

제 1 차 년 도
최 종 보 고 서



레이저 기술개발

공간 광소자를 이용한 광컴퓨터 기술 개발

Development of Optical Computing Techniques Based
on the Spatial Optical Modulator

연구기관
한국과학기술연구원

과 학 기 술 처

제 출 문

과학기술처 장관 귀하

본 보고서를 “레이저 기술”사업의 세부과제인 “공간 광소자를 이용한 광컴퓨터 기술 개발”에 관한 연구의 보고서로 제출합니다.

1991 년 6 월 일

연구기관명 : 한국 과학 기술 연구원.

연구책임자 : 손정영 (응용전자연구실 책임연구원)

조재철 (응용광학연구실 책임연구원)

연구원 : 김세운 (응용전자연구실 선임연구원)

김상혁 (응용광학연구실 연구원)

강기호 (응용전자연구실 연구원)

전형욱 (응용전자연구실 연구원)

김유민 (응용광학연구실 위촉연구원)

손동환 (고려대 물리과 위촉연구조원)

김신근 (응용광학연구실 연구조원)

이재하 (응용광학연구실 연구조원)

요 약 문

I. 제 목

공간 광소자를 이용한 광컴퓨터 기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 중요성

1. 목 적

- 광굴절을 결정을 이용한 광 정보처리 기술의 확립과 공간 광변조소자를 이용한 실시간 광학적 영상인식 기술 확립

2. 중 요 성

- 광연산, 신호 및 정보처리 등 광컴퓨터 구현을 위한 기본적인 구성블럭 실현
- 실시간으로 인식처리되는 광학적 영상처리방법 구현
- 광통신 시스템의 직접화상 전송장치화
- 조정밀 광계측기기의 국산화를 위한 기반기술로 이용
- 전기적 신호의 광신호 변환기로 활용
- 핵융합을 위시한 미래첨단 기술의 개발을 위한 기초로 활용
- 수출전략 산업의 생산성 향상 및 공장자동화에 활용
- 무인 자동 이동 시스템 개발 및 로봇틱 비전에 활용

- 군사적 첨단인식 및 추적 시스템 개발에 응용
- 이동물체 영상식별 및 광응용 표적 자동 추적 시스템의 기반기술로 응용
- 저가격 LCTV 를 이용한 광학적 영상처리 기술 구현

Ⅲ. 연구개발의 내용

- 자기편평 결정인 $BaTiO_3$ 와 관련된 현상의 규명
- 광굴절을 결정을 이용한 기본영상처리 개발
- LCD 를 이용한 실시간 영상처리 시스템구성
- 저가격 LCTV 를 이용하여 필요한 공간광소자 제작
- CCD 카메라에 의해 결상되는 영상을 LCTV 화면에 재생
- 가간섭 광학적 영상처리용 광학계 구성
- 실시간 영상처리 구현 : Edge-enhancement 와 상의 가감산

Ⅳ. 연구개발의 결과 및 활용에 대한 건의

- 광굴절을 결정 $BaTiO_3$ 의 자기편평 위상공액파에 대한 특성을 광원과 입사빔의 조건에 따라 연구하였다.
- 입사빔의 위치에 따라 안정된 상태, 불안정 상태, 감쇠 진동 상태를 겪으며 입사각이 커질수록 반사율은 증가하고 Fanning 현상이 빨랐다.
- 수렴하는 빔보다 발산하는 빔의 반사율이 높다.
- 최고 반사율 조건은 입사각이 70° 정도로 입사면의 중간위에 쏠림거리를 지나 발산하는 경우이다. 이때 Fanning 각은

- 57° 이며 49%의 반사율과 수초의 반응 시간을 나타내었다.
- 다중모드의 광파이버에 대한 영상전송을 실험한 결과 입력단의 잠음으로 영상 전송이 뚜렷하지 못하였다.
 - 광파이버의 입력단에 대한 영상입력의 체계적인 연구가 요구된다.
 - 액정(LCD)을 이용한 편광-위상공액 Novelty Filter를 구성하였다.
 - 영상의 삽입시보다 영상의 제거시 더 뚜렷한 필터링 효과가 있었다.
 - 영상의 contrast를 높이는 방법은 LCTV나 LCLV로 가능하다고 본다.
 - 저가격 LCTV를 개조하여 공간 광소자를 제작하였다.
 - LCTV를 이용하여 실시간 광학적 영상처리인 Edge-enhancement와 상의 가감산을 구현하였다.
 - 이 연구결과는 산업에 활용할 수 있는 간단한 실시간 영상처리 시스템 개발에 활용할 수 있다.
 - 광학적 광연산 연구에 활용할 수 있다.

SUMMARY

I. Title

Development of Optical Computing Techniques Based on the Spatial Optical Modulator

II. Objective and Significance of the Study

1. Objectives

- Development of Optical Information Processing Techniques Using the Photorefractive Crystal BaTiO₃
- Development of Real-time Optical Image Processing Technology Using LCTV

2. Significance

- Establishment of a basic configuration for Optical Computing; Optical Signal Processing, Optical Information Processing
- Realization of Real Time Optical Image Processing Techniques
- Development of a Technique for the Direct Image Transmission
- Establishment of a Technical Basis for the Very Precise Optical Instrumentation
- Utilization as a New E/O Converter

- Building a Technical Foundation for Future High Technology, like Nuclear Fusion
- Improvement of Industrial Production and Factory Automation
- Development of a Fully Automated Moving System and a Robotic Vision
- Development of a New Target Detecting and Tracking System for Military Use
- Establishment of Real Time Optical Image Processing Technology Based on Low Priced LCTV

III. Contents and Scope of the Study

- Characterization of Photorefractive Effects for the Self-pumped Optical Phase Conjugate Mirror, BaTiO₃,
- Development of New Image Processing Techniques Based on the Photorefractive Crystal
- Realization of Real Time Image Processing System Using LCD
- Fabrication of a Spatial Optical Device Using Low Priced LCTV
- Displayment of an Image Obtained with CCD Camera on LCTV
- Construction of an Optical System for Coherent Optical Image Processing
- Construction of a Real Time Optical Image Processing system; Edge Enhancement and Image Subtraction and Addition

IV. Results and Recommendation

- Characteristics of a self-pumped optical phase conjugation were investigated by changing relative position and incident angle of input beam on the crystal surface
- The optical phase conjugate reflectivity vs. time showed stable, unstable, and damped oscillations depending upon the beam incidence position on the photorefractive crystal
- The beam fanning effect appears more rapidly and the reflectivity increases as the beam incidence angle increases
- The reflectivity of divergent beam was more than that of convergent beam
- For the case of the crystal ($6.5 \times 6.5 \times 3 \text{ mm}^3$) used for our experiment, the reflectivity was maximized when input angle is 70° , beam incidence position is on the center of the input face, and the beam is divergent, and the fanning angle is 57° . For the above condition the reflectivity was 49%, and the response time was in the order of seconds
- The direct image transmission through the multimode optical fiber showed strong background reflection from the input tip of the fiber. It is necessary to remove the background reflectance to enhance the contrast

- Polarization-conjugating novelty filter based on LCD was set up
- The novelty filter works more effectively when the image is on than off
- The image contrast will be increased with high quality LCLV or LCTV
- The spatial optical device based on low priced LCTV was built
- Edge enhancement, image subtraction and addition using LCTV was performed
- Above experimental results will be useful for the development of a real time image processing system and a optical computing system

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	15
Chapter 2. Development of Optical Information	
Processing Techniques based on Optical Phase	
Conjugation	17
Section 1. Introduction	17
Section 2. Characteristics of Photorefractive Crystal	
BaTiO ₃	22
1. Theory of Photorefractive Effects	25
1) Photorefractive Effect	25
2) Self-pumped Optical Phase Conjugation	32
2. Experiments of Self-pumped Optical Phase	
Conjugation	43
3. Experimental Results	43
Section 3. Application of Optical Phase Conjugation..	56
1. Polarization and Spatial Information Recovery by	
Modal Dispersion and Phase Conjugation	56
2. Experiments of Polarization-conjugating Novelty	
Filter	61
Section 4. Discussion and Conclusion	67
References	69

Chapter 3. Real Time Optical Image Processing Technology	
Using LCTV	71
Section 1. Introduction	71
Section 2. Structure and Characteristics of LCTV	71
Section 3. Optical System for Image Processing	78
1. Fourier Transform Using Lens	78
2. Optical System	78
Section 4. Edge Enhancement, Image Subtraction, and	
Addition	81
1. Edge Enhancement	81
2. Image Subtraction and Addition	82
Section 5. Experiments	85
1. Fabrication of SLM Using LCTV	85
2. Construction of Optical Image Processing	
System	88
3. Real Time Edge Enhancement	90
4. Real Time Image Subtraction and Addition	92
Section 6. Conclusions	95
References	97

목 차

제 1 장 서 론	15
제 2 장 위상공액파를 이용한 광정보 처리기술	17
제 1 절 서 론	17
제 2 절 광굴절을 결정인 BaTiO ₃ 의 특성	22
1. 광굴절 효과의 이론적인 배경	25
1) 광굴절을 효과(photorefractive effect)	25
2) 자기펌핑 위상공액 현상(self-pumped optical phase conjugation)	32
2. 자기 펌핑 위상 공액 실험	43
3. 실험 결과	43
제 3 절 위상공액파의 응용	56
1. 다중모드 광파이버에서의 편광의 보상 효과의 실험	56
2. Optical Novelty Filter의 실험	61
제 4 절 결과논의 및 결론	67
참 고 문 헌	69
제 3 장 LCTV를 이용한 실시간 광학 영상처리 기술	71
제 1 절 서 론	71
제 2 절 LCTV의 구조 및 특성	71
제 3 절 영상처리 광학계	78

1. 렌즈에 의한 Fourier 변환	78
2. 광학계	78
제 4 절 Edge Enhancement와 상의 가감산	81
1. Edge Enhancement	81
2. 상의 가감산(Image Substraction and Addition)...	82
제 5 절 실험	85
1. 액정 TV를 이용한 공간광변조소자의 제작	85
2. 영상처리 광학계 구성	88
3. 실시간 Edge Enhancement 실험	90
4. 실시간 상의 가감산 실험	92
제 6 절 결 론	95
참 고 문 헌	97

제 1 장 서 론

광을 이용한 정보처리방식, 즉 광컴퓨터는 현재의 슈퍼 컴퓨터에 비해 처리속도가 빠르고 정보 전달이 용이하며 또한 전자적 잡음에 강하여 정보화 사회의 발전과 더불어 그 필요성이 점차 증대되고 있다. 공간 광소자는 1차나 2차원 광데이터 필드상에 정보를 직접처리 하기위한 소자로 광이 가진 고유의 특성인 공간 병렬성 및 속도를 잘이용할 수 있기 때문에 광연산, 신호 및 정보처리 등 광컴퓨터 구현을 위한 가장 기본적인 구성블럭으로 주목받고 있다.

공간 광소자의 개념은 1960년대의 Holography나 Fourier 변환특성의 인식과 더불어 시작되었다고 할 수 있으나, 실제 활발한 연구활동은 공간 광소자가 상용화된 1980년대 이후 수행되었다. 현재 공간 광변조기는 패턴인식, 영상이해 및 처리, 광연산, 전기신호의 광신호로 변환, 메모리, programmable 공간 필터링, 고속 비선형 스위치, 실시간 홀로그래프 등 고속 정보처리를 위해 요구되는 모든 기능의 수행가능성을 보여주고 있고, 또한 일부는 실험실적인 시작품 제작단계까지와 있으나, 아직까지 대부분의 기술은 기초개념의 정립단계를 벗어나지 못하고 있다.

본 연구는 광굴절율(Photorefractive) 물질중 $BaTiO_3$ 를 사용한 영상처리 및 광연산 기술의 개발과 LCLV(Liquid Crystal Light Valve)나 LCTV(Liquid Crystal TV)를 이용한

입의 형태의 물체모양을 실시간으로 인식처리하는 광학적 영상처리 방법에 대한 연구수행을 목적으로 하였다. 제 2 장에서 광굴절을 결정인 $BaTiO_3$ 의 특성규명 및 위상공액파를 이용한 광정보 처리기술에 대해 기술하였으며 제 3 장에서는 저가격 LCTV를 이용한 광학적 영상처리 기술에 대해 기술하였다.

현재 광굴절을 물질을 이용한 2차원 행렬변환과 영상필터 그리고 응용기술 개발을 위해 미국, 소련, 구주, 일본 등지에서 많은 연구가 진행되고 있고 또한 LCLV 등의 기술은 소형 컴퓨터와 CCD 카메라의 도움에 의해 나쁜 조건하에서의 영상인식까지도 할수 있는 단계에 와 있다. 공간 광소자 기술은 광컴퓨터의 구현만이 아니고 앞으로 광기술을 인도할 중요한 기술중의 하나이므로 우리 광산업기술의 확립 및 선진국화를 위해 집중 개발되어야 한다.

제 2 장 위상공역파를 이용한 광정보 처리기술

제 1 절 서 론

광을 이용한 정보처리방식, 즉 광컴퓨터는 현재의 슈퍼 컴퓨터에 비해 처리속도가 빠르고 정보전달이 용이하며 또한 전자적 잡음에 강하여 정보화 사회의 발전과 더불어 그 필요성이 점차 증대되고 있다. 공간 광소자는 1 차나 2 차원 광대역 필드상에 정보를 직접 처리하기 위한 소자로 광이 가진 고유의 특성인 공간 병렬식 및 속도를 잘 이용할 수 있기 때문에 광연산, 신호 및 정보처리 등 광컴퓨터 구현을 위한 가장 기본적인 구성블럭으로 주목받고 있다.

원자나 원자간의 전기장의 세기는 $10^7 \sim 10^{10} \text{ V/cm}$ 로 일반적인 광원으로 가능한 전기장의 세기인 10^3 V/cm 보다 훨씬 크기 때문에 매질의 광학적 계수들은 그 매질을 통과하는 빛의 세기에 변화가 없는 것으로 간주되어 왔으나 원자간의 전기장 세기에 버금가는 고출력 레이저 ($10^5 \sim 10^9 \text{ V/cm}$)의 출현으로 이 개념은 수정이 불가피하게 되어 비선형 광학이란 새로운 분야가 탄생되었다.

비선형 광학은 매질의 광학적 계수들이 이 매질을 통과하는 광의 세기에 의존한다는데 근거를 두고 있으며, 특히 비선형이란 말은 매질의 감도가 입사광의 전기장 세기가 다차 함수로 주어지는 것에 기인한다. 이 비선형 광학은 spectroscopy(Saturat-

ion, Brillouin, Raman 그리고 Rayleigh), optical diagnostics, laser fusion, laser isotope separation, 입사광의 harmonics generation, optical phase conjugation (OPC) 등 여러 분야에서 응용되고 있다.

비선형 광학의 한 분야로서 OPC는 입사전자파 (OPC는 optical spectrum만이 아니고 microwave, radio frequency, 자외선 등 다른 electromagnetic spectrum에서도 가능)의 위상(phase)이나 파면(wavefront)이 비선형 매질에 의해 그 복소 공간 진폭(complex spatial amplitude)의 복소관을 취한 것과 같이 반전되는 현상을 말하며 그림 2-1에서 보이는 것과 같이 위상반전된 파는 그 입사광의 경로를 정확히 역진행하므로 광학 시스템에서의 수차나 광전파 경로상에 놓인 diffusive매질에 의한 퍼짐이나 왜(distortion)를 보상할 수 있어 실시간 적응 광학(real-time adaptive optics), 광신호 처리(optical signal processing), 광연산(optical computing), 영상처리(image processing), 간섭계(interferometry), 극저 잡음 탐지(ultra-low noise detection), 분광학 분야 등 다양한 응용 분야를 갖고 있으며, 그 가능성은 무한한 것으로 간주되고 있다. 따라서 현재 선진국에서 OPC는 광디스크(optical disk), quantum well laser, 광 파이버 센서, picosecond optical technology, coherent 광통신, 광 컴퓨터, micro-optics 등과 더불어 차세대 광학 분야를 선도할 신기술의 하나로써 각광을 받고 있다.

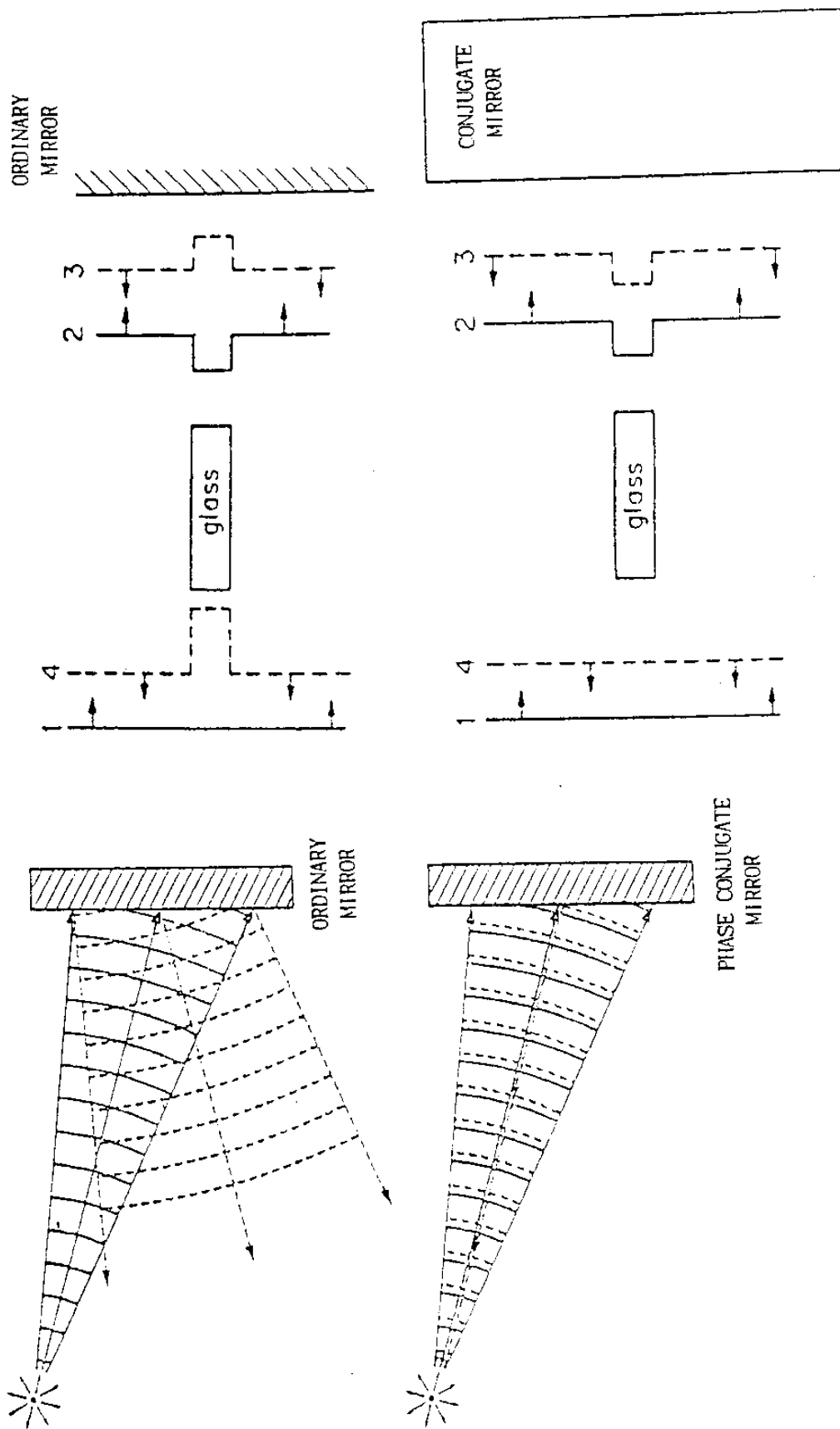


그림 2-1. 보통의 거울과 위상공액 거울(OPCM)의 비교

OPC를 야기시키는 물리적 현상들은 stimulated Brillouin scattering, stimulated Raman scattering, Kerr-like four-wave mixing, electrostrictive effects in aerosols, photorefractive effects, heating과 plasma production 등이며 이러한 현상을 일으키는 매질은 Dyes(dye, Rhodamine 6G, B, BDN 등), 불순물이 첨가된 반도체 (GaAs, InP, CdS, CdSe, ZnSe, CdTe, HgCdTe 등), 진성 반도체 (Ge, InSb, Si 등), 기체 (Sodium, Rbodium, Iodine 등), 가스 방전 (O_2 등), 액체 (에탄올, 메탄올, CS_2 등), 압축 가스 (SF_6 등), 그리고 electrooptical 결정 (BSO($Bi_{12}SiO_{20}$), BGO($Bi_{12}GeO_{20}$), SBN($Sr_{1-x}Ba_xNb_2O_6$), $BaTiO_3$, $LiNbO_3$, $LiTaO_3$, $KNbO_3$ 등) 등^(2-1,2)이 있다.

일반적으로 OPC를 일으키기 위해서는 원자간의 전기장 세기에 버금가는 높은 밀도 ($10^7 \sim 10^9 V/cm^2$)를 가진 레이저광을 조사하여야 하나 $BaTiO_3$ 나 SBN 같은 광굴절을 결정에서는 $1W/cm^2$ 정도의 낮은 밀도에서도 OPC를 얻을 수 있다. 특히 $BaTiO_3$, SBN, BSKNN($Ba_{2-x}Sr_xK_{1-y}Na_yNb_5O_{15}$) 결정은 높은 electrooptic 계수를 나타내므로 OPC 실험에서 pumping beam 및 외부인가전압이 없이 자기펌핑이 가능하다. 따라서 자기펌핑은 구성상 간단하고 외부의 진동에 크게 영향을 받지 않으며 two-wave mixing이나 four-wave mixing에서 야기되는 align의 어려움을 해결할 수 있다.

OPC의 왜를 보상하는 성질을 이용한 OPCM(optical phase

conjugate mirror)은 최근 광통신에 쓰이고 있는 다중모드 광 파이버에 적용시키는 연구⁽²⁻³⁾가 시도되고 있다. 다중모드 광 파이버를 통과한 영상정보는 일반적으로 편광성과 공간성을 상실하므로 영상정보의 처리가 불가능하나 OPC를 이용하여 편광성과 공간성을 보상하는 것이 가능하다(Basov의 구상⁽²⁻⁴⁾이라 함). 1986년 Caltech의 Yariv 그룹⁽²⁻⁵⁾에서 실험적으로 성공하였으며 1987년 Rockwell의 Yeh 그룹⁽²⁻⁶⁾에서 이를 이용한 위상공액 다중모드 파이버 자이로스코프를 연구하였다.

OPC의 응용인 Novelty Filter⁽²⁻⁷⁾는 입력 정보중에서 기존의 입력중 새로운 정보만 정보로 처리하는 것이다. Novelty Filter의 개념은 많은 동물들의 시각 구조에서 보여주고 있는 현상을 근거로 하고 있는데, 예를 들어 개구리의 시각 구조는 Novelty Filtering을 하므로써 날아가는 곤충을 식별한다. 변화가 없는 주위의 환경에 대해서는 무시하고 변화가 있는 영상에 인간의 눈에 따라가는 것과 같이 Novelty Filtering은 시간적인 high-pass filtering과 유사하다. 따라서 Novelty Filter를 통해 들판을 볼때 처음에는 들판 전체가 보이다가 정적인 들판은 사라지게 되고 날아가는 새가 있으면 새만 보이게 된다. 빠르게 뛰고있는 개구리가 있다고 할때 두 장소에서 개구리의 상이 나타날 것이다. 전에 있던 곳과 현재 있는 곳에서 동시에 나타나게 되는데 그것은 두 곳 모두 변화가 있는 것으로 감지되기 때문이다. 기존의 디지털 영상처리법은 카메라로 영상을 받아 저장하였다가 다시 받은 영상과의 차를 디지털로 처리하여 출력으로 내

보낸다. 이와는 달리 실시간 홀로그래름 영상의 저장체로 사용할 경우 입력영상은 기록과 더불어 기록된 영상과의 차를 출력하게 되므로 간단하고 현저하게 영상처리를 할 수 있다. 자기뮴핑 광굴절을 결정에 이용한 Novelty Filter는 1987년 Southern California 대학의 Feinberg 그룹⁽²⁻⁸⁾에서 연구되었다.

본 연구에서는 광굴절을 결정 $BaTiO_3$ 의 자기뮴핑 위상공액 현상을 분석 연구하여 이 OPC를 응용하기 위하여 최고 위상공액 반사율의 조건을 조사하였으며 이를 다중 모드 광 파이버에 응용될 수 있는지를 실험하였다. 또한 Novelty Filter를 구성하여 이의 응용 가능성을 알아 보았다.

제 2절 광굴절을 결정인 $BaTiO_3$ 의 특성

Perovskite 구조인 $BaTiO_3$ 는 온도에 따라 상전환을 여러 번 겪는다. 그중에서도 광굴절을 결정으로 사용되는 tetragonal (4mm) 구조는 $120^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ 사이에서 상전환이 일어나지 않는다. 높은 밀도의 광원이나 외부 인가전압없이 광굴절을 결정으로 사용할 경우에는 poling을 하고 사용하여야 한다. Poling이란 Curie 온도이하 120°C 정도에서 C-축으로 수 천 전압을 걸어주어 ferrite domain이 C-축에 나란히 놓아 그림 2-2에서 보는 것과 같은 이온의 변위에 의해 편광성이 생기게 된다. Poling이 된 결정은 two-wave mixing이나 four-wave mixing 뿐만이 아니라 자기뮴핑 (self-pumped) 위상공액 현상에 적용할 수 있다.

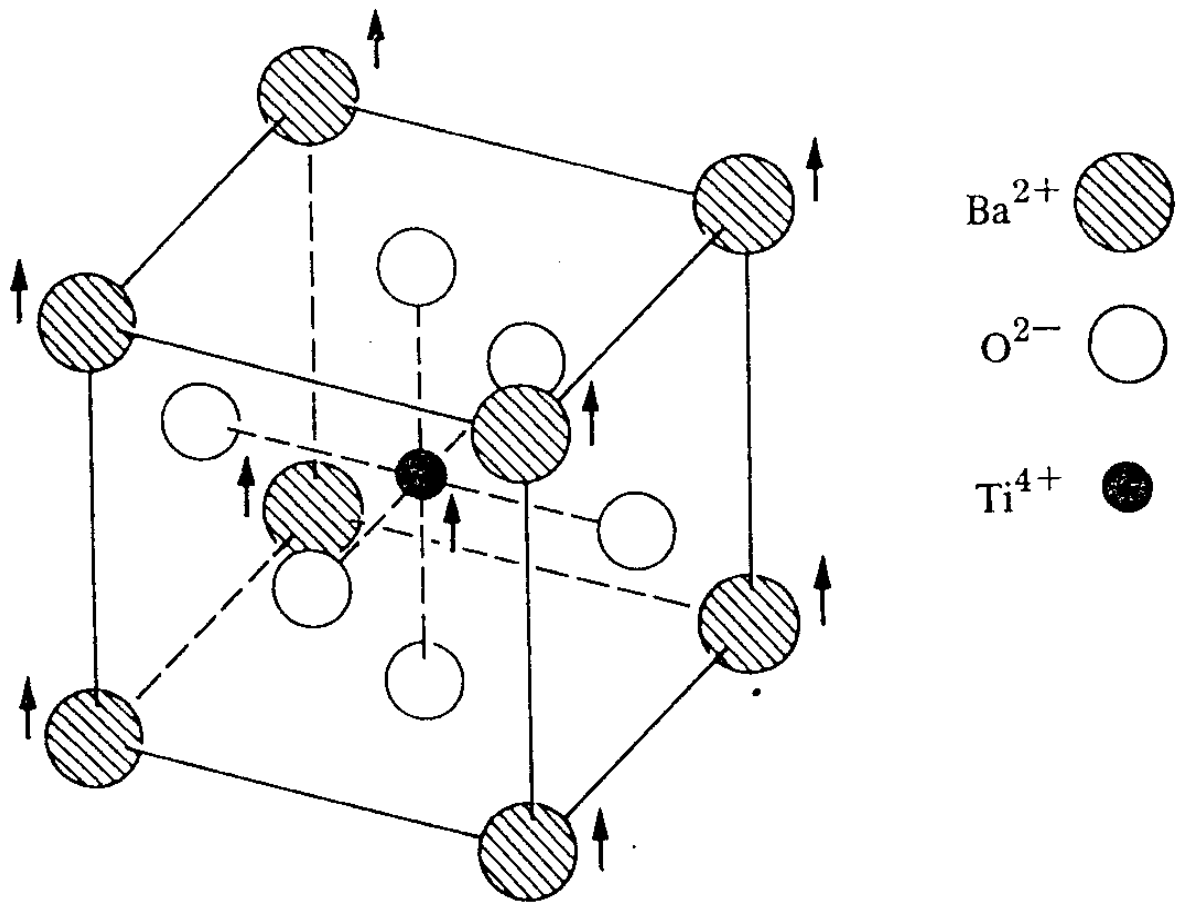


그림 2-2. BaTiO₃의 결정구조. 편광성을 갖게 될 때 이온들의 변위는 화살표와 같다.

표 2-1. 여러 광굴절을 결정의 특성비교 (파장이 400nm인 경우)

Material	Room temperature Electrooptic Coefficients (10^{-12}m/V)	Index of Refraction	$n_o^3\gamma$ (10^{-12}m/V)	ϵ/ϵ_o	Point Group Symmetry
KDP (KH_2PO_4)	$\gamma_{41}=8.6$ $\gamma_{63}=10.6$	$n_o=1.51$ $n_e=1.47$	29 34	$\epsilon_{\parallel c}=20$ $\epsilon_{\perp c}=45$	$\bar{4}2m$
KD_2PO_4	$\gamma_{63}=23.6$	~ 1.50	80	$\epsilon_{\parallel c}\sim 50$	$\bar{4}2m$
ADP ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)	$\gamma_{41}=28$ $\gamma_{63}=8.5$	$n_o=1.52$ $n_e=1.48$	95 27	$\epsilon_{\parallel c}=12$	$\bar{4}2m$
Quartz	$\gamma_{41}=0.2$ $\gamma_{63}=0.93$	$n_o=1.54$ $n_e=1.55$	0.7 3.4	$\epsilon_{\parallel c}\sim 4.3$ $\epsilon_{\perp c}\sim 4.3$	32
CuCl	$\gamma_{41}=6.1$	$n_o=1.97$	47	7.5	$\bar{4}3m$
ZnS	$\gamma_{41}=2.0$	$n_o=2.37$	27	~ 10	$\bar{4}3m$
GaAs	$\gamma_{41}=1.6$	$n_o=3.34$	59	11.5	$\bar{4}3m$
ZnTe	$\gamma_{41}=3.9$	$n_o=2.79$	77	7.3	$\bar{4}3m$
CdTe	$\gamma_{41}=6.8$	$n_o=2.6$	120		$\bar{4}3m$
GaP	$\gamma_{41}=0.97$	$n_o=3.31$	$n_o^3\gamma_{41}=29$		$\bar{4}3m$
LiNbO ₃	$\gamma_{33}=30.8$ $\gamma_{13}=8.6$ $\gamma_{22}=3.4$ $\gamma_{42}=28$	$n_o=2.29$ $n_e=2.20$	$n_e^3\gamma_{33}=328$ $n_e^3\gamma_{22}=37$ $(n_e^3\gamma_{33}-n_e^3\gamma_{13})=112$	$\epsilon_{\parallel c}=50$ $\epsilon_{\perp c}=98$	3m
LiTaO ₃	$\gamma_{33}=30.3$ $\gamma_{13}=5.7$	$n_o=2.175$ $n_e=2.180$	$n_e^3\gamma_{33}=314$	$\epsilon_{\parallel c}=43$	3m
BaTiO ₃	$\gamma_{33}=23$ $\gamma_{13}=8.0$ $\gamma_{42}=820$	$n_o=2.437$ $n_e=2.365$	$n_e^3\gamma_{33}=334$	$\epsilon_{\parallel c}=106$ $\epsilon_{\perp c}=4300$	4mm

표 2-1에 OPC에 관련된 여러 electrooptic 물질의 특성을 비교하였다.

OPC는 서론에서 언급하였듯이 전자기파의 위상이나 파면이 발전되는 것을 의미하는데 수학적⁽²⁻⁹⁾으로 초기 전자기파의 전기장이

$$E_{\text{real}}(r, t) = |E(r)| \cos(\omega t - \phi(r)) = \frac{1}{2} [E(r)e^{-i\omega t} + E^*(r)e^{i\omega t}] \dots\dots\dots (1)$$

일때 위상공액파의 전기장은

$$E_{\text{conj}}(r, t) = |E(r)| \cos(\omega t + \phi(r)) = \frac{1}{2} [E^*(r)e^{-i\omega t} + E(r)e^{i\omega t}] \dots\dots\dots (2)$$

즉, OPC는 위상이 $\phi(r) = -\phi(r)$ 이거나 파면이 $E_{\text{conj}}(r) = E^*(r)$ 로 표현되므로 time-reversal 이라고도 한다. 현재 이를 이용하여 image enhancement, 왜의 보상, 이동물체의 식별과 추적, 광파이버에서의 공간성과 편광성의 보상, 새로운 레이저 resonators, convolution, correlation, 광컴퓨팅, 광메모리 등⁽²⁻²⁾을 연구하고 있다.

1. 광굴절율 효과의 이론적 배경

1) 광굴절율 효과 (photorefractive effect)⁽²⁻⁹⁾

BaTiO₃와 같은 electrooptic 결정에서의 OPC는 입사광이 통과하는 지역의 굴절율이 입사광 세기의 공간적인 변화에 따라 변화하는 광굴절율 효과에 의해 생긴다.

일반적으로 편광성은 전기장에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$P=P(E)=\chi(E)E=D-\epsilon_0E \quad \dots\dots\dots (3)$$

이때 electric displacement D 는 $\frac{n^2}{c^2\mu} E$ 이고, electric susceptibility $\chi(E)$ 는 다차 함수 $\chi(E)=\chi^{(1)}+\chi^{(2)}E+\chi^{(3)}E^2+\dots\dots$ 로 표현되므로서 전기장 내의 굴절을 n 은 $x-, y-, z-$ 축에 대해

$$\left(\frac{1}{n^2}\right)_1x^2+\left(\frac{1}{n^2}\right)_2y^2+\left(\frac{1}{n^2}\right)_3z^2+\left(\frac{1}{n^2}\right)_4yz+2\left(\frac{1}{n^2}\right)_5xz+2\left(\frac{1}{n^2}\right)_6xy=1 \quad \dots (4)$$

로 표현되며 결정의 center symmertry가 없을때 간단히 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^3 \gamma_{ij}E_j \quad \dots\dots\dots (5)$$

γ_{ij} 는 electrooptic 상수로서 BaTiO₃와 같이 point symmetry group이 4 mm인 경우

$$\gamma_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \gamma_{13} \\ 0 & 0 & \gamma_{23}=\gamma_{13} \\ 0 & 0 & \gamma_{33} \\ 0 & \gamma_{42} & 0 \\ \gamma_{51}=\gamma_{42} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (6)$$

이다.

공간전기장 E_{sc} 의 존재하에 Pokels 효과에 의해 유기된 배질의 굴절율 변화 Δn 는 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{eff} E_{sc} \quad \dots\dots\dots (7)$$

분극방향이 crystal optic axis와 α, β 각으로 입사하는 두빔의 경우 정상광선(ordinary polarized rays)과 이상광선(extraordinary polarized rays)에 대해 유효 Pokels 계수는 각각

$$\gamma_{\text{eff}}(\text{ordinary}) = \gamma_{13} \sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \dots\dots\dots (8)$$

$$\gamma_{\text{eff}}(\text{extra}) = \frac{1}{n_o n_e^3} \sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) [n_e^4 \gamma_{33} \sin\alpha \sin\beta + 2n_e^2 n_o^2 \gamma_{42} \cos^2\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) + n_o^4 \gamma_{13} \cos\alpha \cos\beta] \dots\dots\dots (9)$$

이 되며 n_o 와 n_e 는 정상광선과 이상광선의 굴절율이다.

그림 2-3 과 같이 결정내로 두빔이 입사될 때 광굴절율 효과는 band transport 모델⁽²⁻¹⁰⁾에 의하면 광굴절율 결정내에 존재하는 불순물이나 결정 결함에 의해 생긴 주거나 받개의 에너지 준위가 에너지 띠 간격 내에 형성되는데 두빔의 가간섭에 의해 공간적으로 주기적인 여기 광원에 의해 전자(또는 정공)는 전도대(또는 가전도대)로 이동하게 되고 전하밀도가 낮은 곳으로 이동하거나 전장에 의해 drift될 것이다. 이렇게 공간적으로 분리된 전하는 강한 공간 전기장을 형성하므로써 이 field 때문에 Pokels 효과가 나타나게 되고 volume적자로 알려진 매질의 굴절율 변화를 야기한다. 다시말해서 두개의 입사빔

$$E_1(r, t) = e_1 |E_1| e^{i(\omega_1 t - k_1 \cdot r)} + c. c. \dots\dots\dots (10-a)$$

$$E_2(r, t) = e_2 |E_2| e^{i(\omega_2 t - k_2 \cdot r)} + c. c. \dots\dots\dots (10-b)$$

이 입사하였을때 간섭에 의해 x - 축에 따른 빔 세기의 변화는

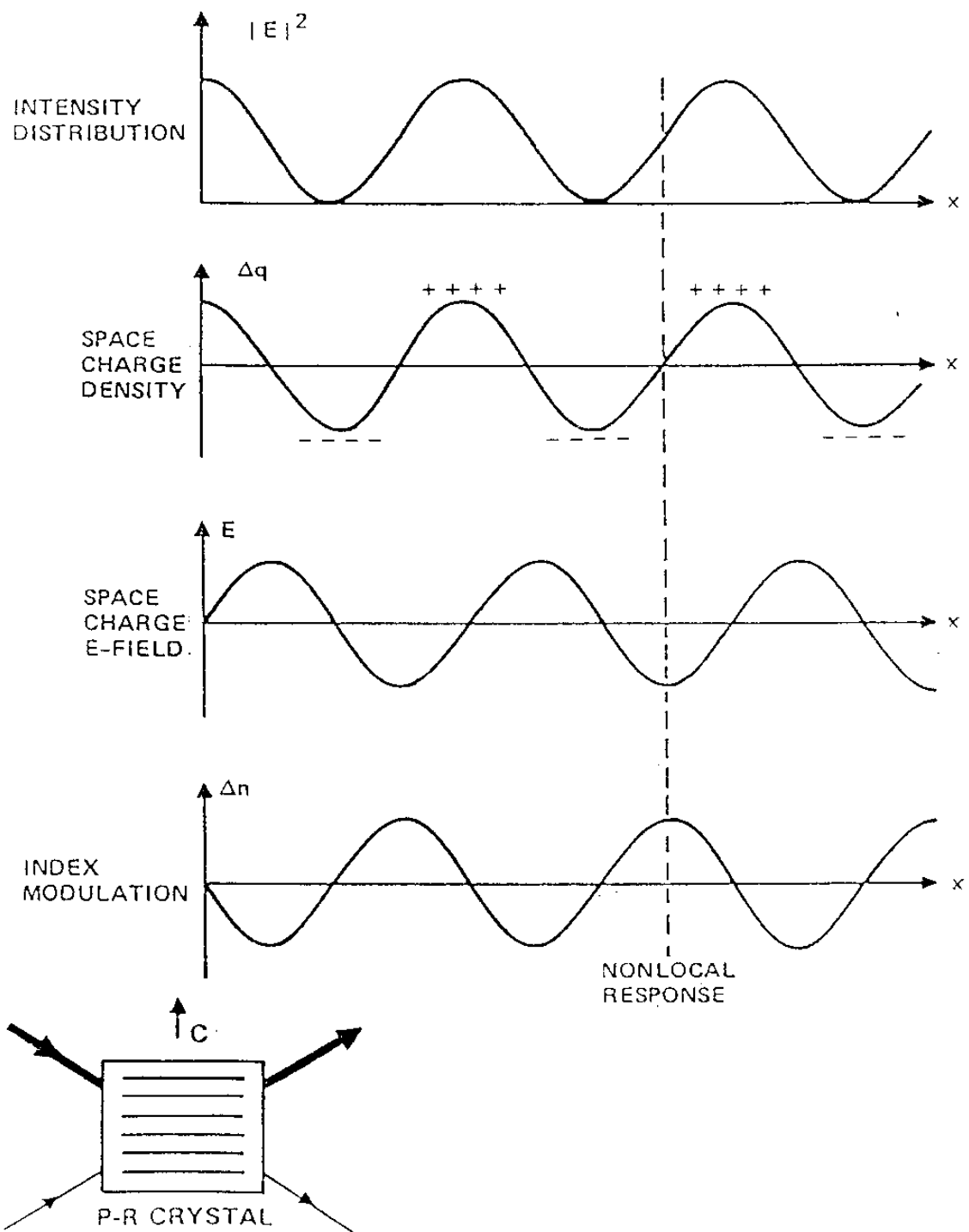


그림 2-3. 광간절음 효과

$$I(x) = I_0 + [I_1 \exp(i(\Omega t - Kx)) + c.c.] \dots\dots\dots (11)$$

이때 여기서 $K = |k_2 - k_1|$, $e_x = \frac{k_2 - k_1}{|k_2 - k_1|}$, $\Omega = \omega_2 - \omega_1$, $I_0 = |E_1|^2 + |E_2|^2$, $I_1 = e_1 \cdot e_2 |E_1 \cdot E_2^*|$ 이다.

이 주기적인 광의 세기 분포는 에너지 띠 간격 내의 불순물 준위에서 전하를 여기시켜준다. 이렇게 생긴 공간 전하는 입사광의 강도가 가장 약한 지역 (dark region)으로 이동하므로 공간전하의 분리가 일어난다. 따라서 세기의 변화간격의 반인 π/K 로 분리되어 전하에 의한 전기장이 형성되며 이것으로 인하여 광결을 격자가 있게 된다. 이 광결의 변화는 공간전하와 같이 파형을 이루게 되나 그 위상은 차이가 있다. 매질로의 입사광의 에너지 전담이 최대가 되는 경우 위상차는 90° 일때다. 1981년 Feinberg의 hopping 모델⁽²⁻¹¹⁾에 의하면 광결을 효과를 일으키려면 전하의 분리가 수 μm 이상이 되어야 하는데 일반적으로 diffusion에 의해 이동후 재결합을 하는 거리는 수백 Å를 넘지 못하고 있으며 재 여기되어 재결합하는 hopping를 겪으면서 수 μm 이동하므로 격자 형성 시간이 일반적인 반도체보다 느린 반응시간을 나타낸다. 이런 광여기, diffusion, drift, 재결합 과정을 광결을 효과를 설명하기 위하여 continuity 방정식과 Gauss의 법칙에 적용시키면 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial N_D^+(x, t)}{\partial t} = \left(\frac{\alpha_D}{h\nu}\right) I(x)(N_D - N_D^+) - \gamma_D n_e N_D^+ \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{\partial J_x}{\partial x} = -e \frac{\partial}{\partial t} (N_D^+ - n_e) \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} = \frac{e(N_D^+ - n_e - N_a)}{\epsilon} \dots\dots\dots (14)$$

여기서 주계발도 $N_D = N_D^0 + N_D^+$, τ_D 는 재결합 상수, N_a 는 발계발도, α_D 는 흡수계수이며 ϵ 는 유전율이다. neutral charge 방정식을 만족하는 2nd harmonic 해

$$E_x(x, t) = E_0 + [E_1^{sc} \exp(-iKx) + c. c.] \dots\dots\dots (15)$$

를 대입하여 보면 공간전기장 E_1^{sc} 는

$$E_1^{sc} = -i \frac{I_1}{I_0} \frac{E_N(E_0 + iE_D) [\exp(i\Omega t) - \exp(-t/\tau)]}{[E_0 - \Omega t_0(E_D + E_u)] + i(E_N + E_D + \Omega t_0 E_0)} \dots\dots\dots (16)$$

이며 $E_N = \frac{eN_a}{\epsilon K}$, $E_u = \frac{\tau_D N_a}{\mu K}$, E_0 는 외부전기장, $E_D = \frac{k_B T K}{e}$ 는

diffusion 전기장이고, $t_0 = \frac{N_a h \nu}{\alpha_D N_D I_0}$, $\tau = t_0 \frac{E_0 + i(E_D + E_u)}{E_0 + i(E_N + E_D)}$, μ 는

이동도이고, k_B 는 Boltzman 상수, T 는 격자의 온도이다. 다시 외부의 전기장이 없을때 ($E_0 = 0$)

$$E_1^{sc} \cong -i \frac{I_1}{I_0} \frac{1}{(1 + i\Omega\tau)} \frac{E_D}{(1 + E_D/E_N)} \dots\dots\dots (17)$$

그림 2-4는 격자간격에 따른 내부 전기장의 변화를 구한 것이다. 격자의 간격이 3 μm 이상이 되면 공간 전기장은 불순물의 농도에 관계없이 300 V/cm로 수렴하나 격자의 간격 0.75 μm 근처에서 나타나는 최고치는 농도가 증가함에 따라 격자간격이 작은 쪽으로 이동하며 증가한다.

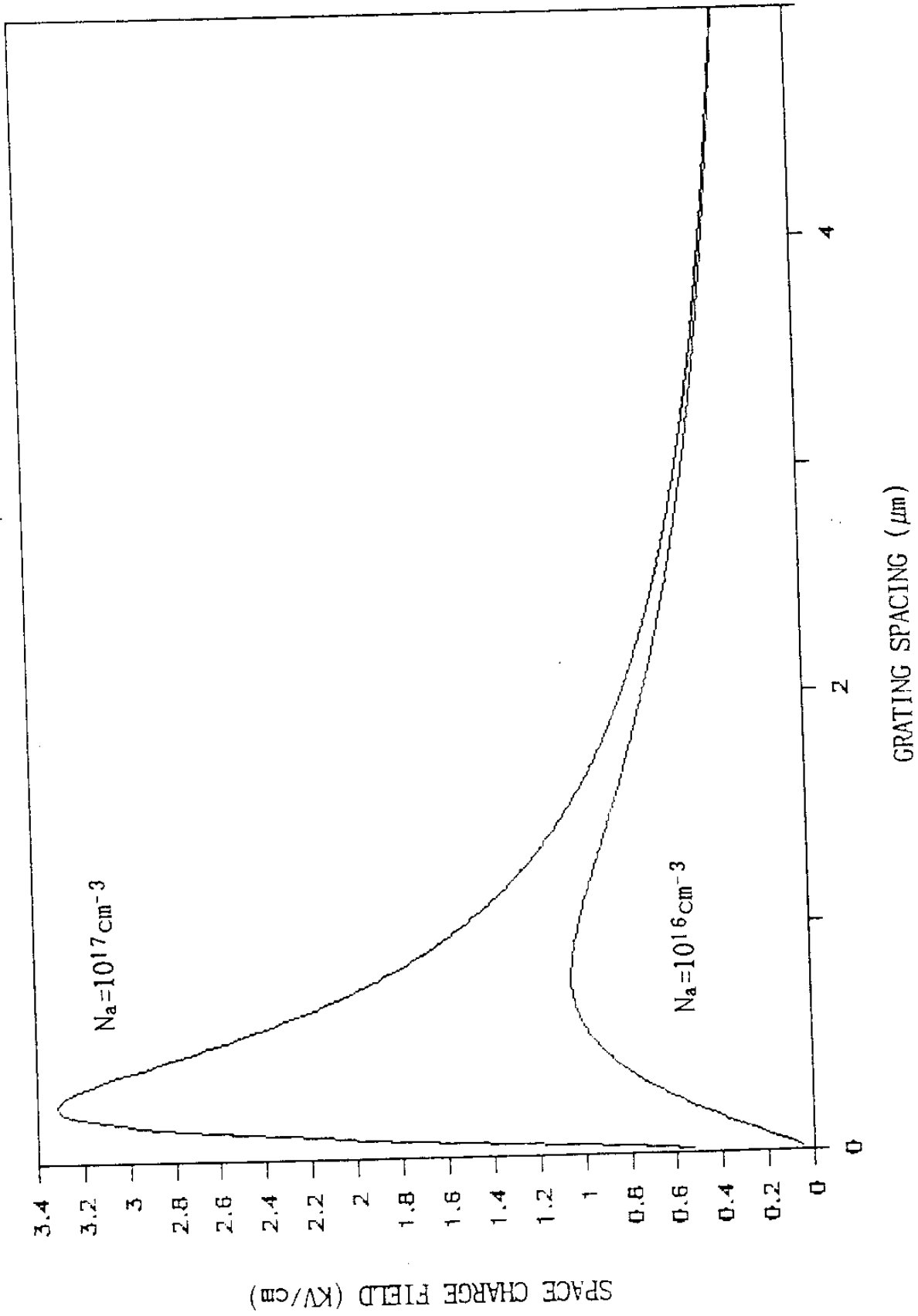
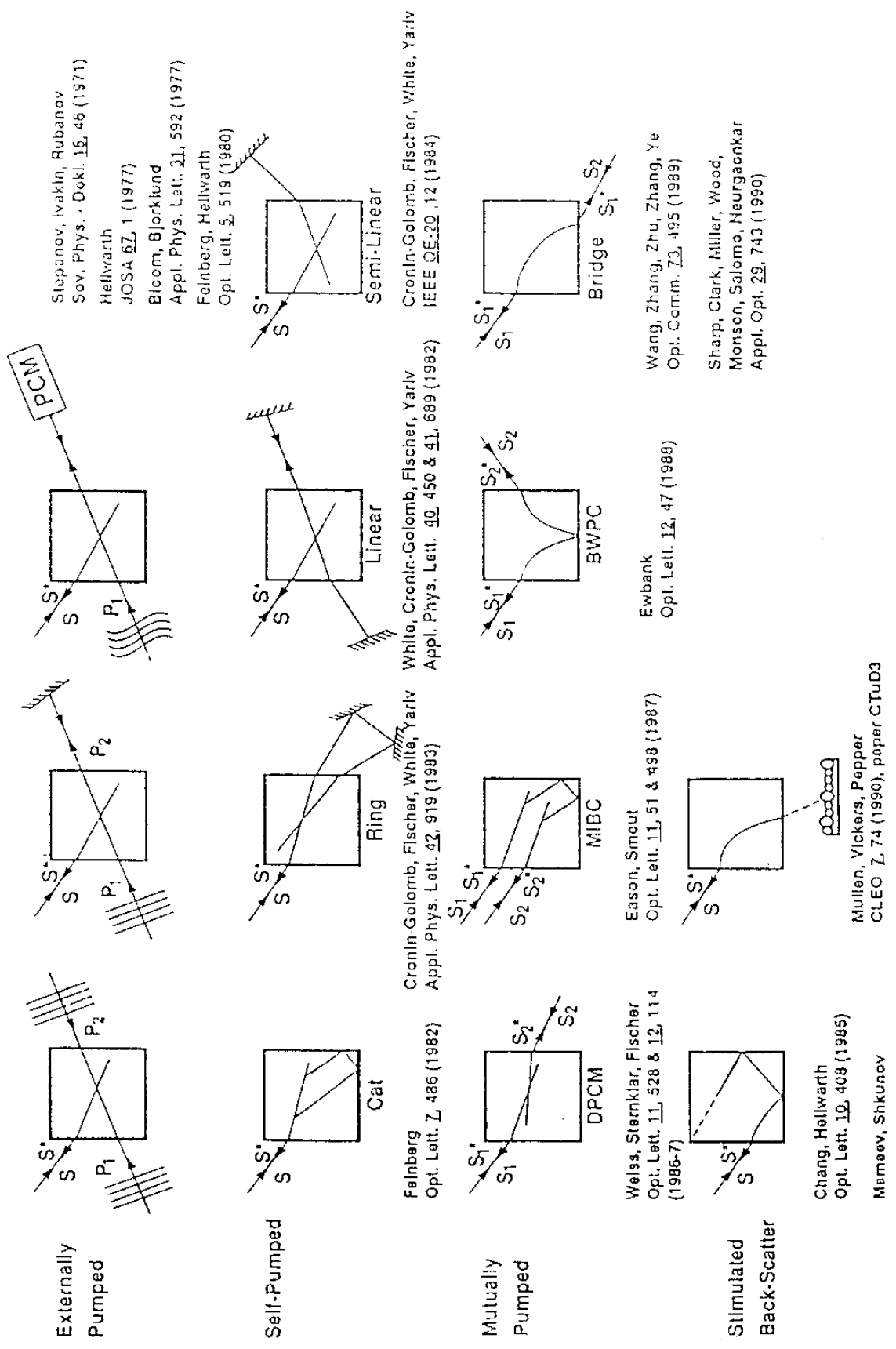


그림 2-4. 굴절률 격자에 따른 내부 전기장의 변화

2) 자기펌핑 위상공액 현상 (self-pumped optical phase conjugation)

광 굴절율 절정에 의한 OPC는 그림 2-5에서와 같이 다양한 방법으로 발진이 가능하나 펌핑하는 상호간에 간섭성을 갖는 두빔이 외부에서 주어지는 four-wave mixing에 근거를 두고 있다. 이때 signal 빔은 10^{-6} W/cm² 정도로 광의 세기가 작아도 가능하나 1978년 S.M. Jensen⁽²⁻¹²⁾에 의하면 광 파이버에 있어서 한개의 펌핑 빔에 의해서도 four-wave mixing이 가능함을 보였다. 이후 1982년 J. Feinberg⁽²⁻¹³⁾는 펌핑 빔을 내부의 반사에 의해 생성되게 하여 OPC를 발진시키는 방법을 고안하였다. 흔히 cat mirror라고 명칭하는 SPPC(self-pumped optical phase conjugation)은 외부의 펌핑 빔이 필요없으므로 간단하고 외부의 진동에 강하며 거의 완전한 align이 가능하다. 또한 낮은 광의 세기 (1W/cm² 이하)에서도 30 ~ 50 %의 반사율이 가능하나 격자 형성시간이 길고 감도가 낮으며 광의 세기를 조절하기가 어려운 단점을 갖고 있다.

SPPC가 이루어지는 현상을 설명하는 이론은 2-k 격자에 의한 back scattering^(2-14,15), two coupled interaction regions⁽²⁻¹⁶⁾, enhanced coupling via frequency shifted waves⁽²⁻¹⁷⁾, time dependent four-wave mixing⁽²⁻¹⁸⁾, photo-voltaic contributions⁽²⁻¹⁹⁾, resonator model⁽²⁻²⁰⁾ 등이 있으나 현재 1983년 J. Feinberg가 제안한 two coupled interaction regions 모델이 가장 잘 설명할 수 있는 것으로 알려져



Stepanov, Ivakin, Rubanov
Sov. Phys. Dokl. **16**, 46 (1971)

Hellwarth
JOSA **67**, 1 (1977)

Bicom, Bjorklund
Appl. Phys. Lett. **31**, 592 (1977)

Feinberg, Hellwarth
Opt. Lett. **5**, 519 (1980)

Cronin-Golomb, Fischer, White, Yariv
IEEE QE-20, 12 (1984)

White, Cronin-Golomb, Fischer, Yariv
Appl. Phys. Lett. **40**, 450 & **41**, 689 (1982)

Cronin-Golomb, Fischer, White, Yariv
Appl. Phys. Lett. **42**, 919 (1983)

Feinberg
Opt. Lett. **7**, 486 (1982)

Wang, Zhang, Zhu, Zhang, Ye
Opt. Commun. **73**, 495 (1989)

Ewbank
Opt. Lett. **13**, 47 (1988)

Eason, Smout
Opt. Lett. **11**, 51 & **12**, 498 (1987)

Weiss, Sternklar, Fischer
Opt. Lett. **11**, 528 & **12**, 114 (1986-7)

Sharp, Clark, Miller, Wood, Monson, Salomo, Neurgaonkar
Appl. Opt. **29**, 743 (1990)

Chang, Hellwarth
Opt. Lett. **10**, 408 (1985)

Mullen, Vickers, Pepper
CLEO **74** (1990), paper CTuD3

Mamaev, Shkunov

그림 2-5. 광결절을 결정을 이용한 위상공액파 발생의 여러 예

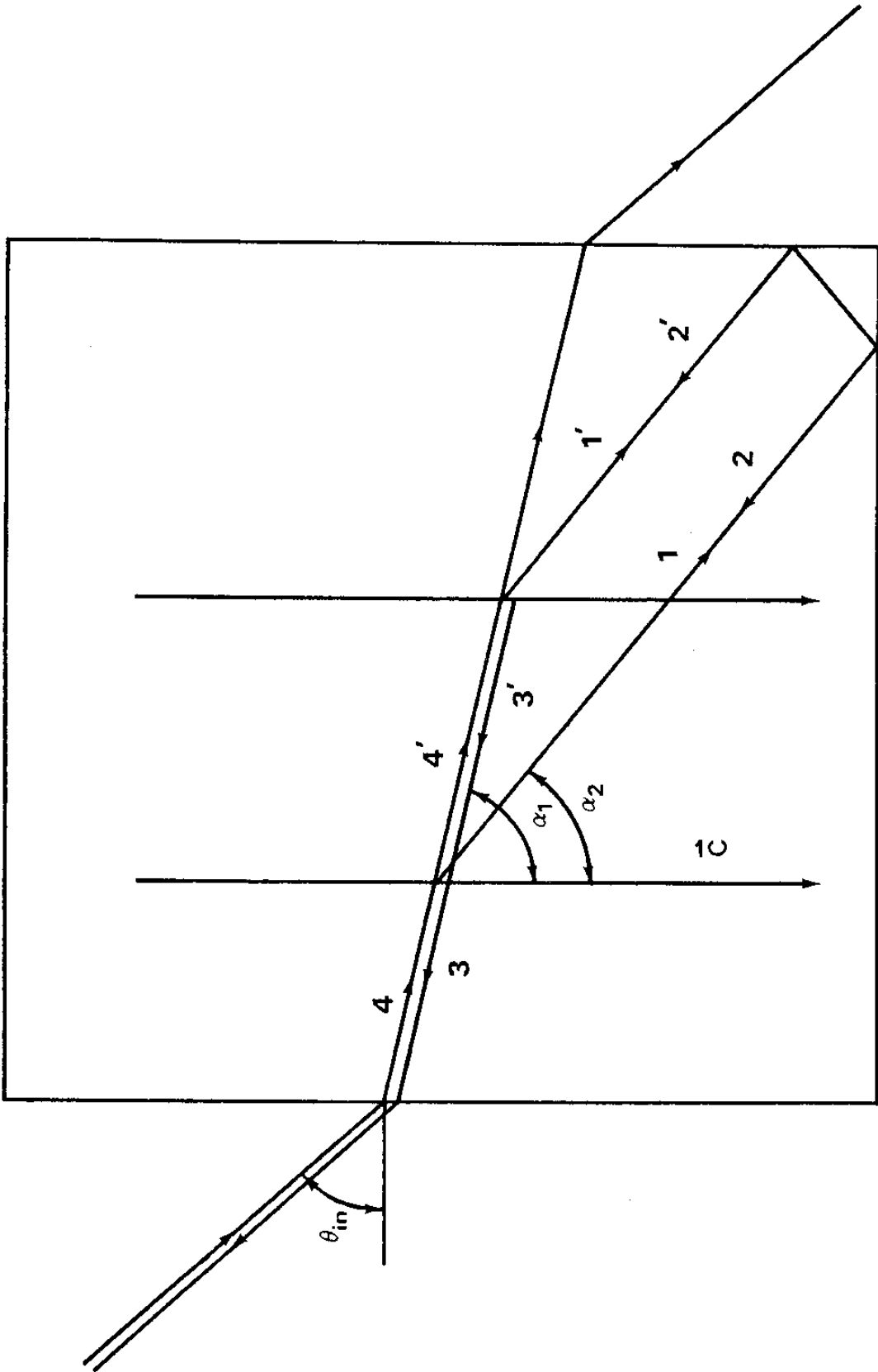


그림 2-6. 두 지역의 four-wave mixing을 고려한 Two coupled interaction region 모델

있다. 그림 2-6은 BaTiO₃ 결정 내로 빔이 진행하여 OPC를 받긴 하는 현상을 도식화한 것이다. 하단 모서리로 fanning된 빔이 내부 반사로 펌핑 빔으로 작용하여 two coupled interaction region들을 형성하고 있으므로 four-wave mixing을 함으로서 위상공액 파가 발진하고 있다. 두빔이 결합할때 정상상태의 단위 길이당 결합상수는

$$\gamma = \frac{\omega}{2nc} \frac{\gamma_{\text{eff}} E^{\text{sc}}}{\cos((\alpha_1 - \alpha_2)/2)} \dots\dots\dots (18)$$

이며, 여기서 n 은 굴절율, ω 는 광원의 각진동수이다. 그림 2-7-(a)와 (b)는 He-Ne 레이저의 파장인 $0.6328 \mu\text{m}$ 에서의 공기중에서 BaTiO₃ 내로 입사시 식(18)에 의해 결합 상수를 구한 결과이다. 불순물의 농도가 10^{17}cm^{-3} 일때 더 높은 결합상수를 나타내며 입사각이 증가함에 따라 증가하나 fanning각이 클경우에 최고치를 갖는데 결과적으로 입사각을 크게 하고 fanning각이 60° 근처로 하는 것이 최고의 결합상수를 갖게 될 것이다. 그림 2-8은 빔의 직경이 1mm일때 입사각에 따른 결합길이를 구한 것이다. 입사각이 증가함에 따라 결합길이는 증가하지만 fanning각이 클수록 급격히 증가한다. 결합길이와 결합상수를 곱한 결합강도는 그림 2-9-(a)와 (b)에서 보는 것과 같이 입사각과 fanning각이 증가함에 따라 급격히 증가한다. 하지만 그림 2-10에서 보는 것과 같이 굴절율 각자의 간격은 위의 결과와는 반대로 입사각과 fanning각이 증가함에 따라 급격히 증가함으로서 광감도에 역으로 작용하고 있다. 또한 입사면의 반사율을 고려할때 Brewster 각

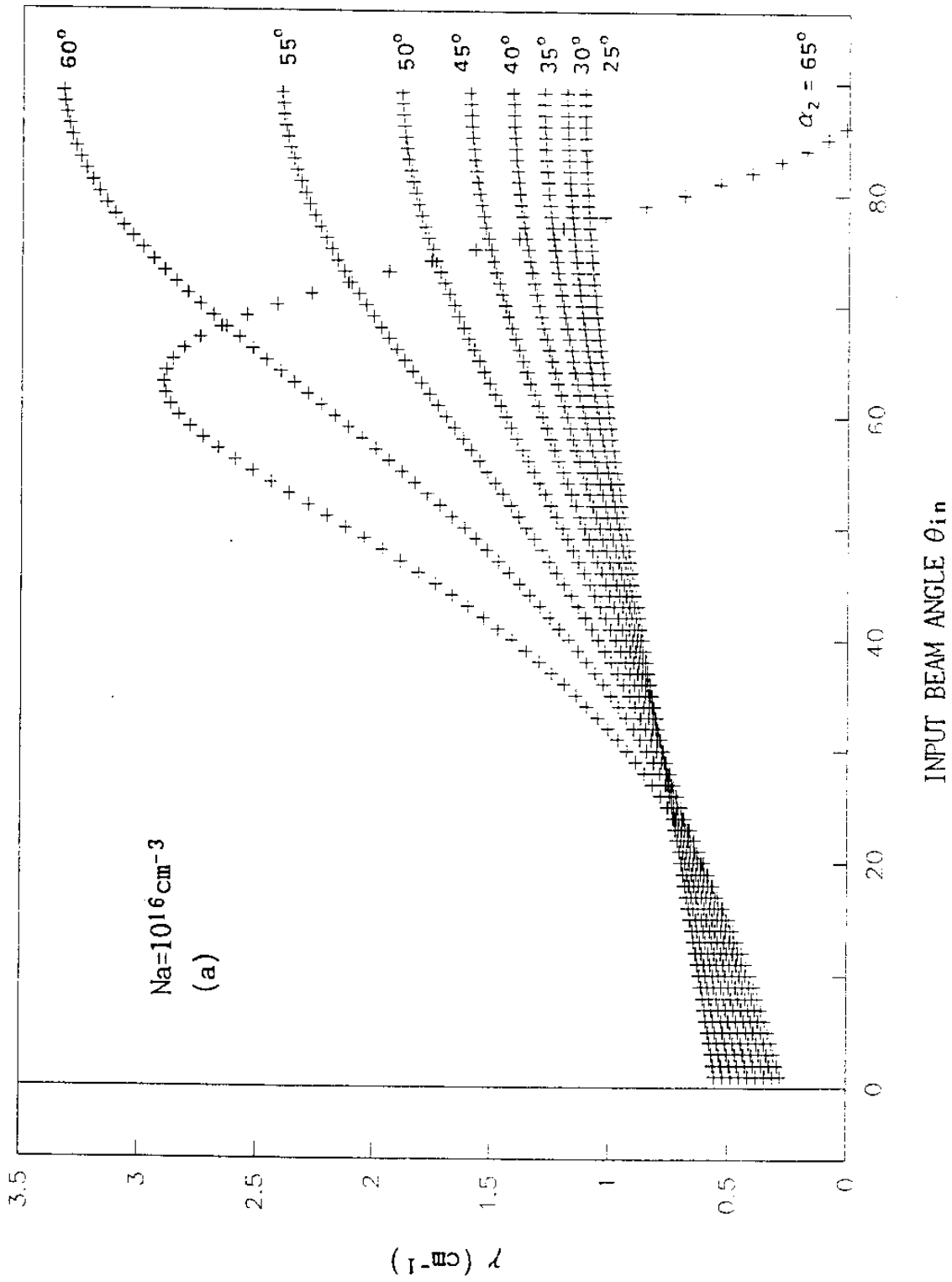


그림 2-7(a). 파장이 $0.6328 \mu\text{m}$ 일때 fanning 각에 따른 일사각과 결합상수 r 와의 관계

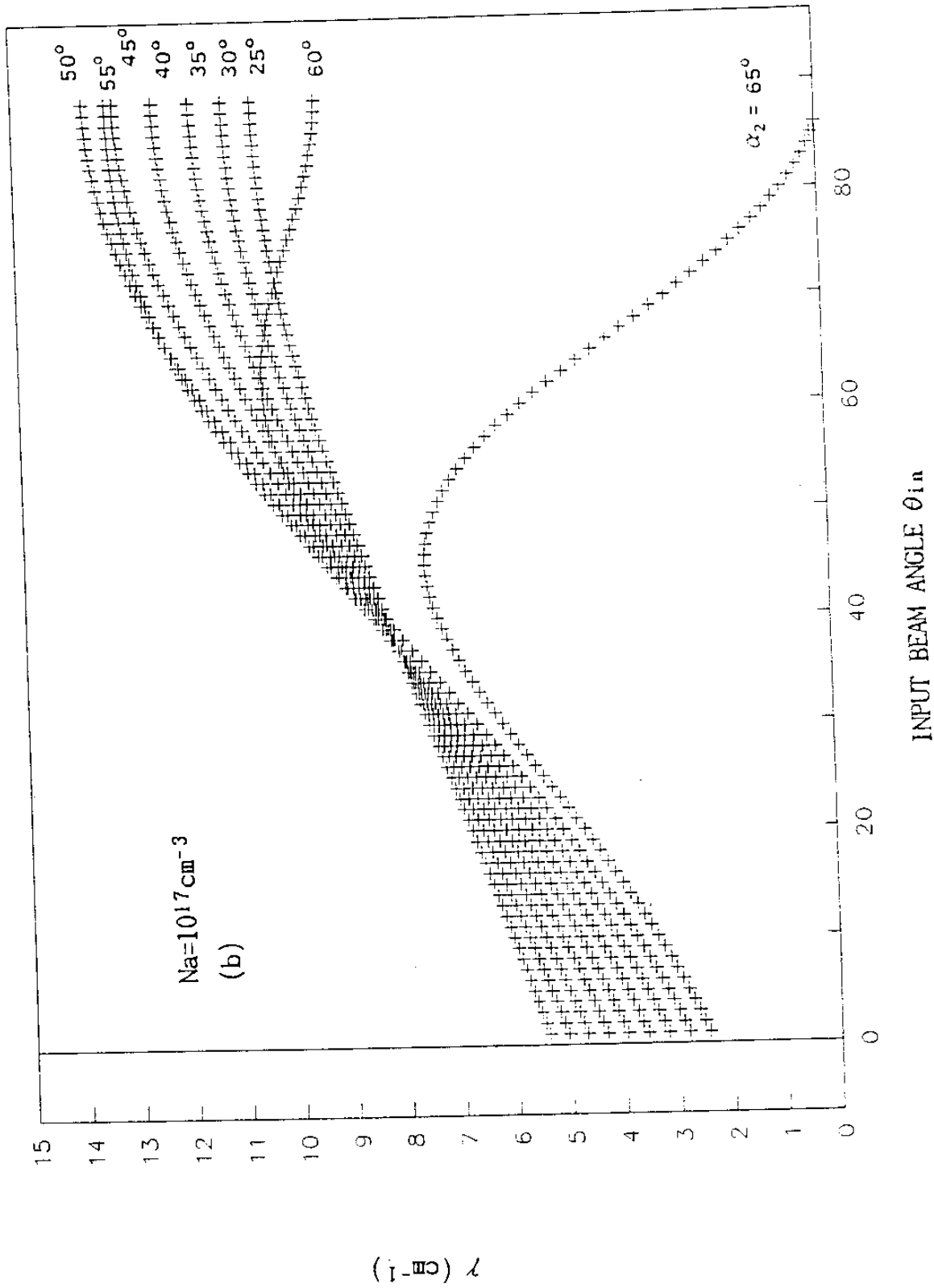


그림 2-7(b). 파장이 0.6328 μm 일때 fanning 각에 따른 입사각과
 질화상수 γ 와의 관계

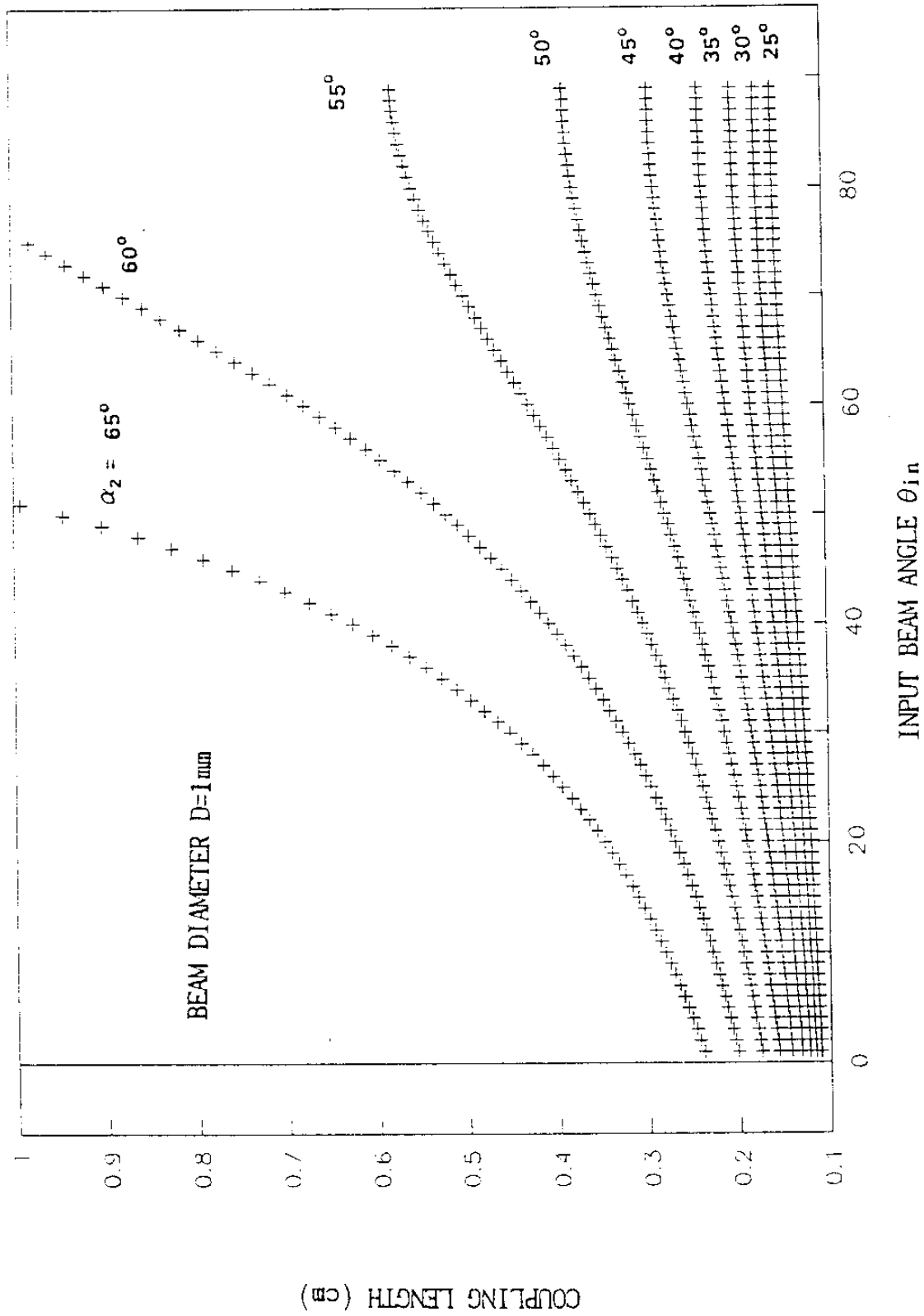


그림 2-8. 파장이 $0.6328\ \mu\text{m}$ 일때 fanning각에 따른 입사각과 결합길이

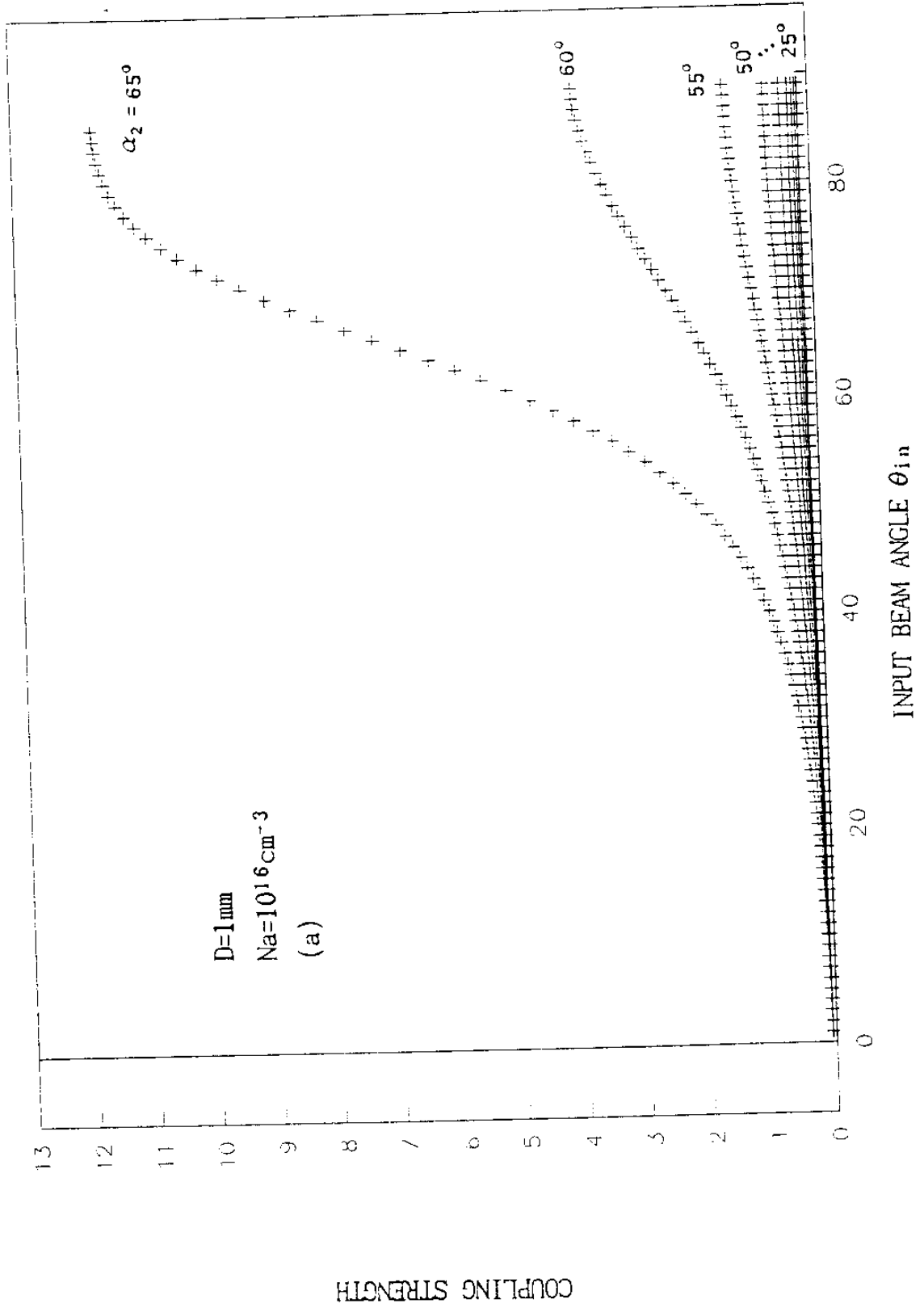


그림 2-9(a). 파장이 $0.6328\mu\text{m}$ 일때 fanning 각에 따른 입사각과 결합강도

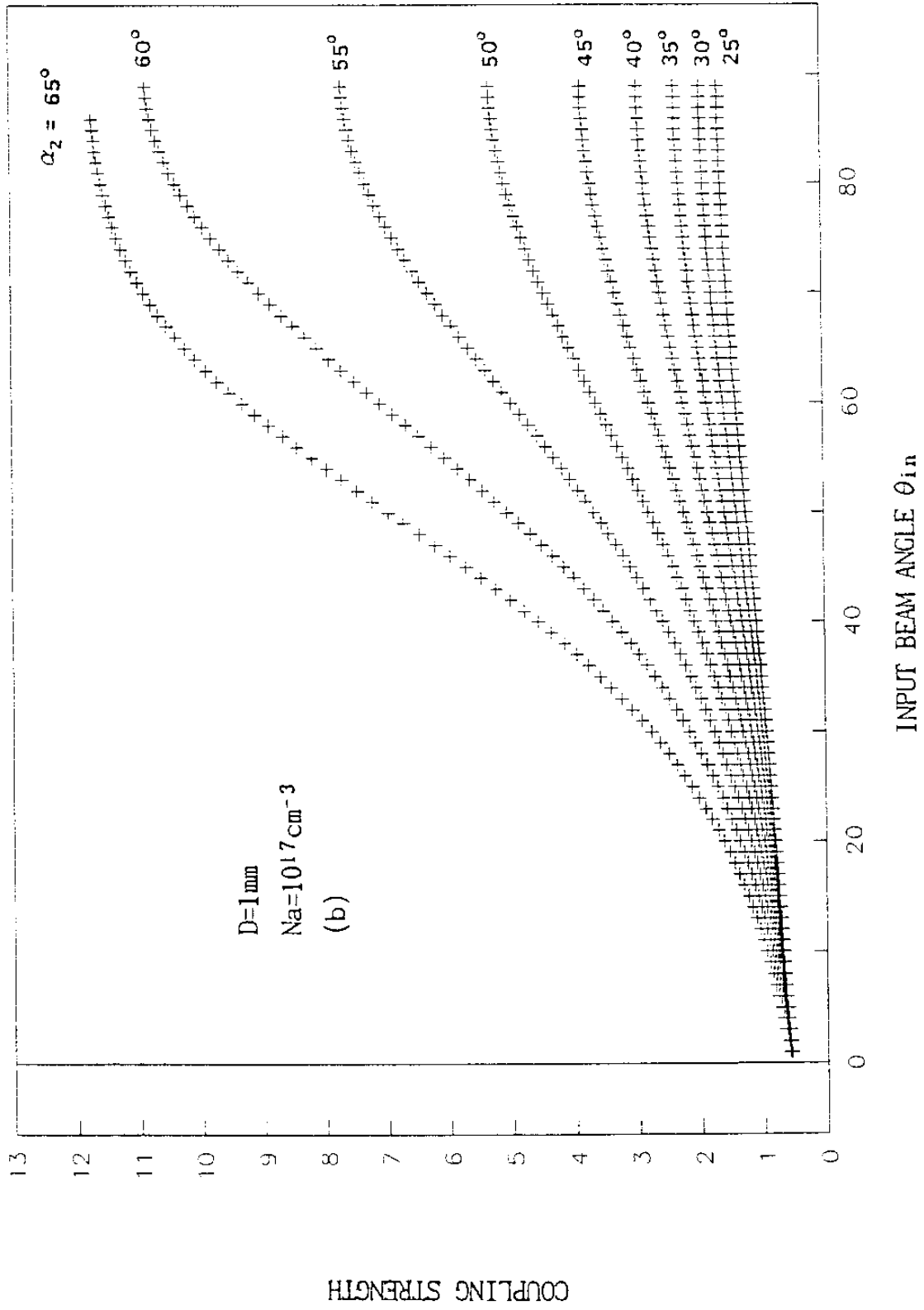


그림 2-9(b). 파장이 $0.6328\ \mu\text{m}$ 일때 fanning 각에 따른 입사각과 결합강도

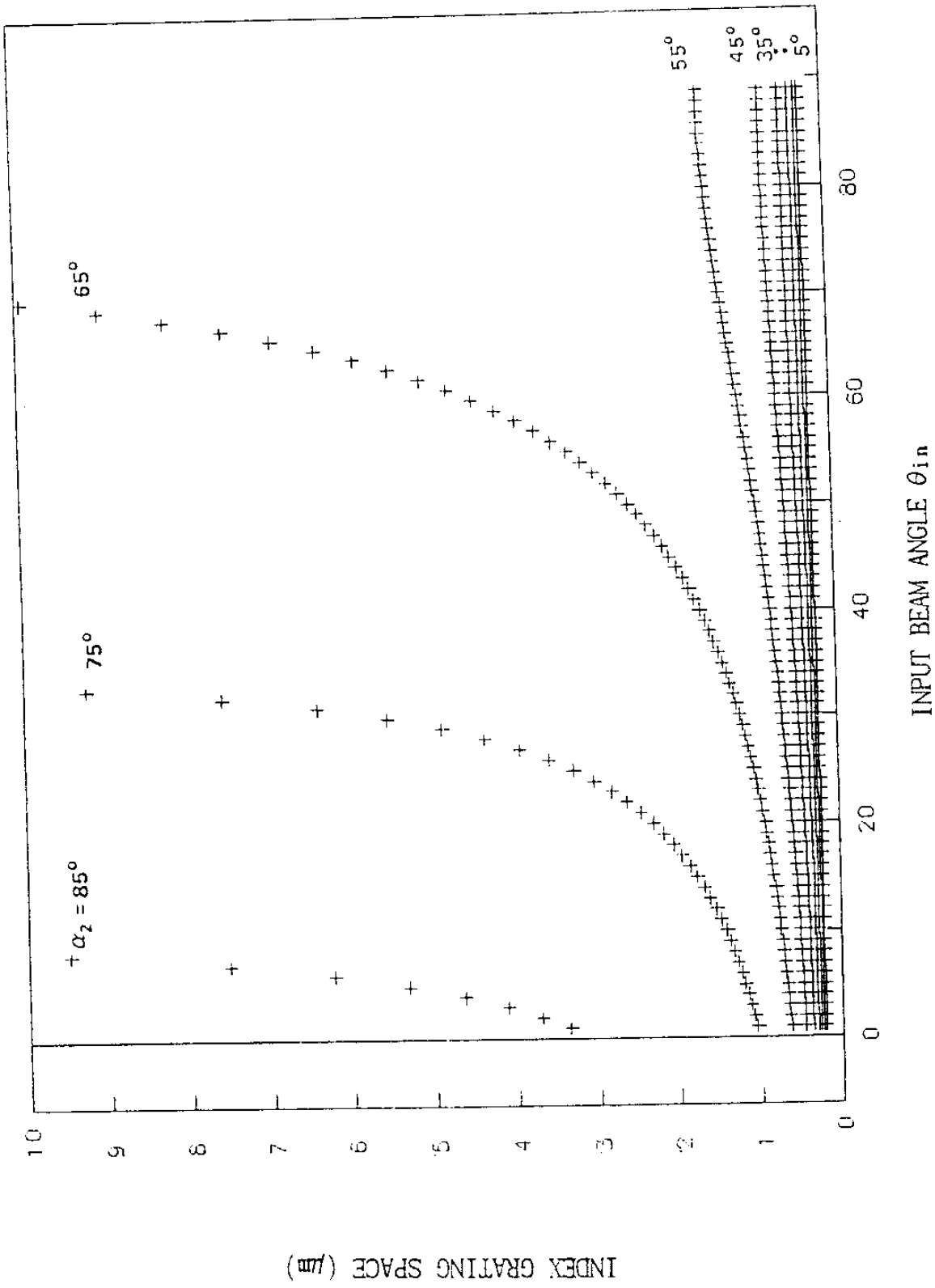


그림 2-10. 파장이 $0.6328 \mu\text{m}$ 일때 fanning 각에 따른 입사각과 굴절율
격자의 간격

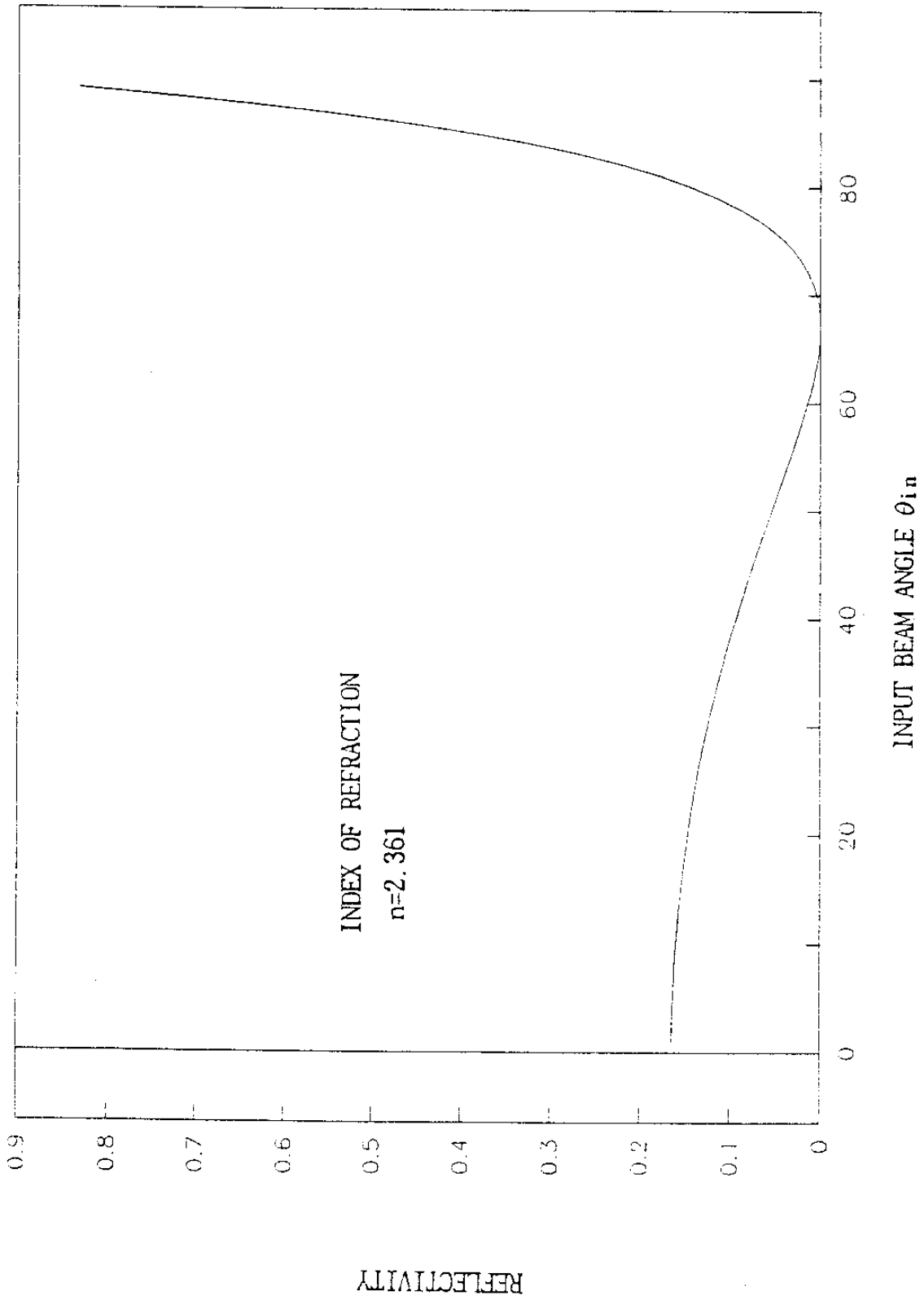


그림 2-11. 파장이 0.6328 μm 일때 입사각과 결정표면의 반사율

67°을 지나 반사율이 급격히 증가하므로서 OPC를 발전시키는 입력 광원의 양을 급격히 줄인다(그림 2-11).

2. 자기편광 위상공액 실험

BaTiO₃ 결정에 조사된 레이저 빔의 결정내 진파특성과 상호작용에 의해 생기는 모든 현상들을 관찰하기 위해 그림 2-12와 같은 실험장치를 사용하였다. 빔 분할기를 거쳐 결정내로 입사한 빔을 비디오 카메라(Sonny CCD-V89)나 카메라(Nikon Nikomat)로 관찰하였고 발전된 위상공액파는 다시 빔 분할기를 거쳐 포토다이오드(Newport 818-SL)에 의해 검출되어 펄스 기록계(Yokogawa LR-4210)에 기록되었다. 광원으로는 빔의 직경 0.8 mm, 빔 발산이 1.1 mrad인 10 mW He-Ne 레이저(Hughes 3227H-PC)를 사용하였으며 광굴절을 결정으로는 top-seed solution growth(TSSG)법에 의해 성장된 6.5 × 6.5 × 3 mm³ 크기의 BaTiO₃(Sanders Associates)를 사용하여 입사면 6.5 × 3 mm²으로 입사광의 편광이 이상편광이 되게 편광과 c-축을 평행하게 두었다. 실험상의 변수로는 입사빔의 위치를 입사면의 하단을 기준으로 하였으며 시계 방향을 입사각의 크기 방향으로 하였다. BaTiO₃의 온도에 대한 민감성때문에 실험실은 20 °C 이상을 유지하였으며 결정 표면에 붙은 이물질의 제거는 50 °C로 가열한 알코올에 세척하였다.

3. 실험결과

그림 2-13은 그림 2-12의 실험장치에서 렌즈 L를 촛점거리가

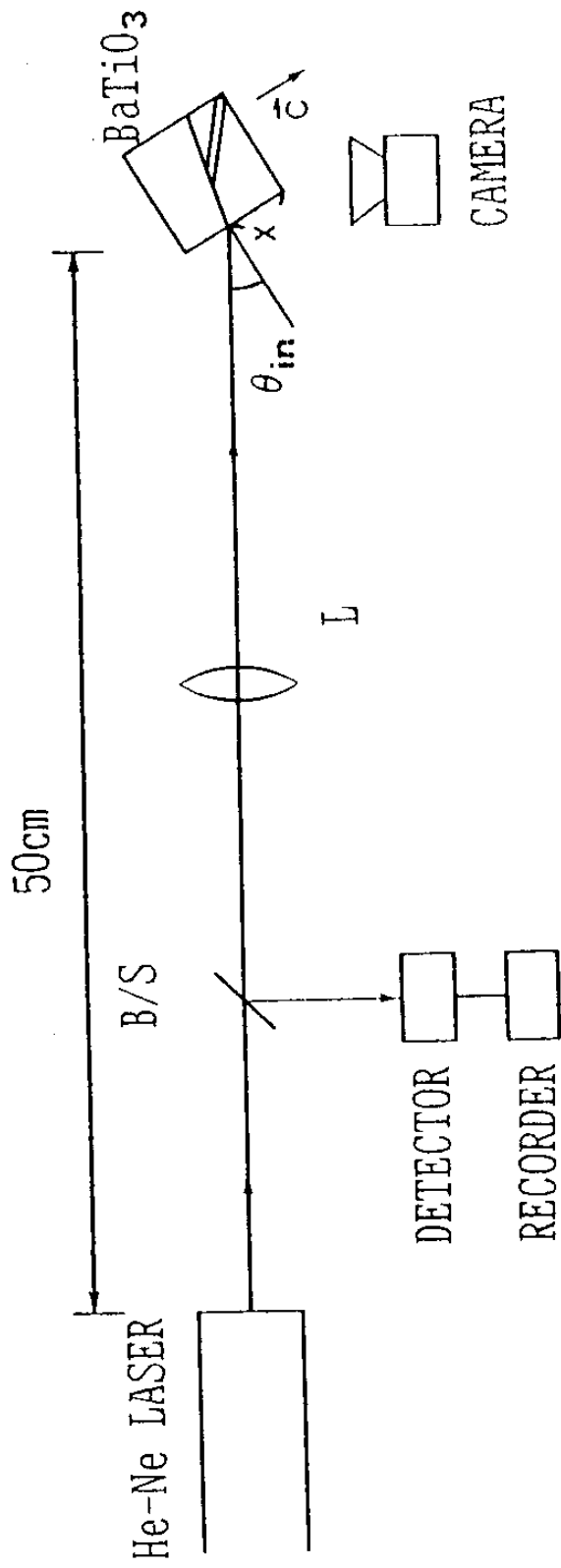


그림 2-12. 자기 펄핑 위상공해 실험의 구성

250 mm 인 렌즈로 하여 렌즈와 결정과의 거리를 300 mm 가 되게 한 후 입사면의 중앙에 70° 의 입사각으로 입사시켰을 때 위상공액파가 발생하는 것을 시간에 대해 기록한 것이다. 입사 수초후에 위상공액파가 발생되어 약 50 %의 반사율을 나타내고 있다. 그림 2-14 는 이런 반사율이 나타나는 동안의 결정내 빔의 전과모습을 각 시간별로 찍은 사진이다. OPC가 발생하는 과정에 대한 최근 전해에 의하면 처음 레이저 빔이 결정 내로 입사하였을 때 결정 내의 구조적 결함에 의해 산란되면서 비롯 이 산란 빔이 초기의 빔에 비해 매우 약하지만 초기 빔과 만나므로써 간섭성을 갖게 되고 그 결과 아주 약한 격자를 형성한다. 이 격자로 인하여 비대칭적 에너지의 전달인 two-beam coupling이 일어나므로써 산란 빔은 좀 더 강한 세기로 변화하여 더 격자를 형성한다. 이런 과정을 반복적으로 지속하므로써 초기 빔은 고갈상태에 이르게 되며 결정 내에는 모서리의 전반사에 의한 빔의 경로를 형성하게 되며 두 지역에서의 four-wave mixing으로 인하여 결국 위상공액파는 발생한다. 그림 2-14에서의 각 시간별 사진을 보면 초기의 입사빔이 입사면과 동시에 양 모서리를 연결하는 빔의 경로를 형성하고 중앙에 형성된 빔은 다시 가장자리로 퍼져 10여초가 경과했을때는 하단 모서리의 중앙에서 빔이 형성되므로써 그림 2-13에서의 급격한 위상공액 반사율이 발생되며 점점 시간이 경과함에 따라 모서리의 중앙빔은 강하게 증가하여 초기 빔의 고갈로 안정상태에 이르게 된다. 그림 2-15는 렌즈 L를 제거하여 입사각을 30° 로 하고 결정의 입사면의 하단을 기준으로 입사위치 X를 변화시

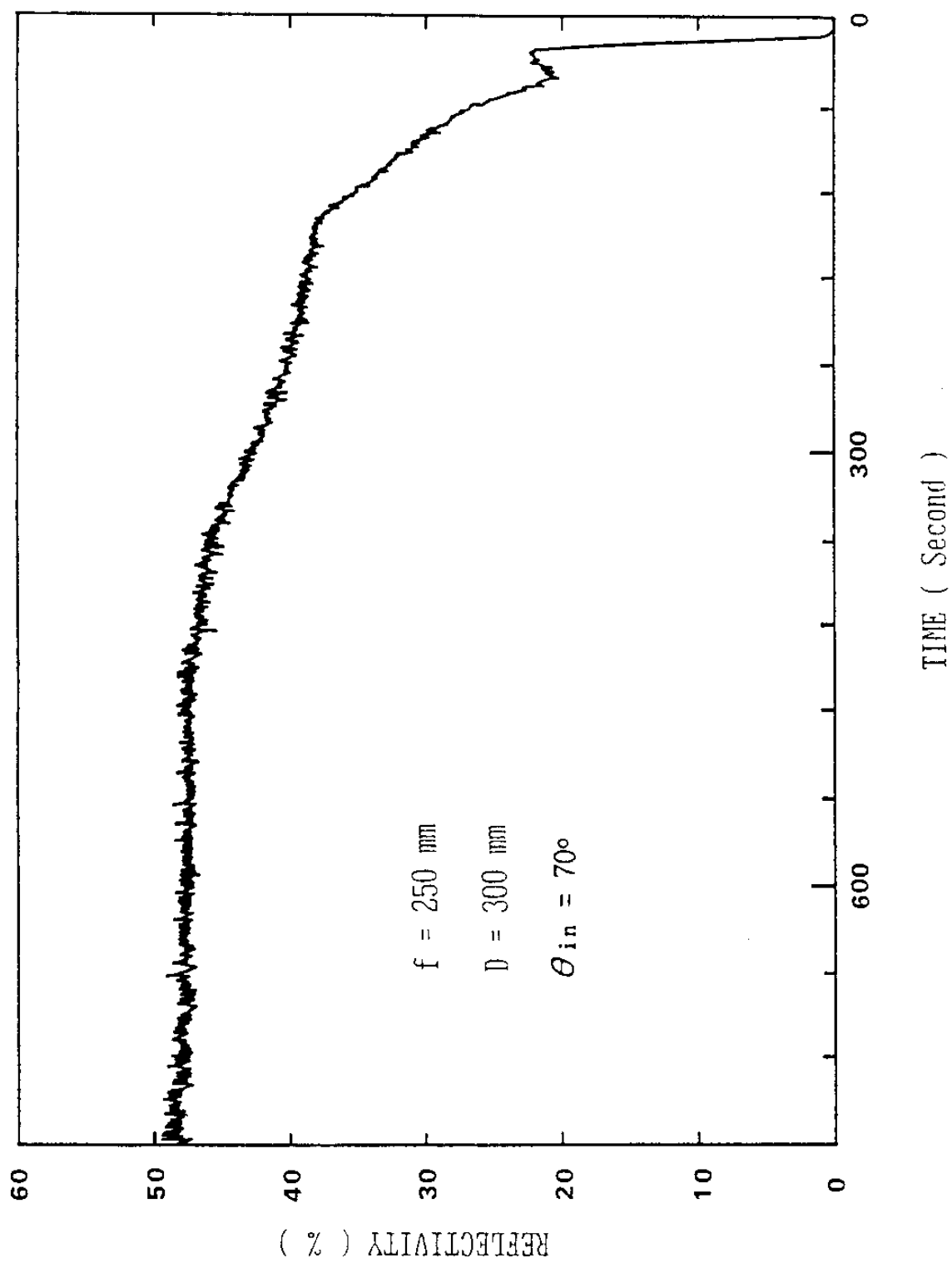
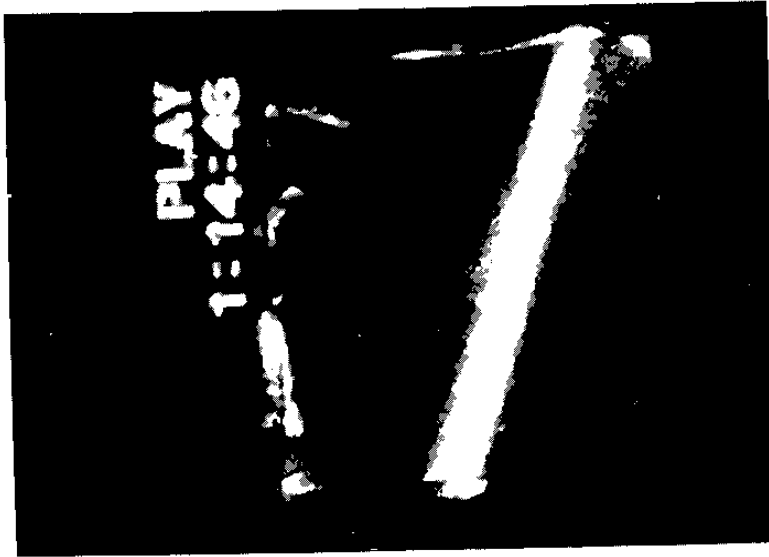


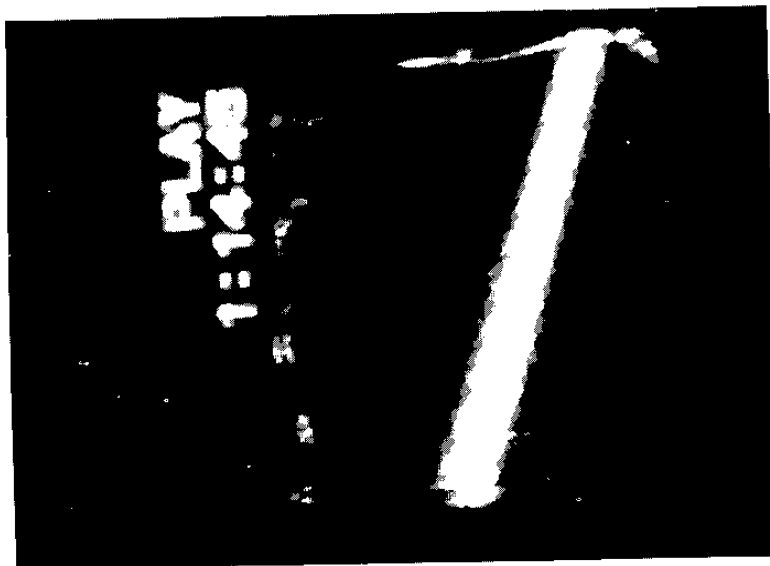
그림 2-13. 시간에 따른 위상공해 반사율



(c)

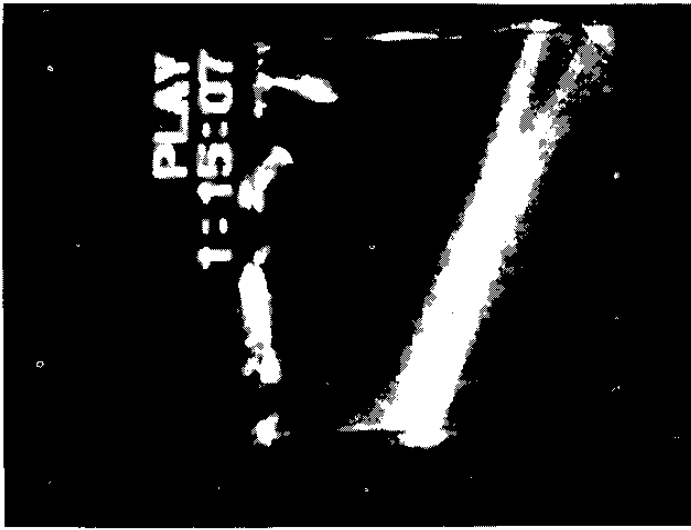


(b)



(a)

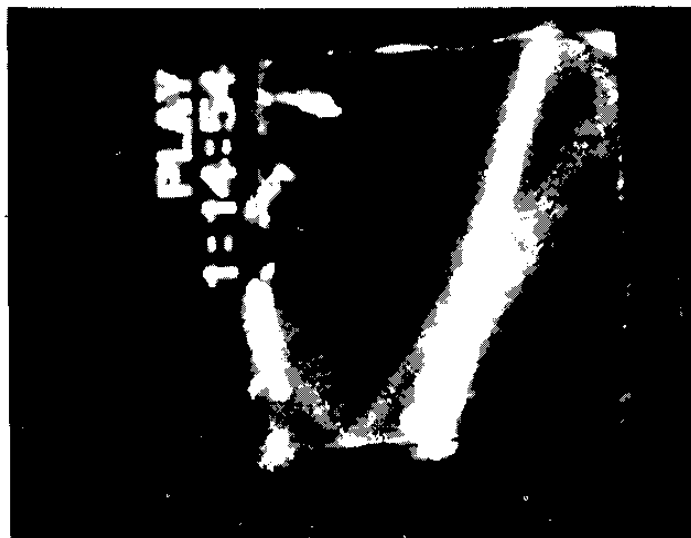
그림 2-14. 각 시간대별 자기평평 위상공액파 발진을 위한 결정내의
빔 경로 입사후 (a) 0초 (b) 1초 (c) 3초시



(f)



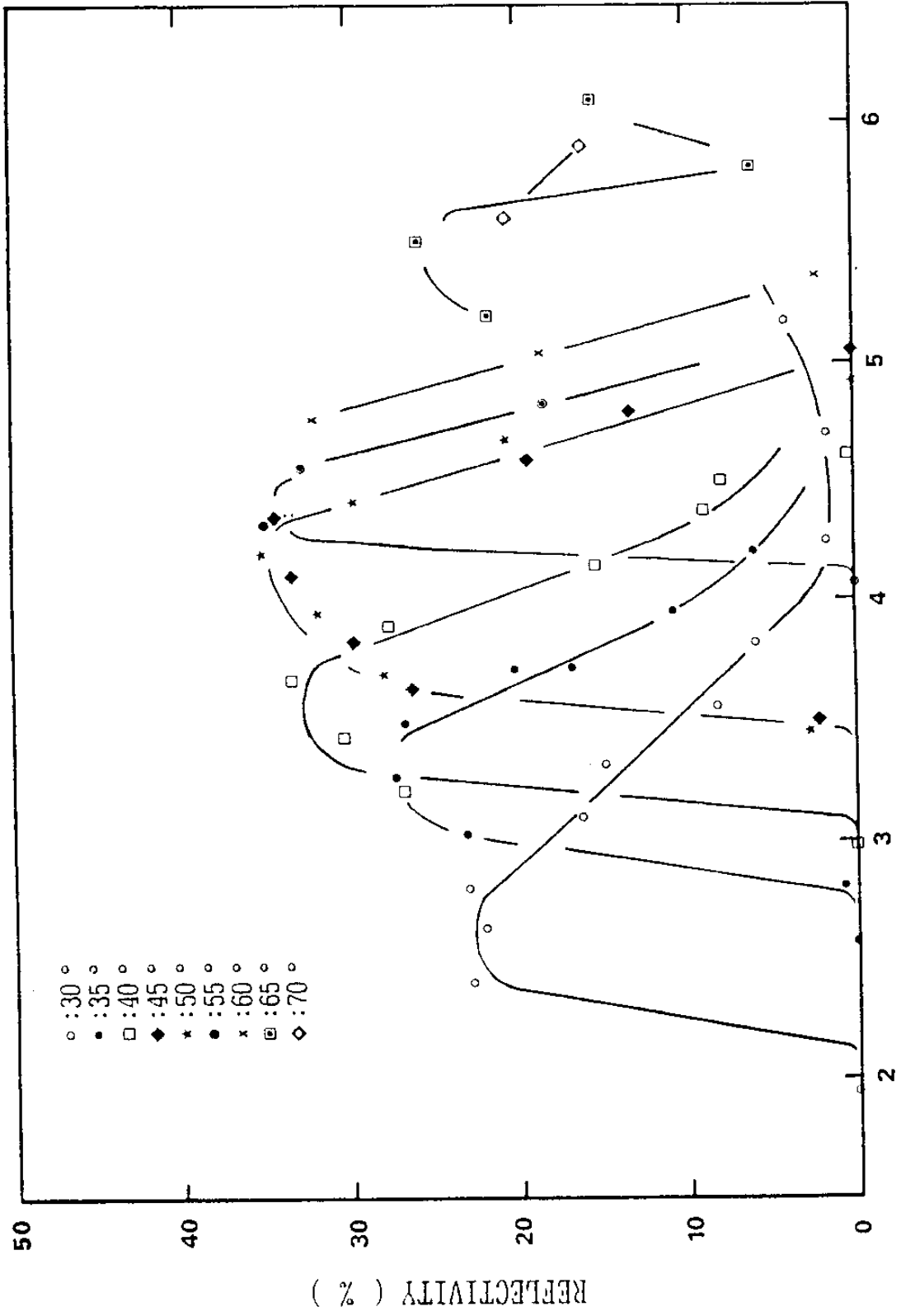
(e)



(d)

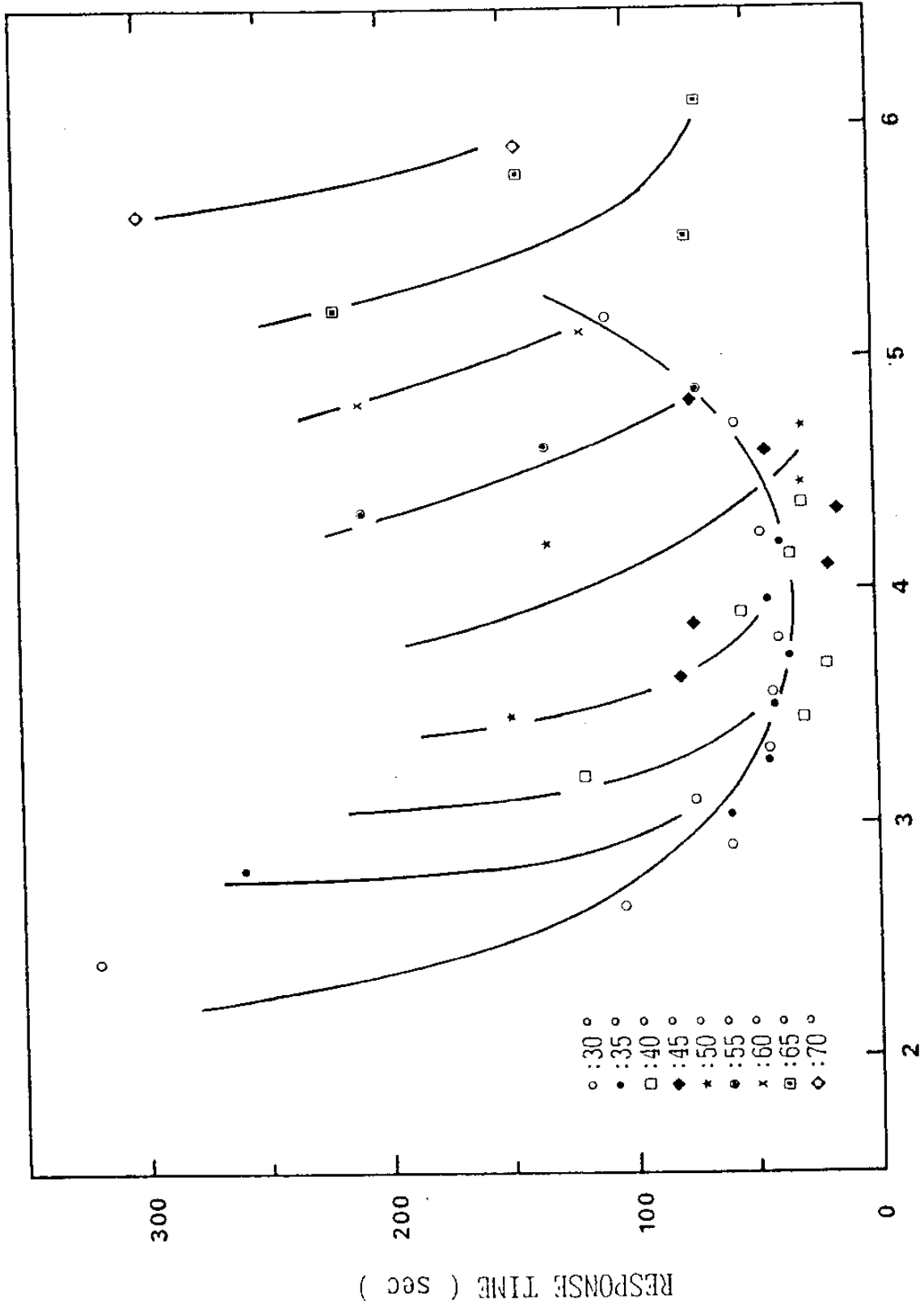
그림 2-14. 각 시간대별 자기워킹 위상공액파 발진을 위한 결정내의
빔 경로 입사후 (d) 9초 (e) 17초 (f) 19초시

컸을때 시간에 따른 위상공액 반사율을 기록한 것이다. 입사위치 X
 가 중앙이하에서는 대체로 반사율은 친친히 증가하면서 안정된 상
 태에 도달한다. 입사면의 하단에서 가까울때 위상공액파는 발생하지
 않다가 가리가 벌어질수록 더 짧은 시간과 더 높은 반사율을 나
 타냈다. 최대 반사율을 지나 입사위치가 상단에 가까울수록 불안정
 한 상태를 겪고 난후 입사면의 중앙을 지나서는 비정상적인 상태
 인 감쇠 진동을 하게 된다. 이때 fanning각은 하단 65° 에서
 상단 25° 로 변화하였다. 그림 2-16은 위의 조건하에서 입사각을 변
 화시키면서 얻은 결과이다. 입사각이 증가함에 따라 위상공액 반사
 율의 최고점은 입사면의 상단으로 이동하였으며 입사면이 50° 정
 도에서 최고 반사율을 나타내었다. 앞에서도 언급이 되었듯이 입사
 면 상단 부분으로 입사하는 빔의 위상공액 반사는 펄스화 되는 요
 동이 있었다. 입사각이 크면 대체로 상단 끝부분을 제외하고 안정
 된 반사율을 나타냈다. 빔의 수렴이나 발산 조건이 위상공액파 발
 생에 미치는 정도를 알기위해 초점거리가 250 mm인 렌즈 L과
 결정과의 거리 D를 변화시켜 보았다. 그림 2-17에서 보는 것과 같
 이 빔이 수렴하면 단위 광 강도가 더 커져서 더 높은 반사율을
 나타낼것이나 빔의 크기변화가 더 위상공액파 발생에 영향을 미침
 을 알 수 있다. 따라서 수렴하는 빔보다 발산하는 빔이 더 높은
 반사율과 더 빠른 반응을 얻을 수 있다. 빔의 크기가 매우 작을
 때는 위상공액파가 발생하지 않는데 이것에 대한 견해⁽²⁻²²⁾는 여러
 가지가 있으나 빔의 크기가 작으면 결합강도가 작을 것이고 따라
 서 위상공액파의 발생도 아주 작을 것이다. 예를 들어 $100\ \mu\text{m}$ 의



ENTRANCE POSITION X (mm)

그림 2-16. 입사각별로 입사위치에 따른 반사율



ENTRANCE POSITION X (mm)

그림 2-16. 입사각별로 입사위치에 따른 반응시간

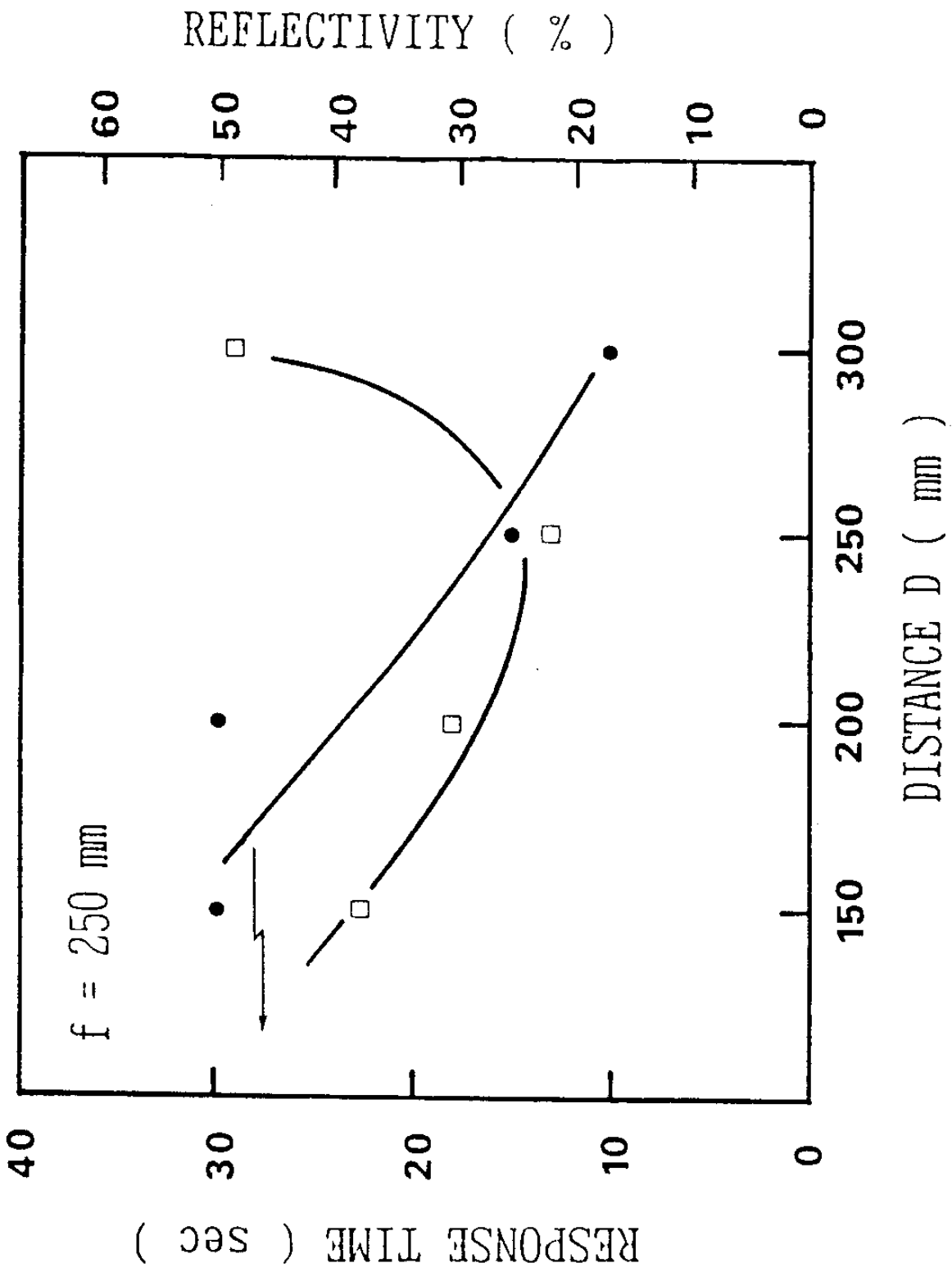


그림 2-17. 렌즈와 결정과의 거리에 따른 반사율과 반응시간

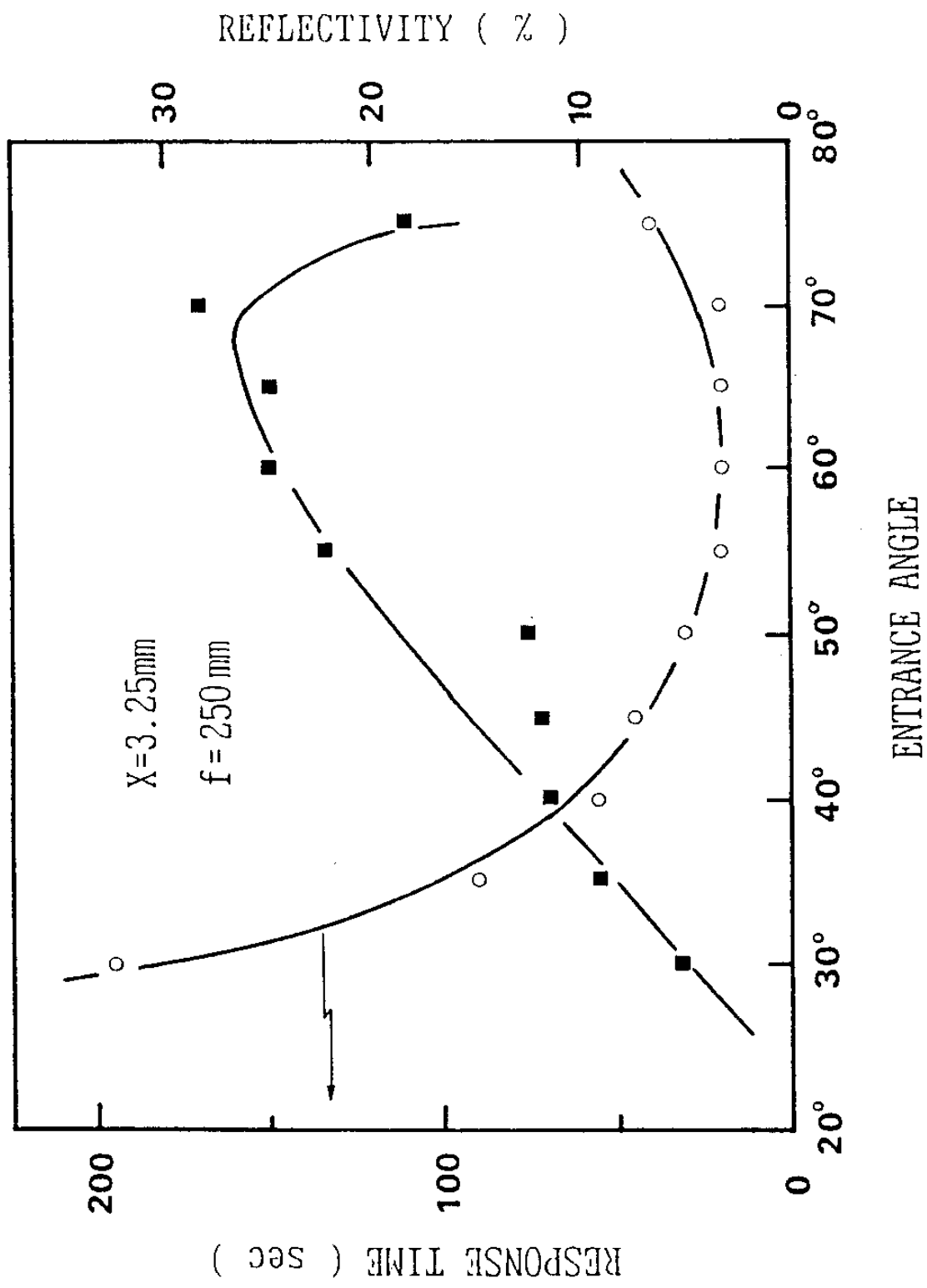


그림 2-18. 입사각에 따른 반사율과 반응시간

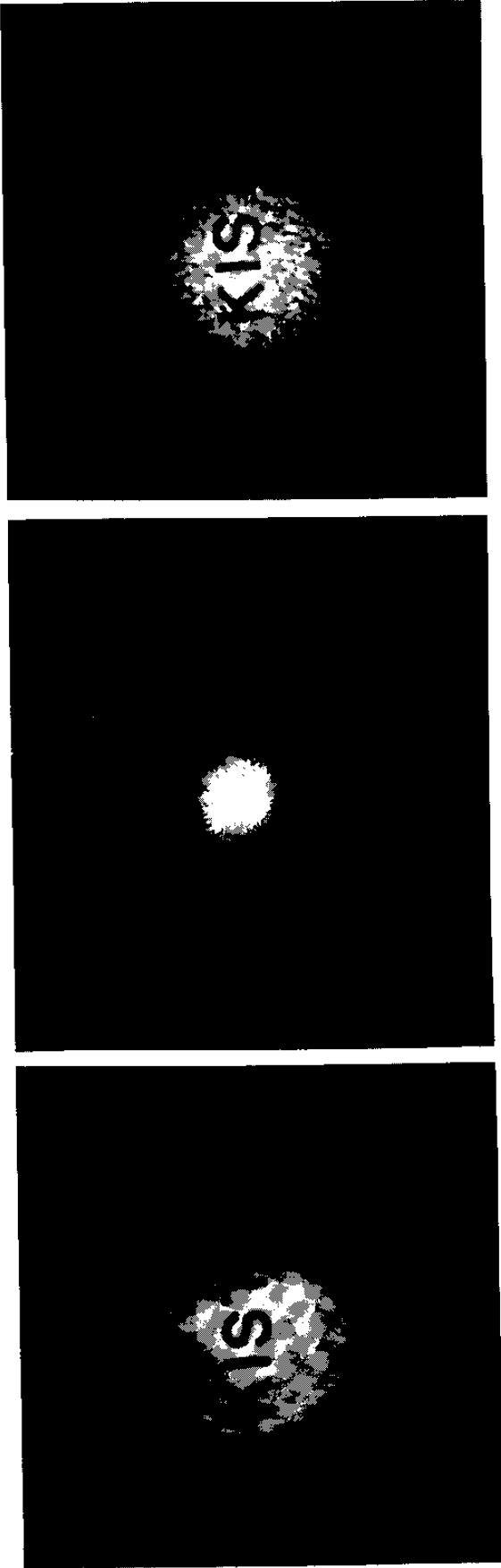
빔 크기에서 결함강도는 1 이하가 되며 이 정도로는 위상공액파가 발생하지 않는 것과 같은 결과를 얻을 것이다. 그림 2-18은 초점거리 250 mm에서 발산하는 빔을 입사위치 3.25 mm로 입사시켰을 때 입사각에 따른 위상공액 반사율과 반응시간이다.

이 결과는 렌즈를 사용하지 않은 결과와 달리 결함상수의 분석결과와 비교하여 볼때 입사각이 크면 반사율은 증가하나 Brewster 각보다 클때 입사빔의 손실이 반사율에 매우 크게 영향을 미치므로서 반사율은 입사각이 Brewster 각 70° 근처에서 최대가 되었다. 또한 입사각에 관계없이 fanning각은 약 57°였다.

제 3 절 위상공액 파의 응용

1. 다중모드 광파이버에서의 편광보상 효과의 실험

OPC의 왜 (distortion)에 대한 보상성을 알아 보기 위하여 그림 2-12의 자기 펌핑 위상공액 실험장치에서 image 영상을 입사시키기 위하여 레이저 (광의 강도를 위해 40 mW의 $0.5145\mu\text{m}$ Ar^+ 레이저를 사용하였음)에서 나온 빔을 빔 확대기로 직경 10 mm로 확대한후 KIST란 영상을 거쳐서 빔분할기로 분할하고 렌즈로 초점화시켜 입사하였으며 OPC는 빔분할기에 반사되어 스크린에 비추어진다. 그림 2-19(a)는 이렇게 하여 얻은 위상공액 영상이며 렌즈와 결정사이에 distorter (불산에 10 분동안 화학부식시킨 슬라이드 유리)를 두었을때 영상은 KIST란 글자를 알아볼 수 없게 왜곡되나 (그림 2-19(b)) 광굴절을 결정에 의해 생긴



(a) (b) (c)

그림 2-19. (a) Image 영상의 위상공역
 (b) distorter에 의해 왜곡된 영상
 (c) (b)의 영상이 OPC에 의해 보상된 영상

OPC에 의해 보상이 되었을때 그림 2-19(c)와 같이 글자는 선명하게 보상되어 나타난다. 이와같은 OPC의 특성을 distorter 대신 다중모드 광파이버에 적용시켜볼 수 있으나 다중모드 광파이버의 특성상 편광성과 공간성을 상실하게 하므로 영상전송이 쉽지않다⁽²⁻³⁾. 편광성과 공간성을 보상하기 위해 그림 2-20 과 같은 실험장치를 구성하였다. Image 영상을 갖고 있는 초기 필드 $E^{(1)}$ 이 다중모드 광파이버 내로 입사되면 파이버 내의 강한 내부모드 결합에 의해 전파중에 다른 모든 모드와 편광으로 분류되어 파이버로부터의 $E^{(2)}$ 는 스펙클이 짝 들어찬 영상과 거의 편광성이 상실된 상태가 된다. 다시말해서 KIST 라는 영상을 입력되었을때 그림 2-21의 (a)와 같이 그 상은 완전히 사라져 버린다. x-축으로 편광기를 두어 필드 $E^{(2)}$ 의 x- 성분만 OPCM에 입사시켜 위상공액파 $E^{(3)}$ 가 다시 초기의 경로로 되돌아 감으로서 파이버의 내부모드 결합을 다시 겪게 된다. 결과적으로 출력으로 $E^{(4)}$ 가 나타나게 되며 y- 성분도 그림 2-21의 (b)와 같이 wave plate를 두어 편광성을 바꿔서 OPC를 발생시킨다. 하지만 실험적으로 이의 구현은 쉽지가 않은데 본 연구에서는 1m의 광파이버에 KIST란 영상을 입력시켰으나 광파이버를 통한 광세기의 손실로 그림 2-21의 (b)에서 보는 것과 같이 광파이버에 영상을 입력시 나타나는 허상인 잡음으로 인하여 OPC에 의한 보상성을 구별할 수가 없었다.(그림 2-21의 (c)) SNR(signal to noise ratio)을 높이는 것이 앞으로의 관건이며 이는 주로 광파이버에 대한 입력문제이므로 광파이버에 입력조건에 따른 체계적인 연구가 필요하다.

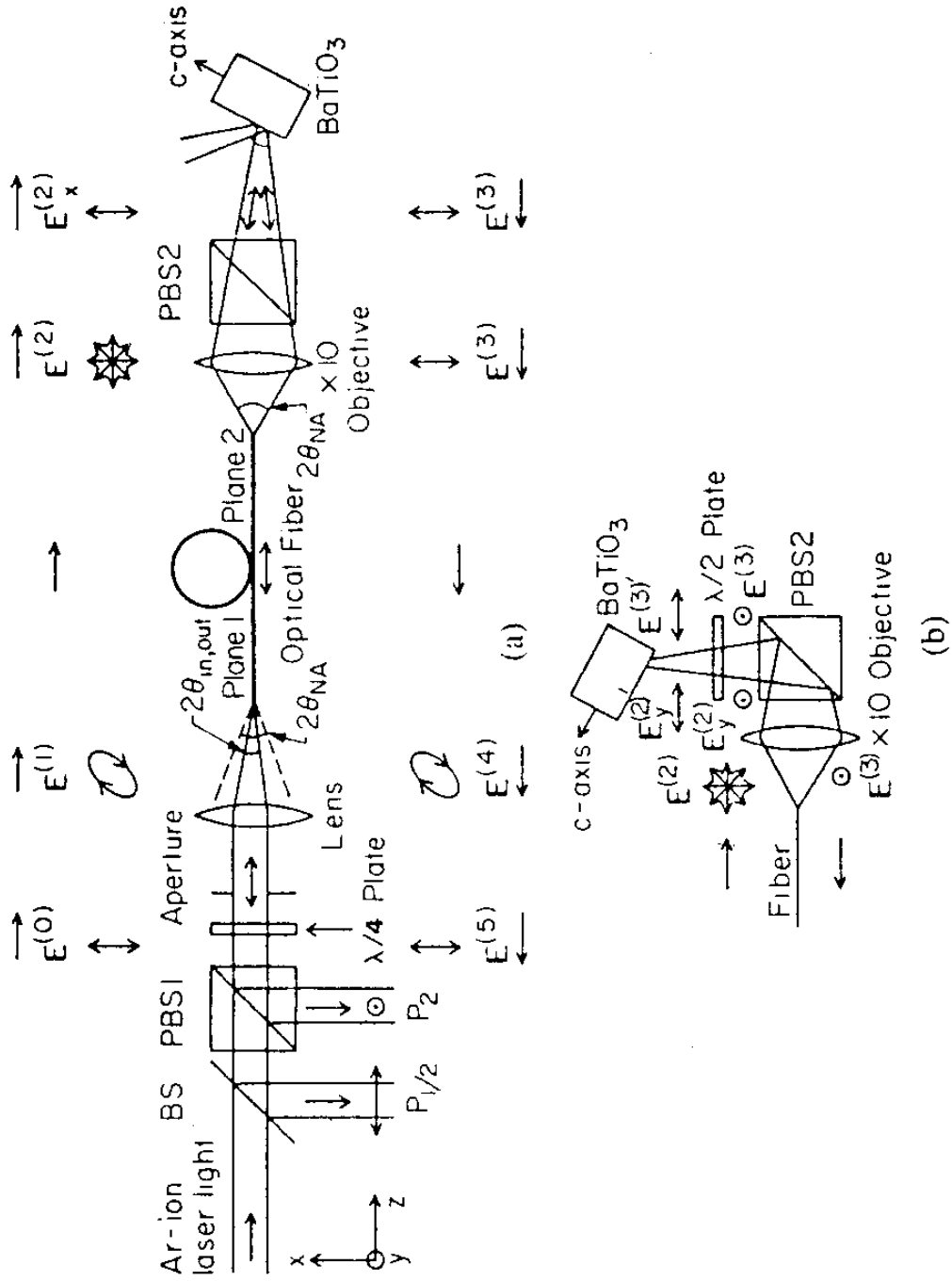
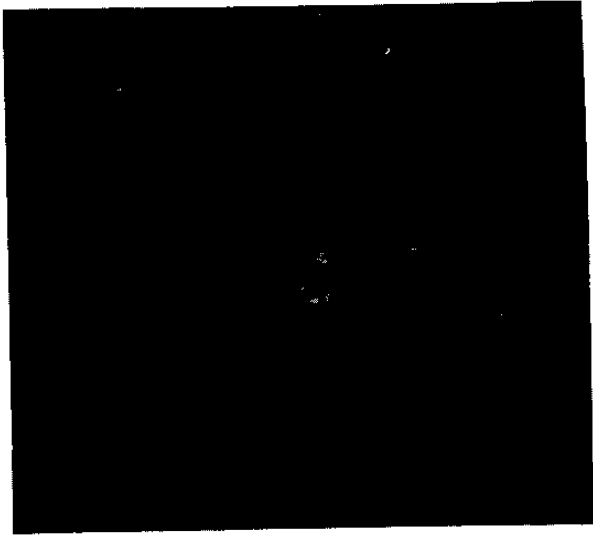
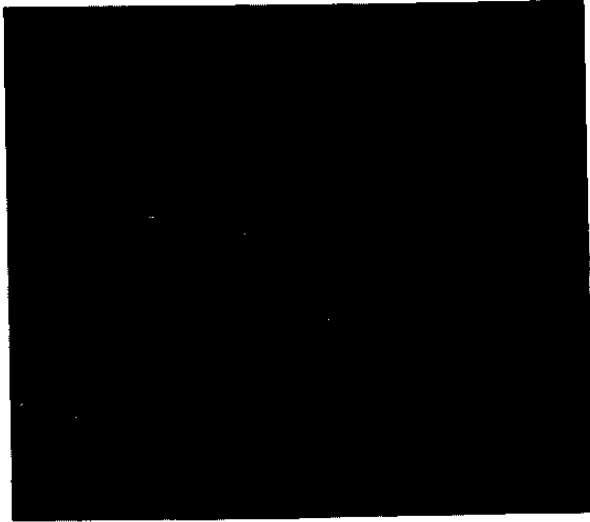


그림 2-20. 편광성과 공간성을 보상하기 위한 장치구성 (a) x-편광성에 대한 구성, (b) y-편광성에 대한 구성



(a)



(b)



(c)

그림 2-21. (a) 광파이버에 의해 퇴광성과 공간성이 상실된 영상,
 (b) 광파이버에 영상을 입력시 나타나는 허상
 (c) 허상중간에 광파이버를 통해 재생된 위상공액 영상

2. Optical Novelty Filter 실험

OPC의 또다른 응용으로 high-pass 필터⁽²⁻⁷⁾가 주목되고 있는데 굴절을 격자가 영상의 변화에 반응하기전에 광굴절을 결정의 출력은 세기의 변화를 일시적으로 나타낸다. Two-beam 결합에 의하면 순간적인 contrast는 contrast 비 $C = I_{\text{novel}} / I_{\text{old}} = \exp(r\ell)$ 로 결합강도에 영향을 받는다. (여기서 ℓ 은 결합길이) 자기 펄핑 위상공액 현상을 이용할 경우 결정내의 광의 세기는 공간적으로 변하고 있고 광굴절을 결정도 이에 따라 반응하고 있으므로 시간적인 필터의 성질을 고려하여 한다. 입력 필드 $\epsilon(t)$ 의 시간에 따른 Laplace 변환은 $\epsilon(s)$ 가

$$\epsilon(s) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma - i\infty}^{\sigma + i\infty} \epsilon(t) e^{st} dt \quad \dots\dots\dots (19)$$

일때

$$\epsilon(t) = \int_0^{\infty} \epsilon(s) e^{-st} ds \quad \dots\dots\dots (20)$$

이며 여기서 s 는 복소수 주파수로 $s = \sigma + i\omega$ 이다. 필터로서 구성이 되면 transfer 함수 $h(s)$ 에 의해 필터의 출력 $e'(s)$ 은

$$e'(s) = h(s)e(s) \quad \dots\dots\dots (21)$$

이다. 광굴절을 결정의 transfer 함수⁽²⁻⁷⁾는

$$h(s) = \exp\left[\frac{D_c \gamma \ell}{2(s + D_c)}\right] \quad \dots\dots\dots (22)$$

로 표현될 수 있다. (여기서 D_c 는 광의 세기에 비례하는 감쇄상

수) r 의 실수성분이 음수인가 양수인가에 따라 high-pass 나 low-pass 필터링이 되며 s 의 허수성분이 0인가 무한대인가에 따라 transfer 함수는 최대치와 0 값을 갖게 된다. 따라서 정상상태에서 cut-off 주파수에 대해 신호의 진폭은 극값을 갖게 되어 영상의 변화에 대한 반응을 하게 된다. 이런 성질의 Novelty Filter는 움직이는 상을 감지하는데 유용하며 움직이는 상이 없을 때 아무 상이 나타나지 않아야 된다. Novelty Filter의 구성은 그림 2-22 와 같이 구성하였는데 구성 방법은 여러가지가 있으나 본 연구에서는 편광 위상 공액파를 이용한 filter이다. 초기의 편광 빔을 편광 빔분할기로 두 빔으로 분류한뒤 한 빔을 편광 image를 갖고 있는 LCD(liquid crystal display)에 통과시키고 다시 편광 빔분할기를 통과시킨 두 빔중 한 빔에 대해 $\lambda/2$ wave plate를 통과시켜 편광방향을 결정에 대해 이상광선이 되게 하므로서 각각의 위상공액파를 발생시켰다. 두 위상공액파는 두번째 편광 빔분할기에 의해 다시 한 편광 빔으로 결합하여 첫번째 편광 빔분할기로 되돌아가는데 정상상태에서는 초기의 편광성을 갖고 있으므로 레이저 쪽으로 되돌아 갈 것이다. 그러나 image에 있어 갑작스런 변화가 있으면 첫번째 편광 빔분할기로 되돌아가는 빔은 초기의 편광성에 변화가 생겨 스크린 쪽으로 image의 일부를 보내게 된다. 그림 2-23은 두번째 편광 빔분할기에 의해 분리되어 생긴 s-와 p-편광 위상공액 영상을 찍은 사진이다. LCD에 'E'의 글자영상을 입력시키며 실험을 한 결과 그림 2-24, 2-25와 같은 결과를 얻었다. 그림 2-24의 (a)는 image

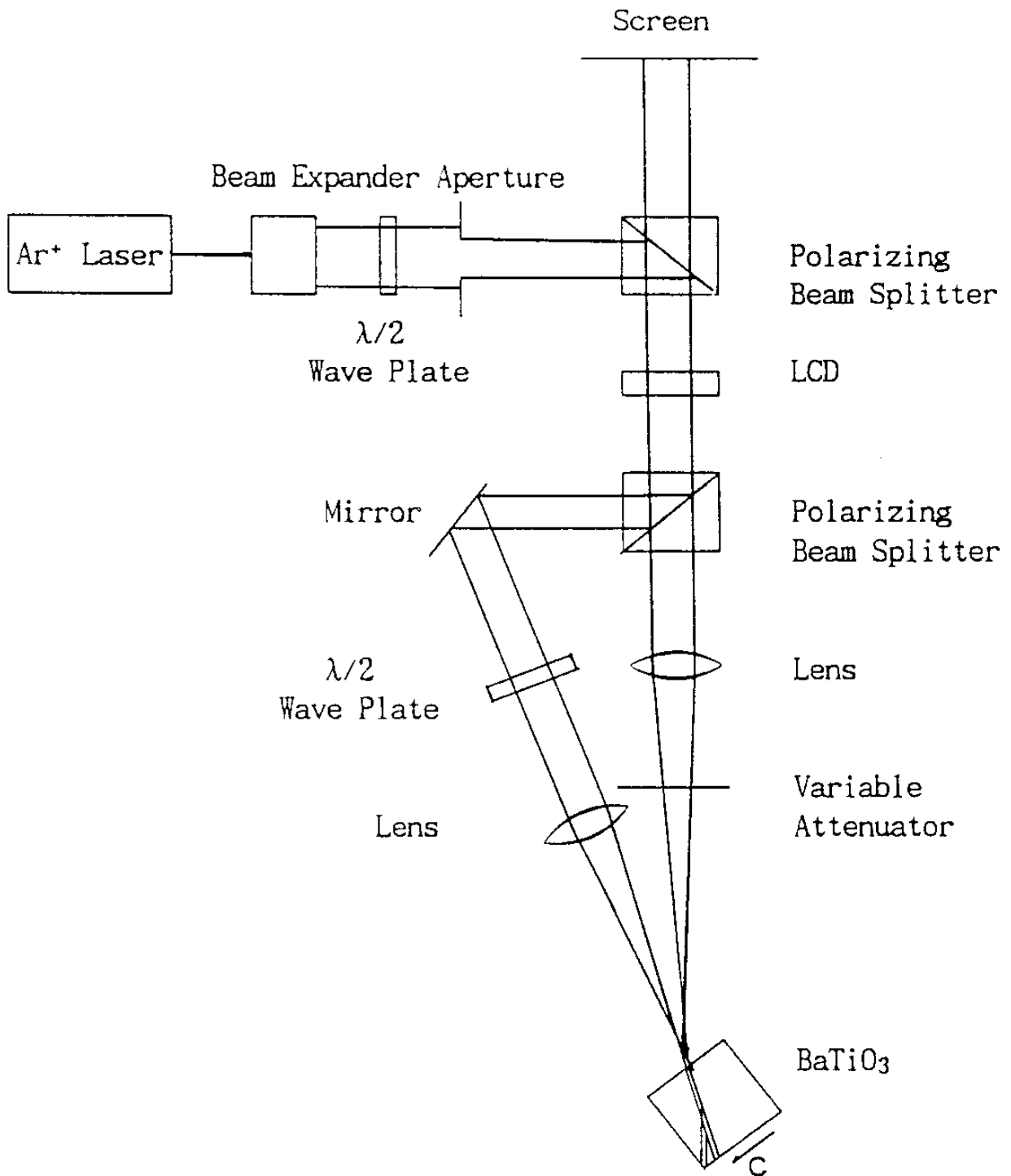
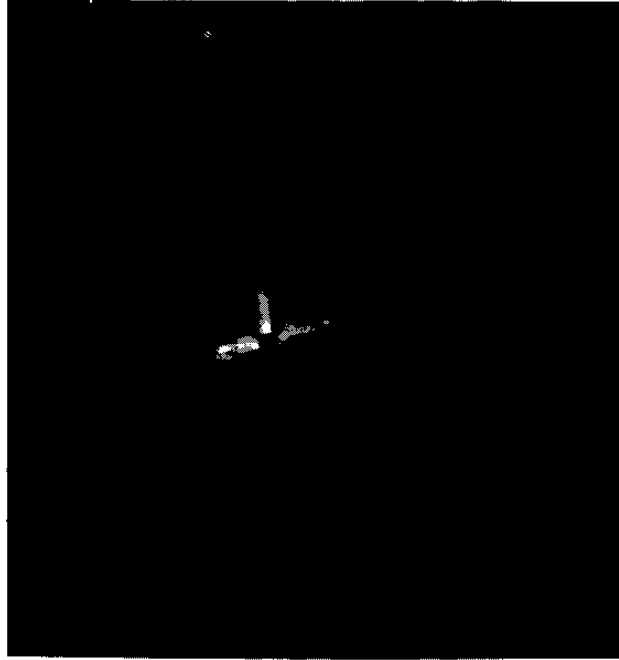


그림 2-22. 두개의 편광 빔분할기를 이용한 편광 위상광학 Novelty Filter의 구성



(a)



(b)

그림 2-23. LCD에 의해 분리된 (a) s-편광 위상공해 영상과 (b) p-편광 위상공해 영상

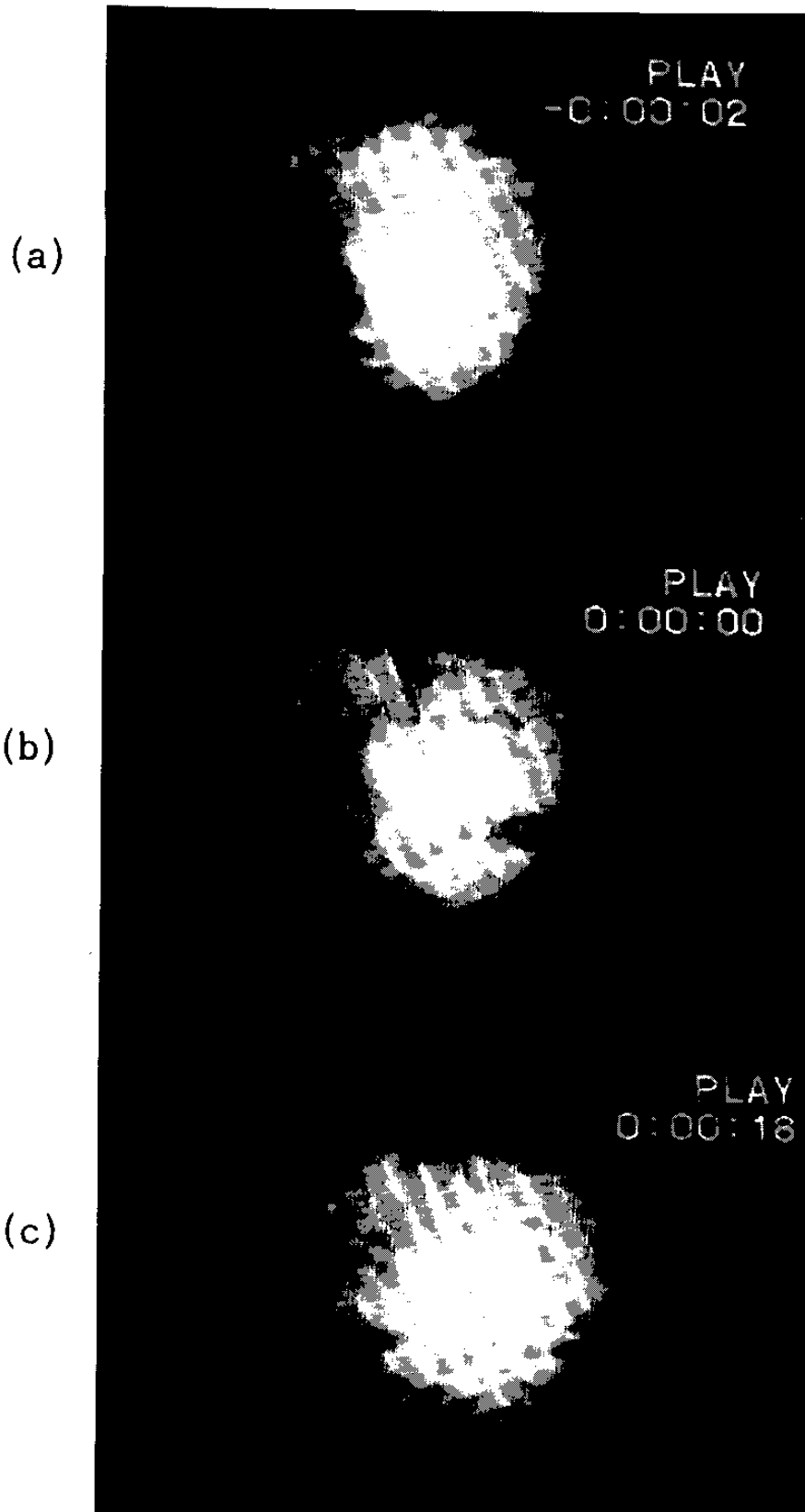


그림 2-24. 영상 업력시 Novelty Filter 구성의 결과 (a) image 영상을 입력시키기전, (b) image 영상 'E' 을 입력시켰을때, (c) (b)의 상태에서 18초가 경과한 후 image 영상의 contrast가 흐려진 상태

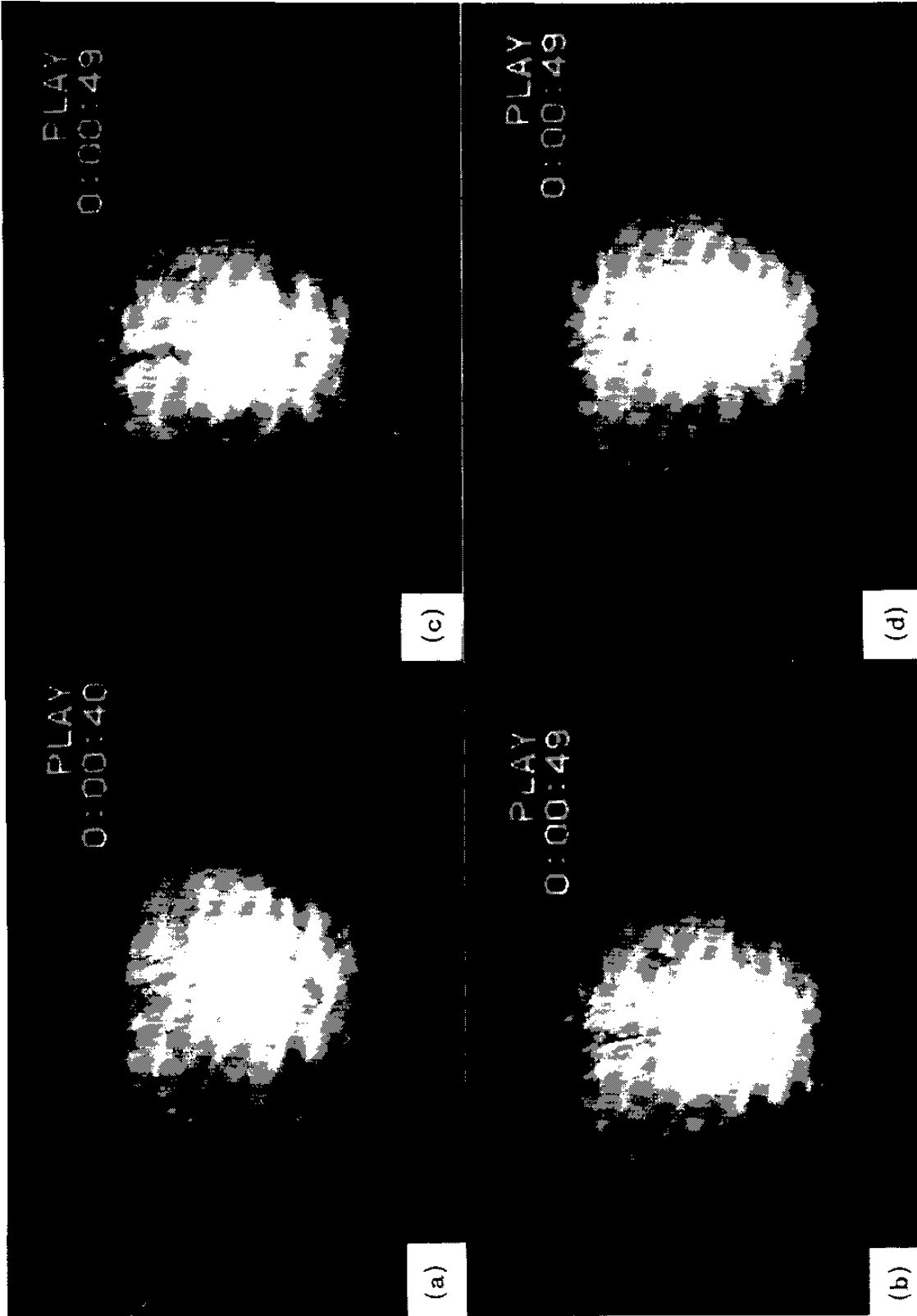


그림 2-25. 영상 제거시 Novelty Filter 구성의 결과 (a) image 영상을 입력된 상태, (b) image 영상 'E' 을 제거시, (c) (b)의 상태에서 1 초도 경과하지 않은 상태로 image 영상의 contrast가 증가된 상태 (d) (c)의 상태 후 filtering 효과가 사라진 상태

영상을 입력시키기전 image의 사스텝 잡음이 지배적인 상태의 사진이며 그림 2-24의 (b)는 image영상을 입력시켰을때 순간적으로 image영상의 contrast가 증가한 상태의 사진이다. 그림 2-24의 (c)는 18초후 image영상의 contrast가 다소 상실된 상태를 나타내는 사진인데 이론적인 결과와 달리 더 오랜 시간이 경과하더라도 null(무)상태가 되지않았다. 그림 2-25의 (b)는 (a)의 상태에서 9초가 경과한 후에 LCD의 입력을 꺼버렸을때 얻은 결과로 순간적으로 image영상의 contrast가 증가하였으며 1초 이내로 back ground 잡음영상으로 되돌아 갔다. (그림 2-25의 (d))이 결과에서는 back ground잡음이 너무 강하였는데 원인으로서는 LCD의 편광성 상태가 좋지않았으며 다소 광 부품상의 편광성 잡음을 제거치 못한데 있다. 따라서 LCD를 LCLV로 하였을 때 실용화가 가능하게 Novelty Filter의 contrast는 15:1 이상⁽²⁻⁸⁾이 될것으로 본다.

제 4 절 결과논의 및 결론

광굴절을 결정인 $BaTiO_3$ 의 자기킴핑 위상공액 현상을 분석 연구하여 최고 위상공액 반사율의 조건을 조사하였다. 이 결과를 이용하여 다중모드 광파이버에 적용시켜보았으며 또한 Novelty Filter를 구성하였다.

광굴절을 결정 $BaTiO_3$ 의 자기킴핑 위상공액파에 대한 특성을 광원과 입사빔의 조건에 따라 연구한 결과 입사빔의 위치에

따라 안정된 상태와 불안정 상태, 감쇠 진동 상태를 겪으며 입사각이 커질수록 반사율은 증가하고 fanning 현상은 빨라진다. 수렴하는 빔보다 발산하는 빔의 반사율이 더 높았으며 최고 반사율 조건은 입사각이 70° 정도로 입사면의 중간위에 초점거리를 지나 발산하는 경우였다. 이때 fanning각은 57°이며 49%의 반사율과 수초의 반응시간을 나타내었다. 다중모드 광파이버에 대한 영상 전송의 가능성을 알아보기 위해 실험한 결과 입력단의 잡음으로 영상전송이 뚜렷하지 못하였으나 실용화를 위해서는 근본적으로 기존의 방법에서 탈피한 새로운 기술이 연구되어야 한다. LCD를 이용한 편광 위상공액 Novelty Filter를 구성한 결과 영상 삽입시보다 영상의 제거시 더 뚜렷한 필터링 효과가 있었다. 따라서 고해상도를 갖는 LCTV나 LCLV로 실용화가 가능한 Novelty Filter를 구성할 수 있으리라 본다.

참 고 문 헌

- 2-1. D.M. Pepper, Opt. Eng. 21(2). 156 (1982).
- 2-2. M.C. Gower, Prog. Quant. Electr. 9,101 (.21984).
- 2-3. Y. Tomita, R. Yahalom, K. Kyuma, A. Yariv, and N.S. -K. Kwong, IEEE J. Quantum Electron. 25(3), 315(1989).
- 2-4. N.G. Basov, V.F. Efimkov, I.G. Zubarev, A.V. Kotov, S.I. Mikhailov, and M.G. Smirnov, Sov. Phys. -JEPT Lett. 28, 197 (1978).
- 2-5. K. Kyuma, A. Yariv, and S. -K. Kwong, Appl. Phys. Lett. 49, 617 (1986).
- 2-6. I. McMichael, P. Beckwith, and P.Yeh, Opt. Lett. 12, 1023 (1987).
- 2-7. D.Z. Anderson and J. Feinberg, IEEE J. Quantum Electron. 25 (3), 635 (1989).
- 2-8. D.Z. Anderson, D.M. Lininger, J. Feinberg, Opt. Lett. 12, 123 (1987).
- 2-9. Quantum Electronics, 3rd ed., edited by A. Yariv (John Willey & Sons, New York, 1989), p495.
- 2-10. N.V. Kukhtarev, V.B. Markov, S.G. Odulov, M.S. Soskin, and V.S. Vinetskii, Ferroelectrics 22, 949 (1979).
- 2-11. J. Feinberg, D. Heiman, A.R. Tanguay, Jr., and R.W. Hellwarth, J. Appl. Phys. 51, 1297 (1980).

- 2-12. S.M. Jensen and R.V. Hellwarth, Appl. Phys. Lett. 33, 404 (1978).
- 2-13. J. Feinberg, Lett. 7, 486 (1982).
- 2-14. T.Y. Chang and R.W. Hellwarth, Opt. Lett. 10, 408 (1985).
- 2-15. J.F. Lam, Appl. Phys. Lett. 46, 909 (1985).
- 2-16. K.R. MacDonald and J. Feinberg, J. Opt. Soc. Amer. 73, 548 (1983).
- 2-17. K.R. MacDonald and J. Feinberg, Phys. Rev. Lett. 55, 821 (1985).
- 2-18. D.J. Ganthica, Opt. Lett. 58, 1644 (1987).
- 2-19. M.C. Gower, Opt. Lett. 11, 458 (1986).
- 2-20. P. Yeh, IEEE J. Quantum Electron. 25(3), 484 (1989).
- 2-21. E.J. Sharp, W.W. Clark III, M.J. Miller, G.L. Wood, B. Monson, G.J. Salamo, and R.R. Neurgaonkar, Appl. Opt. 29 (6), 743 (1990).
- 2-22. G. Zhang, Q -X Li, P.P. Ho, S. Liu, Z.K. Wu, and R.R. Alfano, Appl. Opt. 25(17), 2955 (1986).

제 3 장 LCTV를 이용한 실시간 광학 영상처리 기술

제 1 절 서 론

실시간으로 이차원 영상의 광학적 영상처리를 하는 기술은 영상인식, 영상의 연산, 영상추적등 여러분야에 활용될 수 있으며 이를 이용하여 로봇틱 비존, 공정 제어 및 자동화등을 실현할 수 있다.³⁻¹⁾ 그러나, 실시간으로 영상처리를 하기 위해서는 고가의 공간변조소자(SLM:Spatial Light Modulator)³⁻²⁾가 필히 사용되어야 하기 때문에 그동안 이를 이용한 많은 영상처리 연구가 수행되어 왔으나 아직 산업에 크게 활용되고 있지는 않은 실정이다. 최근에 저가격의 기존의 액정 TV를 개조하여 이를 대체해 보려는 연구가 많이 진행되고 있다.^{3-3,4)} 본 연구에서는 이러한 추세에 따라 흑백 액정 TV를 이용한 실시간 광학적 영상처리를 구현해 보 고자 한다.

제 2 절 LCTV의 구조 및 특성

액정 TV를 이용하여 실시간 광학적 영상처리를 하는 데에는 두가지 측면이 있다. 하나는 CCD 카메라로 입력 영상을 액정 TV 화면위에 구현시키고 이 곳에 가간섭성 평행광을 입사시켜 가간섭성 이차원 입력 영상을 구현시키는 것이며 다른 하나는 영

상처리용 가간섭 광학계의 필터면 즉, 공간주파수 필터링이 이루어지는 곳에 액정 TV를 위치시키고 그의 화면에 컴퓨터에 의해 설계된 공간주파수 필터를 재현시키는 것이다. 따라서, 액정 TV의 분해능과 contrast는 영상처리 결과에 매우 중요한 변수로 작용하게 된다.

액정 TV에 사용되는 액정은 smectic, nematic, cholesteric 등의 세 종류가 있다. Smectic 액정은 담배모양의 분자들이 layer (유리판) 면과 그의 긴축이 수직하게 배열되어 있으며 nematic 액정은 분자들이 같은 방법으로 배열되어 있으나 다만 layer 내에서 분리되지 않는 것이 다르다. Cholesteric 액정은 이와는 반대로 분자들의 긴축이 layer 면에 평행하게 배열되어 있다.

액정의 개발초기에는 cholesteric 형이 온도에 따라 색깔이 변화하기 때문에 온도 계측용으로 사용되었었다. Display 용으로 액정을 사용하려는 시도는 1960년도 중반부터 미국내의 Xerox, RCA 등 회사에 의해 이루어 졌다.

Display 용으로 사용되는 액정은 화학적, 광화학적, 전기화학적으로 안정성이 있어야 하며 또한, colorless, 고저항, sharp threshold, 저복굴절도, low viscosity, positive dielectric anisotropy, 넓은 동작온도범위 등의 특성을 만족해야만 한다.

일반적으로 흑백용 액정 TV의 구조는 그림 3-1 과 같다. 액정 분자들은 투명전극판 사이에 놓여지게 된다. 이 투명전극판에 가해

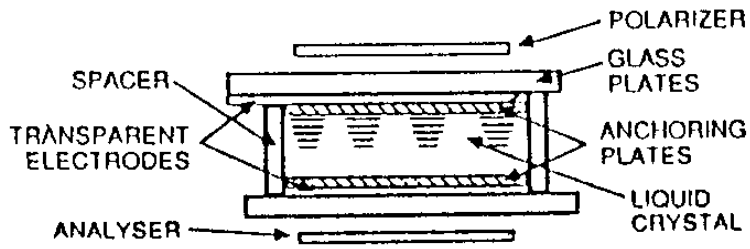


그림 3-1. 액정 TV의 구조

지는 전압에 따라 액정분자들의 배열상태가 변화하여 결국 이 곳을 투과하는 빛의 위상을 변화시켜 주게된다. 투명전극판을 증착시킨

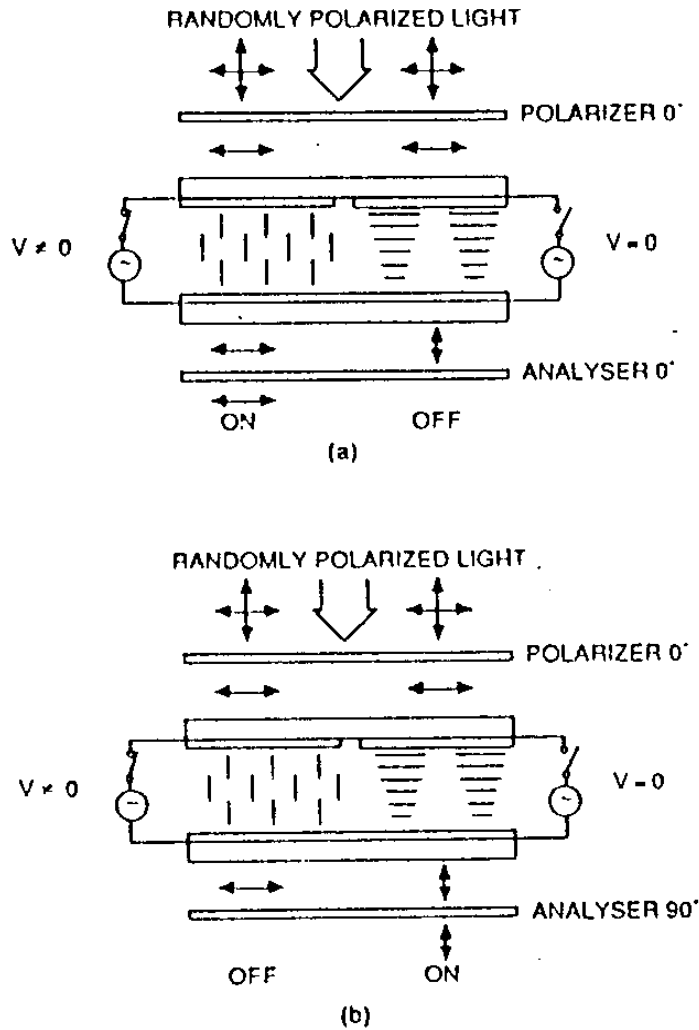


그림 3-2. 액정 TV의 polarizer와 analyzer 배열방법

두개의 유리판의 바깥표면에는 편광기가 부착되는 데 이 편광기의 편광방향의 배열에 따라 액정 TV의 빛의 투과특성은 그림 3-2와 같이 두가지로 구분된다. 투명전극에 전압이 가해지지 않을 때 즉, $V = 0$ 이면 액정분자들에 의한 입사광의 편광방향 변화는 전혀 없기 때문에 투과광의 편광방향은 입사광의 편광방향과 일치하게 된다. 그러나, 투명전극에 전압이 가해지면 액정분자들은 전장방향에 평행하게 다시 배열되어 결국 입사광의 편광방향은 액정부분을 지남에 따라 변화하게 되며 전압이 높아지면 투과광의 편광 방향을 90도만큼 회전시킬 수 있게 된다. 이 경우에 그림 3-2와 같이 polarizer 와 analyzer 의 편광방향이 서로 일치할 경우와 반대로 서로 직교할 경우의 액정의 투과율 t 는

$$t(0 \text{도}) \propto \cos^2(\theta)$$

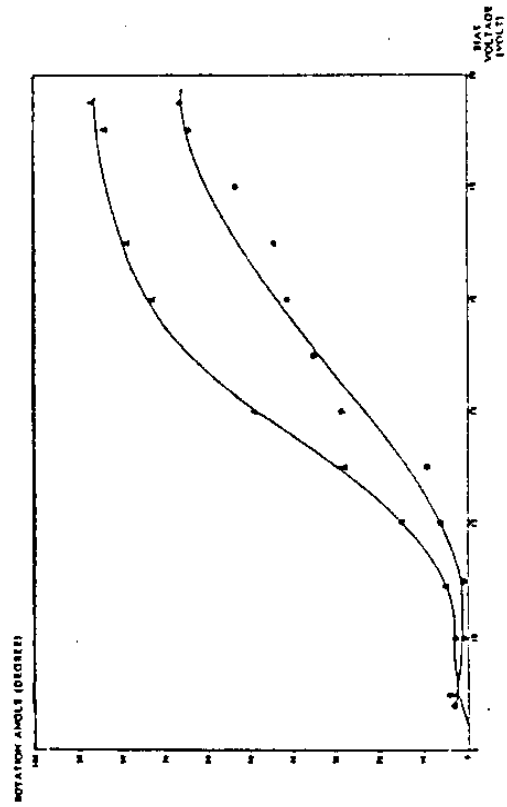
$$t(90 \text{도}) \propto \sin^2(\theta) \quad \text{단, } \theta \text{는 액정에 의한 입사광의 편광회전각.}$$

으로 주어진다. 이로부터 기본적으로는 액정에 의한 빛의 명암변화에 대한 contrast 는 단지 사용하는 polarizer와 analyzer 의 편광도에만 관계된다. 그러나, 초당 30 Hz 로 액정의 편광회전도를 변화시켜야 TV 신호를 화면에 구현시킬 수 있기 때문에 액정의 반응속도를 여기에 맞춰 동작시키기 위해서는 bias voltage 를 액정에 미리 가해줘야 한다. 이로인해 실제의 액정 TV의 contrast 는 매우 낮다. 참고로 시중에서 판매되고 있는 액정 TV에 대한 일반 특성을 열거하면 표 3-1 과 같다.

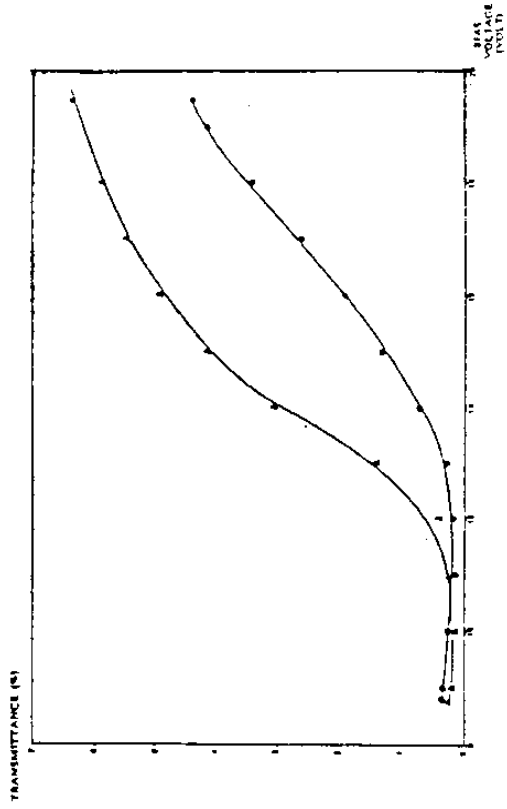
표 3-1. 액정 TV의 특성

Model		Radio Shack (black and white)	Epson (color)	Citizen (color) (color filter removed)
Characteristic				
Aperture Size (cm x cm)		4.4 x 5.4	2.9 x 3.8	2.3 x 3.2
No. of Pixels		120 x 146	220 x 240	220 x 648
Pixel Size ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)		366 x 370	131 x 158	104 x 49
Surface Flatness ($\lambda = 633\text{nm}$)		0.1 λ /cm	0.1 λ /cm	0.1 λ /cm
Maximum Contrast (at $\lambda = 633\text{nm}$)	without spatial filtering	6	11	6
	with spatial filtering	>10	>30	>10
Resolvable Gray Levels		<6	~ 6	<6
Maximum Transmittance With Polarized Light ($T = 25^\circ\text{C}$, $\lambda = 633\text{nm}$)		~50% (built in polarizer)	~7% (external polarizer)	~7% (external polarizer)
Spectral Transmission Range		Visible to Near IR	Visible	Visible to Near IR
Input Device		TV camera or computer	TV camera or computer	TV camera or computer
Addressing Method		Matrix	Active matrix (with TFT)	Matrix
Addressing Speed (at 25°C) (frames/sec)		30	30	30
Pixel Relaxation Time (msec)		~10	~100	~10
Operating Power (Watts)		0.33	1.1	0.87
Temperature	Operating	5°C to 40°C	5°C to 40°C	5°C to 40°C
	Storage Tolerance	-20°C to 60°C --	-20°C to 60°C > 80°C , > 500 hours	-20°C to 60°C --
Total Weight		~300 grams	450 grams	~450 grams

입사광의 세기가 높을때와 낮을때의 bias voltage에 따른 액정 TV의 편광회전각과 투과율은 그림 3-3 과 같다. 이로부터 액정 TV의 contrast는 가해지는 bias 전압에 따라 변화하며 특정한 전압에서 contrast가 최대가 됨을 알 수 있다. 그림 3-4는 bias 전압에 따라 액정 TV의 contrast변화를 측정한 결과이다. A는 성능이 더 좋은 편광기로 대체하여 측정한 결과이며 B는 액정에 부착되어 있는 기존의 편광기를 그대로 사용하여 측정한 결과이다.



(a)



(b)

그림 3-3. Bias 전압에 따른 액정 TV의 편광회전각과 투과율 변화
 (▲ : 입사광의 세기가 높을 때, ● : 입사광의 세기가 낮을 때)

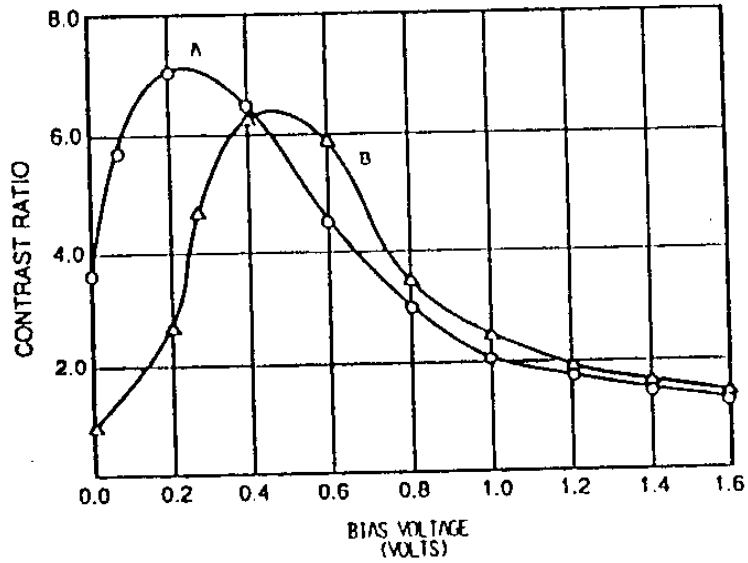


그림 3-4. Bias 전압에 따른 액정 TV의 contrast 변화 (A:external polarizers, B:builtin polarizers)

그리고, 액정 TV는 여러개의 액정 cell 들이 어레이 형태로 구성되어 있기 때문에 액정 TV 화면을 가간섭성 평행광으로 비추어 이의 Fourier 스펙트럼을 관찰해 보면 그림 3-5 와 같이 각 액정 cell 들의 수직 및 수평방향으로의 간격때문에 마치 회절격자에 의한 회절패턴처럼 보여짐을 알 수 있다. 이로인해 실지로

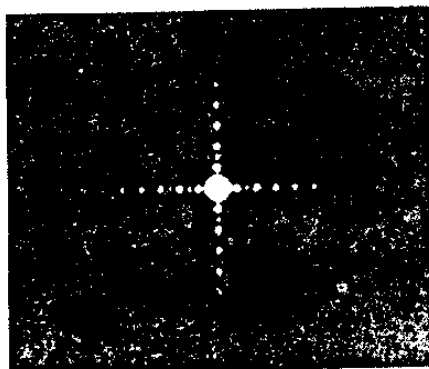


그림 3-5. 액정 TV 화면의 Fourier 스펙트럼

액정 TV를 사용하여 광학적 영상처리를 하는 경우에는 이 패턴의 가장 중심부분 즉, 저공간주파수 영역에서만 영상처리를 해야 될 필요가 있다.

제 3 절 영상처리 광학계

1. 렌즈에 의한 Fourier 변환

광학수차가 전혀없는 초점거리가 f 인 볼록렌즈의 전초점평면 위에 진폭 투과율이 $t(x,y)$ 인 이차원 물체가 놓여 있을 때 여기에 진폭 A 인 가간섭성 평행광이 입사하면 이 렌즈의 후초점평면상에 형성되는 진폭분포 $T(f_x, f_y)$ 는

$$T(f_x, f_y) \propto A \int_{-\infty}^{+\infty} t(x,y) \exp\{-j2\pi(f_x x + f_y y)\} dx dy,$$

\propto Fourier transform of $t(x,y)$,

으로 표현되기 때문에 결국 볼록렌즈는 Fourier 변환 기능을 갖고 있음을 알 수 있다. 여기서, (x', y') 을 렌즈의 후초점평면에서의 직교좌표계라고 하고 λ 를 가간섭성 평행광의 파장이라고 하면 공간주파수 f_x, f_y 는 각각 $x'/\lambda f, y'/\lambda f$ 으로 주어지며 단위는 lines/mm로 주어진다. 그런데, 대상물체가 렌즈의 전방 임의의 위치에 있을 경우에도 역시 렌즈의 후초점평면상에는 같은 진폭분포가 형성되며 단지 위상만이 차이가 나게된다.

2. 광학계

이차원 영상의 광학적 영상처리를 할 수 있는 광학계는 그

그림 3-6 과 같이 세개의 볼록렌즈로 구성되어 있다.

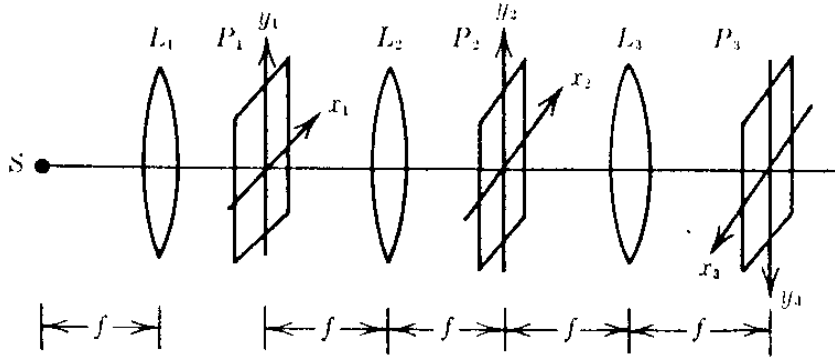


그림 3-6. 영상처리용 가간섭 광학계

첫번째 렌즈 L_1 은 가간섭성 광원 S 로부터 출사되는 빛을 평행광으로 만들어 주는 데 이용된다. 가간섭성 광원 S 는 대개 가시영역의 레이저가 이용되며 레이저의 빔직경이 1mm 이하이므로 이를 크게 확대시켜 주는 빔확대기가 사용된다. 두번째 렌즈 L_2 는 이 렌즈의 전초점평면상(입력면)에 놓여 있는 이차원 영상 P_1 을 Fourier 변환시키는 데 사용되고 세번째 렌즈 L_3 는 두번째 렌즈 L_2 의 후초점평면상(필터면)에 형성된 신평분포를 다시 역 Fourier 변환시키는 데 사용된다. Fourier 변환과 역 Fourier 변환은 단지 좌표축의 방향이 역으로 된 것외에는 근본적으로 같기 때문에 그림 3-6에서 세번째 렌즈 L_3 의 후초점평면(출력면)상의 좌표축이 역으로 설정되었음을 알 수 있다.

이 광학계를 이용하여 이차원 영상처리를 하는 과정은 다음과 같다. 우선 영상처리를 하려는 이차원 물체(대개는 사진필름임)를 입력면에 정지하고 원하는 영상처리를 공간주파수 영역에서 시행할 수 있는 적당한 공간주파수필터를 필터면에 정확히 정지한다.

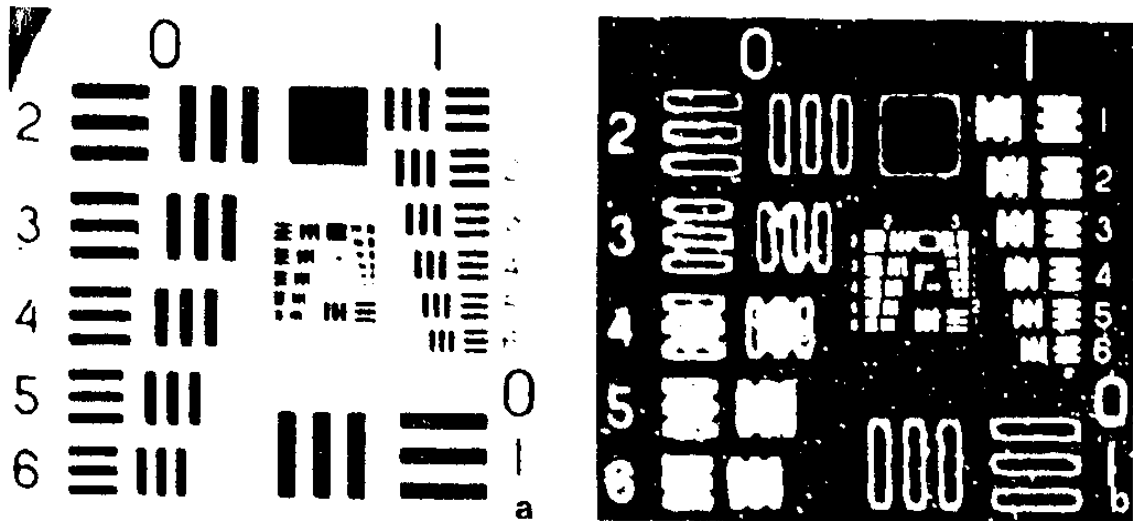
이렇게 하면 입력 영상의 Fourier 변환이 필터면에 정치되어 있는 공간주파수 필터에 의해 변환되고 이 변환된 진폭분포는 다시 출력면에서 역 Fourier 변환되어 진다. 따라서, 출력면에서 본래의 영상처리 결과를 관찰할 수 있다.

그런데, 이러한 영상처리 과정을 실시간 즉, 입력 영상이나 공간주파수필터를 사진현상과정을 거치지 않고 구현하여 영상처리를 해야만 실지로 여러 산업, 의료분야에 활용할 수 있다. 이로 인해 그동안 실시간 영상처리를 위한 많은 연구가 진행되어 왔으며 핵심 광소자인 공간광변조소자(SLM:spatial light modulator)의 개발이 집중적으로 추진되어 왔다. 공간광변조소자는 이 경우 입력면이나 필터면에 놓이게 되며 순수광학적으로 또는, hybrid형태로 입력영상이나 공간주파수필터를 실시간으로 구현시켜 준다. 그동안 개발된 공간광변조소자로는 BSO를 이용한 PROM, 액정을 이용한 LCLV, deformable mirror를 이용한 소자, 자기광학매체를 이용한 소자, CCD를 이용한 소자, multi quantum well 효과를 이용한 SEED(self electro-optic effect device) 등이 있으나 이들 가격이 매우 비싸거나 아직 개발단계에 있어 실지 산업용으로 활용하기에는 문제가 많다. 이 때문에 최근에 저가격 LCTV를 이용하여 산업에 활용할 수 있는 여러가지 실시간 영상처리에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

제 4 절 Edge Enhancement 와 상의 가감산

1. Edge Enhancement

그림 3-6 의 입력면에 놓여진 이차원 영상의 테두리만을 관찰함으로써 입력영상의 모양을 더욱 선명히 파악하고자 할 때에는 edge enhancement 라는 영상처리가 이용된다. 이는 입력영상의 Fourier 변환 성분가운데 D.C. (즉, 공간주파수 좌표의 원점) 와 이 근처의 낮은 공간주파수를 제외한 나머지 공간주파수 성분만을 투과시킬 수 있는 공간주파수필터를 제작하여 필터면위에 정확히 정치시킴으로써 가능하다. 이로인해 이러한 종류의 필터를 관찰해 보면 단지 하나의 까만점으로 보이게 된다. 이 점의 최적 직경은 렌즈 L_2 의 aperture 의 Fourier 변환에 의해 형성되는 Airy



입력 영상

처리 결과

그림 3-7. Edge enhancement 의 한 예

disk의 직경과 동일하다. 그림 3-7은 이러한 종류의 영상처리 실험
 과의 한 예이다.

2. 상의 가감산(Image Substraction and Addition)

가. 상의 가산(Image Addition)

그림 3-8과 같이 진폭투과율이 각각 $0_1(x_1, y_1)$, $0_2(x_1, y_1)$ 인 두
 개의 이차원 영상이 서로 원점에 대해 $2a$ 만큼 떨어져서 입력면
 에 놓여 있다고 가정한다.

이 두영상의 Fourier 변환을 각각 $0_1(x_2, y_2)$ 과 $0_2(x_2, y_2)$
 라 하고 이를 다시 공간 주파수 f_x, f_y ($f_x = x_2 / \lambda f$, $f_y =$
 $y_2 / \lambda f$)를 이용하여 $0_1(f_x, f_y)$ 과 $0_2(f_x, f_y)$ 로 표시하면 필터면
 상에 형성된 진폭분포 $0(f_x, f_y)$ 는

$$0(f_x, f_y) = 0_1(f_x, f_y)\exp(+j2\pi f_x a) + 0_2(f_x, f_y)\exp(-j2\pi f_x a)$$

으로 주어진다.

필터면위에 놓여지는 회절격자가 좌표의 원점 즉, 축상에서 진
 폭투과율이 최대가 되는 cosine grating이고 이 회절격자의 진
 폭투과율 $G(f_x, f_y)$ 가

$$\begin{aligned} G(f_x, f_y) &= 1 + m \cos(2\pi f_x a), \\ &= 1 + (1/2) m \{ \exp(-j2\pi f_x a) + \exp(+j2\pi f_x a) \}, \end{aligned}$$

으로 주어졌다고 하면, 회절격자를 투과한 직후의 진폭분포 $t(f_x, f_y)$

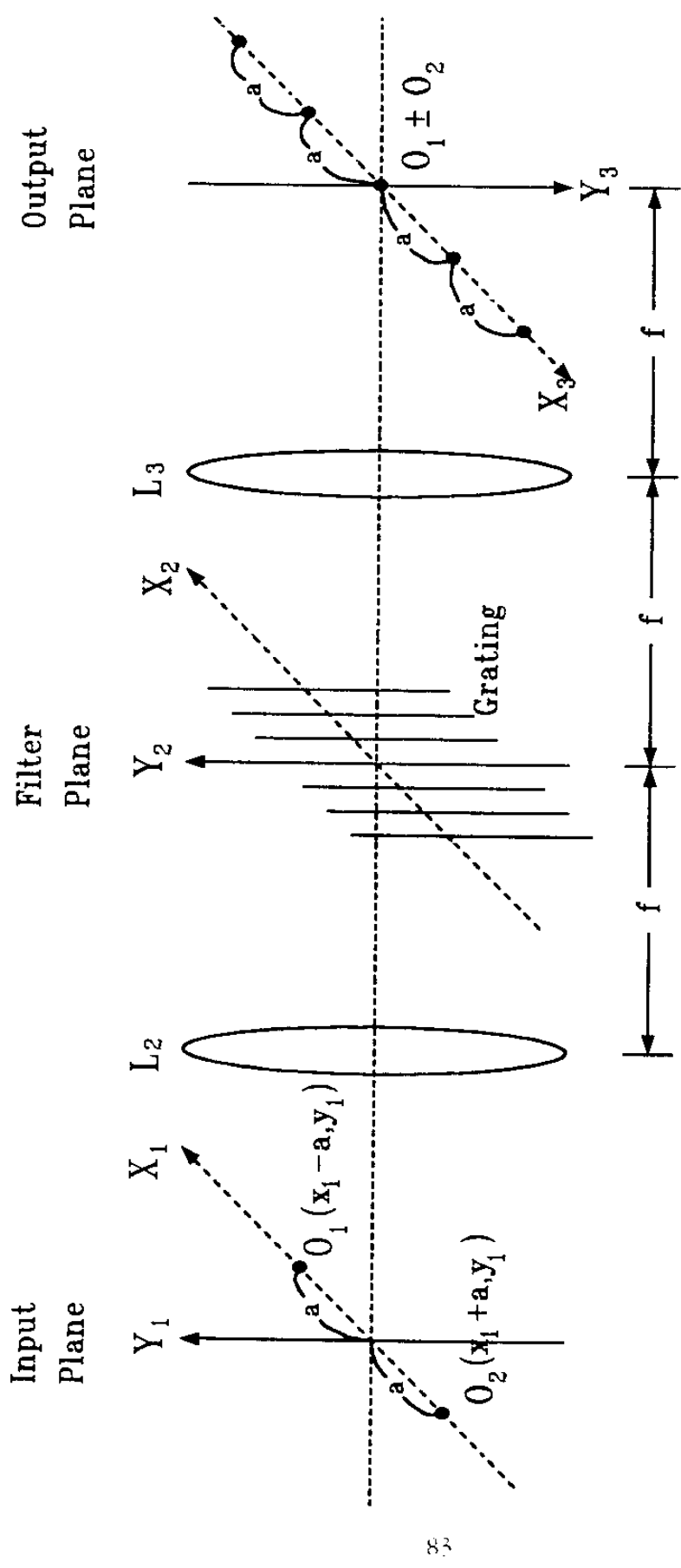
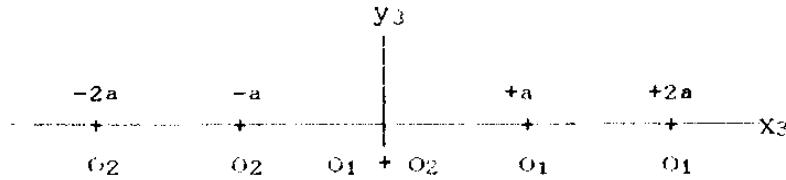


그림 3-8. 상의 가감산을 위한 광학계

는

$$\begin{aligned}
 t(f_x, f_y) &= O(f_x, f_y) \times G(f_x, f_y), \\
 &= (m/2)\{O_1(f_x, f_y) + O_2(f_x, f_y)\} \\
 &\quad + \{O_1(f_x, f_y)\exp(+j2\pi f_x a) + O_2(f_x, f_y)\exp(-j2\pi f_x a)\} \\
 &\quad + (m/2)\{O_1(f_x, f_y)\exp(+j4\pi f_x a) + O_2(f_x, f_y)\exp(-j4\pi f_x a)\}
 \end{aligned}$$

으로 주어지게 된다. 출력면에서의 진폭분포 $O(x_3, y_3)$ 는 $t(f_x, f_y)$ 의 역Fourier 변환에 비례하므로



와 같이 되어 결국 원점 즉, 광축상에서 두개의 입력영상의 합이 얻어짐을 알 수 있다.

나. 상의 감산 (Image Substraction)

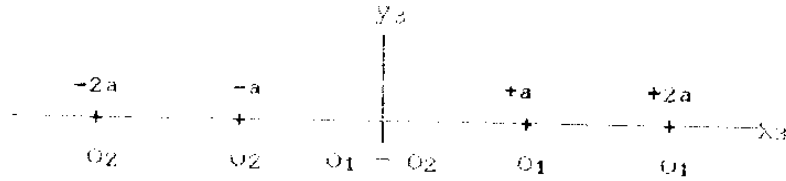
진폭투과율이 각각 $O_1(x_1, y_1)$, $O_2(x_1, y_1)$ 인 두개의 이차원 영상의 차이를 얻는 영상처리는 여러분야에 활용될 수 있는 중요한 방법의 하나이다. 이는 그림 3-8에서 원터면위에 sine grating을 정치서킴으로써 가능하다. Sine grating의 진폭투과율 $G(f_x, f_y)$ 는

$$\begin{aligned}
 G(f_x, f_y) &= 1 + m \sin(2\pi f_x a), \\
 &= 1 + (j/2) m \{ \exp(-j2\pi f_x a) - \exp(+j2\pi f_x a) \},
 \end{aligned}$$

으로 주어지므로 회절기자를 투과한 직후의 진폭분포 $t(f_x, f_y)$ 는

$$\begin{aligned}
t(f_x, f_y) &= O(f_x, f_y) \times G(f_x, f_y), \\
&= (jm/2) \{ O_1(f_x, f_y) - O_2(f_x, f_y) \} \\
&\quad + \{ O_1(f_x, f_y) \exp(+j2\pi f_x a) + O_2(f_x, f_y) \exp(-j2\pi f_x a) \} \\
&\quad - (jm/2) \{ O_1(f_x, f_y) \exp(+j4\pi f_x a) - O_2(f_x, f_y) \exp(-j4\pi f_x a) \}
\end{aligned}$$

으로 주어지게 된다. 따라서, 출력면에서의 진폭분포 $O(x_3, y_3)$ 는



이 되어 출력면의 광축상에서 두개의 이차원 영상의 차이를 얻을 수 있다.

그런데, 실제 실험에서는 두개의 평면파의 간섭으로 얻어진 cosine grating을 f_x 축 방향으로 약간 이동시켜 90도 반전 위상차를 줌으로써 sine grating을 실현시킨다.

제 5 절 실험

1. 액정 TV를 이용한 공간광변조소자의 제작

본 실험에 사용된 흑백 액정 TV는 CASIO 회사의 모델 TV-45 제품으로 화면은 40 mm × 60 mm 크기이고 액정 cell의 갯수는 130 개 × 180 개였으며 각 액정 cell의 크기는 320 μm × 320 μm가 되었다. 비디오 입력단자는 부착되어 있지 않았기 때문에 제품을 해체하여 전자회로를 정밀 조사한 후 비디오 입력 단자를 새로 제작하여 부착하고 간유리판을 제거한 뒤에 액정 TV 화면을 광축에 대해 수직하게 되도록 개조하였다. CCD 카메라로 포

민조도가 일정한 입력 영상을 비디오 입력단자를 통해 액정 TV 화면에 나타나게 하고 이 빛에 $0.6328 \mu\text{m}$ 파장의 He-Ne 레이저 (5 mW, TEM₀₀) 광의 빔직경을 빔확대기로 50 mm 가 되도록 확대하여 얻은 가간섭 평행광 즉, 평면파를 입시시킨 후 bias 전압을 변화시켜 가면서 투과특성을 조사하였다. 그림 3-9는 그 결과이다. 이로부터 최대 contrast 를 얻으려면 적당히 bias 전압 즉, brightness 를 조절할 필요가 있음을 알 수 있다.

그런데, 레이저광이 액정 TV 를 투과한 직후에는 빔단면에서는 아무런 무늬도 나타나지 않으나 광축에 따라 진행할수록 복잡한 회절

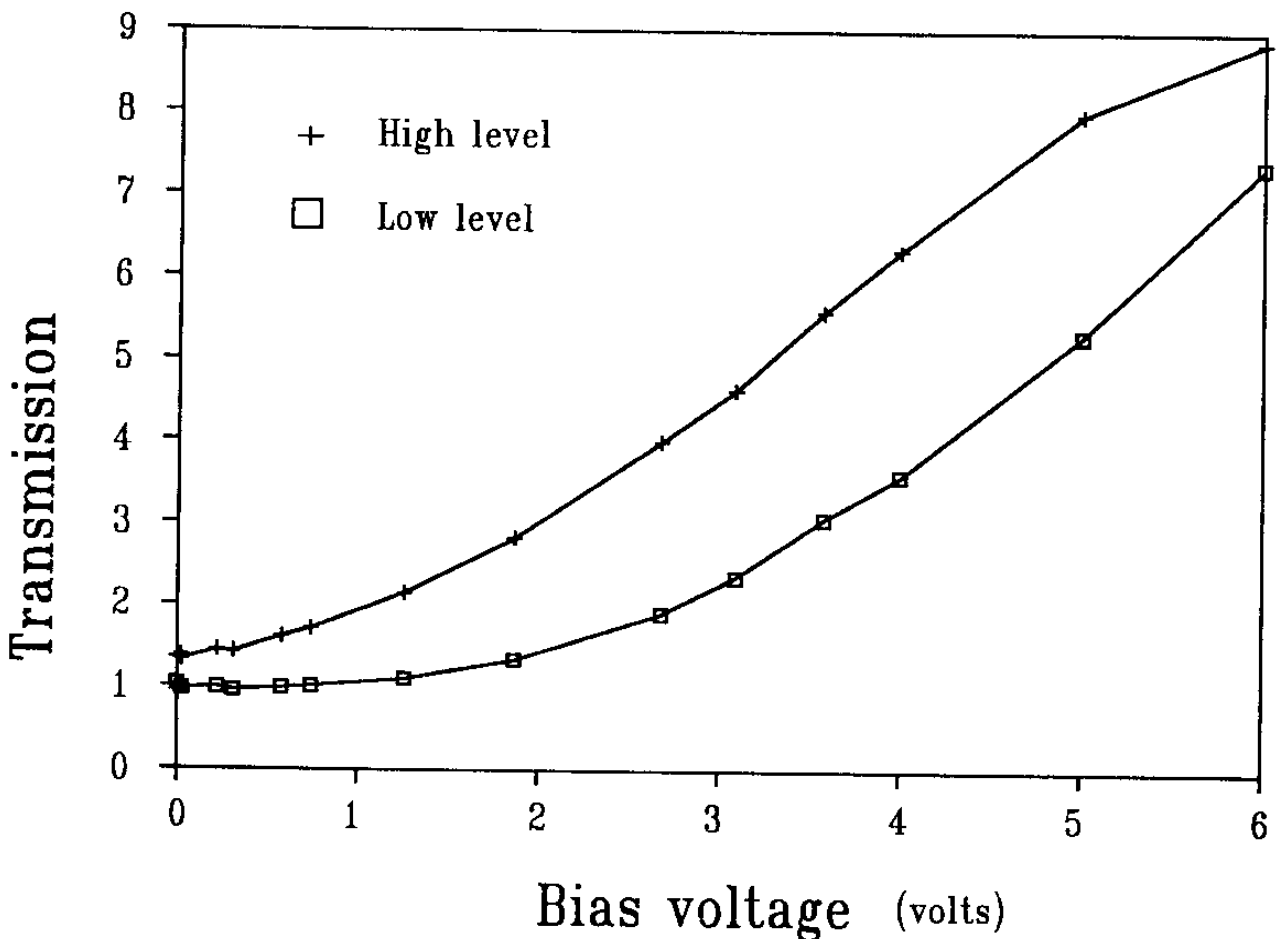


그림 3-9. Bias 전압에 따른 투과율 변화
(CASIO Model TV-45 LCTV)

및 간섭무늬가 나타남을 알 수 있었다. 이 현상은 액정 TV에 부착되어 있는 편광기의 표면상태가 안 좋기 때문에 발생하는 것을 알았으며 이를 해결하고자 본래 액정 TV 양면에 부착되어 있는 편광기들을 뜯어내고 성능이 좋은 편광기를 액정 TV의 전후에 위치시켜 사용하였다. 그 결과 투과광의 단면에서 관찰되던 간섭 및 회절무늬가 거의 제거되었으며 contrast도 현저히 증가함을 알 수 있었다. 사용된 두개의 편광기의 편광방향과 bias 전압에 따라 액정 TV를 통해 형성되는 가간섭 영상의 상반전이 발생하는 것을 관찰하였으며 또한, contrast도 같이 변화함을 알 수 있었다. 실험결과 본 실험에 사용된 액정 TV에서는 brightness를 최소로 하고 두개의 편광기의 편광방향이 서로 직교하도록 해 줄 때 contrast가 1:10으로 최대가 됨을 알 수 있었으나 형성되는

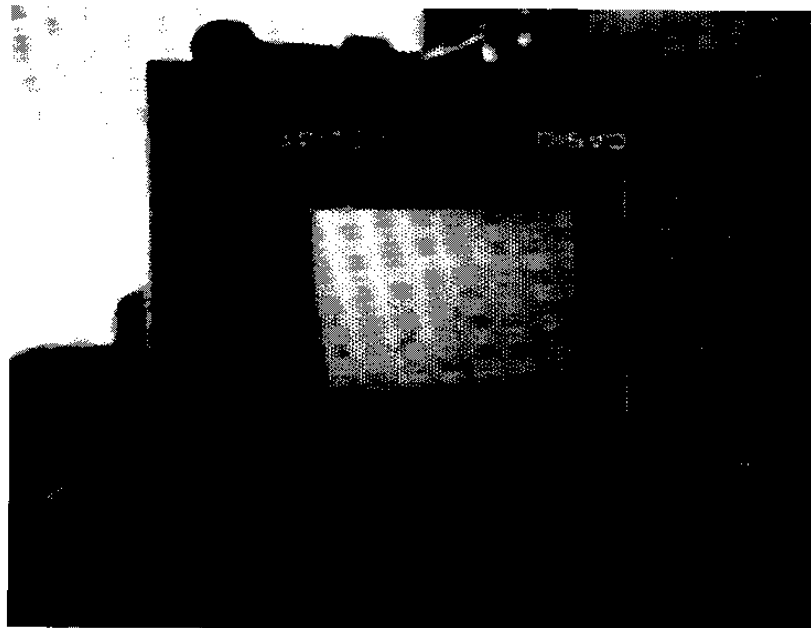


그림 3-10. 개조된 흑백 액정 TV(CASIO model TV-45).

가간섭 영상의 intensity는 반대로 최저가 됨을 알 수 있었다. 그림 3-10은 개조된 액정 TV의 모습이다.

액정 TV 화면에 레이저 광을 입사시키고 투과광을 그대로 Fourier 변환렌즈로 Fourier 변환 시킨 결과 그림 3-11 과 같이 이차원 회절격자에 의한 회절무늬와 유사한 패턴이 형성됨을 관찰하였다. 이는 액정 TV 화면을 구성하고 있는 액정 cell 간의 간격이 대략 0.3 mm 이기 때문에 기인된다.

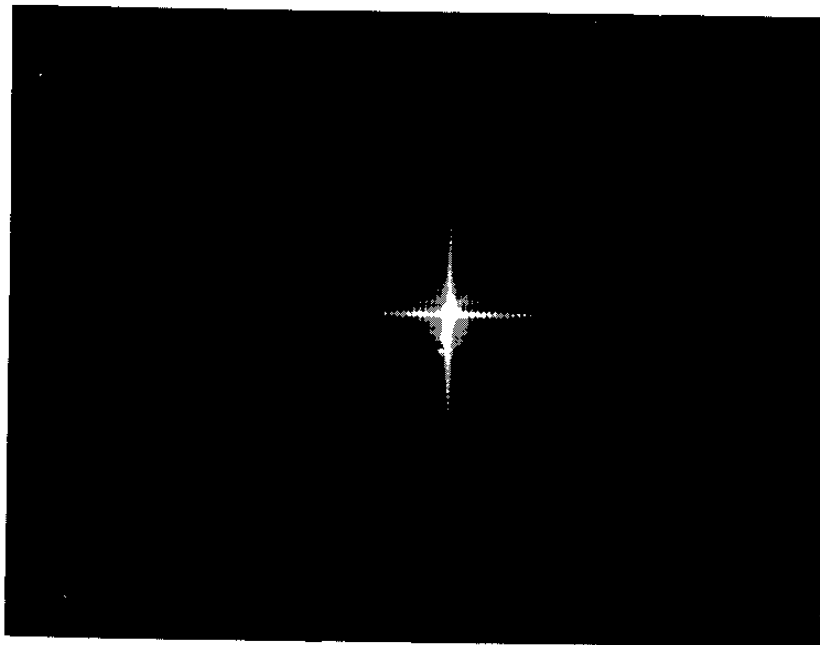


그림 3-11. 액정 TV 화면에 대한 Fourier 스펙트럼

2. 영상처리 광학계 구성

그림 3-6 과 같은 영상처리 광학계를 구성하는 데에는 0.6328 μm 파장의 출력이 5 mW인 He-Ne 레이저와 spatial filter 를 사용하는 빔확대기, 초점거리가 350 mm이고 구경이 70 mm인 두개

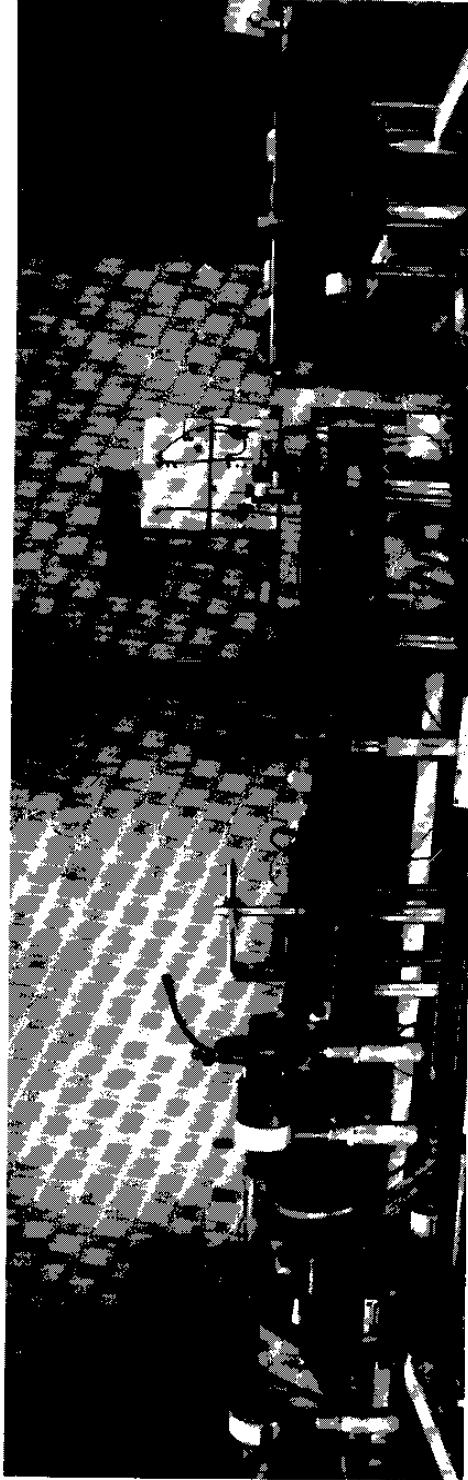


그림 3-12. 사용된 영상처리 광학계

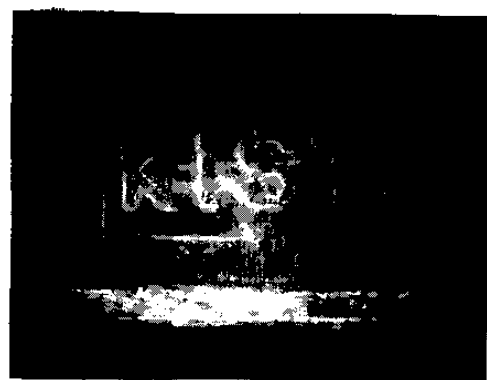
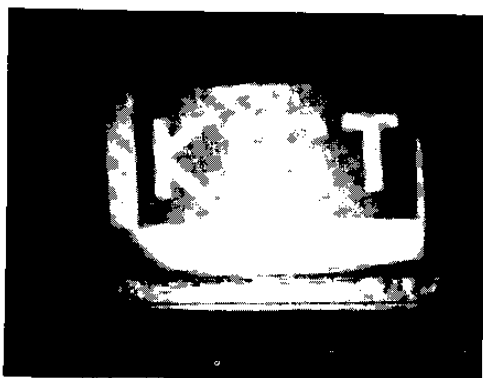
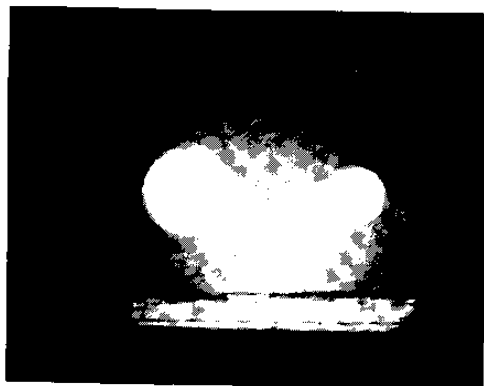
의 Fourier 변환렌즈가 사용되었다. 입력면에는 앞에서 영상처리에 적합하게 개조한 흑백 액정 TV를 위치시키고 이 전후에 polarizer와 analyzer를 위치시켰으며 소형 CCD 카메라에 의해 결상된 상은 비데오단자를 통해 입력면에 위치한 액정 TV로 보내어지며, 필터면에는 공간주파수필터나 sine grating을 정확히 후초점평면에 정치시키고자 삼차원 미세이동장치가 부착된 고정판이 놓이도록 구성하였으며 출력면에는 간유리판을 위치시켜 출력상을 관찰하고 폴라로이드 카메라로 출력상을 기록하였다. 그림 3-12는 본 실험에 사용된 영상처리 광학계이다.

3. 실시간 Edge Enhancement 실험

우선 Edge Enhancement에 필요한 high pass spatial filter를 제조하였다. 이는 앞에 이론에서 언급되었듯이 Fourier 변환렌즈의 aperture에 의한 Fourier 스펙트럼에서 형성된 Airy disk의 직경이 최적 필터가 되므로 입력면에 액정 TV가 위치하지 않았을 때 단지 50 mm의 빔직경을 갖는 레이저 평면파를 Fourier 변환렌즈에 입사시키고 이 렌즈의 후초점평면상에 649 F 필름을 놓아 노출시킨 후 현상, 정착 과정을 거쳐 Airy disk와 같은 하나의 점형태의 상을 기록함으로써 high pass spatial filter를 제작하였다. 그런데, 액정 TV 화면을 구성하고 있는 이차원 어레이 형태의 액정 cell들 때문에 그림 3-11과 같은 패턴이 필터면상에 형성되며 이 패턴의 각 점들을 중심으로 입력 영상의 Fourier 변환 성분이 같이 형성되기 때문에 앞에서 제작

한 high pass spatial filter를 필터면에 그대로 정치하면 출력면에서는 제대로 영상처리가 얻어질 수 없게 된다. 이로 인해 필터면에는 D.C. 성분 주위의 공간주파수성분만을 투과시키는 low pass spatial filter를 high pass spatial filter와 같이 정치시켜야 한다. 이때 low pass spatial filter의 직경은 가능한 입력영상의 공간주파수 성분이 많이 투과되도록 설정해야 하며 Airy disk의 직경보다는 더 크도록 해줘야 한다.

그림 3-13은 이러한 방법으로 얻어진 실시간 Edge Enhancement의 결과이다. 이로부터 본래의 목적에 잘 부합되는 영상처



입력 영상

처리 결과

그림 3-13. 실시간 Edge Enhancement 결과

리 결과가 실시간으로 얻어짐을 알 수 있으며 여기서 입력영상은 필터면에 필터를 정치하지 않은 상태에서 액정 TV 화면에 입력된 영상이 출력면에서 1:1로 결상된 것을 기록한 것이다. 이로부터 액정 TV의 contrast가 낮기 때문에 입력영상주위에도 어느정도 투과광이 있음을 알 수 있다. 또한, 영상처리 결과에 대한 사진에서 보듯이 가간섭 광학계에 의한 영상처리에서 항상 수반되는 노이즈가 포함되어 있음을 볼 수 있다.

4. 실시간 상의 가감산 실험

상의 가감산에 필요한 sinusoidal 회절격자를 우선 제작하였다. 빔확대기로부터 출사되는 레이저 평면파를 광분할기와 평면거울을 이용하여 작은 각도에서 서로 간섭하도록 해주고 이 곳에 649 F 필름을 놓아 노출시킨 뒤에 현상, 정착과정을 거쳐 회절격자를 제작하였다. 필름의 exposure와 현상시간을 조절함으로써 회절효율이 높고 ± 1 차의 회절광을 제외한 고차 회절광이 최소가 되도록 하였다. 그림 3-14는 이렇게 해서 제작된 sinusoidal 회절격자의 Fourier 스펙트럼이다. 이로부터 ± 1 차의 회절광을 제외한 고차 회절광이 거의 안 보이므로 제작된 회절격자는 sinusoidal 회절격자의 특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 제작된 회절격자를 필터면에 정치시키고 입력영상이 없을 때 출력면에 형성된 상을 관찰해 보면 선형 간섭무늬가 보임을 알 수 있다. 이것은 회절격자가 Fourier 변환렌즈의 후초점평면에 정확히 정치되어 있지 않을 때에 회절격자로부터 회절되는 회절광사이의 간섭에 의해



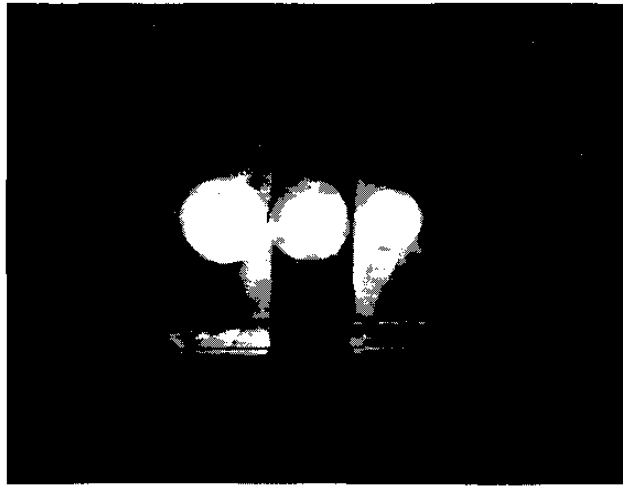
그림 3-14. 제작된 sinusoidal 회절격자의 Fourier 스펙트럼

형성되는 간섭무늬이다. 회절격자의 위치를 조금씩 광축에 따라 이동해 보면 Fourier 변환렌즈의 후초점평면에 근접할수록 점차로 선형간섭무늬의 간격이 넓어짐을 알 수 있었으며 최대로 넓어졌을 때에 회절격자는 정확히 정지됨을 알 수 있었다. 그런데, 입력면에 액정 TV가 없을 때에는 이 선형간섭무늬가 제대로 직선형태를 갖고 있으나 액정 TV를 입력면에 위치시켰을 때에는 전반적인 선형간섭무늬는 제대로 보이나 직선이 약간씩 곡선 형태로 변조되어 있음을 알 수 있었다. 이는 액정 TV를 구성하는 데 사용된 두개의 얇은 유리판의 평탄도가 광학적으로 완전하지 않기 때문에 평면파가 이곳을 투과할 때 위상변화가 발생되어 일어나는 현상이다. 이를 해결하려면 두개의 유리판위에 다시 광학적인 평탄도가 매우 좋은 얇은 유리판을 부착하고 이 사이에 유리와 같은 굴절율을 갖는 액체를 넣어야 하는 데 전반적인 선형간섭무늬가 제대로 보임을 고려하면 영상처리 결과에는 큰 영향이 없을 만큼 액정 TV에 의한 위상 오차가 적다고 판단되어 본 실험에서는 그대로 사용하였다.

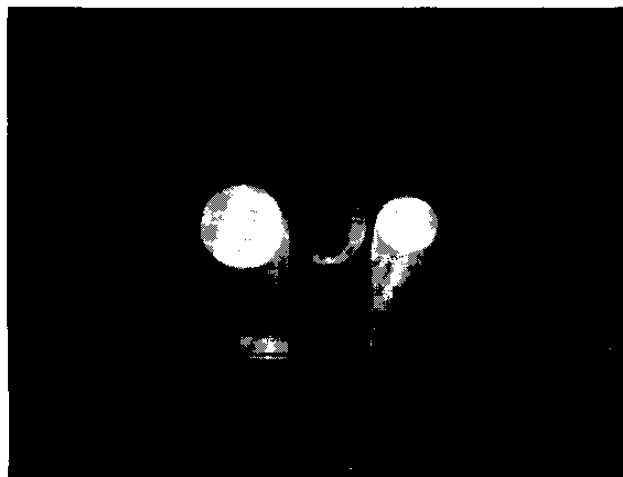
그런데, 이 경우에도 앞에서와 마찬가지로 액정 TV 화면의 Fourier 스펙트럼 때문에 필터면에 회절격자와 함께 D.C. 성분 주

위의 공간주파수 성분만을 통과시키는 low pass spatial filter가 장치되어야 한다. 이 필터의 직경은 1.4 mm 이었다. 이로 인해 입력영상의 공간주파수 성분 가운데 약 4 lines/mm 이상의 성분은 cutoff 됨을 알 수 있다. 이것은 본 실험에 사용된 액정 TV의 액정 cell 들의 크기가 비교적 크기 때문에 기인한다. 상의 가감산을 하려는 두개의 입력영상을 CCD 카메라로 결상할 때 앞에서 제작한 sinusoidal 회절격자의 ± 1 차 회절패턴사이의 간격으로 액정 TV 화면위에 두개의 입력영상이 형성되도록 배율을 조절하고 출력면에 형성되는 영상을 관찰하면서 필터면의 회절격자를 광축에 수직하게 조금씩 이동하면 출력면의 원점 즉, 광축상에서 두개의 입력영상이 서로 가감산을 교대로 하는 것을 관찰할 수 있다. 그런데, 사용된 액정 TV의 낮은 contrast 때문에 입력영상의 어두운 부분에서도 액정 TV 화면을 그대로 투과한 빛이 존재하게 되어 출력면에서 상의 가감산이 관찰되는 위치에 세기가 약하고 균일한 빛이 존재함을 알 수 있다. 이로 인해 상의 가감산을 관찰해 보면 이상한 간섭 무늬로 변조되어 있음을 알 수 있다. 이를 해결하기 위해서 미리 액정 TV 화면상에 형성되는 두개의 입력영상 사이의 빈 공간을 통해 입사 평면파가 투과되는 것을 막기 위해 이 부분을 빛이 투과하지 못하도록 하였다.

이렇게 하여 직경이 서로 다른 두개의 원 형태의 입력영상에 대해 상의 가감산을 실험한 결과는 그림 3-15와 같다. 이로부터 실시간으로 상의 가감산이 제대로 이루어짐을 알 수 있다.



상의 가산



상의 감산

그림 3-15. 실시간 상의 가감산 실험결과

제 6 절 결 론

본 연구에서는 시중에서 판매되고 있는 8만원대의 저가격 액정 TV를 개조하여 만든 공간광변조소자를 이용하여 영상의 테두리만을 관찰할 수 있는 Edge Enhancement와 두개의 영상사이

의 차이 또는, 합을 관찰할 수 있는 Image Addition and Substraction 등의 광학적 영상처리를 실시간으로 구현해 보고자 하였다.

실험결과 간단한 영상처리에는 사용이 가능함을 알 수 있었으며 좀 더 고분해능의 액정 TV를 사용한다면 비교적 복잡한 형태의 영상에 대해서도 좋은 영상처리 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 3-1. Bahram Javidi, "Industrial Applications of Optical Signal Processing ", Opt. Eng. Vo. 27, 257 (1988).
- 3-2. "Special Issue on Spatial Light Modulators", Opt. Eng. Vo.17 (1978).
- 3-3. Yao Li, et al, "Liquid crystal TV-based white light optical tracking novelty filter ", Appl. Opt. Vo.28, 4861 (1989).
- 3-4. Don A Gregory, "Real-time pattern recognition using a modified liquid crystal television in a coherent optical correlator", Appl. Opt. Vo.25, 467 (1986).
- 3-5. Hua-Kuang Liu and Tien-Hsin Chao, "Liquid crystal television spatial light modulators", Appl. Opt. Vo.28, 4772 (1989).
- 3-6. J.X. Goodman, Introduction to Fourier optics, McGraw-Hill Book Co. N.Y., 1968.
- 3-7. Optical Data Processing, edited by D. Casasent, Springer-Verlag N.Y., 1978.

주 의

1. 이 보고서는 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.