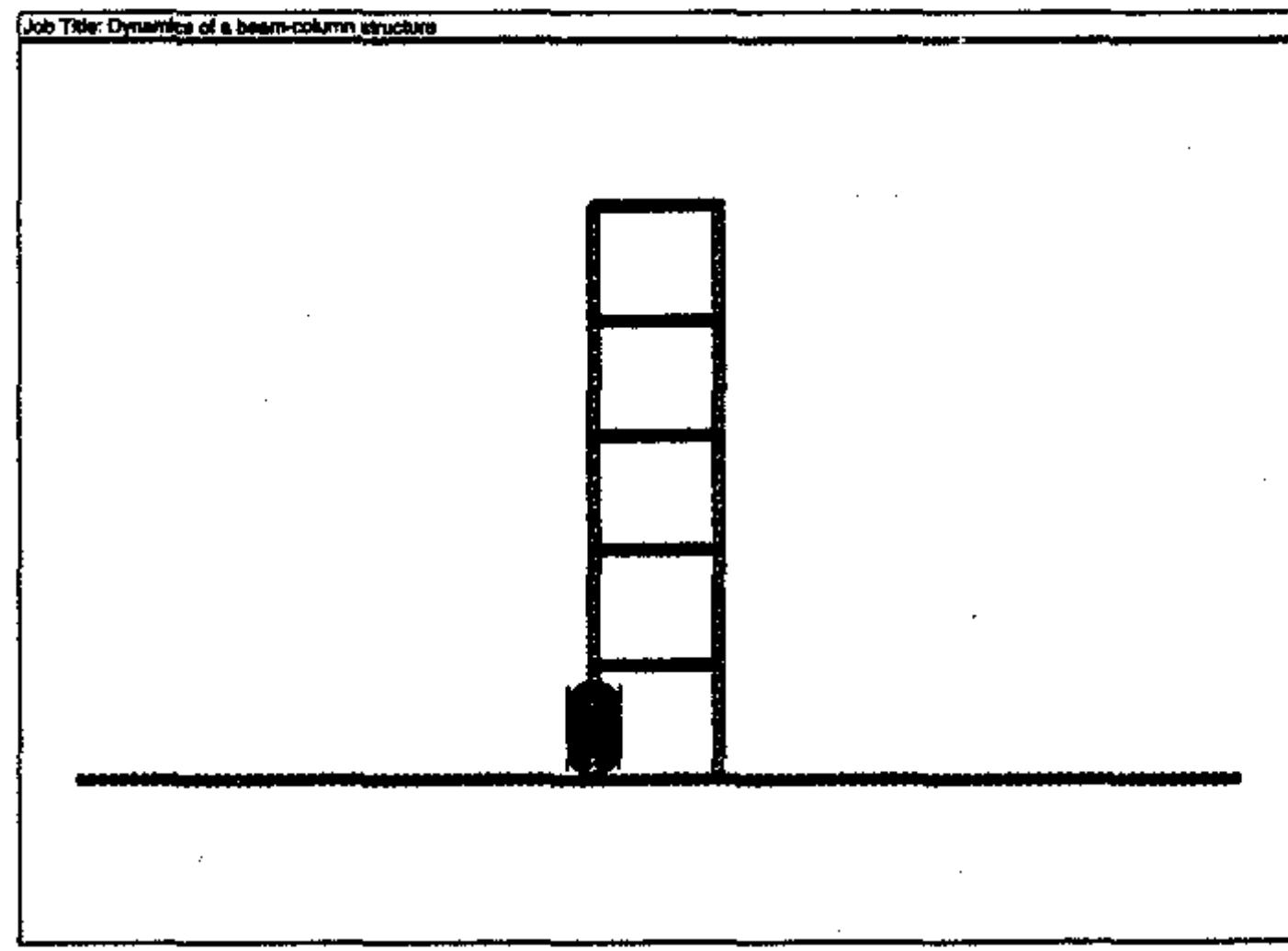


(Time = 6.0 sec)

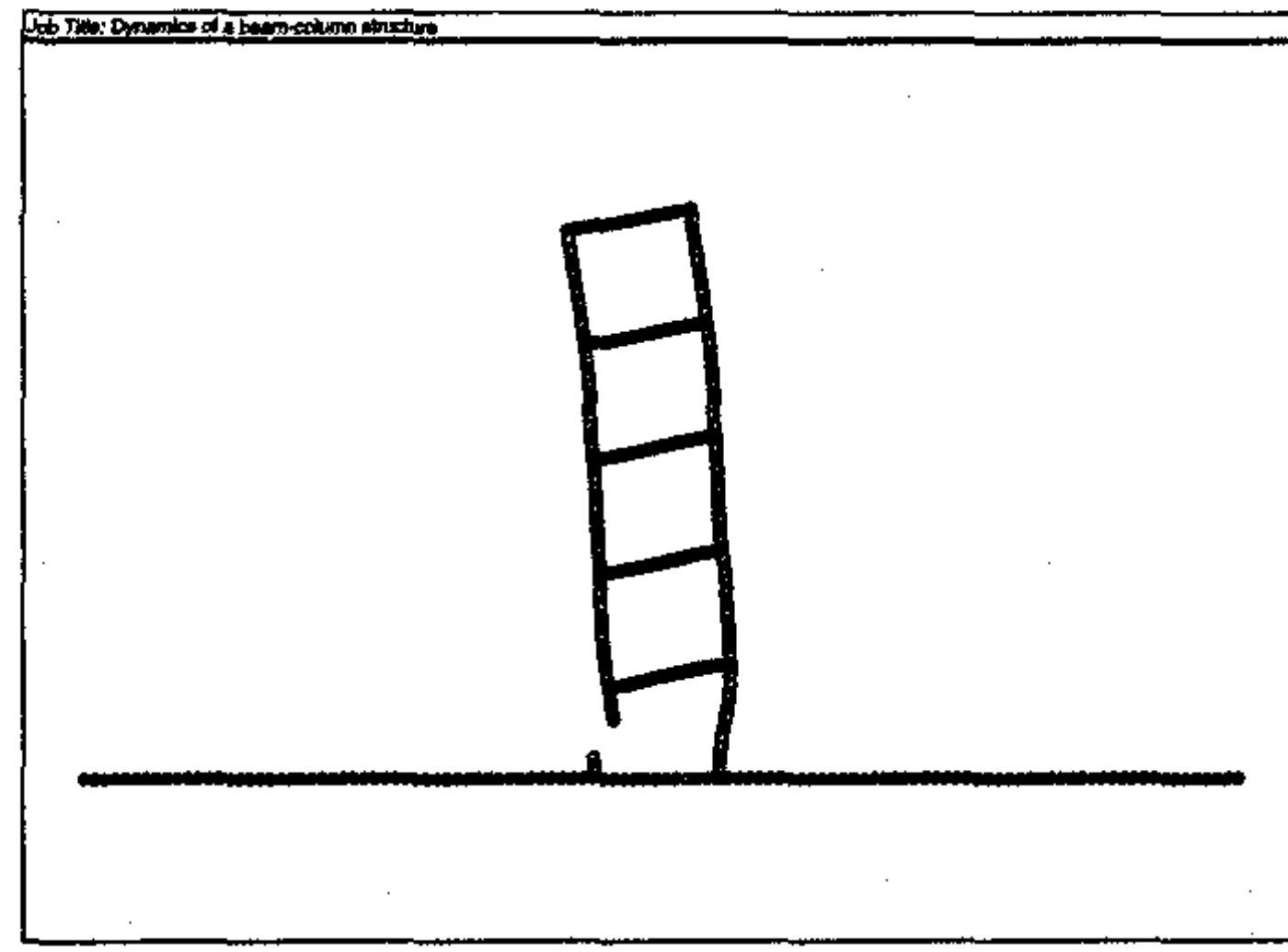


(Time = 10.0 sec)

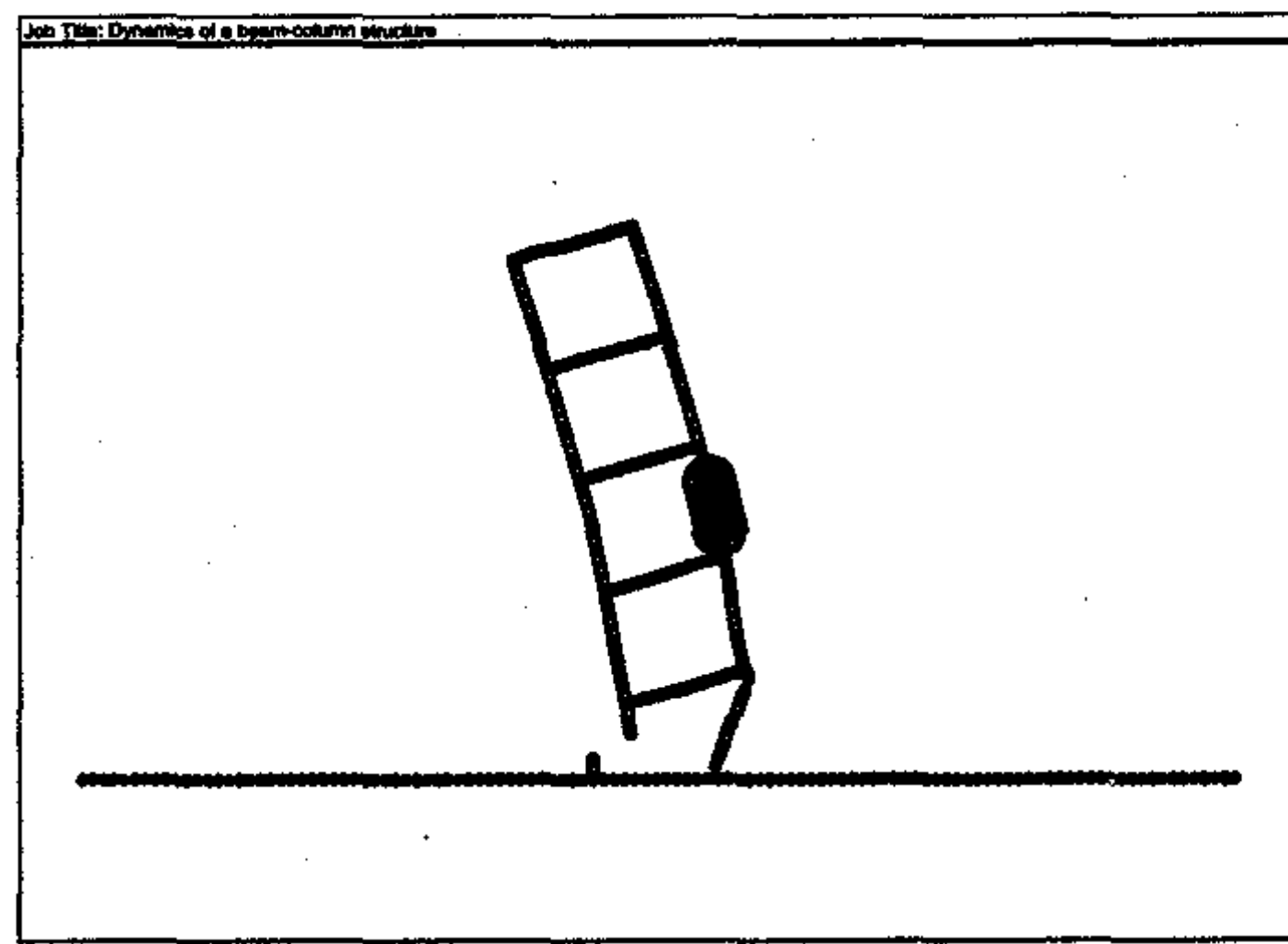
Fig. 3.4.2.7 지발발파시간 = 1.0초의 기둥 2개소 지발 발파 붕괴 양상



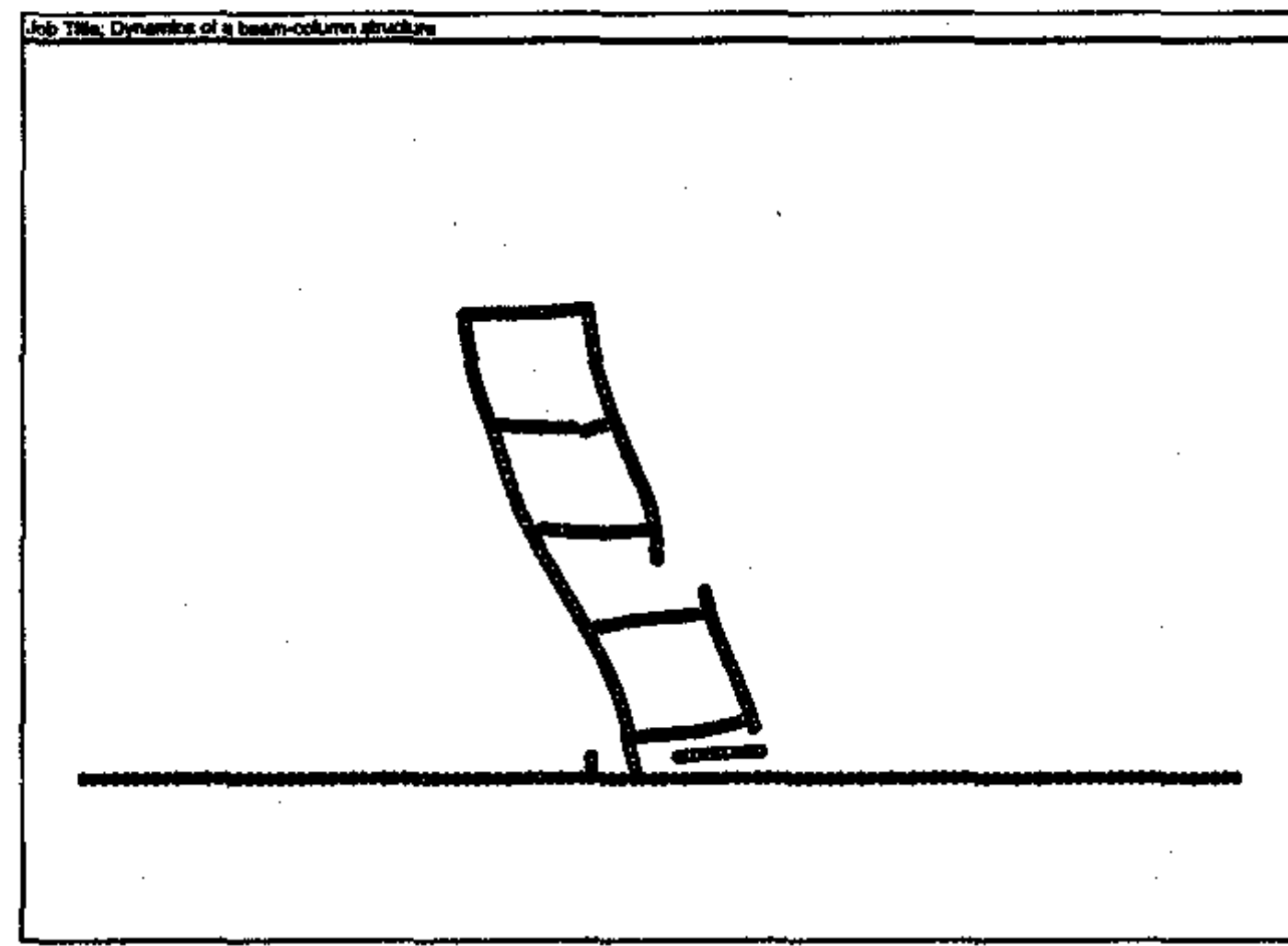
(Time = 0 sec)



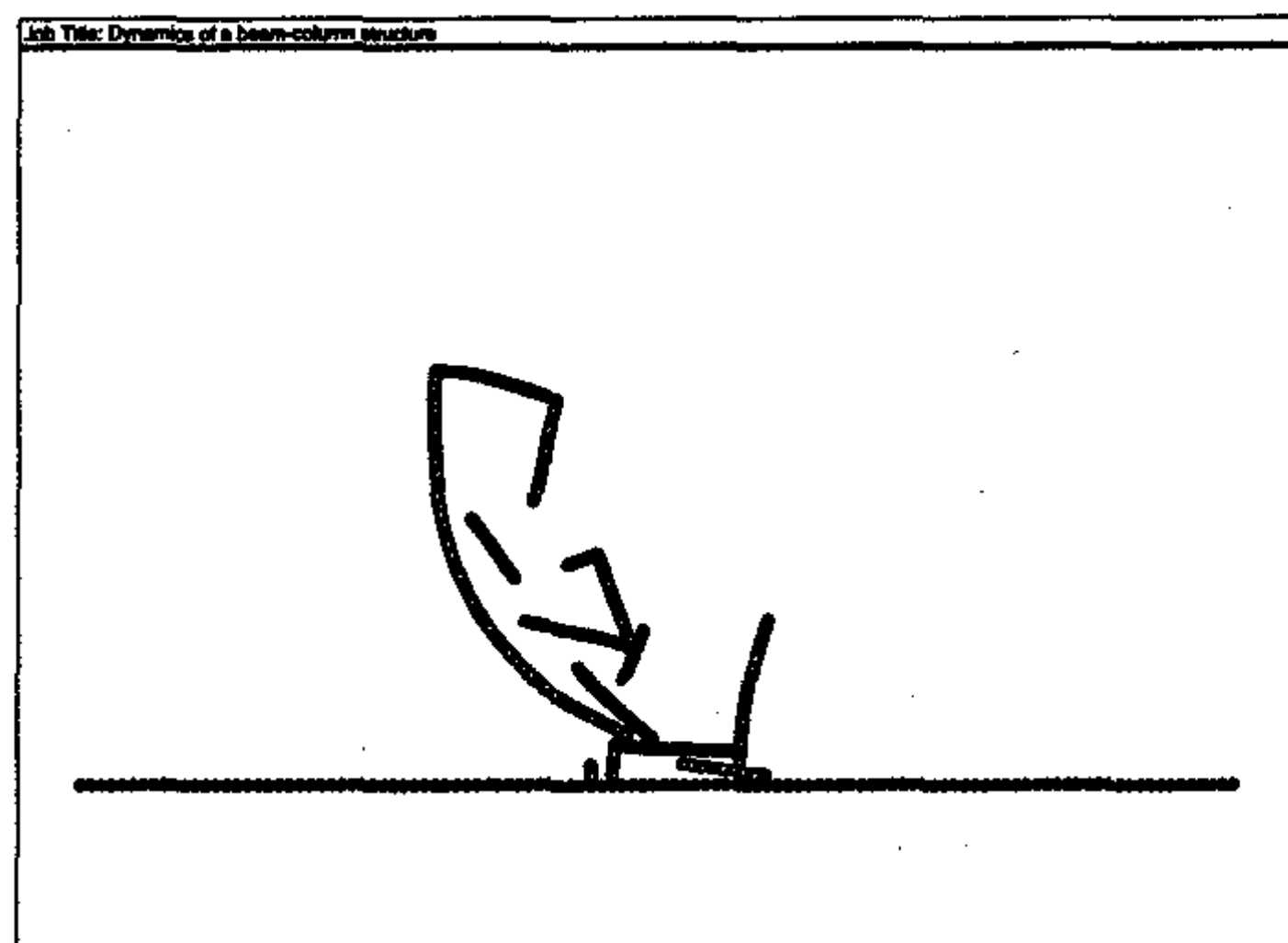
(Time = 1.0 sec)



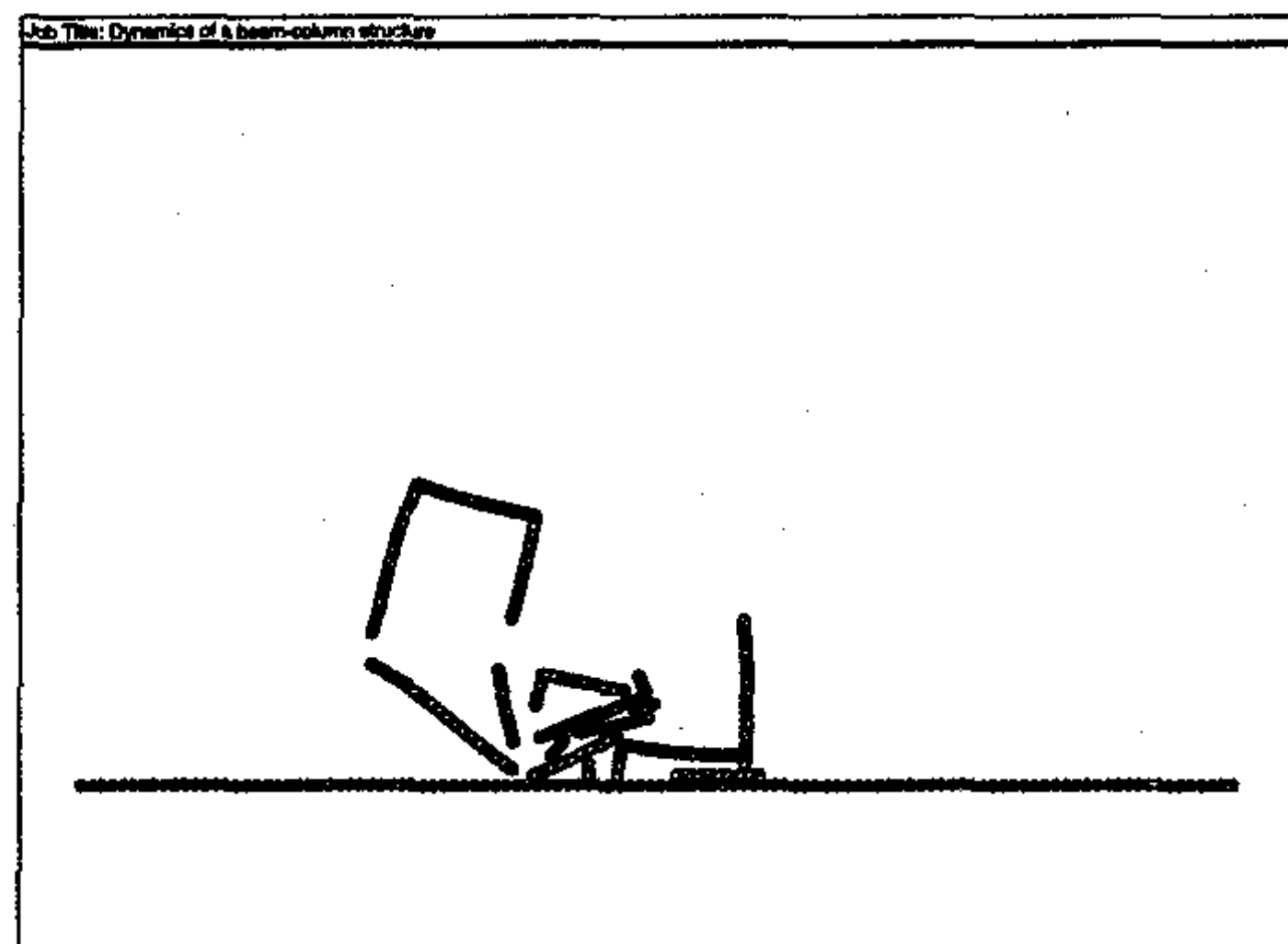
(Time = 2.0 sec)



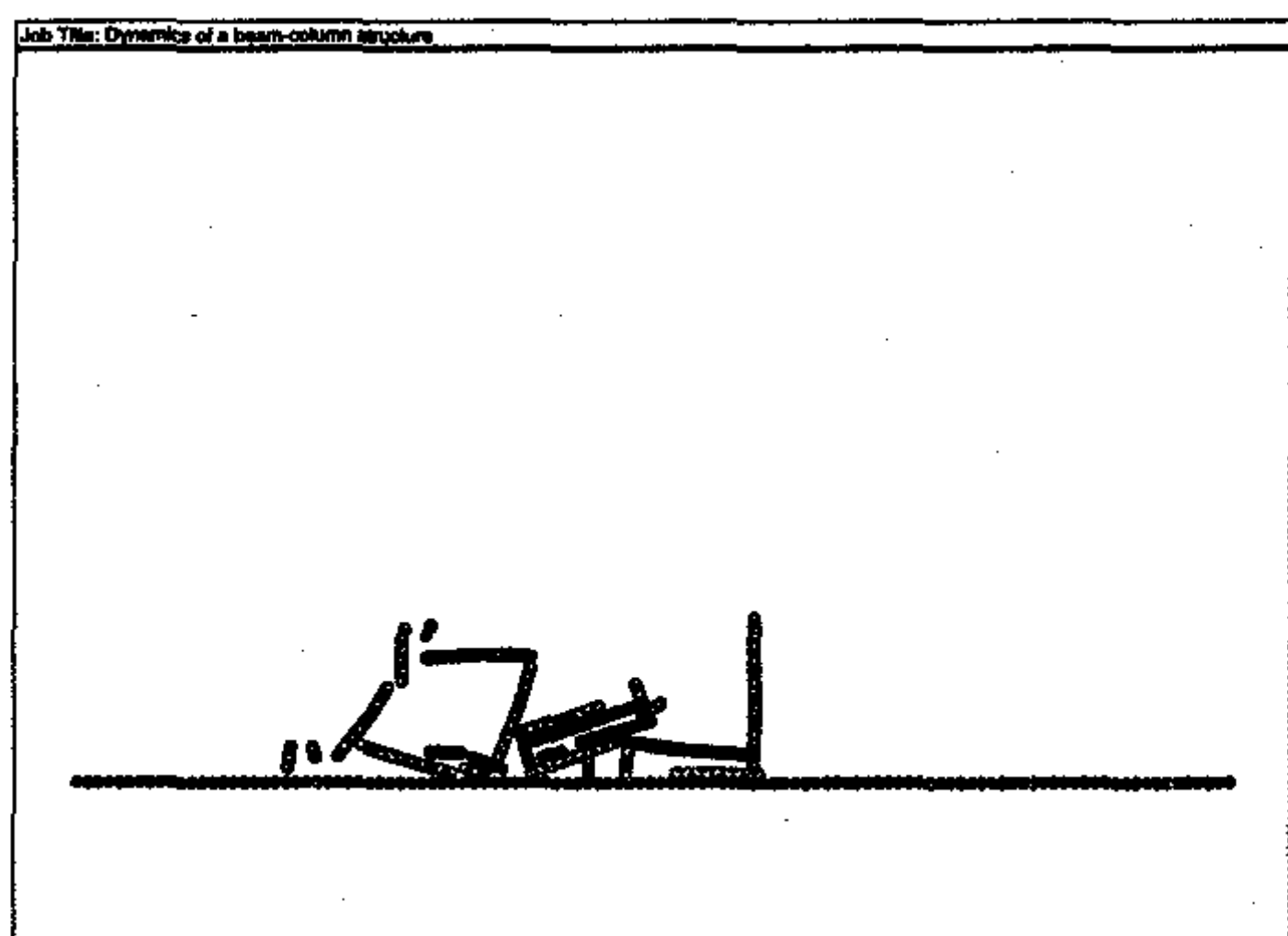
(Time = 3.0 sec)



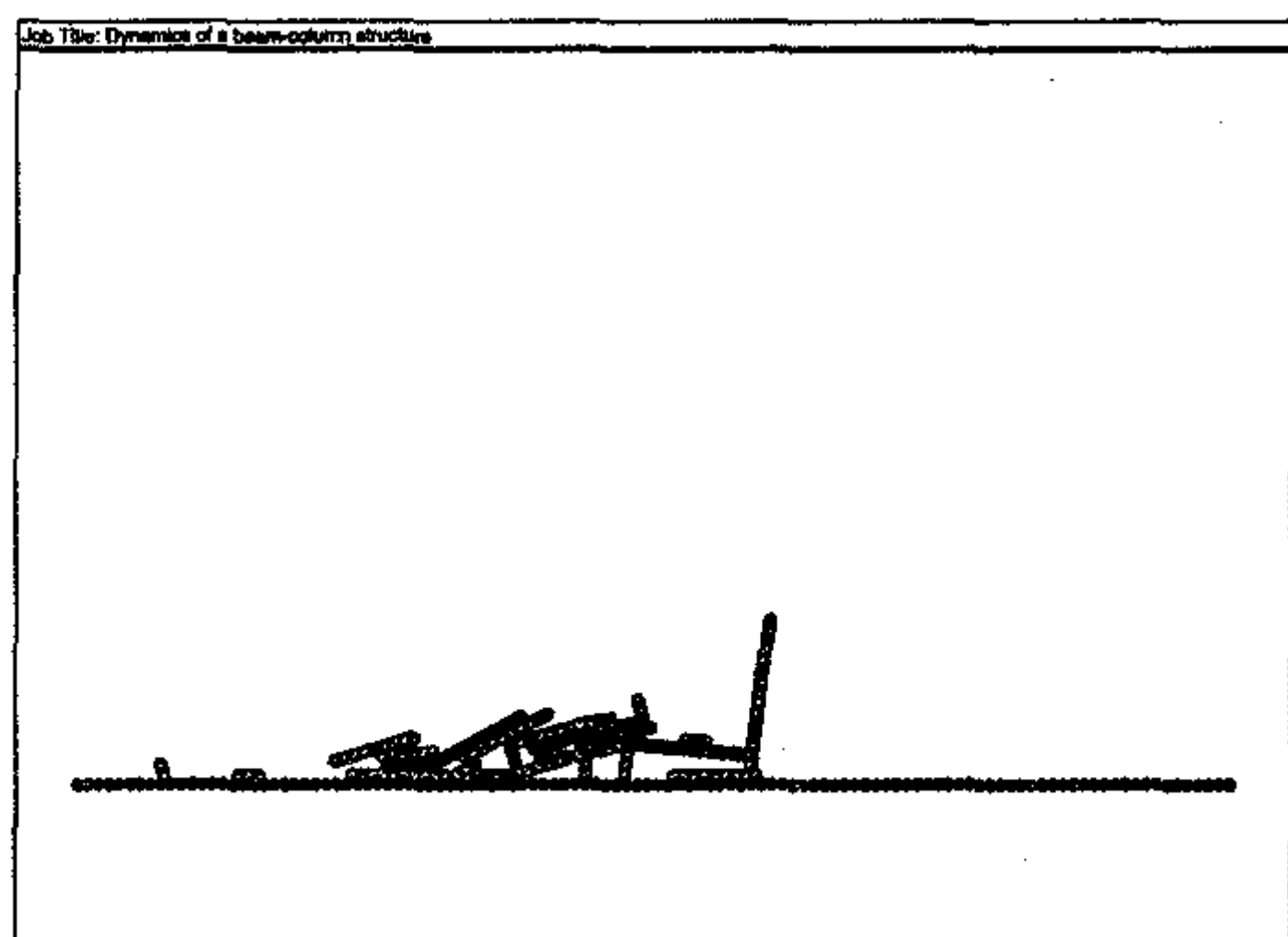
(Time = 4.0 sec)



(Time = 5.0 sec)



(Time = 6.0 sec)



(Time = 10.0 sec)

Fig. 3.4.2.8 지발발파시간 = 2.0초의 기둥 2개소 지발 발파 붕괴 양상

3. UDEC을 이용한 붕괴거동 시뮬레이션

가. 사용 프로그램

해석에 사용된 프로그램은 미국 Itasca Consulting Group에 의해 개발된 UDEC (Universal Distinct Element Code, ver 3.1)이다. 이 프로그램은 개별요소법(distinct element method)을 바탕으로 코딩된 것으로서 최근 세계적으로 지반공학 분야에서 널리 적용되고 있다. 개별요소법은 암반을 절리나 단층 등과 같은 불연속면으로 나누어지는 블록들의 집합체라고 가정하고, 각 블록들의 접촉면에서 발생하는 힘과 변위와의 관계를 운동방정식에 의거 해석함으로써 블록들의 거동을 예측하는 수치해석적 기법이다. 여기서 블록들은 변형을 하지 않는 강성블록과 변형이 가능한 블록으로 대별되는데, 변형가능블록의 내부는 유한차분법을 이용하여 연속체 요소로 분할되어 응력 및 변형률이 계산된다.

개별요소법에 의거한 UDEC은 explicit formula로써 블록의 이동에 의해 경계면 상에서 발생하는 접촉력 및 변위를 계산한다. 블록의 이동은 블록 시스템을 가로질러 경계면에 전달되는데 이는 동적으로 블록 시스템의 물리학적 특성으로 속도가 전파됨을 의미한다. 수치해석적인 관점에서 이러한 동적인 거동은 시간이라는 매개변수를 도입하여 표시한다. 이때 시간의 크기는 매 계산단계에서 각 블록의 이웃 블록에 대한 침투가 즉각 전달되지 않을 정도로 충분히 작아야 한다. 이러한 과정은 연속체에서 유한차분법의 explicit법에서 사용하는 방법과 유사하다. 이 개별요소법에 의한 블록 시스템의 변위 계산은 동적인 계산식에 기초를 두고 있기 때문에 정적인 문제에 이 방법의 적용은 시스템이 안정된 상태로 수렴하게 하기 위하여 damping상수를 도입하여 동적이완(dynamic relaxation)을 시킨다. 요소간의 상호작용은 절점과 요소면의 접촉조건에 따라 지배하는 구성방정식에 의해 결정된다. 구성방정식은 응력과 변형율의 개념보다는 힘과 변위의 개념을 사용하여 요소간의 상호작용을 나타내는 관계로 구성되며 각 요소에 대해 계산된 합력과 모멘트로부터 Newton의 제2법칙 및 수치적 적분을 통하여 요소들의 반응이 계산된다. 이 때 각 요소의 정적 및 동적 응력조건에 대한 반응은 시스템을 지배하는 미분방정식의 해를 수치적으로 구함으로써 얻어진다.

나. 모델링 방법

모델링에서는 건물의 기둥과 보를 절리에 해당하는 경계면에 의해 생성되는 요소들로 구성하며, 그리고 개개의 요소들을 강성요소로서 가정하고 해석을 실시하였다. 모델링은 동적인 과정을 통하여 해석을 수행하기 때문에 건물의 기둥발파를 시작하

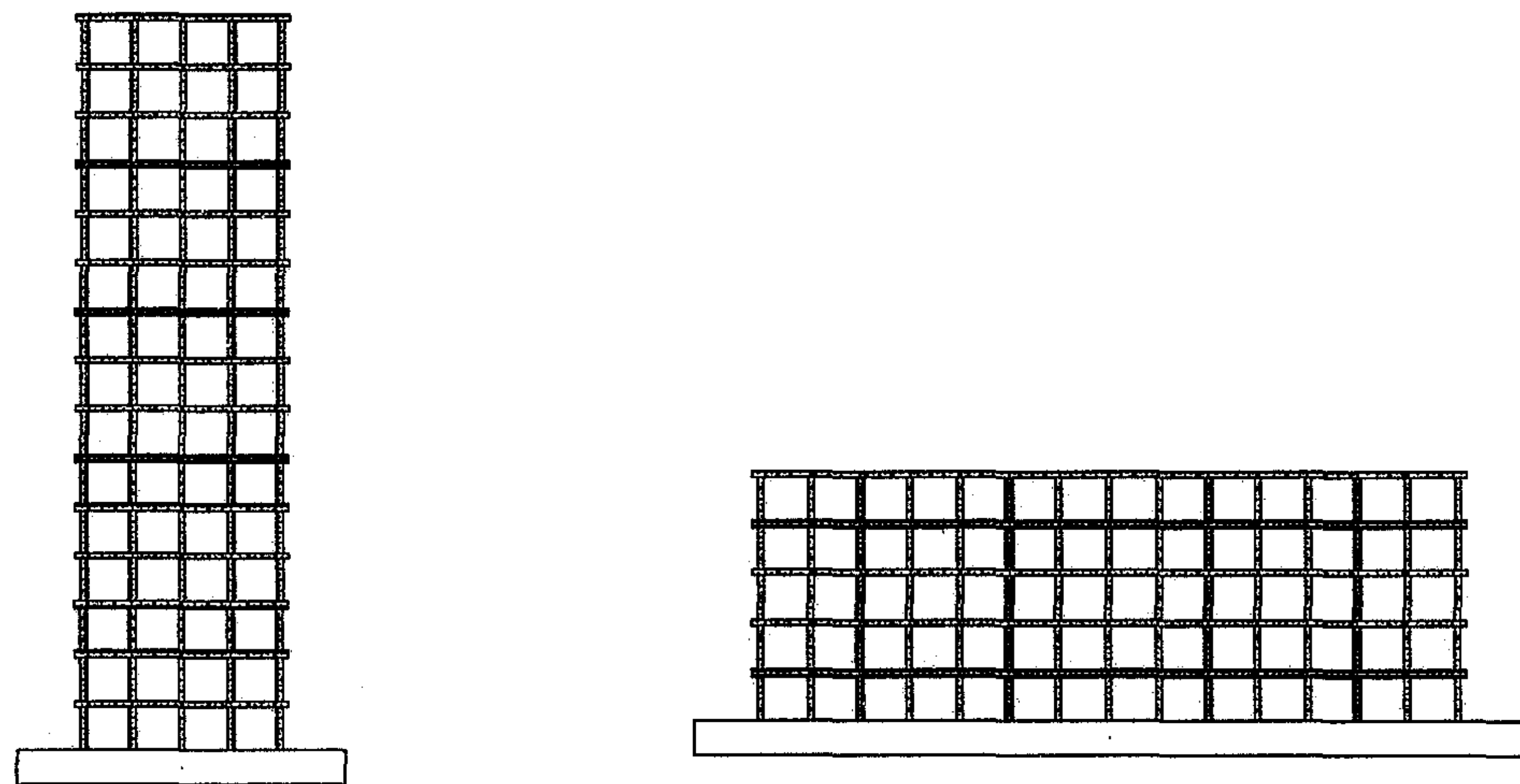
기 전에 충분한 계산단계를 수행함으로써 평형에 도달 시킨다. 이것의 의미는 $t=0$ 에서 해석 대상물체는 무중력 상태에 있는 것과 같은 상태이므로 중력을 가하면 모든 물체가 바닥으로 내려앉기 시작하기 때문이다. 이 변화는 매우 갑작스러운 것으로 곳곳에 충격파가 발생하여 물체는 상하로 진동하면서 차차 평형상태에 도달하게 된다. 평형상태의 도달에 대한 판단은 물체내부의 임의의 점에 대해서 여러 방향에서 작용하는 힘들이 서로 평형을 이루지 못하고 남아있는 힘인 불평형력 (unbalanced force)의 크기 및 물체내부에서의 최대속도 등을 관찰하여 이들 값들이 일정한 수준으로 수렴하는 것을 평가함으로써 판단할 수 있다.

시험모델이 평형상태에 도달한 후에 각 모델에 따라서 단계적으로 기둥을 제거하고 중력을 가함으로써 건물의 파괴양상을 관찰하였다.

해석의 결과는 여러 변수에 따라 여러 형태로 표현이 가능하지만 여기서는 해석 대상건물의 붕괴 양상을 보기 위하여 각각의 블록들의 모습과 블록이 움직임을 판단하기 위하여 블록의 중심점에서의 속도 벡터를 동시에 표시하였다.

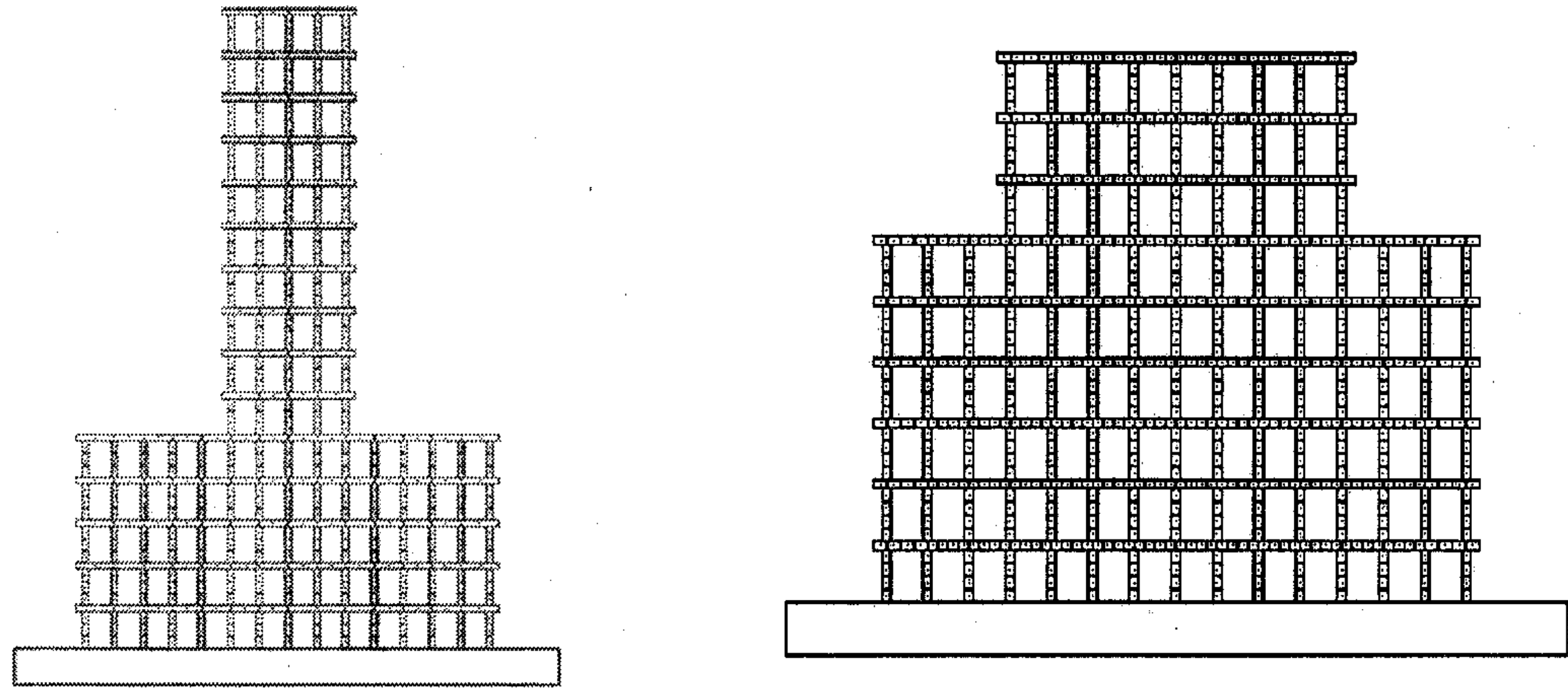
다. 해석을 위한 입력자료

해석에 사용하기 위한 시뮬레이션 모델들은 사용 프로그램 UDEC에서 제공되는 프로그램 언어인 FISH를 이용하여 작성한 프로그램으로서 모델의 요소들을 생성시켰다. 이 프로그램을 이용하여 모델건물의 모양, 건물의 층수, 기둥의 수 그리고 기둥과 보의 요소분할 등을 쉽게 생성될 수 있도록 하였다. 이와 같은 모델건물의 예들이 Fig. 3.4.3.1에 표시되어 있으며, 부록 1에는 모델을 생성하기 위해 작성된 프로그램의 일부를 표시하였다.

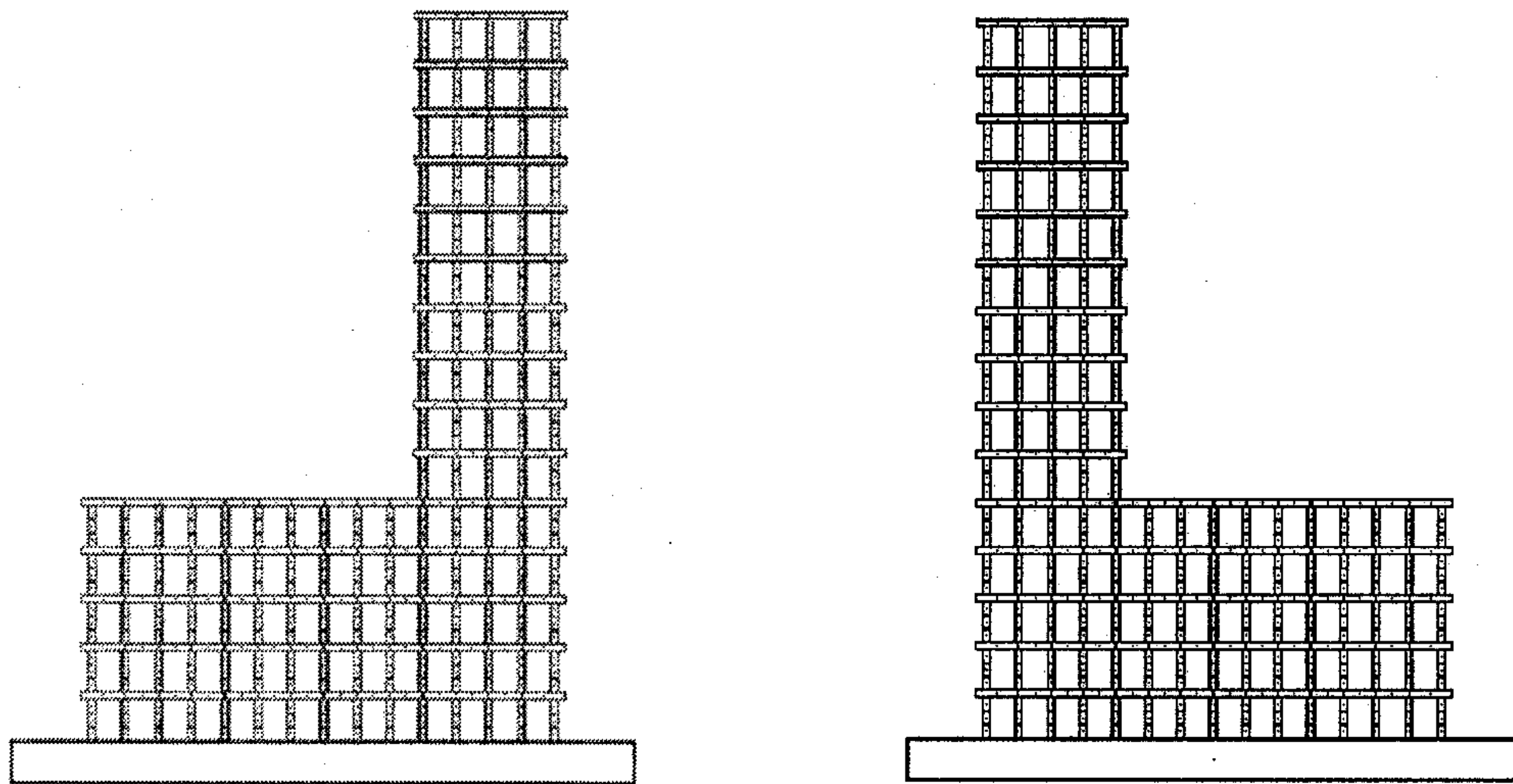


a) 수직형태의 고층의 건물과 수평형태의 저층 건물

Fig. 3.4.3.1 FISH언어로 작성한 Program을 이용하여 구성한 모델의 예



b) 탑형태의 고층부분이 건물 중앙에 있는 경우



c) 탑형태의 고층부분이 건물 양 측면에 있는 경우

Fig. 3.4.3.1 계속

해석에 사용한 여러 구조물형태에서는 보와 기둥 그리고 기둥과 기둥사이의 간격 등을 쉽게 변동할 수 있지만 본 시뮬레이션 작업들에서는 보와 기둥의 크기를 일정하게 고정하였고 건물의 형태만 변화를 시켰다. 기둥의 크기는 폭을 0.4 m 높이를 2.4 m로 하였고 기둥과 기둥사이의 간격은 1.5 m로 하였다. 보의 두께도 0.4 m 그리고 보는 기둥의 중앙과 기둥중앙에 얹혀지는 형태로 중앙에 위치하는 보의 너비는 1.9 m가 되고, 건물의 양측면에 위치하는 보의 길이는 2.5 m로 하였다. 그리고 각각의 보와 기둥은 발파에 의한 블록의 제거를 용이하게 하기 위해서 4개의 블록으로 분할하였다.

각 블록의 밀도는 $2,000 \text{ kg/m}^3$ 으로 하였으며, 각 기둥과 보 내부의 경계면인 절리의 특성은 여러 경우에 대해 해석을 실시하였지만, 여기에서 표시된 모델들의 절리의 수직강성률(jkn) 및 전단 강성률(jks)은 각각 200 GPa/m , 마찰각은 30° 로 하였다. 그리고 보와 기둥사이의 접촉 점착력(ccoh) 100MN 과 접촉인장력(cten)은 10MN 으로 주어 해석을 실시하였다.

라. 해석의 예

Fig. 3.4.3.2~3.4.3.4는 해석에서 있어서 블록사이의 물성의 차에 따라 건물의 붕괴 양상이 어떻게 달라지는가를 살피기 위한 예로서 탑 형태의 15층 건물모델에서 건물부재내 블록의 절리의 강성 변화에 따른 파괴 양상들을 나타낸 것이다.

Fig. 3.4.3.2의 경우는 건물부재내 절리의 강성이 매우 낮은 경우 보내의 절리면을 따라 블록들이 쉽게 파괴되어 건물의 형태가 유지되지 못하는 양상을 나타내고 있다.

Fig. 3.4.3.3의 경우는 건물부재의 블록사이의 강성을 크게 했을 경우에 블록들사이에서 파괴가 일어나지 않고 건물전체가 휘면서 전도되는 모습을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 3.4.3.4의 경우는 경계면의 물성이 합리적인 범위에 접근 했을 때 일반적인 건물파괴양상과 비슷한 형태를 나타내고 있다.

이와 같이 여러 경우의 물성에 대한 해석을 통하여 경계면의 물성을 결정하고 그 값을 근거로 다른 모델에 대한 해석을 실시하였다.

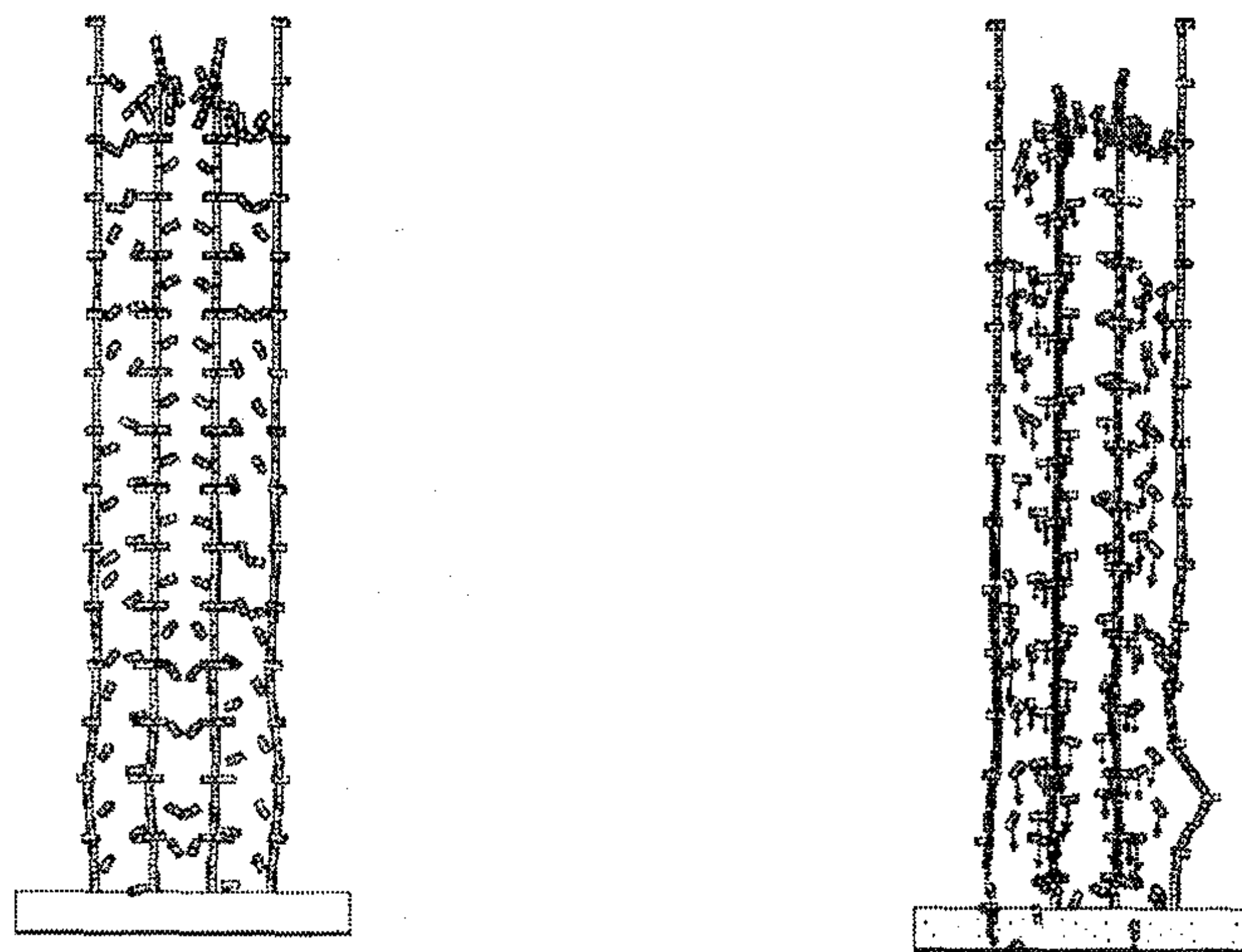


Fig. 3.4.3.2 건물부재 내 절리의 강성이 작은 경우의 파괴양상

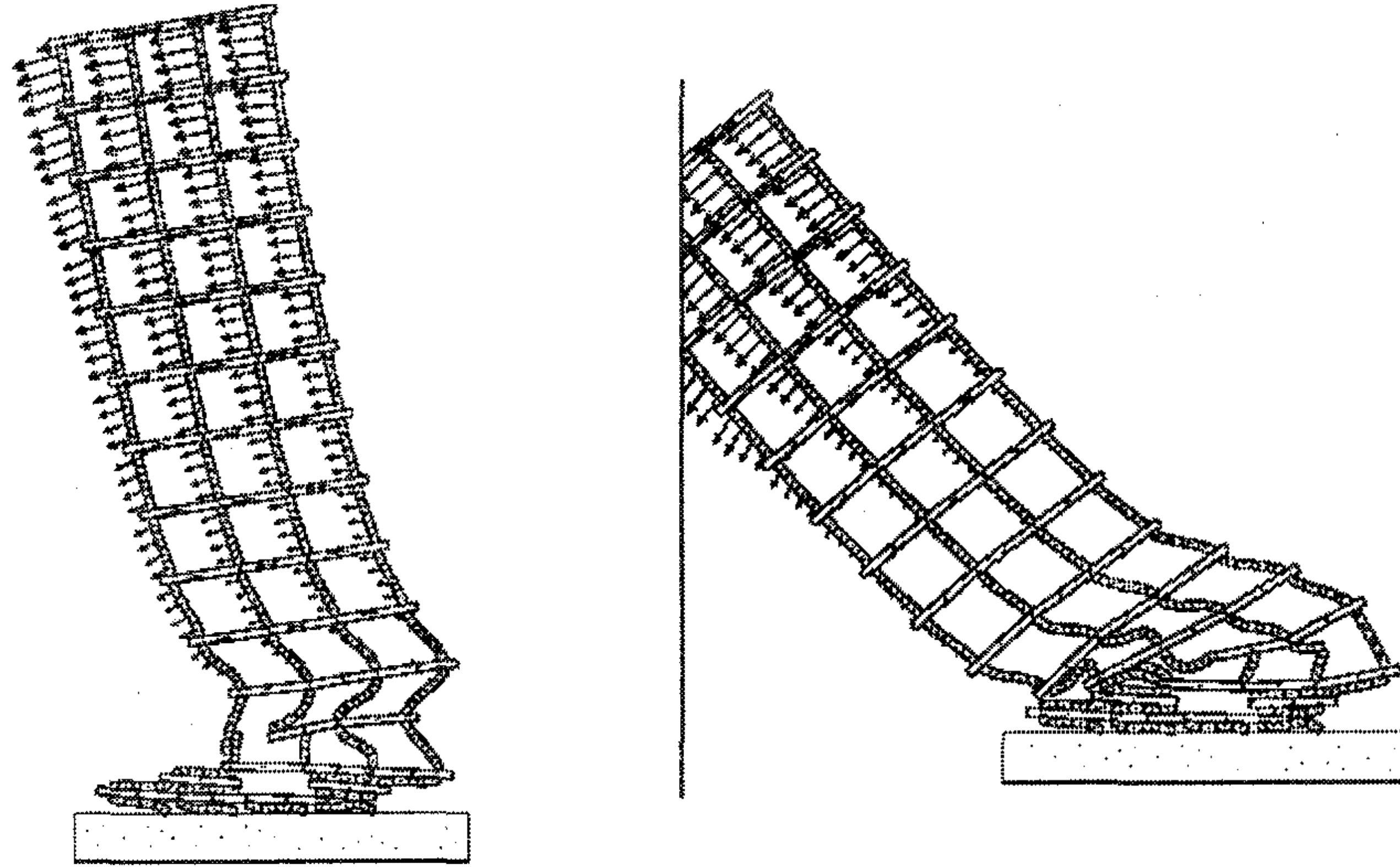


Fig. 3.4.3.3 건물부재 내 절리의 강성이 매우 큰 경우의 파괴양상

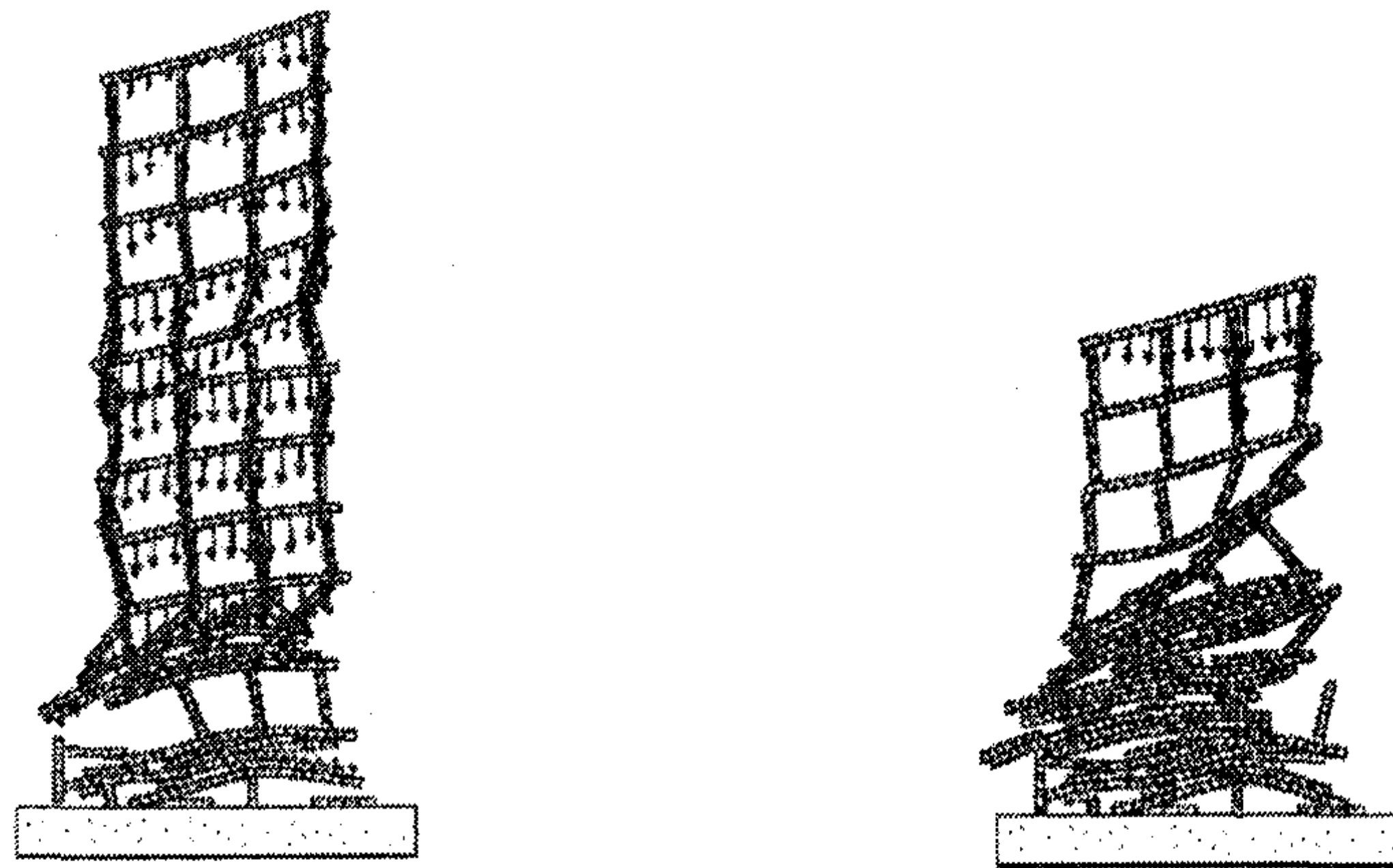


Fig. 3.4.3.4 건물부재 내 절리의 강성이 적당한 경우의 파괴양상

건물의 형태에 따른 발파와 건물붕괴 순서에 대해 몇가지의 경우를 살펴보면 다음과 같다.

Fig. 3.4.3.5는 횡적으로 긴 5층의 저층 건물을 발파할 경우의 해석 예로서, 건물의 부에 건물이 전도될 수 있는 충분한 공간이 있을 경우에는 Fig. 3.4.3.5a)와 같이 양 측면으로 붕괴시키는 것과 건물외부에 건물이 전도될 수 있는 충분한 공간이 없을 경우에는 Fig. 3.4.3.5b)와 같이 건물안쪽으로 붕괴시키는 것을 시뮬레이션 한 것이다. 실제 건물해체를 위한 시공에 있어서와 마찬가지로 건물중앙의 보들을 약화시키는 것을 실현하기 위해 두 경우 모두 건물중앙부의 보의 블록들의 경계면에 대한 물성을 보와 기둥사이에 주어진 경계면의 물성과 같이하여 사전에 건물을 약화시키

는 효과를 주었다.

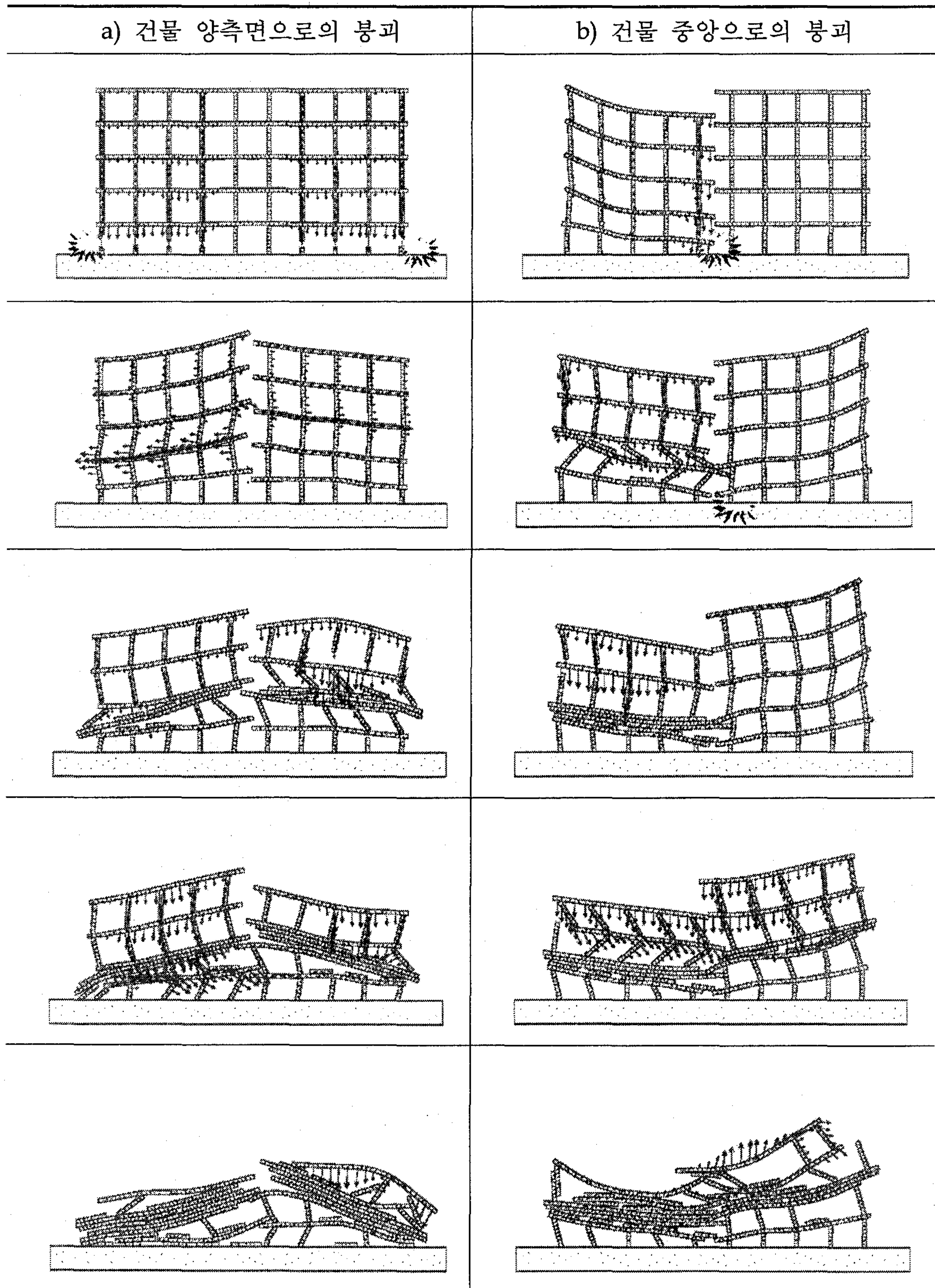


Fig. 3.4.3.5 5층 저층 건물의 붕괴양상

Fig. 3.4.3.5a)는 1층의 건물 좌우 양측면의 바깥쪽 1열에서부터 4열까지의 기둥을 동시에 발파하여 양측면으로 붕괴시키는 경우를 나타낸다. Fig. 3.4.3.5b)와 같이 건물을 중앙으로 전도시키기 위해 중앙부의 기둥을 동시에 발파할 경우 건물 양쪽에서 중앙으로 붕괴되는 보들에 의해 건물이 붕괴되지 않고 서로 버티주는 양상을 나타내기 때문에, 건물의 어느 한 쪽 부분의 중앙기둥을 먼저 발파하여 건물 한 쪽 부분을 먼저 안쪽으로 붕괴시키고, 시차를 두어 건물의 다른 쪽 부분의 중앙기둥을 발파함으로써 건물 다른 쪽 부분을 나중에 안쪽으로 붕괴시켜 전체적으로 건물이 중앙으로 붕괴시키는 것을 시뮬레이션 한 예가 Fig. 3.4.3.5b)이다. 이와 같은 시뮬레이션에서는 건물붕괴시 붕괴할 수 있는 공간을 고려하여 전도시킬 방향을 결정하고 그리고 어떠한 순서로 발파를 실시해야할 것인지를 살펴볼 수 있다.

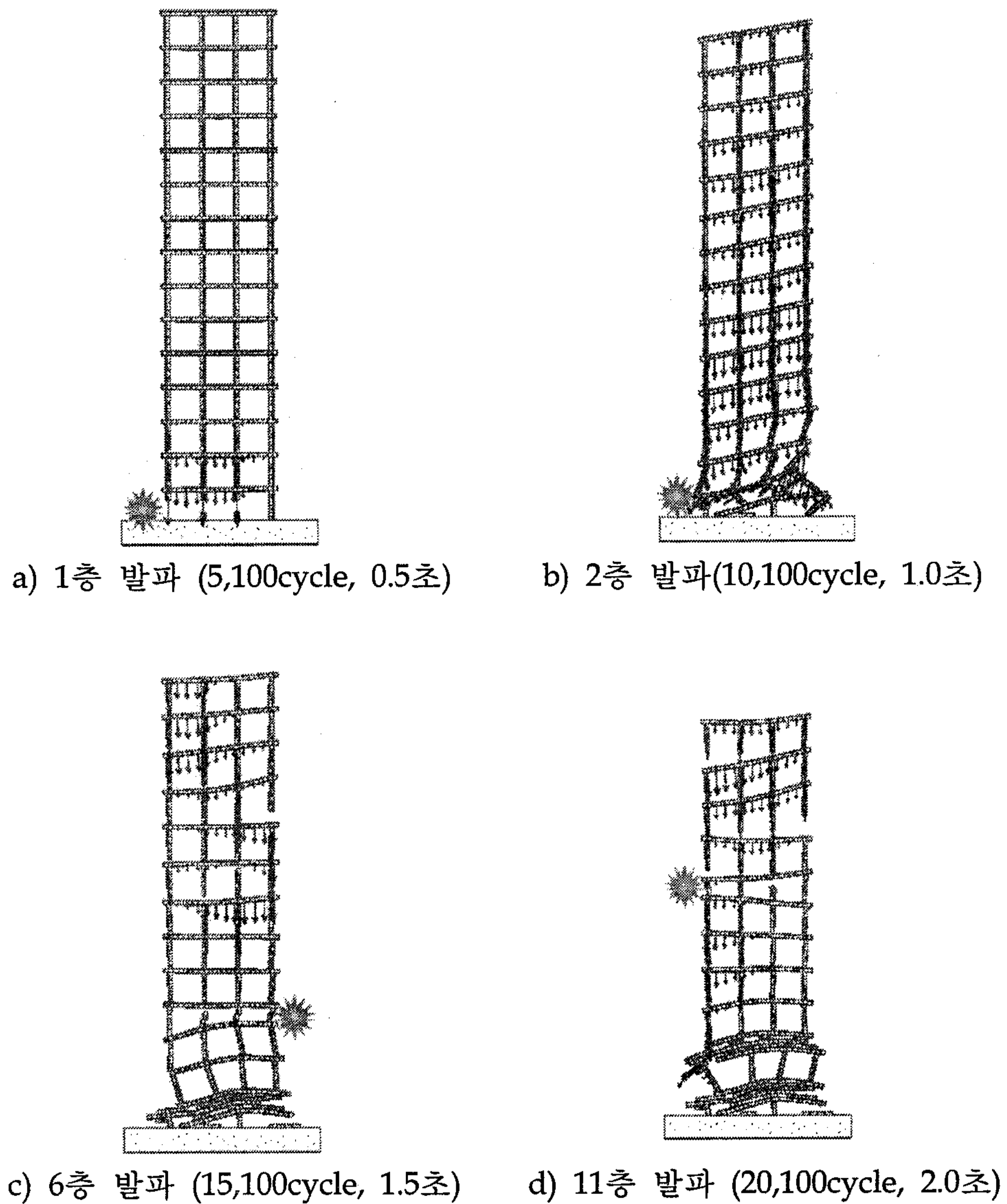
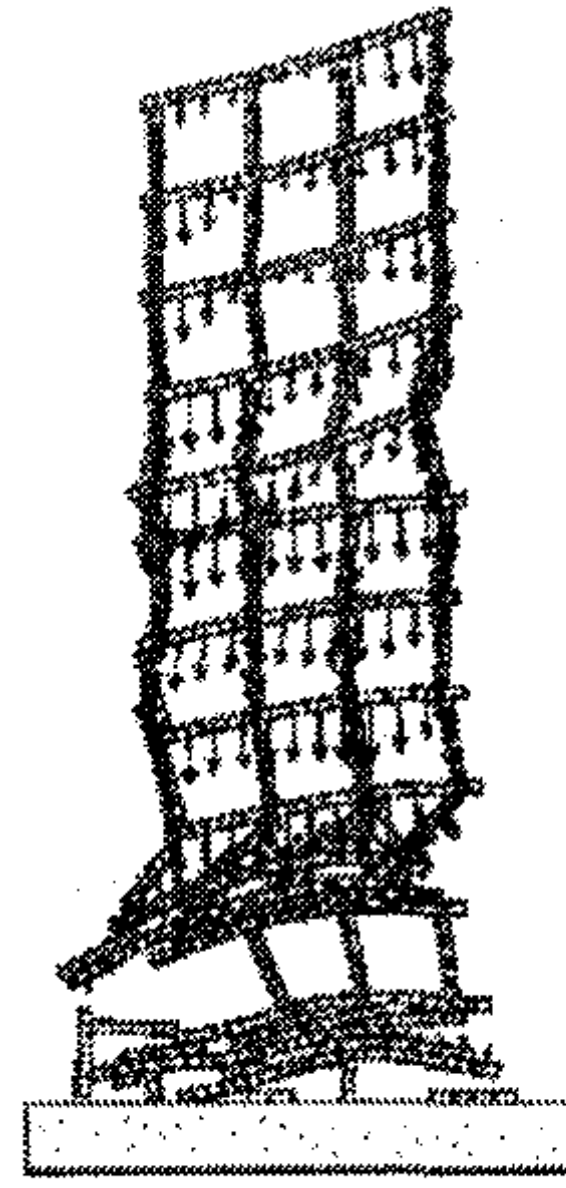
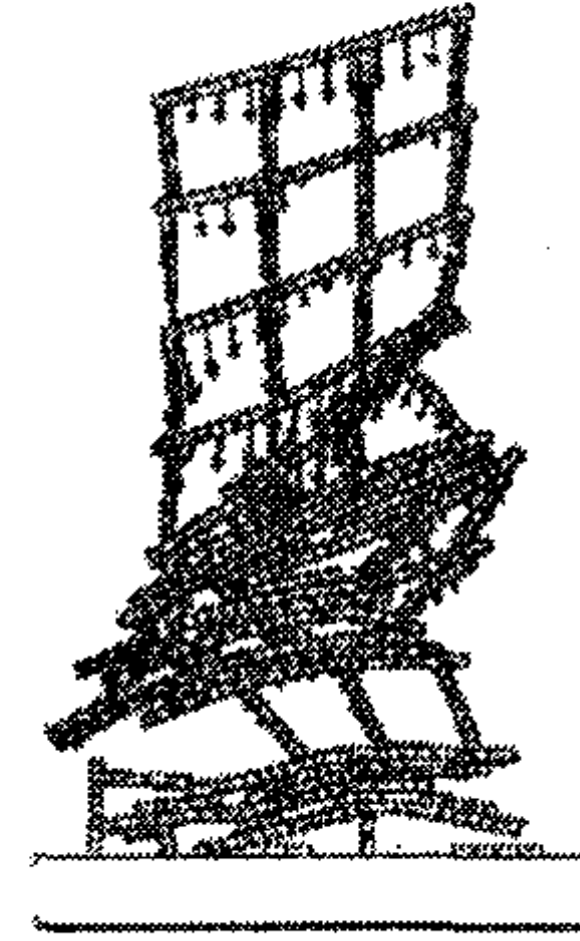


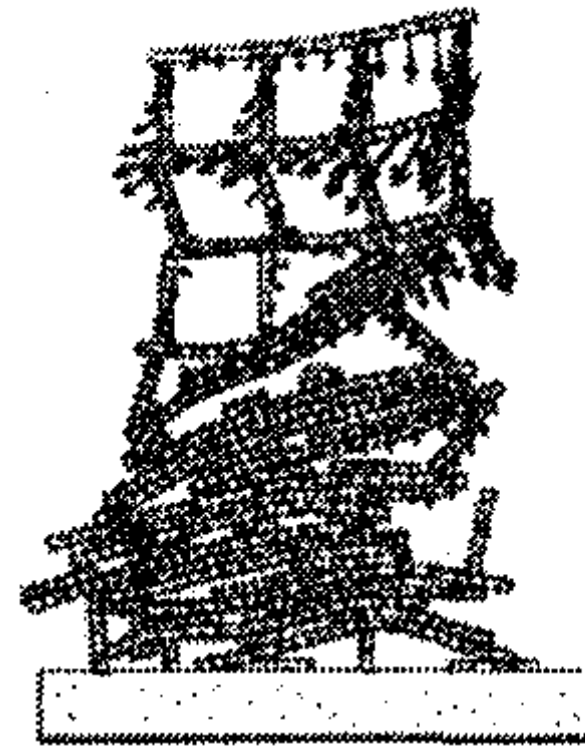
Fig. 3.4.3.6 15층 고층건물 붕괴양상



e) 25,100cycle, 2.5초



f) 30,100cycle, 3.1초



g) 45,100cycle, 4.6초



h) 60,100cycle, 6.1초

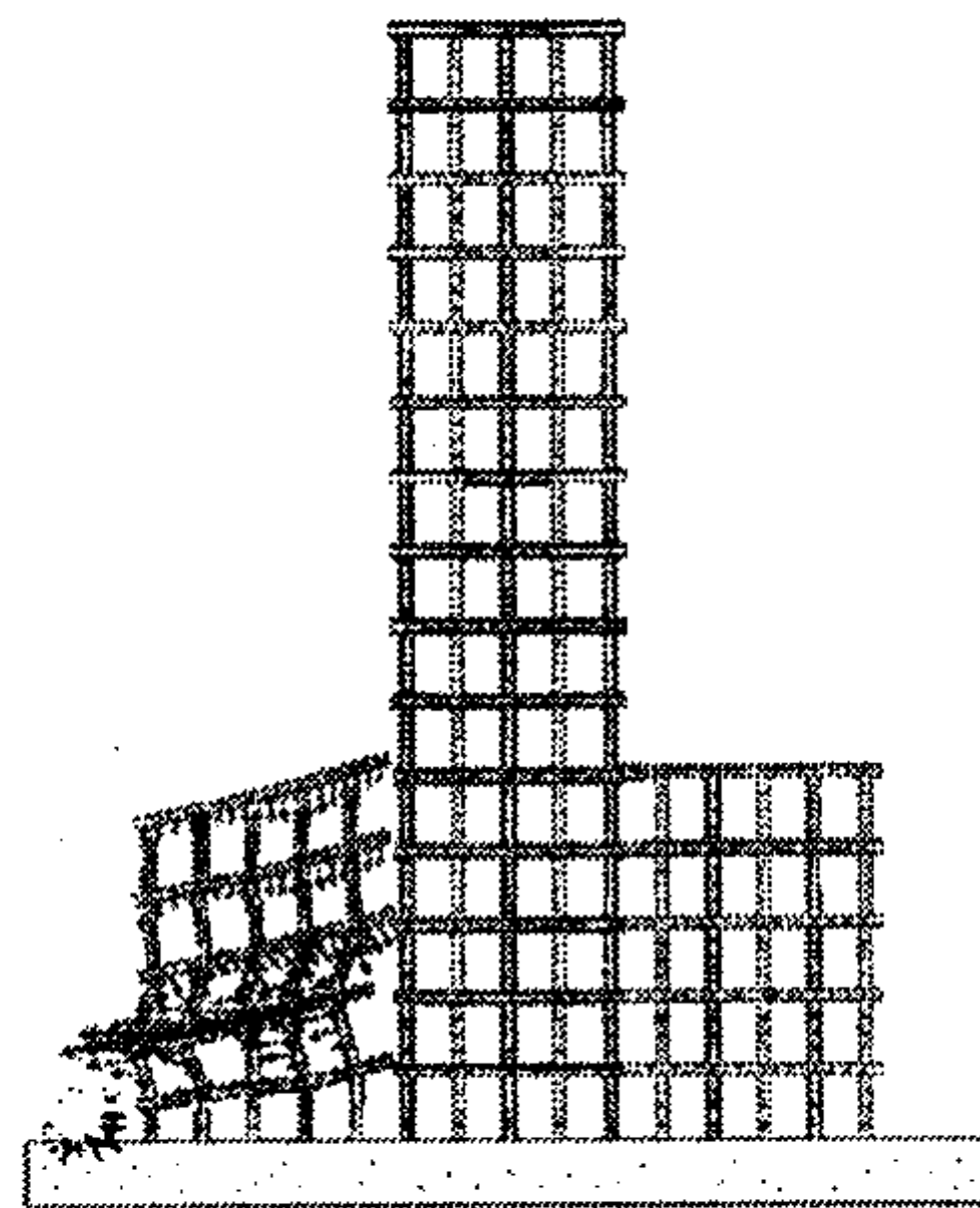
Fig. 3.4.3.6 계속 (15층 고층 건물 붕괴양상)

Fig. 3.4.3.6은 15층의 탑 형태의 고층 건축의 붕괴시 한쪽방향으로만 전도되는 경우에 넓은 전도 공간이 필요하게 됨으로 한쪽 방향으로 만의 전도를 방지하고 현위치에 주저앉히는 붕괴가 필요하기 때문에 층의 구간별로 시차를 두어 발파를 실시하게 된다. 따라서 건물 최하층의 좌측부 기둥을 먼저 발파하여 건물의 평형상태를 무너뜨리고(Fig. 3.4.3.6a), 0.5초의 시차를 두어 2층의 좌측부의 기둥을 발파하여(Fig. 3.4.3.6b)건물에 하중변화를 가속화시켜 좌측으로 붕괴시킨다. 그리고 다시 0.5초의 시차를 주어 건물 전체가 왼쪽으로 전도되는 것을 방지하기 위해 6층의 우측부의 기둥들을 발파하여(Fig. 3.4.3.6c) 좌측으로 전도되는 것을 방지시킨다. 마지막으로 건물의 상부가 다시 오른쪽으로 전도되는 것을 방지하기 위해 0.5초후 11층의

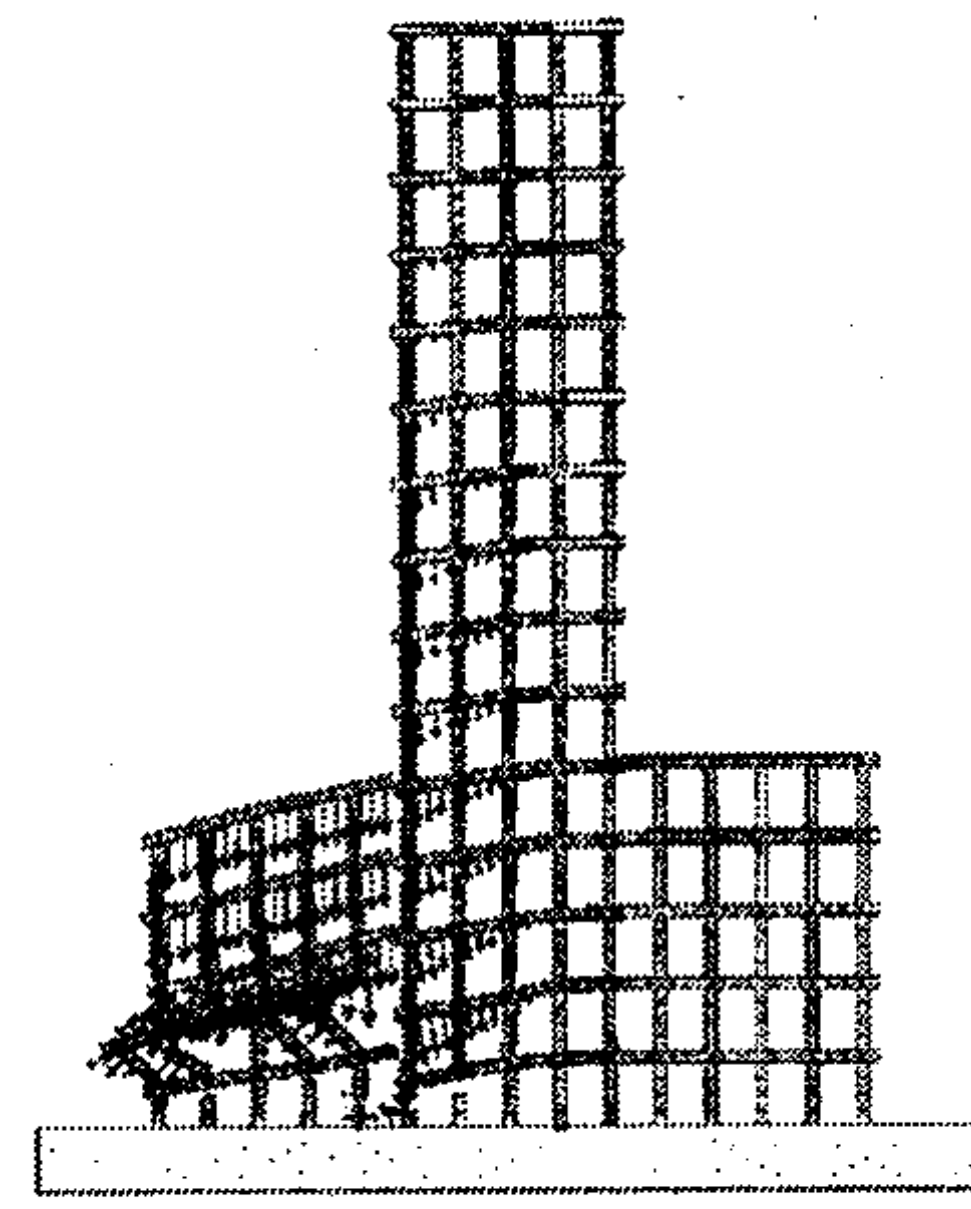
좌측 기둥부를 발파하여(Fig. 3.4.3.6d) 건물을 붕괴시키는 것을 시뮬레이션 한 것이다. 즉 기둥 발파를 실시한 층(1, 2, 6 및 11층)간의 발파의 시차는 각각 0.5초이다.

Fig. 3.4.3.7은 건물의 중앙부가 15층이고 양날개부가 각각 5층인 건물파괴를 시뮬레이션 한 예이다. 이 경우는 건물의 중앙탑이 붕괴될 수 있는 공간을 확보가 이 작업의 관건이다.

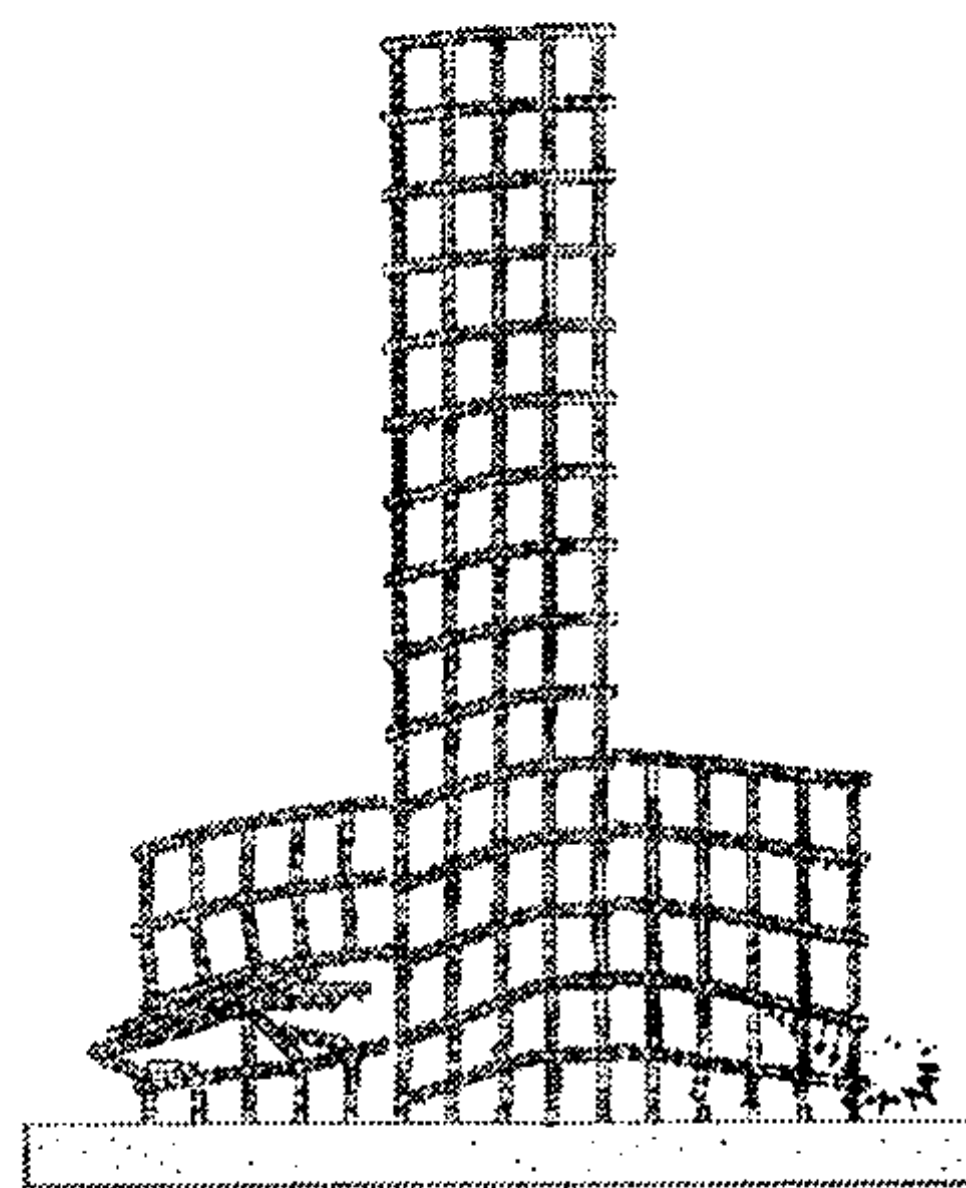
따라서 건물의 양쪽 날개부를 각각 양측면으로 전도시킴으로써 중앙의 공간을 확보하였다. 실제 건물해체를 위한 시공에 있어서와 마찬가지로 건물중앙과 각 양익부의 접촉부를 쉽게 분리시키기 위해 사전작업으로 건물의 일부를 약화시키는 것을 실현하기 위해 접촉부의 보에 해당하는 블록들의 경계면에 대한 물성을 보와 기둥 사이에 주어진 경계면의 물성과 같이하여 사전에 건물을 약화시키는 효과를 주었다.



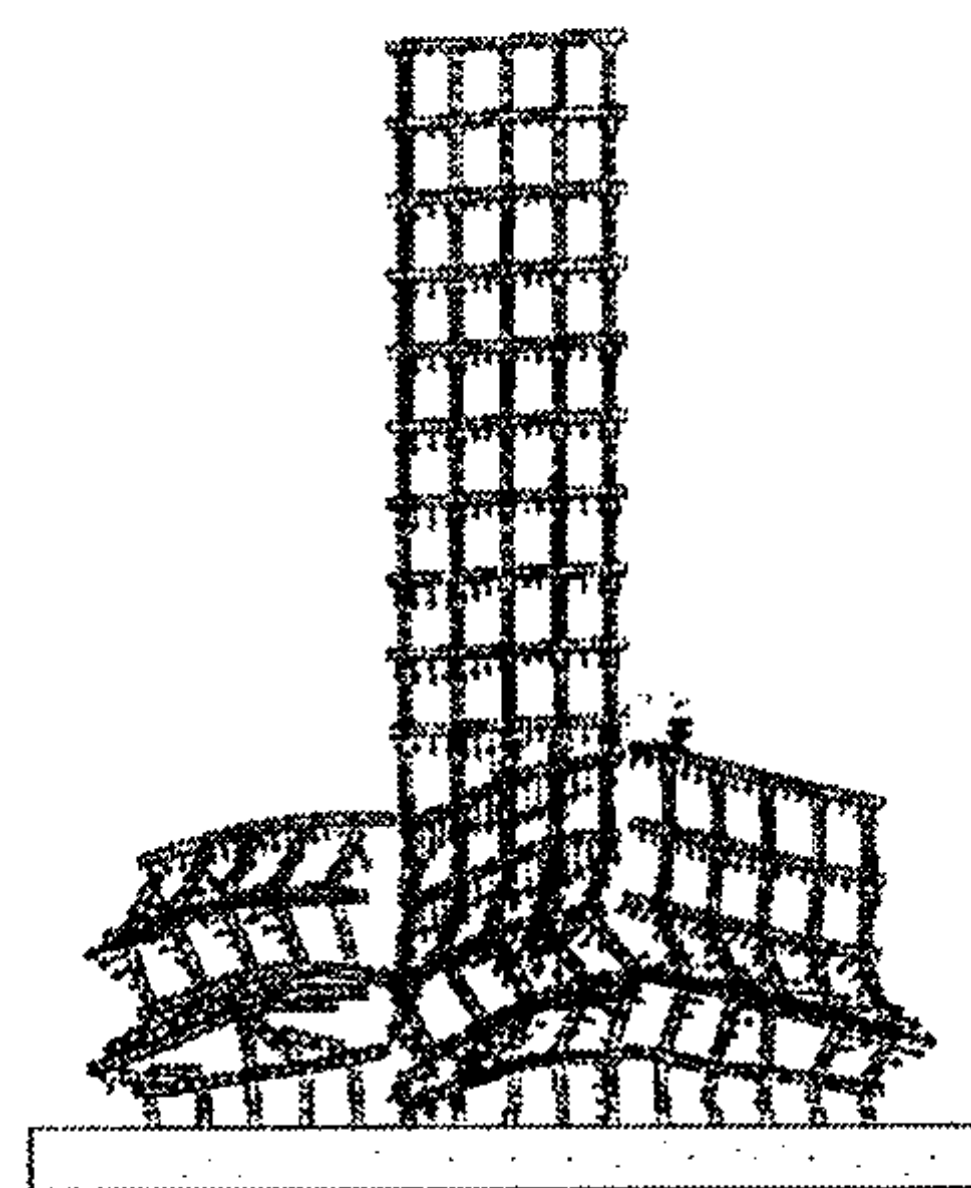
a) 3,500cycle, 2.4초
(우측날개부 발파)



b) 4,500cycle, 3.1초
(중앙건물 좌하단 발파)

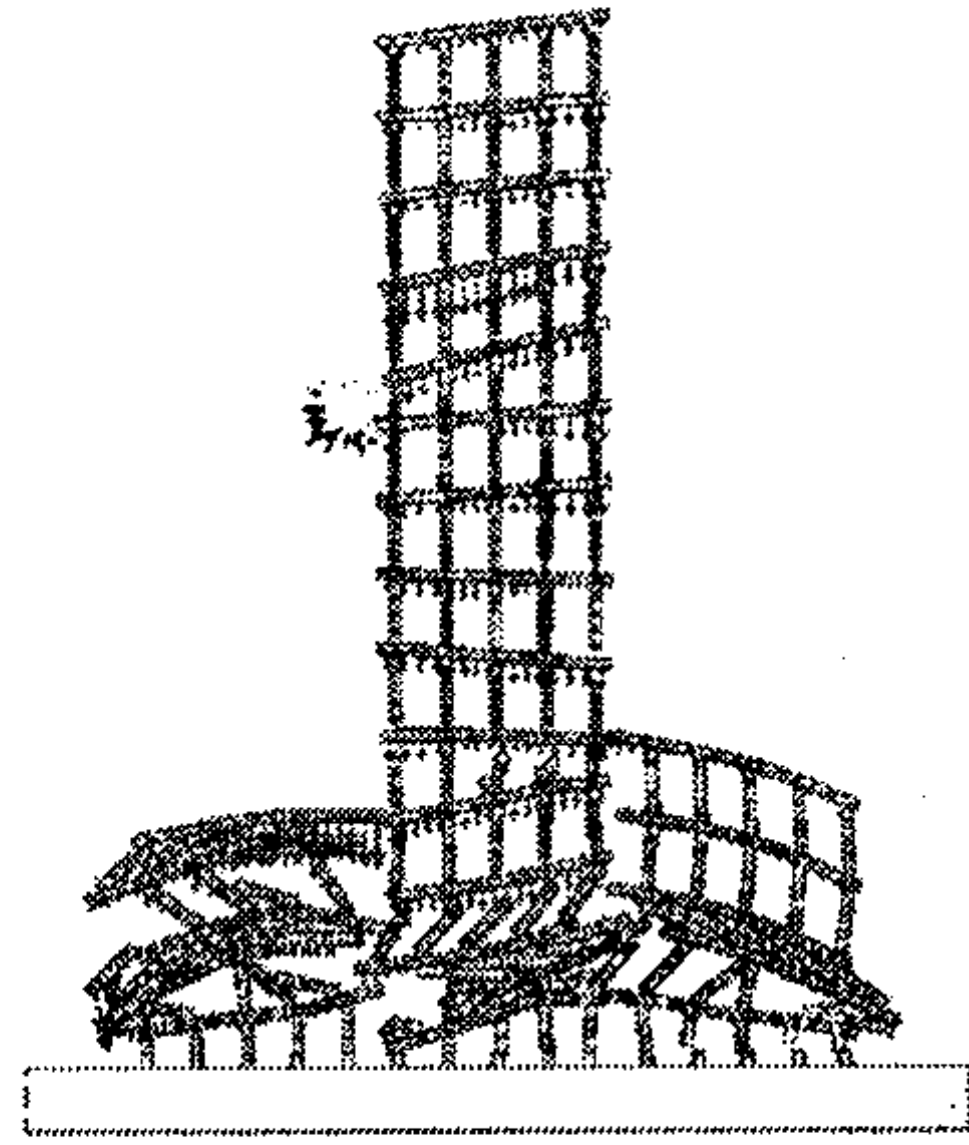


c) 6,000cycle, 4.1초
(좌측날개부 발파)

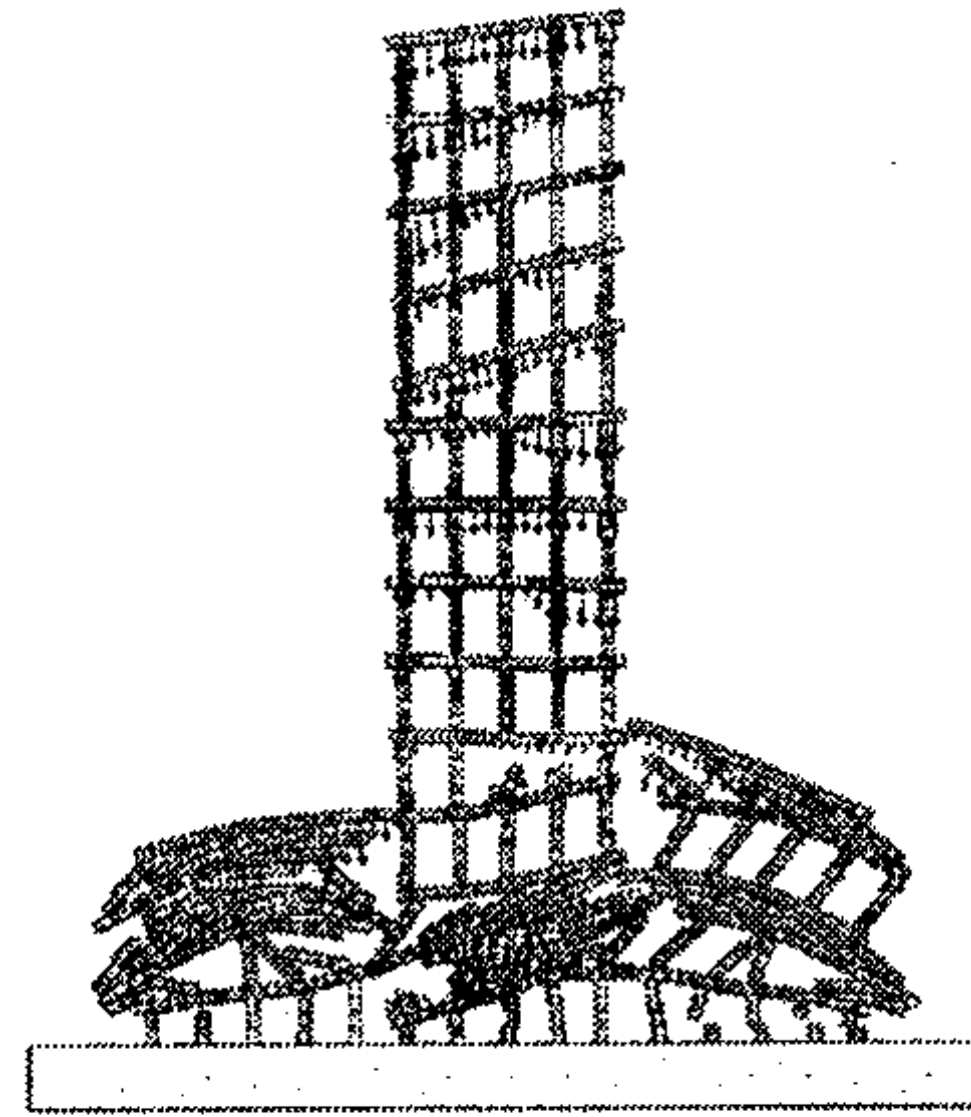


d) 9,000cycle, 6.1초
(중앙건물 6층 발파)

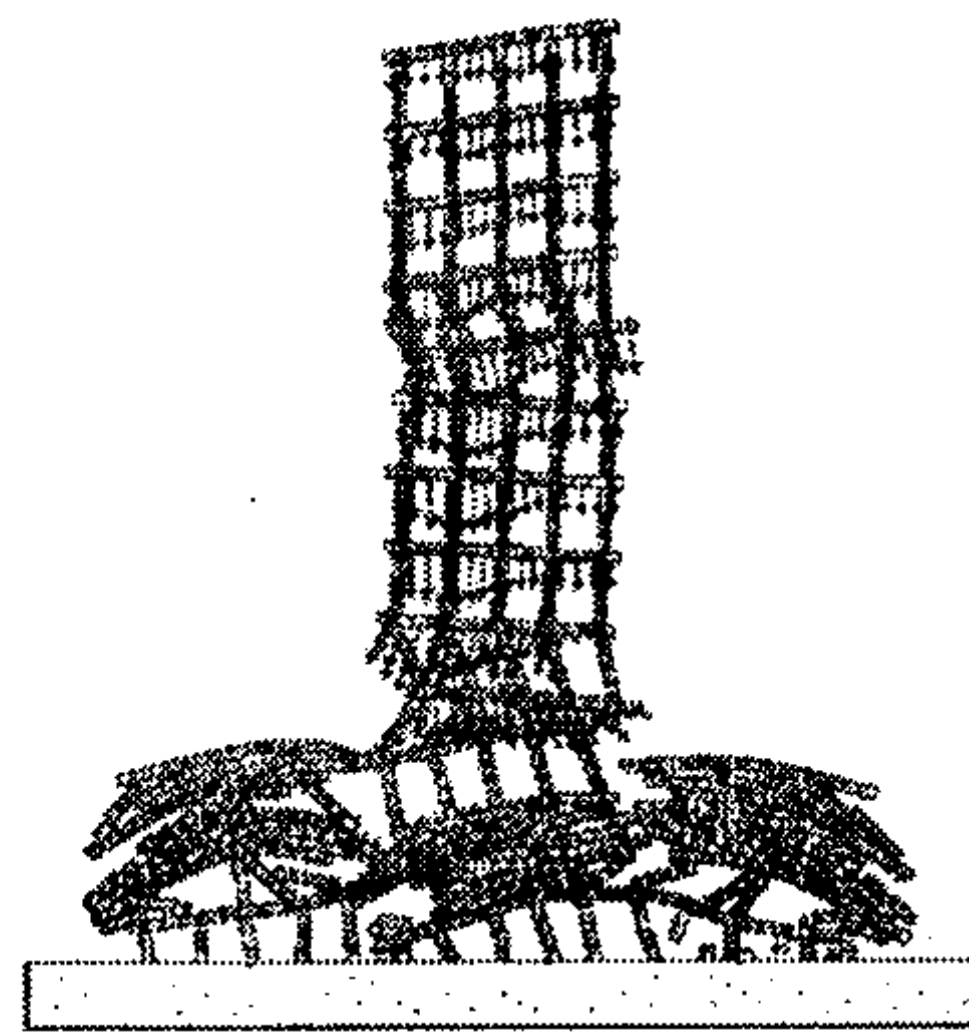
Fig. 3.4.3.7 15층 고층건물의(중앙 15층; 양익부 각 5층) 붕괴양상



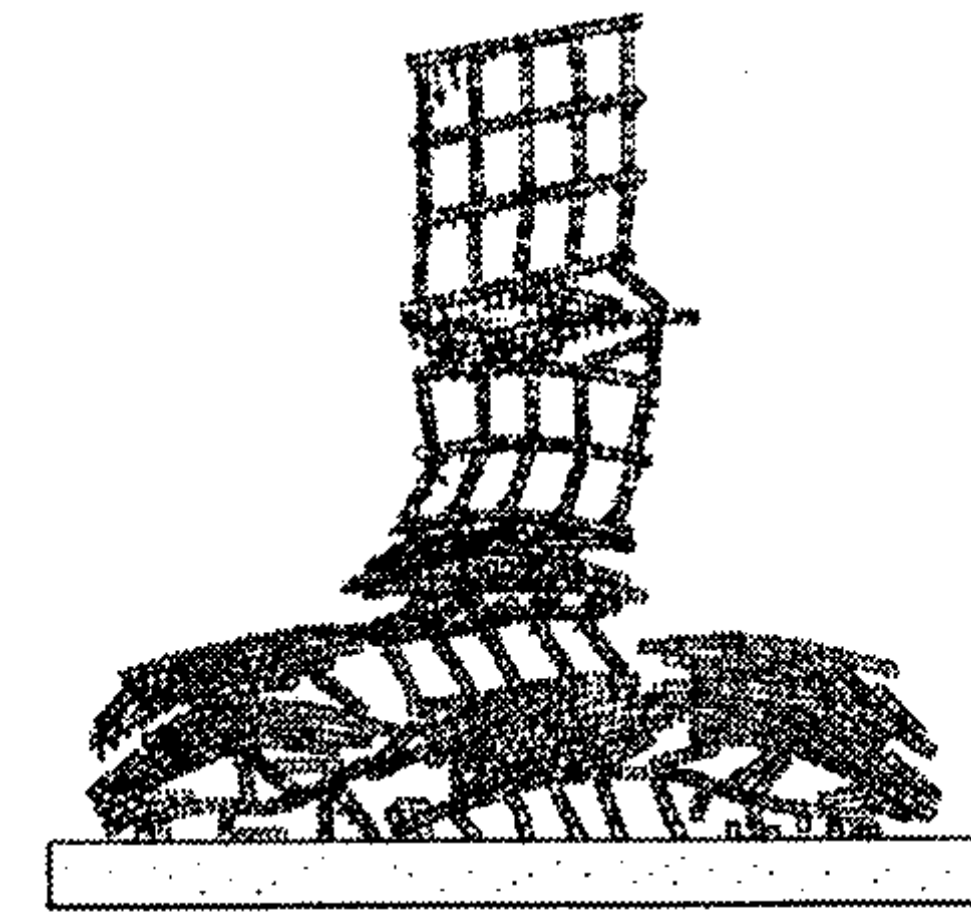
e) 12,000cycle, 8.2초
(중앙건물 11층 발파)



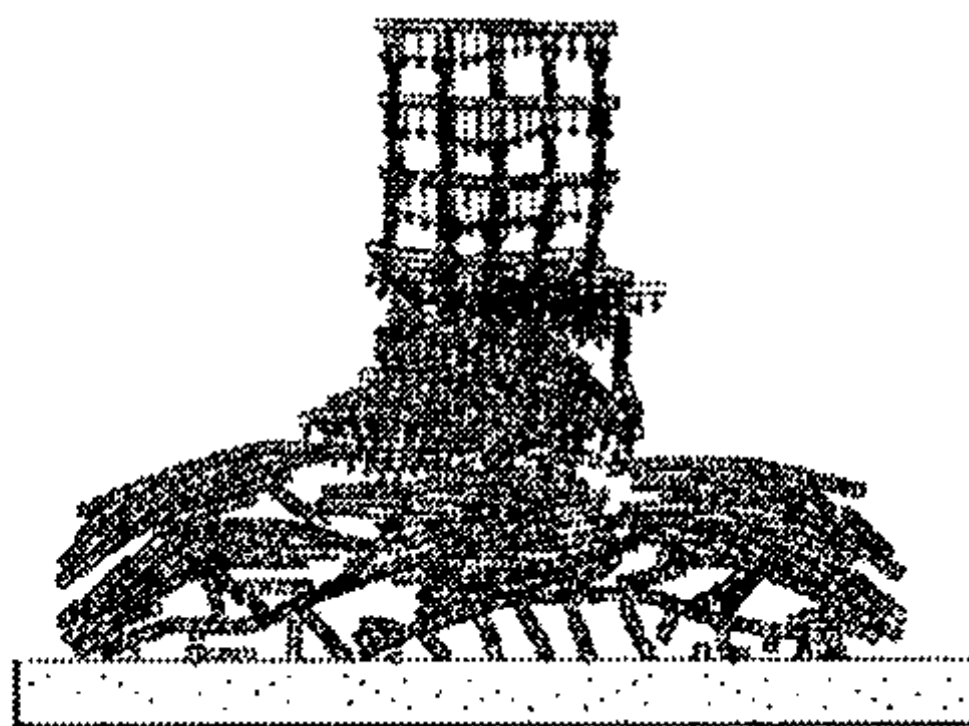
f) 15,000cycle, 10.2초



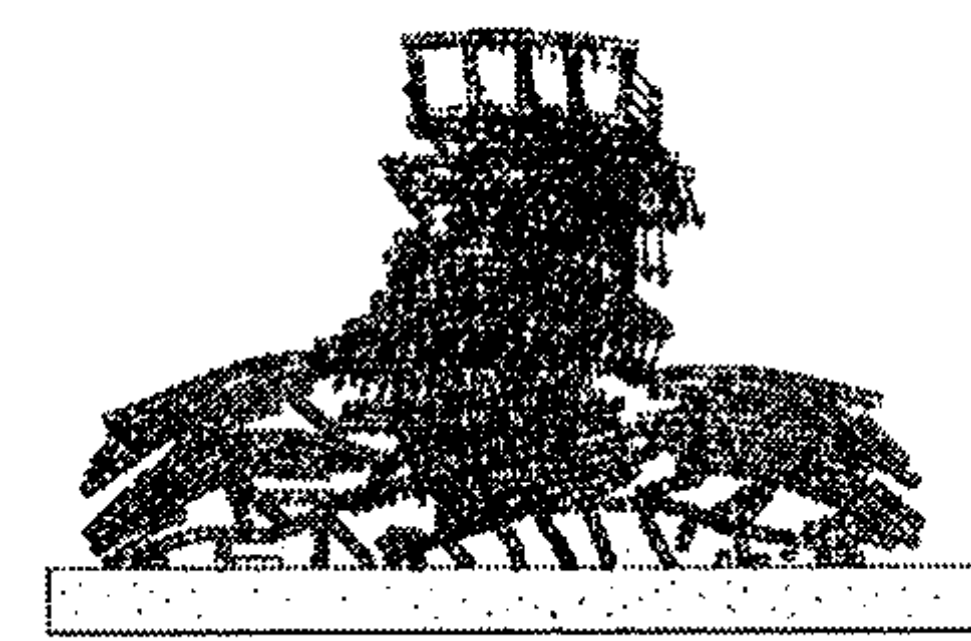
g) 23,000cycle, 15.7초
(좌측날개부 발파)



h) 33,000cycle, 22.5초



i) 43,000cycle, 29.3초



j) 53,000cycle, 36.2초

Fig. 3.4.3.7 계속

건물발파의 순서는 Fig. 3.4.3.7a)와 같이 먼저 좌측 날개부의 1층과 2층의 좌측기둥을 동시에 발파하여 좌측 날개부의 건물을 왼쪽으로 먼저 전도시킨 후에, Fig. 3.4.3.7b)와 같이 중앙부의 1층과 2층의 좌측 기둥을 발파하여 중앙건물을 좌익부쪽

으로 전도시킨다. 중앙건물 상부의 붕괴공간을 확보하기 위해서 Fig. 3.4.3.7c)와 같이 우측 날개부 건물의 1층과 2층의 우측기둥들을 발파하여 우측 날개부를 오른쪽으로 전도시킨다. 그 후 시차를 두어 중앙 고층건물이 한쪽 방향으로 전도되는 것을 방지하기 위해 Fig. 3.4.3.6과 마찬가지로 차례로 6층(Fig. 3.4.3.7.d), 11층(Fig. 3.4.3.7e)의 기둥을 발파하여 건물을 중앙으로 붕괴를 시킨다. 전체적으로 양 날개부의 건물을 양쪽으로 전도시켜 중앙부의 건물이 붕괴될 수 있는 공간을 확보하여 중앙 고층 건물을 중앙에 붕괴시키는 형태이다. 이와 같이 건물의 형태와 붕괴공간 등에 따라 각 경우에 맞는 여러 조건들을 고려하여 해석해야 하기 때문에 붕괴작업 조건을 일반화하기는 매우 힘든 일이다.

다음은 발파시차에 따른 파괴양상이 어떻게 달라지는 가를 살펴보기 위해서 기둥이 3열인 5층건물을 예로 하여 실시한 시뮬레이션의 예이다. 건물발파의 형태는 먼저 1차 발파에서는 1층의 좌측 제1열의 기둥중 1/2를 제거하고, 시차를 둔 2차 발파에서는 2층의 좌측 제1열의 기둥중 1/2를 제거하고 동시에 1층의 제2열의 기둥중 1/4을 제거하는 형태로 발파를 실시한 것이다.

Fig. 3.4.3.8의 경우는 1차와 2차 발파를 동시에 실시한 경우이며, Fig. 3.4.3.9는 1차와 2차 발파의 시차를 0.215초를 적용하였고, Fig. 3.4.3.10과 Fig. 3.4.3.11은 2발파간의 시차를 앞의 경우에 비해 2배씩 늘린 경우를 나타낸 것이다.

각 그림은 1차 발파후 같은 시간대의 건물이 파괴되고 있는 양상을 나타내는 것으로, 전체적으로 1차와 2차의 발파사이의 시차가 짧을수록 파괴가 빨리 진행되고 있음을 볼 수 있다. 따라서 건물층간 발파시차의 선택문제도 건물붕괴의 양상에 상대한 영향을 미칠 수 있음을 볼 수 있다.

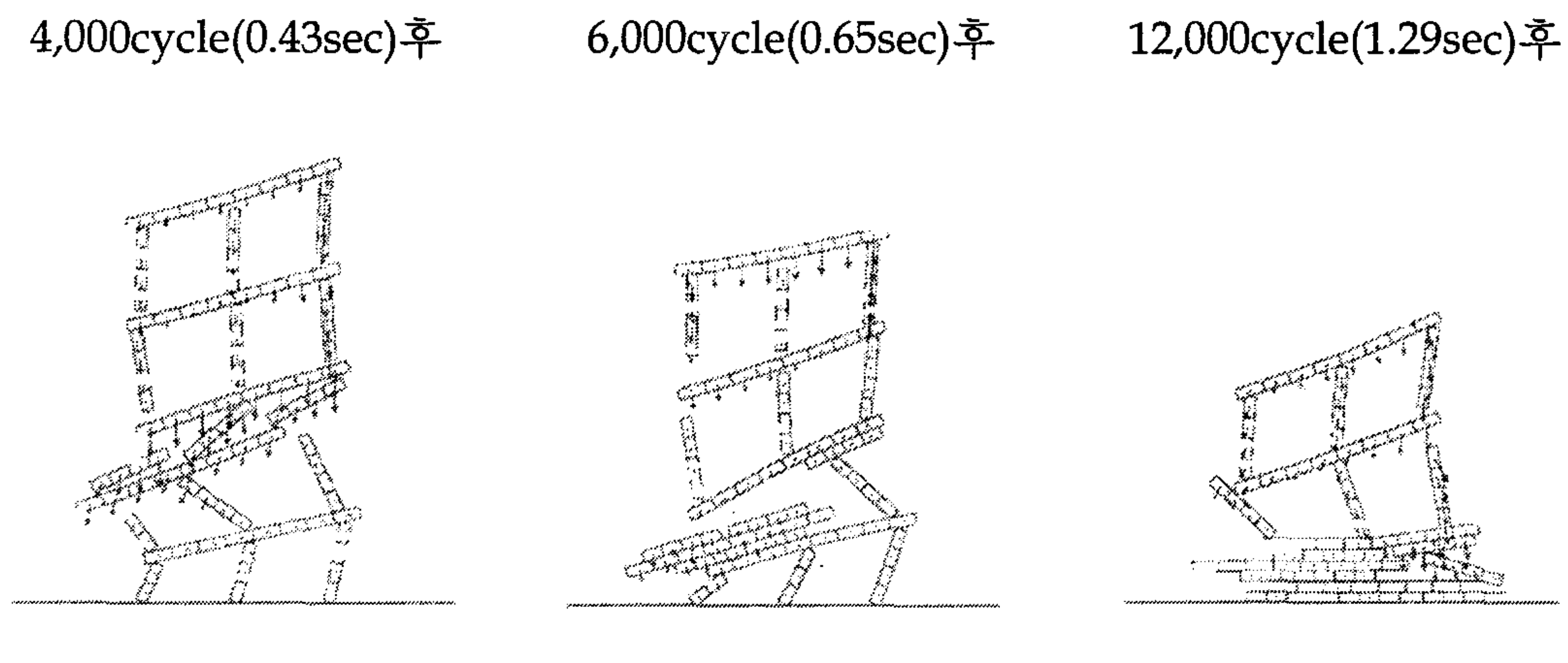


Fig. 3.4.3.8 발파시차에 따른 파괴양상 (1층과 2층 동시발파)

4,000cycle(0.43sec)후

6,000cycle(0.65sec)후

12,000cycle(1.29sec)후

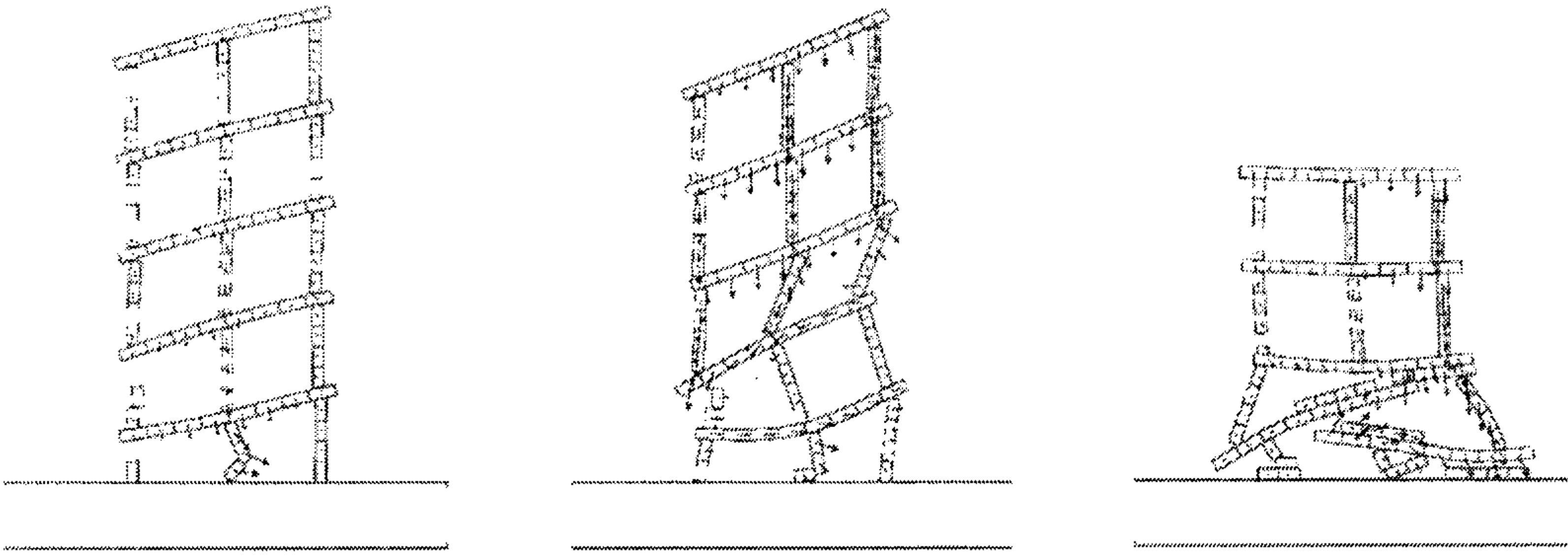


Fig. 3.4.3.9 계속 (1층 발파 0.215초후 2층 발파)

4,000cycle(0.43sec)후

6,000cycle(0.65sec)후

12,000cycle(1.29sec)후

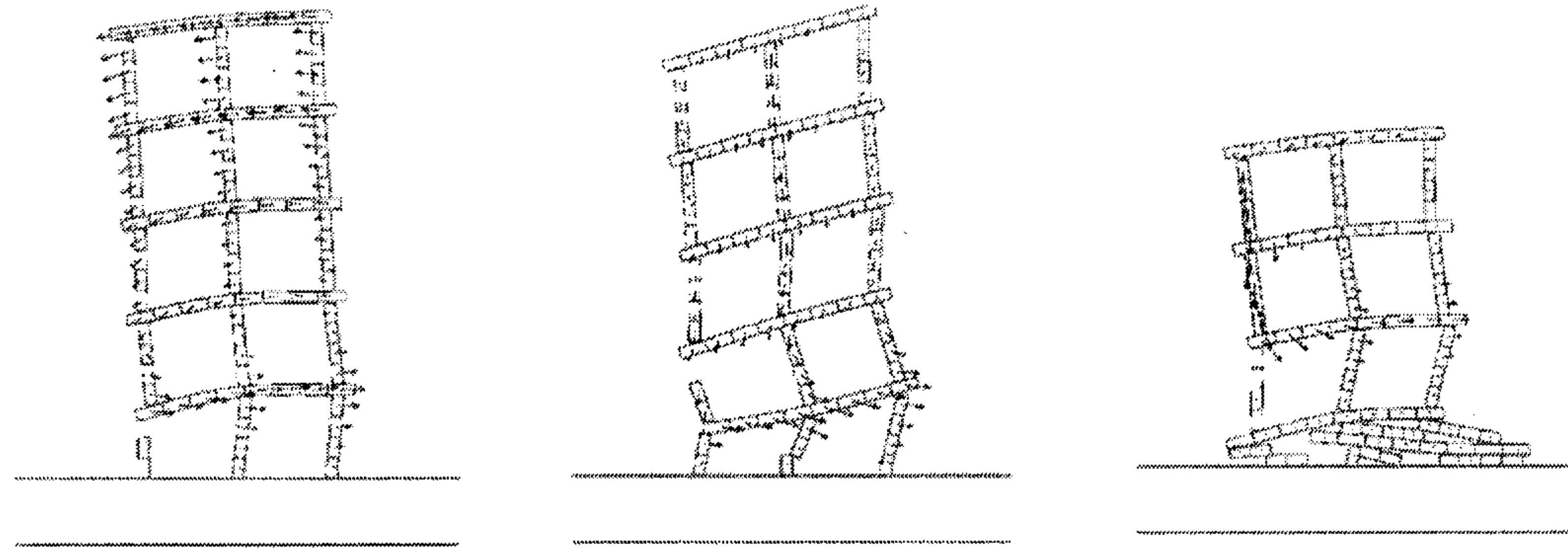


Fig. 3.4.3.10 계속 (1층 발파 0.43초후 2층 발파)

4,000cycle(0.43sec)후

6,000cycle(0.65sec)후

12,000cycle(1.29sec)후

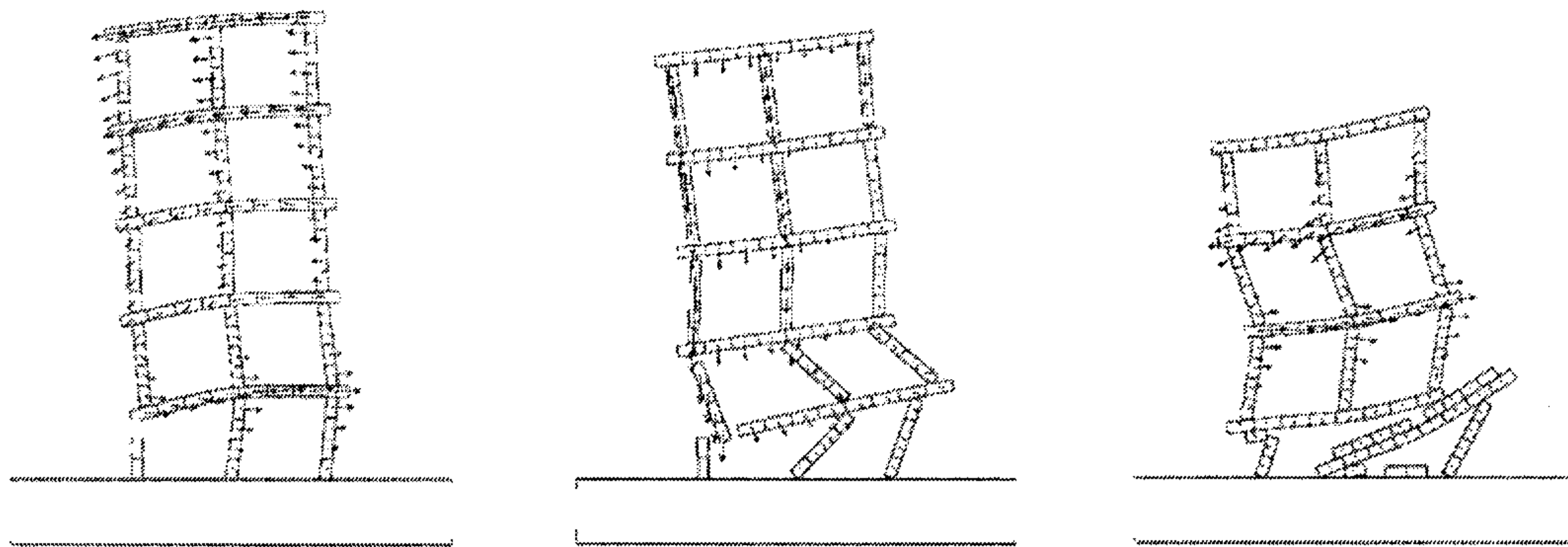


Fig. 3.4.3.11 계속 (1층 발파 0.86초후 2층 발파)

마. 고찰

해석에 사용하기 위한 시뮬레이션 모델들은 사용 프로그램 UDEC에서 제공되는 프로그램 언어인 FISH를 이용하여 작성한 프로그램으로서 모델의 요소들을 즉 모델건물의 모양, 건물의 층수, 기둥의 수 그리고 기둥과 보의 요소분할 등 생성시켰지만 보다 실제건물에 가깝고 쉽게 작성할 수 있기 위해서는 GUI환경을 이용하여 보다 쉽게 작성 및 수정할 수 있는 프로그램의 개발이 필요하다.

해석에 있어서 건물부재의 물성의 차에 따라 건물의 붕괴양상이 달라지기 때문에 붕괴양상 해석이 실제조건에 부합되기 위해서는 건물부재의 물성파악을 특히 부재간의 물성파악에 많은 신경을 써야 할 것이다. 또한 발파 및 건물낙하에 의한 충격과 같은 동적인 영향도 고려해 할 것이다.

이와 같은 시뮬레이션에 의한 해석은 정량적인 해석보다는 실제 시공 전 건물붕괴의 양상을 파악한다는 것이 보다 더 중요하다. 따라서 붕괴할 수 있는 공간, 건물의 형태 등을 고려하여 전도시킬 방향 및 약화시킬 부분 등을 결정하고 그리고 앞의 상황에 맞게 어떠한 순서로 발파를 실시하고 각 발파간의 시차를 어떻게 해야 할 것인지에 대해 여러 경우에 대해 살펴보아야 한다.

이와 같이 건물의 형태, 붕괴공간 취약화부분, 발파시차 등에 따라 각 경우에 맞는 여러 조건들을 고려하여 해석해야 하기 때문에 붕괴작업조건을 일반화하기는 매우 힘든 일이다.

/참고자료/

FISH 언어로 작성한 해석모델을 만들기 위한 Program의 일부

; 건물 파괴 중앙15층 양날개 5층인 건물의 예,

title

Building failure process

def bld_setup

;좌표의 원점(0,0)은 건물의 좌하단, upbas : 건물중앙부의 원점부, upbasrt : 건물
중앙부 하단의 최우측부

;blcas : 건물상부위치

;ifloor : 건물 양익부의 층수, cfloor : 건물중앙부의 층수

;bm_th : 보의 두께, cl_th : 기둥의 폭, cl_hgt : 기둥의 높이

;bld_ht : 건물 양익부의 높이, bldct_ht : 건물중앙부의 높이

bld_dfht : 양익부와 중간층의 높이차

;beam_lg : 보의 길이, beamup_lg : 건물중앙부 보의 길이, cl_space : 기둥의 간
격

;cl_num : 건물하부 기둥의 열수,

clct_num: 건물중앙부의 기둥열수(중앙부와 하부기둥의 수 홀수 또는 짝수로 통
일)

;fond_lg : 기초길이, depth : 기초깊이, ndivd : 기둥의 분할을 위한 세트수

ifloor=5

cfloor=15

bm_th=0.4

cl_th=0.4

cl_hgt=2.4

cl_space=1.5

cl_num=15

clct_num=5

fond_lglt=-4

fond_lg=4

depth=-2.4

ndivd=4

blcas=3

dfloor = cfloor - ifloor

bld_ht = ifloor*(bm_th+cl_hgt)

bldct_ht = cfloor*(bm_th+cl_hgt)

bld_dfht = bldct_ht - bld_ht


```
beam_lg = cl_th*(cl_num+2) + cl_space*(cl_num-1)
beamup_lg = cl_th*(clct_num+2) + cl_space*(clct_num-1)
fond_lgrt = beam_lg + fond_lg
```

```
if bldcas=1 then
  upbas=0
else
  if bldcas= 2 then
    upbas= beam_lg - beamup_lg
  else
    upbas = beam_lg/2 - beamup_lg/2
  endif
endif
upbasrt = upbas + beamup_lg
end
```

bld_setup

; 기초블록의 설정

```
block fond_lglt,depth fond_lglt,bldct_ht fond_lgrt,bldct_ht fond_lgrt,depth
```

; 건물상부

```
crack fond_lglt,bld_ht fond_lgrt,bld_ht
crack upbas,bld_ht upbas,bldct_ht
crack upbasrt,bld_ht upbasrt,bldct_ht
del fond_lglt upbas bld_ht bldct_ht
del upbasrt fond_lgrt bld_ht bldct_ht
```

; 건물하부

```
crack fond_lglt,0 fond_lgrt,0
crack 0,0 0,bld_ht
crack beam_lg,0 beam_lg,bld_ht
del fond_lglt 0 0 bld_ht
del beam_lg fond_lgrt 0 bld_ht
```

```
.....
.....
.....
```

4. 실험실 붕괴거동 실험 장치 개발

가. 모형시험 연구 목적

본 연구는 건물발파 연구에서 건물의 대상으로 파괴시험을 하기가 쉽지 않으므로 건물을 대신할 수 있는 모형을 제작하여 실제 건물발파 시험을 대신할 수 있도록 할 목적으로 수행되었다.

나. 제작의 기본 원리

건물발파는 건물을 철거를 목적으로 하는 것으로서 이를 위하여 건물전체를 파괴하는 것이 아니고 특정한 층의 건물기둥을 파괴하여 건물의 전체 붕락을 유도하게 된다. 그러므로 건물발파에서는 기둥을 효과적으로 파단 시켜서 전체 건물의 붕락을 원하는 방향과 모양으로 유도하는 것이 기술의 관건이 된다.

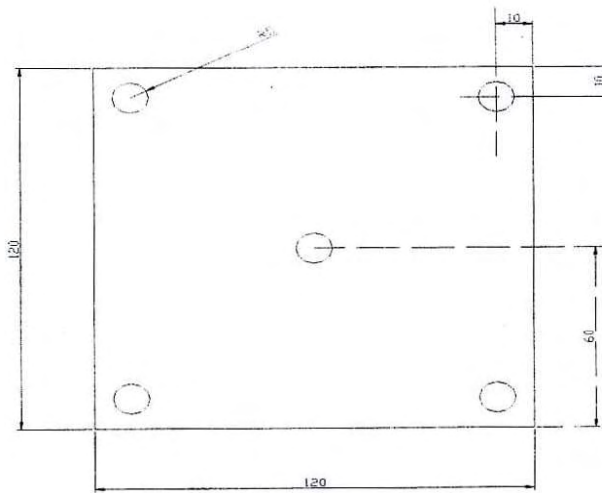
그러나 이러한 목적으로 실제 건물발파를 시험하기란 건물의 규모가 크고 실제 시험이 잘못될 경우 원하지 않는 결과를 초래하여 주변에 피해를 미칠 수가 있기 때문에 이러한 실제 건물을 대상으로 하는 건물발파시험은 어렵다.

그러므로 건물발파가 기둥의 파괴에 있다는 점을 착안하여 건물을 대신할 수 있는 모형을 만들고 이 모형에서 기둥만을 효과적으로 절단할 수 있다면 본 연구의 목적을 달성할 수 있게 된다. 이를 위하여 기둥을 미리 두 개로 절단하고 한 쪽의 기둥을 전자석으로 만들어서 모형을 붕괴시키려고 하면 전류의 송전을 중단하면 전자석이 자력을 상실하면서 기둥은 절단이 된다.

다. 모형의 제작

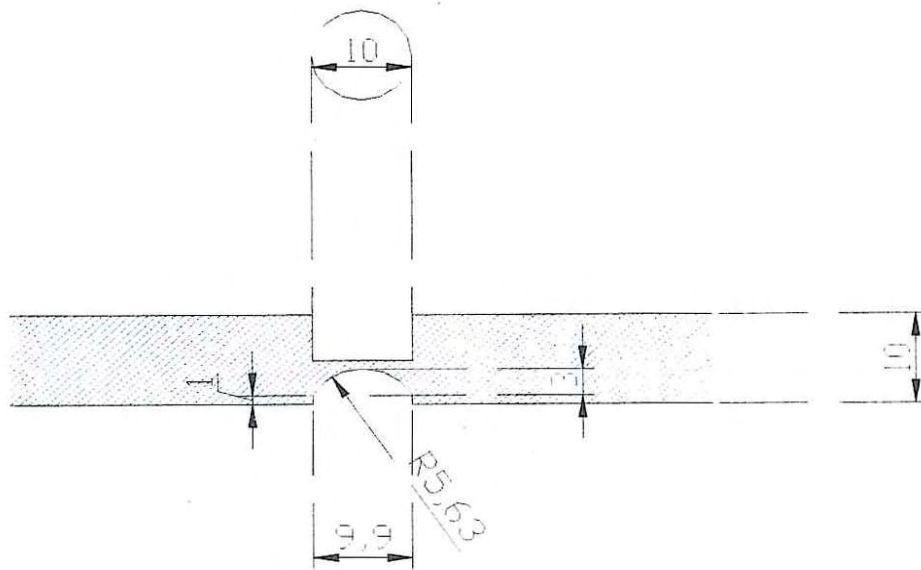
1) 건물의 바닥과 천장

건물의 천정과 바닥은 투명한 플라스틱판으로 구성하였고 또한 이를 강성체로 간주하였다. 건물파괴에서 벽체는 거의 힘을 받은 수 없는 구성물이어서 모형에서는 벽체를 만들지 않고 빈 공간으로 두었다. 바닥과 천장을 구성하는 플라스틱판의 모양과 규격은 Fig. 3.4.4.1과 같다. 판의 5면에 구멍을 내어서 기둥을 세울 수 있도록 하였다. 판은 정사각형으로 한변의 길이는 각각 120cm 이고 두께는 10cm 로 하였다. 판에서 구멍은 기둥이 박히는 바닥과 상부의 천장에 걸쳐지는 천장 면을 고려하여 판을 상하면에 각기 다른 모양의 홈을 만들었는데 이 홈들의 모양과 규격은 Fig. 3.4.4.2와 같다.



A Plan View of Base Plate

Fig. 3.4.4.1 A plan view of plate



Treatment of holes in a base plate

Fig. 3.4.4.2 A hole for assembling the plate and column

판의 바닥에 사각형의 바닥면과 직각이 되는 원통형의 구멍을 판 것은 바닥에 기둥을 가능한 한 고정시키려는 의도이며 천장에 구멍은 기둥의 상부면에 자유로들 최대한 부여하기 위하여 반구형의 모양을 가지도록 하였다. 이와 같이 하여 기둥이 꺾이면서 무너질 때 기둥의 움직임에 따라 상판이 자유롭게 이탈할 수 있도록 배려하였다.

2) 기둥

기둥은 Fig. 3.4.4.3과 같이 4가지 모양으로 제작을 하였다. 기둥의 길이는 모두 110cm 이다. 고정된 기둥 외에 전자석과 결합되는 기둥의 모양은 Fig. 3.4.4.3에서와 같이 3가지 타입으로 만들었다. 기둥의 절단 각도는 각각이 15°, 30°, 45°이다. 이와 같이 기둥의 절단면을 달리한 이유는 경우에 따라 전자석에서 자성이 상실될 경우 상부의 자중으로부터 붕락이 자유롭게 일어날 수 있도록 경우에 따라 적합하도록 기둥의 이탈정도를 조절하기 위해서 이다. 각 기둥은 직경 9.9cm로 바닥판의 구멍과의 공차를 0.1cm로 가공하였다. 각 기둥의 제원은 Fig. 3.4.4.3과 같다.

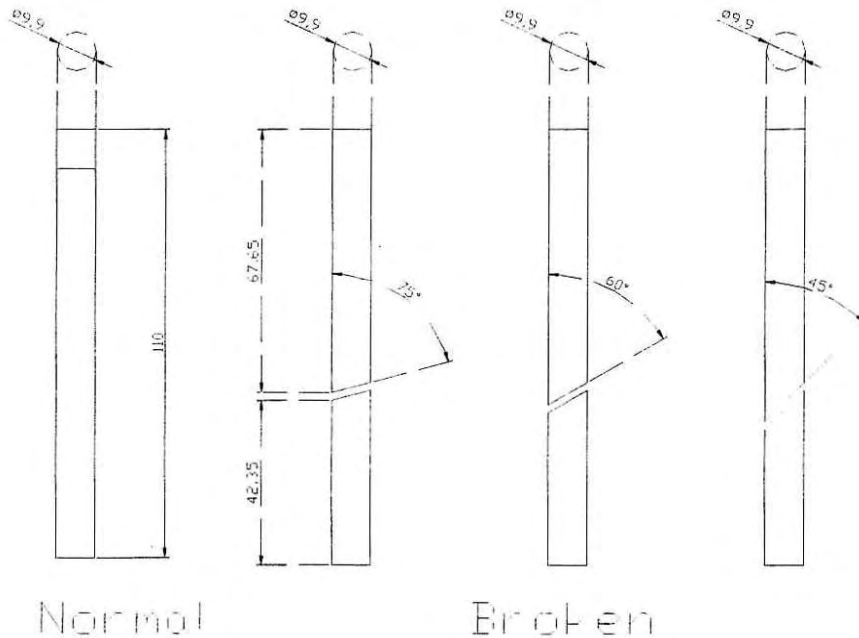


Fig. 3.4.4.3 Types of columns

3) 꺾임 기둥

꺾임기둥은 전자석으로 그 역할을 할 수 있도록 하였다. 건물발파에서는 기둥을 파괴하여 건물의 붕락을 유도하게 되는데 본 모형시험에서는 발파를 대신하여 전자석의 자성을 끊어서 건물이 부러질 수 있도록 하였는데 이 역할을 위하여 기둥을 일정한 각도로 절단하고 하부의 기둥을 전자석으로 구성하였다. 전자석으로 구성되는 기둥의 모양과 제원은 Fig. 3.4.4.4와 같다. 직경 9.9cm의 철봉에 직경 0.2cm의 에나멜선을 5회 반복하여 감았다. 전자석에서의 자성의 세기는 도선을 흐르는 전압과 코일의 감은 횟수에 비례한다.

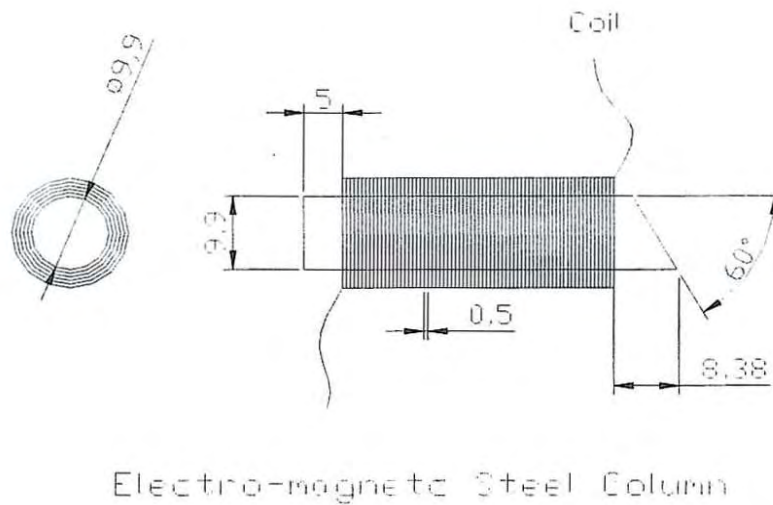
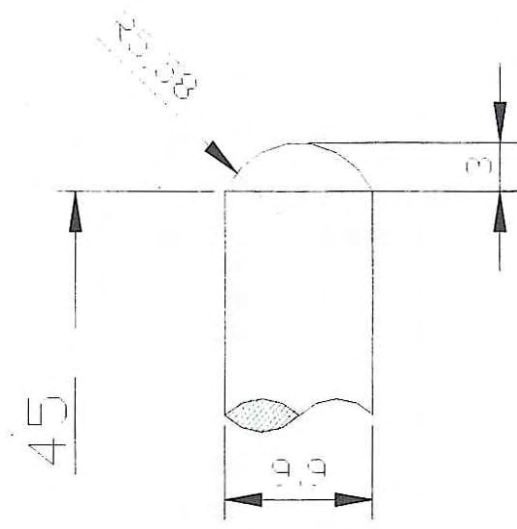


Fig. 3.4.4.4 An electromagnet device for cutting effect

꺾임 기둥의 상단부는 Fig. 3.4.4.5와 같이 반구형의 모양으로 가공을 했는데 이는 기둥이 꺾일 때 상판과의 활절구조를 형성하여 상판과 기둥이 분리되는 모양을 고려하여 되도록 자유도를 많이 허용하기 위함이다. 상판에 연결되는 끝부분은 반경 3cm의 반구좌 모양이고 직경은 모형의 철봉들과 같이 9.9cm이다.

4) 건물 모형

건물모형은 1차적으로 각 층이 한 칸으로 된 건물을 가정하였다. 준비된 부품으로 형성시킨 건물의 모형의 3차원 모양은 Fig. 3.4.4.6과 같다. 이 모양은 가장 간단한 건물 모양으로 본 시험을 본격적으로 시행하기 위한 예비연구의 사례이다. 각 층은 기둥과 바닥판으로 연속적으로 결합이 된다.



Treatment of Upper Post

Fig. 3.4.4.5 Upper part of a column

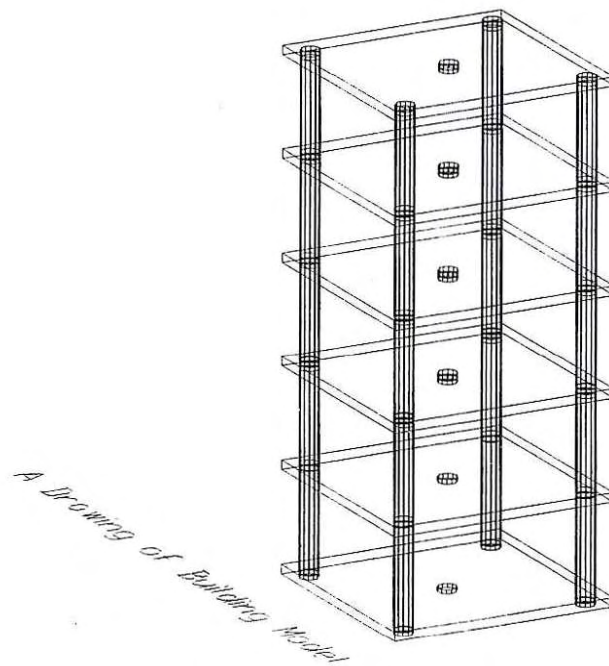
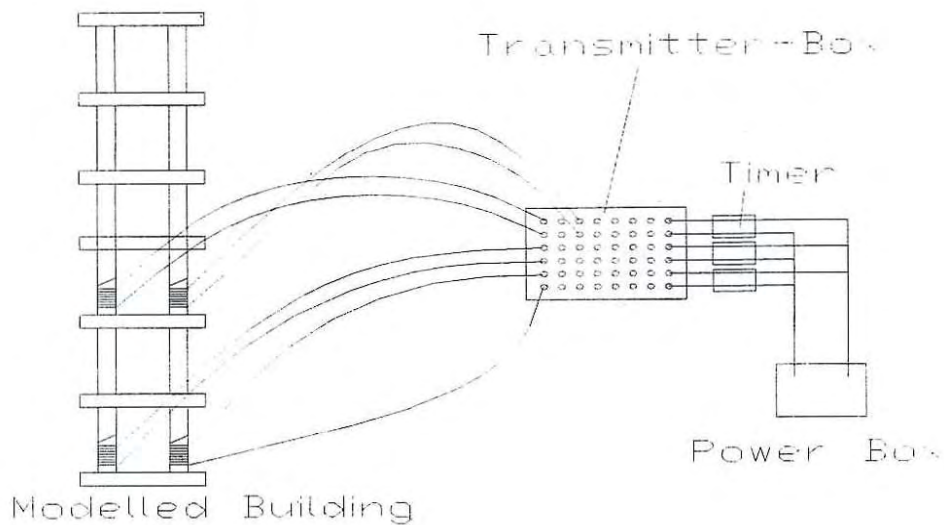


Fig. 3.4.4.6 Building model

5) 회로도

이와 같이 만들어진 모형은 Fig. 3.4.4.7과 같은 기본적인 회로도로 연결이 된다. 전자석의 전류를 공급하기 위하여 교류-직류 변환기를 사용하여 전력을 공급하는 파워팩(Power-Box)을 만들었다. 이 파워팩은 전압을 조절할 수 있는 가변식 직류-교류 변환기 이다. 이로부터 나온 전류는 회로판(Transmitter-Box)에서 각 전력점(Electric-Node)으로 분기가 되고 각 전력점에서 도선을 연결하여 건물모형의 꺾임기둥을 구성하는 전자석 기둥의 각선에 연결을 하였다. 시차를 조절하기 위하여 파워팩과 회로판 사이에 타이머(Timer)를 부착하였다.



Circuit of Model

Fig. 3.4.4.7 Electric circuit for delay effect

라. 실험결과

본 예비실험결과 모형 건물은 전자석 기둥의 전류를 차단함으로써 순조로운 붕락을 하였지만 본 시험의 진행을 위하여 다음과 같은 문제점이 발견되었고 이를 개선하려고 하였다.

1) 전자석기둥에서의 잔류 자성

꺾임 기둥의 하부를 전자석을 구성하여 모형을 만들 때 전력을 걸어 전자석을 만들게 되는데 이때 모형을 쌓아 올리면서 적지 않은 시간이 소요된다. 그러면 꺾임의 하부는 장시간 전자석으로 역할을 하면서 위에 놓여지는 상부의 구조물을 받치

게 되는데 장시간 전자석으로 역할을 하면서 모형건물의 붕락을 유도하기 위해 전력을 끊어도 자성이 잔류되어 전자석의 기능을 일정기간 유지함으로써 원하는 시간에 건물의 붕락을 유도하기가 어려웠다.

이를 해결하기 위해 꺾임 하부에 자류자장이 남아있지도 않도록 하여야 하는데 이를 위하여 자성을 남기지 않는 규소철을 이용하여 봉강을 만들든지 아니면 상부의 기둥도 전자석으로 만들어서 건물 붕락시 하부기둥의 자성을 유지한 채 상부 철봉기둥에서 N-S 극이 반대로 작용하도록 직류전류의 방향을 바꾸어 흘리는 방안이 강구되어서 이를 개선하는 작업이 필요할 것으로 판단된다.

2) 상판 혹은 하판과 기둥의 활절 구조

실제의 건물은 발파시 기둥과 벽체, 그러면 건물의 각층에 무너지면서 상호간의 자유도가 확보되고 자유롭게 무너져 내린다. 그러나 모형에서는 상판 혹은 하부판이 비록 플라스틱이라도 상대적으로 강하여 강성체처럼 작용하기 때문에 이와 시험에서는 이와 같은 붕괴형상을 창출하기 어렵다.

이와 같은 단점을 보완하기 위해서는 기둥과 상하부판이 자유롭게 이탈되도록 하여야 하는데 자유도가 너무 많으면 모형 건물의 각층을 적체할 때 회전모멘트가 발생하여 건물을 단단하게 지어 올리기가 매우 어렵고 또한 쉽게 무너지고 만다. 그래서 기둥과 상하부판의 연결구멍 공차를 될 수록 줄일 수밖에 없다.

그러나 기둥과 상하부판이 너무 밀접하게 결합되면 기둥이 꺾이더라도 기둥과 상하부판이 연결이 끊어지지 않아서 건물의 붕락에 지장을 받게 되어 실제의 건물과 괴에서 볼 수 있는 붕락현상을 재현하기가 어렵다. 이런 문제를 해결하기 위하여 철봉기둥과 상하부판의 구멍과의 공차를 줄이고 전자석 하부기둥의 바닥이 평면인 원통형의 홈을 파고 기둥의 상부가 연결되는 상판의 아랫구멍은 Fig. 3.4.4.2와 같이 둥근 구좌모양으로 홈을 파고 철봉의 상부쪽 역시 이에 부합되도록 구좌모양으로 가공을 하였다.

그러나 현재의 부재로 만든 모형 역시 철봉기둥과 상하부판의 구멍과의 공차가 커서 여전히 회전모멘트가 많이 작용하여 모형건물의 적체시 어려움이 있다.

3) 전력공급시스템

건물의 구조가 복잡해지면서 전자석의 기둥이 늘어난다. 이때 전자석에 일정한 자성을 유지하기 위해서는 각 전자석에 흐르는 전류의 양이 동일하여야 한다. 이를 위해서는 파워팩의 전력량을 조절할 수 있어야 한다. 또 전력이 지나치게 많이 공급되면 전자석의 코일에 열이 발생하게 되고 심하면 코일이 녹아내릴 위험이 있다.

이상과 같은 점을 고려하여 시험을 성공시키기 위해서는 전자석의 세기와 안정된 전류의 공급을 제어할 수 있는 장치와 환경이 요구되고 이를 위해 장치의 개선이 필요하다.

4) 건물의 층과 층의 연결

예비시험에서는 각층이 한 칸의 구조로 된 구조물이지만 실제의 건물은 각 층이 여러 개의 격실로 구성된 복합건물이다. 이를 위해서 현재의 상하 판에서 중앙의 구멍에 기둥을 설치하고 각 상하 판의 측면을 연결하는 장치를 하여야 한다. 현재 각층의 측면에 직경 2 mm의 구멍을 두 개씩 뚫고 이를 녹말 이쑤시개를 집어넣어 연결하였다. 나무로 연결 이쑤시개는 상대적으로 너무 강성이어서 층간이 무너지더라도 각 상하 판이 분리되지 않는데 비해 녹말 이쑤시개는 층간이 무너지면서 쉽게 끊어져서 소기의 목적을 달성할 수 있었다.

그러나 이 경우 플라스틱 상하 판을 좌우로 연결할 경우 플라스틱 층간의 수평을 유지하기가 어렵고 하부 기둥의 전자석에서 자성을 제거하게 되면 층간에 기둥이 꺾이면서도 일부는 서로 동시에 무너지면서 상호 받침을 하여 층의 형태가 유지되는 경우가 있었다.

이를 개선하기 위해서는 플라스틱판을 적체시 전자석 기둥의 자성이 충분히 강해야 하고, 하부바닥과 기둥이 충분히 밀착하여 회전모멘트를 억제하여야 한다. 아울러 층간이 서로 간섭하지 않고 무너지도록 하려면 각 전자석 기둥간의 시차를 적절히 조절하여야 한다.

마. 요약

본 시험에서는 일단 각 모형건물의 부재 모양과 제원을 결정하고 실험을 성공할 수 있는 요인들은 분석하여 보았다. 전자석 기둥을 이용한 모형건물 시험을 하려는 시도는 매우 획기적이면서도 효과적인 수단으로 사료된다. 그러나 모형건물은 각 부재물로 연결할 경우 회전모멘트를 최대한 억제해야하는 동시에 건물이 파단될 경우에는 거꾸로 부재들의 활절구조가 최대한 발휘되면 회전모멘트를 극대화해야하는 모순적인 거동이 요구되는데 이 점을 동시에 고려하기가 매우 어렵다. 이를 위해서 부재간의 공차, 전자석의 세기, 전자석 기둥의 형태, 층간의 결합 방법 등 열러가지 요인이 더욱 개선되어야 한다.

이러한 여러 문제점이 개선되면 본 건물발파 모형시험은 건물의 붕락을 고속카메라로 촬영을 하면서 원하는 모양으로 건물발파를 유도하는 등 매우 효과적인 실험 결과와 분석수단을 제공할 수 있으리라 기대된다.

5. Physical modelling - 실험실 모형실험

석고모형에 대한 해체발파 실험은 본 연구에서 진행되고 있는 붕괴거동 시뮬레이션 해석기법과 관련한 중간 연구결과들을 실제 건물을 1/20의 축척으로 줄인 모형 건물의 해체발파에 적용함으로써 연구결과들을 검증하고 이론적인 내용을 보완하기 위하여 실시되었다. 건물모형은 석고를 부재로 하여 소규모로 제작되었으나 모형의 제작과 시험발파과정을 통해 몇 가지 실제적인 결과들을 얻을 수 있었다. 본 건물 모형 발파실험의 주요 내용과 결과를 아래에 간략히 제시하였다.

가. 건물모형의 구조

실험에 사용된 건물모형은 저층 및 고층 아파트와 같은 건축구조물의 해체발파를 상징하여 기둥과 보 및 슬래브로 이루어진 6~8층 정도의 건물로서 공업용 석고를 사용하여 제작하였다. 제작된 기둥, 보 및 슬래브 부재의 모습을 Fig. 3.4.5.1과 2에 보였다. 일반구조물의 철근에 상응하는 보강재는 별도로 사용하지 않았으며, 내력벽이나 외벽 등은 사전 취약화에 따라 모두 철거된 것으로 가정하였다.

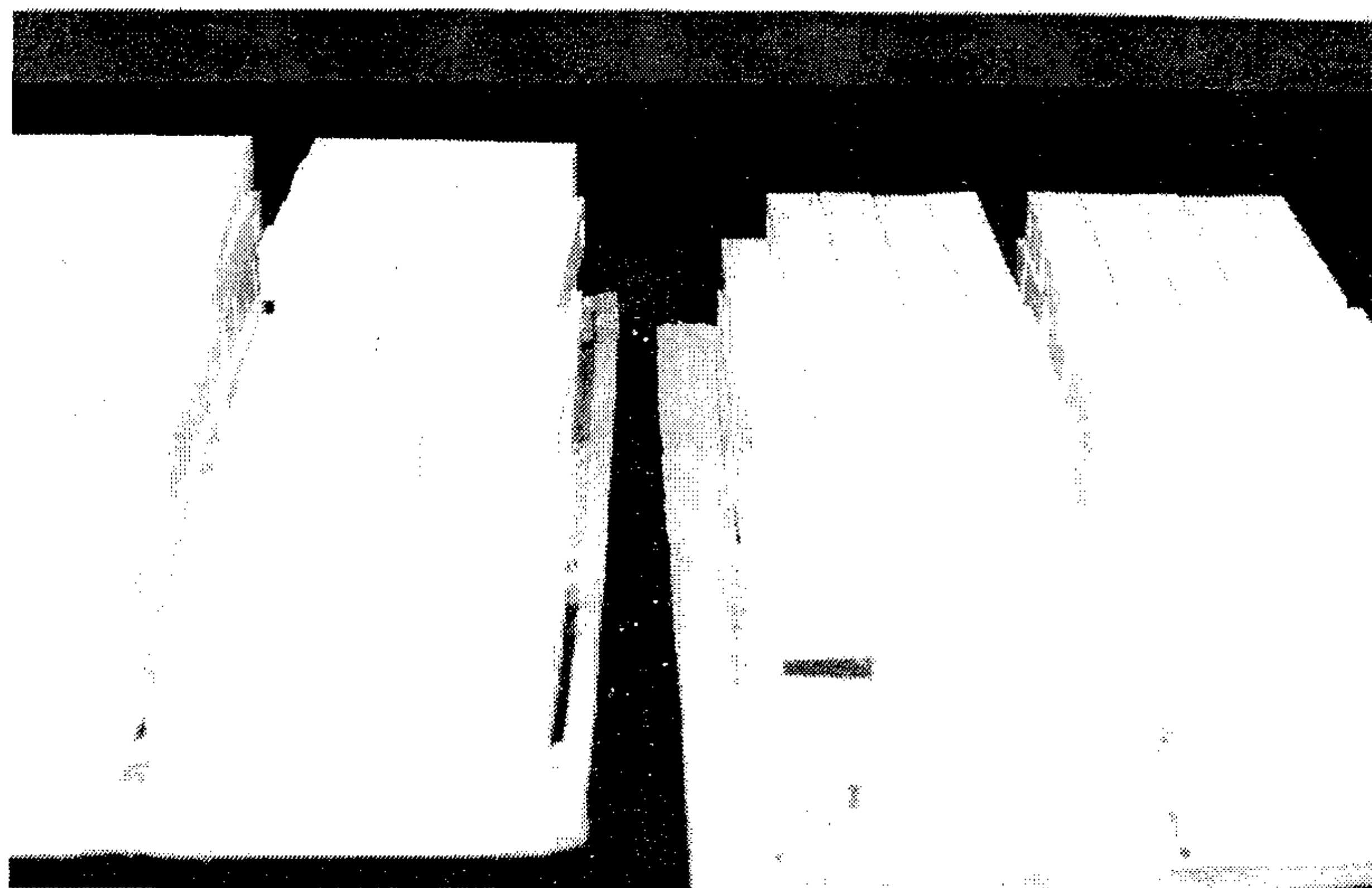


Fig. 3.4.5.1 기둥

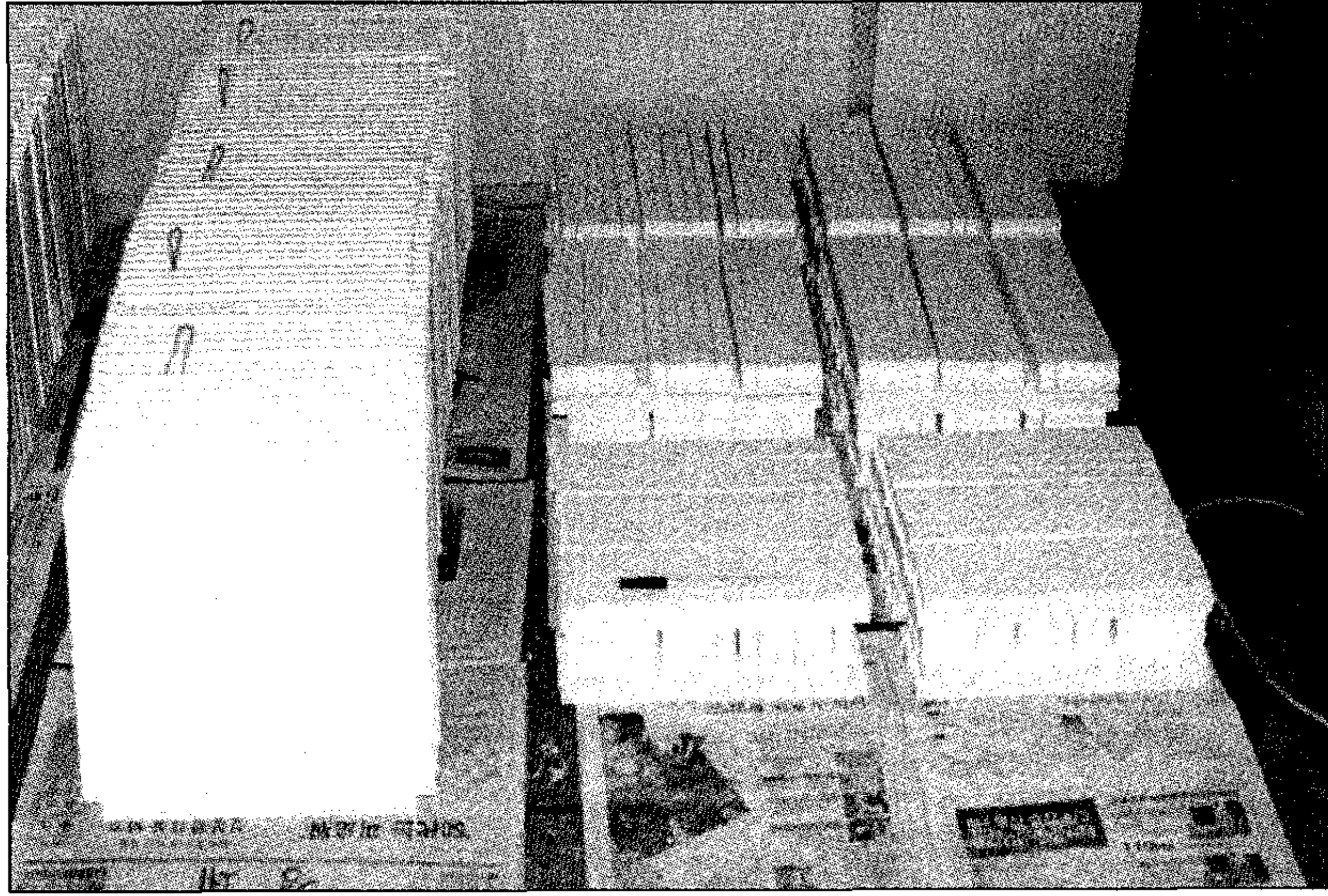


Fig. 3.4.5.1 보와 슬래브

모형건물의 구조는 건물의 길이를 4칸, 폭을 3칸 정도로 하여 고층아파트의 1/4, 저층아파트의 1/2 정도의 규모를 상정하였다. 각 층의 바닥을 이루는 슬래브는 모형제작과 운반상의 문제로 인하여 4개의 기둥으로 구분되는 구획의 크기로 별도로 제작한 후 건물모형을 쌓아올리면서 강력접착제를 사용하여 접착시켰다. 실험과정에서 건축 중에 있는 모형건물의 모습을 Fig. 3.4.5.3에 보였다.

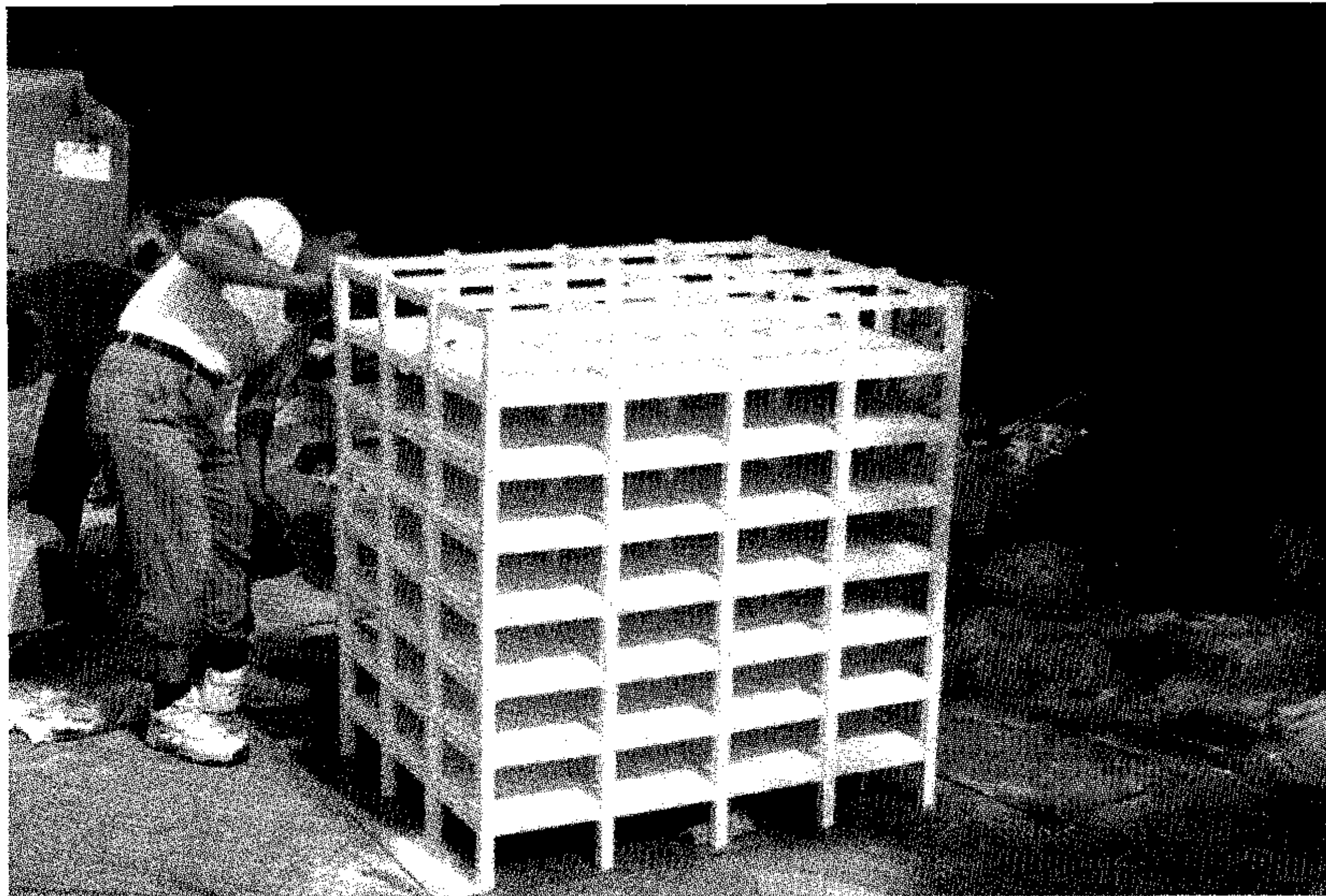


Fig. 3.4.5.2 건물모형의 건축과정

나. 붕괴패턴 설계

제작된 건물모형 자체는 폭에 비해 길이가 약간 긴 장방형 형태의 건물로서 비교적 저층이고, 길이방향에 있어서는 실제 구조물의 1/2 규모를 상정하고 있으므로 이를 감안하여 전체적으로는 점진붕괴기법을 적용하였다. 붕괴방향은 건물의 우측으로부터 좌측을 향해 점진적으로 붕괴시키되, 상부 층들은 건물의 전방을 향해 붕괴되도록 유도하였다. 점진붕괴기법을 적용하기 위하여 수직방향의 두 층과 수평방향의 한 칸을 하나의 단위구획으로 설정하여 총 12~16 구획을 단위 발파구획으로 정하였다.

원칙적으로 상하 구획간의 지발시차를 부여할 때에는 상부의 하중을 고려하여 최초의 발파직후 붕괴에너지가 충분히 확보되도록 하여야 하나 본 건물모형의 경우에는 슬래브의 이음매 부분이 취약화 되어 있고 파괴에 대한 저항으로 작용할 수 있는 벽체들이 없는 까닭에 이 부분에 대한 문제는 없는 것으로 간주하였다.

모형건물의 우측 최하부에 해당하는 발파구획이 발파됨으로써 2층 보, 즉 3층 바닥이 지표에 도달하는데 걸리는 낙하시간 t 는 자유낙하를 가정할 때 다음과 같이 계산된다.

$$i) \text{ 구획의 높이: } h = 0.15 \text{ m/층} \times 2 \text{ 층} = 0.3 \text{ m}$$

$$ii) \text{ 초속도 } v_0=0 \text{인 물체의 자유낙하거리: } s = \frac{1}{2}gt^2$$

$$iii) s=h \text{ 일 때의 낙하시간: } t = \sqrt{\frac{2 \times 0.3}{9.8}} = 0.25 \text{ sec} = 250 \text{ ms}$$

실제 건물의 경우에는 이음매 부분의 저항 등으로 인하여 이런 방식으로 계산된 자유낙하시간 보다는 더 긴 시간이 지나야 지반에 도달할 것이지만 본 모형건물의 경우에는 최하부 구획의 발파만으로도 최상부 구획까지도 진동영향으로 파괴될 수 있어 붕괴시점이 더욱 빨라질 것으로 예상하여 수직방향에서의 지발시차(τ_v)를 250 ms 보다 짧은 $\tau_v = 200 \text{ ms}$ 로 설정하였다.

횡방향에서의 구획간의 지발시차(τ_h)의 산정시에는 우측구획의 낙하가 좌측의 인접구획의 파괴에 영향을 줄 수 있는 요소를 고려하여 $\tau_h = \tau_v$ 로 할 수도 있으나 본 건물모형의 경우에는 보의 고정단부나 슬래브의 이음매 부분의 저항이 극히 적은 관계로 수직방향에서의 구획열 간의 일종의 단축붕괴 양상을 보다 정밀하게 관찰하는데 주안점을 두고 횡방향에서의 지발시차 $\tau_h = 2 \tau_v = 400 \text{ ms}$ 로 설정하였다. 이

와 같은 설계는 실제건물의 발파에 있어서는 횡방향의 시차를 충분하게 부여함으로써 전체 구획들 사이의 발파 및 붕괴가 충분한 시차를 두고 발생되도록 하여 발파로 인한 지반진동이나 파괴부재의 낙하로 인한 충격진동을 더욱 경감시키는 효과를 노릴 수 있다.

다. 발파해체

본 건물모형은 석고를 재료로 사용하므로 모형건물을 세운 후에는 천공 등에 따른 진동이나 외력을 유발시킬 수 있는 작업이 거의 불가능하므로 부재의 제작과정에서 사전에 장약기둥에다 직경 8 mm 정도의 뇌관구멍을 만들어 두었다. 건물모형에 대한 해체발파를 시행하기 전에 실시한 시험발파들에서는 주로 기둥의 발파시 인접한 기둥들의 파괴여부를 시험하였으며, 그 결과에 따라 천공 및 붕괴 방향을 결정하였다. 이것은 본 모형발파에서 실제로 가장 큰 문제가 된 부분으로서 장약기둥의 발파로 인한 비산으로 인접기둥이나 보 또는 슬라브 등이 파손되어 일종의 cut-off 현상이 발생하는 어려움이 있었다. 하지만 이런 문제는 실제 발파에서는 일어날 수 없는 것이므로 모형발파 시에는 장약기둥에 대해 적절한 방호조치를 하거나 적정장약량을 유지토록 하면 해결될 수 있다. Fig. 3.4.5.4에 장약과정에서 뇌관이 장전된 모습을 보였다.

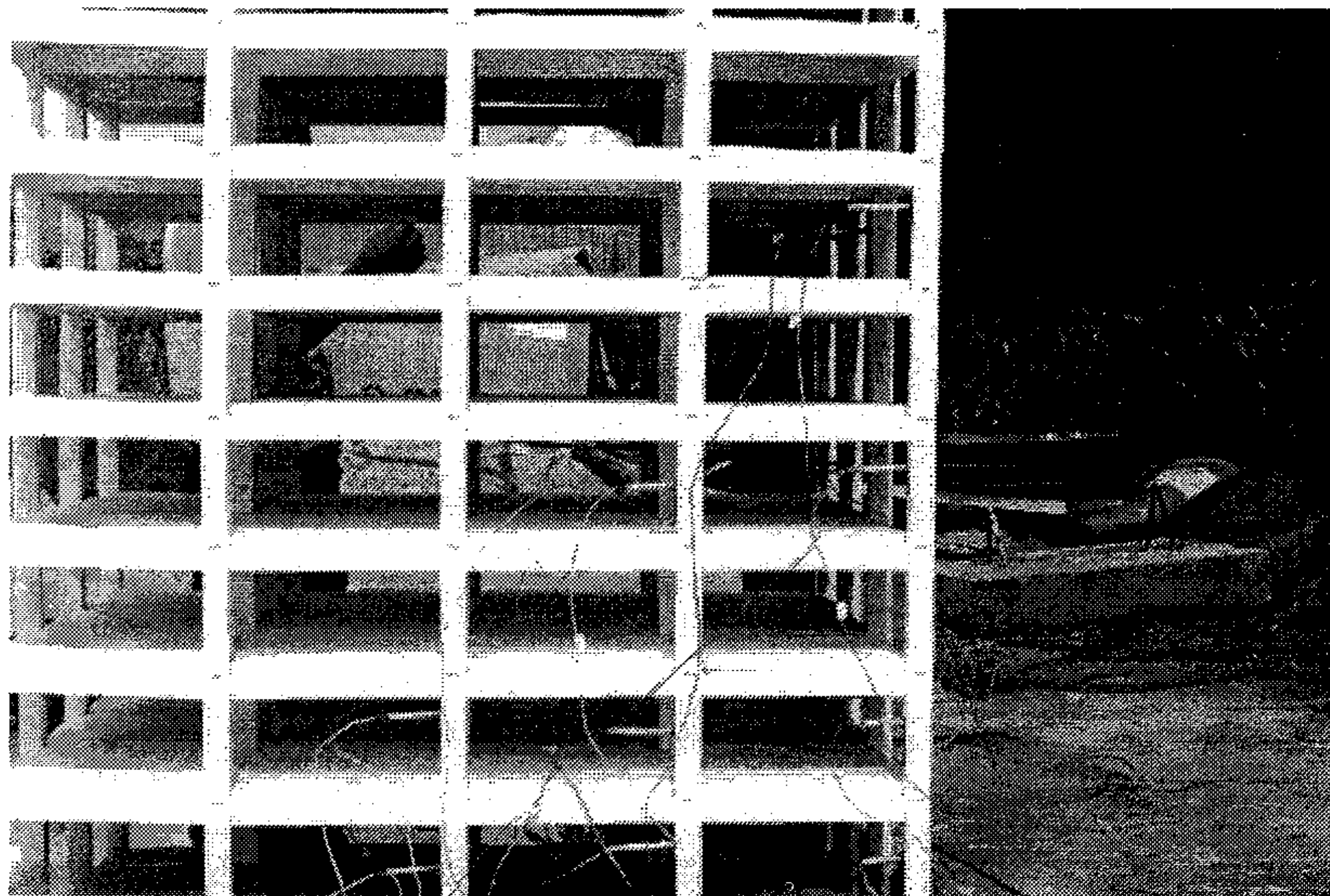


Fig. 3.4.5.4 뇌관의 장전

시험발파의 결과 기둥의 파괴에는 별도의 폭약 없이 상업용 8호 전기뇌관(첨장약: PETN 1g)만으로도 과장약 발파가 되었으나 시험여건상 8호 뇌관을 사용하기로 하였다. 폭약, 즉 뇌관의 장전 시에는 설계 단차에 따라 해당 지발뇌관들을 1층, 2층, 4층 또는 1층, 2층, 4층, 6층의 기둥에 장약하였으며, 각 층별로 12~20개의 뇌관을 사용하였다. 결선작업에서는 모든 뇌관을 직렬로 연결하였으며, 저항측정기를 통해 단선여부와 회로의 저항을 면밀히 점검한 뒤 기폭 하였다. 기폭직전의 장약이 완료된 모습을 Fig. 3.4.5.5에 보였으며, 기폭후 붕괴모습은 Fig. 3.4.5.6에 보인 고속카메라 시스템을 사용하여 고속 촬영하였다.

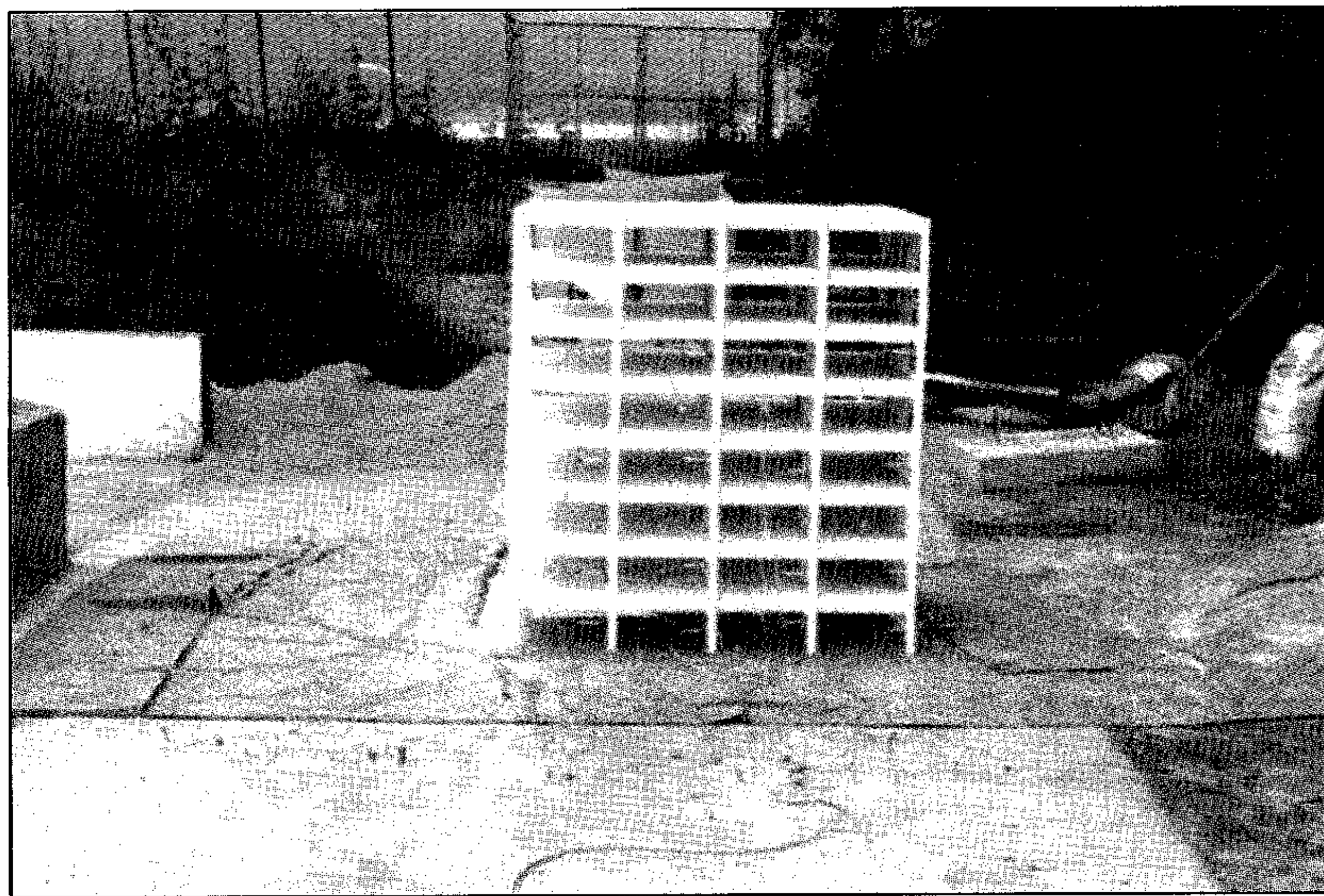


Fig. 3.4.5.3 장약 및 결선이 완료된 모습



Fig. 3.4.5.4 고속카메라

라. 해체결과

기폭과 더불어 건물모형이 붕괴되는 과정을 고속카메라와 비디오카메라를 사용하여 촬영하였으며, 고속카메라에 잡힌 단계별 붕괴양상을 Fig. 3.4.5.7에 보였다. 촬영된 영상을 관찰한 결과 붕괴의 진행이 설계한 바와 같이 우측에서 좌측을 향하여 점진적으로 진행되었으며, 수직방향에서의 각 구획열들이 주어진 시차에 따라 뚜렷하게 낙하하는 것을 볼 수 있었다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 구획과 구획사이를 연결하는 이음매 부분의 저항이 거의 없어 보와 슬래브의 처짐이 구획단위로 끊어지듯이 나타남으로써 실제 건물의 발파와는 다른 양상을 보였다. 실제 건물의 경우에는 슬래브가 다른 부재들과 일체화되어 있으며, 기둥과 보를 연결하는 이음매 부분은 다른 부분에 비해 더욱 강화되어 있으나 본 건물모형에서는 제작과정상의 어려움으로 이와 같은 부분이 실제건물과는 다르게 되는 문제점이 있었다. 향후 모형발파를 계획할 때는 이 점을 감안하여 철근을 사용하거나 이음매에 대한 강화장치를 마련할 필요성이 있을 것이다.

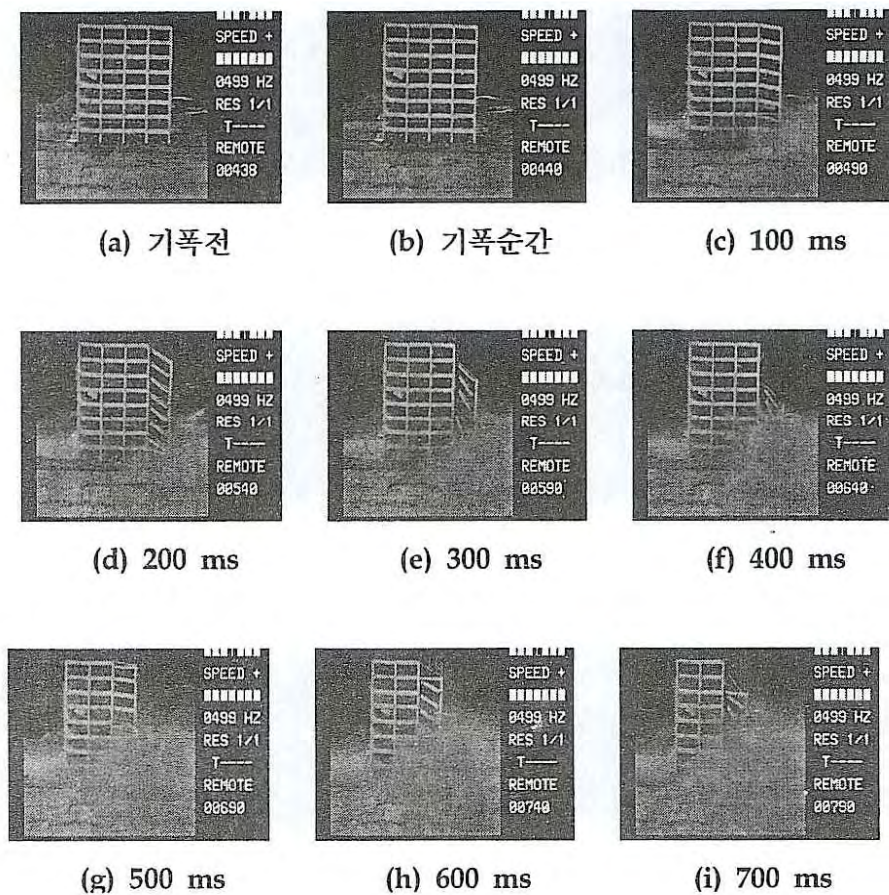


Fig. 3.4.5.7 건물모형의 단계별 붕괴양상

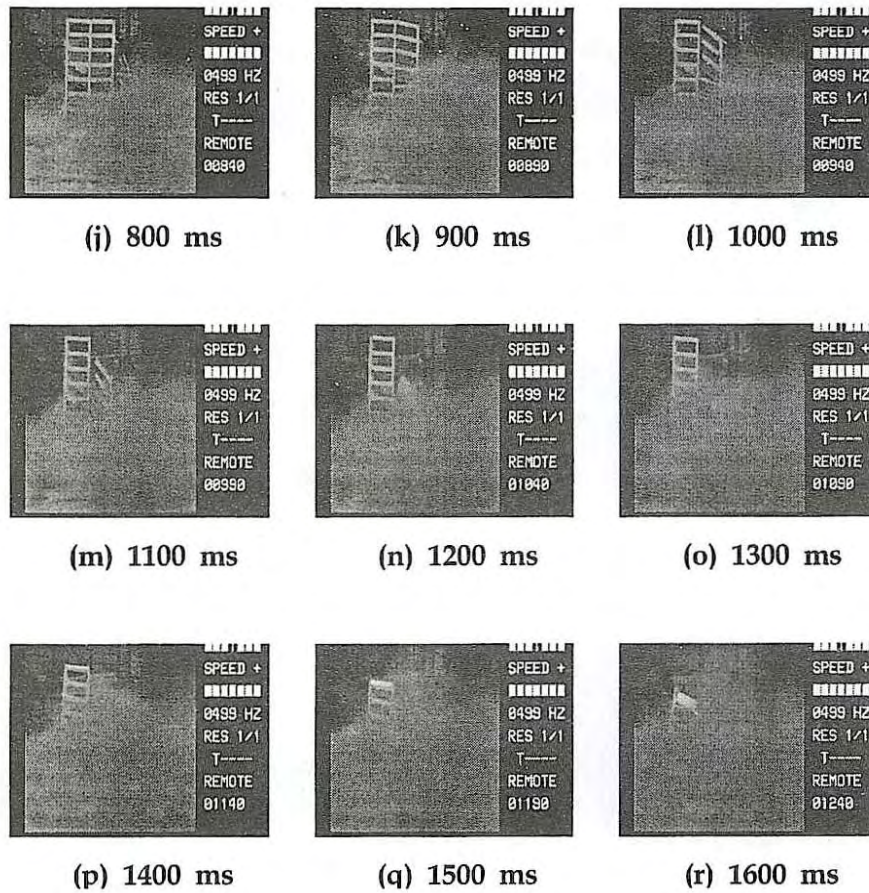


Fig. 3.4.5.7 건물모형의 단계별 붕괴양상 (계속)

한편, Fig. 3.4.5.8은 해체가 완료된 건물모형의 잔해를 보여주는 것으로 파괴된 주요부재들이 건물이 있던 자리에 그대로 붕괴되어 쌓여있는 것을 볼 수 있다. 본 모형발파에서는 모든 장약기둥이 과장약된 상태이므로 기둥, 보 및 슬래브를 이루던 파편들이 건물 주변 2~3 m까지 비산되어 흩어진 모습이 관찰되었지만 이는 실제 해체작업에서는 장약기둥의 방호와 더불어 장약층에 대한 외벽방호 등으로 충분히 제어가 가능한 부분에 해당된다.



Fig. 3.4.5.8 건물모형의 붕괴된 모습

이상과 같은 문제점이나 그 외 건물모형에 사용된 부재의 역학적, 물리적 성질 등이 실제와는 다소 차이가 있는 문제점이 있다고는 하지만 건물모형발파는 현실적으로 상당히 중요한 의미를 지닌다고 할 수 있다. 즉, 실제 국내에서 행해지고 있는 대부분의 해체발파는 저층의 아파트나 공장 등이 주가 되고 있어 발파해체가 요구되는 고층건물이나 특수한 형태의 구조물 등이 있을 경우에는 외국의 기술력에 의존하거나 기타 소모적인 다른 해체방법을 사용할 수밖에 없는 실정이다. 하지만 우리가 기존의 경험을 토대로 해석적 모델링을 통해 붕괴거동을 시뮬레이션 함과 동시에 적절한 축척과 재질의 모형을 제작하여 사전에 충분한 시험발파를 실시한다면 성공적인 발파해체를 수행할 수 있을 뿐만 아니라 각종 구조물의 발파해체에 필요한 귀중한 자료와 경험도 아울러 축적할 수 있을 것으로 판단된다.

제 5 절 발파진동 및 충격진동 발생특성

1. 개요

건물의 발파해체나 암굴착시 발생하는 진동은 주위 구조물이나 시설물 또는 가축과 인체 등에 영향을 줄 수 있으므로 환경 영향 평가에서 매우 중요한 분야이다. 암굴착시 발생하는 지반진동은 일찍이 많은 민원의 대상이 되어 연구가 비교적 활발히 진행된 바 있고 여러 가지 예측 기법도 제시되어 있다. 본 연구에서는 기존의 예측 기법이 갖고 있는 단점으로서 진동의 주파수나 파형에 대한 정보를 제공하지 못한다는 단점을 보완하는 새로운 기법들을 개발하여 제시하였다. 주파수 특성과 파형의 정보는 구조물의 응답 특성을 분석하는 데 매우 중요한 정보이다.

기존의 환산거리 개념을 이용한 진동 예측방법을 보완하는 새로운 2종류의 모델은 시간영역에서 실제측자료를 이용한 모델링 기법(범용 S/W FLAC 이용)과 주파수영역에서 전달함수를 이용하는 기법 등이다. 개발된 모델은 현장적용으로서 서울 지하철 9공구 현장 인근 주요 지장물에 대한 영향평가에 이용된 바 있다.

또한 현장에서 쉽게 사용할 수 있도록 계측자료로부터 환산거리를 이용한 발파진동 예측식을 구하는 프로그램 개발하였으며 요청이 있을 경우 현장 보급용으로 제공할 예정이다.

건물해체와 암굴착시 발생하는 진동의 주된 차이는 전자의 경우 파괴된 부재가 지반에 낙하하면서 발생하는 충격진동이 수반된다는 것이다. 발파시 암반을 통해 전달되는 발파진동과 부재 충격시 발생하는 진동은 서로 다른 특성을 나타내며 구조물에 미치는 영향 정도도 다를 수 있다. 본 연구를 통해 발파에 의한 진동과 충격에 의한 진동을 구분하여 예측하고 평가할 수 있는 경험식을 도출하여 제시하였다.

기타 사항으로 1단계 연구기간중 국내 주요 석회암 지역(강원도 동해 및 삼척 지역), 고속철도경주구간 채석장 3개소, 청도-밀양의 안산암 지역 등에서 발파진동을 계측하여 자료를 확보하였으며 춘천 5층 아파트 해체시 발파 및 충격진동을 계측하였다.

2. 발파진동 예측기법

가. 개요

발파진동의 예측은 발파로 인한 진동이 어느 정도 발생될 것인지 혹은 발생한 진동이 인근 구조물에 어떤 영향을 미칠 것인지를 사전에 예측함으로써 발파의 가능 여부를 검토하고 또한 이를 설계에 반영함으로써 주변 구조물의 안정성을 확보하는데 그 목적이 있다.

기존에 발파진동의 예측을 위해 수행되어 오던 수치해석 기법들은 대부분 입력 발파하중으로 이론적인 계산식 및 경험식에 의해 추정된 압력곡선을 사용하고 있으며, 주로 단일공 발파를 기준으로 제안되었다. 시간에 따른 발파압력곡선 또한 간단한 사인파의 형태를 띠는 것으로 간주하는 것이 일반적이며, 다수의 공을 사용하는 터널발파를 모사함에 있어서도 굴착예정인 터널 주변장에 등가의 압력을 가하는 것으로 해석하는 것이 지금까지의 해석방법이었다. 또한 발파압력을 사용한 추정식들은 폭약에 의한 폭발상태를 이상적인 것으로 가정하고 폭발에너지를 구하는 것이 대부분이므로, 실제 폭발압력보다 높은 압력을 가지는 것으로 계산된다. 하지만 폭발로부터 발생하는 모든 에너지가 발파진동의 전달에 사용되는 것이 아니므로, 발파압력을 적절하게 감소시켜야 한다. 즉, 발생에너지의 대부분이 암석의 파쇄 및 균열발생에 사용되고, 구조물의 안정성에 영향을 미치는 발파진동의 발생 및 전달에 사용되는 에너지는 작은 부분을 차지한다. 여러 연구자에 의하여 지금까지 밝혀진 바로는 폭발에너지 중 탄성파의 전달에 사용되는 폭발에너지는 진동을 전달하는 암종 및 사용된 화약의 종류에 따라 다르지만 대체적으로 5~50%의 범위 내에 있는 것으로 알려져 있다.

이와 같은 사실로부터 실제 진동전달에 사용되는 폭발에너지를 정확히 추정하는 것은 거의 불가능하고, 발파압력의 지속시간 또한 폭약의 장전상태, 전색조건 및 암반조건 등에 따라 달라지는데 이를 단순한 사인함수 형태로 가정하여 해석하는 것은 다소 무리가 있다고 볼 수 있다.

결론적으로, 발파압력 추정식들을 사용하는 동해석은 가장 중요한 입력자료인 발파하중의 산정에 있어서 많은 문제점을 가지게 된다. 즉, 발파압력의 크기, 형태 및 지속시간을 정확하게 산정할 수 없다는 것이다. 그러나 동해석 대상에 따라 적절한 격자 크기 및 발파원의 주파수를 고려할 필요가 없으므로 복잡한 지층조건을 쉽게 모사할 수 있는 장점이 있다. 또한, 간단한 경험식으로 쉽게 발파압을 산정하여 설계단계에서 사전영향평가를 할 수 있는 기본자료를 제공할 수 있기 때문에 많이 사용되고 있다. 이에 본 연구에서는 발파압력을 이용한 기존의 해석방법과 발파진동

파형을 이용한 해석방법간의 차이점을 살펴보고자 한다. 이러한 검토를 통하여 어느 방법이 지반을 통한 진동전달을 제대로 모사할 수 있는지, 발파진동파형을 이용한 해석과 발파압력을 이용한 해석간의 차이점은 무엇인지 등을 실제 시추공 발파를 통해 지표면에서 측정된 진동파형과의 비교를 통하여 고찰함으로써, 발파해석을 위한 보다 타당한 해석방법을 제시하고자 한다. 아래의 Fig. 3.5.2.1은 현재 널리 사용되는 있는 발파압력을 사용하는 경우의 해석 개념도이다.

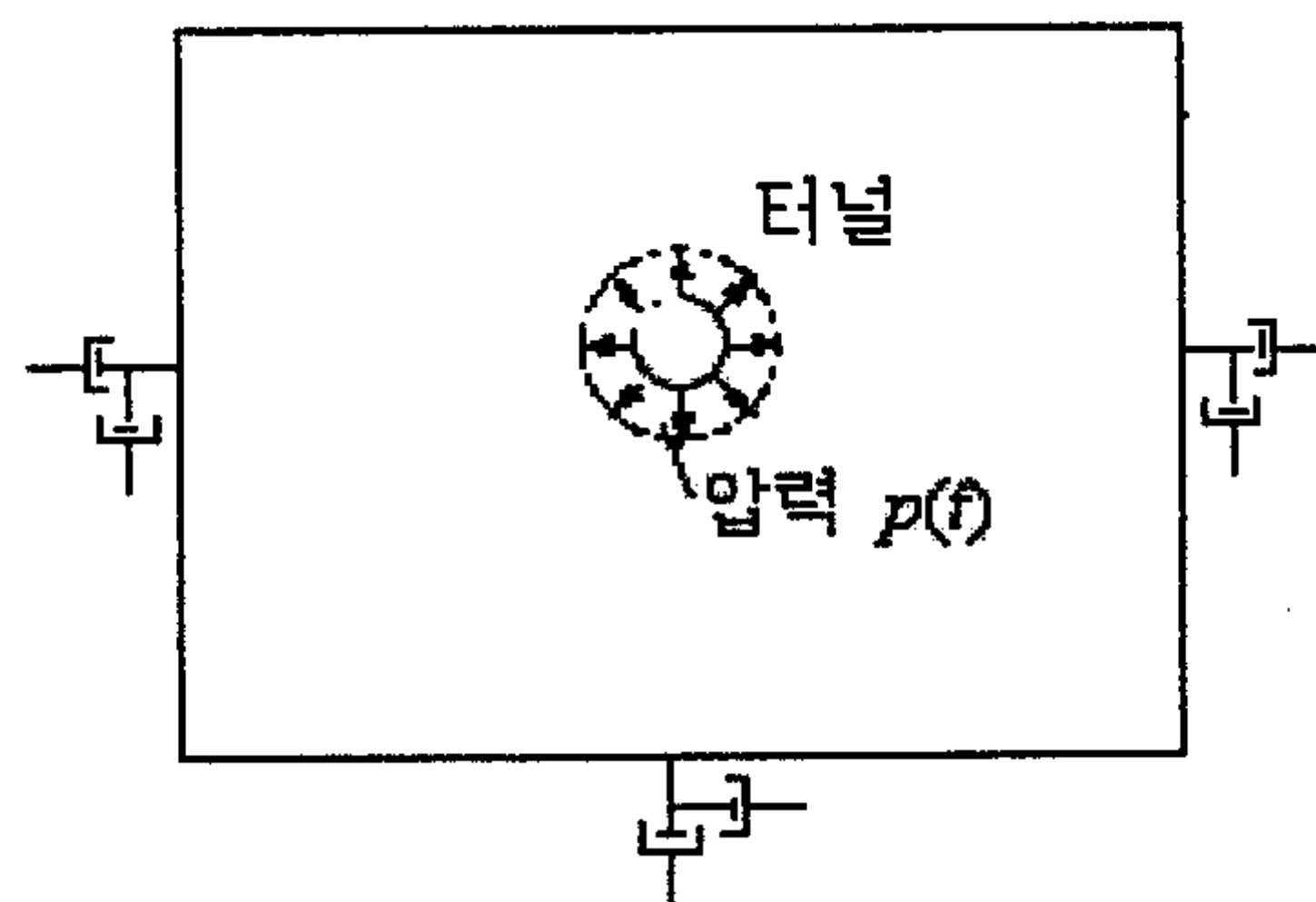


Fig. 3.5.2.1 기존의 발파압력을 사용한 동해석 모델

나. 진동파형의 추정 방법

이론식 및 경험식으로부터 구한 발파압력을 사용하는 방법은 동해석에서 매우 중요한 입력자료인 실제 발파압력 및 지속시간을 정확히 추정하기 어렵고, 발파로 인한 지반진동을 제대로 모사할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이런 문제점을 해결하기 위하여, 본 해석에서는 대상지역의 기반암에서 시추공 발파를 실시하고 이로부터 발파지점으로부터 충분히 이격된 지점에서 측정된 발파진동파형을 근거로 추정된 발파지점의 진동파형을 이용하였다. 이와 같이 발파진동파형을 수치해석의 입력자료로 이용하는 것이 단순한 발파압력을 사용하는 것보다 실제의 발파현상 및 지반진동을 더 정확하게 반영하게 된다. 그 이유는 구조물의 안정성을 평가하는 기준은 주로 지반의 진동속도를 근거로 하고 있으며, 입력자료인 발파진동파형은 발파진동이 전달되는 지반의 특성을 반영한 진동파형을 모사할 수 있기 때문이다. Fig. 3.5.2.2는 본 해석에서 적용될 발파진동파형을 이용한 동해석 개념도이다.

발파진동해석에 사용될 진동파형을 구하기 위하여 Fig. 3.5.2.3과 같은 단계별 해석을 실시하였다. 시추공 시험 발파의 수행시 발파지점으로부터 2m 이격된 지점에서의 발파진동을 정량적으로 추정하기 위하여 원거리 시추공에서 측정된 현지반의 발파진동을 대상지반의 흡수계수를 감안하여 근거리의 진동값으로 보정하였다. 발

파지점이 아닌 2m 이격된 지점에서의 값을 구한 이유는 발파로 인한 주변 암반의 소성영역 발생을 고려하여 순수히 진동파 전달에만 에너지가 소모되는 탄성구간으로 여겨지는 지점이기 때문이다. 이 경우 시추공 내부에 설치된 지오폰으로부터 획득된 자료는 경암층을 통과하여 전파된 탄성파이므로 지표 근처 풍화대의 영향을 받지 않았으며, 실제 발파 시공시에 기반암을 통해 전달되는 발파진동의 패턴과 유사할 것으로 판단된다.

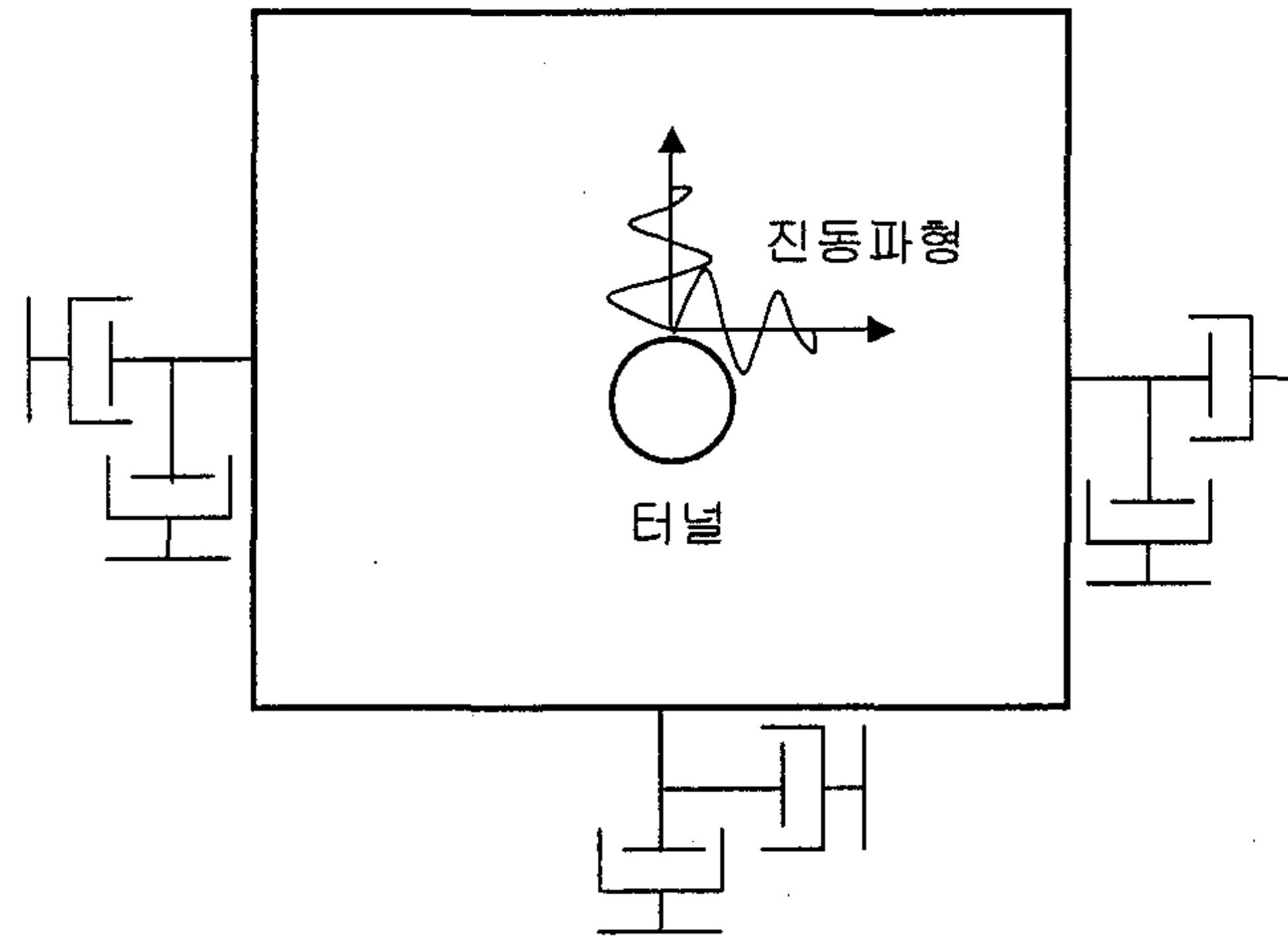


Fig. 3.5.2.2 발파진동파형을 사용한 동해석 모델

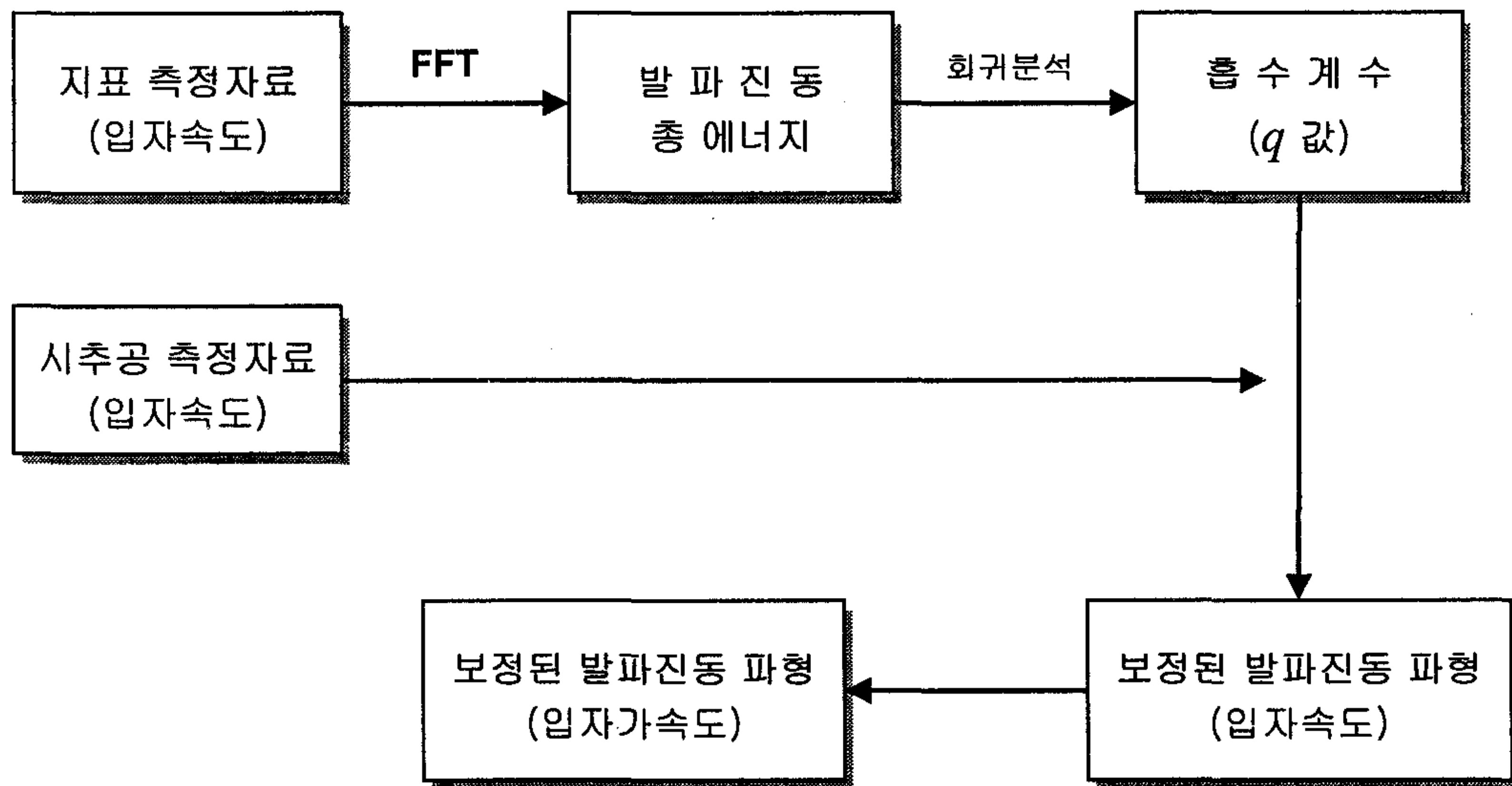


Fig. 3.5.2.3 흡수계수를 이용한 발파진동 파형의 보정 과정

발파진동파형의 추정은 시추공 내에서 입자속도로 측정된 발파진동파형을 흡수계수를 이용하여 거리에 대한 에너지의 감소량만큼 증폭시킨 후, 이를 수치미분 ($dt=25\times 10^{-6}$ sec)하여 가속도 파형을 구성하는 과정으로 이루어진다.

Fig. 3.5.2.4는 지표면에 설치된 각 수신기에서 측정된 진동속도 자료로부터 에너지를 거리별로 주파수 대역에서 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 대부분의 에너지가 400Hz 이내에서 분포하고 있으며, 특히 200Hz 부근에 집중되어 있음을 알 수 있다. Fig. 3.5.2.5는 시추공에서 획득된 입자속도 및 흡수계수를 이용하여 2 m 거리로 보정된 입자속도 파형(각 그래프의 위쪽)과 수치미분을 통해 변환된 2 m 거리에서의 입자가속도 파형(각 그래프의 아래쪽)을 도시한 것이다.

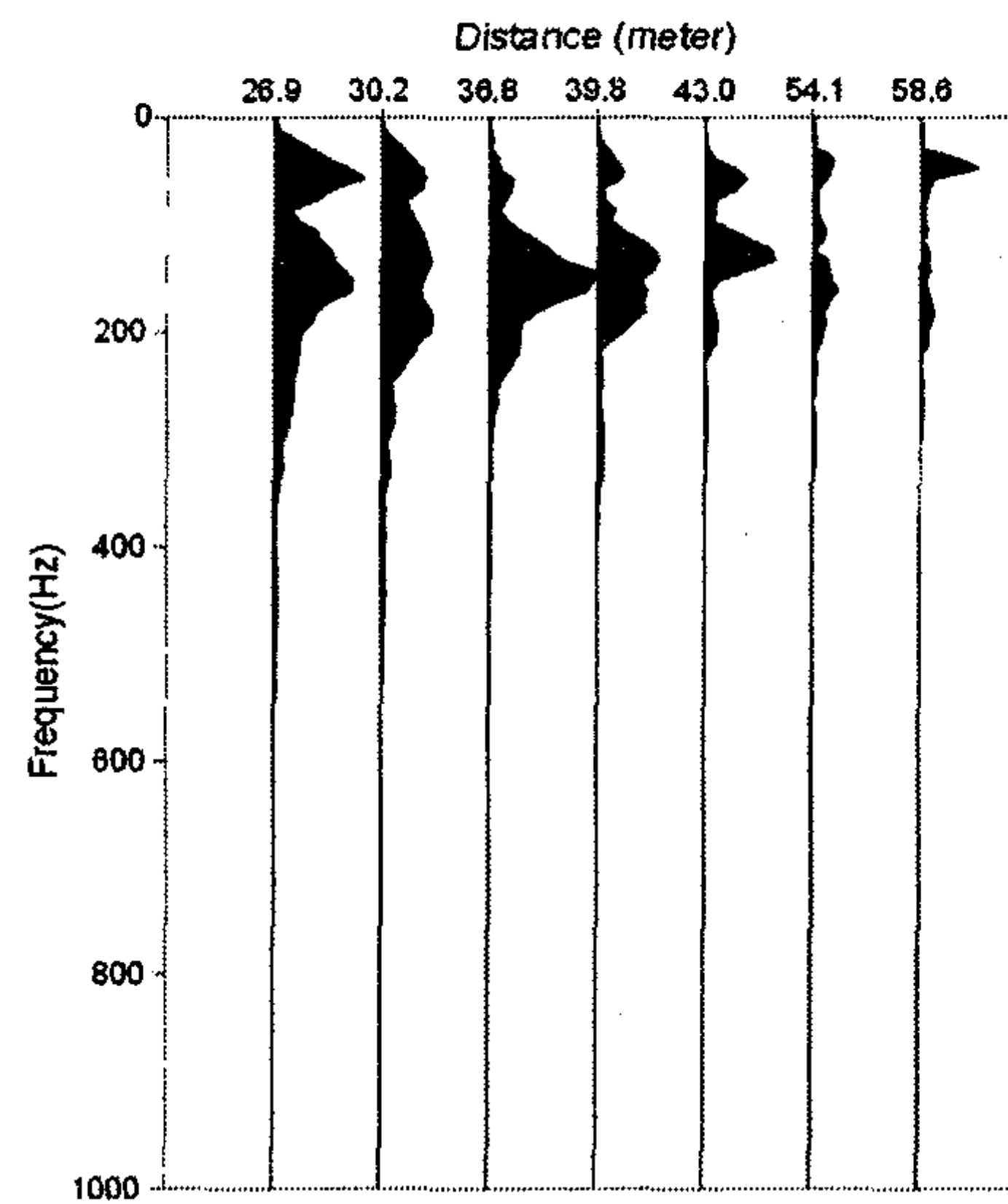
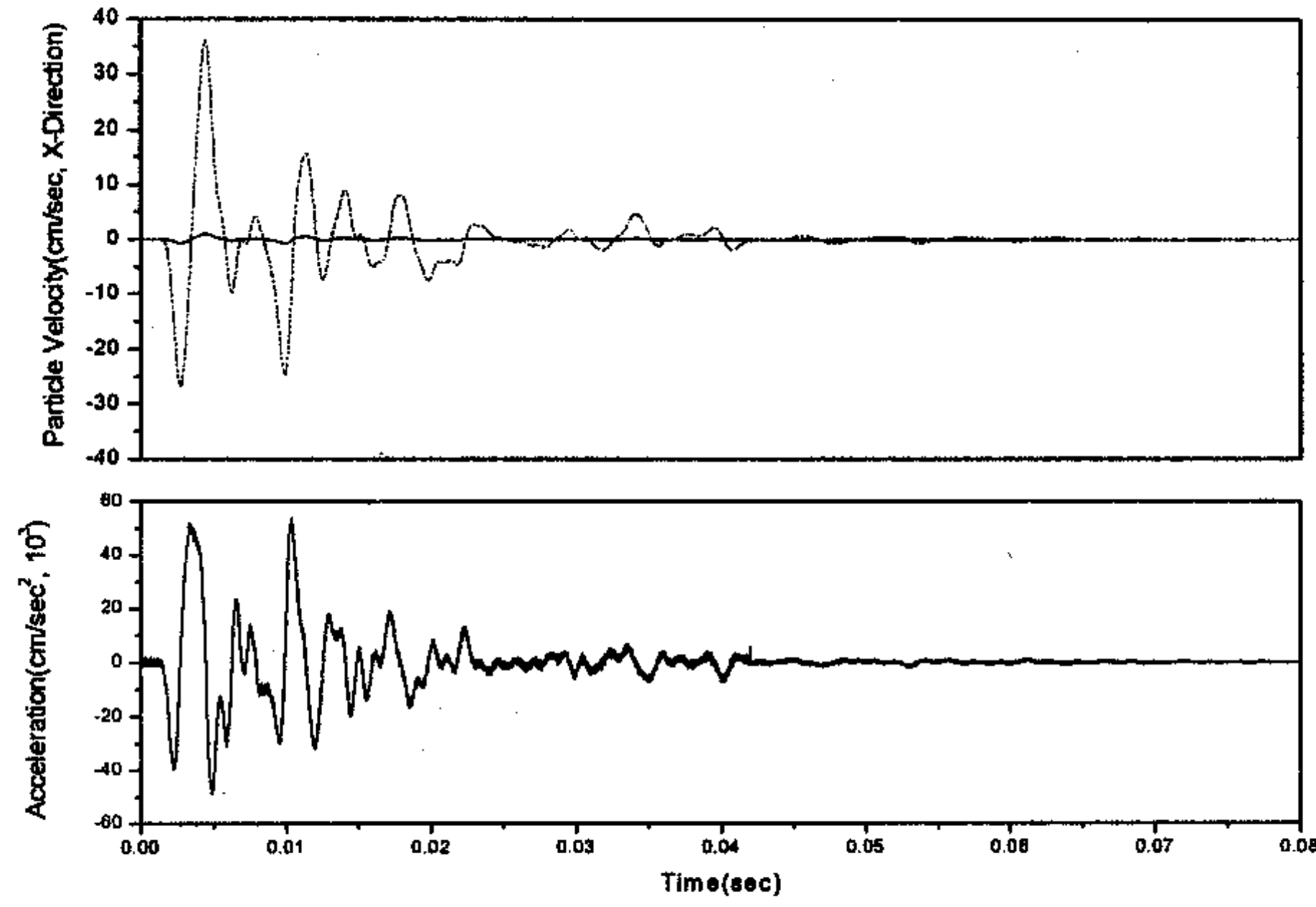
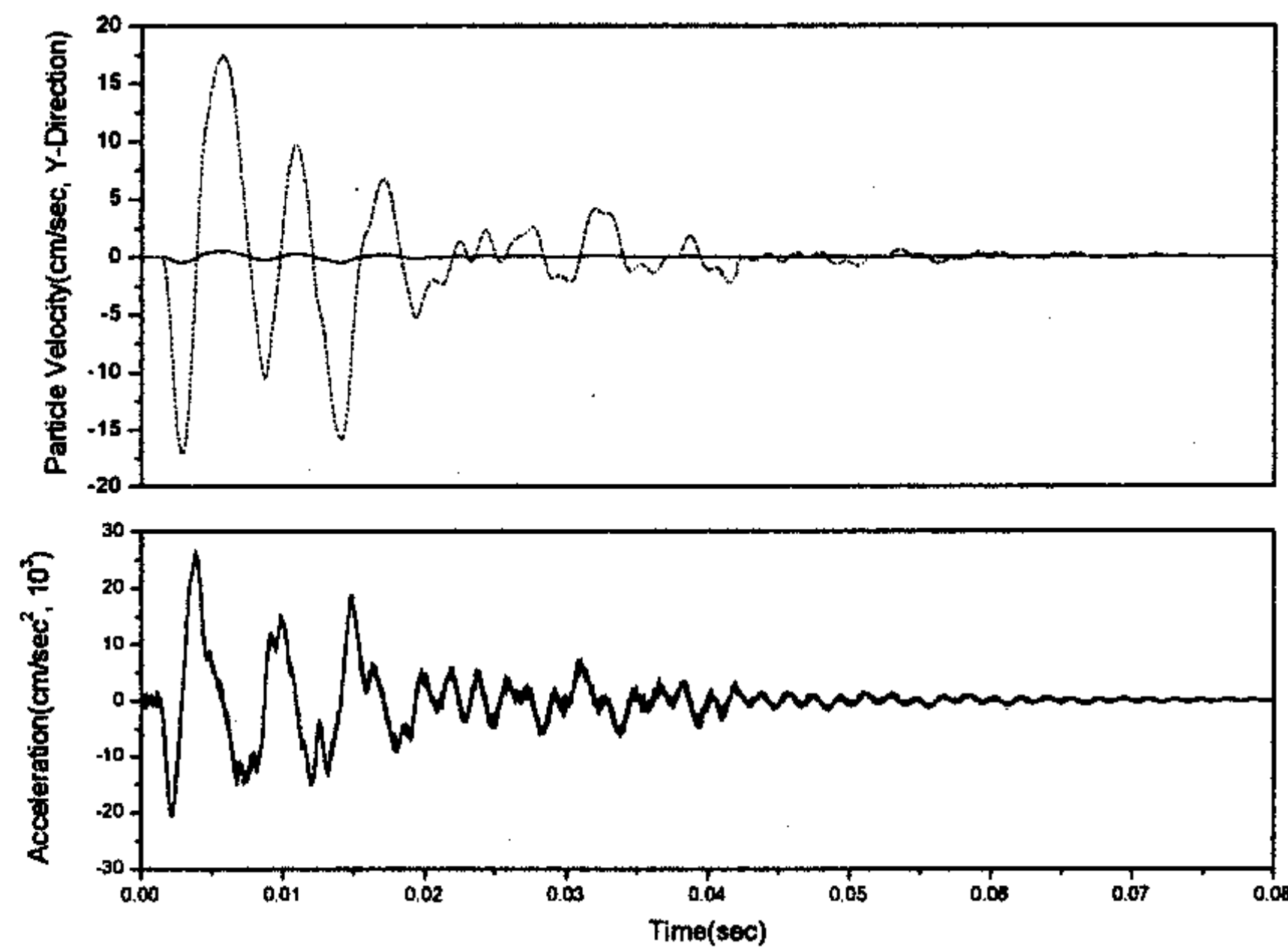


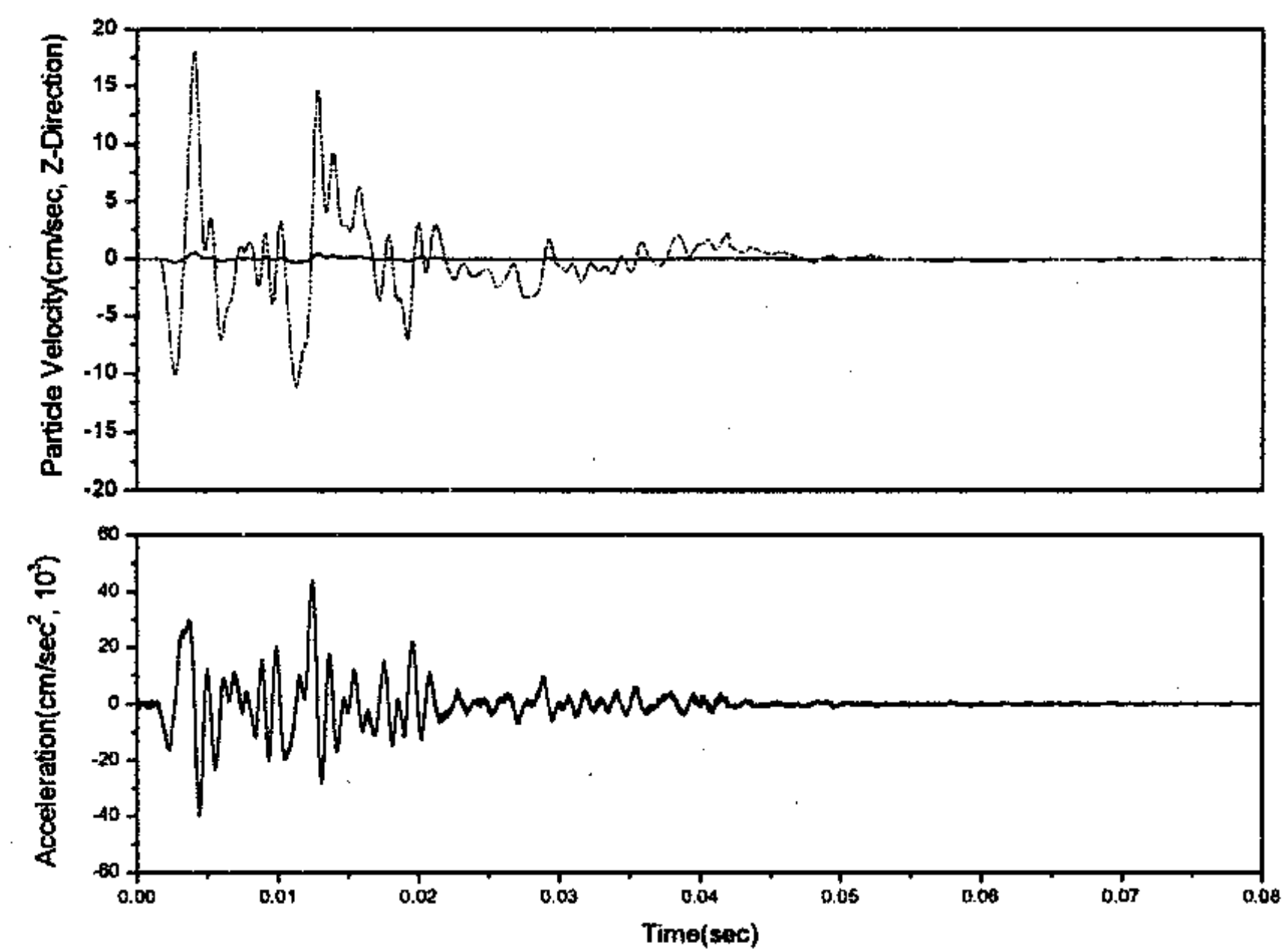
Fig. 3.5.2.4 주파수별로 도시된 입자속도의 에너지 분포



(A) 진행방향 성분(위 : 입자속도, 아래 : 입자가속도)



(B) 접선방향 성분(위 : 입자속도, 아래 : 입자가속도)



(C) 수직방향 성분(위 : 입자속도, 아래 : 입자가속도)

Fig. 3.5.2.5 2 m 거리로 보정된 발파진동의 파형

다. 시추공 시험발파 모델링

(1) 해석 모델

FLAC을 이용하여 동적 해석을 수행한 시험발파 과정은 Fig. 3.5.2.6과 같다. 시추공 내의 그림과 같은 위치에서 장약량 1.5 kg 및 0.75 kg으로 각 1 회씩 제 1, 2 발파를 실시하였으며, 100 ms의 시차를 가진 지연뇌관을 이용하였다. 발파진동은 지오폰을 이용하여 시추공 직상부의 지표면에서 일직선상으로 3~5 m 간격을 두고 측정하였으며, 발파지점으로부터 40 m 떨어진 주변 시추공의 한 지점(심도 27 m)에서도 기반암의 지반진동을 측정하기 위하여 지오폰을 설치하였다.

구성모델은 수치해석상의 대표적 지반모델인 탄성모델 및 Mohr-Coulomb 모델 중에서, 중첩이 가능하며 또한 본 해석이 인근 구조물의 영향평가에 필수적인 발파진동의 전달 및 지반진동속도에 주안점을 두고 있으므로 대상지반을 탄성모델로 가정하였다.

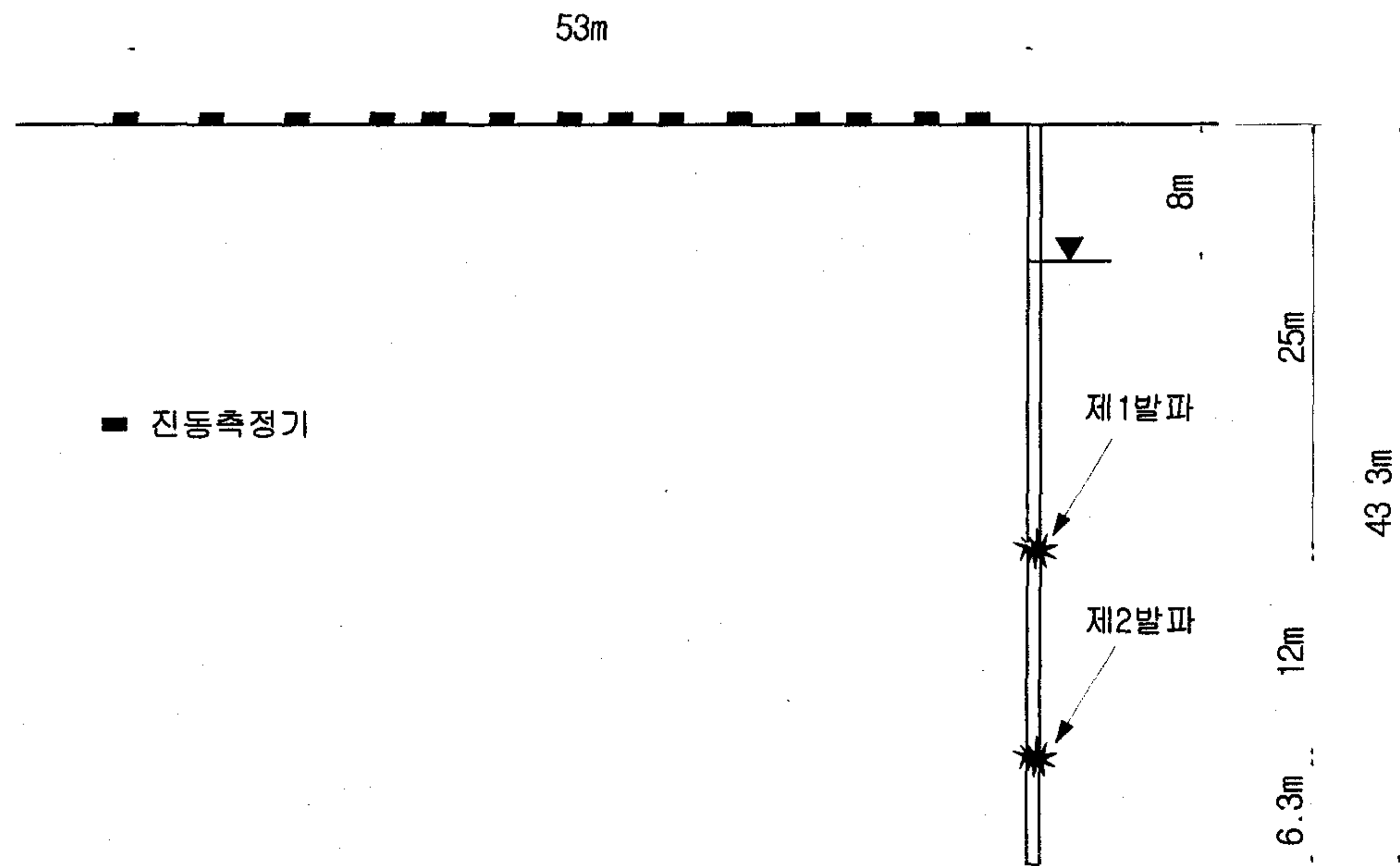


Fig. 3.5.2.6 시험발파 방법 모식도

(2) 해석 절차

FLAC을 이용한 발파진동 예측 동해석을 위해 아래에 도시된 Fig. 3.5.2.7의 과정을 거쳤다.

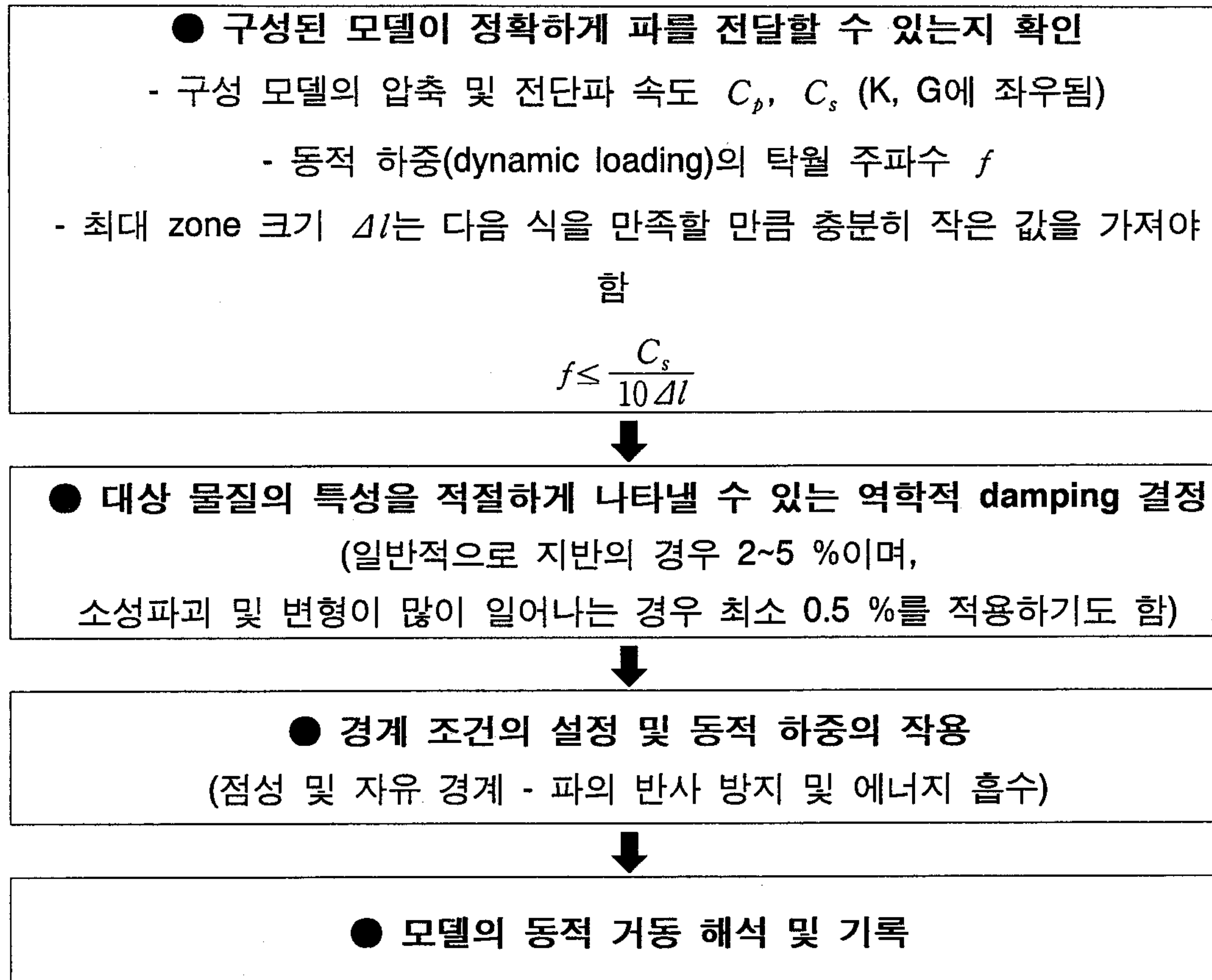


Fig. 3.5.2.7 FLAC을 이용한 동적 해석 과정

(3) 입력변수 산정

(가) 지반 물성

대상지역의 시추공 조사에 의하면, 심도 2 m까지 모래를 함유한 실트질 자갈로 구성된 매립층이 있으며, 그 하부는 모두 기반암인 호상흑운모편마암으로 구성되어 있다. 이들 지층에 대하여 실내시험 및 탄성과 시험으로 구한 각 층의 물성은 Table 3.5.2.1과 같다. 수치해석 과정에서 탄성모델을 가정하고 있으므로 탄성에 관련된 물성만 제시하였다.

평면파 조건(plane-wave condition)을 가정하면 매체를 지나는 P파 속도 및 S파 속도 C_p, C_s 는 지반의 체적 및 전단계수 K, G 와 다음과 같은 관계에 있다.

$$C_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

따라서 측정된 위치의 지반 밀도 및 P파, S파 속도로부터 K , G 를 구하고 이로부터 다음 식을 이용하여 지반의 동탄성계수 및 동포아송비 E , ν 를 추정할 수 있다.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

기반암의 동적 물성을 추정하기 위해 사용된 자료는 시추공 조사에서 경암층으로 판정된 부분의 탄성파 측정자료를 평균하여 구했으며, 그 값은 각각 $C_p = 4,810$ m/s, $C_s = 2,763$ m/s이다. 매립층의 동적 물성은 탄성파 측정자료와 같은 충분한 자료가 주어지지 못하였으므로 매립층도 단순히 기반암의 동적 및 정적 물성이 이루는 비를 따른다고 가정하여 정적 물성으로부터 산정하였다.

Table 3.5.2.1 각 층별 물성자료

물성		매립층	기반암층
밀도 (t/m^3)		1.80	2.65
영률 (GPa)	정적 계수	0.011	19.0
	동적 계수	0.038	51.5
포아송비	정적 계수	0.30	0.24
	동적 계수	0.31	0.25

(나) 기반암 내 해석 격자의 크기

일반적으로 FLAC을 이용한 동적 해석에서 반사파의 영향을 고려하지 않는다면 요소의 최대 크기를 결정할 때 P파 속도를 주된 기준으로 볼 수 있다. 본 해석에서 기반암의 탄성파 속도는 각각 $C_p = 4,810$ m/s, $C_s = 2,763$ m/s이며 폭원의 탁월 주파수(predominant frequency) 범위는 200 Hz 부근이므로, 최대 요소 크기는

$$\Delta l \leq \frac{C_p}{10f} \approx 2.4 \text{ (m)}$$

가 된다. 본 해석에서는 이보다 작은 1m를 최대 요소 크기로 설정하였으며, 이러한 크기는 S파 속도를 기준으로 한 경우도 만족시킬 수 있을 만큼 작은 크기이다.

(다) 기반암의 damping 계수 결정

기반암의 damping 계수는 기반암층 이외의 다른 매체를 지나지 않은 파에 대한 자료를 이용하여 구할 수 있으므로 이를 위해 발파지점으로부터 40 m 떨어진 시추

공(심도 27m)에서 측정된 입자속도와 수치해석 결과를 비교하였다.

Table 3.5.2.2 기반암을 지난 파의 측정결과 및 수치해석결과

최대 입자속도	측정결과 (cm/s)	Damping 고려 (cm/s)				
		0 %	0.5 %	1 %	2 %	5 %
수직(V)	0.52	2.24	1.11	0.77	0.47	0.27
진행(L)	1.05	3.01	1.30	0.88	0.60	0.39
벡터합	1.17	3.76	1.70	1.16	0.76	0.47

측정된 최대 입자속도와 해석결과를 살펴보면 damping을 전혀 하지 않은 경우에는 입자속도가 과대하게 평가되었으나 2, 5% damping을 설정한 경우에는 지나치게 많은 감쇠가 일어났음을 볼 수 있다. 0.5% damping의 경우에는 수직 및 진행성분별 입자속도의 해석결과가 측정결과보다 크므로 이 감쇠계수를 해석에 이용한다면 보다 안전한 측면이 될 수 있으나, 수직성분 입자속도의 경우에는 2배 이상의 차이가 나며 두 성분의 최대 입자속도로부터 구한 벡터합도 상당히 크다. 이에 비하여 1% damping을 적용한 경우에는 진행방향의 최대 입자속도가 측정치의 84%로 작게 평가되었으나 수직 입자속도는 측정결과에 가까우며 벡터합은 거의 일치하는 것으로 나타났다.

본 동해석에서 최대 입자속도는 각 성분별 비교보다 벡터합을 이용한 비교가 더 적절하며, 또한 각 성분별 최대 입자속도로부터 구한 벡터합은 동일 시간의 성분별 입자속도의 벡터합보다 안전측에 가까우므로 기반암만을 지나온 파를 해석하고자 하는 경우 1% damping계수를 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

(4) 발파진동식 추정

(가) 시험발파를 통한 발파진동식

시험발파를 통한 발파진동식은 진동속도(최대벡터합, PPV)와 수직성분에 대한 진동가속도에 대해 추정하였으며, 회귀분석 결과는 Table 3.5.2.3과 같다. 회귀분석 결과 진동속도(벡터합, PPV)에 대해 0.94, 수직성분의 진동가속도에 대해 0.85의 매우 높은 상관관계를 보이고 있다. 회귀식의 환산거리는 상관계수가 높으며, 전반적으로 높은 안전율을 줄 수 있는 자승근 환산거리를 이용하였다. Fig. 3.5.2.8에는 진동속도의 회귀분석 결과를 도시하였다.

Table 3.5.2.3 발파진동식의 회귀분석 결과

구 분	회 귀 식	비 고
진동속도 (PPV, cm/sec)	$V(50\%) = 225.51(SD)^{-1.67}$	R=0.94 SD : 자승근환산거리
	$V(95\%) = 326.12(SD)^{-1.67}$	
진동가속도 (수직성분, g)	$A_V(50\%) = 487.03(SD)^{-1.98}$	R=0.85 SD : 자승근환산거리
	$A_V(95\%) = 1019.04(SD)^{-1.98}$	

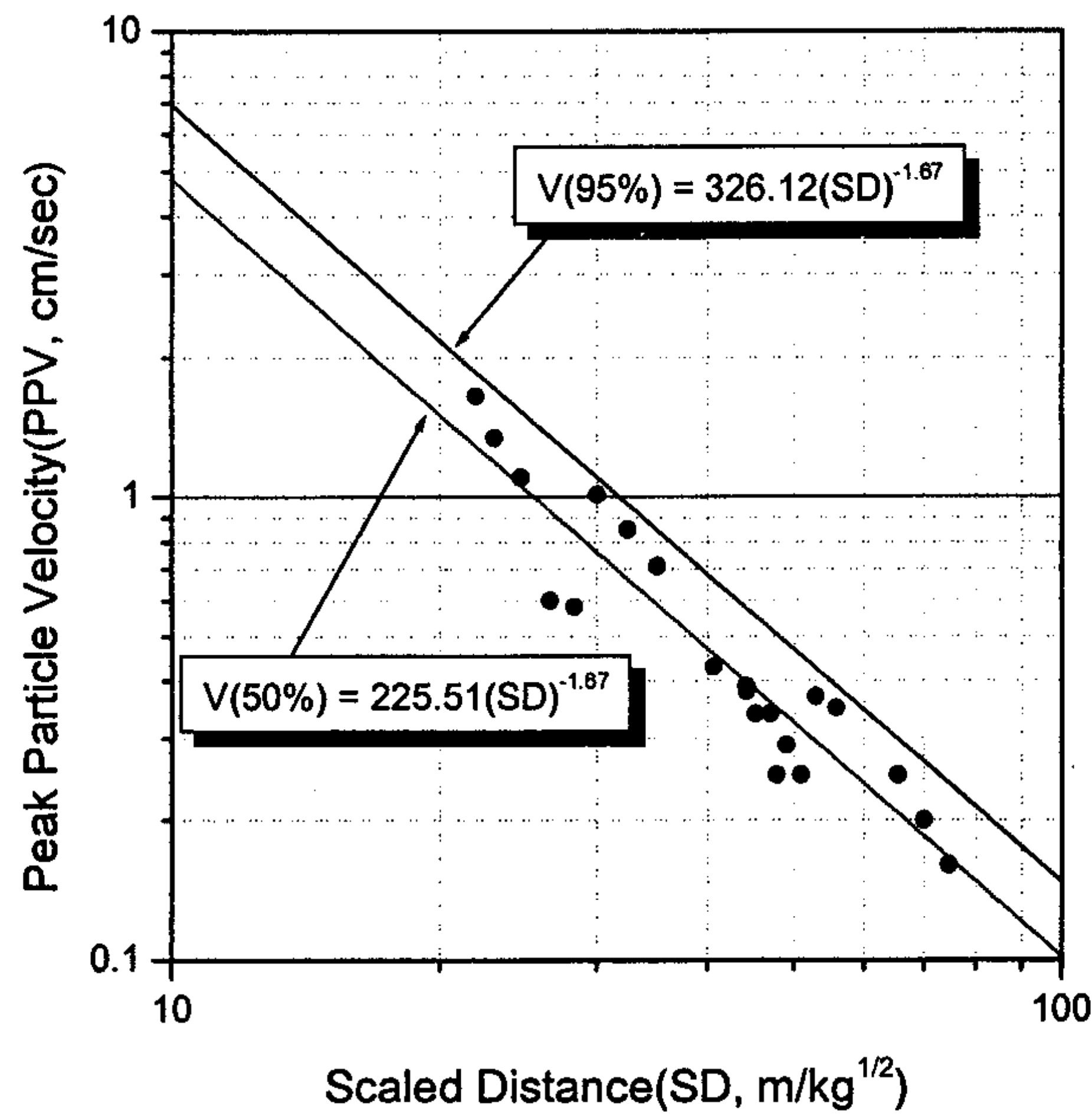


Fig. 3.5.2.8 발파진동속도(벡터합, PPV)의 회귀분석(R=0.94)

(나) 동해석을 통한 발파진동식

① 전체지반을 기반암으로 가정한 경우

기반암층보다 매립층이 매우 작아서 damping 계수를 적절히 조절하여 매립층의 영향을 반영할 수 있다는 가정 하에 해석의 신속성과 편의를 위해 기반암만으로 모델을 구성하고 제 1 발파를 모사하였으며, 그 결과는 다음 Fig. 3.5.2.9와 같다.

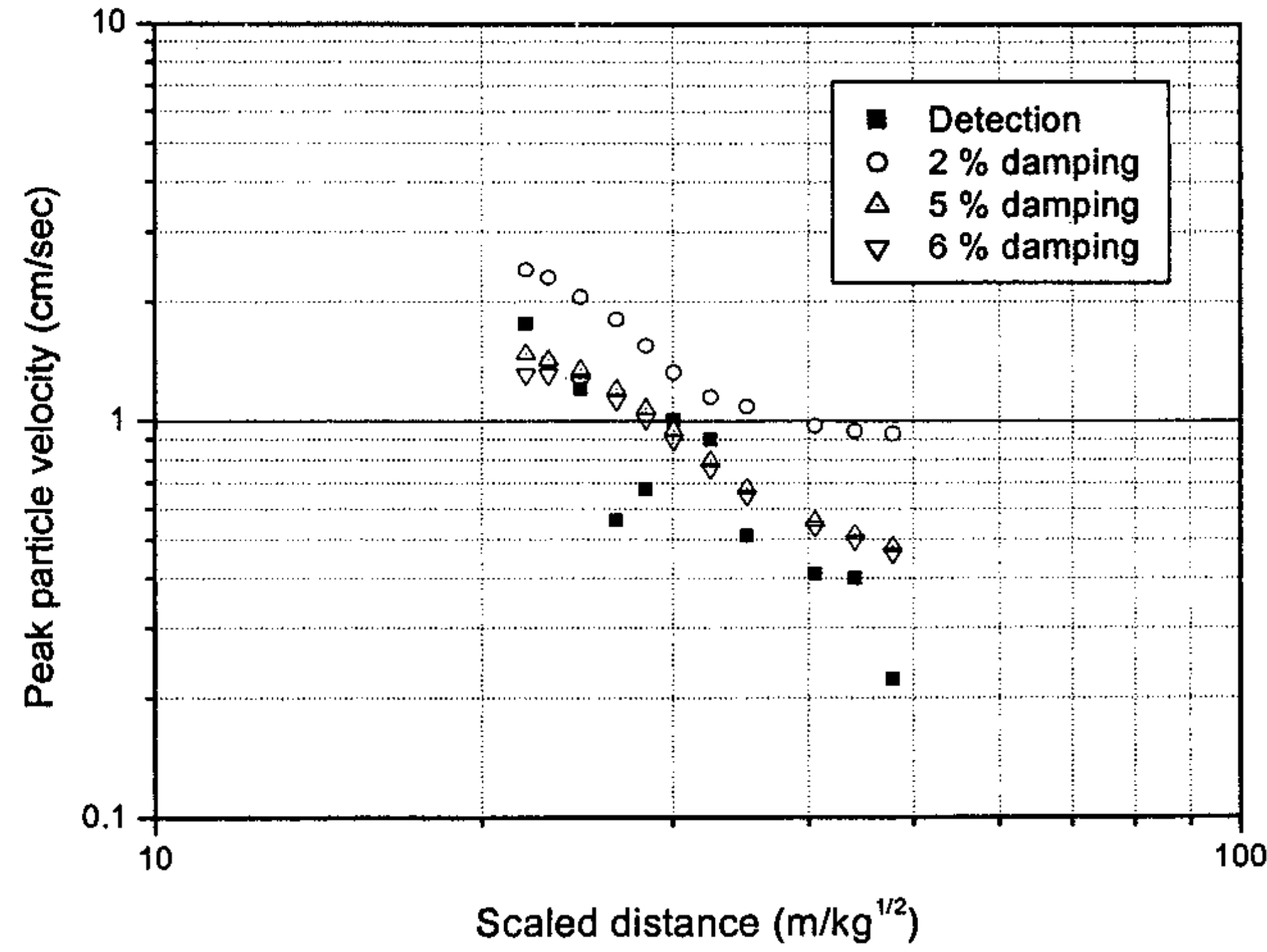


Fig. 3.5.2.9 제 1 발파의 측정결과와 damping 크기별 해석결과 비교

해석결과를 살펴보면 그림에서 알 수 있듯이 5%보다 작은 damping 계수를 적용한 경우 전체적으로 측정결과보다 최대 입자속도가 크며, 5%부터 측정값에 유사한 결과를 얻을 수 있다. 그리고 5%보다 크게 damping 계수를 적용하여도 해석결과에 큰 차이가 발생하지 않는다. 일반적으로 지반의 역학적 damping 계수의 범위가 5%를 넘지 않는다는 점과 5% damping 해석결과가 대체적으로 측정결과보다 안전측에 있다는 점도 함께 고려하여 시험발파의 해석모델로서 적절하다고 판단된다. 두께 2m의 매립층에 의한 입자속도의 감소는 기반암만을 지나는 파의 감쇠 정도인 1%보다 훨씬 큰 5%를 적용함으로써 해석에 반영되는 것으로 본다.

Fig. 3.5.2.10의 지표면 측정결과를 볼 때 제 2 발파의 폭원은 제 1 발파의 폭원과 형태가 매우 유사하며 단지 입자속도의 크기에만 영향을 미친다고 볼 수 있다. 따라서 5% damping에 의한 최대 입자속도로부터 구한 회귀식이 아래와 같을 때 장약량이 0.75 kg으로 1/2 감소함으로써 입자속도는 0.60배가 된다고 볼 수 있다.

$$V(50\%) = 200.0(SD)^{-1.58}$$

제 2 발파의 폭원을 상기 식에 따라 가정하여 해석한 결과는 Fig. 3.5.2.11과 같다.

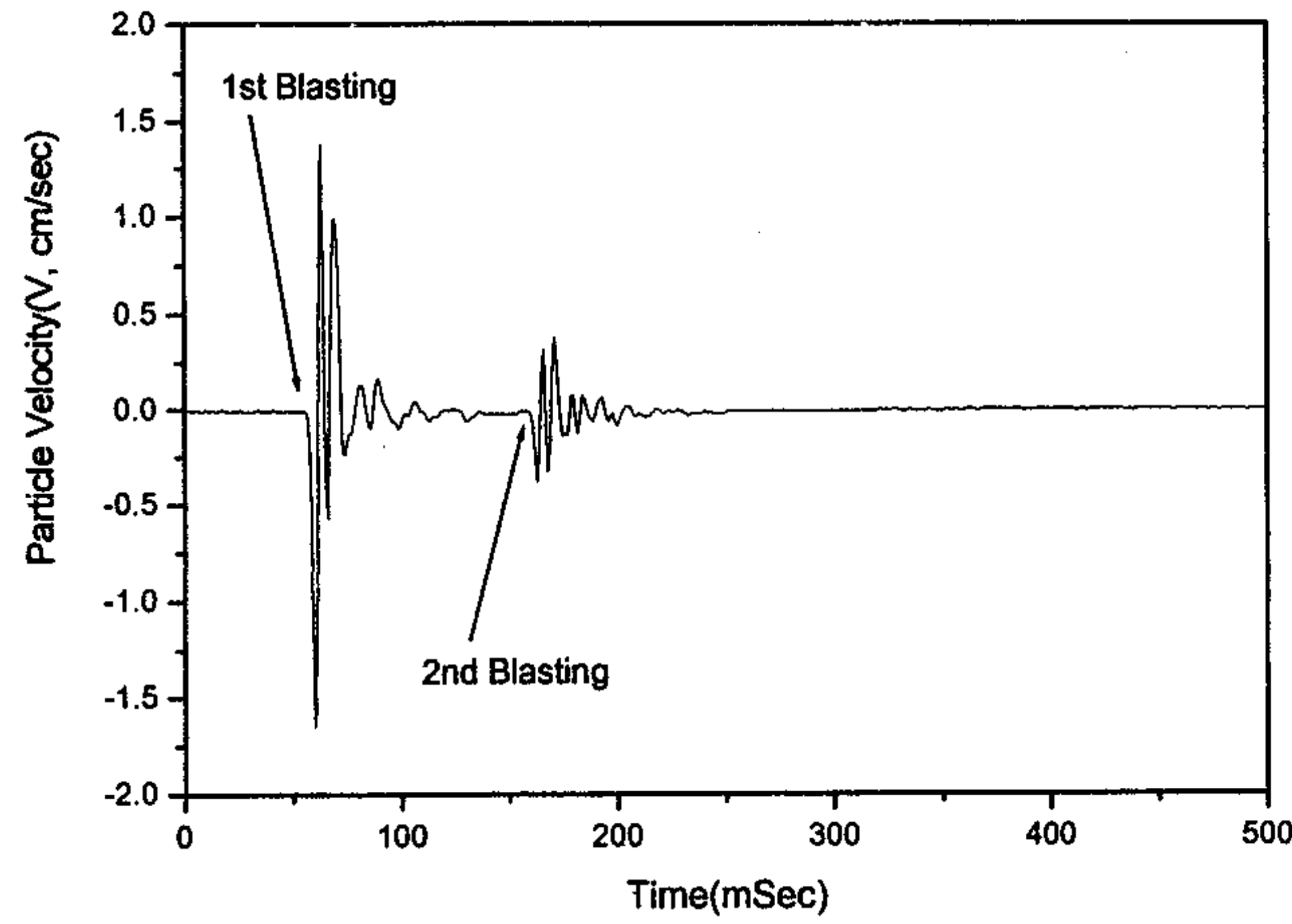


Fig. 3.5.2.10 수평거리 10 m에서 측정된 발파진동의 수직방향성분

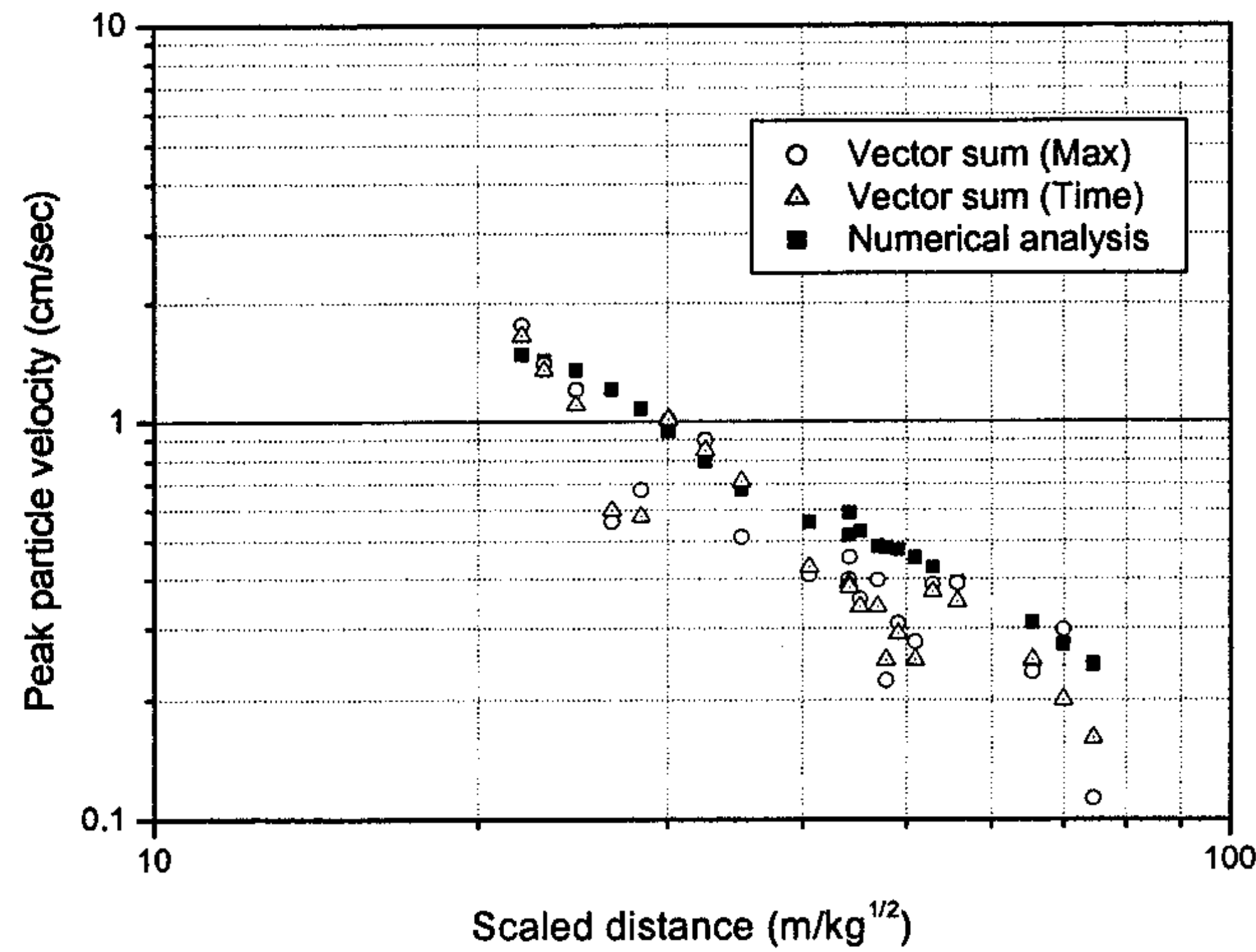


Fig. 3.5.2.11 발파 측정결과와 수치해석 결과 비교

그림에서 Vector sum (Max)는 측정속도의 진행성분(L) 및 수직성분(V)의 각 방향별 최대값을 이용한 벡터합이며, Vector sum (Time)은 측정속도의 수평(T) 및 진행성분, 수직성분을 모두 고려한 시간별 벡터합의 최대값을 의미한다. 전자는 2차원 수치해석이 수평성분을 고려하지 못하고 진행 및 수직성분만을 고려하기 때문에 측정결과와 직접적으로 비교할 수 없으므로 도입하였으며, 후자는 실제 발파에 대한 회귀식 산정에 이용된다. 그림에서 보는바와 같이 대부분의 측정결과가 해석 결과보다 작으며 대체적으로 유사한 경향을 보인다. 환산거리가 증가해 감에 따라

실제 측정 입자속도는 기반암내의 절리 및 제 1 발파에 의한 기반암의 파쇄 등과 같은 불연속적 특성의 영향을 받아 비교적 많이 감소하는 반면, 탄성 모델을 가정하고 수행한 해석결과는 그러한 특성이 반영되지 못하고 선형적인 결과를 제시한다. 그러나 그 차이가 크지 않으며 안전측에 있기 때문에 합리적인 해석이 가능할 것으로 판단된다. Fig. 3.5.2.12, 3.5.2.13 및 Table 3.5.2.4에 각각 측정 및 해석결과의 50, 95% 회귀결과를 제시하였다.

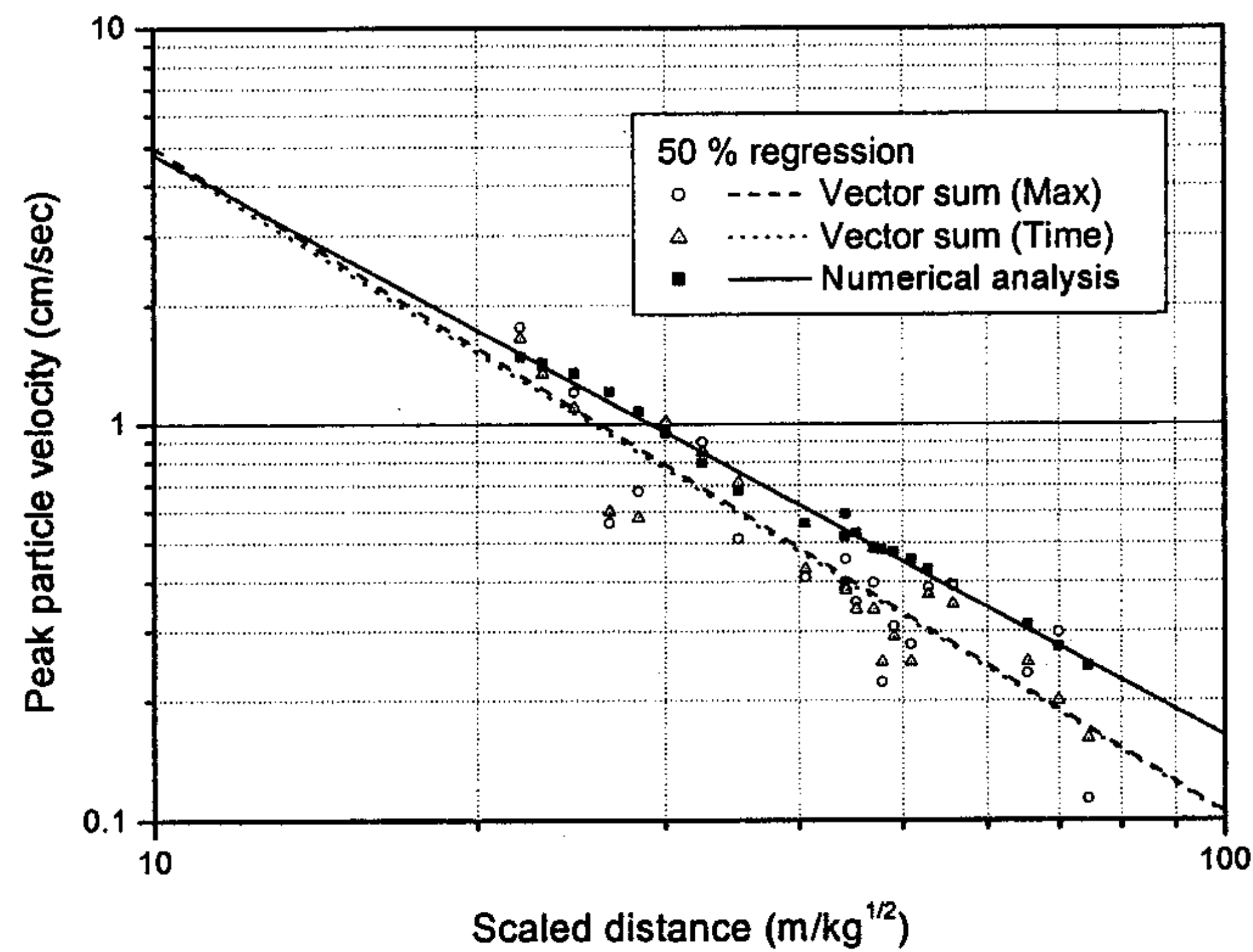


Fig. 3.5.2.12 측정 및 해석결과의 50% 회귀결과

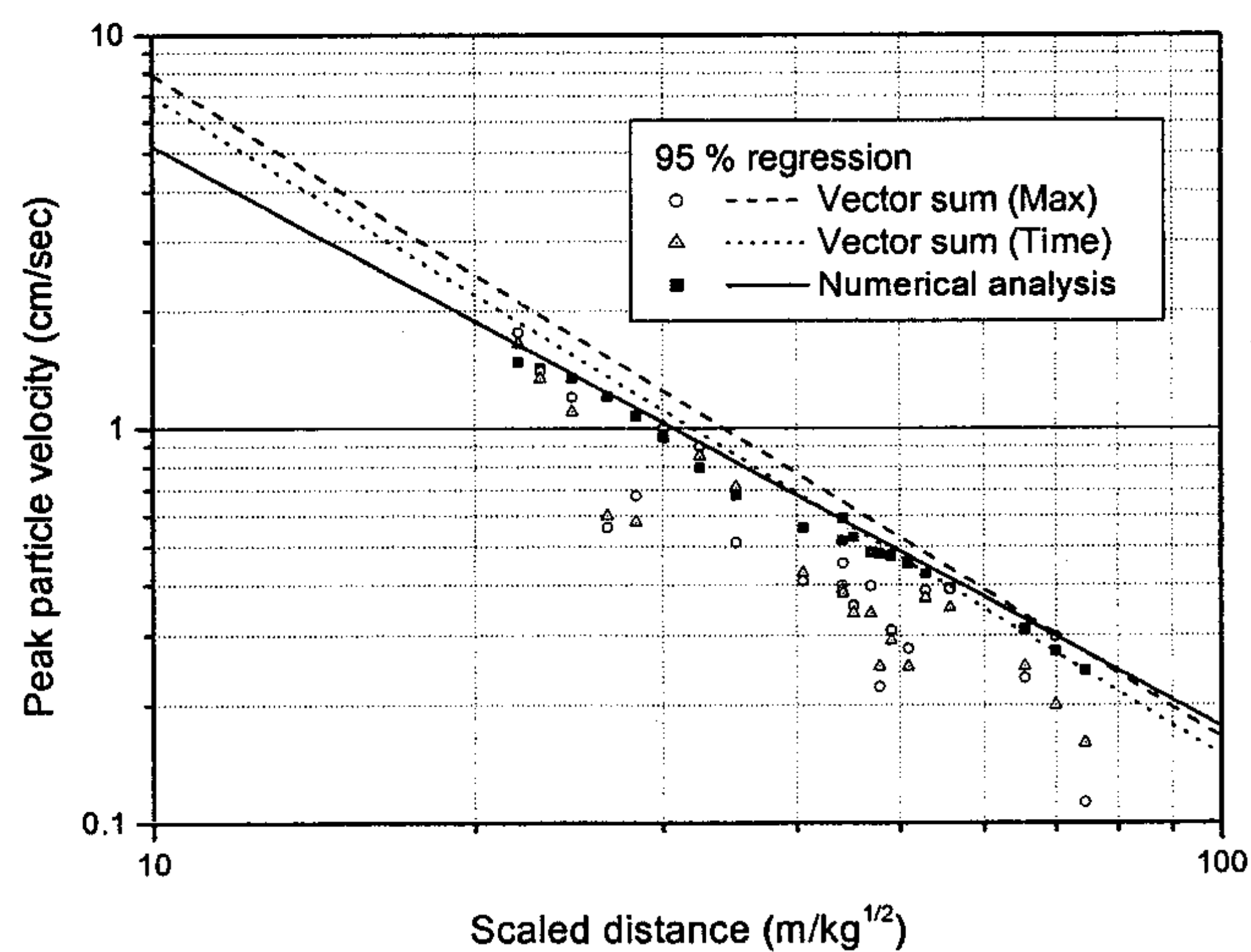


Fig. 3.5.2.13 측정 및 해석결과의 95% 회귀결과

Table 3.5.2.4 50 및 95 % 회귀결과

구 분	회귀식
측정속도의 진행 및 수직성분의 각 방향별 최대값의 벡터합	$V(50\%) = 239.0(SD)^{-1.68}$
	$V(95\%) = 378.5(SD)^{-1.68}$
측정속도의 수평, 진행 및 수직성분을 고려한 시간별 벡터합의 최대값	$V(50\%) = 225.5(SD)^{-1.67}$
	$V(95\%) = 326.1(SD)^{-1.67}$
수치해석 (진행 및 수직성분의 각 방향별 최대값)	$V(50\%) = 141.4(SD)^{-1.47}$
	$V(95\%) = 153.6(SD)^{-1.47}$

Fig. 3.5.2.12에서 보는바와 같이 세 가지의 회귀식 중에서 진행 및 수직성분의 각 방향별 최대값의 벡터합과 수평, 진행 및 수직성분을 모두 고려한 시간별 벡터합의 최대값을 회귀한 결과는 50% 신뢰도의 경우 매우 유사하며, 기울기를 고정하고 y 절편을 이동하여 구한 95% 신뢰도의 경우에는 전자가 조금 크다. 반면, 수치해석 결과는 기울기의 차이로 인해 두 회귀직선 위쪽에 위치하며 분산이 상대적으로 작기 때문에 95% 신뢰도의 경우에도 많이 이동하지 않았으나 대부분의 측정결과보다 위쪽에 있어 안전측에 해당된다. 명확한 비교를 위해 수치해석을 이용하여 구한 50, 95% 신뢰도의 회귀식과 측정결과를 Fig. 3.5.2.14에 나타내었다. 모든 측정결과를 포함할 수 있는 회귀식을 산출하기 위해서 수치해석 결과를 이용한 회귀식의 기울기는 그대로 유지한 채 y 절편을 Vector sum (Max)과 Vector sum (Time)의 y 절편 중에서 큰 값과 같게 하는 방법이 제안될 수 있으며, 그 결과를 Fig. 3.5.2.14에 conservative로 표현하여 나타내었다.

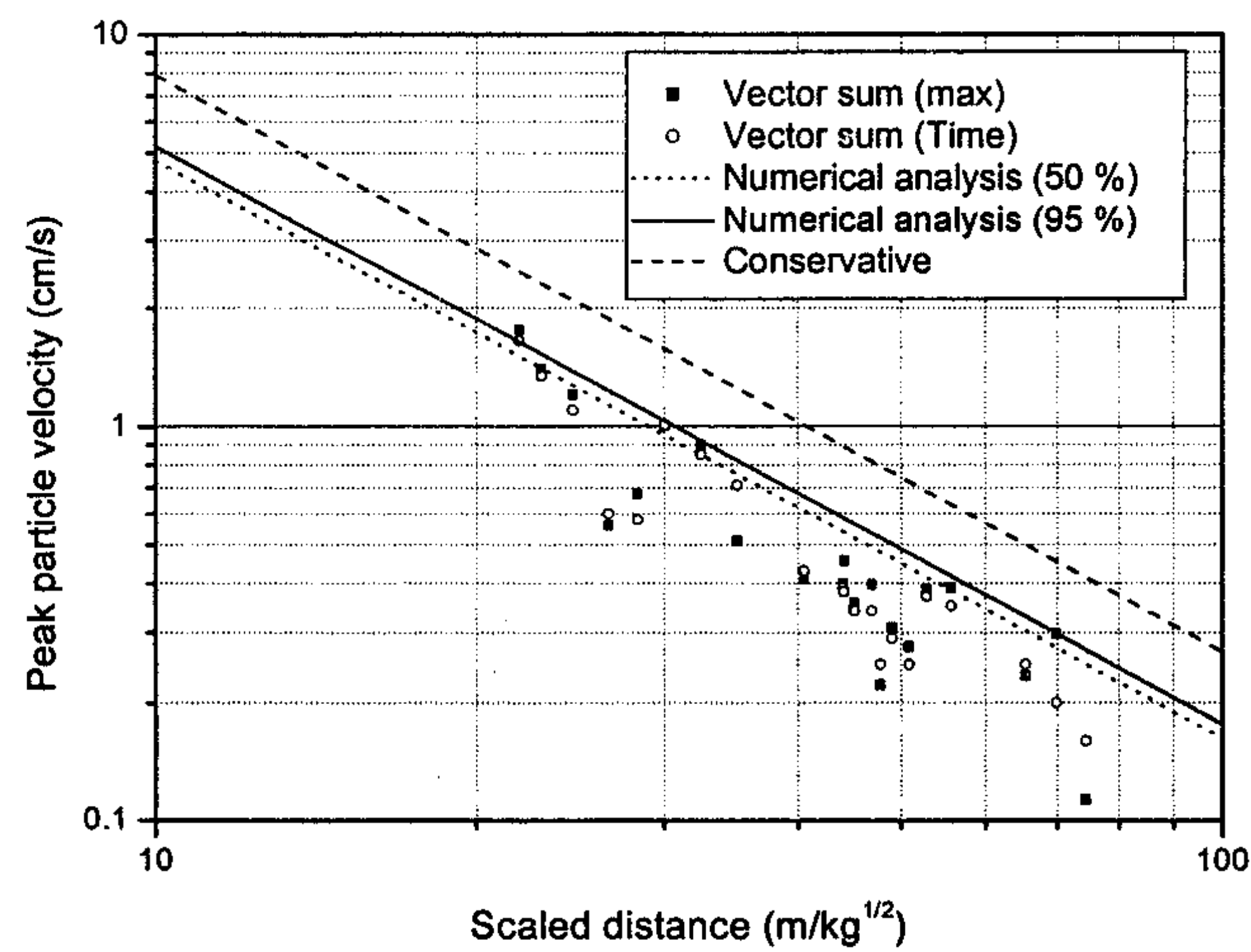


Fig. 3.5.2.14 수치해석 결과의 50, 95% 신뢰도 회귀곡선

Fig. 3.5.2.14로부터 2차원 수치해석을 수행하여 구한 95% 신뢰도의 회귀곡선은 측정결과의 2차원 자료만을 고려한 경우뿐만 아니라, 3차원 측정결과의 모든 자료도 대부분 포함하고 있음을 알 수 있다. y 절편을 이동하여 모든 자료를 포함하는 방법은 이 경우에 있어 최대 입자속도를 지나치게 과대평가할 가능성이 있다. 따라서 기반암만으로 모델을 구성하고 기반암층보다 상대적으로 얇은 2 m의 매립층은 기반암의 감쇠 정도인 1%보다 큰 5%를 적용하여 매립층내의 감쇠를 반영하였을 때, 95% 신뢰도의 회귀식을 이용하여 발파식을 선정한다면 보다 안전측에 가깝고 합리적인 해석을 수행할 수 있을 것으로 여겨진다.

② 기반암 + 매립층 2 m로 지반을 구성한 경우

대상지역의 실제 지층조건에 가까운 모델을 구성한 해석을 수행하기 위해서 매립층에 해당하는 심도 2 m까지 Table 3.5.2.1에 제시된 매립층(자갈층) 물성을 적용하였다. 이러한 경우 요소의 크기에 따라 진동파의 전달이 영향을 받을 수 있으므로 주어진 물성으로부터 추정된 P, S파 속도 및 폭원의 주파수에 기초하여 요소의 최대 크기를 0.2m로 선정하였으며, 각 damping 계수별 해석결과는 Fig. 3.5.2.15와 같다.

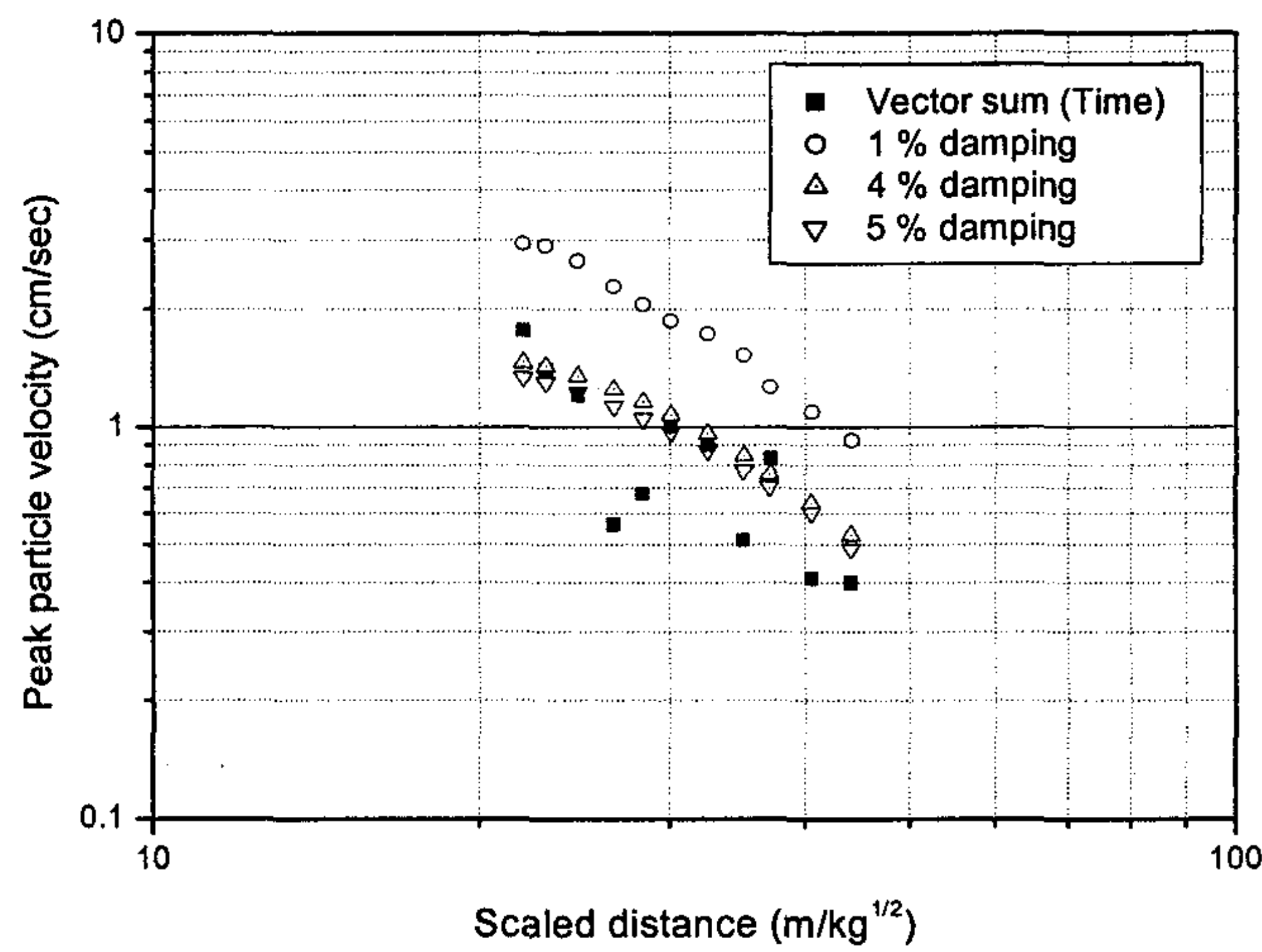


Fig. 3.5.2.15 매립층을 모사한 모델의 수치해석 결과

해석결과에서 알 수 있듯 기반암의 감쇠 계수인 1%를 적용하면 최대 입자속도가 크게 평가되며, 4% 및 5%에서 측정결과에 근접한다. 그러나 기반암만을 모사하여 해석한 결과와 달리 5% damping의 경우 측정결과보다 작게 평가된 지점이 많으며

(2지점 증가), 이러한 결과로부터 매립층으로 모사된 부분에서 설정된 damping 이의에 더 많은 감쇠가 추가적으로 발생하였음을 알 수 있다. 따라서 본 해석에서는 매립층에서도 추가적인 감쇠가 일어날 수 있으므로 전체적인 감쇠 계수는 4%가 적합한 것으로 판단된다.

앞의 과정과 동일하게 제 1 발파의 회귀식으로부터 장약량과 최대진동크기의 비를 구하여, 제 2 발파를 모사(발파 위치에 제 1 발파 폭원의 입자속도 0.607배를 적용)하였으며, 그 결과는 다음 Fig. 3.5.2.16과 같다.

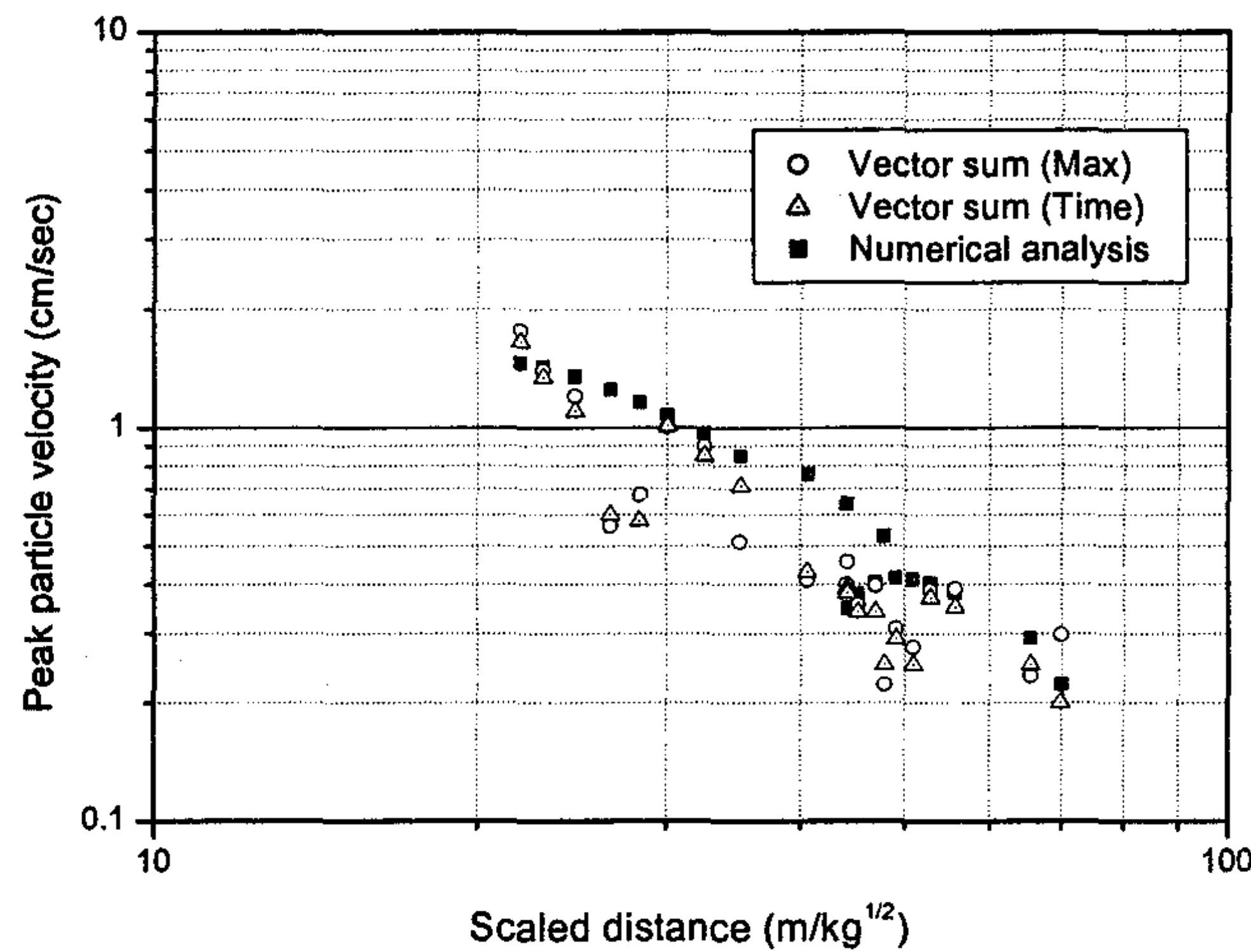


Fig. 3.5.2.16 발파 측정결과와 수치해석 결과 비교 (매립층 포함)

해석결과를 살펴보면 측정결과와 수치해석 결과가 대체적으로 유사한 형태를 띠고 있음을 알 수 있다. 제 2 발파 부분의 일부 자료가 선형적인 형태에서 벗어나 있으나 해석결과는 측정결과에 매우 근접해 있다. 기반암과 5% damping으로 모사하였을 때 환산거리가 증가함에 따라 실제 측정 결과보다 안전측에 가까운 값을 보였던 반면, 매립층이 포함된 본 해석은 환산거리가 큰 쪽에서도 측정결과에 유사한 값을 보였다. 해석결과의 50, 95% 신뢰도 회귀곡선은 다음과 같으며, 측정결과와 함께 Fig. 3.5.2.17에 제시하였다.

$$V(50\%) = 284.1(SD)^{-1.66}$$

$$V(95\%) = 370.5(SD)^{-1.66}$$

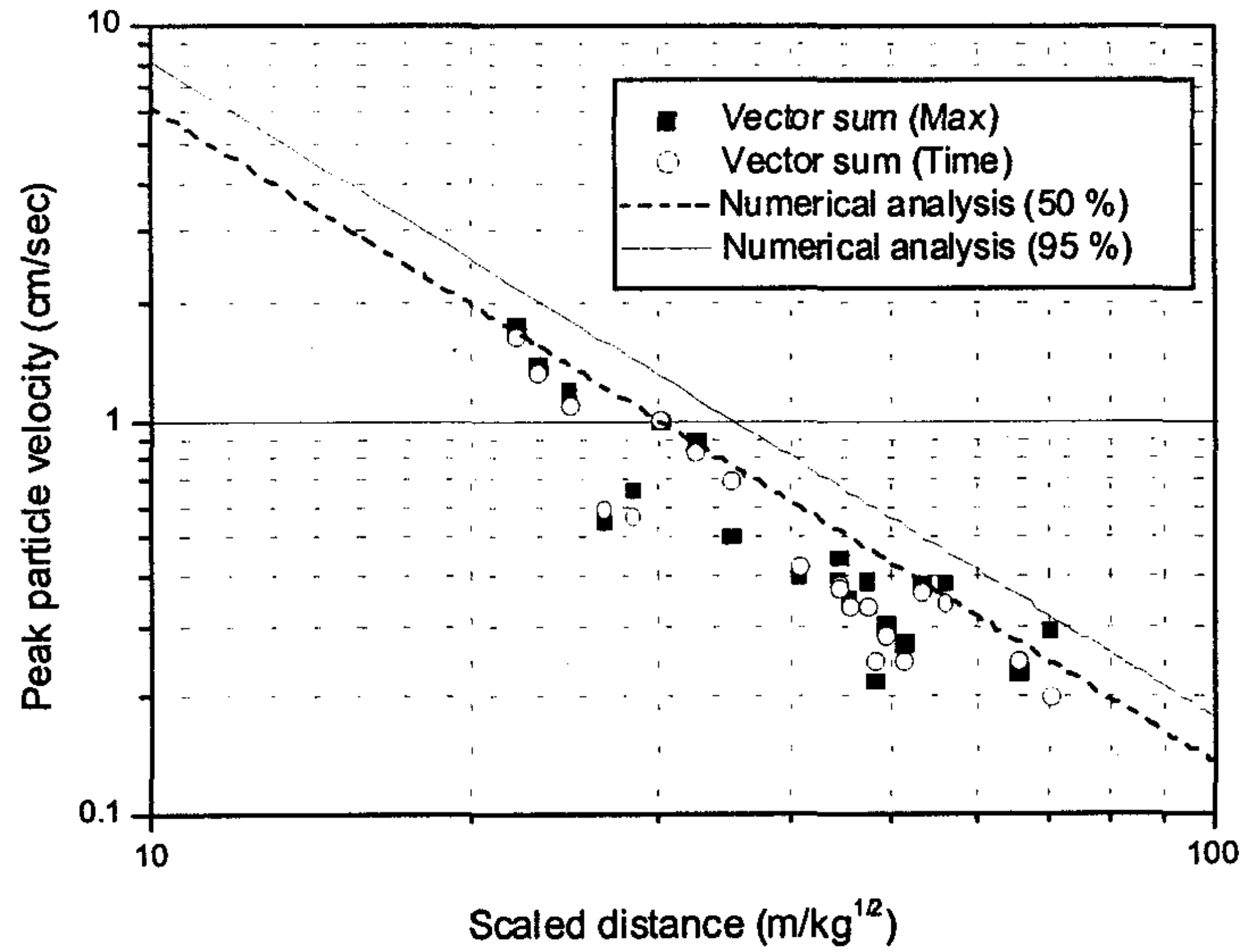


Fig. 3.5.2.17 수치해석 결과의 50, 95% 신뢰도 회귀곡선

앞에서 언급한 측정결과의 회귀식과 비교할 때 수치해석 결과를 이용한 회귀식은 실제 측정자료에 매우 근접해 있으며, 95% 신뢰도의 경우 모든 측정자료를 포함하고 있음을 알 수 있다. 그림에서 Vector sum (Max)은 측정속도의 진행성분(L) 및 수직성분(V)의 각 성분별 최대값만을 이용한 벡터합이며, Vector sum (Time)은 측정속도의 수평(T) 및 진행성분, 수직성분을 모두 고려한 시간별 벡터합의 최대값을 의미한다. 전자는 2차원 수치해석이 발파진동의 3방향 성분을 모두 고려하지 못하고, 단지 수평성분을 제외한 진행 및 수직성분만을 고려하기 때문에 측정결과와 직접적으로 비교할 수 없다. 따라서 2차원 수치해석의 결과와 비교하기 위하여 진행 및 수직의 2가지 성분만을 고려한 결과를 나타낸 것이다. 이에 반하여 후자는 실제 발파에 따른 3가지 성분을 가진 발파진동의 회귀식 산정에 이용된 값들을 나타낸 것이다.

③ 발파진동 예측 해석을 위한 발파진동식 결정

기반암으로 전체 모델을 구성하고 상대적으로 얇은 2m의 매립층이 미치는 영향을 전체 damping 계수에 반영한 경우(①의 경우), 측정자료와 유사한 결과를 보이나 환산거리가 증가할수록 최대 입자속도를 다소 크게 평가하는 경향이 있다. 반면, 매립층의 물성과 그에 따른 적절한 요소 크기를 적용한 경우(②의 경우) 환산거리의 전 범위에서 실제 측정결과에 근접한 결과를 보인다. 두 경우에서 구한 회귀식은 모두 발파식 산정에 이용될 수 있을 것으로 판단되며, 충분한 자료가 주어지지 않

았거나 보다 안전측에 가까운 해석을 수행하고자 할 경우에는 전자의 모델을 이용할 수 있다. 하지만 지반특성이 다른 영역이 함께 있으며 각 영역별로 정확한 물성 자료를 이용할 수 있다면 실제에 가까운 해석을 위해 후자의 모델이 더 적절하다고 할 수 있다.

라. 입력 파형에 따른 해석 결과 비교

(1) 기존의 압력파형 적용

(가) 미국 NHI에 의한 발파압력

① 발파압력파형

미국 National Highway Institute에서 제시한 발파압력 산정식은 아래와 같다.

$$P_{Det} = \frac{4.18 \times 10^{-7} \times SGe \times V_e^2}{1 + 0.8 SGe}$$

$$P_B = P_{Det} \times \left(\frac{d_c}{d_h}\right)^3$$

위 식은 화약 1 kg당 폭발하중을 기준으로 한 식이고,

P_{Det} = 폭발압력 (detonation pressure, kbar)

SG_e = 화약의 비중

P_B = 공벽면에 가해지는 압력(decoupled detonation pressure, kbar)

V_e = 폭속(detonation velocity, ft/sec)

d_c = 화약의 직경(charge diameter, ft)

d_h = 장약공의 직경(borehole diameter, ft)

이다. 참고로 1 bar = 100,000 Pa이고, 1 ft = 0.3048 m이다. 위의 식은 발파시에 발생하는 공기 동압력의 크기를 정의한다.

실제 공벽에 작용하는 동압력은 시간에 따라 변하는 형태를 취하므로, 1968년 Starfield 등이 제안한 창함수(window function)를 사용하여 동압력에 대한 시간이력을 적용한다.

$$P_D(t) = 4P_B \left(\exp\left(\frac{-Bt}{\sqrt{2}}\right) - \exp(-\sqrt{2}Bt) \right)$$

위에서 $B = 16338$ 인 하중상수이다.

Fig. 3.5.2.18은 화약량 1.5 kg, 화약의 직경 50 mm, 비중 1.6, 폭속 5.5 km/sec인 Gelatine Dynamite를 사용하여 76 mm 공경의 시추공에서 발파할 때, 밀장전(Fully Charged) 및 디커플링(Decoupled)된 경우에 발파공 벽면에 작용하는 발파압력을 각각 나타내고 있다. 시추공 발파의 경우엔 폭약을 장전한 이후에 그 상부를 모래 등의 전색물로서 충전하였으므로 밀장전 상태로 가정하고 해석하였다.

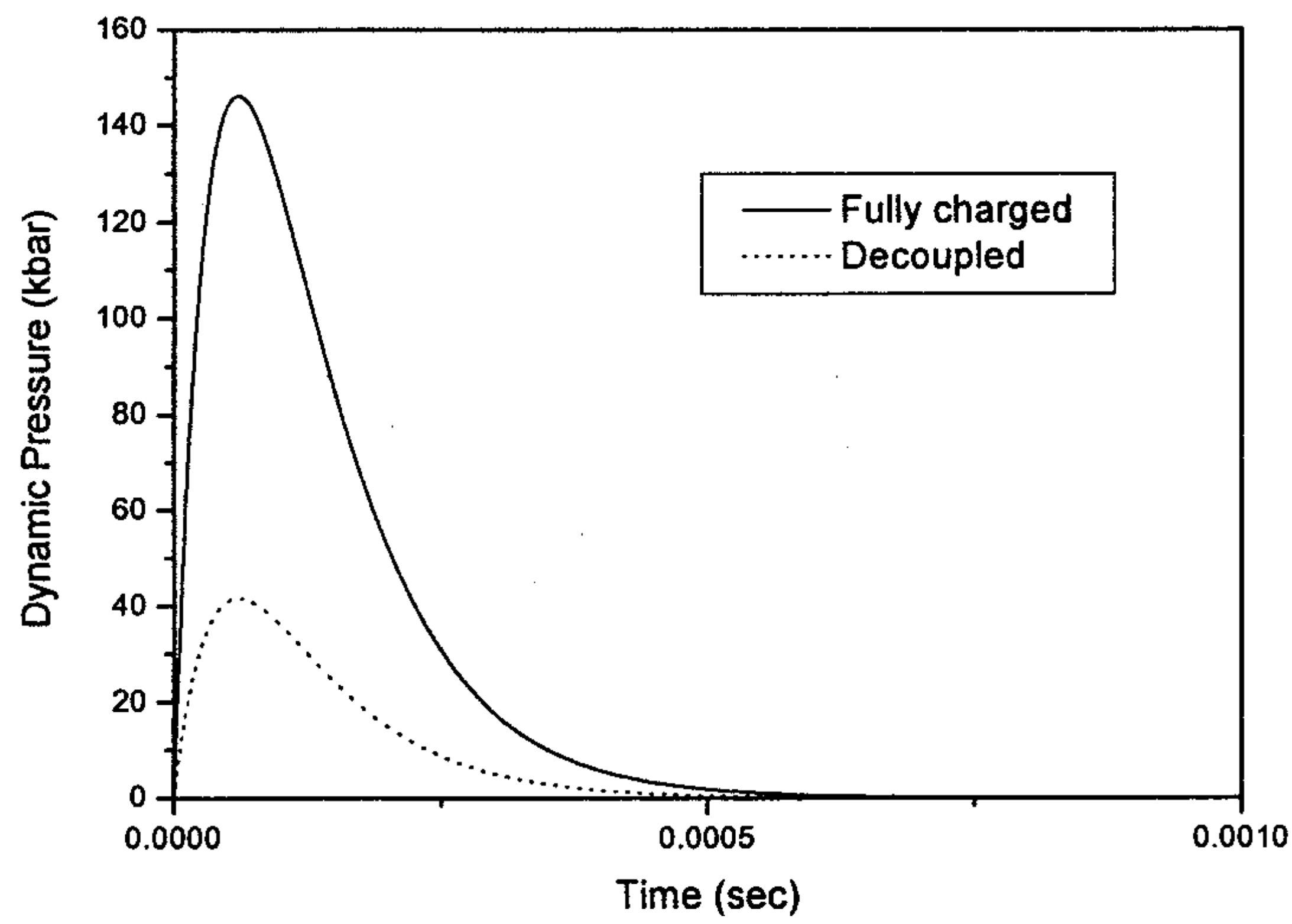
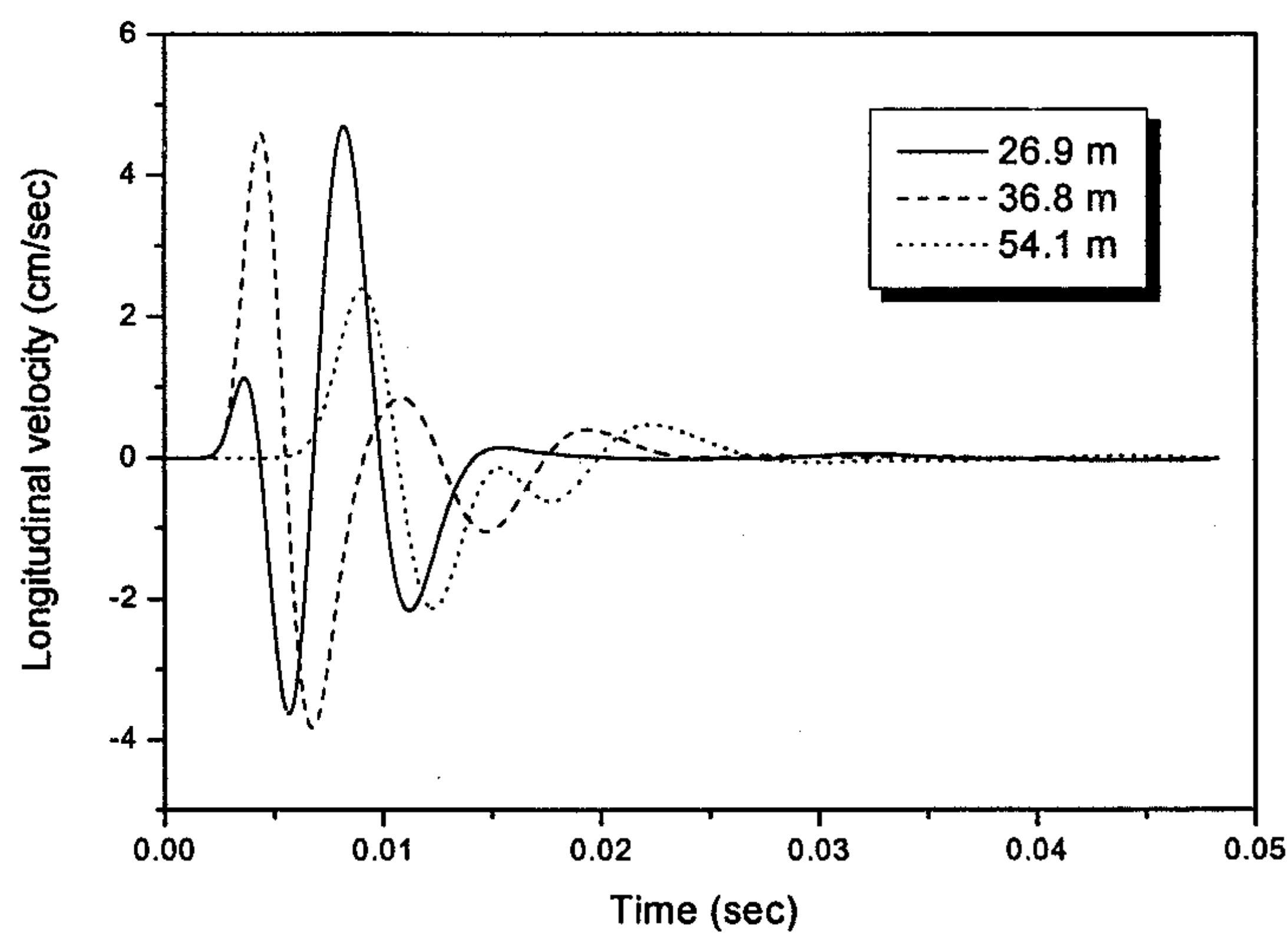
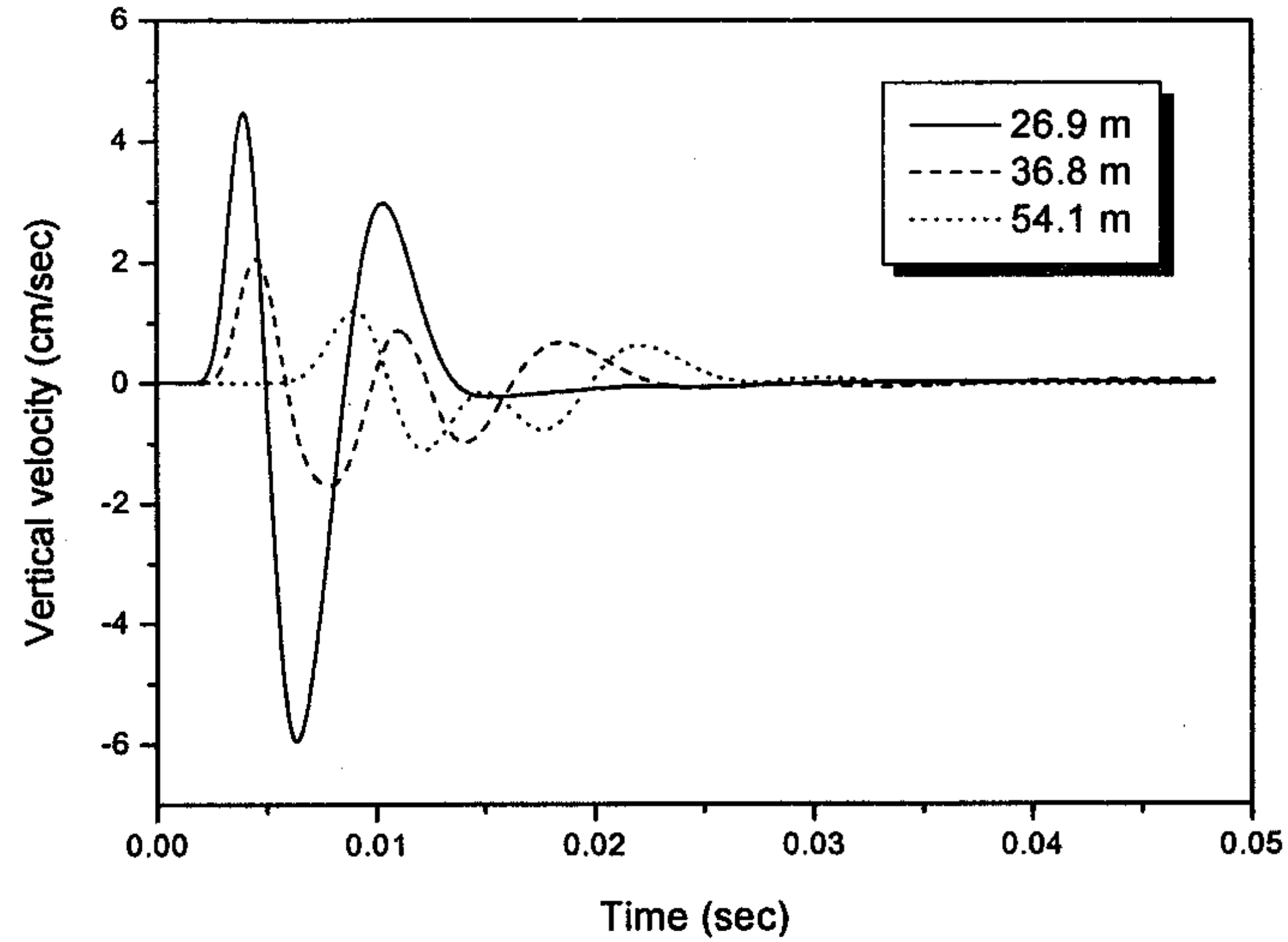


Fig. 3.5.2.18 미국 National Highway Institute에 의한 발파압력곡선

② 해석 결과



(a) 진행방향 속도



(b) 수직방향 속도

Fig. 3.5.2.19 계측지점별 진행, 수직방향 입자속도 (미국 NHI)

(나) Liu & Tidman에 의한 발파압력

① 발파압력파형

캐나다 CANMET/MRL의 Liu & Tidman(1995)이 이론적 모델을 기초로 하여 밀장전된 발파공의 동적압력을 계산하는 반경험식(semi-empirical equation)을 제안하였는데, 아래의 식과 같다. 이 반경험식을 이용하면 폭약 및 암반의 물성에 따라 발파공에 작용하는 최대압력을 계산할 수 있으며 시간에 따른 감쇠 정도를 반영하기 위한 감쇠함수(decay function)를 적용하였다.

$$P = P_m \left(\frac{R}{R_0} \right)^\alpha$$

$$P_m = 1.62 (\rho_0 D^2) \left(\frac{\rho_r \times C}{\rho_0 \times D} \right)^{0.25}$$

$$\alpha = -1.54 \left(\frac{C}{D} \right)^{-0.33}$$

$$F_{decay} = \exp\left(1 - \frac{t}{t_0}\right) \times \frac{t}{t_0}$$

여기서, P_m 은 발파공 최대압력(kbar), α 는 압력감쇠계수이며 R_0 는 발파공의 반지름(m), R 은 발파공으로부터의 거리(m)이다. ρ_0 , ρ_r 은 각각 폭약과 암반의 밀도

(g/cm³)이며 C 는 암반의 탄성과 속도(km/s), D 는 폭약의 폭속(VOD, km/s)이다.

Fig. 3.5.2.20은 앞서 NHI식을 사용할 경우의 조건과 같이 화약량 1.5 kg, 화약지름 50 mm, 비중 1.6, 폭속 5.5 km/sec인 Gelatine Dynamite를 사용하여 76 mm 공경의 시추공에서 발파할 때, 발파공 벽면에 작용하는 발파압력을 나타내고 있다(밀장전 상태). 이 압력곡선은 대상지역의 대표적 암종인 호상흑운모편마암($\rho_r=2.65$ g/cm³, $C = 4.81$ km/s)에 굴착된 발파공에서 Gelatine dynamite를 사용하여 발파할 때 발생하는 압력을 나타내는 것으로, 지표 하부 25 m 지점의 발파 시추공 벽면에 60 cm 길이(화약 1.5 kg에 해당되는 길이)로 적용하였다.

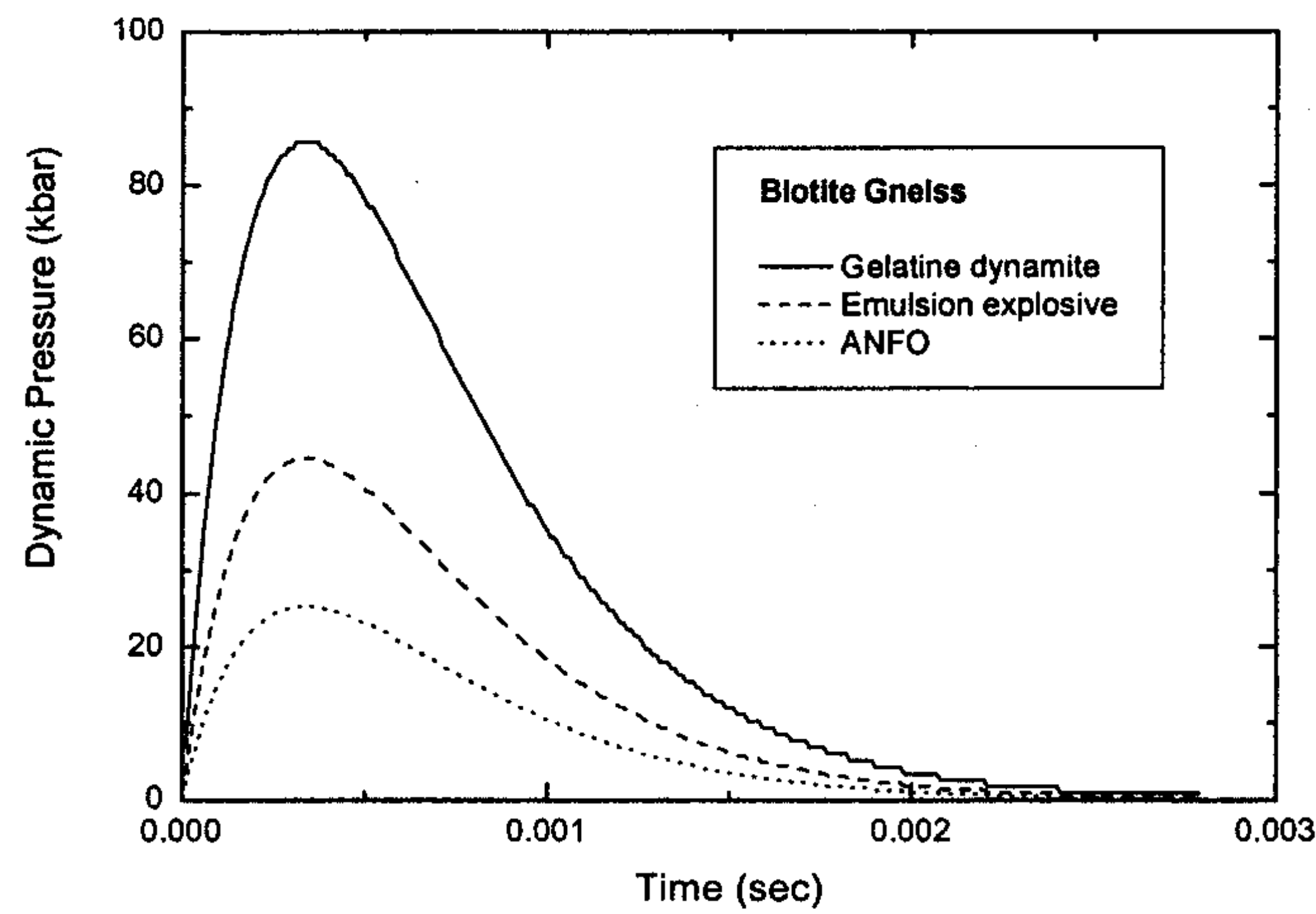
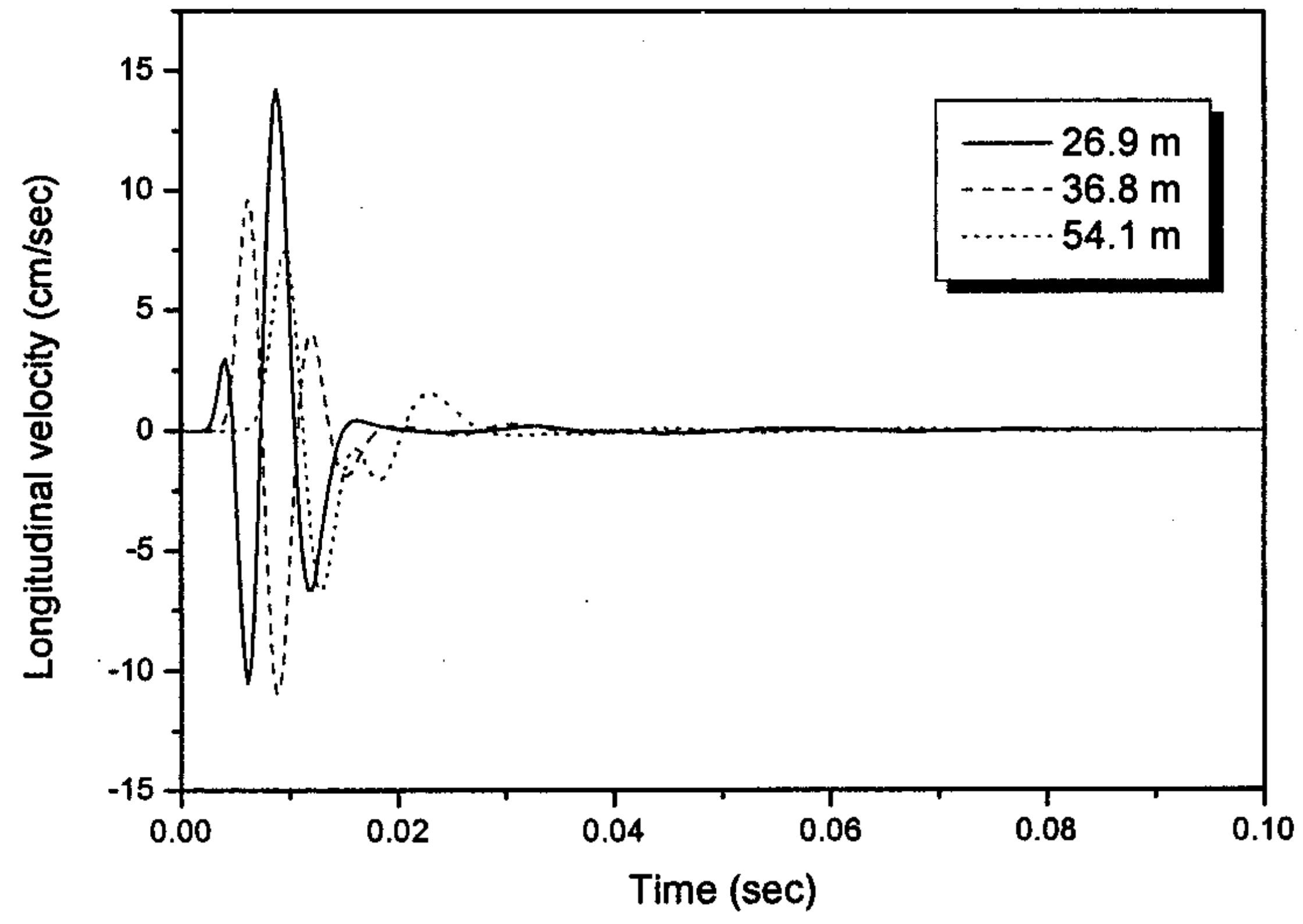
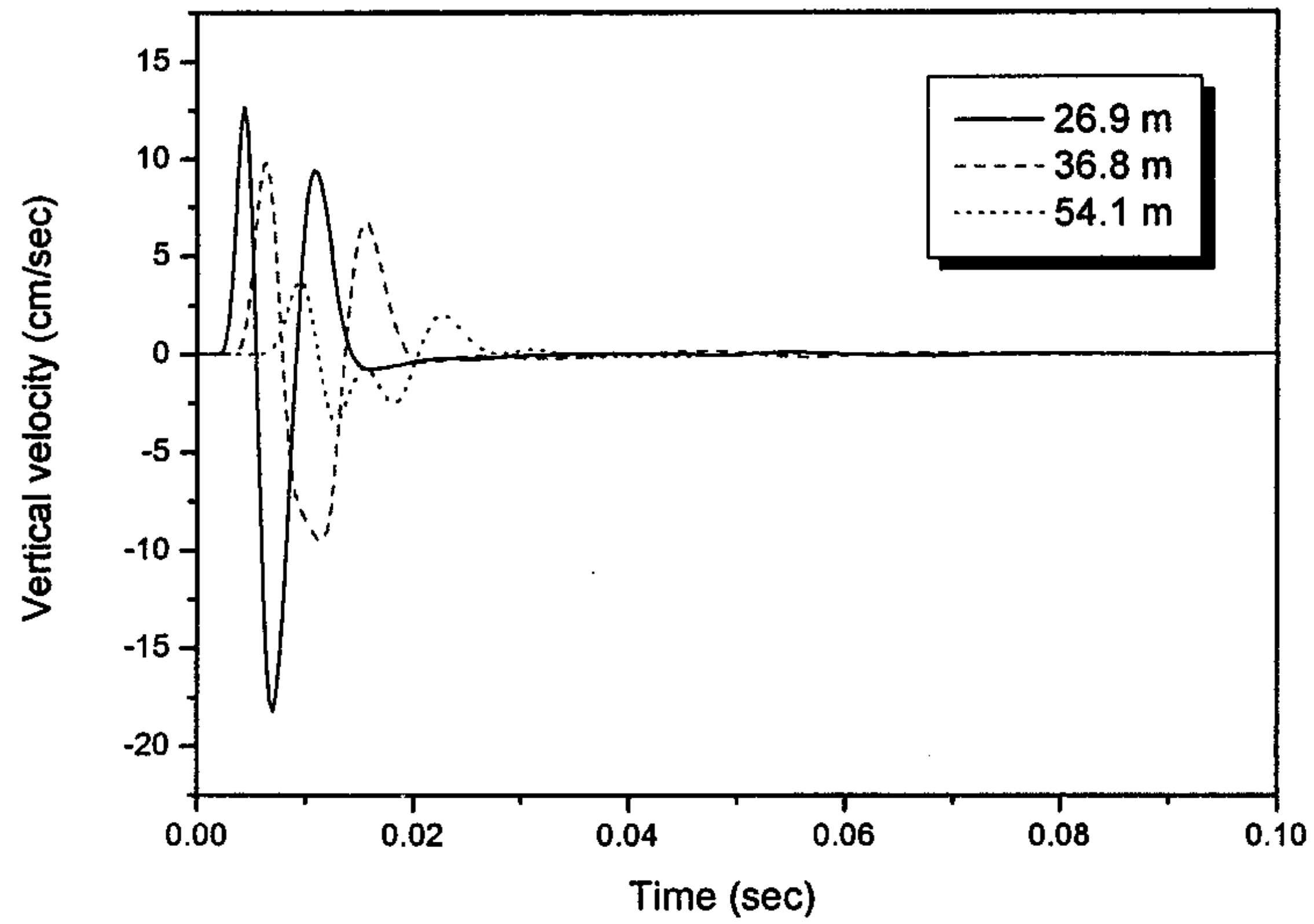


Fig. 3.5.2.20 Liu & Tidman에 의한 발파압력곡선 (Fully Charged)

② 해석 결과



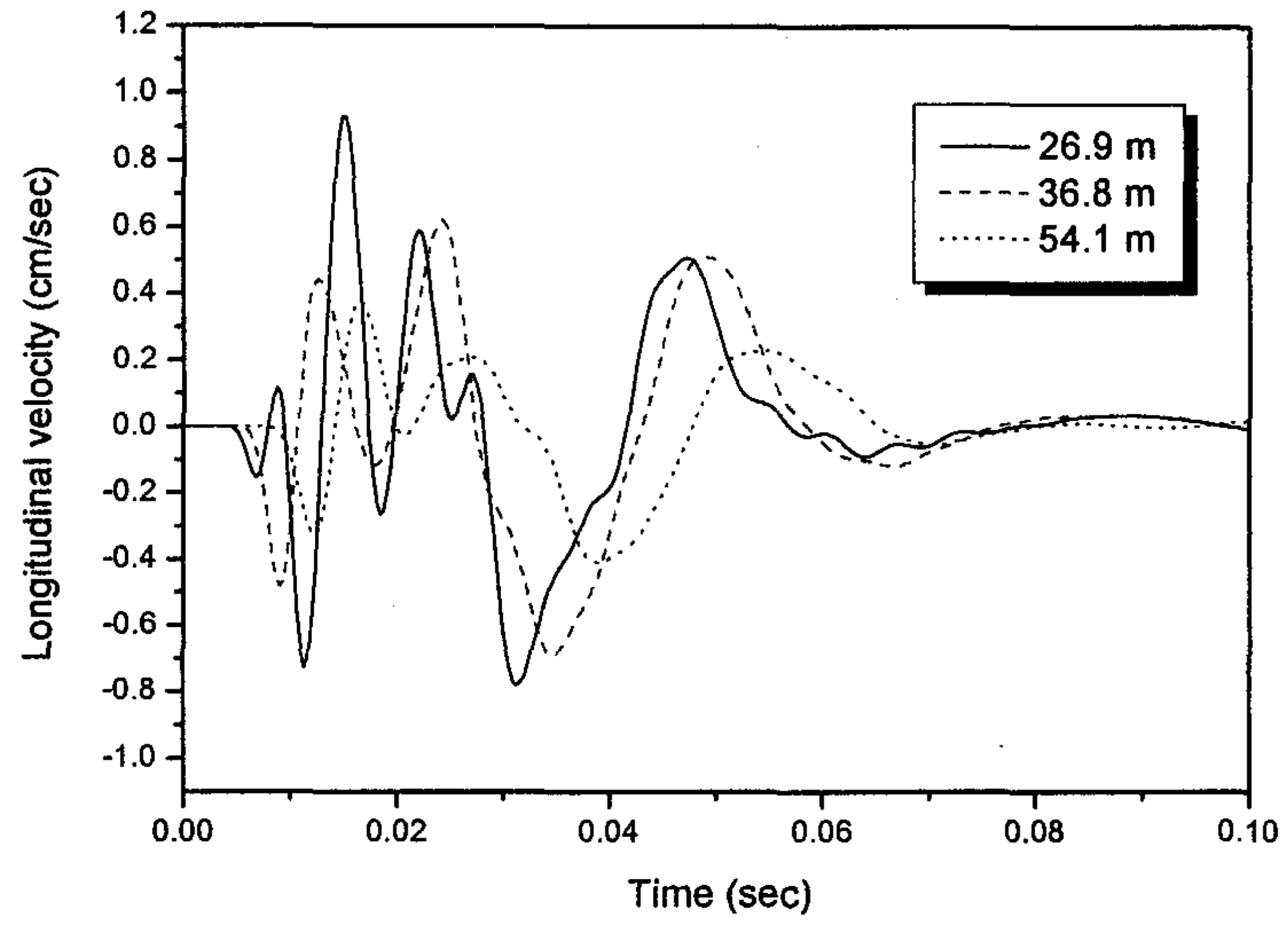
(a) 진행방향 속도



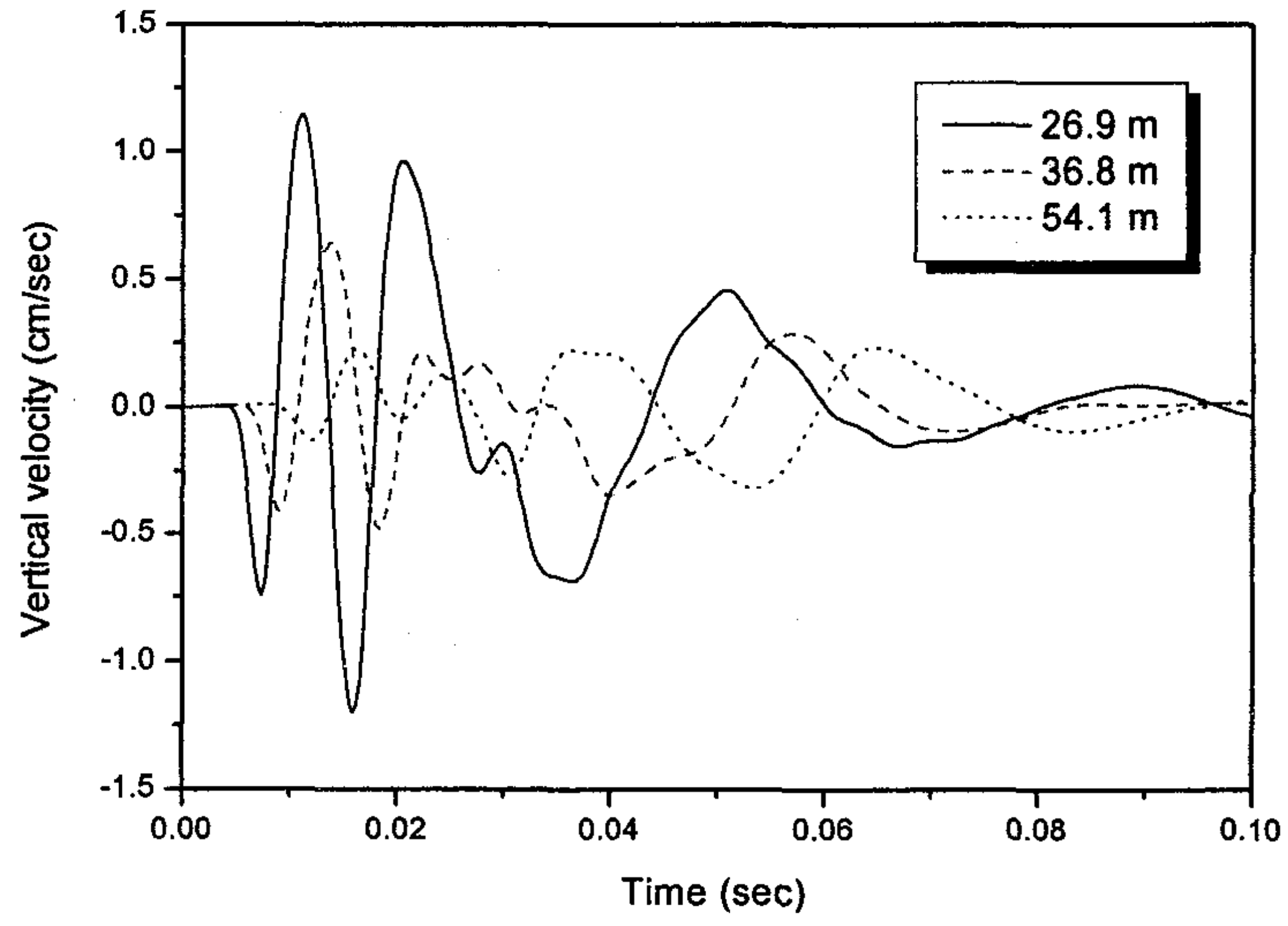
(b) 수직방향 속도

Fig. 3.5.2.21 계측지점별 진행, 수직방향 입자속도 (Liu & Tidman)

(2) 발파진동파형 적용 결과



(a) 진행방향 속도



(b) 수직방향 속도

Fig. 3.5.2.22 계측지점별 진행, 수직방향 입자속도 (발파진동파형)

(3) 해석결과의 비교

위에서 해석한 3가지 경우(NHI 식, Liu & Tidman 식, 진동파형)에 대한 진동속도 측정 결과를 각각 정리하여 Table 3.5.2.5에 제시하였다.

Table 3.5.2.5 입력파형에 따른 각 지점별 결과

결과 입력파	거리 (m)	진행방향 최대속도 (cm/sec)	수직방향 최대속도 (cm/sec)	벡터합 PPV (cm/sec)
발파압력 (미국 NHI)	26.9	4.69	5.95	6.52
	36.8	4.60	2.05	5.03
	54.1	2.39	1.20	2.67
발파압력 (Liu & Tidman)	26.9	14.2	18.2	19.3
	36.8	10.9	9.81	13.6
	54.1	7.44	3.74	8.33
진동속도파형	26.9	0.93	1.20	1.48
	36.8	0.69	0.65	0.95
	54.1	0.41	0.32	0.52
실제 측정값	26.9	0.61	1.65	1.65
	36.8	0.91	0.43	1.01
	54.1	0.15	0.37	0.39

상기 표에서 보는 바와 같이 3가지 경우 중에서 폭원의 입력형태로 진동속도파형을 사용한 경우가 실제 측정치와 가장 근접한 결과를 나타내었다. 이에 반하여 발파압력을 사용한 경우에는 미국 NHI식과 Liu & Tidman식의 두 결과 모두 측정치에 비하여 상당히 높게 진동속도가 나타났다. 특히 Liu & Tidman식의 경우엔 미국 NHI식의 2~3배 이상 높게 나타나는 것으로 해석되었다. 이러한 결과는 Liu & Tidman식이 폭발압력의 크기는 미국 NHI식에 비하여 작다할지라도, 시간에 따른 압력감쇠를 반영하는 변수 t_0 에 따라 압력의 지속시간에 많은 차이가 발생되어 나타난 것으로 보인다. 이와 같이 동해석시 사용되는 폭발압력의 크기와 지속시간에 따라 해석결과가 상당히 다르게 나타날 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 3.5.2.23은 NHI에서 제시된 식에 의한 2가지 압력곡선(밀장전 및 디커플링)을 사용했을 경우와 진동속도파형을 입력형태로 사용했을 경우의 해석결과를 실제 측정된 최대입자속도 PPV와 비교한 그래프이다. NHI 압력곡선에 의한 결과는 측정치에 비해 대체로 값이 크게 해석되었고 환산거리가 커질수록 더 큰 편차를 보

이나 진동속도파형을 입력한 결과는 실제 측정치와 매우 유사함을 알 수 있다. 한편, 입력파형을 압력곡선형태로 적용한 두 가지 경우에는 압력 산정식에 상관없이 발생하는 진동형태가 거의 일치하는 결과곡선을 나타내었다.

이상의 결과를 종합해 볼 때 실제 발파현상 및 지반진동특성을 더 정확하게 반영하며, 해석결과 역시 시험발파의 측정치와 거의 일치하는 진동속도파형을 수치해석의 입력자료로 적용하는 방법이 가장 타당할 것으로 판단된다.

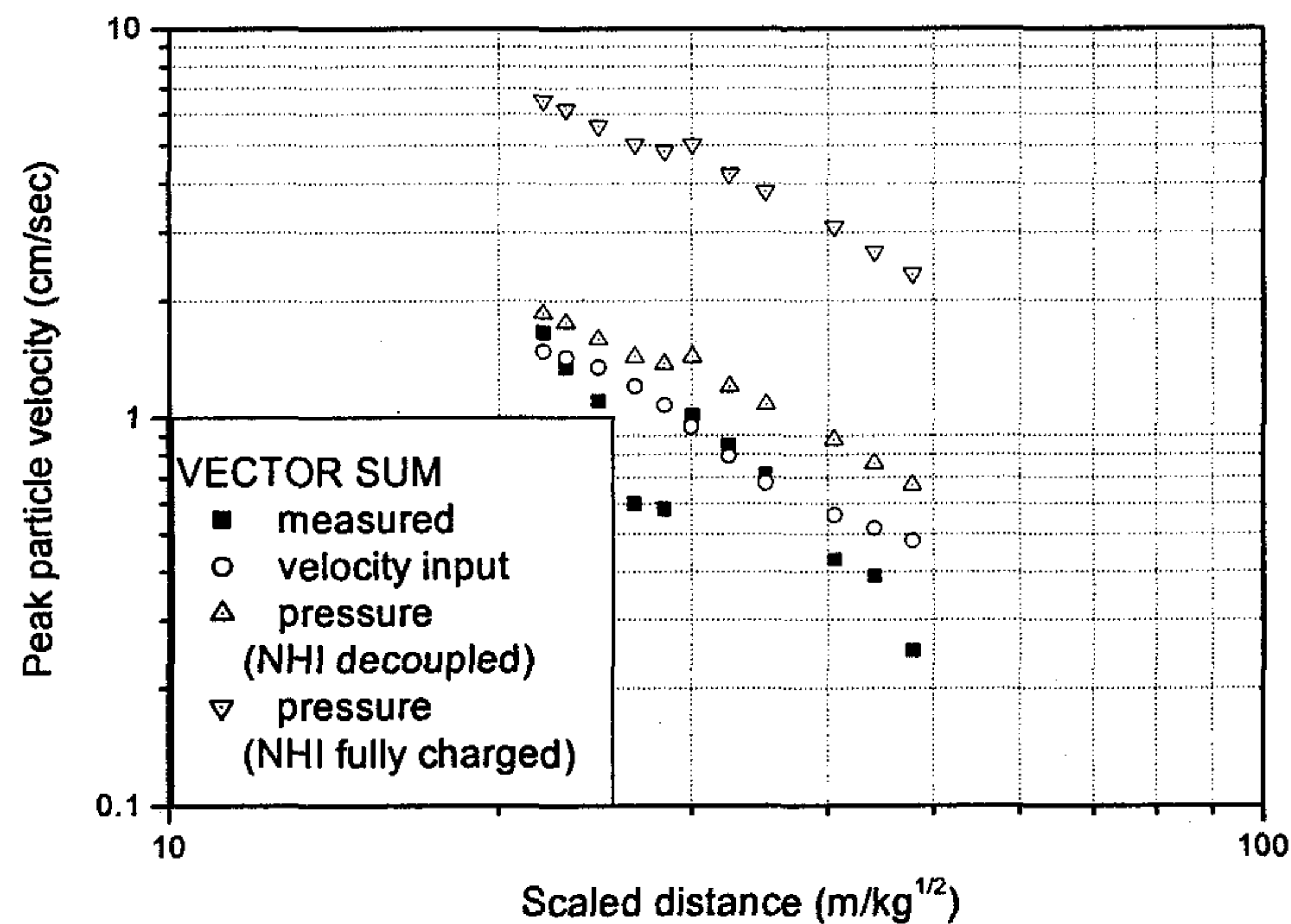


Fig. 3.5.2.23 입력파형에 따른 최대입자속도 분석

라. 주파수영역에서 전달함수를 이용하는 기법

주파수영역에서 전달함수를 이용하는 기법으로서 본 연구에서 사용된 것은 source identification 기법이며 이를 이용하여 계측된 지반응답으로부터 폭원 및 전달함수를 추정하여 계산하는 일련의 해석방법이 개발되었다. 기본 개념은 다음과 같다. 발파에 수반되는 진동스펙트럼을 발파원에서의 파괴 메커니즘, 발파원으로부터 계측지점에 이르는 파동전파특성인 전달 메커니즘에 의하여 나타난다고 생각하고 중첩원리가 적용되는 선형구조계를 가정하면, 계측지점의 발파진동 스펙트럼은 발파원 스펙트럼과 전달 스펙트럼의 곱의 형태로 표현할 수 있다.

$$U(i\omega) = H(i\omega) V(i\omega)$$

여기서 U와 V는 각각 구조계의 어떤 위치에서 반응 U(t)와 입력운동 V(t)의 복소수 푸리에 스펙트럼이다. 그리고 H는 반응과 입력간의 관계를 나타내는 전달함수이

며 w 는 주파수이다. 상기 식은 단지 세 개의 복소수 성분의 주파수 의존적인 함수로 이루어져 있기 때문에 세개중 두개의 값을 알고 있을 때 나머지 한 개의 값은 쉽게 결정할 수 있다. 즉 Source identification 문제에 있어서 $H(iw)$, $U(iw)$ 가 주어져 있을 때 $V(iw)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V(iw) = U(iw) / H(iw)$$

해석대상인 지반을 유한요소와 동적무한요소를 이용하여 모형화 한 후, 본 해석모형을 이용하여 예측하고자 하는 각 지점에서의 전달함수를 구하고, 어느 한 지점에서 계측된 속도에 관한 시간이력과 푸리에 변환을 이용하여 그 지점에서의 응답 스펙트럼을 구한다. 그리고 그 지점에서의 전달함수와 응답 스펙트럼을 이용하여 발파원에서의 하중을 산정하며 산정된 하중에 관한 푸리에 스펙트럼과 각 지점에서의 전달함수를 이용하여 역으로 각 지점에서의 응답 스펙트럼과 속도에 관한 시간이력을 구하는 방법이다. Fig. 3.5.2.24는 폭원으로부터 20m 지점에서 계측된 지반진동 파형으로부터 FFT를 이용하여 구한 스펙트럼과 해석모델로부터 구한 결과로서 좋은 일치를 보여주고 있다. 본 방법의 문제점으로 파악된 사항중의 하나는 계산된 발파원의 물리적 의미이다. 발파원 하중 산정 예인 Fig. 3.5.2.25는 물리적으로는 실제 현상과는 차이가 큰 결과를 보이고 있다. 그러나 발파원 하중은 지반진동의 예측과는 별도의 문제로 간주할 수 있으므로 예측 자체에는 별다른 영향을 미치지 않는다,

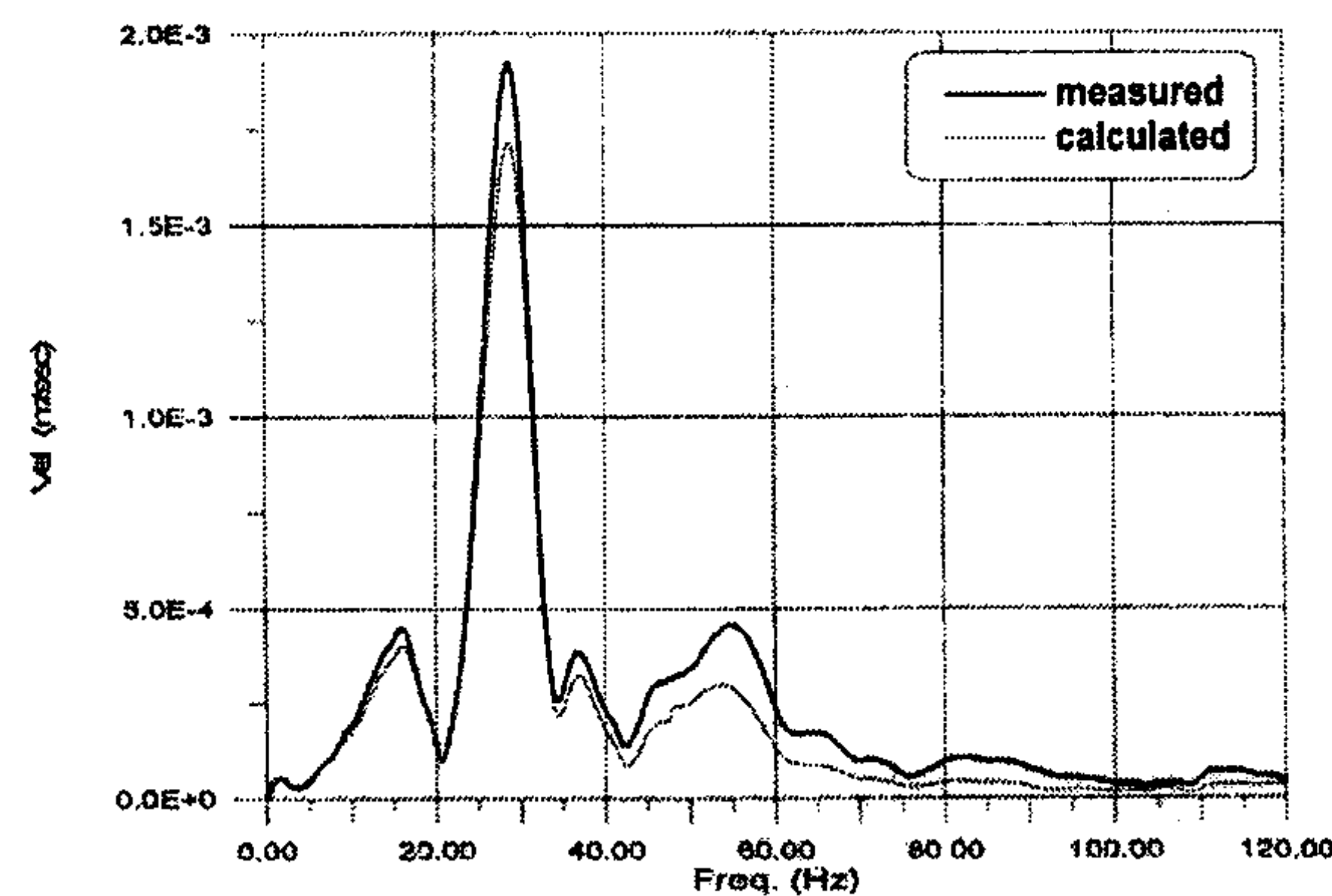


Fig. 3.5.2.24 응답스펙트럼 비교, 폭원으로부터 20m

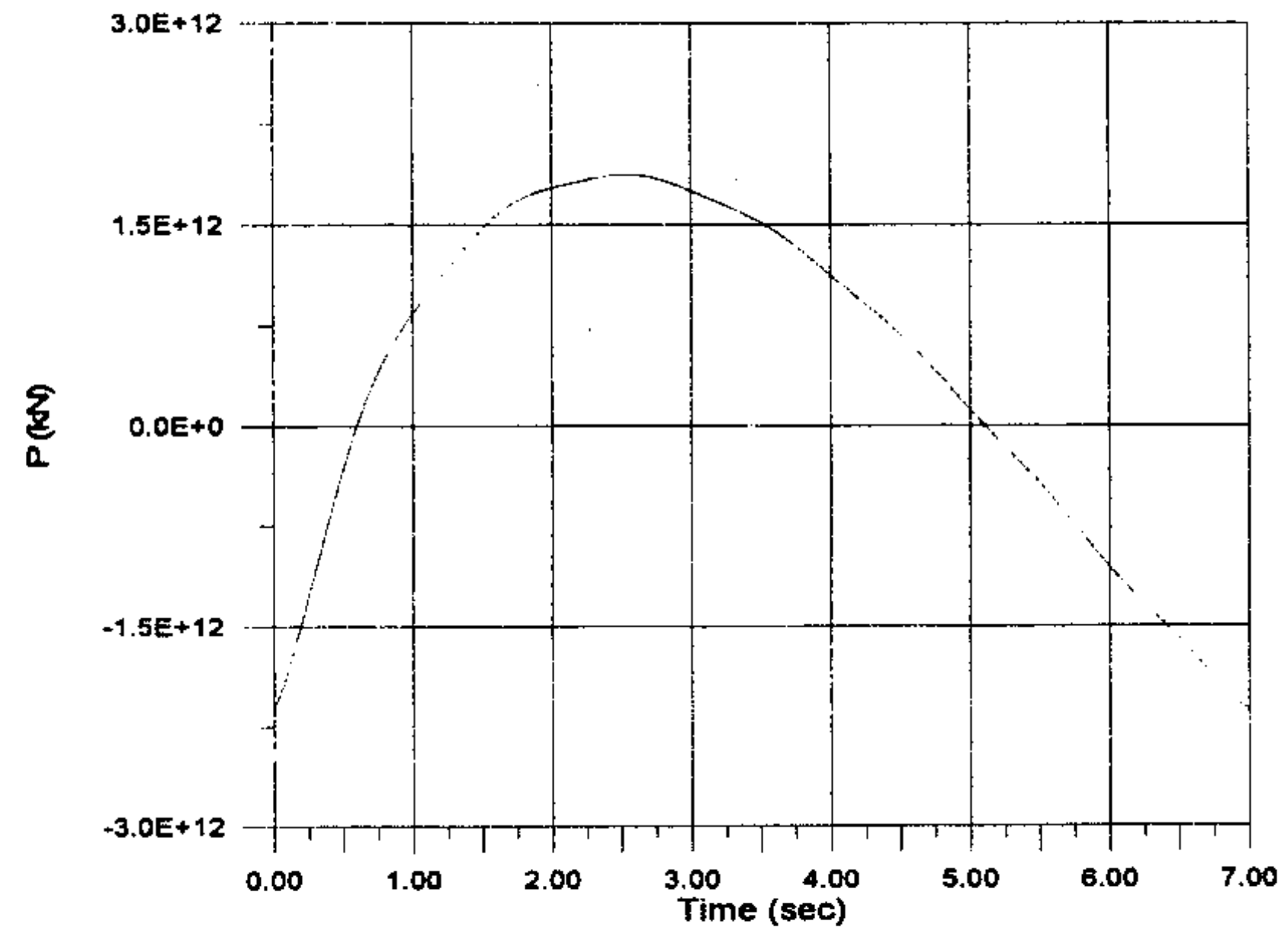


Fig. 3.5.2.25 폭원하중의 시간이력곡선

기타 사항은 발표된 논문에서 참조할 수 있다(Ryu et. al, 2001).

3. 발파진동 자료처리 프로그램 개발 - VIB10

VIB10 프로그램은 발파로 발생하는 지반진동 및 소음에 대한 계측자료의 처리를 목적으로 행렬(matrix)을 기반으로 하는 공학응용 소프트웨어 패키지인 MATLAB 상에서 사용할 수 있는 M-파일 형식을 빌려 작성되었다. 여기서는 VIB10 프로그램 작성의 토대가 되는 발파계측 자료처리와 관련된 이론적인 배경을 먼저 제시한 다음 프로그램의 구성과 작동과정을 간략히 소개하였다.

가. 발파진동 및 소음 예측기법

(1) 발파진동 예측법

발파시 발생하는 지반의 진동은 폭약을 많이 사용할수록 커지며, 폭원으로부터 가까운 곳에서는 크고 거리가 멀어질수록 작아진다. 폭약의 양이나 거리 외에도 발파에 의한 지반진동의 세기에 영향을 주는 변수들이 있으며, 이들을 대별하면 다음과 같다:

- (i) 화약의 종류와 장약량,
- (ii) 발파원으로부터 측정지점까지의 거리, 즉 폭원거리
- (iii) 암반의 역학적, 구조적 특성,
- (iv) 천공패턴, 장약방법, 점화순서 등의 발파방법

일반적으로 발파방법은 공사기간 중에 변경될 수 있으므로 주어진 지역에서 발파패턴의 유형에 따라 유발될 수 있는 영향을 예측하고 사전에 대책을 수립하기 위해서는 발파방법에 따라 지반진동을 예측할 수 있는 식을 도출할 필요가 있다. 진동의 세기는 지역적 특성과 발파조건에 따라 다르므로 대상지역별로 발파조건에 따른 발파진동측정을 통하여 전파특성을 도출하여야 한다.

지반진동의 세기를 나타내는 진동의 진폭은 변위, 속도, 가속도 등으로 나타낼 수 있으나 일반적으로 구조물에 대한 영향평가와 관련해서는 진동속도에 의한 척도를 사용하는 것이 가장 합리적인 것으로 알려져 있다.

(가) 예측식; 일반적인 형태

발파진동을 예측할 수 있는 식은 진동의 속도성분으로 표시할 때 일반적으로 장약량 및 폭원거리를 주요 변수로 하여 다음 식과 같은 유형으로 표현할 수 있다.

$$PPV = k D^a W^c \quad (3.5.3.1)$$

여기서

PPV = 최대진동속도(Peak Particle Velocity), cm/sec 또는 mm/sec

D = 폭원거리, m

W = 지발당 최대장약량, kg

k, a, c = 자유면 상태, 화약의 성질, 압질, 발파방법 등에 따르는 상수

(나) 환산거리(scaled distance)를 이용한 식

위의 일반식은 폭원거리를 장약량으로 환산한 형태인 환산거리로서 표시하면 다음과 같다.

$$PPV = k \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^n \quad (3.5.3.2)$$

$$PPV = k \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^n \quad (3.5.3.3)$$

여기서,

n = 감쇠지수

k = 화약류의 특성, 발파 방법, 압반 특성 등에 따라 결정되는 상수

거리를 장약량의 제곱근으로 환산한 형태의 것을 제곱근 환산거리(root scaled distance)라 하며, 세제곱근으로 환산한 형태의 것을 세제곱근 환산거리(cube root scaled distance)라 한다.

환산거리로서 표현하면 대수 방안지에서 환산거리, 즉 사용한 폭약의 양과 폭원에 서의 거리에 따른 진동의 변화양상을 쉽게 나타낼 수 있다. 환산거리로서 세제곱근 을 사용하느냐 또는 제곱근을 사용하느냐 하는 문제는 자료처리결과 적합도가 높은 쪽을 택하는 것이 일반적이다.

(다) 진동자료의 처리기법

위에서 언급한 바와 같이 일반적으로 구조물에 대한 영향평가를 위한 발파진동은 지반진동속도를 사용하며, 최대진동속도 PPV를 예측할 수 있는 식은 장약량(W)과

폭원거리(D)를 주 변수로 하여 위의 식 (3.5.3.1)과 같은 일반식으로 표현할 수 있다.

식 (3.5.3.1)에서 k, a, c 등의 상수는 발파방법과 지역적 특성에 따라 결정되는 상수들이다. 이 식의 양변에 log 를 취하면 다음 식과 같이 된다.

$$\log V = A + B \log D + C \log W \quad (3.5.3.4)$$

제곱근 스케일링(root scaling)과 세제곱근 스케일링(cube root scaling)의 경우 각각 다음과 같이 표시된다.

$$\log V = A + B (\log D - 1/2 \log W) \quad (3.5.3.5)$$

$$\log V = A + B (\log D - 1/3 \log W) \quad (3.5.3.6)$$

이 식들은 log-log 방안지에서 표현하면 선형(linear) 형식으로서 $y=ax+b$ 와 같은 직선의 형태로 표시된다. y축을 log V 값으로 하고 x축을 $\log(D/W^{1/2})$ 또는 $\log(D/W^{1/3})$ 값으로 하였을 때, b는 y축의 절편을 나타내고 a는 기울기를 나타낸다. 따라서 log-log 그래프용지에 계측자료들을 도시하면 선형으로 감소하는 진동전파의 경향을 쉽게 얻을 수 있다.

식의 k, a, b 값들은 대상지역에서 시험발파를 통해 폭원으로부터 측정지점까지의 거리 D 및 지발당 최대장약량 W에 대한 발파진동값 V를 여러 번 측정하여 획득하고, 얻어진 계측 값을 통계처리기법인 중회귀분석법(multiple regression analysis)을 사용하여 처리함으로써 구할 수 있다.

발파풍압과 소음도 유사한 방법으로 계측자료를 처리하여 예측식을 도출할 수 있으나 지형적 및 기후의 영향을 크게 받으므로 일반적으로 신뢰도가 낮은 것이 특징이다.

(2) 발파풍압 예측법

(가) 음압레벨 및 파워레벨

폭약이 폭발하면 에너지의 일부는 대기 중으로 압력파동의 형태로 전달된다. 이 압력파동의 주파수가 사람이 들을 수 있는 가청주파수대역(20~20,000 Hz)에 해당하면, 음(sound) 또는 소음(noise)이라 하며, 압력파동의 주파수가 낮아서 가청주파

수대역 이하이면 충격음(concussion)이라 하여 우리가 들을 수 없다. 이와 같이 발파로 인해 발생하는 소음 및 충격음을 통틀어 발파풍(air blast)이라 하며, 발파풍의 세기는 발파풍압으로서 대개 압력단위(bar, Pa, psi)로도 표시할 수 있으나 환산단위인 데시벨 단위(dB)로 많이 표시한다. 예를 들어, 거리에서 달리는 자동차가 일으키는 소음수준은 대략 80~90 dB 정도로 측정된다.

음압(sound pressure)의 수준은 다음 식으로 환산한 음의 세기레벨(SIL)을 사용하여 표시할 수 있다.

$$SIL = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (3.5.3.7)$$

여기서, SIL(sound intensity level): 음의 세기레벨 [dB]

I: 음의 세기 [w/m^2]

I_0 : 기준음의 세기 = 10^{-12} [w/m^2]

기준음의 세기는 귀의 감각으로 1,000 Hz 부근의 최소 가청치와 비슷한 값이다.

한편, 음압 P와 음의 세기 I 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$P = \sqrt{\rho c I} \quad (3.5.3.8)$$

따라서 음의 세기가 기준음의 세기 $I_0 = 10^{-12}$ [w/m^2]일 때 음압 P_0 는 식 (3.5.3.8)에 의해 다음과 같이 된다.

$$P_0 = \sqrt{\rho c I_0} = \sqrt{400 \times 10^{-12}} = 2 \times 10^{-5} [\text{Pa}]$$

그러므로 음압의 수준은 음압 P_0 를 기준치로 하고 $I \propto P^2$ 의 관계를 이용하면 아래와 같이 음압레벨(SPL)의 식으로도 표시할 수 있다.

$$L_p = SPL = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad (3.5.3.9)$$

여기서, $L_p = SPL$ (sound pressure level): 음압레벨 [dB]

P: 발파풍압 또는 음압 [Pa]

$$P_0: \text{인간의 최소가청음압} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa} = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$$

이와 같이 음의 세기레벨(SIL)과 음압레벨(SPL)은 실제로 같은 것이나 근래에는 주로 음압레벨을 사용하는 경우가 많으며, 본 프로그램에서 발파풍압의 수준도 음압레벨(SPL)을 사용하여 환산한다. 음압레벨은 dB(L)의 단위로 표시하며, 주파수에 대해 보정을 하지 않은 값으로서 구조물에 대한 영향을 평가할 때 많이 사용된다.

이와 달리 일반적인 스피커 등의 출력표시에서와 같이 소음문제를 고려하는 경우에는 음원 자체의 파워레벨(power level)을 취급할 때가 많다. 발파풍압의 환산에서도 음압레벨, 즉 과압(overpressure)에 의한 환산을 이용할 수도 있으나 폭원 자체의 파워레벨을 이용한 환산도 가능하다. 파워레벨(PWL)은 음원 자체의 출력을 데시벨 척도로 평가하며, 기준 음의 파워로서 $W_0 = 10^{-12}$ [Watt]를 사용한다.

$$L_w = \text{PWL} = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0} \quad (3.5.3.10)$$

여기서, $L_w = \text{PWL}$ (power level): 파워레벨 [dB]

W : 음원의 음향출력 [Watt]

W_0 : 기준음의 파워 = 10^{-12} Watt

음압레벨(SPL) 또는 음의 세기레벨(SIL)은 음원으로부터 일정 거리 떨어진 곳에서의 음압 또는 음의 세기를 이용하여 환산하는 개념이며, 파워레벨은 음원 자체가 지니고 있는 파워를 이용하여 환산하는 개념이다.

(나) 소음레벨

압력의 단위는 소리의 압력 그 자체를 가리키고 있으며, 주파수에 관계없이 일정하다. 그러나 사람이 귀로 느끼는 소음의 감각량은 저주파일수록 둔하게 감각되기 때문에 인체를 대상으로 할 때에는 사람의 청감에 따라 적절한 보정회로를 사용해야 한다. 청감보정회로에는 건강한 사람이 가청할 수 있는 1,000 Hz 음을 기준으로 주파수에 따른 보정을 하는데, 가청응답을 연구하는데 적합한 것으로 A 및 C 보정회로가 있다. 이와 같은 청감보정회로를 통하여 측정된 소음을 소음도 또는 소음레벨이라 하고, 인체를 대상으로 한 일반적인 환경소음에서는 A 특성을 많이 사용하므로 dB(A)로 표기한다. 일정한 시간 이상 지속적으로 발생하는 소음에 대하여는 공해진동으로서 기준시간 동안 dB(A)로 측정하여 평균한 값에 해당하는 등가레벨

(Leq)을 많이 사용한다.

(다) 환산거리를 이용한 소음자료의 처리기법

앞의 음압레벨(SPL)에 대한 식 (3.5.3.6)에서 $\frac{P}{P_0}$ 를 환산거리 형태로 표시하면,

$$\frac{P}{P_0} = k' \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^\beta \quad (3.5.3.11)$$

양변에 log를 취하고 20을 곱해주면,

$$20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) = 20 \log k' + 20\beta \log \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)$$

따라서

$$L_p = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) = k + \beta \log \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right) \quad (3.5.3.12)$$

위의 식 (3.5.3.12)를 log-linear 좌표계에 사용하면 환산거리 ($D/W^{1/3}$ or $D/W^{1/2}$)에 따른 발파풍압(dB)의 크기를 도시할 수 있다. 이로부터 계측된 자료점들을 그래프 상에 도시하고 자료를 가장 잘 표현하는 예측식을 회귀분석을 통하여 구함으로써 환산거리에 따른 발파풍압의 감소경향을 예측할 수 있다.

나. 프로그램의 구성 및 동작

VIB10 프로그램은 위에 제시한 이론적 예측기법을 토대로 발파진동 및 소음의 계측치를 입력자료로 하여 중회귀분석을 통해 주어진 지역에서의 진동 및 소음의 전파특성을 체계적으로 예측하는 것을 목적으로 한다. 개발된 VIB10 프로그램의 구성 및 동작방식을 아래에 간략히 소개하였다.

(1) 프로그램의 시작 및 종료

Fig. 3.5.3.1은 MATLAB의 초기화면인 'MATLAB Command Window'를 보인 것이며, 본 VIB10 프로그램의 실행은 그림에서와 같이 'MATLAB Command

Window'의 명령행(command line) 상에서 vib10을 입력함으로써 수행된다. 단, 이때 VIB10 프로그램을 담고 있는 M-파일이 MATLAB 프로그램의 실행경로로 등재된 디렉토리 내에 있어야 하며, 그렇지 않은 경우에는 파일의 전체경로를 지정하여야 한다.

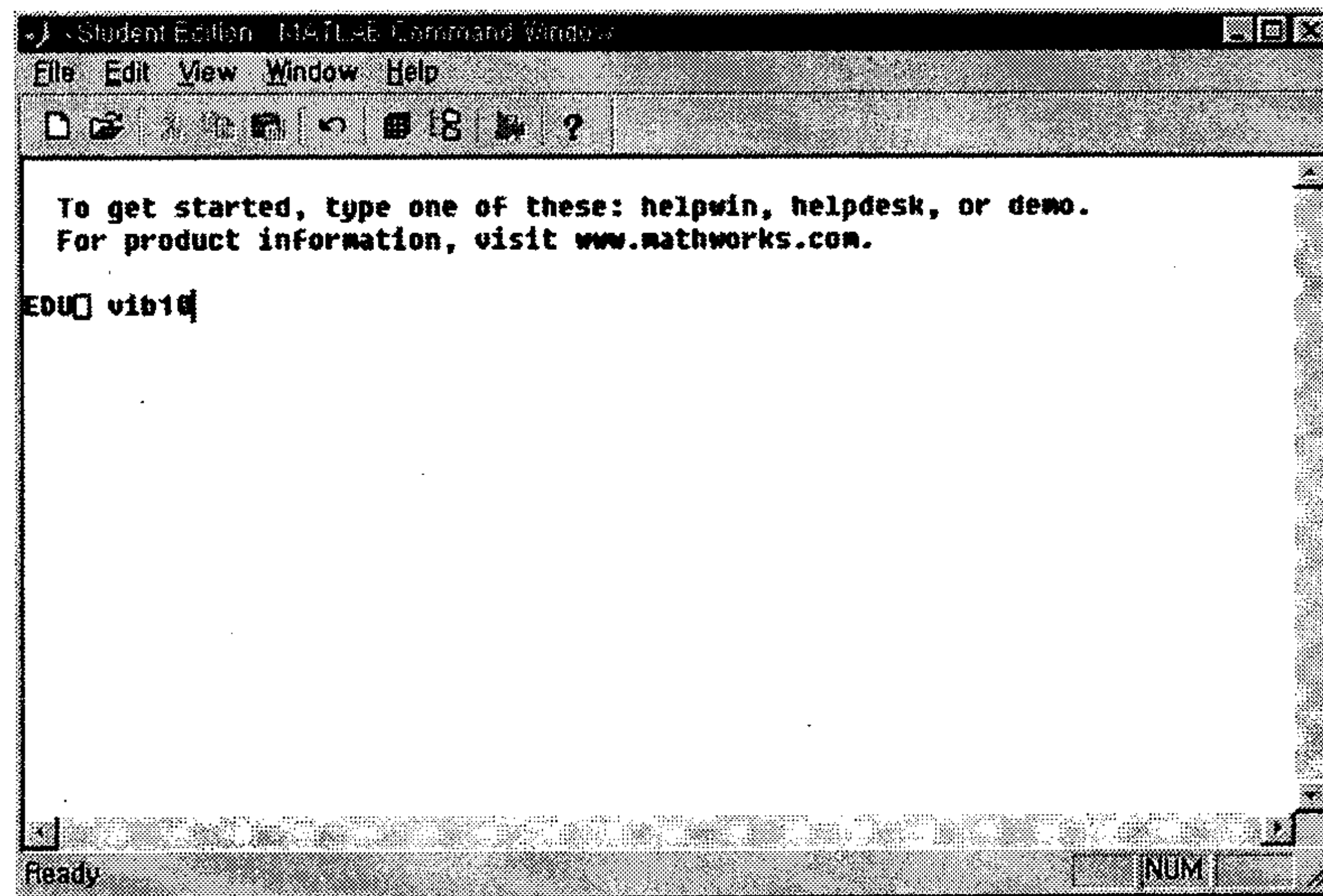


Fig. 3.5.3.1 VIB10 프로그램의 시작

VIB10 프로그램의 종료는 Fig. 3.5.3.3에서 보인 바와 같은 메뉴 상에서 'Quit'을 선택하면 프로그램 실행 중 언제라도 종료할 수 있다.

(2) 데이터파일의 선택

데이터파일은 사전에 일반적인 문자편집기(text editor)를 사용하여 아스키파일(ASCII file)의 형태로 작성, 저장해 두어야 하며, 프로그램이 실행되면 저장해 둔 파일을 불러들여 사용한다. 즉, 프로그램이 실행되면 처리해야할 데이터파일을 읽어들이기 위해 Fig. 3.5.3.2에 보인 것과 같은 선택 창이 열리며, 이 창에서 파일의 경로와 파일명을 입력함으로써 데이터파일을 지정한다.

한편, 본 프로그램에서 지정하고 있는 데이터파일의 형식을 확인하기 위해서는 Fig. 3.5.3.3에 보인 바와 같이 MATLAB 명령행 상에서 help vib10을 입력하면 된다. 그러면 VIB10에 대한 설명과 함께 본 프로그램에서 지정하고 있는 데이터파일의 구체적인 형식이 'MATLAB Command Window' 상에 출력된다.

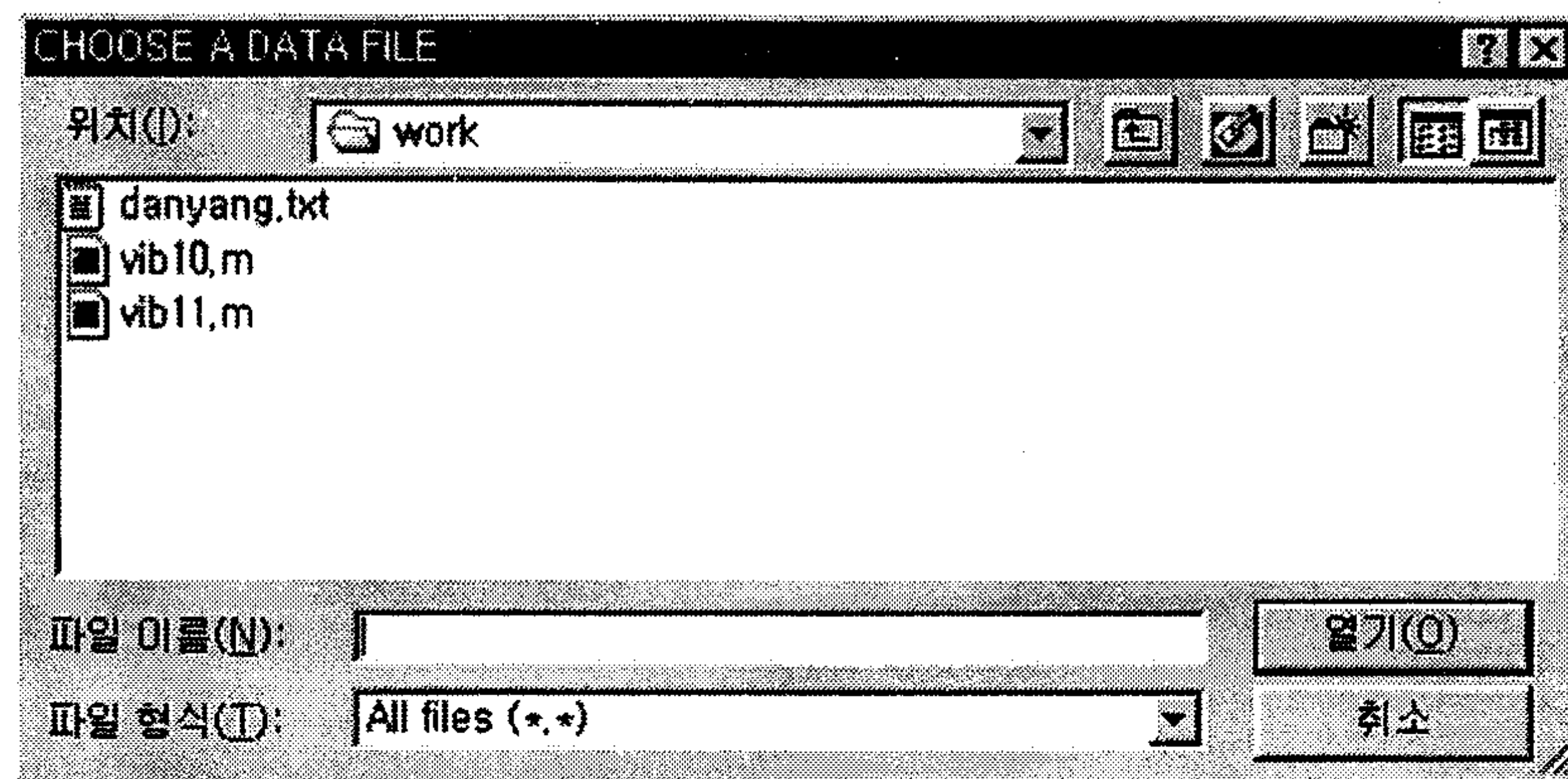


Fig. 3.5.3.2 데이터파일의 선택

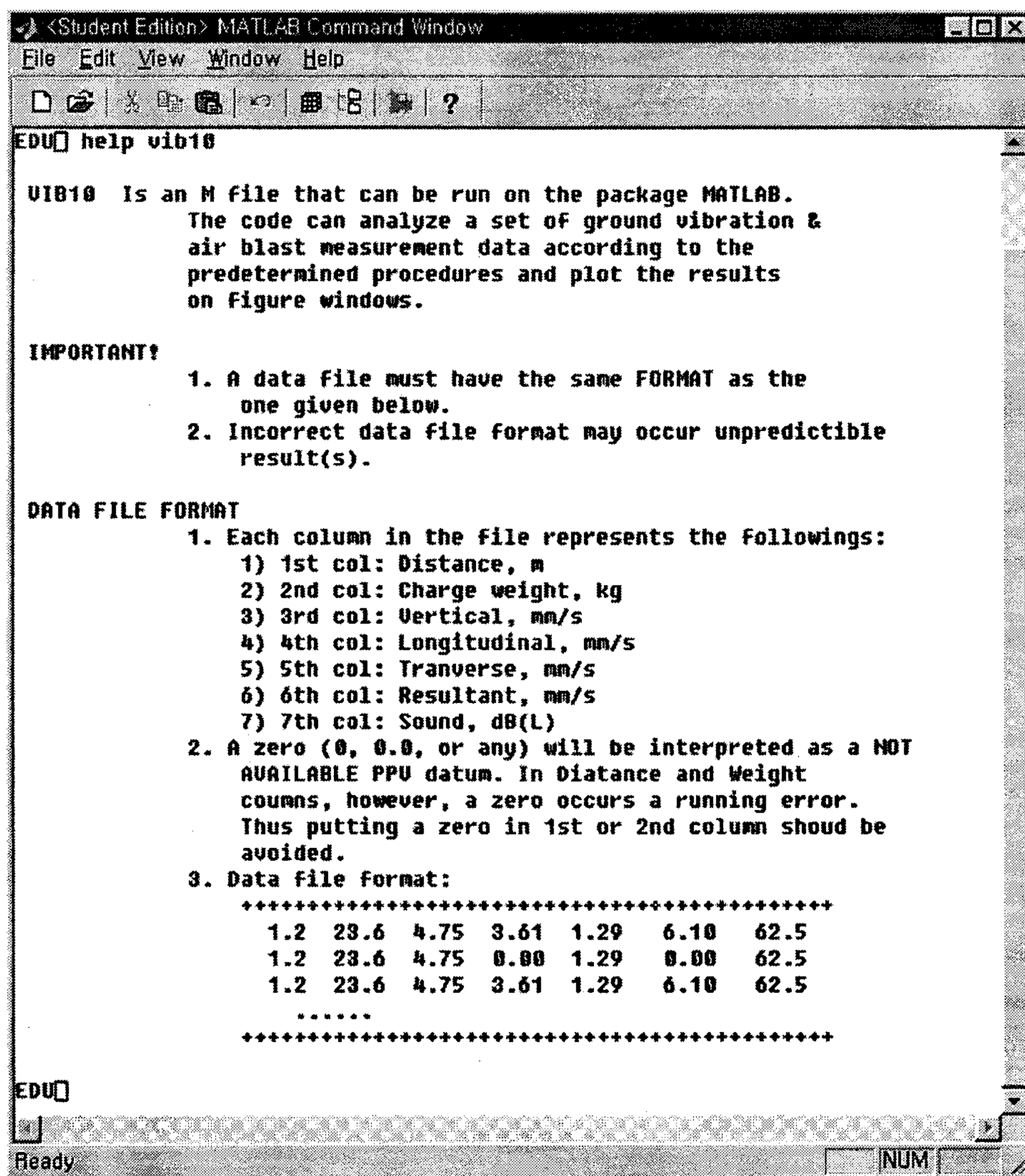


Fig. 3.5.3.3 VIB10의 개요 및 데이터파일의 형식보기

(3) 처리작업의 종류선택: 진동자료 또는 소음자료

데이터파일을 읽어 들인 후 프로그램은 처리하고자 하는 작업의 종류를 선택하게 하는데, Fig. 3.5.3.4에 보인 것과 같은 선택 창에서 원하는 작업을 선택한다. 한편, 본 프로그램에서 처리할 수 있는 작업의 종류로는 크게 i) 진동자료 처리작업과 ii) 소음자료 처리작업이 있다:

- 1) 진동자료: 수직성분, 진행성분, 접선성분, 벡터합성분 및 전체성분
- 2) 소음자료

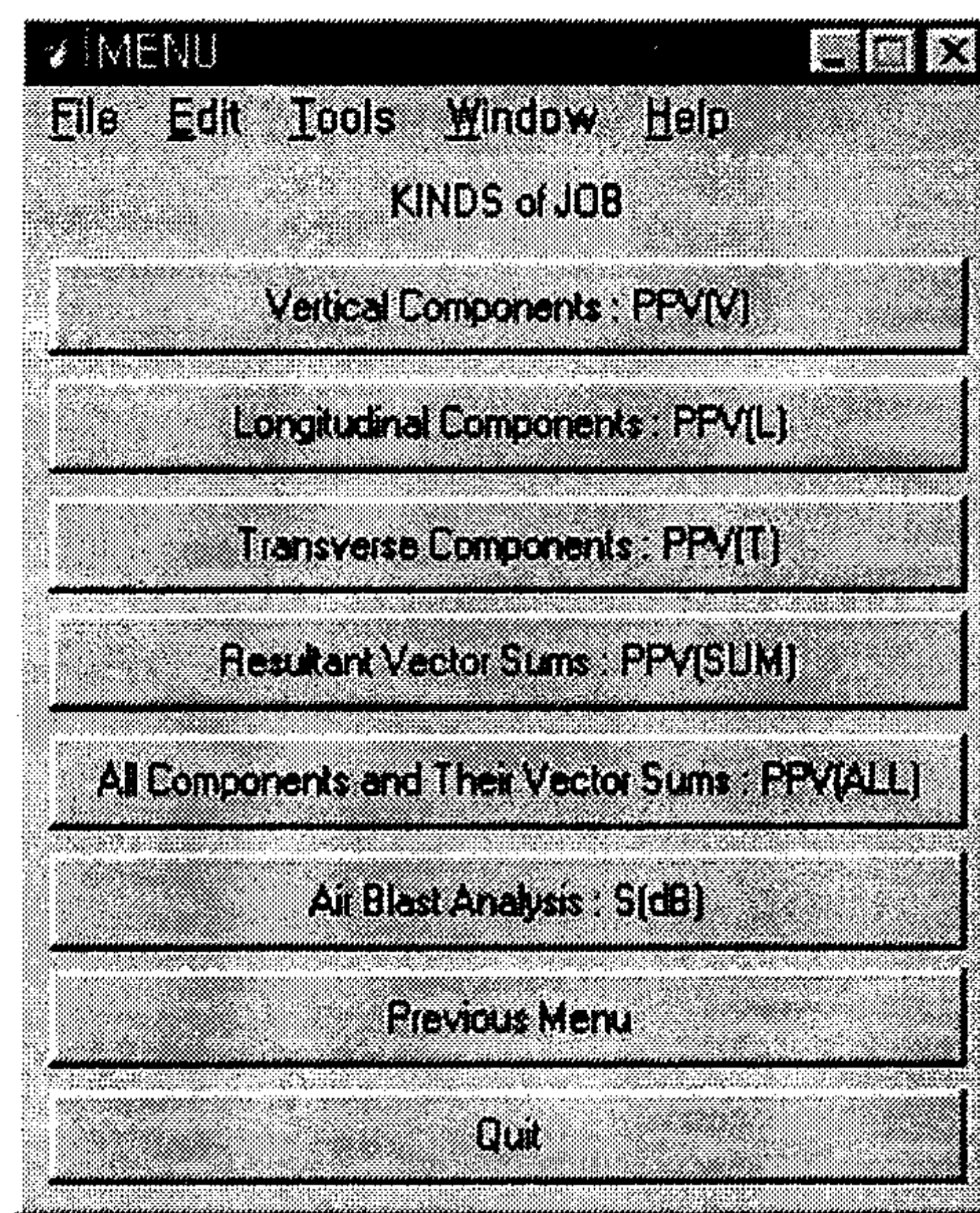


Fig. 3.5.3.4 자료처리작업의 종류선택

(4) 환산기법(scaling method)의 선정

원하는 작업이 선정되면 이에 대한 처리기법으로서 Fig. 3.5.3.5에 보인 것과 같은 메뉴에서 i) 제곱근환산기법과 ii) 세제곱근 환산기법 가운데 하나를 선택하여야 한다. 대개 두 기법을 차례로 사용하여 결과를 얻은 다음, 이들 중 상관도가 높은 쪽을 택하여 해석에 이용하는 것이 보통이다. 여기서는 제곱근 환산기법에 대한 사용법만을 소개하고 있으나 세제곱근 환산기법을 사용하는 경우에도 그 절차는 마찬가지이다.

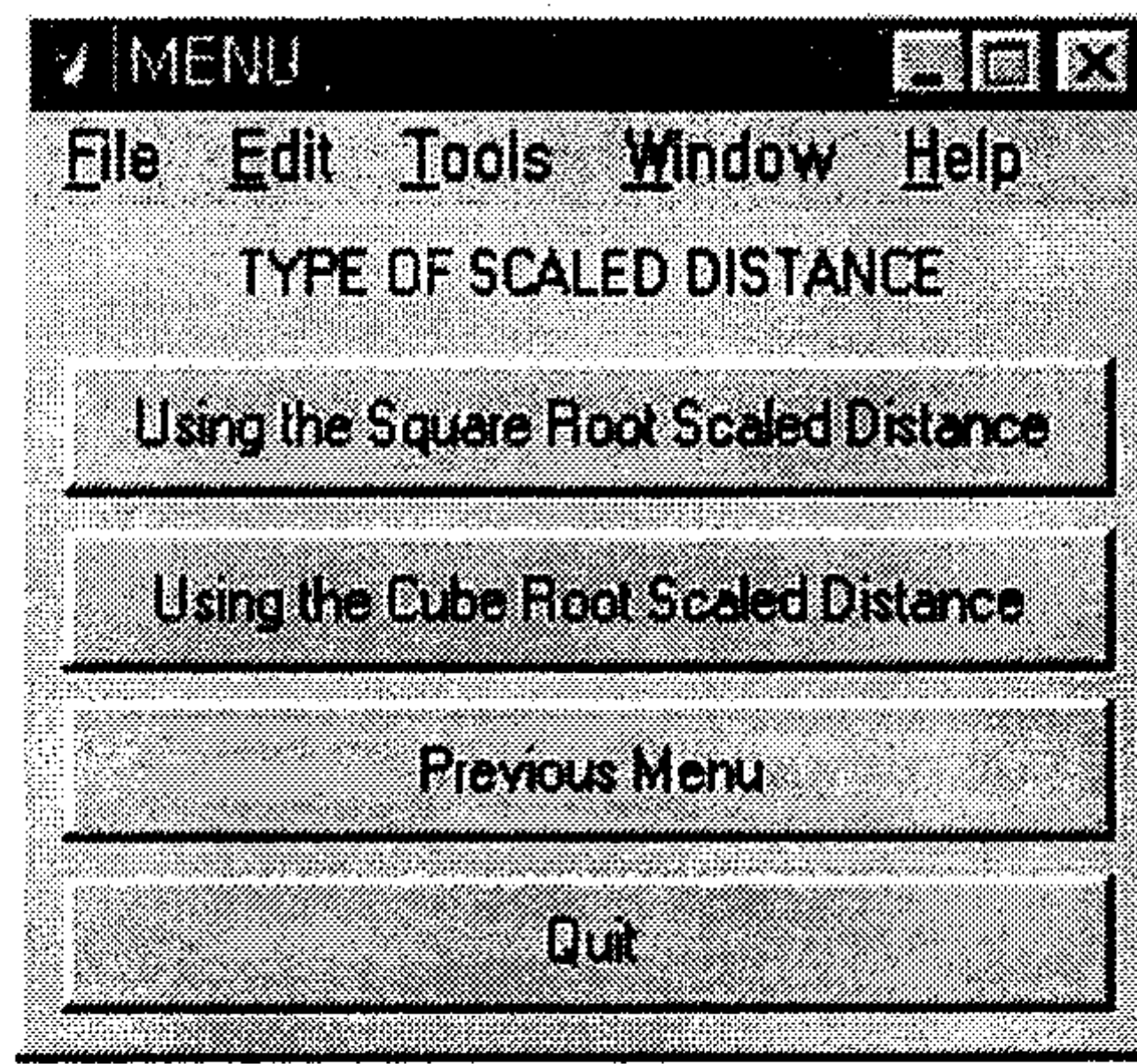


Fig. 3.5.3.5 환산기법의 선택

(5) 자료처리형식(출력형식)의 지정

발파진동 또는 소음 자료에 대하여 필요로 하는 회귀분석의 종류를 결정한다. 본 프로그램에서는 현재 Fig. 3.5.3.6에 보인 바와 같이 자료에 대한 중위수(median) 및 상·하한에 대한 회귀분석만 수행할 수 있으며, 따라서 이들의 조합 가운데 대체로 많이 사용되는 4가지 옵션을 제공하고 있다.

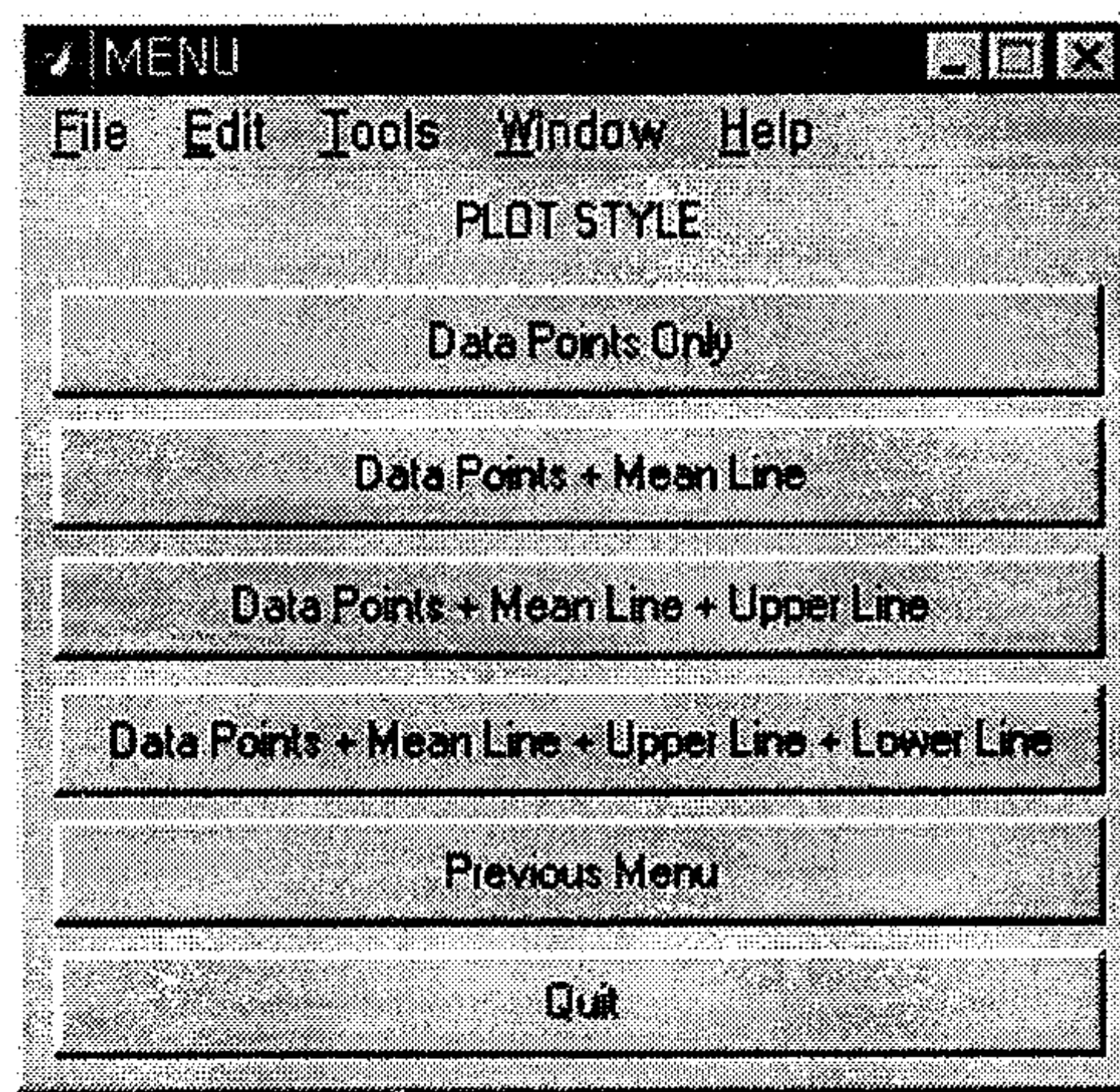


Fig. 3.5.3.6 출력형식의 선정

(6) 출력형식별 처리과정 및 결과

(가) Data Points Only 옵션

앞 단계에서 출력형식을 'Data Points Only'로 했을 경우 진동 및 소음 자료의 처리과정 및 결과는 다음과 같이 된다.

① 진동자료

진동계측자료에 대한 출력형식이 'Data Points Only'일 경우에는 별도의 회귀분석을 수행하지 않으며, Fig. 3.5.3.7에서와 같이 계측된 자료 점들만 그래프에 도시한다.

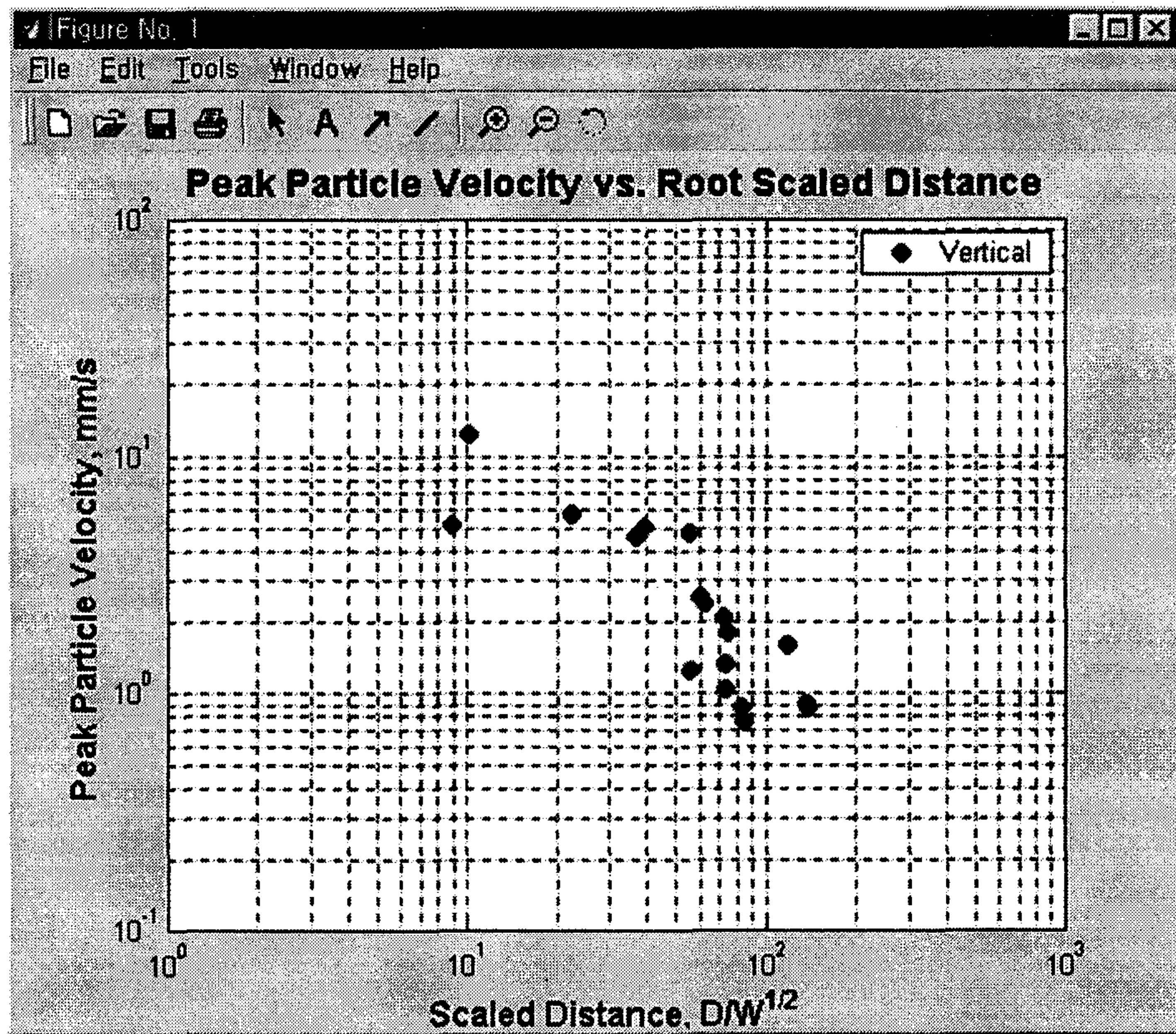


Fig. 3.5.3.7 'Data Points Only' 옵션선택시의 진동자료 처리결과

② 소음자료

소음계측자료에 대한 출력형식이 'Data Points Only'일 경우 위의 진동자료 처리에서와 마찬가지로 별도의 회귀분석을 수행하지 않으며, Fig. 3.5.3.8에서와 같이 계측된 자료 점들만 그래프에 도시한다.

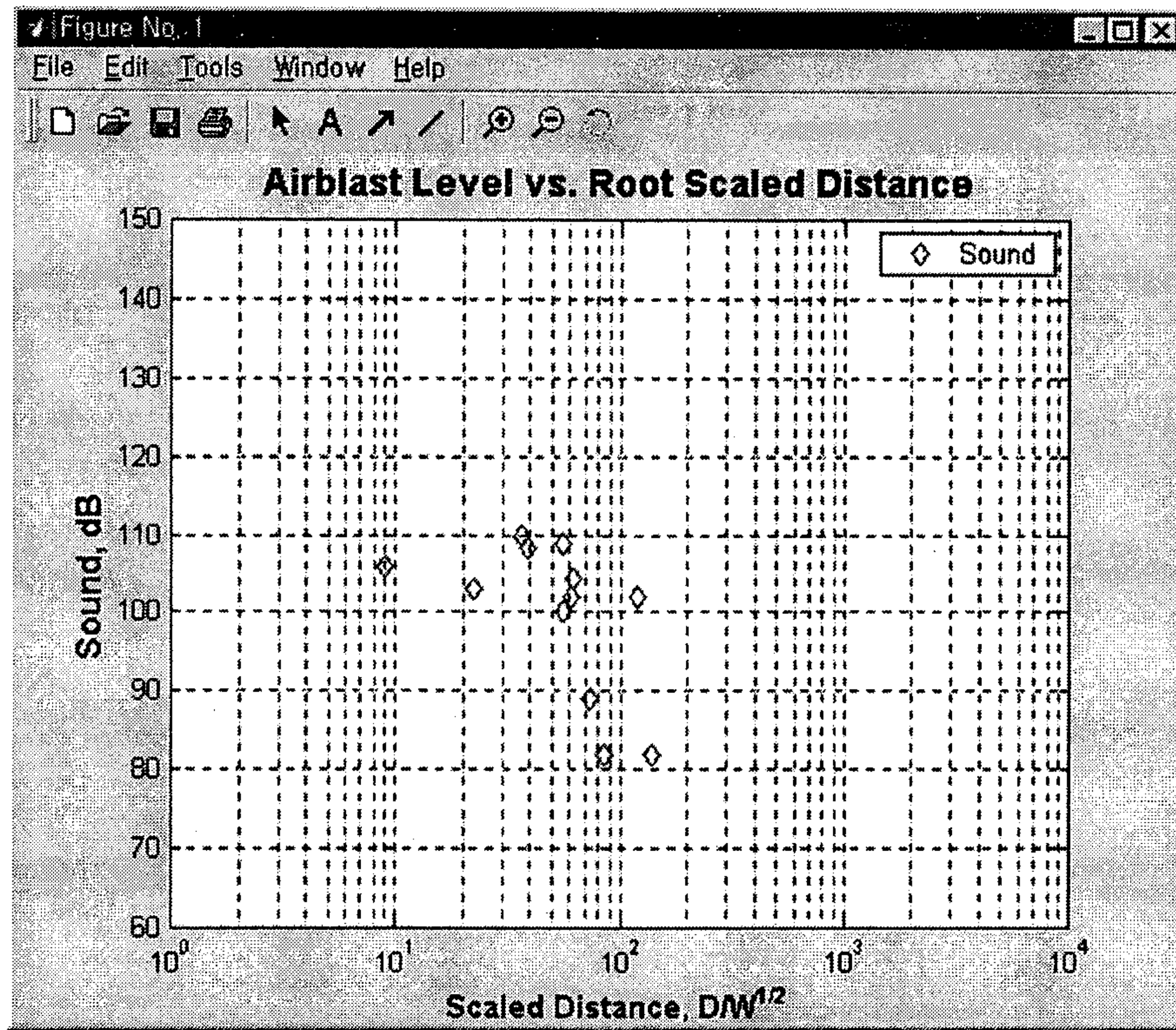


Fig. 3.5.3.8 'Data Points Only' 옵션선택시의 진동자료
처리결과

(나) Data Points + Mean Line 옵션

앞 단계에서 출력형식을 'Data Points + Mean Line'으로 했을 경우 진동 및 소음 자료의 처리과정 및 결과는 다음과 같이 된다.

① 진동자료

진동계측자료에 대한 출력형식이 'Data Points + Mean Line'일 경우에는 대상 자료에 대한 50% 회귀선을 구하며, Fig. 3.5.3.9에서와 같이 계측된 자료 점들과 아울러 50% 회귀선을 함께 그래프에 도시한다.

아울러 환산식의 계수들(K 및 N)과 상관도(R)를 표시할 지점을 십자형(+)의 커서를 사용하여 지정하는데, 사용자가 적절한 지점으로 마우스를 사용하여 커서를 이동한 후 클릭하면 Fig. 3.5.3.10에서와 같이 선택한 지점에 회귀분석 결과를 표시한다.

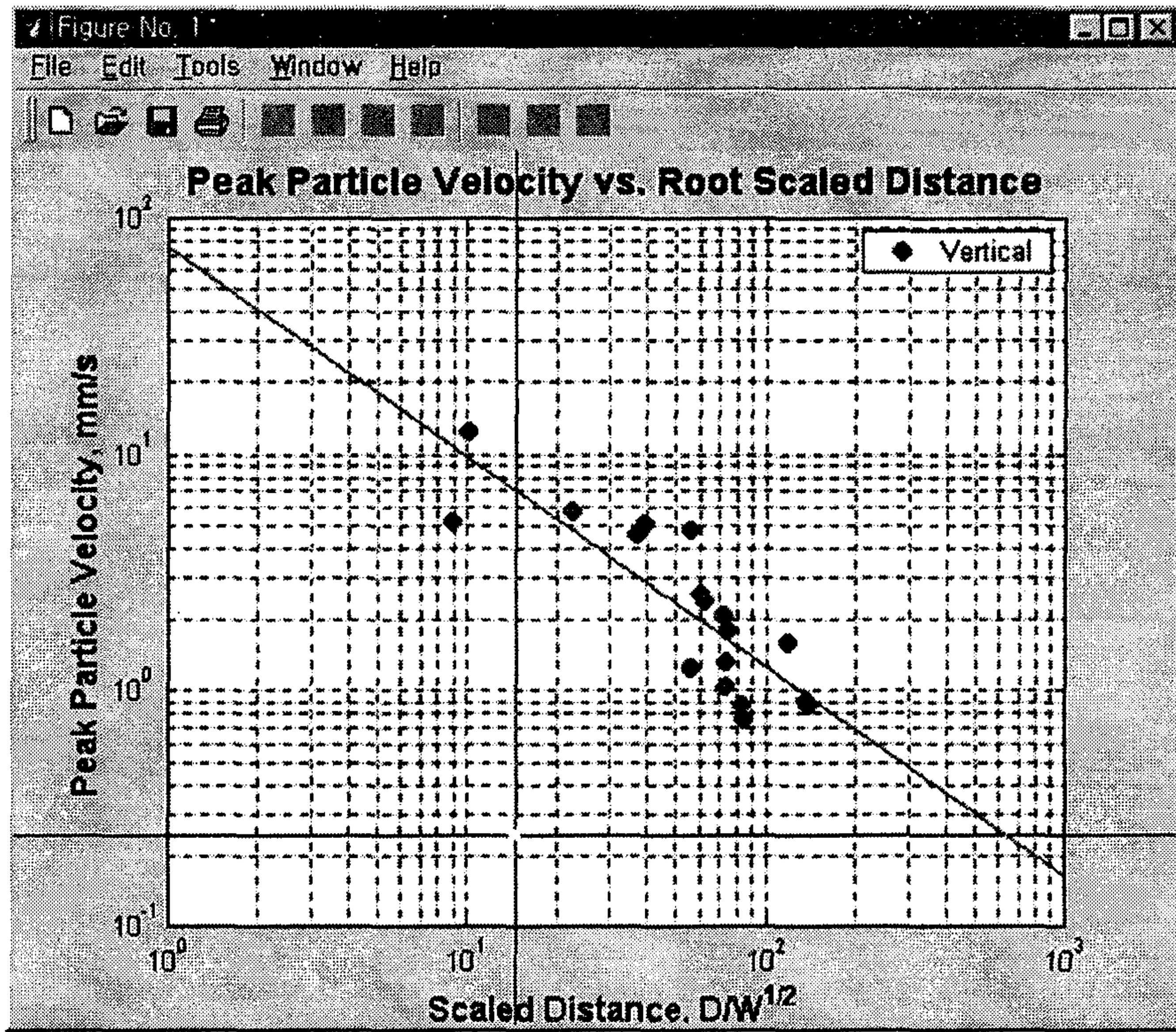


Fig. 3.5.3.9 'Data Points + Mean Line' 옵션선택시의 50% 회귀선

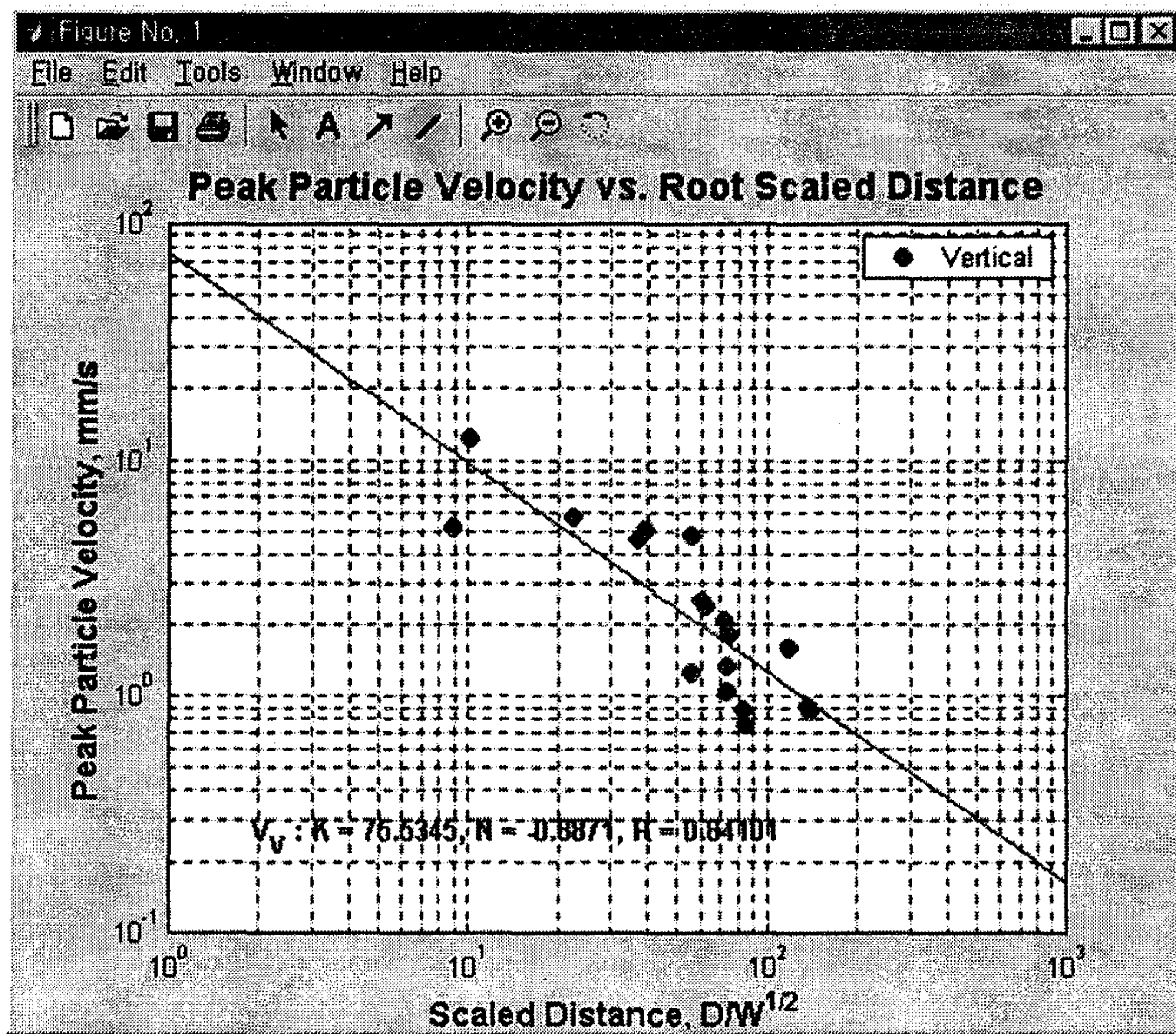


Fig. 3.5.3.10 'Data Points + Mean Line' 옵션선택시의 진동자료 처리결과

② 소음자료

소음계측자료에 대한 출력형식이 'Data Points + Mean Line'일 경우 위의 진동자료 처리에서와 마찬가지로 대상 자료에 대한 50% 회귀선을 구하며, Fig. 3.5.3.11에서와 같이 환산식의 계수들(K 및 N)과 상관도(R)를 구하여 선택한 지점에 회귀분석 결과를 표시한다.

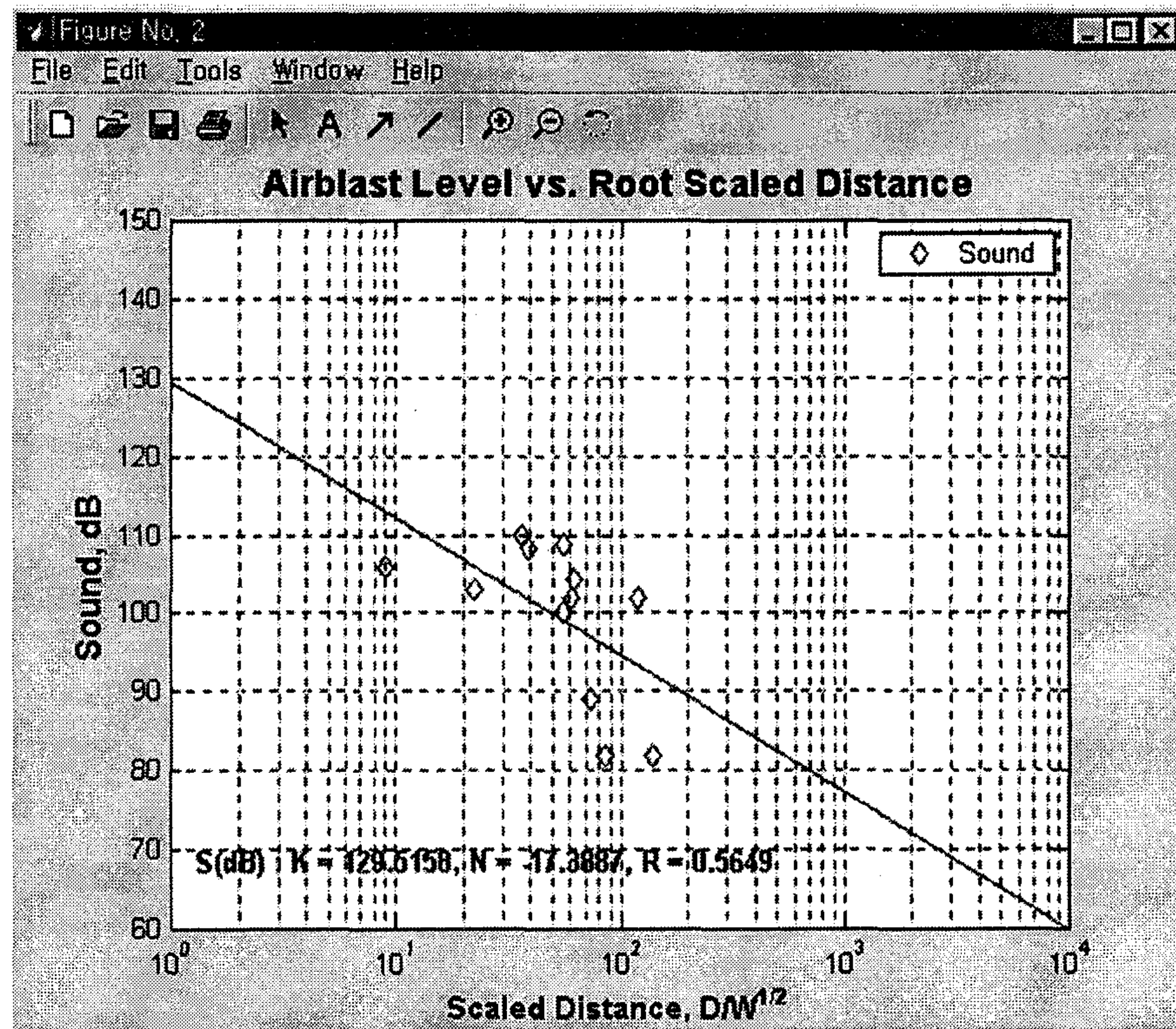


Fig. 3.5.3.11 'Data Points + Mean Line' 옵션선택시의 소음자료 처리결과

(다) Data Points + Mean Line + Upper Line 옵션

① 진동자료

진동계측자료에 대한 출력형식이 'Data Points + Mean Line + Upper Line'일 경우에는 대상 자료에 대한 50% 회귀선을 구하는 외에 모든 자료를 포함하는 상한선에 대한 회귀식을 함께 구하며, Fig. 3.5.3.12에서와 같이 계측된 자료 점들과 아울러 50% 회귀선과 상한선을 함께 그래프에 도시한다.

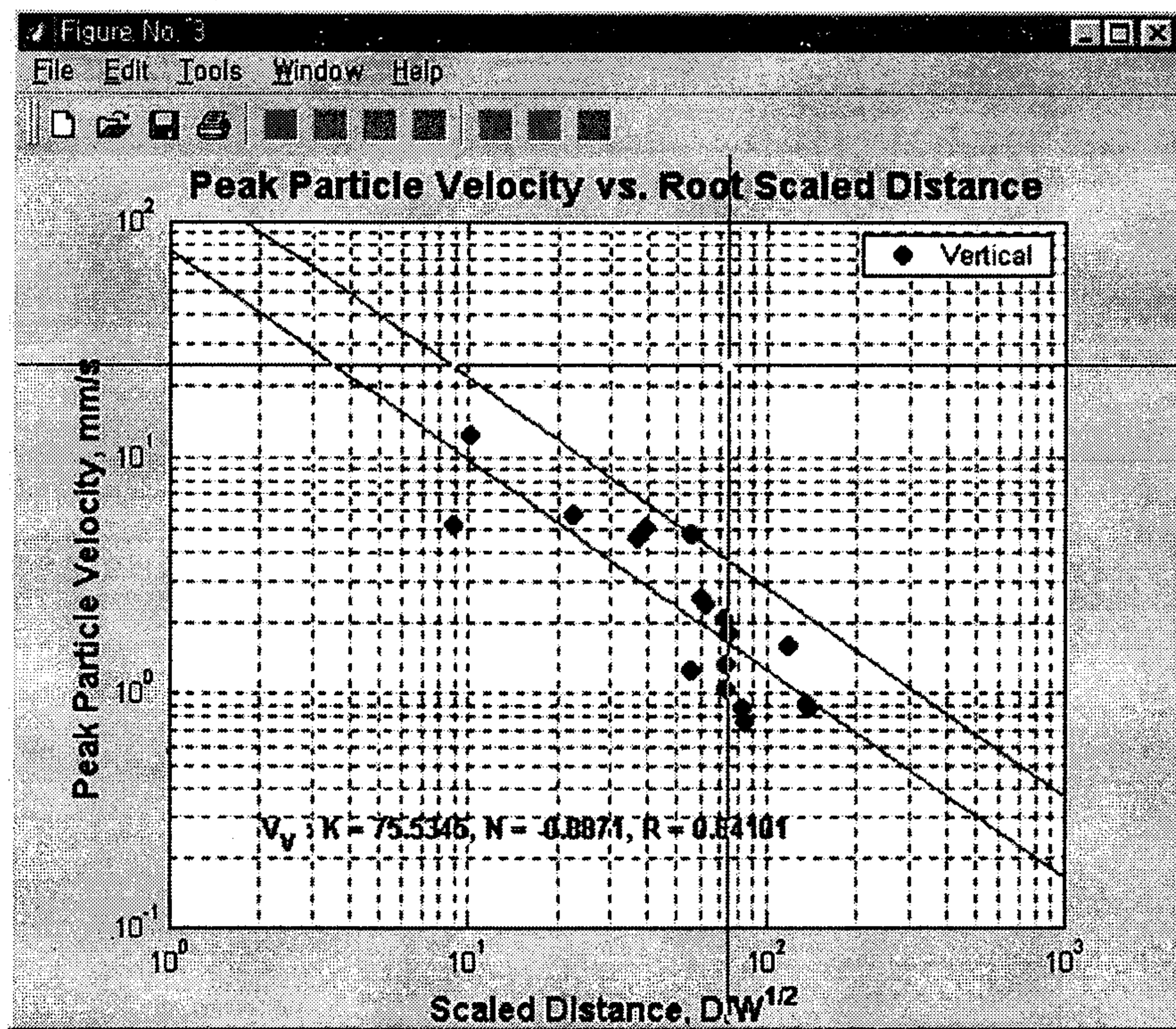


Fig. 3.5.3.12 'Data Points + Mean Line + Upper Line' 옵션선택시의 50% 회귀선 및 상한선

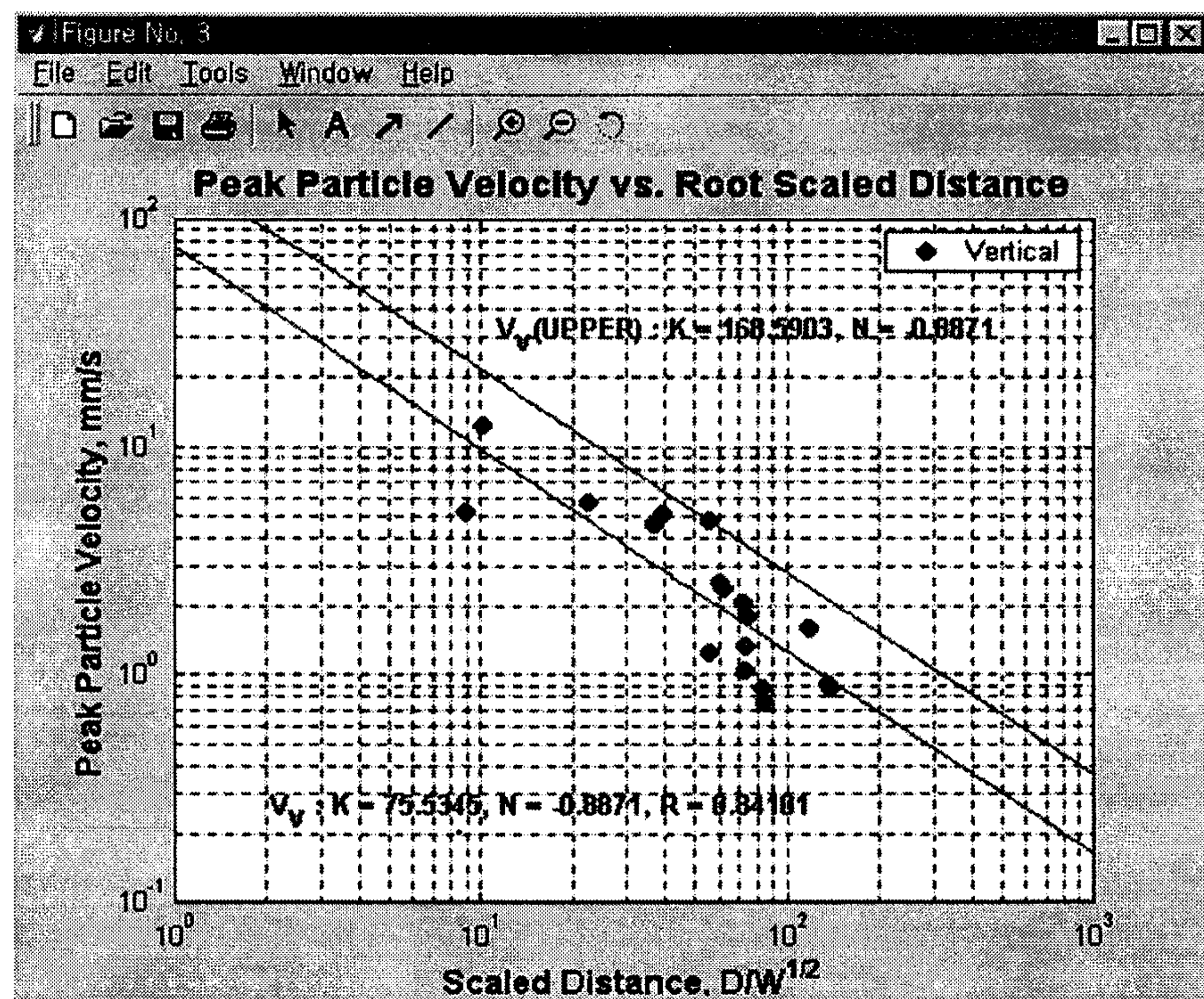


Fig. 3.5.3.13 'Data Points + Mean Line + Upper Line' 옵션선택시의 진동자료처리결과

아울러 환산식의 계수들(K 및 N)과 상관도(R)를 표시할 지점을 십자형(+)의 커서를 사용하여 지정하는데, 사용자가 적절한 지점으로 마우스를 통해 커서를 이동한 후 클릭하면 Fig. 3.5.3.13에서와 같이 선택된 지점에 회귀분석 결과를 표시한다.

② 소음자료

소음계측자료에 대한 출력형식이 'Data Points + Mean Line + Upper Line'일 경우 위의 진동자료처리에서와 마찬가지로 대상 자료에 대한 50% 회귀선과 모든 자료를 포함하는 상한선을 구하며, Fig. 3.5.3.14에서와 같이 환산식의 계수들(K 및 N)과 상관도(R)를 구하여 선택된 지점에 회귀분석 결과를 표시한다.

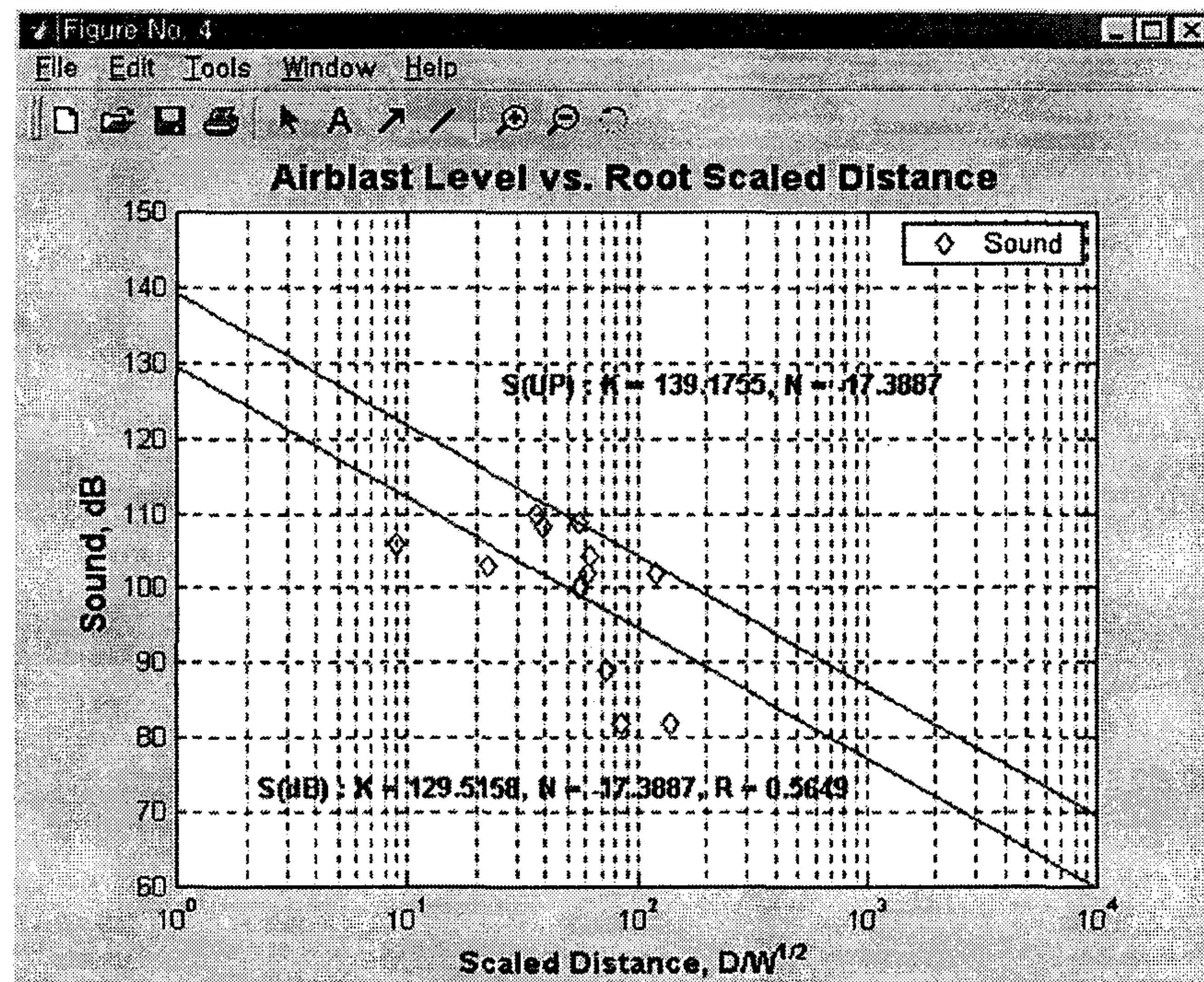


Fig. 3.5.3.14 'Data Points + Mean Line + Upper Line' 옵션선택시의 소음자료 처리결과

(라) Data Points + Mean Line + Upper Line + Lower Line 옵션

① 진동자료

진동계측자료에 대한 출력형식이 'Data Points + Mean Line + Upper Line + Lower Line'일 경우에는 대상 자료에 대한 50% 회귀선과 모든 자료에 대한 상한선을 구하는 외에 하한선에 대한 회귀식도 함께 구하며, Fig. 3.5.3.15에서와 같이 계측된 자료 점들과 아울러 50% 회귀선, 상한선 및 하한선을 함께 그래프에 도시한다.

아울러 각 환산식의 계수들(K 및 N)과 상관도(R)를 표시할 지점은 앞의 다른 옵션에서와 마찬가지로 각각의 회귀선이 도시된 직후 십자형(+)의 커서를 사용하여 지정토록 하는데, 사용자가 적절한 지점으로 마우스를 통해 커서를 이동한 후 클릭하면 선택된 지점에 회귀분석 결과를 표시한다. 일반적으로 자료에 대한 하한선은 많이 사용되지 않으나 본 프로그램에서는 옵션으로 제공하고 있다.

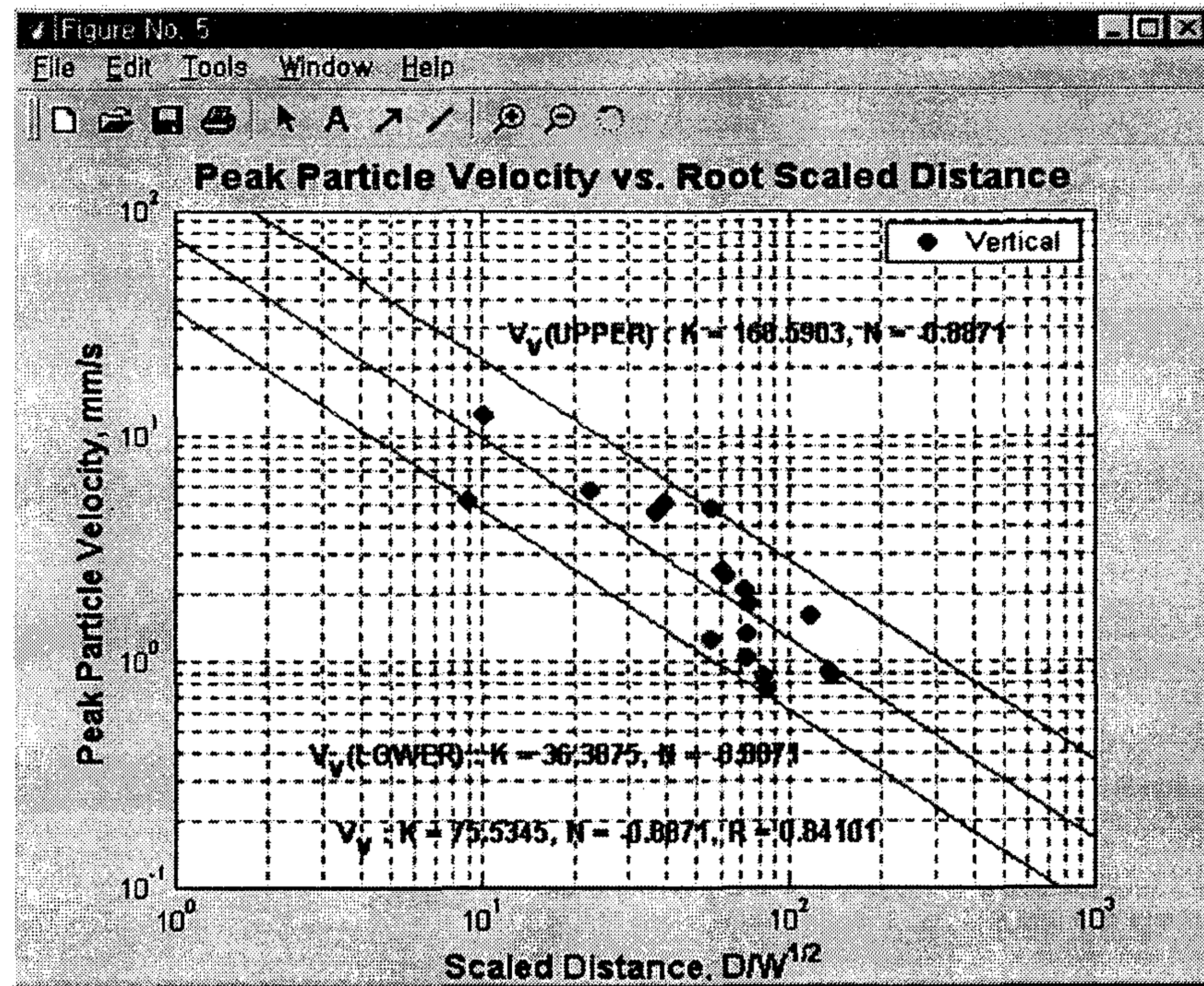


Fig. 3.5.3.15 'Data Points + Mean Line + Upper Line + Lower Line' 옵션선택시의 진동자료 처리결과

② 소음자료

소음계측자료에 대한 출력형식이 'Data Points + Mean Line + Upper Line + Lower Line'일 경우 위의 진동자료 처리에서와 마찬가지로 대상 자료에 대한 50% 회귀선과 모든 자료에 대한 상한선 및 하한선을 구하며, Fig. 3.5.3.16에서와 같이 각 환산식의 계수들(K 및 N)과 상관도(R)를 구하여 선택된 지점에 회귀분석 결과를 표시한다.

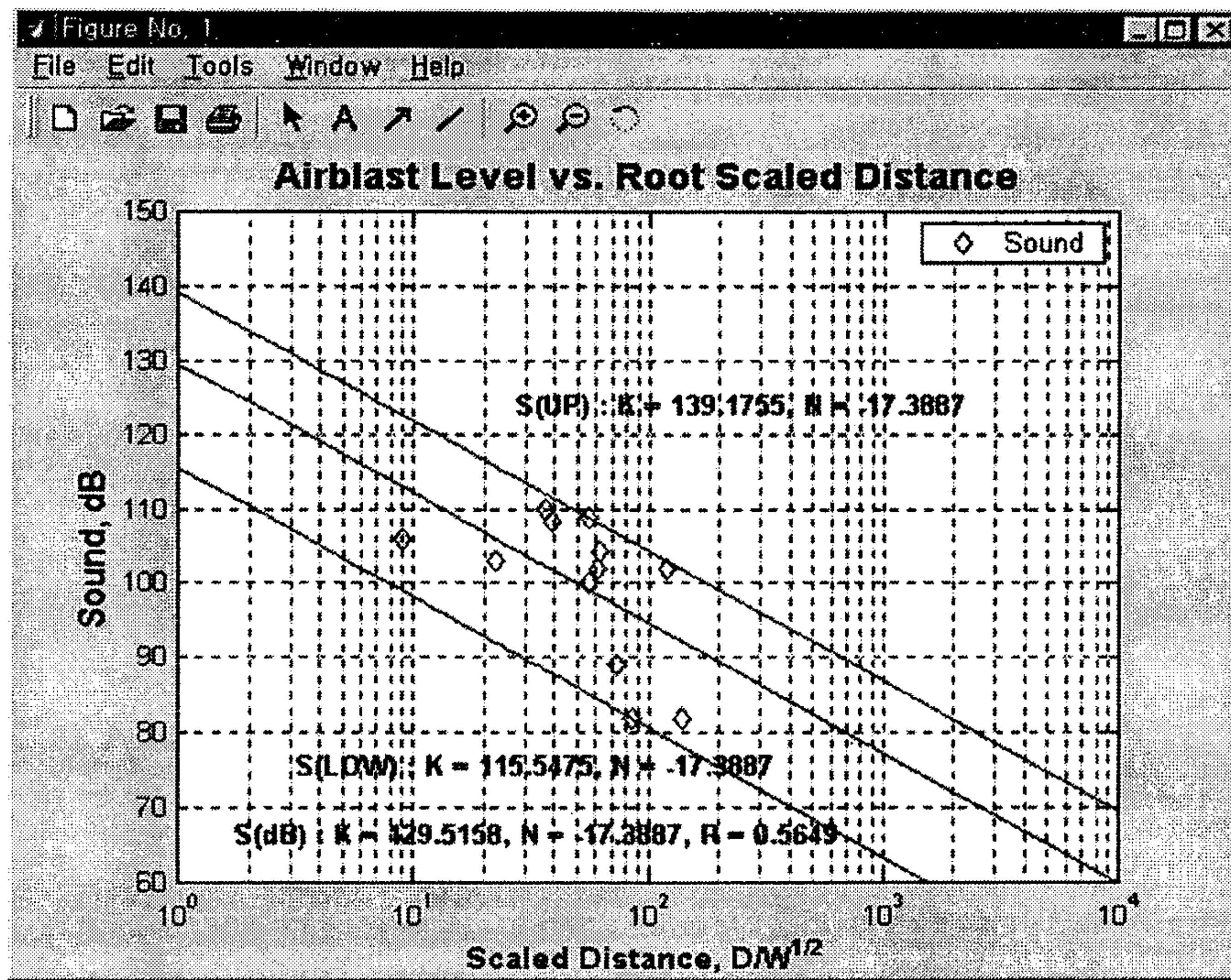


Fig. 3.5.3.16 'Data Points + Mean Line + Upper Line + Lower Line' 옵션선택시의 소음자료 처리결과

다. Source Code

```
function vib10()

%VIB10 is an M file that can be run on the commercial package MATLAB.

%   The code can analyze a set of ground vibration & air blast
%   measurement data according to the predetermined procedures
%   and plot the results on figure windows.
%
%
%IMPORTANT!

%   1. A data file must have the same format as the one given below.
%   2. Incorrect data file format may occur unpredictable results.
%
%DATA FILE FORMAT

%   1. Each column in the file represents the followings:
%
%       - 1st col: Distance, m
%       - 2nd col: Weight, kg
%       - 3rd col: Vertical, mm/s
%       - 4th col: Longitudinal, mm/s
%       - 5th col: Tranverse, mm/s
%       - 6th col: Resultant, mm/s
%       - 7th col: Sound, dB(L)
%
%   2. A 'zero' (0, 0.0, or any) will be interpreted as a NOT
%       AVAILABLE PPV datum. In Distance and Weight
%       columns, however, a zero occurs a running error.
%       Thus putting a zero in 1st or 2nd column should
%       be avoided.
%
%   3. Data file format:
%
%       -----
%       4.2  23.6  4.75  3.61  1.29  6.10  62.5
%       4.2  23.6  4.75  0.00  1.29  0.00  62.5
```



```

%      4.2  23.6  4.75  3.61  1.29  6.10  62.5
%      ...
%      -----

% remove garbages being remained from the previous session.
clear;

% Declaration of global variables
global numFigure;    % for numbering of figure window
global VV VL VT VS VA VB; % for storing PPV and SOUND data
global typeJob;      % 'V', 'L', 'T', 'S', 'A', or 'dB'
global typeSD;       % 'SQUARE' or 'CUBE'
global plotStyle;    % 'D', 'DM', 'DMU', or 'DMUL'

numFigure = 1;      % initialization of figure window designator.

result = readfile;
if (isequal(result, 'QUIT')) % if CANCEL or any error, exit
    return;                % the program.
end                        % if DONE, go ahead.

```

< 이하생략 >

4. 충격진동 예측기법

실제 발파해체공법시 발생하는 지반진동은 발파에 의한 진동과 부재의 낙하시 지반과의 충격에 의한 진동으로 나눌 수 있다. 발파해체는 암반굴착시와는 달리 화약의 장약방법이 건물 내 주요 지지부를 천공하여 장약, 발파함으로써 발파원이 지상에 있게 되고 이에 따라 지반으로의 진동의 전달은 암반중 발파와는 다른 양상을 보일 수도 있을 것이며 진동예측에 있어서도 기존의 환산거리개념에 의한 전파식을 사용할 수 있는가의 검토도 필요하다. 또한 고층 건물의 경우 구조물 발파해체시 발생하는 진동은 발파에 의한 진동보다 충격에 의한 진동이 더 클 것으로 예상된다. 발파진동의 크기와 주파수대역에 대한 연구는 그동안 국내에서도 활발히 수행되고 있고, 토목공사의 항타진동 및 기계진동에 관한 이론과 진동속도식을 제시한 경우는 있으나 발파해체시의 충격진동에 대해서는 연구가 매우 미흡한 실정이다. Roberto Folchi는 14층 빌딩이 수직으로 붕괴될 때 거리 D(m)인 지점에서의 예상 진동속도식을 제시한 바 있으나 이 식에는 단순히 거리에 관한 변수만 고려되고 있어 그 적용에 한계를 가지고 있다.

건물발파해체시 발생하는 충격진동에 대하여 Robert Folchi는 14층 건물이 수직으로 붕괴될 때 건물의 중심으로부터 거리 D만큼 떨어진 지점에서 예상되는 지반진동을 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$V_{\max} = 167.3 D^{-1.41}$$

V_{\max} : 예상 지반진동(cm/sec)

D : 충격질량 중심으로부터 측정지점까지의 거리(m)

그러나 식의 표현에서 볼 수 있듯이 상기의 식은 거리만을 변수로 하고 있으며 충격량의 규모에 따른 변수가 포함되어 있지 않기 때문에 상기 식이 적용된 특정지역 외로 일반적 적용이나 실제 여러 발파패턴에 대한 효과를 예측하는 데 제한을 갖고 있다.

일반 발파에 의한 진동예측식에서 변수로 사용하는 환산거리는 거리를 사용화약량에 의하여 환산한 것이다. 장약량은 폭원에서 에너지양에 비례하며 따라서 충격진동의 경우에도 장약량에 해당하는 에너지 변수의 사용을 고려하여 볼 수 있다. 충격시 지반에 전달되는 에너지는 부재가 갖는 운동에너지에 비례할 것이며 운동에너지의 양은 부재가 원래 갖고 있던 위치에너지가 변환된 것으로서 계측자료의 처리는 장약량 변수를 위치에너지 변수로 대체할 수 있다.

충격에 의한 지반진동의 전파특성을 고찰하기 위하여 낙하 추를 이용하여 충격시험을 실시한 결과를 요약하면 낙하충격에 의한 지반진동의 속도는 발파에 의한 예측식의 환산거리 변수에서 장약량 대신 에너지양을 사용하여 유도할 수 있음을 보여주었다. 낙하충격에 의한 지반진동 전파는 다음 식으로 표현할 수 있었다.

$$PPV = K \left(\frac{D}{E^{1/3}} \right)^n$$

PPV : 최대진동속도 (mm/sec, cm/sec)

D : 충격지점으로부터의 거리 (m)

E : 낙하물체의 초기 위치에너지 (J)

K, n : 입지상수

따라서 낙하충격에 의한 최대입자 진동속도는 발파진동의 속도전파식에서 표현되는 지발당 최대장약량의 변수대신에 부재의 위치에너지로 변환하면 예측이 가능한 것으로 나타나고 있으며 상기의 식에서 에너지 E는 다음과 같이 부재의 위치에너지로 계산할 수 있다.

$$E = mgh$$

m : 추(부재)의 질량(kg)

g : 중력가속도(= 9.8 m/sec²)

h : 추(부재)의 높이(m)

건물발파해체의 경우 파괴된 부재의 무게와 지반에서의 높이로부터 에너지 계산이 가능하다. 그러나 파괴된 부재의 형태자체가 단순한 형상이 아닐 경우의 위치에너지 계산에서 질량중심을 이용하기는 어려우며 따라서 여러 형태의 부재에 대한 위치에너지 산정하는 방법이 고려되어야 할 것이다. 또한 상기 식의 보완을 위하여 회전운동에 의한 충격효과, 지반에 1차 낙하된 부재들로 인한 충격흡수 영향문제들이 정량적으로 고찰되어야 할 것이다.

국내 발파해체시 진동 계측은 해체대상 건물에 인접한 주요 구조물 또는 시설물을 대상으로 하여 영향평가를 위한 목적으로 수행되는 것이 일반적이라 거리별로 진동전파양상을 구하기에는 자료가 아직 불충분한 면이 있다. 상기의 결과로 보면 환산거리를 이용한 예측식을 충분히 적용할 수 있을 것으로 예상되나 계측자료가 좀더 축적될 필요가 있으며 지반 쪽으로의 진동전달에 있어서 암굴착 경우와의 정량적인 비교도 가능할 것으로 보인다.

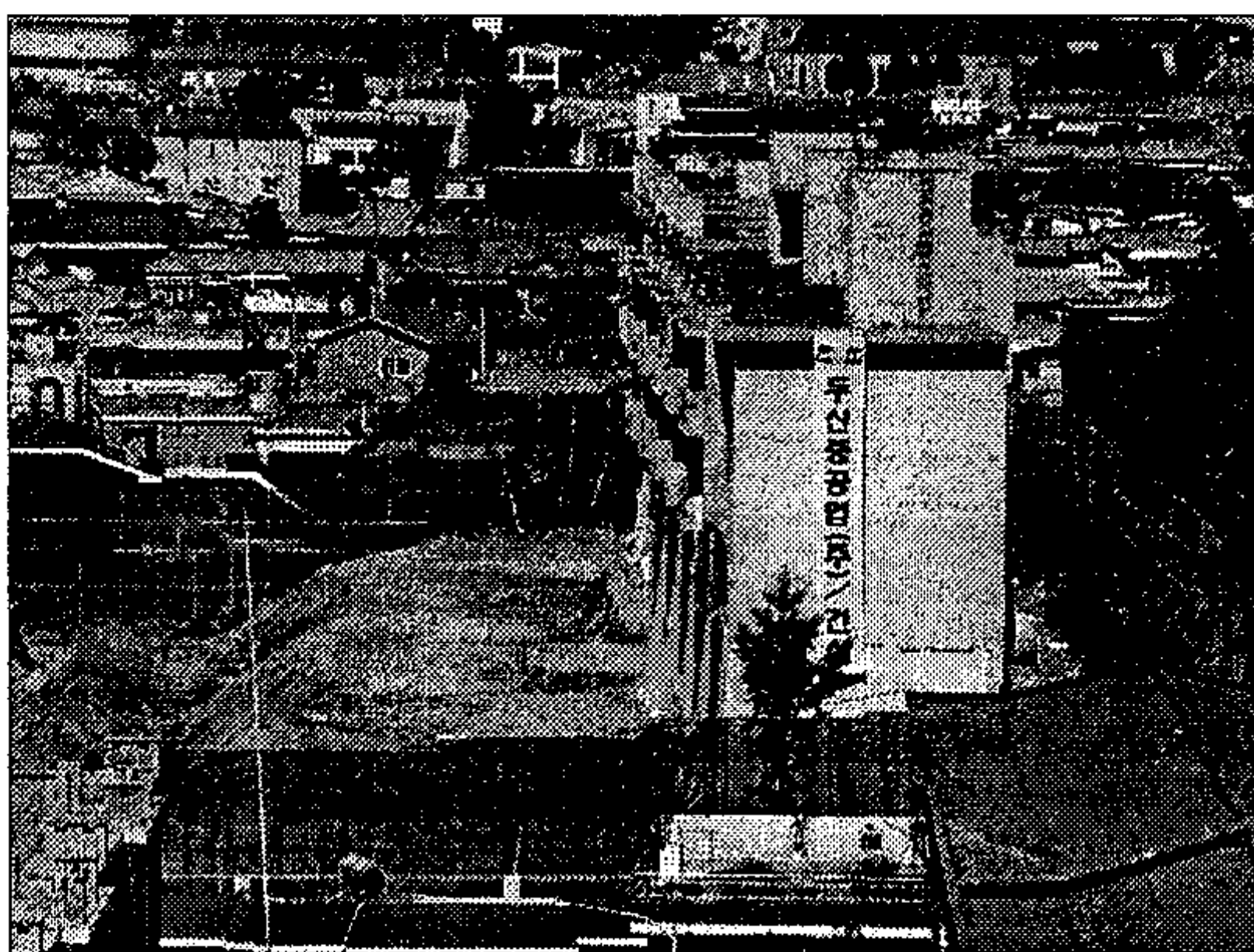
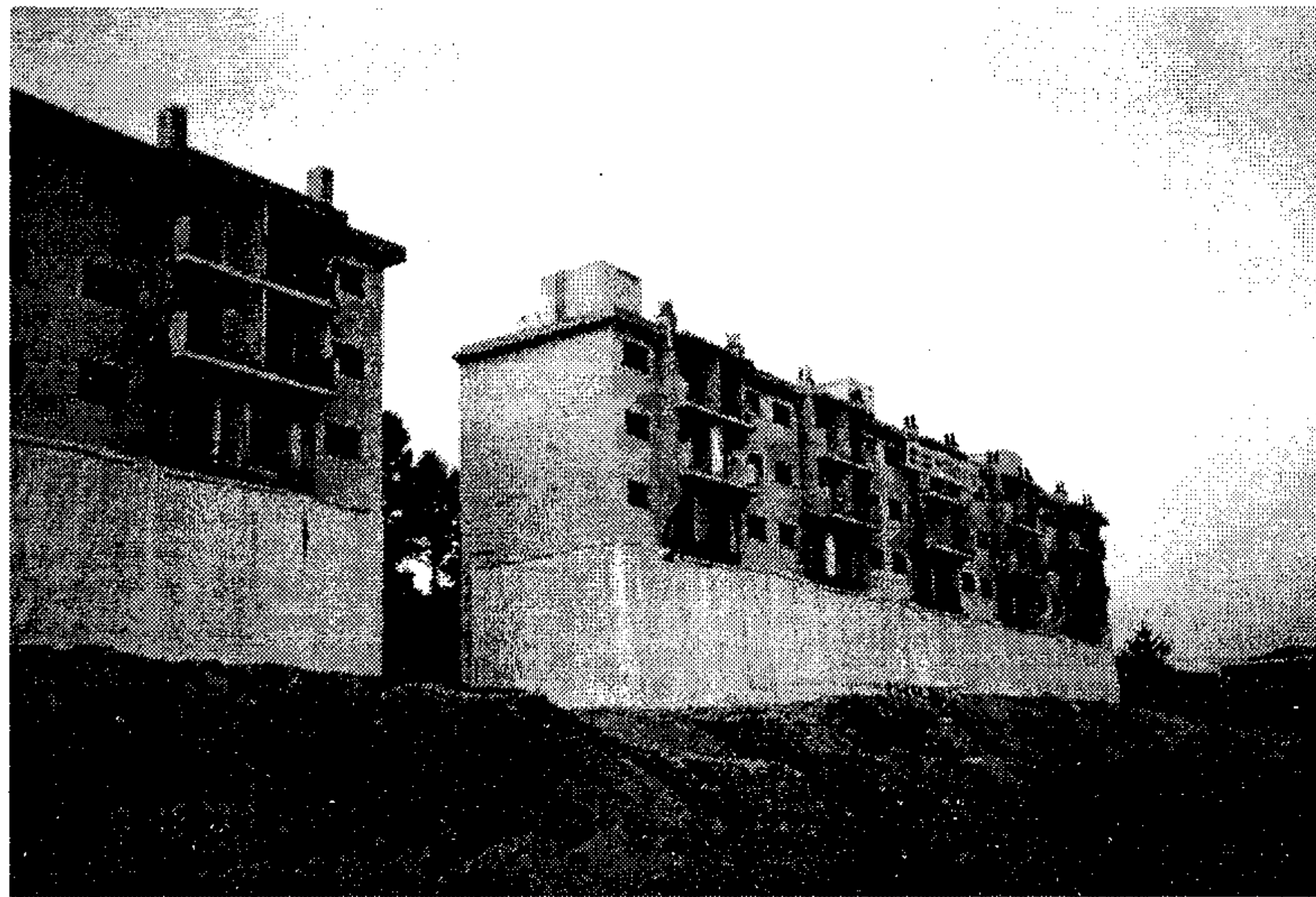
5. 계측 사례

1단계 연구기간 중 실시된 현장 계측 사례는 다음과 같다.

- ▶ 건물발파해체시 발파진동 및 충격진동 : 춘천 5층 아파트
- ▶ 채석발파시 발파진동 : 청도-밀양의 안산암 지역 채석발파, 건천시 S1 채석장 채석발파, 경주시 S2 및 S3 채석장 채석발파
- ▶ 노천 채광발파시 발파진동 : 동해 및 삼척 석회암 지역 채광발파
- ▶ 기타 : 철도터널굴착 터널발파 진동, 시추공을 이용한 지하심부 시험발파

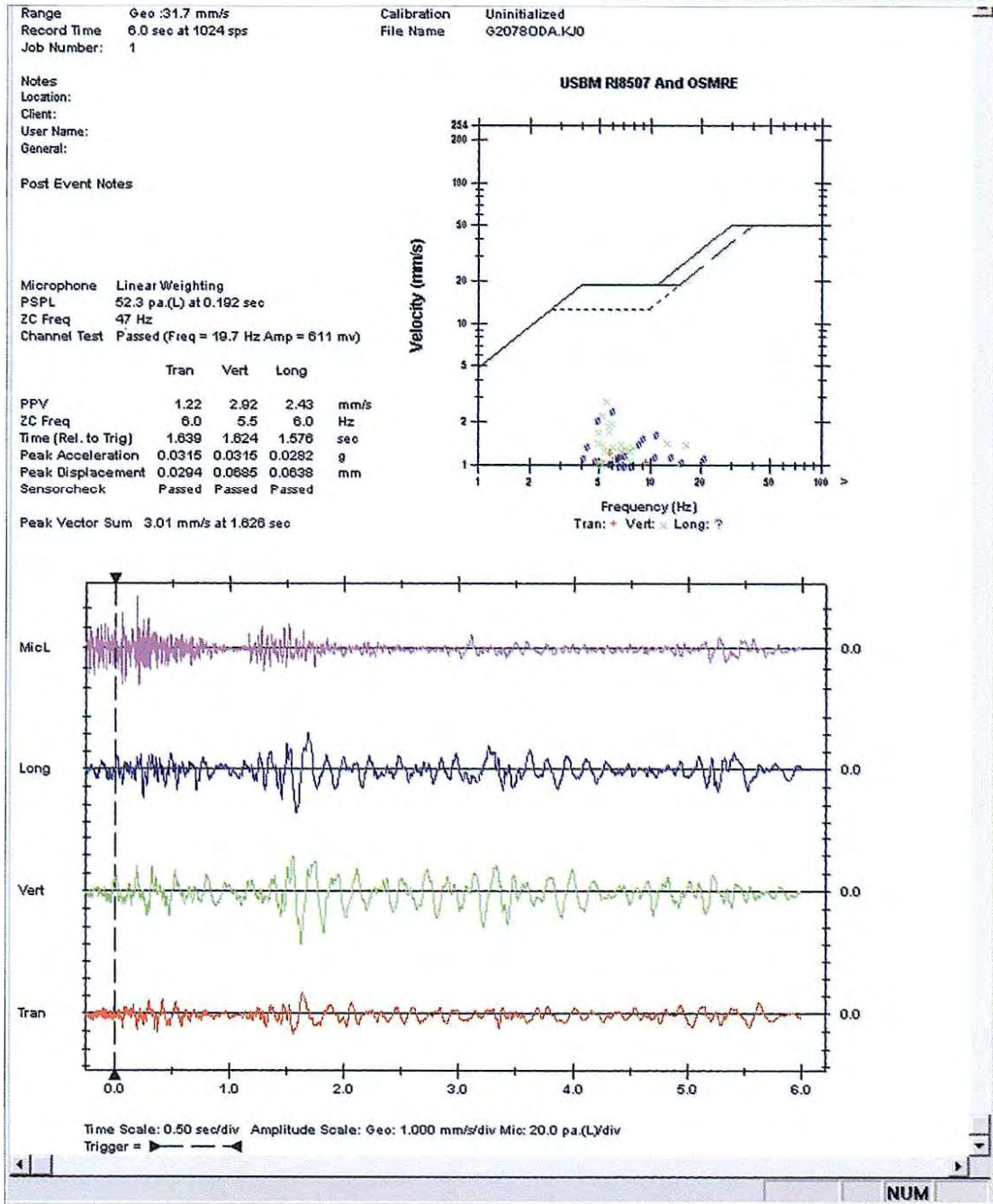
계측자료들은 파형자료, 영상자료 등으로 축적되어 있으며 몇 가지 예를 기술하면 다음과 같다.

가. 건물발파해체 계측 사례



▶ 지반진동/풍압

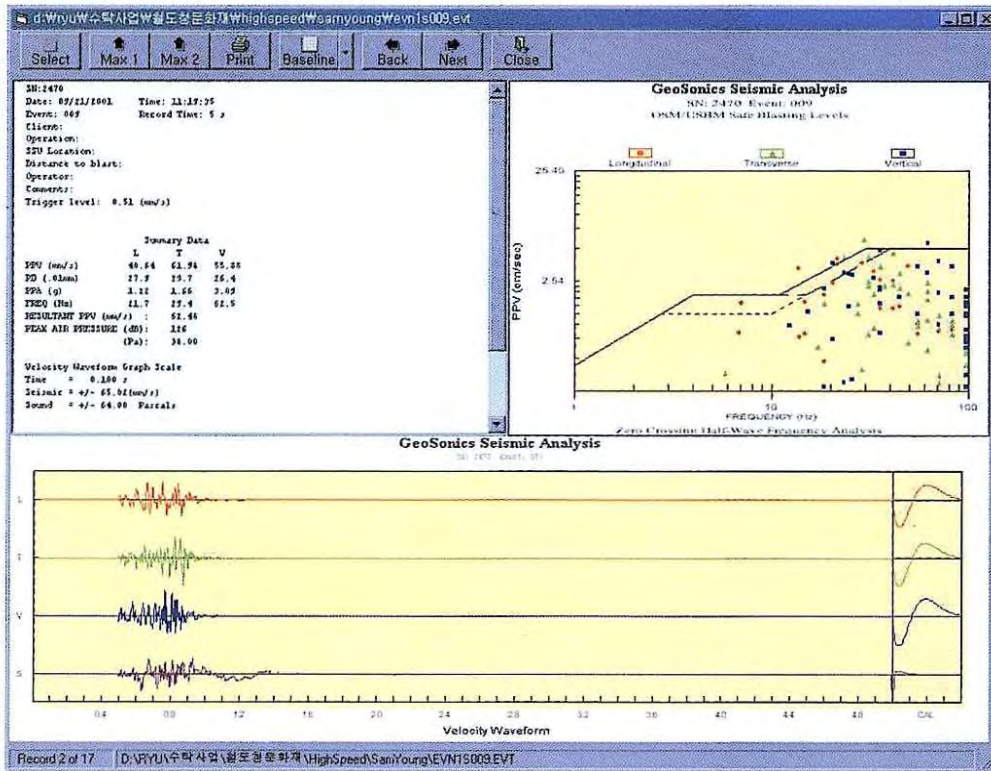
- ▷ Project : 춘천5층아파트
- ▷ 일시 : 2001.8.17
- ▷ D = 아파트벽면에서 46 m (지반)
- ▷ 계측기 : MiniMate #5207



나. 노천 발파에 의한 지반진동 계측과형 예

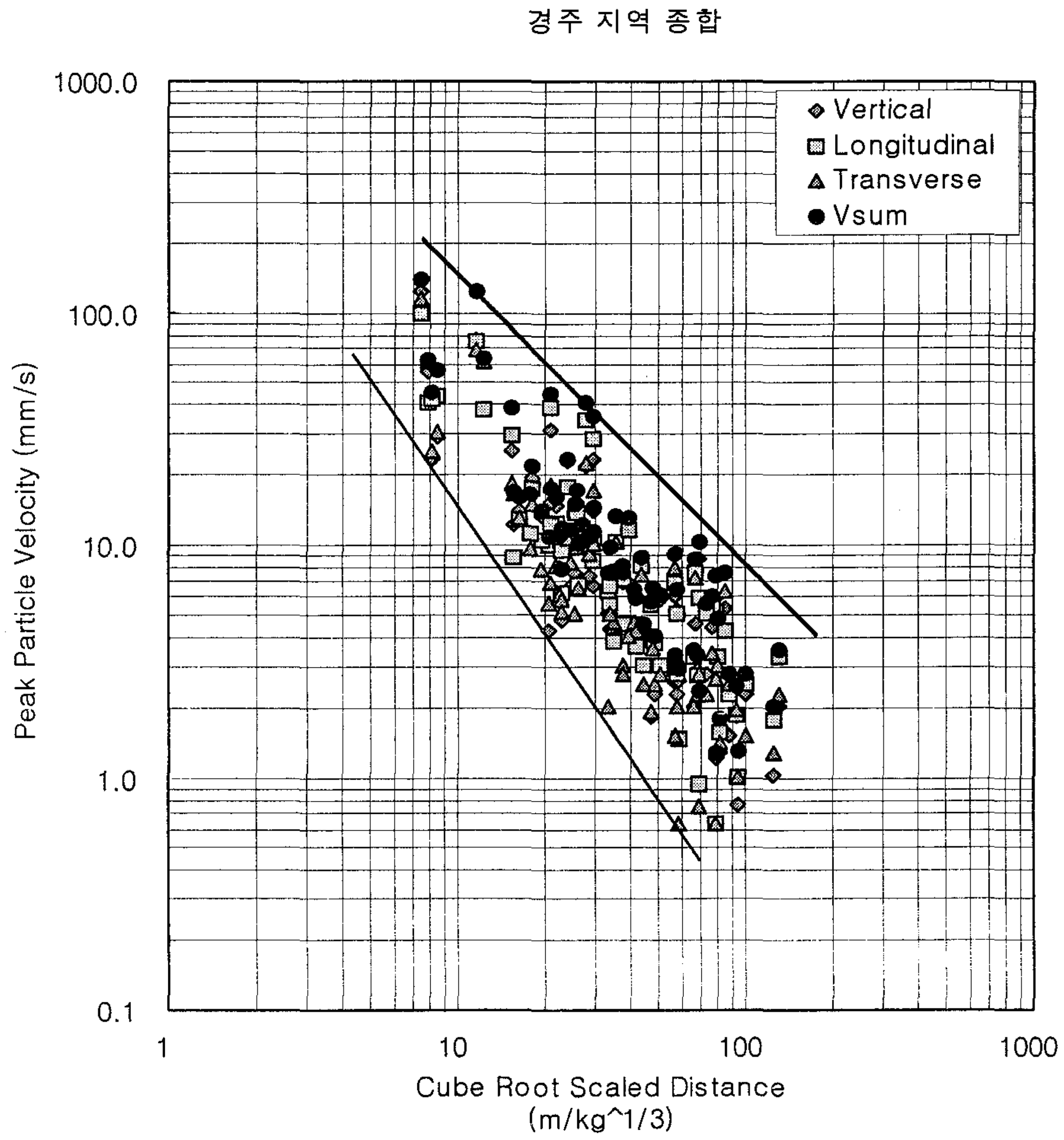
▷ S1지역 (2001. 10)

▷ W=12 kg, D=18m



다. 계측결과 처리사례

- ▷ 환산거리에 대한 최대진동 수준 변화 추이
- ▷ 계측지역 : 건천 및 경주 지역 (2001.10-2001.12)
- ▷ 발파형태 : 1자유면 및 2자유면(벤치) 발파



제 6 절 구조물 절단을 위한 균열제어발파기술 개발

1. 공기층을 이용한 양면발파기술

가. 개요

공기층을 이용한 양면발파기술은 양면동시발파에서 초안폭약과 같은 비교적 저폭속의 폭약류를 발파공 내부에서 상부와 하부로 분산장약(decking)하여 두 약포 사이에 공기의 층을 두므로써, 즉 공기층을 이용한 분산장약(air decking)을 적절히 이용함으로써 모암과 원석에 손상을 최소화하고 파단면을 형성할 수 있는 새로운 발파방법이다.

기술의 핵심은 모든 발파공의 바닥부 및 상부의 적절한 지점에다 각각 폭약을 장전함으로써 두 약포 사이에 공기의 층을 두되, 장약방법에 있어서 수직공의 경우 상부장약을 비닐포대(또는 이와 유사한 재질로서 공기층의 완충작용에 의한 폭약의 폭력저하에 별다른 영향을 미치지 않는 재질로 된 것) 속에 넣은 다음, 이 비닐포대를 노끈 등으로 묶어 인접공의 것과 서로 연결함으로써 한 쌍의 약포를 함께 매단 형식으로 장전하는데 있다.

기폭은 순발뇌관을 사용하여 실시하되, 각 발파공 내의 상·하부로 분산시킨 장약들뿐만 아니라 전체 발파공들을 모두 동시 발파하는 방법을 취한다. 발파공 내의 상·하부 약포가 동시에 폭발하면 상·하부 폭약으로부터 발생된 각각의 폭발충격파가 공기층 내로 진입하면서 폭압이 일차 감소되고, 또 공기 중의 충격파로 진행하다가 서로 충돌하면서 폭압이 더욱 감소됨으로써 암반에 균열을 일으키지 않고 깨끗한 절취면을 얻을 수 있게 된다.

나. 천공 및 장약 패턴

본 공기층을 이용한 양면발파기술에서 적용할 수 있는 천공패턴의 일례를 Fig. 3.6.1.1에 보였다. 천공직경은 초안폭약의 약경 28 mm \emptyset 를 감안하여 38 mm \emptyset 를 사용하며, 천공간격은 0.3 m로 하되 암괴의 양단 부분에서는 천공간격을 0.2 m 정도로 좁혀주어 암괴가 절취 예정면을 따라 확실하게 절단되도록 한다. 천공장은 채취코자 하는 암괴의 크기에 따라 달라질 수 있으나 대략 10 m 이내로 하는 것이 좋다. 마찬가지로 암괴의 길이도 현장여건에 따라 적절한 크기로 설정할 수 있으나 대략 40 m를 초과하지 않도록 하는 것이 좋다.

장약량은 Fig. 3.6.1.2에 보인 바와 같이 초안폭약 28 mm \emptyset 약포 하나의 중량에 해당하는 약 156 g을 발파공의 상·하부에 같은 양으로 나누어 약 78 g씩 장약한다. 기폭방법은 동시발파를 사용하므로 모든 장약에는 순발뇌관 내지 같은 지발시차를 가지는 뇌관을 장착한다. 각 발파공에 뇌관을 장착할 때는 상부장약의 경우에는 뇌관의 폭굉방향이 공저방향으로 향하도록 하며, 하부장약의 경우에는 이와는 반대로 뇌관의 폭굉방향이 공구방향이 되도록 장착하여야 한다. 폭약의 폭굉방향은 뇌관의 폭굉방향에 의해 결정되므로 이와 같은 방식으로 뇌관을 장착하면 뇌관의 폭굉으로 유도되는 폭약의 폭굉방향이 발파공 중간의 공기층을 서로 향하게 됨으로써 공기층을 통한 완충작용의 효과를 더욱 향상된다.

전색은 상부장약의 위쪽 부분에 대하여만 실시하며, 강한 흡수성을 지닌 초안폭약을 사용할 경우에는 전색물로서 점토나 모래를 사용한다. 결선 시에는 각 공의 상·하부 장약을 먼저 직렬로 결선하고, 계속해서 인접공과도 직렬로 연결한 다음 모든 약포를 동시에 발파한다.

본 공기층을 이용한 양면발파기법에서는 수직공의 경우 하부장약과 상부장약 사이에 공기층을 두기 위해 다음과 같은 절차에 따라 상부장약을 장전한다.

- ① 상부장약으로 사용할 약포에 뇌관을 삽입한다.
- ② 뇌관을 꽂은 약포를 비닐포대 등에 넣고 포대를 긴 끈으로 묶는다.
- ③ 인접공의 끈과 적절한 길이로 묶은 후 한 쌍의 포대를 각각의 공에 장전한다.
- ④ 장전된 폭약의 상부에 점토나 모래를 사용하여 전색한다.

이와 같은 절차에 따라 장전된 상부장약의 모습을 Fig. 3.6.1.3에 보였다. 그림에서와 같이 수직공에 장전되는 상부장약은 각각 한 쌍씩 발파공 속에 매달린 형상이 된다.

다. 시험발파 및 결과고찰

양면발파법으로서 비교적 잘 알려져 있는 도폭선에 의한 발파법과 본 공기층을 이용한 양면발파법 간의 발파효율을 비교할 목적으로 아래와 같이 국내의 D 석재 광산에서 세 차례의 시험발파를 실시하고 그 결과를 고찰하였다.

1) 시험발파 I: 도폭선을 이용한 양면발파시험

- 2) 시험발파 II: 공기층을 이용한 양면발파시험 1
- 3) 시험발파 III: 공기층을 이용한 양면발파시험 2

Fig. 3.6.1.4는 본 공기층을 이용한 양면발파시험 II와 III에서 사용한 초안폭약이며, Fig. 3.6.1.5는 순발뇌관과 초안폭약을 발파공에 장전하기 위한 준비작업의 모습이다.

(1) 이론적 장약량 산정법

Mancini 등은 도폭선에 의한 양면발파를 적용함으로써 채석작업에서 성공적인 결과를 낳았던 과거 사례들을 중심으로 관련 발파자료들을 통계적으로 분석하여 다음과 같은 실험식을 제안하였다.

$$c = c_1 + c_2 \frac{A}{V} + c_3 d \quad (1)$$

식에서, c = 비장약량 (g/m^3), A = 절단면적(m^2), V = 절단체적(m^3), d = 변위(m)이며, c_1, c_2, c_3 는 상수이다. 위 식의 의미를 살펴보면, 우변의 초항 c_1 은 유효한 비장약량의 최소값을 나타내며, 항목 c_2A/V 는 파괴효과를 표시하고, 항목 c_3d 는 변위효과를 나타낸다. 한편, 화강암의 경우 식 (1)의 상수 c_1, c_2, c_3 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$c_1 = 10.52 \text{ g/m}^3, \quad c_2 = 26.47 \text{ g/m}^2, \quad c_3 = 28.74 \text{ g/m}^4$$

위의 식 (1)은 관찰된 자료로부터 유도한 경험식이며, 비장약량 개념에 근거하고 있다. 양면발파의 관점에서 보면 비장약량은 절단대상 암괴의 체적에 대한 소모된 총화약량, 다시 말하면 암괴 단위 체적당 화약소모량으로 정의할 수 있으며, 이는 발파효율과 경제성에 대한 중요한 지표가 된다.

(2) 발파결과

시험발파의 내용 및 결과를 Table 3.6.1.1에 간략히 제시하였다. 표에서 암괴의 이동거리란 양면발파의 결과 암괴가 절단되면서 원래의 위치로부터 전방으로 움직인 평균거리를 말한다. 도폭선을 이용한 시험발파 I에서는 암괴의 이동거리가 23 cm이었으며, 초안폭약을 사용한 시험발파 II와 III에서는 각각 52 및 60 cm이었다.

암괴의 후방 절취면의 상태는 시험발파 전체를 통해 균열이 거의 관찰되지 않은 비교적 매끄러운 암반면을 보여주었으나 상부 모서리 부분에서는 암편이 일부 떨어져 나가는 현상이 관찰되었다. 이와 같이 암괴의 상부 모서리 부분에서 암편이 불규칙하게 떨어져 나가는 현상은 반사파에 의한 자유면에서의 인장파괴의 결과이거나 전회의 발파에서 발생된 잠재균열로 인한 것으로 판단되며, 본 공기층을 이용한 양면발파기법에서는 비장약량과 전색장을 적절히 조절하면 최소화할 수 있다.

Table 3.6.1.1 시험발파 결과

구 분		시험발파 I	시험발파 II		시험발파 III
암 괴	길이(m)	11.65	20.75	5.75	31.0
	너비(m)	7.0	7.0	7.0	7.1
	높이(m)	8.0	6.0	4.0	5.8
	표면적(m ²)	174.75	333.0		399.9
	체적(m ³)	652.4	1033.0		1276.6
	이동거리(m)	0.23	0.52		0.60
비장약량	장약량(g)	10,840	25,781		31,875
	이론 비장약량(g/m ³)	24.1	34.0		36.1
	실제 비장약량(g/m ³)	17.0	25.0		25.5

초안폭약을 사용한 양면발파에 대한 발파효율을 평가하기 위해 시험발파 III에 대하여 위에 언급한 이론적인 비장약량 c 를 계산하였다. 즉, 실제 발파 후에 암괴가 이동한 거리 $d = 0.60$ m이었으며, 암괴의 기하학적 형상과 관련된 수치들로서 표면적 $A = 399.8$ m², 체적 $V = 1,276.6$ m³이었다. 따라서 이들 수치들과 화강암에 대한 상수 c_1, c_2, c_3 를 식 (1)에 대입하면 다음과 같이 이론적인 비장약량 c 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 c &= c_1 + c_2 \frac{A}{V} + c_3 d \\
 &= 10.52 + 26.47 \left(\frac{399.9}{1,276.6} \right) + 28.74 (0.60) \\
 &= 36.1 \text{ g/m}^3
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

계산 결과를 살펴보면, 시험발파 III에서 이론 비장약량은 36.1 g/m³인데 비하여

실제 비장약량은 25.5 g/m^3 으로 그 값이 더 작은 것을 알 수 있다. 이 결과는 암괴의 이동거리가 0.60 m 가 되기 위해서는 이론적으로는 36.1 g/m^3 의 비장약량이 요구되지만 실제로는 25.5 g/m^3 의 비장약량만으로도 충분히 발파가 된 것을 의미하므로 본 공기층을 이용한 양면발파법의 발파효율이 매우 우수함을 증명하여 준다. 마찬가지로 시험발파 II의 경우에도 이론 비장약량은 34.0 g/m^3 인데 비해 실제 비장약량은 25.0 g/m^3 으로 훨씬 작게 나타남으로써 시험발파 III과 유사한 결과를 보였다.

이와 같은 결과는 발파효율이 매우 우수한 것으로 알려져 있는 도폭선을 이용한 양면발파에서 나타나는 발파효율과 대등한 것이어서 본 공기층을 이용한 양면발파 기술은 향후 석재용 채석발파 및 이와 유사한 응용발파 분야(예를 들면, 사면에서의 법면에 대한 제어발파)에서 발파의 효율성, 경제성 및 작업능률 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 보인다. 또한 본 기술은 모암(채석발파에서는 채취되는 원석도 포함)을 보호하는 것을 주목적으로 하는 제어발파이므로 채석발파의 경우에는 발파균열을 감소시킴으로써 원석의 손실을 대폭 감소시킬 수 있고, 암반사면에 대한 제어발파에 적용할 경우에는 법면의 안정성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

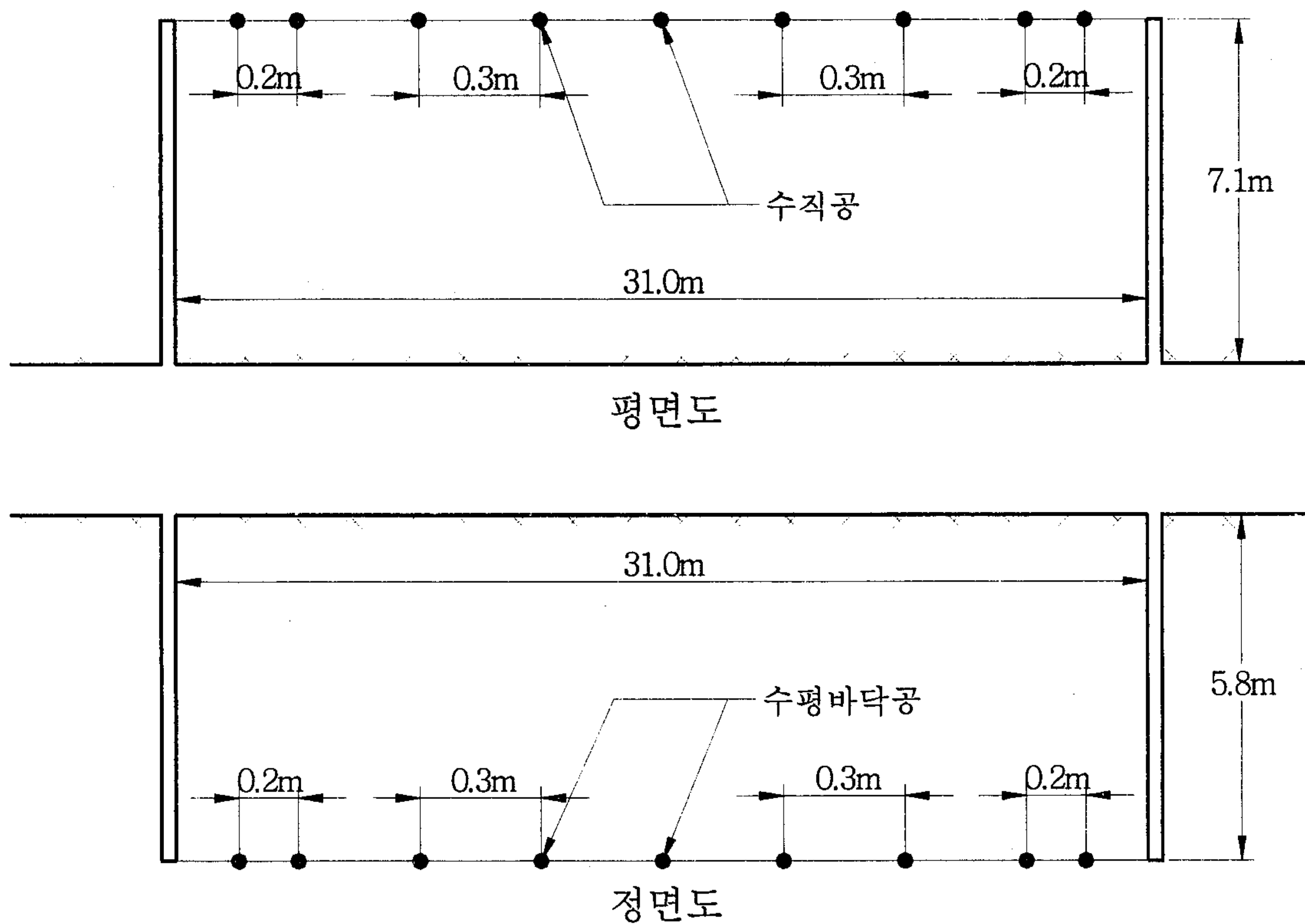


Fig. 3.6.1.1 공기층 양면발파에서의 천공패턴

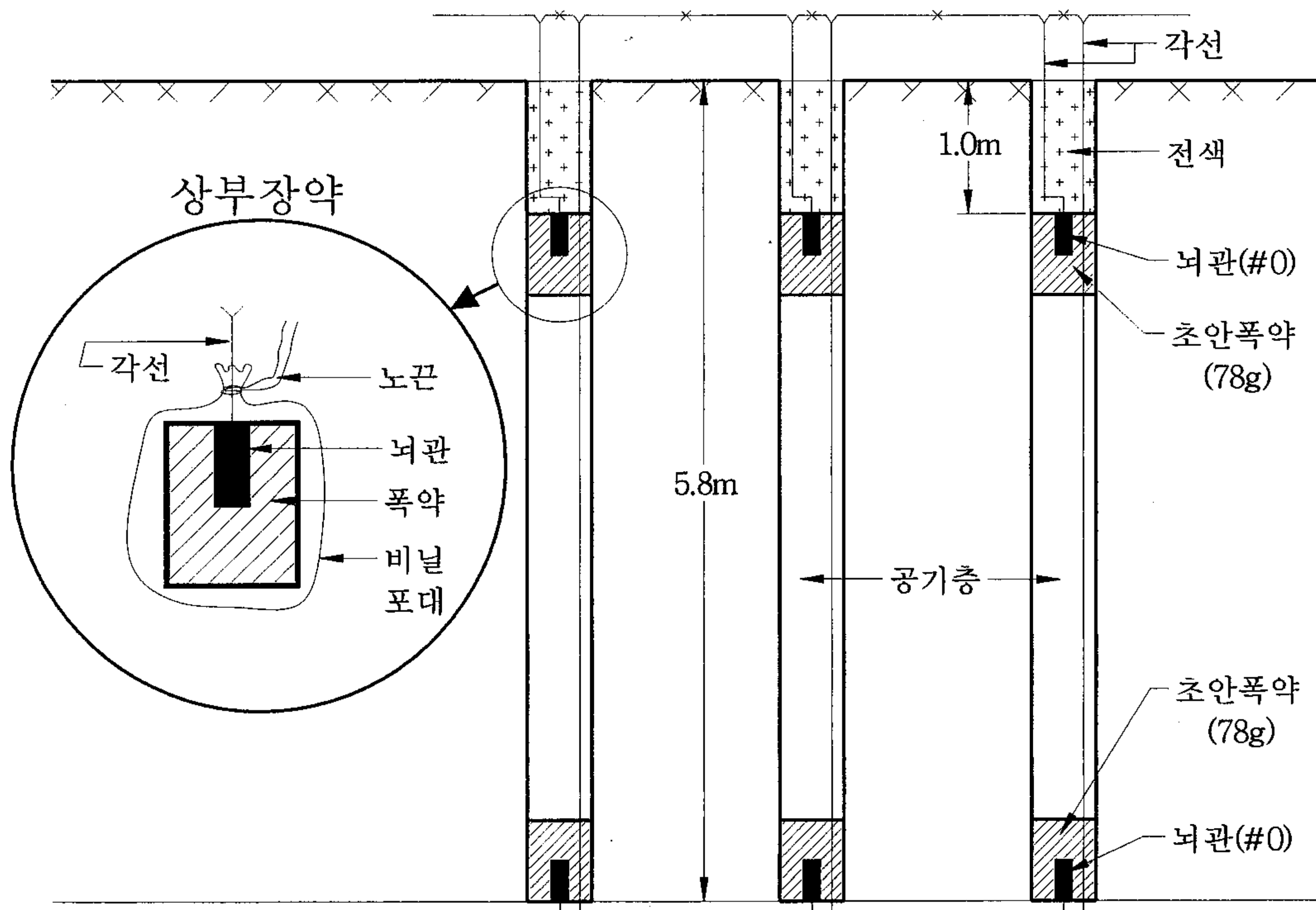


Fig. 3.6.1.2 공기층 양면발파에서의 장약패턴

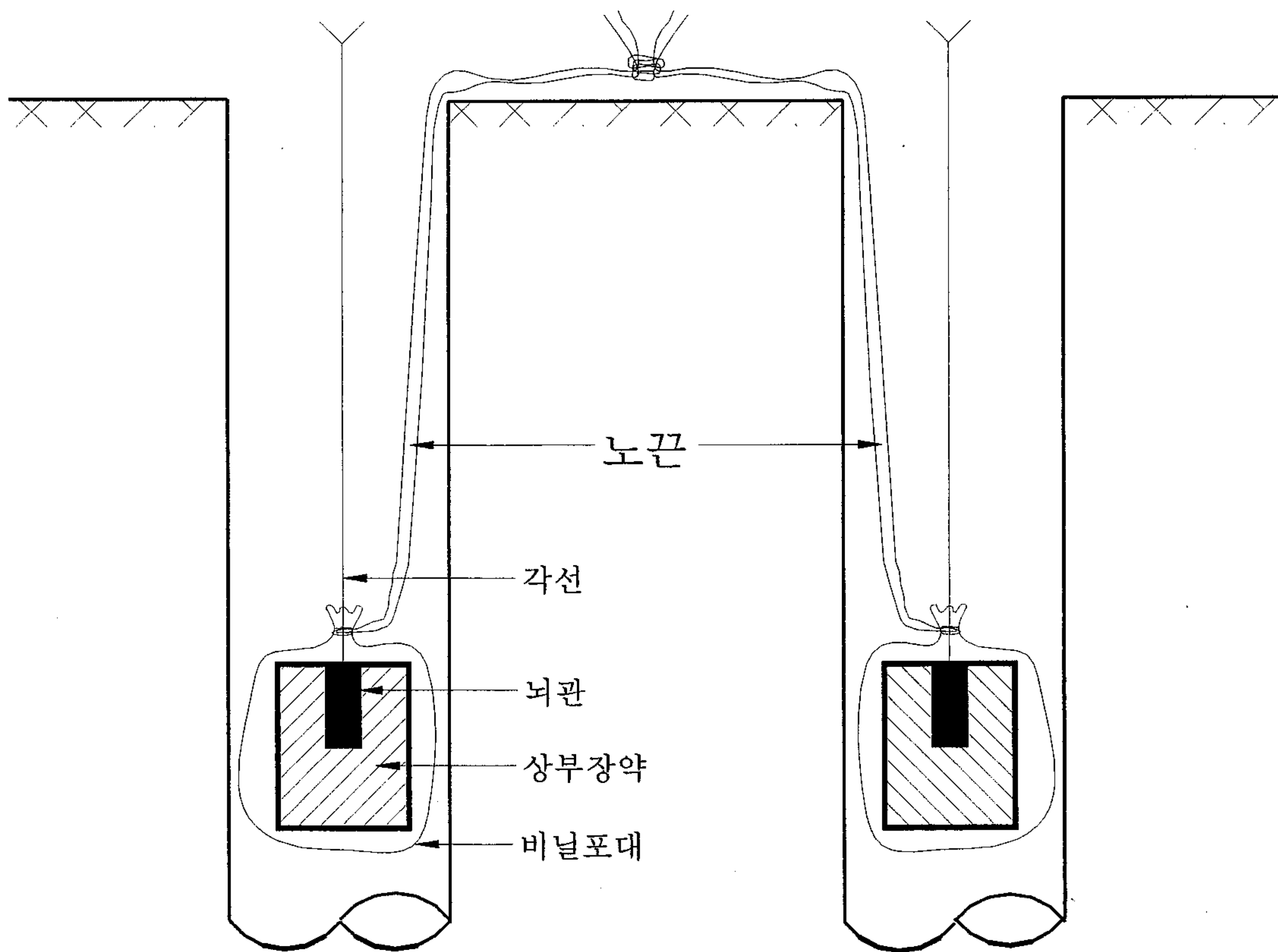


Fig. 3.6.1.3 공기층 양면발파에서의 상부장약 장전법

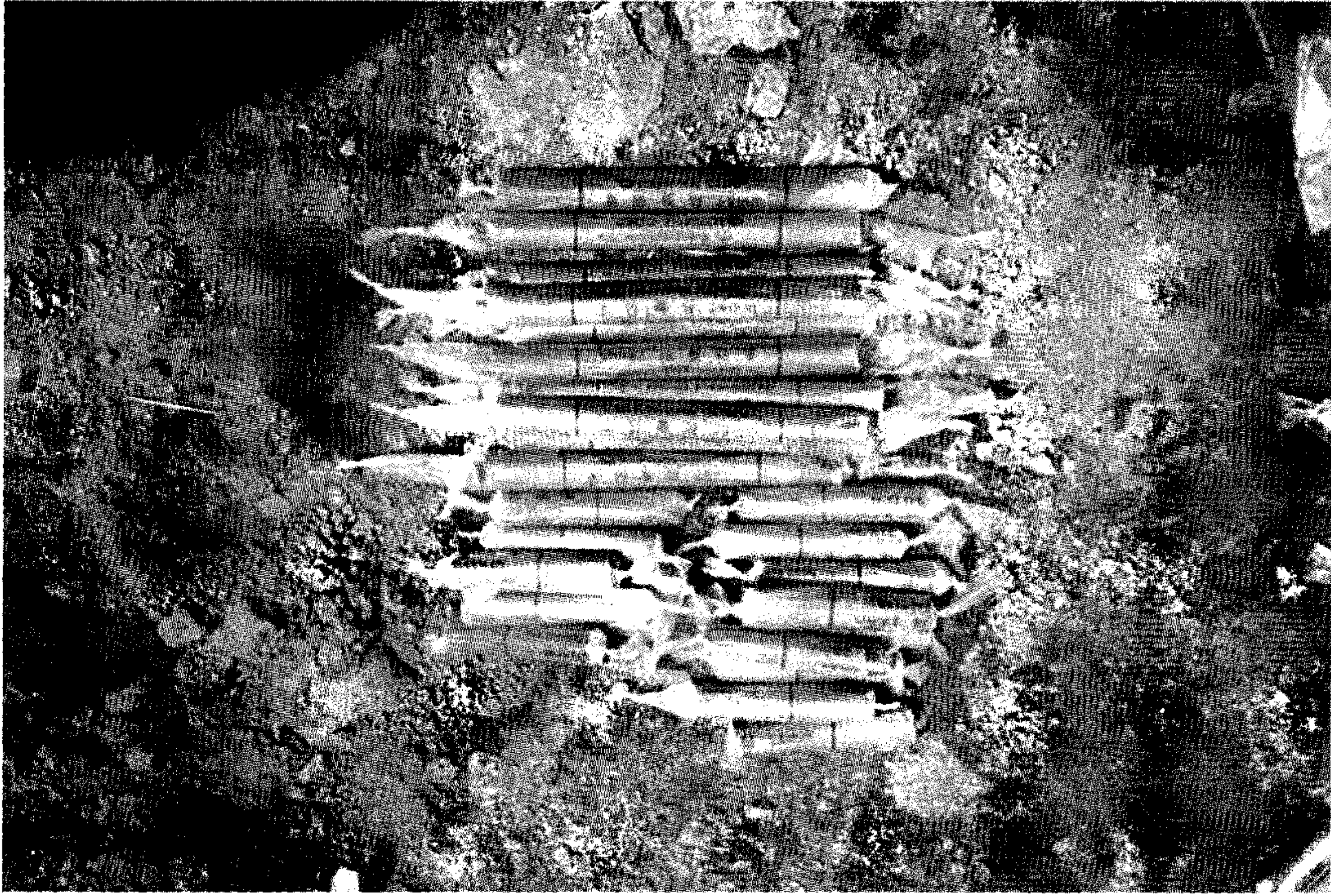


Fig. 3.6.14 초안폭약



Fig. 3.6.15 초안폭약의 장전

2. 종이 스플릿튜브와 공기층을 이용한 균열제어발파기술

가. 개요

본 기술은 종이 스플릿 튜브와 공기층을 동시에 이용한 균열제어발파방법에 관한 것으로, 그 목적은 건축물 해체시 대형 콘크리트 기초의 절단, 노천굴착시 암반 사면의 마지막 법면 형성, 터널 건설시 암반의 굴착을 위한 발파에 있어서 주위 부재나 암반에 손상을 최소화하고 원하는 방향으로의 절단면을 형성할 수 있는 효과적인 발파방법을 제공하기 위해 개발되었다.

본 방법의 구성은 절단면이 형성되는 부재나 암반의 경계선을 따라 일정한 간격으로 천공을 한 후 공의 하부에 폭약을 장전하고, 속이 빈 원통형 종이 튜브에 길이 방향으로 180도 마주보는 두 줄의 홈을 만들어 경계선을 향하도록 공에 삽입하고, 상부에 폭약을 장전하여 상하부의 폭약을 같은 시차를 가진 뇌관을 사용하여 동시에 기폭 하되, 인접한 공들은 모두 동시에 기폭하거나 또는 다단발파기 및 비전기식뇌관의 시차를 이용하여 가능한 짧은 시차로 기폭 시키는 발파방법을 특징으로 한다.

본 균열제어 발파방법은 비교적 폭속이 낮고 가스압 효과가 큰 폭약류를 발파공 내부에서 상부와 하부로 분산 장약하고 두 약포사이의 공간은 홈이 파인 종이 스플릿 튜브를 설치하여 상·하부의 약포를 동시에 기폭 시킬 때 공기층의 완충작용과 종이 튜브에 형성한 홈에 발생하는 압력의 집중을 이용하여 홈의 방향으로 균열이 우선적으로 발생, 진행하도록 유도함으로써 원하는 파단면을 형성하는 새로운 발파 방법이다.

특히 종이로 만든 튜브를 사용함으로써 경제적으로 유리하며, 시공 전에 발파공수에 해당하는 만큼 종이 튜브를 준비하고 상부 및 하부에 폭약을 설치해 놓은 다음 장약 작업시 발파공에 삽입함으로써 작업에 소요되는 시간과 인력을 감소시킬 수 있다.

나. 스플릿 튜브 및 폭약 장착 방법

다음과 같은 절차에 따라 스플릿 튜브를 만들고 폭약을 장착한다.

① 원통형 지통류를 준비하고 원통 방향으로 180도 마주보도록 두 줄의 홈(슬릿, slit)을 만든다. (이하 스플릿 튜브)

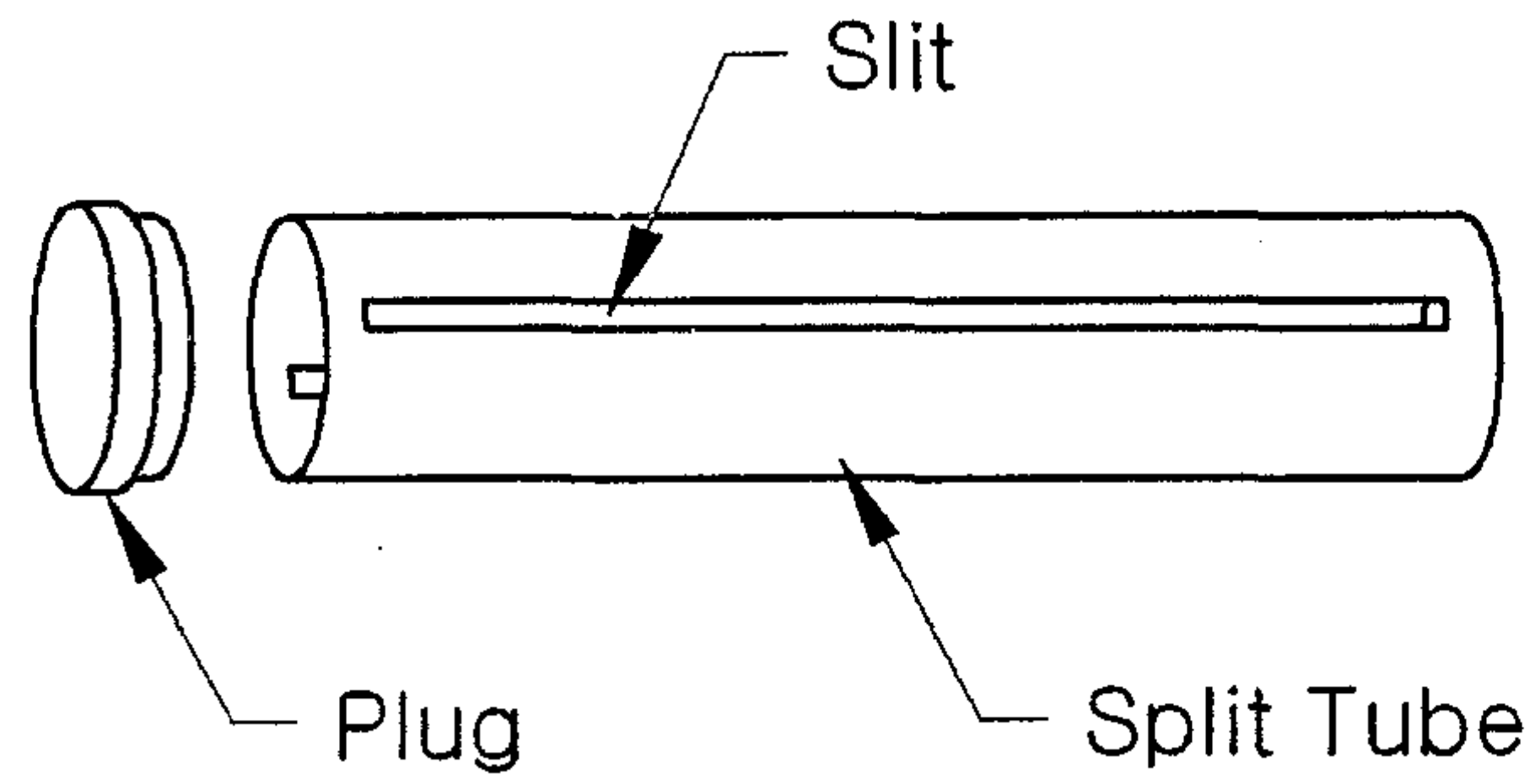


Fig. 3.6.2.1 종이 스플릿 튜브의 제작

② 스플릿 튜브의 상부 내부에 폭약을 테이프 등을 이용하여 고정시킨다. 폭약은 반드시 원통 내부에 위치할 필요는 없다.

③ 스플릿 튜브의 하부도 상부와 동일하게 폭약을 테이프 등을 이용하여 고정시킨다.

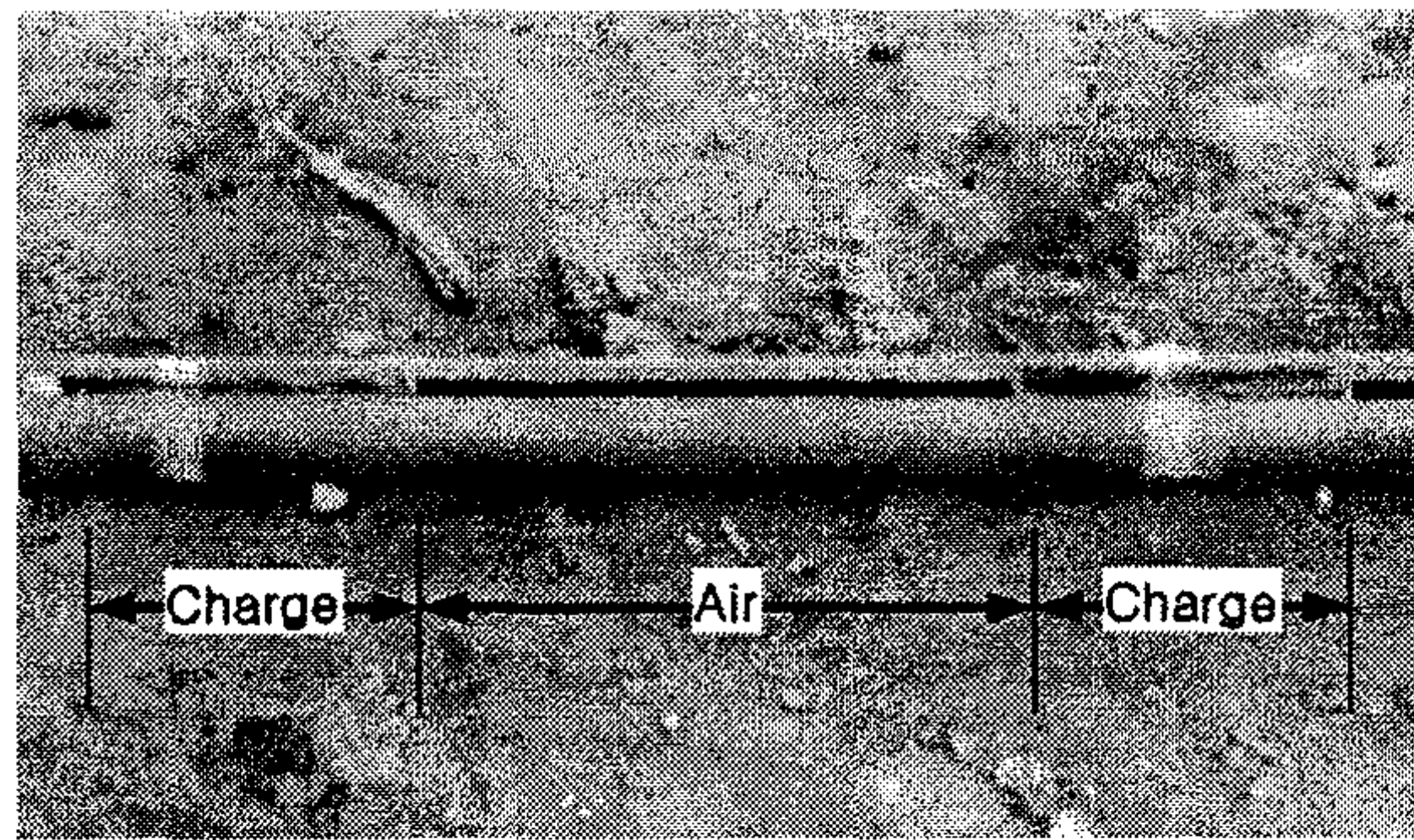


Fig. 3.6.2.2 폭약을 장착한 스플릿 튜브

스플릿 튜브에 폭약을 장착할 때 폭약의 직경과 스플릿 튜브의 직경 차이 때문에 폭약이 한쪽 방향으로 쏠리는 현상을 방지하고, 발파공 내에서 튜브의 변형을 방지하는 역할과 전색제가 튜브 안쪽으로 밀려들어가지 않도록 다음 그림과 같은 기구를 만들어 사용한다.



Fig. 3.6.2.3 폭약 장착 및 튜브 변형 방지를 위한 보조 도구

④ 상부와 하부의 폭약에 순발뇌관 또는 같은 시차의 지발뇌관을 각각 설치하고 각각의 각선을 묶어 놓는다. 이 때 각선의 길이는 공 밖의 모선과 연결할 수 있는 충분한 길이를 가진 것이어야 한다.

⑤ 폭약을 설치하는 발파공 수만큼 ①~④를 반복하여 폭약이 장착된 스플릿 튜브를 제작한다.

⑥ 천공한 발파공에 폭약이 장착된 스플릿 튜브를 삽입한다.

다. 현장적용시험

본 기술의 현장적용 효과를 평가하기 위하여 현장암반에 대한 시험발파를 실시하여 균열이 발생하는 위치와 성장방향의 제어 효과를 고찰하였다.

현장시험은 전라북도 남원시에 소재하고 있는 K 산업의 골재생산 발파현장에서 실시되었다. 이 채석장을 구성하고 있는 암반은 중생대 쥐라기의 남원화강암으로 불리는 화강암이 널리 분포하고 있다.

시험발파 절차는 (i) 대상 암반 및 암괴의 선정, (ii) 천공 및 장약 패턴의 설계, (iii) 천공작업, (iv) 스플릿튜브의 조립, (v) 장약 및 전색 작업, (vi) 발파, (vii) 파단면 및 균열의 조사관찰의 순서로 이루어졌다.

또한 본 시험에서는 크게 (i) 일반발파공에 대한 시험과 (ii) 스플릿튜브를 이용한 시험의 두 가지 형식으로 구분하여 실시함으로써 파단면 형성을 위한 균열 제어 효과를 서로 비교할 수 있도록 하였다.

(1) 시험대상 암반 및 암괴의 선정

현장에서 시험에 사용된 암괴는 3축 방향의 크기가 모두 2 m 이상인 암괴를 대상으로 선정하였으며, 암반의 경우 벤치높이 10 m 이상인 벤치 벽면에 천공 위치를 설정하여 시험하였다. 본 시험의 대상 암석인 남원화강암의 주요물성은 Table 3.6.2.1과 같다.

Table 3.6.2.1 시험대상 암반의 주요물성

물 성	평 균
탄 성 계 수	56.7 GPa
포 와 송 비	0.261
인 장 강 도	8.3 MPa
일축압축강도	140.2 MPa
밀 도	26.7 kN/m ³

(2) 천공방법

시험대상으로 선정된 암괴에 크롤러드릴을 이용하여 천공하였으며 동일한 폭약을 사용하여 발파공 벽면에 작용하는 발파압력의 크기를 변화시키기 위하여 공경 75 mm와 42 mm의 두 가지 크기의 발파공을 천공하여 시험을 실시하였다.

Fig. 3.6.24에서 (a)는 크롤러드릴에 장착하여 사용하는 천공용 비트로서 직경 75 mm인 버튼비트(button bit)이고, (b)는 천공된 발파공의 모습이다.

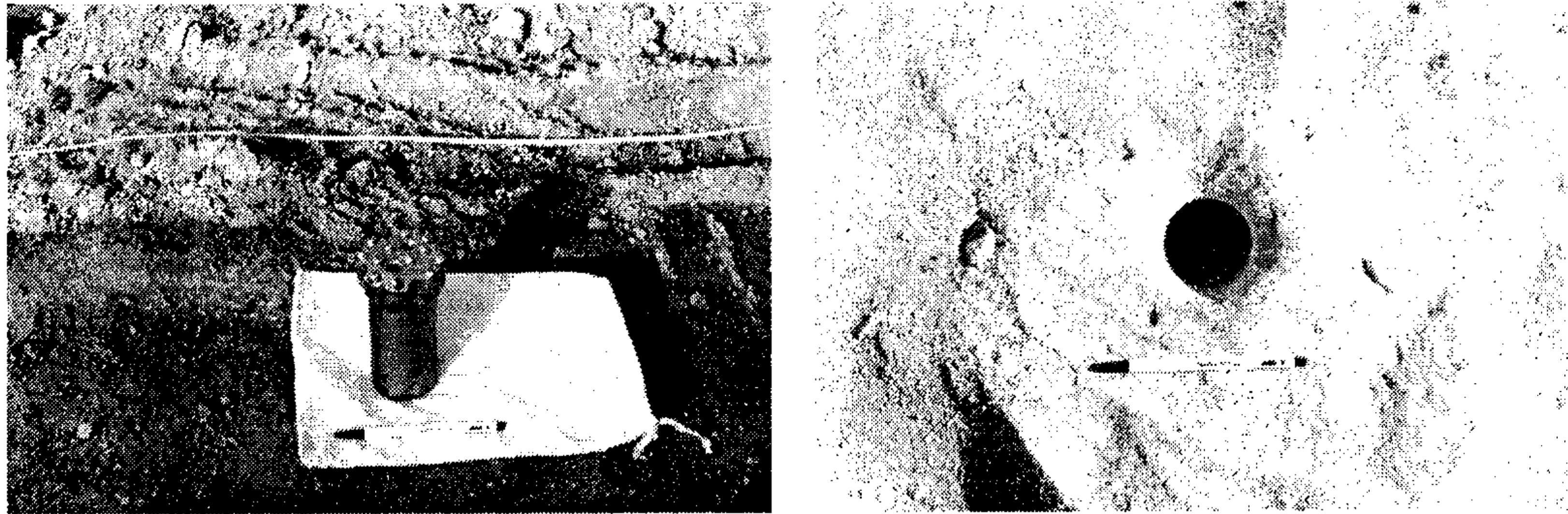


Fig. 3.6.24 (a) 75 mm 버튼비트

(b) 천공된 발파공

(3) 스플릿튜브의 조립 및 장약방법

시험에 사용된 폭약의 종류는 암괴의 크기 또는 암반의 상태에 따라 에멀전계 폭약과 정밀폭약을 혼용하였으며, 전기뇌관을 사용하여 기폭하였다. Table 3.6.2.2는 시험에 사용된 폭약류의 주요제원을 보인 것이다.

Table 3.6.2.2 시험에 사용된 폭약의 특성

종 류	무 게 (g)	규 격 (mm)		폭 속 (m/s)	비 중	비 고 (포장형태)
		구경	길이			
에멀전계열	200	ø20	200	5,900	1.20~1.25	기름종이
	1,000	ø50	500	5,900	1.20~1.25	필름
정밀폭약	125	ø17	500	4,200	1.15~1.25	플라스틱

전색의 영향을 살펴보기 위하여 전색물을 사용했을 때와 무전색으로 발파했을 때를 대비하여 시험하였다.

스플릿 튜브에 사용된 재질은 종이와 PVC이었으며, 튜브의 길이는 1 m이었다. 천공작업이 진행되면 이에 따라 비트(bit)도 마모되기 때문에 새 비트의 외경을 75 mm와 42 mm로 하여도 실제 천공되는 공경은 약 63 mm와 40 mm 정도가 되므로 발파공 내부에 튜브를 원활하게 삽입하기 위해 직경 60 mm와 39 mm의 튜브를 사용하였다. 이와 같은 튜브를

실제 발파공 속에 장전되는 스플릿 튜브의 형태로 제작할 때에는 원형의 튜브를 길이 방향에서 두 쪽으로 절단하여 절단된 튜브 내부에 테이프 등으로 폭약을 고정시켜 사용하였다. 절단한 한쪽 튜브 내에 폭약을 테이프로 고정한 후 남은 다른 쪽 튜브를 서로 결합하여 발파공 내에 삽입할 수 있도록 하였다. 한편, 튜브의 재질이 균열면 형성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 위에 언급한 바와 같이 PVC 튜브와 종이튜브를 사용하여 시험하였는데, PVC나 강철과 같은 튜브재질은 기존의 연구에서도 많이 사용되고 있으나 극히 빠른 폭굉 반응에서는 종이와 같은 연질의 재료도 상당한 저항력을 일으킬 것으로 예측하여 저가의 지통류를 스플릿 튜브로 제작하여 사용함으로써 그 실용성을 시험하였다.

일반발파공에 대한 시험결과로부터 암괴의 크기 및 발파공의 직경과 깊이 등을 고려하여 적정장약량을 산정하였으며, 폭발압력이 스플릿 튜브 내의 특정한 곳에만 집중적으로 작용하는 것을 방지하기 위하여 폭약을 장약할 때에는 튜브 내에 분산하여 장약하였다. 정밀폭약을 주장약(column charge)으로 사용하는 경우에는 기폭약으로서 에멀전계 폭약을 사용하였고, 전색물로는 점토로서 현장의 석분을 사용하였다.

(4) 기폭방법 및 균열면 조사방법

본 시험에서는 적정장약량을 구할 목적으로 먼저 일반발파공에 대하여 3회의 시험발파를 실시하고, 이후 스플릿 튜브를 장전한 발파공을 대상으로 9회의 균열제어 시험발파를 실시하였다. 기폭방법은 모든 발파에서 순발뇌관을 사용한 동시발파를 사용하였다.

발파후 나타난 균열의 전개방향 및 개수, 전파길이 등을 육안으로 세밀하게 관찰하였으며, Fig. 3.6.25는 결과 예로서 된 스플릿 튜브의 홈(슬릿, slit)을 따라 발생한 균열에 형성된 파단면의 모습을 나타낸 것이다.

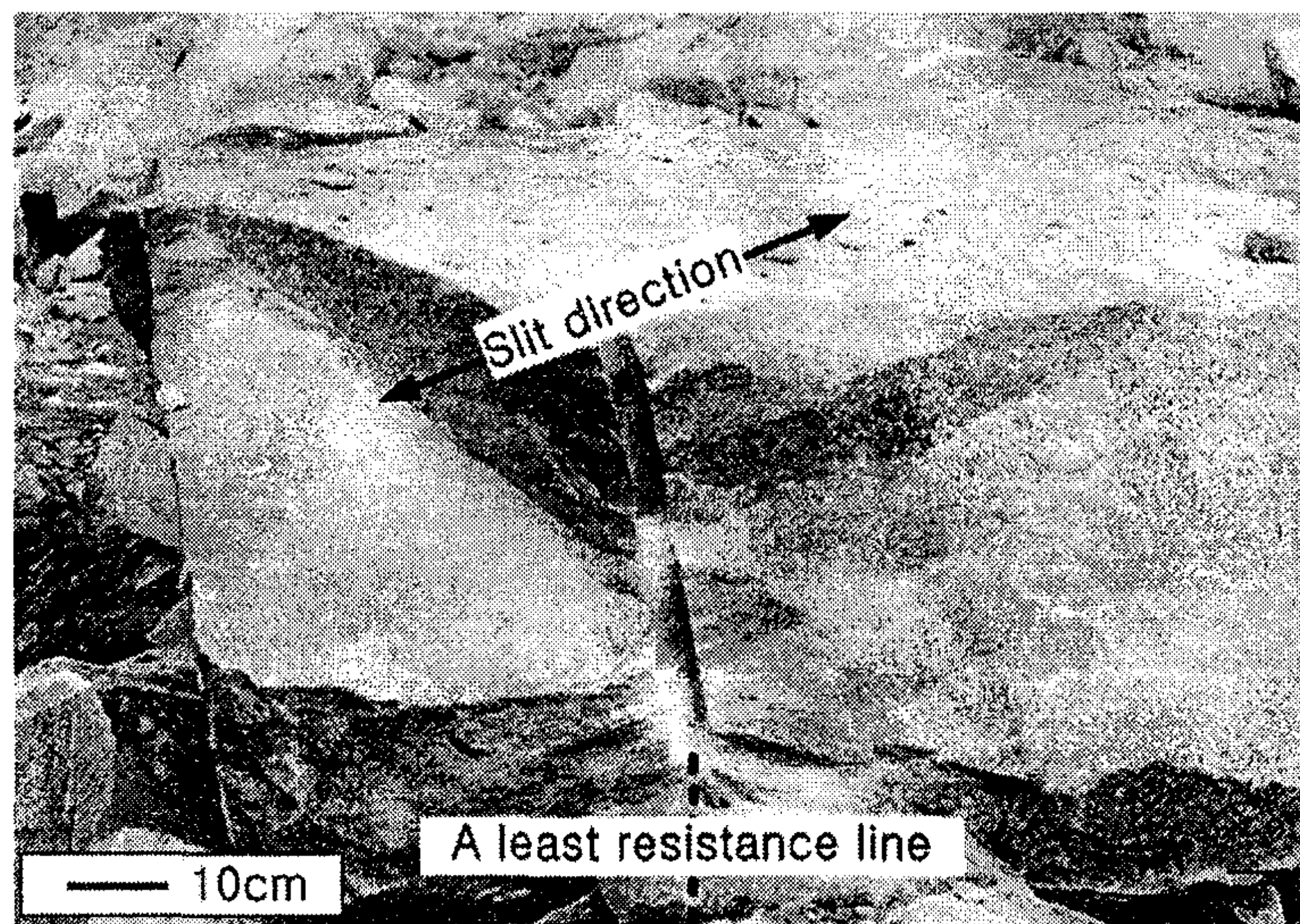


Fig. 3.6.25 발파 후 스플릿 튜브의 슬릿을 따라 형성된 파단면

(5) 결과 및 고찰

본 시험발파에서 적용된 주요 시험조건 및 결과는 Table 3.6.2.3에 보인 바와 같다.

Table 3.6.2.2 주요 실험조건 및 실험결과

번호	공경 (mm)	공깊이 (cm)	장약량 (g)	전색법	시험결과	비고 (튜브재질)
1	63	150	에멀전 200 정밀폭약 125	무전색	공발	
2	63	150	에멀전 300	무전색	파괴	
3	63	250	에멀전 500	석분	파괴	
4	63	150	에멀전 100 정밀폭약 125	무전색	공발	종이튜브
5	63	150	에멀전 200 정밀폭약 250	무전색	공발	종이튜브
6	63	150	에멀전 260	무전색	공발	종이튜브
7	63	150	에멀전 300	석분	균열길이 30cm	종이튜브
8	63	150	에멀전 300	석분	균열길이 10cm	종이튜브
9	63	250	에멀전 500 정밀폭약 375	석분	균열길이 30cm	종이튜브
10	63	250	에멀전 500 정밀폭약 375	석분	균열길이 40cm	종이튜브
11	40	180	에멀전 450	석분	균열길이 40cm	종이튜브
12	40	150	에멀전 400	석분	균열길이 120cm	PVC 튜브, 벤치 벽면

먼저 일반적인 원형공 발파시험에서는 공발되지 않고 파단면이 형성될 수 있는 적정장약량을 구하였으며, 구해진 적정장약량을 기준으로 스플릿튜브를 이용한 균열제어 발파에 필요한 장약량을 결정하였다.

일반적으로 전색물의 종류와 전색장은 발파결과에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 본 시험발파에서도 전색을 하지 않았을 때에는 대부분 공발이 발생하였다. 따라서 무전색 발파시에는 발파공 주변에 파단면을 형성시키는데 매우 큰 장약량을 필요로 하였으며, 스플릿튜브 발파에서도 전색을 하지 않았을 경우에는 모두 공발하는 결과를 보였다.

스플릿튜브는 폭약의 폭굉으로 발생하는 응력파를 튜브의 슬릿부분에 집중시킴으로써 슬릿부분으로부터 파괴균열이 전개되도록 하는 작용을 하는 것으로 알려져 있으며, 본 현장시험 결과에서도 슬릿이 가공된 부분에서 균열이 개시되고 전파되는 것을 확인할 수 있었다.

암피를 이용한 시험에서는 슬릿의 위치에서 균열이 시작되어 제어하고자 하는 전파방향으로 어느 정도 진행하다가 다시 자유면 쪽을 향하여 파단면이 형성되는 특성을 보여주었다. 즉, 균열의 전파방향은 슬릿의 위치에서 계획된 방향으로 제어되었지만 자유면의 영향으로 전파방향이 변화됨으로써 균열의 전파길이는 정확하게 측정하기 어려웠다. 반면, 암반을 대상으로 한 균열제어발파에서는 균열의 방향뿐만 아니라 전파길이도 비교적 정밀하게 측정할 수 있었다.

한편, 발파시 발생하는 폭굉 압력은 매질을 파괴하는데 가장 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 시험에서는 폭약의 종류와 공경의 크기에 따라 발파공 벽면에 작용하는 압력의 크기를 나타낼 수 있는 식을 이용하여 폭굉 압력을 계산하고, 이를 균열제어 정도와 비교하였다.

폭굉 압력을 계산하는 데에는 1991년 미국의 National Highway Institute에서 제안한 아래 두 식을 사용하였다.

$$P_D = \frac{4.18 \times 10^{-7} \times SGe \times V_e^2}{1 + 0.8 SGe} \quad (1)$$

$$P_B = P_D \times \left(\frac{d_c}{d_h} \right) \quad (2)$$

식들에서,

P_D = 폭발압력 (kbar)

SG_e = 폭약의 비중

V_e = 폭속 (ft/sec)

P_B = 디커플링 발파압력 (kbar)

d_c = 약경

d_h = 공경

Fig. 3.6.2.6은 스플릿 튜브를 이용한 발파에서 식 (1)과 (2)에 의해 계산된 폭굉 압력과 현장시험 결과 형성된 균열 길이를 도시한 것이다. 그림에서 (a)는 발파공 내에 작용하는 폭굉 압력을 계산하여 계산치와 균열 길이의 관계를 나타낸 것이고, (b)는 공경에 대한 제어된 균열 길이의 비로 표시되는 균열 길이 비를 계산하여 폭굉 압력과 균열 길이 비의 상호관계를 도시한 것이다. 스플릿 튜브의 재질은 암피의 경우에는 종이튜브를 사용하였으며, 암반의 경우에는 PVC 튜브를 사용하였다.

암괴에서 균열을 개시하는데 필요한 폭굉 압력은 약 1.5 GPa이고, 폭굉 압력의 크기가 2.5 GPa이었을 경우에는 슬릿 이외의 튜브의 벽면 부분에서도 균열이 발생하였다. 폭굉 압력의 크기가 1 GPa 이하일 경우에는 공발하여 균열제어가 불가능하였다.

암반의 경우에는 이보다 작은 700 MPa의 압력에서도 튜브의 슬릿 위치에서 균열이 개시되었으나 슬릿 이외의 부분에서는 균열이 발생하지 않았다. 스플릿튜브에 의한 제어균열의 전파길이는 120 cm로 공경의 약 30배 정도로 나타났다.

스플릿튜브를 이용한 암반 발파의 경우 공경의 30배까지 균열제어가 가능한 것으로 나타났으며, 이는 앞에서 언급한 스무스 발파나 선균열 발파 등의 기존의 제어발파기법들에서 적용하고 있는 공간적인 공경의 5~10배를 크게 증가하는 수준이다.

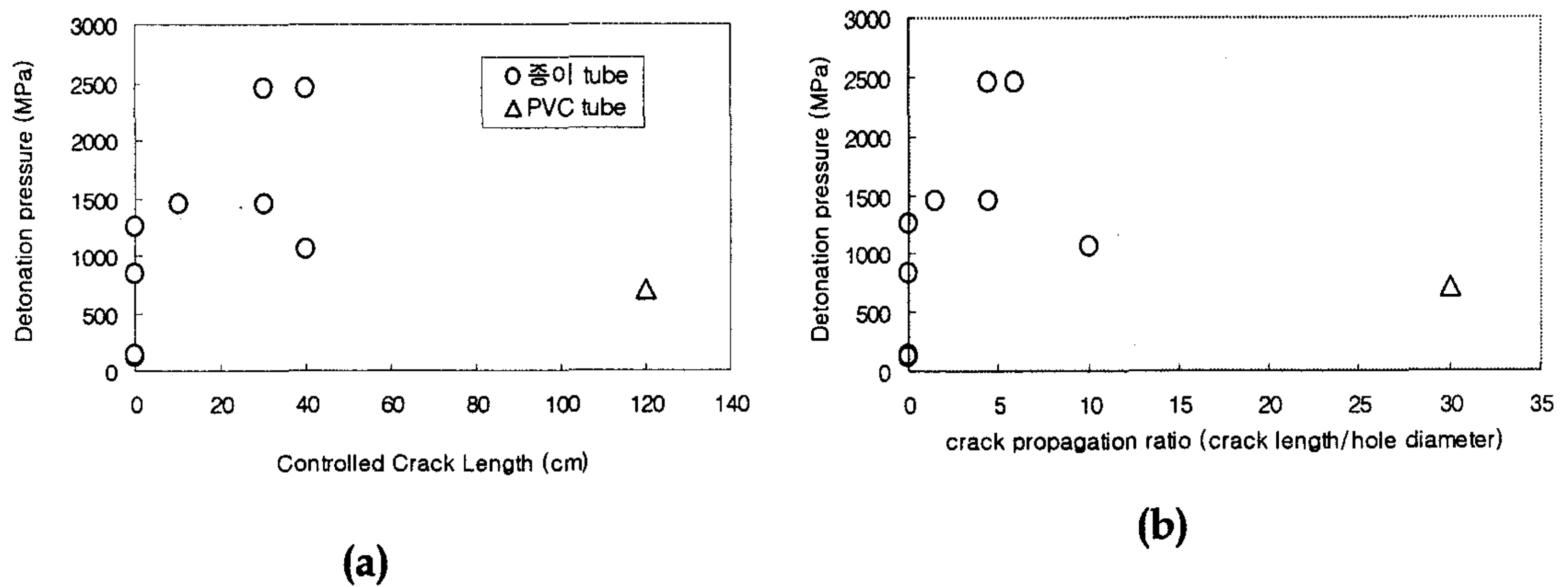


Fig. 3.6.2.5 스플릿튜브 발파의 폭굉 압력과 균열길이

(6) 결과요약

현장발파시험의 결과 스플릿튜브를 사용함으로써 균열이 슬릿방향으로 진행하도록 제어할 수 있었다. 따라서 스플릿튜브를 사용하여 파단면의 생성방향에 대한 제어가 가능한 것으로 나타났다. 또한 튜브의 재질은 종기와 같이 저렴한 가격의 재료를 사용하여도 효과를 얻을 수 있었다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

본 연구는 과거 경험적, 시행착오적 방법에 의존하던 발파연구 분야에 다양한 수치해석적 방법들과 실험적 방법을 적용함으로써 과학적인 방법에 기초하여 고도의 기술 개발을 가능케 하는 새로운 전기가 마련되었으며 새로운 기술의 개발과, 실험 장치의 개발은 창의적이고 매우 우수하다고 평가할 수 있다

본 연구의 최종 개발결과는 발파가 tool로서 이용되고 있는 건설, 토목, 자원분야에 외국기술도입을 대체하고 시공의 질을 높이는 등 매우 우수한 파급효과를 가져올 것으로 예상되며 1단계 연구는 연구개발의 기초가 되는 분야가 주 대상으로서 개발될 기술에 필수적으로 요구되는 기초 자료들이 결과물로서 산출되었고 매우 실용적인 발파진동예측프로그램, 제어발파기술, 실험실 실험 장치는 현장 및 연구계에 파급효과 매우 클 것으로 판단된다.

본 연구개발결과는 실험적 관찰이 거의 불가능하여 아직도 규명되고 있지 않은 발파원 부근의 메커니즘을 수치해석적인 방법으로 추정할 수 있는 기초 자료를 제공하고 있으며, 동적모델링에 있어서 타당한 입력 자료의 설정, 발파 및 대상 매질과 관련된 설계변수 도출, 붕괴거동의 사전 예측을 통한 실패 가능성 방지, 진동, 소음, 비산 등 환경공해적 요소의 발생저감 및 영향평가를 위한 사전 예측기술의 개발에 활용된다. 또한 1단계 연구결과로서 개발된 균열면 제어발파기술, 워터젯 절단기술, 진동예측기술 등은 환경친화적인 기술로서 활용이 매우 크다.

국내는 물론 국외에서도 구조물 해체관련 자료는 공개를 꺼리고 있으며 know-how 자료로서 확보하고 있으나 1단계 연구를 통해 많은 설계 및 시공 자료들이 축적되었고 이는 경험적, 시행착오적인 방법에 의존해 온 대상 분야를 이론적 근거에 기초한 과학적인 기술로서 확립, 발전시키기 위해 개발되는 tool들에 필수적으로 활용될 귀중한 자료로 평가된다.

1단계 연구사업의 결과로 귀중한 기술 자료들이 축적되었으며, 발파해체 메커니즘에 대한 이론적 고찰과 기초이론의 정립, 실험실 동적거동특성 실험시스템 개발, 수치해석법을 이용한 응력장 변화양상, 손상영역 등 제어발파효과 분석, 진동·소음 특성 규명 및 예측모델 개발, 고속촬영과 현장계측을 통한 붕괴거동 및 파괴거동 분석, 설계변수의 영향 분석 등의 연구 및 개발이 계획대로 성공적으로 수행되었고, 당초 계획에 없었으나 사전취약화 기술로서 워터젯 절단기술이 개발되는 등 발파해체기술의 실용화 및 고도화를 위한 기반이 정립되었다고 평가된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 추가 연구의 필요성

1단계 연구에서는 낙후된 국내 발파기술의 발전을 위한 기반을 구축하고, 환경친화적인 고도의 기술이 요구되는 구조물 발파해체기술(건축구조물 발파해체 및 암반구조물 발파해체-굴착발파)의 개발 및 실용화·보급을 위하여 기초기술을 체계화 확립하였다.

본 연구를 통하여 핵심기술로서 제어발파기술의 고도화를 위한 수치해석적 도구와 실험적 도구들이 마련되었고 발파로 인한 파괴 메커니즘 검토, 제어발파 설계변수에 대한 정량적 분석, 현장 계측 및 자료축적이 이루어졌으며 1단계 연구결과로부터 도출된 결과들로부터 발파해체를 위한 제어발파기술의 고도화를 이룩하고 국내 자체기술로서 확립하여 현장에 보급하기 위해서는 추가 연구사업으로 연결되어야 할 필요가 있다.

2. 활용 계획

1단계 연구 기간 중에도 건물발파해체시 비산 억제 및 방호기술, 암반 균열 제어 기술, 발파진동 계측 및 해석 기술 등이 현장에 적용되고 활용된 바 있으며 개발될 기술들은 다음과 같은 분야에 활용될 수 있다.

- ▷ 노후 아파트, 고층 빌딩 해체 철거; 노후 산업공장, 발전소 등 대형 콘크리트 구조물 등 재래식 공법으로 해체가 곤란한 구조물의 해체를 위한 발파설계 및 평가에 활용
- ▷ 붕괴거동 시뮬레이션 기술을 활용한 설계 타당성 검토
- ▷ 환경영향평가기술을 활용하여 시공시 재해발생 가능성을 시공 전에 검토 그리고 재해영향권의 분석을 통한 안전성 확보
- ▷ 건물들이 밀집되어 있어 재래식 공법의 적용이 불가능한 경우에 활용
- ▷ 진동·소음·비석 등으로 재해의 우려가 높은 도심지에서 제어발파기술로 활용
- ▷ 노천채굴장에서의 발파, 철도터널, 도로터널, 도로사면, 지하공간 개발 등과 관련하여 각종 암반굴착 공사시 균열제어발파 기술로 활용하여 안정성 제고 및 환경공해 절감에 활용

- ▷ 폐기물 지하 처분장 건설시 안전성에 치명적인 영향을 미치는 처분공동 주벽의 균열발생을 억제하기 위한 손상대 제어발파 기술로 활용
- ▷ 동적 하중에 대한 응답특성 연구결과는 발파진동에 대한 영향평가 및 건물피해 기준 마련을 위한 기초 자료로 활용
- ▷ 기술 자료의 축적방법을 표준화하여 산·학·연 기술 자료의 공유
- ▷ 발파해체사업에 산·연 협동으로 참여; 설계 및 시공사에 기술지원; 소프트웨어 보급 활용
- ▷ 한강의 노후 교량 구조물 철거 및 교량기초 콘크리트 구조물 해체, 구 조선총독부 건물철거 등에도 발파해체기술의 적용이 검토된 바 있으나 기술력의 미비로 다른 해체방법이 적용된 바 있으나 향후 적용이 가능
- ▷ 건설, 토목, 광업 각 분야의 다양한 발파작업(도로건설을 위한 암반사면 절취 작업, 도로 및 철도터널 굴착공사, 골재채취를 위한 발파작업)에 관련기술 향상효과
- ▷ 석회석 노천 및 지하채굴장에서의 생산발파, 석·골재채취를 위한 발파, 도로건설을 위한 암반사면 절취 작업, 도로 및 철도터널 굴착공사 등에 적용되어 효율 증대, 굴착공간 및 사면 안정성 제고 등의 기술향상도 동시에 해결할 수 있는 기술임
- ▷ 2008년에는 노후 원자력발전소 2기를 비롯하여 수명이 다한 원전발전소가 단계적으로 폐쇄될 예정 : 대형콘크리트로 이루어진 reactor 구조물의 철거는 발파해체기술이 적용되어야 하며 기술개발이 이루어지면 자체 시공이 가능할 것임(영국은 CDG가 발파해체기술로 철거)
- ▷ 본 기술은 전 세계적으로도 기술력을 갖고 있는 나라가 제한되어 있으므로 향후 동남아 개발도상국을 비롯하여 국외로의 기술수출도 가능
 - 일본은 기술력 미비로 고베 대지진시 손상 받은 건물의 해체에 외국기술을 활용
 - 대만 99년 9월 대지진 후 재해지역의 건물 철거에 고심하고 외국기술 도입 예정

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

2000-2003년도의 국제학술발표회 및 전시회를 통하여 수집된 주요 해외과학기술 정보를 요약하면 다음과 같다.

화약발파와 관련한 관심분야로서 매년 학술발표회에 앞서 최근 산업계의 주요 이슈로서 화약 및 발파기술의 안전관련 법규의 보완을 위해 수행되어 온 사업들의 발표 및 토론회가 개최되고 있다. 최근 3년 동안의 주요 발표자는 다음과 같다.

FritsWybenga, PE, US Representative to the United Nations Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods, Office of Hazardous Materials Safety in the Research and Special Programs Administration of the US Department of Transportation

David G. Trebisacci, Senior Chemical/Marine Specialist, National Fire Protection Association-Marine Field Service

Matthew J. Burkart, PE, Chairman ANSI A10 Committee, Safety in Construction and Demolition Operations

각각 다른 기관을 중심으로 규정보완 작업이 이루어지고 있으며 세계 23개국이 참여하고 있는 UN Committee에서는 UN Recommendation으로부터 Model Regulation을 작성하여 제시하고 이를 기본으로 유럽(ADD/RID), North American DG Standard 등에서 채택을 고려하고 있다. 현재 주요 사안은 환경규제기준, Model Regulation의 완성, 리튬배터리에 관한 처리문제 등으로 발표되었다. UN Committee에 일본은 참여하고 있으나 우리나라는 참여하지 않고 있는 것으로 나타났다. 현재 국내 법규는 거의 일본에 준하고 있고 많은 법규상의 문제점들이 제기되고 있는 시점에서 법규의 보완을 위해 적극적인 대처가 필요할 것으로 판단된다. (관련 웹사이트 <http://hazmat.dot.gov/>)

기타 NFPA 및 ANSI 의 안전관련 법규 및 표준화 작업의 보완에 대한 지속적인 노력이 발표되고 있다. 또한 안전관련 규정 및 법규제정을 위한 UN committee와 같은 조직에 국내 대표도 참여할 수 있도록 하여 국제적 활동에 적극 동참하는 것이 필요할 것이다

연구들 보면 산업계 및 학계의 많은 현장사례들이 중심이 되고 있으며 신제품으로 국내에는 출시되고 있지 않은 전자식 뇌관의 적용에 관한 논문이 나오고 있어

전자식 뇌관의 매우 정밀한 초시가 다양한 제어발파 기법에 적용될 수 있는 점을 감안한다면 향후 급격히 보급될 것으로 전망된다.

발파과정의 컴퓨터 모델링 기법이 매우 정밀해지고 있는 경향도 눈에 띄는 부분이었다. Sandia 국립연구소를 중심으로 개발된 디스크 및 구형 개별요소법(DMC_Blast model)모델은 파쇄암의 비산을 다루는 cast blasting 및 파쇄암의 이동 특성의 연구에 유력한 tool로서 활용이 기대된다. 이 소프트웨어는 아직 일반에게는 공개되지 않는다고 하며 당 연구진에서 활용하고 있는 상용화 된 소프트웨어인 PFC 모델과 차이점은 가스압의 효과를 별도로 고려하고 있다는 점이다.

또한 당 연구진이 실험적으로 연구한 바 있는 shape charge 기술도 AUTODYN 과 같은 수치해석적 기법을 이용하여 연구한 사례가 발표되었고 관련 소프트웨어 전시도 있었다. AUTODYN 소프트웨어는 3-D의 경우 10만불이 넘는 매우 고가의 제품이다.

논문들은 환경영향문제로 인하여 발파진동에 관련된 논문이 가장 많은 편이었으며 새로운 화약류의 개발, 시험 및 적용, 컴퓨터 모델링, 제어발파설계, 안전 등으로 분류할 수 있다.

최신 발파관련 장비들과 소프트웨어들에 관한 정보는 다음과 같다.

새로운 제품들로서 천공 정밀도가 매우 높은 천공장비류(HALCO MACH series 외)와 전자식 뇌관류(electronic detonator), NONEL식으로 여러개를 동시에 기폭할 수 있도록 고안된 boulder breaker류, gas 방출을 억제하는 stemming tool 들이 상품화 되어 보급되고 있다. 다양한 발파진동 및 소음 계측장비류 중에서도 자료를 원격으로 송신할 수 있도록 개발된 INSTANTEL 사의 제품이 눈에 띄고 향후 그 활용범위가 넓어질 것으로 보이며, 자료처리 소프트웨어들이 많이 개선되고 있다.

Precision Blasting의 Blast Designer, Controlled Blasting, Blasting Cost Analyst, Blast Report Database, Breaker 등의 소프트웨어들이 소개되고 폭약 성능을 계산하는 TIGER code의 windows version이 출시되었다.

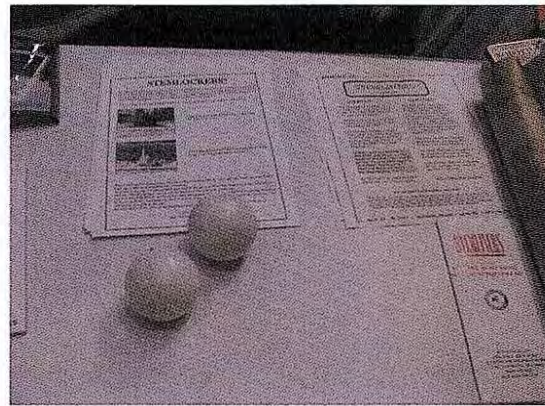
소형 카메라와 유사한 고속촬영장비와 자료처리 소프트웨어, 사면 및 터널면의 형상을 자동으로 계측하고 그 이미지를 작성해주는 장비류는 향후 활용성이 많은 기자재로서 연구용으로 확보하여야 필요가 있다.

발파설계 평가와 관련된 소프트웨어들의 개발이 활발하며, 특별히 최근 지구촌 곳곳에서 발생하고 있는 폭탄 테러와 관련하여 폭발시 건축물에 대한 영향과 피해를 예측하는 소프트웨어의 개발 시도도 특징적인 사항이다.

New Mexico Tech의 Energetic Materials Research & Testing Center의 연구시설 및 연구사업 소개와 Virginia 공과대학의 자원공학과를 소개하는 자리가 준비된 것은 최근 국내에서도 각 대학이 학생유치를 위한 다각적인 노력을 하고 있는 것을 고려해 볼 때 흥미로운 일이었다.



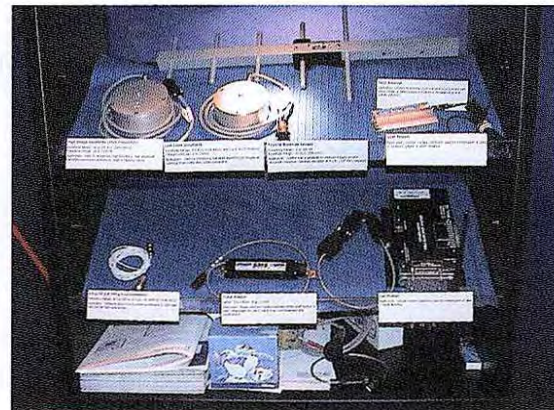
자료 1. 물을 이용한 옥석파쇄 시스템



자료 2. 전색 도구



자료 3. 다양한 전색 보조 도구들



자료 4.진동 계측 센서류, 원격 제어 장치

제 7 장 참고문헌

- 김재극, 산업화약과 발파공학, 서울대학교 출판부, p.21, p.367-368, 1992.
- 대한주택공사 부설 주택연구소, 1997, 재개발지구내 중고층건축물의 발파해체 공법에 관한연구, 187p.
- 류창하 외, 1995, 건물발파해체를 위한 제어발파 설계기술 개발, 한국자원연구소, pp.63-92.
- 윤철현, 신화약발파해설, 구미서관, p.274, 1994.
- Aimone, C.T., 1992, Rock Breakage : Explosives, SME Mining Engineering Handbook, Society of Mining Engineers, pp. 722-746.
- Atlas Powder Co., Explosives and rock blasting, 1987.
- Belytschko, T., Plesha, M. & Dowding, C. H., 1984, A Computer Method for Stability Analysis of Caverns in Jointed Rock, Int. J. Numer. Analy. Methods in Geomech., vol. 18, pp.473-492.
- Cundall, P., 1971, A Computer Model for Simulation Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock System, Proc. Int. Symp. Rock Fracture, Nancy, France, Paper II 2-8.
- Cundall, P., 1974, Computerized Design of Rock Slope Using Interactive Graphics fo the Input and Output of Geometrical Data, Proc. 16th Symp. Rock Mech., pp. 5-14.
- Cundall, P., 1980, UDEC - A Generalized Distinct Element Program for Modelling Jointed Rock, U. S. Army European Research Office and Defence Nuclear Agency, Contract DATA 37-39-C-0548.
- Chen, S. G., Zhao, J. (1998) A study of UDEC modelling for blast wave propagation in jointed rock masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 35. No. 1. pp. 93-99.
- Donze, F.V., Bouchez, J., and Magnier, S.A. (1997) Modeling Fractures in rock blasting, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. Vol. 34, pp. 1153-1163.
- Du Pont Inc., Blasters' handbook, Sesquicentennial ed., p.51, pp.163-172, 1952.
- Folchi R. , Demolition of an Industrial Building in an urban site , Jr. of Explosives Engineering, Vol.10, No.1, May/June.
- Gustafsson, R., Blasting technique, Dynamit Nobel Wien, p.20, 1981.

- Itasca Consulting Group, Inc., 1995, FLAC manual, ver. 3.3.
- Itasca Consulting Group, Inc., 1999, PFC User's Manuals, ver. 2.0.
- Itasca Consulting Group, Inc., 1995, UDEC-Theory and Background, Version 3.10, Minneapolis: ICG.
- Kutter, H.K. and Fairhurst, C., 1971, On the fracture process in blasting, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 8, pp. 181-202.
- Langefors, U. & Kihlstrom, B., 1978, *The modern technique of rock blasting*, John Wiley & Sons, p. 44.
- Lemos, J. V., 1987, *A distinct element model for dynamic analysis of jointed rock with application to dam foundation and fault motion*, Ph.D. Thesis, University of Minnesota.
- Liu, Q. and Tidman P., 1995, *Estimation of the dynamic pressure around a fully loaded blasthole*, MRL 95-014 (TR).
- McHugh, S. and Keogh, D., 1982, Use of laboratory-derived data to predict fracture and permeability enhancement in explosive-pulse tailored field tests., *Issues in rock Mechanics, Proceedings of the Symposium on Rock Mechanics*, Vol. 23, 504-514.
- Plesha, M. E., 1984, *A Method for the Transient Analysis of Jointed Media*, Dept. Eng. Mech., Univ. of Wisconsin, p.37.
- Plesha, M. E. & Aifantis, E. C., 1983, *On the Modeling of Rocks with Microstructures*, 24th Symp. Rock Mech., pp.27-35.
- Pyrak-Nolte, L. J., 1998, *Seismic visibility of fractures*, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.
- Ryu C., S. Cho & H. Yang, 2001, *Prediction of Dynamic Response of Ground Due to Blast Loading*, Proceedings of the 27th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, v1, Orlando Florida USA, 361-372.
- Stacey R.D., 1992, *Physics of the Earth*, 3rd Ed., Brookfield Press Ed.
- Per Anders Persson, Roger Holmberg and Jaimin Lee, 1993, *Rock blasting and explosives engineering*, 540p.
- U. S. A. National Highway Institute, 1991, *Explosives engineering, Rock blasting and overbreak control*, 415p.
- Voegele, M. D. & Fairhurst, C., 1982, *A Numerical Study of Excavation Support Loads in Jointed Rock Masses*, Proc. 23rd Symp. Rock Mech., pp. 675-683.

특정연구개발사업 연구결과 활용계획서

사업명	중사업명	국가지정연구실사업		
	세부사업명	제어발파기법을 이용한 구조물 발파해체기술 개발사업		
과제명	제어발파기법을 이용한 구조물 발파해체기술 개발			
연구기관	한국지질자원연구원	연구책임자	류창하	
총연구기간	2000년 6월 14일. ~ 2003년 6월 13일. (36개월)			
총 연구비 (단위 : 천원)	정부출연금	민간부담금	합계	
	760,900		760,900	
기술분야	자원기술 (건설기술)			
참여기업				
공동연구기관				
위탁연구기관	서울대학교			
연구결과활용 (해당항목에(√) 표시)	1. 기업화 ()	2. 기술이전(√)	3. 후속연구추진(√)	4. 타사업에 활용(√)
	5. 선행 및 기초연구()	6. 기타목적활용 (교육,연구)()	7. 활용중단(미활용)()	8. 기타()

특정연구개발사업 처리규정 제 31조(연구개발결과의 보고) 제 2항에 의거 연구결과 활용계획서를 제출합니다.

- 첨부 : 1. 연구결과 활용계획서 1부.
2. 기술요약서 1부

2003년 6월 일

연구책임자 : 류 창 하 (인)

연구기관장 : 한국지질자원연구원장 (직인)

과학기술부장관 귀하

여 백

[첨부1]

연구결과 활용계획서

1. 연구목표 및 내용

▶ 연구목표

- 기술자료의 데이터베이스 및 웹사이트 구축
- 제어발파설계를 위한 해석적 방법의 정립
- 붕괴거동 시뮬레이션 기법개발
- 실험실 동적거동특성에 대한 실험시스템 확립
- 발파진동 및 충격진동 발생특성 규명
- 구조물 절단 기술 확보

▶ 연구내용

- 건축구조물 해체설계 및 시공자료, 터널 및 노천 굴착시공자료, 계측자료 등의 수집 및 수집자료의 데이터베이스화
- 발파해체거동 시뮬레이션 기법정립 및 붕괴거동 시뮬레이션 모델의 입력변수분석
- 수치해석기법에 의한 발파원 모델링, 대변위 동적거동 모델링 특성분석, 입력자료의 산정 및 parameter study를 통한 설계변수들의 영향분석
- 균열제어를 위한 새로운 발파방법의 개념 정립, 현장시험 및 수치해석적 고찰
- SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar) 기법을 이용한 실험실 실험법 및 장치의 개발
- 발파진동 및 충격진동 계측, 발생특성분석 및 예측모델 도출

2. 연구수행결과 현황(연구종료시점까지)

가. 특허(실용신안) 등 자료목록

발명명칭	특허공고번호 출원(등록)번호	공고일자 출원(등록)일자	발명자 (출원인)	출원국	비고
회전식 워터젯 슬로터	10-2002-0013113	2002.03.12	최병희, 류창하, 선우춘	한국	
공기층을 이용한 양면발파법	10-2002-0014981	2002.03.20	류창하, 최병희, 선우춘, 홍기표	한국	
스플릿튜브, 스플릿튜브와 공기층을 이용한 균열제어발파 방법	10-2003-0036527	2003.06.05	최병희, 류창하, 백승규	한국	

나. 프로그램 등록목록

프로그램 명칭	등록번호	등록일자	개발자	비고
BLASTMAN	2002-01-12-3340	2002.5.22	한국지질자원 연구원	
VIB10		2003.6	한국지질자원 연구원	처리중

다. 노하우 내역

- ▷ 국내 구조물 해체관련 설계 및 시공자료의 분석 및 축적, 기동발파 메카니즘의 규명 및 방호대책 확보
- ▷ 구조물의 사전취약화를 위한 워터젯 재료절단기술
- ▷ 도로, 댐 등의 사면에 대한 제어발파 공법설계 및 암석채취용 균열제어발파 기술 개발
- ▷ 취약화된 구조물의 안정성 평가를 위한 수치해석적 기법 및 입력변수 산정기법
- ▷ 최적제어발파 설계를 위한 수치해석적 모델링 기법개발
- ▷ 붕괴거동 시뮬레이션을 위한 물리모델 및 sequential blasting 시험 및 해석 기법 개발

라. 발생품 및 시제품 내역

- ▷ 흡킨슨 효과를 이용한 동적거동 실험장치를 개발하고 시제품 제작
- ▷ 부재 절단을 위한 회전식 워터젯 슬로터 장치 개발 제작

마. 논문게재 및 발표 실적

○ 논문게재 실적

학술지 명칭	제목	게재 연월일	호	발행기관	국명	SCI게재여부
화약·발파	양면발파법 및 다이아몬드와이어 쓰를 이용한 채석시스템 연구	2000.9	v. 18, n.3	대한화약기술학회	한국	
터널과 지하공간	IMPLICIT 및 EXPLICIT 알고리즘에 기초한 개별요소 수치해석 방법의 모델링 특성 비교 연구	2000.9	v. 10, n.3	한국암반공학회	한국	
터널과 지하공간	암석 내의 균열전파에 따른 유효탄성계수의 변화	2000.9	v. 10, n.3	한국암반공학회	한국	
화약·발파	발파진동 측정에 대한 고찰	2000.12	v. 18, n.4	대한화약기술학회	한국	
화약·발파	터널발파에서 파쇄암의 입도예측에 관한 연구	2001.3	v. 19, n.1	대한화약기술학회	한국	
터널기술	터널발파에서 파쇄암의 입도예측에 관한 사례연구	2001.3	v.3, n.1	한국터널공학회	한국	
화약·발파	발파진동이 사면에 미치는 영향과 안전설계에 관한 연구	2001.3	v. 19, n.1	대한화약기술학회	한국	
화약·발파	영상처리기법에 의한 발파 파쇄암의 파쇄도 측정	2001.6	v. 19, n.2	대한화약기술학회	한국	
화약·발파	화약발파 용어에 대한 고찰	2001.6	v. 19, n.2	대한화약기술학회	한국	
대한토목학회 논문집	사면 안정성 제고를 위한 암굴착 발파설계 연구	2001.5	v.21, n5-C	대한토목학회	한국	
화약·발파	발파공학의 국내 외 연구동향 및 기술적 수준 분석	2001.9	v. 19, n.3	대한화약기술학회	한국	
화약·발파	Split tube를 이용한 균열 제어발파 현장 실험	2001.12	v. 19, n.4	대한화약기술학회	한국	
화약·발파	대전지역의 토목지질학적 조건을 고려한 암파쇄공법 선정에 관한 사례연구	2001.12	v. 19, n.4	대한화약기술학회	한국	
대한토목학회 논문집	단축압축하중 하에서 암석 모사시료의 균열전파 및 결합	2001.4	v.21 4-C호	대한토목학회	한국	
화약·발파	발파와 관련된 암반분류에 대한 고찰	2002.3	v.20, n.1	대한화약발파공학회	한국	
화약·발파	노르웨이의 수중수로관통발파 기술	2002.3	v.20, n.1	대한화약발파공학회	한국	
Engineering Geology	Measurement of rock fracture toughness under mode I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens	accepted 17 Dec. 2001		Elsevier Science	미국	(SCI)

화약·발파	에멀전 폭약의 계면활성제에 관한 연구	2002.9	v.20, n.3	대한화약발파공학회	한국	
화약·발파	미진동 발파공법 적용사례에 관한 연구	2002.9	v.20, n.3	대한화약발파공학회	한국	
J. of J a p a n Explosives Society	Computer Modeling of dynamic Ground motion due to Explosive Blasting and Review of some Modeling Probloms	2002.11	v63, n5	일본화약학회	일본	
화약·발파	철근콘크리트 기둥 발파해체를 위한 방호기술 연구	2002.12	v.20, n.4	대한화약발파공학회	한국	
화약·발파	발파진동측정을 위한 측정지침	2002.12	v.20, n.4	대한화약발파공학회	한국	
화약·발파	뇌관당 파쇄암량을 고려한 발파작업 수량 산정 연구	2003.3	v.21, n.1	대한화약발파공학회	한국	
계: 건수	23					

○ 학술회의 발표실적

학술회의 명칭	제 목	게재 연월일	호	발 행 기 관	국 명
Pacific Rocks 2000	Ground Vibration in tunnelling by blasting and its effect on surface structure	2000.7		PACIFIC ROCKS	미국
한국지반공학회 정기발표회	터널발파로 인한 진동 및 소음 발생과 제어	2000.9		한국지반공학회	한국
한국자원공학회 추계학술발표회	건설현장에서 안정성 향상을 위한 지반진동·소음·비산먼지 측정자료의 분석에 관한 연구	2000.10		한국자원공학회	한국
GEOTECH-YEAR 2000	Ground Vibration from Tunnel Blasting and Surface Structure Response	2000.11		GEOTECH	태국
한국지반공학회 정기발표회	터널굴착이 지상구조물에 미치는 영향평가 및 발파지침설계	2000.11		한국지반공학회	한국
한국산업안전학회 학술심포지엄	건설현장에서 안정성 향상을 위한 지반진동·소음·비산먼지 측정자료의 분석에 관한 연구	2000.11		한국산업안전학회	한국
Proc. of the 27th Annual Conf. on Explosives and BlastingTechnique	Prediction of Dynamic Response of Ground Due to Blast Loading	2001.1		ISEE	미국
한국자원공학회 공동학술발표회	노즐혼합형 연마재 워터젯에 의한 암석의 절삭에 관한 연구	2001.4		한국자원공학회	한국
한국자원공학회 공동학술발표회	암석의 균열전파 및 결합형태에 관한 실험적 연구	2001.4		한국자원공학회	한국
Eurock 2001	Crack Propagation and Coalescence under Uniaxial Loading	2001.6		ISRM FINLAND NG	Finland

학술회의 명칭	제목	게재 연월일	호	발행기관	국명
2nd Asian rock mechanics symposium	Correlation of rock mass classification methods in korean rock mass	2001.9		ARMS	중국
2nd Asian rock mechanics symposium	A study of hydro-mechanical behaviors of rock joints using torsional shearing system	2001.9		ARMS	중국
한국암반공학회, 대한화약기술학회 공동학술발표회	발파공학의 세계적 연구동향과 우리나라의 학문적 기술적 수준	2001.10		한국암반공학회 대한화약기술학회	한국
한국석유공사 비축기지 건설기술세미나	지하동굴 굴착설계 및 시공상의 문제점과 대책	2001.11		한국석유공사	한국
터널 발파공학 세미나	발파공학의 국내 외 연구동향 및 향후과제	2002.1		한국화약발파공학회	한국
Proc. of the 28th Annual Conf. on Explosives and BlastingTech.	Protection Techniques For Explosives Demolition of RC Pillar	2002.2		ISEE	미국
한국지반공학회 봄학술발표회	지반정수산정을 위한 경험적 암반 평가기법과 상관성	2002.3		한국지반공학회	한국
1st Int. Symp. on Energetic Materials and their Applications (ISEM2002)	Computer modeling of Dynamic Behavior due to Explosive Blasting and Review of Some Modeling Problem	2002.5		ISEM	일본
ISRM Regional Symposium, korea-japan Joint Symp. On Rock Engineering	Review of input parameters of distinct element analysis for modeling the rock mass behavior under quasi-static stress field	2002.7		한국암반공학회	한국
Proc. of the 28th Annual Conf. on Explosives and BlastingTech.	A Case Study of Dimensional Stone Blasting in Korea	2003.2		ISEE	미국
계 : 건수	20				

3. 연구성과

- 연구성과 적용

연월	업체명	기술명	주요내용
2001.3.-2001.8.	철도청고속철도사업소	골재채석발파에 의한 지반진동 예측 기술	채석장발파작업에 의한 지반진동 예측 및 터널 구조물에 미치는 영향권 평가
2001.3.-2001.9.	플라즈마엔지니어링	플라즈마를 이용한 암반 발파설계기술	비폭성 발파 방법으로서 플라즈마를 이용한 암굴착 발파설계 기술 이전
2001.9.-2001.12	(주)동일 동양시멘트	채광발파에 의한 발파진동 예측, 영향평가 및 제어기술	동굴문화재인 초당굴에 대한 진동 영향과 채광발파설계 지침
2001.5.-2001.12	한국고속철도공단	터널 및 노천 굴착시 발파진동 예측, 영향평가 및 제어기술	경부고속철도 경주통과구간 문화재 영향평가를 위해 공사시 암반특성을 고려한 진동 소음 발생특성 평가, 예측, 대상문화재 진동, 소음 영향 분석, 굴착공법 평가 및 지침 수립
2001.6.-2001.10	대우건설	발파진동 예측 및 구조물 동적영향평가	서울 지하철 9호선 시공시 발파진동 예측과 인접 주요 구조물에 미치는 영향
2000-2002 (지원계속)	두산중공업 코오롱건설	건물발파해체시 비산 억제 및 방호기술; 진동 영향평가	기동발파해체시 파쇄편의 비산 억제를 위한 방호기술, 진동 영향권 평가

4. 기술이전 및 연구결과 활용계획

가. 당해년도 활용계획

▷ 중소기업기술지도

▷ 발파분야 전문가를 확보하지 못한 산업체와 연구기자재, 계측기기류가 부족한 산업체에 대한 기술협력, 기술지원 및 자료제공

나. 활용방법

▷ 해체발파 및 건설발파 현장에서의 계측, 자료의 획득 및 분석기술의 제공

▷ 기술세미나 등을 통한 해체발파 및 관련발파 기술의 설계 방법 및 지침 제공

▷ 관련 산업계와의 지속적 연계를 통한 보유기술의 제공, 문제점 발굴 및 기술보완

다. 차년도 이후 활용계획

- ▷ 진동계측 및 해석기술 보급; 현장계측 지원
- ▷ 붕괴거동 시뮬레이션 기술의 고도화
- ▷ 발파해체 설계 타당성 검토, 안전성 확보
- ▷ 환경영향평가기술을 활용하여 시공시 재해발생 가능성을 시공전 검토; 재해영향권 분석을 통한 안전성 확보
- ▷ 폐기물 지하 처분장 건설시 안전성에 치명적인 영향을 미치는 처분공동 주벽의 균열발생을 억제하기 위한 손상대 제어발파 기술로 활용
- ▷ 발파해체사업에 산·연 협동으로 참여; 설계 및 시공사에 기술지원; 기술자료 활용

5. 기대효과

▶ 건축구조물 해체분야 전망

- ▷ 60년대말, 70년대초 건축된 아파트 재건축 주기로 인한 기술 수요 증대
- ▷ 과거 국내 산업발전과 함께 건설되었던 산업공장 건물, 발전소 등 많은 구조물들 노후, 철거시점에 도달함에 따른 수요 증대
- ▷ 도심지 재개발사업, 국토재개발사업이 활발해짐에 따라 현 시장규모의 10배 이상 성장할 것으로 추정
- ▷ 재래식의 공법으로는 해체가 곤란한 구조물에 대한 발파해체기술의 수요 급증 예상
- ▷ 도심지 재개발사업, 국토재개발사업이 활발해짐에 따라 수명이 다하지 않은 구조물도 해체대상이 되고 있어 현 시장규모의 10배 이상 성장할 것으로 추정
- ▷ 건축물 해체시장은 2000년 1월 현재 약 300억으로 추정되며, 특수 구조물 해체 및 암반굴착부문은 시장규모가 훨씬 큼

▶ 암반 해체분야(발파를 이용한 암반굴착분야) 전망

- ▷ 에너지 비축기지 건설, 지하 상하수도 처리장, 지하농산물저장고, 도로 및 철도터널 건설 등 지하공간 활용을 위한 암반 굴착공사 증가 예측; 기술수요 급증 전망
- ▷ 국내 방사성 폐기물 지하 처분장 건설이 시급한 상황에서 시공시 손상대 억제를 위한 제어발파 기술 요구(미국 Yucca Mt. 폐기물 처분장에서도 그 중요성이 대두된 바 있음)

- ▷ 국민의식 및 문화수준의 향상과 함께 발파작업에 의한 안전성 등 공해문제는 심각한 사회 문제로 대두; 발파재해측면에서 환경기술과 관련한 환경친화적인 고도의 제어발파기술 수요 급증 전망
- ▷ 타 기술에 비해 높은 작업능률 및 경제성 제공 → 고도화된 제어발파 기술수요 증대
- ▷ 동남아 개발도상국을 비롯한 외국의 경제성장과 함께 발파해체시장 상당한 수준 증가 예상

▶ 활용 계획 및 가능성

- ▷ 앞으로 급증할 노후 아파트, 고층 빌딩 해체 철거; 노후 산업공장, 발전소 등 대형 콘크리트 구조물 등 재래식 공법으로 해체가 곤란한 구조물의 해체를 위한 발파설계 및 평가에 활용
- ▷ 도심지 건물해체작업시 환경친화적인 시공기술로서 진동, 소음, 분진공해의 최소화; 발파재해예방 기술로 활용
- ▷ 건설, 토목, 광업 각 분야의 다양한 발파작업(도로건설을 위한 암반사면 절취작업, 도로 및 철도터널 굴착공사, 골재채취를 위한 발파작업)에 적용 효율증대, 굴착공간 및 사면 안정성 제고, 환경공해 절감 등 관련기술 향상
- ▷ 2008년에는 노후 원자력발전소 2기를 비롯, 수명이 다한 원전발전소가 단계적으로 폐쇄될 예정 : 대형콘크리트로 이루어진 reactor 구조물의 철거는 발파해체기술이 적용되어야 하며 향후 국내 기술로 시공 (영국도 발파해체기술로 철거함)
- ▷ 토목·건설·자원분야를 주 시장으로 하는 민간산업부분의 화약시장은 2000년 1월 현재의 년 6만톤(1300~1400억)으로 이 규모가 당분간 지속된다고 가정할 때 기술이 투입되는 공정규모를 고려하면 상당한 수준에 이를 것이며 기술고도화에 따른 경제성 제고를 가져올 것임.
- ▷ 건설업계 개방에 따른 외국업체의 국내시장 잠식을 고려하면 국내기술축적에 따르는 경제적 효과 다대
- ▷ 본 기술은 전세계적으로도 기술력을 갖고 있는 나라가 제한되어 있으므로 향후 동남아 개발도상국을 비롯하여 국외로의 기술수출도 가능 (일본은 기술력 미비로 고베 대지진시 손상받은 건물의 해체에 외국기술을 활용: 대만 99년 9월 대지진 후 재해지역의 건물 철거에 고심하고 외국기술 도입 예정)

6. 문제점 및 건의사항

발파분야는 과거 경험적, 시행착오적 방법에 의해 기술개발이 이루어졌고, 타 분야와 비교할 때 기술의 공개가 거의 없는 분야로서 최근에 와서야 수치해석적 기법과 계측기기류의 개발 및 보급과 함께 급속한 관심의 대상이 되고 있다. 하지만 발파전문가들의 교류와 학술활동의 장이 되는 국제학회나 관련학술지는 타 분야에 비해 턱없이 적은 형편이며, 특히 구조물 해체분야는 세계적으로 보아도 소규모 구성체가 핵심 기술들을 know-how의 형태로 전수하면서 외부에의 공개를 꺼려하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구나 이와 유사한 분야의 연구 결과를 논문수(특히, SCI 논문)에 지나친 비중을 두어 평가하게 되면 그 성과가 상대적으로 평가절하될 수도 있으므로 유연한 잣대로 분야 특성을 고려한 평가가 필요할 것으로 판단된다. 예를 들어 소프트웨어적 연구의 경우에는 연구성과의 현장적용성이나 적용결과에 비중을 두어 평가하고, 하드웨어적인 연구의 경우에는 결과 산물의 품질이나 공학적 가치를 중심으로 평가해야 하는 것이 바람직하다고 본다.

본 발파해체 연구의 경우 해석의 결과란 단순히 하나의 '기준' 내지 'feeling'을 제공하는 수준일 뿐이므로 본 기술의 실용성을 정확히 평가하기 위해서는 해석과 함께 실규모의 시험발파가 이루어져야 한다고 본다. 하지만 이와 같은 규모의 해체발파를 수행하기 위해서는 많은 예산과 해체대상 구조물이 필요하므로 1단계 연구에서는 당초 계획에 의거 주로 소프트웨어적인 기초기술 연구와 소규모의 시험발파를 수행하여 왔다. 기술의 고도화를 위한 다음 단계에서는 지금까지의 연구결과들을 토대로 통합패키지를 설계·제작하고, 또 가능한 한도 내에서 적절한 규모를 지닌 대상구조물을 확보하여 실규모 발파를 실시함으로써 이에 대한 검증과 보완작업이 필요하며 이를 위한 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

또한 현 시점에도 발파해체기술을 필요로 하는 작업들이 국내에 많이 있으나 화약 발파에 대한 선입견 및 기피, 민원발생에 대한 우려 등의 문제로 비효율적인 과거의 방법에 의존하고 있는 사례가 종종 발생하고 있다. 이러한 경향은 기업들이 발파해체 기술 개발에 대한 투자를 기피하는 결과를 초래하는 원인이 되기도 하므로 기존 방법의 적용 한계와 발파해체 기술에 대한 올바른 인식을 갖도록 하는 것이 필요하며, 고도의 기술 확보를 위한 연구투자가 이루어 져야 한다. 이를 소홀히 할 경우 국내 시장은 외국 전문업체에 잠식될 수 밖에 없을 것이다.

[첨부2]

기술 요약서

■ 기술의 명칭

구조물 해체를 위한 제어발파 설계모델링 및 환경영향평가 기술

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	2000-N-NL-01-C-183 (M1-0001-00-0010)			
과제명	제어발파기법을 이용한 구조물 발파해체기술 개발			
사업명	국가지정연구실사업			
세부사업명				
연구기관	한국지질자원연구원	기관유형	정부출연	
참여기관(기업)				
총연구기간	2000. 6 ~ 2003. 6			
총연구비	정부(760,900)천원	민간()천원	합계(760,900)천원	
연구책임자 1	성명	류 창 하	주민번호	540220-1009126
	근무기관 부서	한국지질자원연구원 지반안전연구부	E-mail	cryu@kigam.re.kr
	직위/직급	책임연구원	전화번호	(042) 868-3236
연구책임자 2	성명		주민번호	
	근무기관 부서		E-mail	
	직위/직급		전화번호	
실무연락책임자	성명	최병희	소속/부서	지반안전연구부
	직위/직급	선임연구원	E-mail	bhchoi@kigam.re.kr
	전화번호	(042)868-3237	FAX	(042) 861-9721
	주소	(305-350) 대전시 유성구 가정동 30		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

본 기술은 낙후된 국내의 발파기술 수준에서 환경친화적인 고도의 기술이 요구되는 구조물발파해체기술(건축구조물 발파해체 및 암반구조물 발파해체-굴착발파)의 개발, 실용화 및 보급을 위해 필수적으로 요구되는 과학적이고 체계적인 기반기술의 제 요소를 포함하고 있으며, 아울러 본 기술에 수반되어 개발된 균열면 제어발파기술, 워터젯 재료절단기술, 발파 및 충격진동 예측기술 등은 환경친화적인 기술로서 그 활용성이 높다 하겠다. 특히, 본 기술은 발파가 도구(tool)로서 활용되고 있는 건설, 토목, 자원 분야에 적용될 경우 외국기술의 도입을 대처할 수 있고 시공의 질을 높이는 등 우수한 파급효과를 가져올 것으로 예상된다.

<기술적 특징>

(1) 과거 경험적, 시행착오적 방법에 의존하던 발파연구분야에 다양한 수치해석적 방법들과 실험적 방법을 적용함으로써 실험적 관찰이 거의 불가능하여 아직도 규명되지 않고 있는 발파원 부근의 메카니즘을 과학적인 접근방법을 통하여 추정할 수 있다.

(2) 폭원에 대한 동적모델링에 있어서 타당한 입력자료의 설정, 발파 및 대상매질과 관련된 설계변수의 도출, 붕괴거동의 사전예측을 통한 실패가능성을 예상할 수 있다.

(3) 진동, 소음 및 비산과 같은 환경공해적 문제의 발생을 감소시키고 이의 영향을 사전에 평가할 수 있는 기술을 예측할 수 있다.

[용도·이용분야]

(1) 노후된 아파트, 공장, 발전소, 고층빌딩과 같은 대형 콘크리트 구조물로서 재래식 공법으로는 해체가 곤란한 구조물들의 해체를 위한 발파설계 및 평가 분야

(2) 환경영향평가기술을 활용한 시공전 재해영향권 분석, 붕괴거동 시뮬레이션을 통한 설계 타당성 검토, 밀집지역에서의 건물발파해체, 도심지의 진동·소음·비석 제어발파

(3) 노천 및 지하에서의 균열제어발파, 폐기물 지하처분장의 공동주벽에 대한 손상대 제어발파, 노후된 교량 및 교각기초 구조물의 해체발파, 원자로 구조물의 발파해체, 재해지역에서의 건물해체 분야 등

■ 기술의 분류

[기술코드] 523 (3 Digit) (KISTEP 홈페이지 기술요약서용 기술분류표 참조)

[기술분야] (1개만 선택(✓로 표시)하여 주십시오)

- 정보산업 기계설비 소재 정밀화학·공정 생명과학
 원자력 자원 에너지 항공·우주 해양
 교통 보건·의료 환경 기초·원천 기타

[기술의 활용유형] (1개만 선택(✓로 표시)하여 주십시오)

- 신제품개발 신공정개발 기존제품개선 기존공정개선
 기 타 (제어발파 설계, 공법 및 영향평가)

[기술의 용도] (복수 선택(✓로 표시)가능합니다)

- 기계설비 부품소자 원료재료 소프트웨어
 가공처리기술 자동화기술 불량률 감소 등 현장애로기술
 제품설계기술 공정설계기술 기 타 (제어발파기술)

■ 산업재산권 보유현황(기술과 관련한)

권리유형	명 칭	국가명	출원단계	일자	등록번호
특허	회전식 워터젯 슬로터	한국	출원	2002.3.12	10-2002-0013113
특허	공기층을 이용한 양면발파 법	한국	출원	2002.3.20	10-2002-0014981
특허	스플릿튜브, 스플릿튜브와 공기 층을 이용한 균열제어발파방법	한국	출원	2003.6.5	10-2003-0036527
컴퓨터 프로그램	BLASTMAN	한국	등록	2002.5.22	2002-01-12-3340
컴퓨터 프로그램	VIB10	한국	출원	2003.6.5	2003-01-12-2985

* '권리유형'란에는 특허, 실용신안, 의장, 컴퓨터프로그램, 노하우 등을 선택하여 기재

* '출원단계'란에는 출원, 공개, 등록 등을 선택하여 기재

