

제 1 차 년 도
연 차 보 고 서



Machine Failure Diagnosis Sensor 개발 연구(1 차년도)

Development of Machine Failure Diagnosis Sensor

연구기관
한국과학기술연구원

과 학 기 술 처

제 출 문

과학기술처장관 귀하

본 보고서를 “공업용 센서의 종합연구”사업의 세부과제인
“Machine Failure Diagnosis Sensor개발연구”사업의 연차 보고서로 제출합니다.

1990년 8월 일

연구기관명: 한국과학기술연구원

연구책임자: 권오관(기계공학부장책임연구원)

안효석(Tribology연구실 선임연구원)

연구원: 손정영(응용전자연구실 책임연구원)

강기호(응용전자연구실 연구원)

전형욱(응용전자연구실 위촉연구원)

윤의성(Tribology연구실 위촉연구원)

요 약 문

I. 제 목

Machine Failure Diagnosis Sensor 개발연구

II. 연구개발의 목적 및 중요성

1. 목 적

- 광의 감쇄를 이용한 기계윤활 oil의 aging과 오염상태를 정량적으로 측정할 수 있는 동특성 범위가 10^6 이상 되는 광센서의 개발
- 광센서 관련 신호처리 회로 개발

2. 중요성

- 대형 기계류는 막대한 초기투자 및 보수 유지비를 요구
- 대형 회전 기계류의 고장시 생산손실이 아주 큼
- 효율적인 장비 점검을 통해 대형기계류의 수명연장 및 성능개선이 가능

III. 연구개발의 내용

- 기계시스템에 쓰이는 oil의 광학적 특성 측정을 위한 기본 시스템 구성
- 마모입자의 참가에 따른 윤활유의 광학특성 변화조사

IV. 연구개발의 결과 및 활용에 대한 건의

- 마모입자의 농도를 측정하는 시스템은 평행 레이저 빔, sample holder, polarizing beam splitter, 그리고 photo diode assembly 로 간단히 구성할 수 있었다.
- 마모 입자의 농도에 대한 정보는 입자의 산란과 윤희유리의 흡수에 의해 일어나며 실험과 수치 해석에 의해 감쇄정수를 구했다.
- 감쇄상수는 마모입자의 농도가 작은 영역 (2000 ppm 까지)에서 선형적이었다.
- 회절패턴 측정 시스템은 평행 레이저 빔, Fourier 변환 렌즈, vidicon 카메라, 영상처리기와 모니터 그리고 PC 컴퓨터로 구성할 수 있었다.
- 마모입자계에 대한 회절패턴으로부터 입자계의 사이즈 분포를 추정할 수 있었는데, 이것에는 에너지 분포함수를 이용했다.
- 마모입자의 산란에 따른 감쇄함수 (σ_s)가 이론치와 많은 차이를 보인 점은 금후의 주요 연구과제이다.
- 광 검지기의 최소 검지가능 광강도가 $1\mu\text{W}$ 라고 가정할 경우 50 ppm의 구조토를 검출하기 위해서는 약 1mm의 oil depth를 필요로 한다.
- 현재의 1cm holder에 의해서는 약 0.2 ppm까지 검출가능했다.

SUMMARY

I. Title

Development of Machine Failure Diagnosis Sensor

II. Objective and Significance of the Study

1. Objectives

- Development of an optical sensor measuring the light attenuation caused by the aged and contaminated lubricating oil. The dynamic range of the sensor will be 10^6 in light intensity.
- Development of a signal processing circuit for the sensor.

2. Significance

- A large machinery requires huge initial investment for installation and enormous maintenance expenses thereafter.
- Production losses due to the failure of the large machinery are huge.
- Extension of the life-cycle and improving the efficiency of the large machinery are possible through the continuous monitoring of the machine condition.

III. Contents and Scope of the Study

- Design and set-up of an experimental optical system for measuring optical characteristics of the lubricating oil.
- Investigation of changes in optical characteristics of the lubricating oil due to the particles added to it.

IV. Results and Recommendation

- The optical system of the sensor composed of a He-Ne laser as light source, a collimating optics, a sample holder, a polarizing beam splitter and a photodiode assembly to measure the transmittance of the sample holder filled with contaminated lubricating oil. The optical system can also measure Fourier transform image of the contaminated particles in the oil for comparison with the transmittance measurement.
- The particle contamination information was deduced from the transmittance measurement by calculating the attenuation coefficient.
- The attenuation coefficient shows almost linear relation with particle concentration for concentrations less than 2000 ppm.
- Diffraction pattern of the particles in the lubrication

oil was analyzed using the image processor.

The dominant particle sizes of the contaminated lubrication oil was estimated by the energy distribution function.

- There is large difference between the theoretical and the experimental attenuation coefficient. More study should be done to explain the difference.
- Making use of matrix transformation in the distribution function and a detector having large dynamic range will give particle distribution information from the measured diffraction pattern.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	13
Chapter 2. Setup of the Contaminant Particle Detection Sensor System	17
Section 1. Measurement of the Properties of Wear Debris by the Optical Attenuation	17
1. Theory of the Optical Attenuation	17
2. Setup of the System	25
Section 2. Measurement of the Properties of Wear Debris by the Diffraction Pattern Analysis	27
1. Theory of the Particle Distribution Estimation by the Diffraction Pattern	27
2. Setup of the System	32
3. Calibration of the System	34
Chapter 3. Results and Discussion of the System	40
Section 1. Experimental Results	40
Section 2. Analysis and Discussion of the System ...	53

Chapter 4. Conclusion	56
References	57
Appendices	59

목 차

제 1 장 서 론	13
제 2 장 Contaminant particle detection sensor	
시스템의 구성	17
제 1 절 광 감쇄 이용 마모입자 특성 측정	17
1. 광 감쇄 이론	17
2. 시스템 구성	25
제 2 절 회절패턴 이용 마모입자 특성 측정	27
1. 회절패턴 이용 입자분포 추정 이론	27
2. 시스템 구성	32
3. 시스템 캘리브레이션	34
제 3 장 실험결과 및 시스템 평가	40
제 1 절 측정 결과	40
제 2 절 시스템 평가	53
제 4 장 결 론	56
참고문헌	57
부 록	59

제 1 장 서 론

윤활유 (Lubricant Oil) 속에 포함된 마모입자 (Wear Debris)의 특성은 그 윤활유와 관계있는 기계류 (Machinery)의 상태와 직접적인 관계가 있다. 그러므로 마모입자 특성의 정확한 규명은 기계류의 마모 진행상태 (Wear Process)에 따라 기계류를 양호한 작동상태로 유지할 수 있어 고장에 따른 생산 손실을 방지할 수 있고, 효율적인 정비점검을 통한 수명연장 및 기계류의 개선을 위한 정보도 제공한다. 기계류의 마모상태와 관련있는 마모입자의 중요한 특성은 크기분포 (Size Distribution), 단위체적당 입자수 (Concentration), 구성물질 (Composition) 그리고 형태이다. 구성물질의 측정은 기계류의 어느 부분이 열화했는지에 대한 단서를, 형태는 어떤식의 열화 (Failure Mode)가 일어났는지에 대한 해답을 준다. 그러므로 기계류의 상태감시 (Condition Monitoring)를 위한 마모입자의 특성 측정은 기계류의 신뢰성 및 작업능률 증진을 위해서 꼭 필요하다.

윤활유에 포함된 입자는 주로 Ferrous 물질계통의 금속, 산화금속 (Metal Oxide) 또는 금속 부식물 (Corrosion Deposits), Ingested Dirt, 연소과정에서 생기는 탄소, 필터나 가스켓, 그리고 물질에서 생기는 Polymer나 Fiber 등으로 되어 있다. 그러나 실제로 마모상태를 나타내는 것은 Tribological Interaction에 의해 생기는 입자들로서 이것은 Ferrous계통 입자

들이므로 기계류의 상태감시를 위해서는 Ferrous 입자를 다른 입자들과 분리하는 것이 필요하다.

현재 마모입자 특성 측정장비로 많이 쓰이고 있는 것은 Ferrous 입자만을 추출하기 위하여 자기력 (Magnetic Force) 을 이용하는 것으로 Ferrography, Rotary Particle Depositor, Magnetic Plug 그리고 Particle Quantifier(또는 Debris Tester) 등이 있다.

그러나 상기의 장비들은 자체로서는 단위체적당 마모입자수에 관한 정보를 얻을 수는 있지만, 크기 분포나 형태 또는 구성물질 측정을 위해서는 Optical Density 측정장비나 Microscope (Bichromatic 또는 Scanning Electron) 또는 X-ray Energy Analysis 장비의 도움을 얻어야 하므로 많은 측정시간이 요구되며 또한 전문가의 도움이 필요하다. 또 이 장비들은 마모입자의 추출에 의한 Inspection을 행하므로 In-Situ 측정 방법이 아니며 또한 연속적인 것이 아닌 단속적인 측정을 행한다. 또 이 장비들의 응답가능 마모입자의 크기 범위 (Size Range)는 Ferrography가 1-20 μm , Rotary Particle Depositor와 Particle Quantifier가 1-50 μm 그리고 Magnetic Plug가 25 μm 으로 마모입자의 크기 범위 (대략 0.01-100 μm)중 일부만 측정 가능하다. 더우기 Ferrography의 상용은 비용이 많이 든다. Spectrometric(또는 Spectroscopic) oil Analysis 장치는 Ferrous 입자를 분리하지 않고 채집된 윤활유에서 직접 마모입자의 구성물질을 측정할 수 있으나 마모입자의 크기가 10 μm 이상일때

는 사용할 수 없고 마모입자의 형태나 크기 분포 등에 대한 정보는 얻을 수 없다. 여과(Filter)에 의한 방법은 마모입자의 크기에 상관없이 없으나, Ferrous 입자의 분리가 어려워 사용이 어렵다. Image Analysis에 의한 마모입자의 크기 및 형태 측정은 입자의 수에 비하여 영상분석에 소요되는 시간이 엄청나므로 사용 가치가 별로 없다. 광기술의 마모입자 측정분야에의 응용은 Ferrugraphy에 연결된 Optical Density 측정이나, Image Analysis 그리고 Spectrometric oil Analysis 등 극히 초보적인 것들이다.

최근에는 레이저와 광파이버를 이용하여 회전자계내에서 운동하는 마모입자에서의 반사광 특성을 Fourier Spectral Analysis를 통하여 각개 입자의 크기와 형태를 측정하는 방법이 개발되었다[1]. 그러나 이 방법은 마모입자에 의한 반사광의 형태를 자계회전 방향에 따라 연속적으로 측정하므로, 형태가 불규칙적인 입자의 측정은 어렵고 또한 그 원리상 마모입자의 단위체적당 입자수가 적어야 하며, 즉 두개의 상이한 입자가 겹쳐져 있지 않아야 한다. 입자와 파이버의 상대적인 거리에 따라 그 응답 특성이 크게 달라지고, 입자의 분포에서 큰 입자는 회전자계와 가까운 곳으로, 작은 입자는 Cell의 중심부로 모이므로 상대적으로 미세한 크기 입자와 응답은 얻지 못하여 실용화에는 아직 문제가 많다. 입자 크기 측정을 위한 광산란 특성의 이용은 Optical Microscope가 개발되고 난 후 부터라고 볼 수가 있는데 60년대 이후 레이저의 개발과 더불어 그 발전속도를 더하여 왔다. 이와같

이 마모입자 특성 분야에 있어 광기술의 1차적인 응용이 늦은 것은 윤활유에 의한 광의 흡수와 광의 전달매체 및 광원의 부재 때문일 것이다. 그러나 최근에는 광섬유의 개발과 광 탐지기 (photodetector)의 감도향상 및 High Intensity 광원의 개발로 윤활유에 의한 광흡수는 큰 문제가 아닐 것 같다. 현재 실시간 (real time) 마모입자 측정 장치로서는 FCM(Fluid Condition Monitor), WDM(Wear Debris Monitor), DM10(Debris Monitor 10) 및 Magnetic Chip Collector 등이 있으나 여러가지 문제점이 있다.

그러므로 본 연구는 레이저 광의 감쇄를 이용한 In-Situ 방식의, 기계 윤활 oil의 Aging과 오염상태를 정량적으로 측정할 수 있는 동특성 범위가 10^6 이상되는 광센서를 개발하는데 그 목적이 있다. 1차 년도는 기계시스템에 쓰이는 oil의 광학적 특성 측정을 위한 기본 시스템을 구성하고 마모입자의 첨가에 따른 윤활유의 광학특성 변화와 관련한 Software 및 변화 정도를 측정한다.

제 2 장 Contaminant Particle

Detection Sensor 시스템의 구성

유탈 상태하의 기계의 상태를 진단하는 방법은 기계내의 유탈유를 분석하여 유탈유 자체의 특성변화 및 유탈유 내의 마모입자들의 함유 상태를 분석하는 것이다. 이 분석에서 마모입자의 정성적 변수로서는 마모입자의 유형별 특징, 입자의 morphology 등이 있고 정량적 변수로서는 입자의 크기 및 크기 분포, 농도 (concentration)와 마모입자의 성분 (composition) 등이 있다.

본 연구에서는, 일차적으로 정량적 변수들의 분석을 위해 다음 두 종류의 실험 장치를 구성했다. 하나는 마모입자의 농도와 유탈유의 노화상태를 알기위한 시스템 (광 감쇄 이용 마모입자 특성 측정 시스템)이며 다른 하나는 마모입자의 농도 및 크기 분포를 알기 위한 시스템 (회절 패턴 이용 마모입자 특성 측정 시스템)이다.

제 1절 광 감쇄 이용 마모입자 특성 측정

1. 광 감쇄 이론 (Optical attenuation theory)

광 감쇄를 이용하여 유탈유내의 마모입자 농도 및 유탈유 노화상태를 측정하기 위해서 그림 1 과 같이 실험장치를 구성하였다. 그림1에서 보듯이 sample holder 내에는 유탈유와 마모입자가 들어

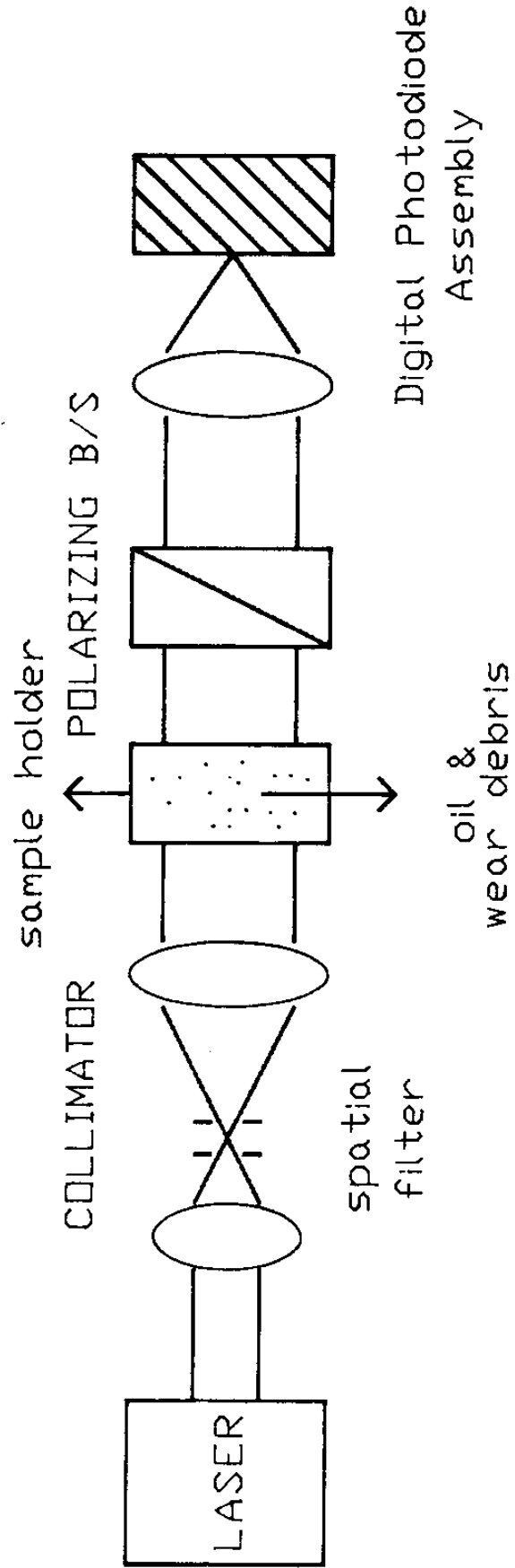


그림 1. 광 감쇄 이용 마모입자 특성 측정 장치

있고, 여기를 평행레이저 빔이 통과 했을 때, 입사광의 감쇄는 마모입자에 의한 산란효과와 윤활유에 의한 흡수효과 그리고 다른 성질의 매질에 입사할때 생기는 반사에 의한 것이다.

Sample Holder는 내부용적이 4 cc인 직육각형의 마주보는 두면이 polished된 silica glass용기이다. 이 silica gla-

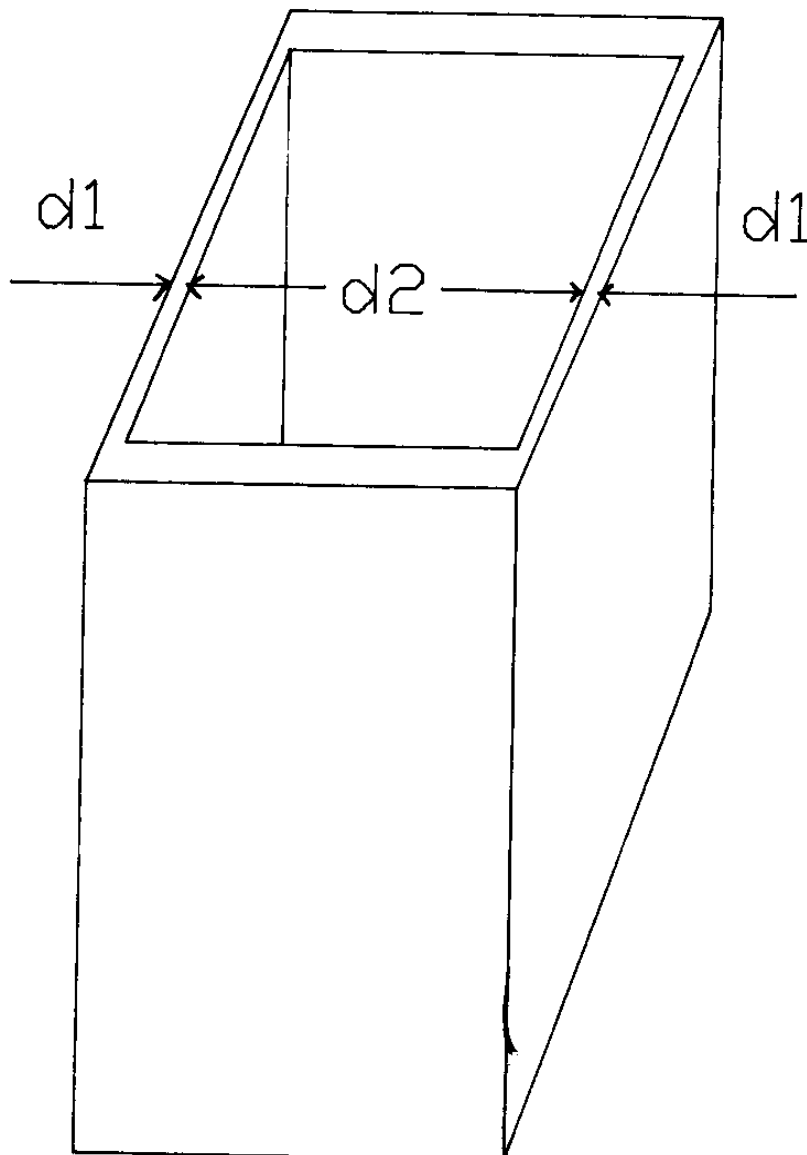


그림 2. 윤활유와 마모입자 샘플의 용기
(sample holder)

ss 용기내에 oil이 있을때와 없을때의 산란효과 (scattering effect)와 흡수효과 (absorption effect)에 의한 빛의 감쇄현상을 수식적으로 표현하기 위해 그림 1의 sample holder 부분을 그림 2와 같이 확대 도식한다.

입사광이 이 glass에 수직으로 입사된다고 할 때 glass의 각 부분에서 주어지는 입사광의 변화를 그림 3과 같이 표현할 수 있다.

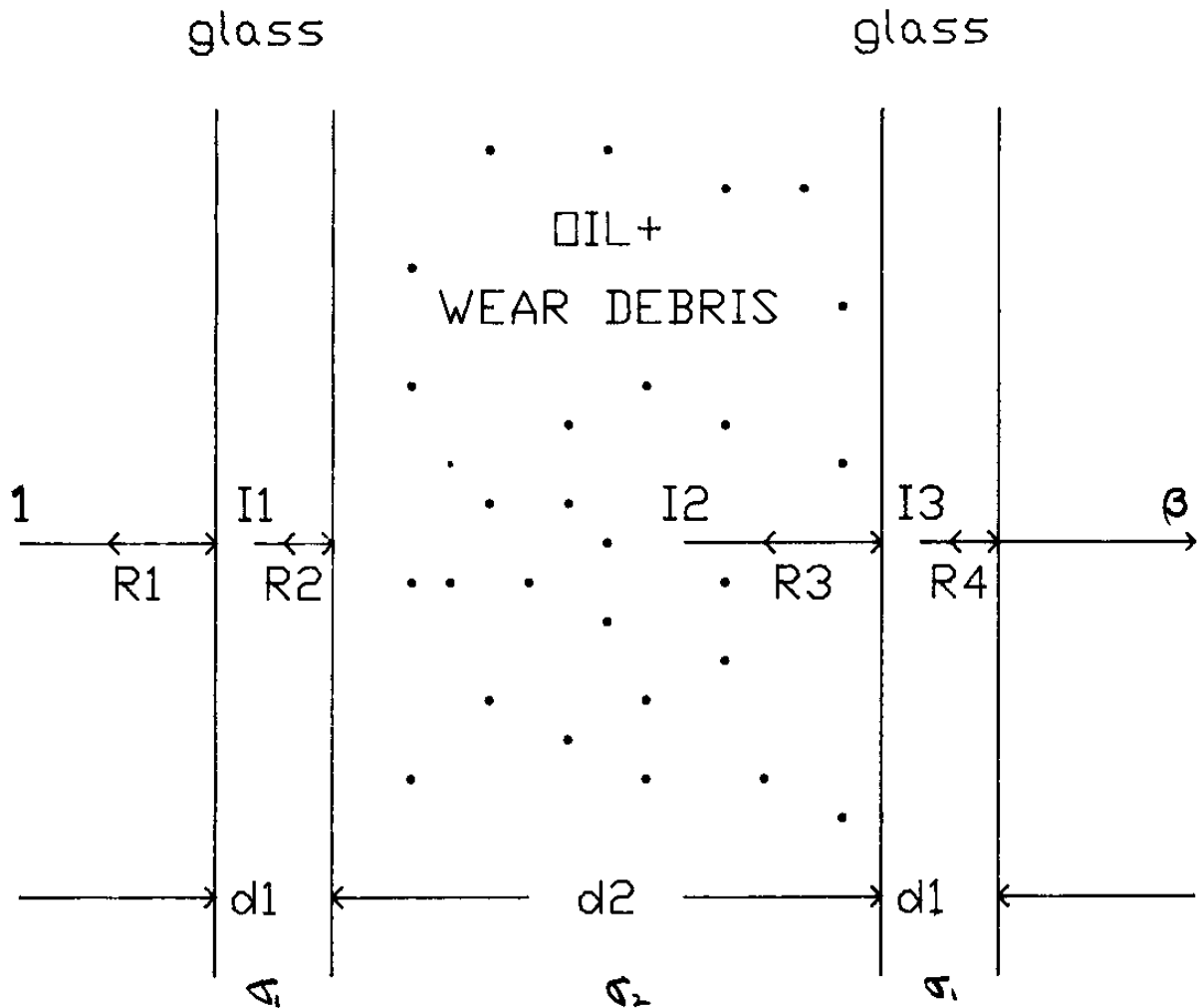


그림 3. 그림 2의 측면도

그림 3에서 입사광을 1, Holder의 표면 각 부분을 입사하는 광과 이때에 생기는 반사율을 각각 I_1, I_2, I_3 와 R_1, R_2, R_3, R_4 로 나타내고, β 는 Holder에서의 출력광의 강도를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \beta &= I_3 - R_4 \\ I_3 &= (I_2 - R_3)e^{-\sigma_1 d_1} \\ I_2 &= (I_1 - R_2)e^{-\sigma_2 d_2} \\ I_1 &= (1 - R_1)e^{-\sigma_1 d_1} \end{aligned}$$

여기서 d_1, d_2 는 Holder의 두께와 내폭을 나타내며 σ_1, σ_2 는 silica유리와 용기내 매질의 감쇄정수이다. 상기의 4개의 식을 연립하여 β 에 관해서 쓰면,

$$\begin{aligned} \beta &= e^{-(2\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2)} - R_1 e^{-(2\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2)} - R_2 e^{-(\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2)} \\ &\quad - R_3 e^{-d_1 \sigma_1} - R_4 \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

그런데 $R_1 = R_4, R_2 = R_3$ 이므로

$$\begin{aligned} \beta &= e^{-(2\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2)} - R_1 (e^{-(2\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2)} + 1) - \\ &\quad R_2 e^{-\sigma_1 d_1} (e^{-\sigma_2 d_2} + 1) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

여기서 $R_1 = \left[\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right]^2$ (n_1 : 유리의 굴절율)이며 $R_2 = \left[\frac{n_1 - n_2}{n_2 + n_1} \right]^2$

(n_2 : 윤활유의 굴절율)이다.

σ_2 및 n_2 를 구하기 위해서는 먼저 σ_1 을 알고, 다음에 식(2)를 풀면 된다. 그림 3에서 윤활유가 없을 때 즉, Holder가 비어있

을 경우에는 식(2)에서 $\sigma_2 = 0$, $R_1 = R_2$ 이므로

$$\beta_1 = e^{-2\sigma_1 d_1} - R_1 (e^{-2\sigma_1 d_1} + 2e^{-\sigma_1 d_1} + 1) \dots\dots\dots (3)$$

실험에 의해 β_1 을 알면, 식(3)에서 σ_1 을 구할 수 있게 된다. 이 때 식(3)의 해석적 해는 없으므로 수치해석적으로 풀어야 한다. 이렇게 해서 σ_1 을 알게 되면, 식(2)에서 σ_2 를 구할 수 있게 되는데 이때 R_2 값 곧 n_2 의 값을 알고 있어야 한다.

σ_2 의 값은 유효유 자체의 광흡수(optical absorption) 과 유효유에 들어 있는 마모입자에 의한 산란(scattering) 효과에 의해 결정된다. 순수 유효유의 경우 유효유 자체에 의한 광의 흡수율은 거의 0에 가깝다. 따라서 σ_2 를 지배하는 Factor는 마모입자에 의한 광산란 효과이다. 광산란 효과를 정식화(formulation) 하기 전에 σ_2 와 광흡수 및 광산란과의 관계성을 규명해 놓는 것이 필요하다. 본 연구에 사용된 sample holder 및 그 내부에 들어있는 유효유 마모입자는 그림 4와 같이 두 단계를 밟아 광 감쇄를 일으킨다. 여기서 σ_a 은 유효유의 흡수 효과에 의한 감쇄계수이며, σ_s 는 마모입자의 산란 효과에 의한 감쇄계수로서, 최종 감쇄계수 σ_2 는 두 계수의 합으로 표현된다.

먼저 σ_a 는 식(2)에서 유효유에 마모입자를 전혀 넣지 않았을 때 σ_2 값을 구함으로써 얻을 수 있다.

다음에는 σ_s 를 광산란 이론 [2][8]에서 다음과 같이 구할 수 있다. 그림 4에서 $I = I_2 e^{-\sigma_s L}$ 이며 이때 σ_s 는

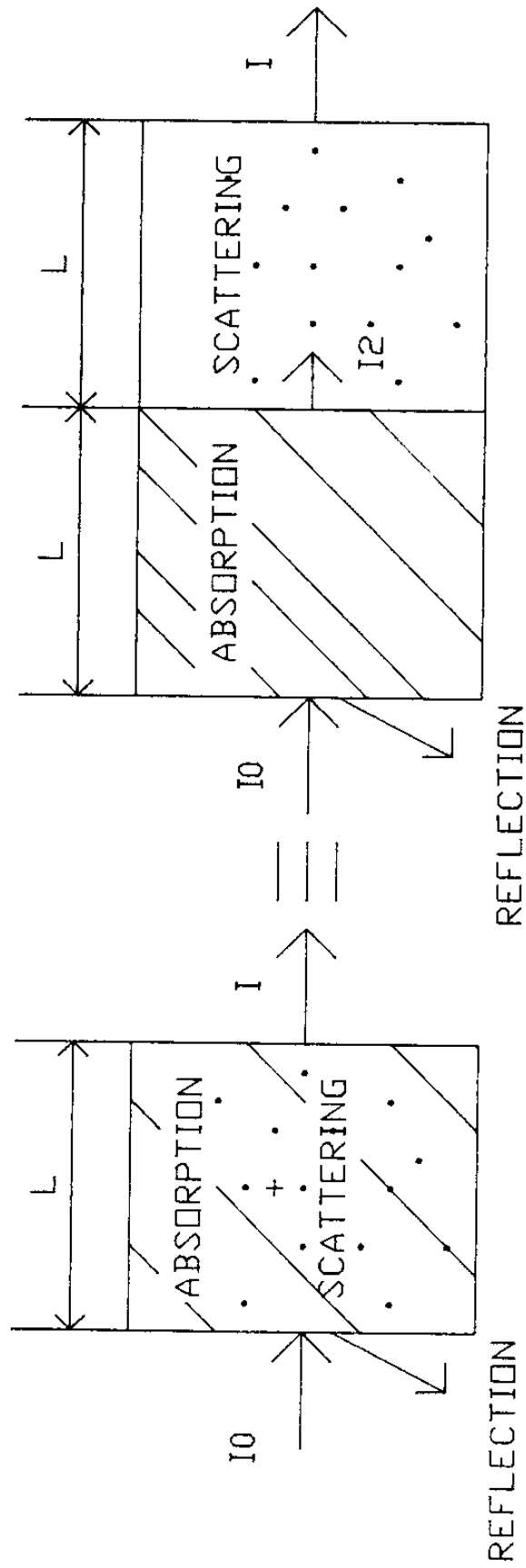


그림 4. 광 감쇄의 기구 (mechanism)

$$\sigma_s = \frac{\pi}{4} \int_0^{D_\infty} C_n Q_s(x, m) N_r(D) D^2 dD \dots\dots\dots (4)$$

- D : 마모입자의 직경
- $N_r(D)$: 입자 분포
- C_n : 단위 체적당 입자수
- $Q_s(x, m)$: Scattering efficiency factor
- m : 마모입자의 굴절율
- x : $x = \pi D / \lambda$: size parameter

여기서 Q_s 는

$$Q_e = Q_s + Q_a$$

Q_e : Extinction efficiency factor

Q_a : Absorption efficiency factor

의 관계가 있는데, Q_a 는 입자에 의한 흡수효과를 나타낸 것이다.

이때 Q_e 는

$$Q_e = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [\text{Real}(a_n) + \text{Real}(b_n)] \dots\dots\dots (5)$$

이며 Q_s 는

$$Q_s = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [|a_n|^2 + |b_n|^2] \dots\dots\dots (6)$$

여기서, a_n 과 b_n 은 n차의 산란계수로서 다음과 같이 주어진다.

$$a_n = \frac{\psi_n'(mx)\psi_n(x) - m\psi_n(mx)\psi_n'(x)}{\psi_n'(mx)\xi_n(x) - m\psi_n(mx)\xi_n'(x)}$$

$$b_n = \frac{m\psi_n'(mx)\psi_n(x) - \psi_n(mx)\psi_n'(x)}{m\psi_n'(mx)\xi_n(x) - \psi_n(mx)\xi_n'(x)} ;$$

$$\psi_n(z) = zj_n(z)$$

$$\xi_n(x) = x[j_n(x) - iy_n(x)]$$

$$\psi_n'(z) = zj_{n-1}(z) - nj_n(z)$$

$$\xi_n'(x) = x[j_{n-1}(x) - iy_{n-1}(x)] - n[j_n(x) - iy_n(x)]$$

이때 j_n 과 y_n 은 각각 제 1종 및 제 2종 spherical Bessel 함수이다.

이상에서, 실험에 의해 σ_s 값을 알면 알려진 분포함수들 즉, Log-Normal, Normal 또는 Rosin-Rammer 등을 이용하여 역으로 C_n 을 알수 있게 된다. 물론 마모입자의 굴절율은 사전에 알고 있어야 한다. 제 2절에서 설명하게 될 회절패턴을 이용하면 마모입자의 대략적인 크기 분포 ($Nr(D)$) 를 구할 수가 있다.

2. 시스템 구성

전체 시스템의 구성은 그림 1 과 같다. 먼저 광원으로는 출력이 최대 5.5 mW인 He-Ne 레이저를 사용하였다. 공간여과기 (spatial filter) 를 통해 레이저 빔의 quality를 높인후 collimator를 사용해 대략 직경 3 mm 정도의 평행빔으로 만들어 sample holder까지 진행하도록 했다. sample holder는 굴절율이 1.46인 silica 유리로된 용적 4 cc와 2 cc의 두종류로서 직육면

체로 만들었다. 유리의 두께는 1.12 mm이며 레이저 빔이 통과하는 길이는 10 mm (4 cc holder) 와 5 mm (2 cc holder)가 된다. 윤활유는 Regal R & O 46 이라는 제품 (굴절율 ≈ 1.46) 을 썼으며, 마모입자는 비철 (non-ferrous) 입자인 규조토 (diatomite) 를 썼다. ferrous 계의 마모입자를 본격적으로 사용하기 전에 규조토를 쓴 것은 일단 샘플로서 만들기가 쉽고, 비교적 원하는 대로 분포를 구할 수 있어서 시스템 설계 및 calibration 에 유리하기 때문이다. 실험에 사용된 규조토의 자세한 제원은 표 1 에 나타내었다.

표 1 . 실험에 사용된 규조토의 제원

#PRODCCTS CHEMICAL ANALYSIS(%)	Nature Ore	# 700	# 500	# 800	# 300
SiO ₂	74.20	83.22	83.22	83.22	84.75
Al ₂ O ₃	11.12	11.85	11.85	11.85	10.92
Fe ₂ O ₃	3.16	2.02	2.02	2.02	2.24
CaO	0.20	0.98	0.98	0.98	0.86
MgO	0.31	0.72	0.72	0.72	0.54
Ignition loss	8.22	0.25	0.25	0.25	0.42
Moisture	3.41	0.35	0.35	0.35	0.37
pH	6-7	6-8.5	6-8.5	6-8.5	6-8.5
Water Soluble		0.134	0.134	0.134	
Sugar Soluble		0.014	0.014	0.014	
Whiteness	Gray	Salmon pink	Salmon pink	Salmon pink	Salmon pink
Bulk density	0.-0.65	0.4-0.7	0.4-0.7	0.4-0.7	0.45-0.6
Specific gra- vity	2.18-2.35	2.18-2.35	2.18-2.35	2.18-2.35	2.18-2.35
PACKING					

Sample holder를 통과한 빛은 편광 빔 분할기(Polarizing Beam Splitter)를 통해 분기되는데 하나는 본 절에서 설명한 광 감쇄 측정을 위해 photodiode assembly로 들어가고, 다른 하나는 제 2절에서 설명하게 될 회절패턴 측정을 위해 vidicon으로 들어간다. 편광 빔 분할기는 비디콘 방향으로 수평 분극 성분만을 통과시키고(수평 분극 에너지는 약 $9 \mu W$) 나머지 수직 분극 성분은 photodiode assembly로 들어간다. photodiode는 resolution이 $0.1 pW$, 동작범위가 $2 pW \sim 2 W$ 인 digital optical power meter를 사용했다. on-line 시스템을 위해 A/D converter 및 관계 회로를 설계중이다.

제 2절 회절패턴 이용 마모입자 특성 측정

1. 회절패턴 이용 입자분포 추정 이론

제 1절의 식(4)에서 σ_s 를 알고 C_n 을 구하려면 먼저 입자의 분포 곧 $Nr(D)$ 를 알아야 한다고 했다. 입자의 분포를 추정(estimation)하는 기법 중 회절무늬 분석법은 그 특성상 다른 복수입자(ensemble particle) 측정 기술들 [3][4][5][6][7]에 비해, 큰 사이즈의 입자들 즉 size parameter($\pi D/\lambda$: 입자의 원주 대 입사광 파장의 비)의 값이 30 이상인 경우에 적용할 수 있으나 [8], 측정이 간편하고 입자의 상대적 위치나 속도, 형태, 굴절을 등의 영향을 가장 작게 받기 때문에 현재 가장 많이 쓰이고 있다.

회절무늬 분석법에도 여러 방법이 있으나 [6][7][9] ring-

wedge detector 이용방법이 가장 이상적인 방식이다. 본 연구에서는 화소수가 512×512 인 비디콘을 detector로 사용하여 ring-wedge detector의 데이터 처리방식을 사용했다. 전체 시스템은 그림 5와 같다. sample holder에 이르기까지는 앞절의 광감쇄 이용 입자 특성측정 시스템과 동일하다. sample holder에서 마모입자에 의해 산란되는 빛은 동시에 회절(diffraction)하면서 편광 빔 분할기를 통해 집광렌즈에 도달하게 되는데 이때 검지기(detector)를 집광렌즈의 초점거리에 두게 되면 마모입자들의 2차원 Fourier 변환이 중첩되어 검지기에 나타나게 된다. 이것을 Fraunhofer 회절이론이라 부른다. 검지기에 나타나는 회절패턴은 구체적으로 다음 식으로 표현된다. 먼저 단일 입자의 경우, 회절 무늬의 강도(intensity) I 는

$$I(s) = \frac{ED}{\lambda^2} \left[\frac{2J_1(2\pi as/\lambda f)}{2\pi as/\lambda f} \right]^2 \dots\dots\dots (7)$$

로 주어진다. J_1 은 Bessel 함수(1차), $s = \sqrt{x^2 + y^2}$ (x, y 는 검지기의 좌표), f 는 집광렌즈의 초점 거리, a 는 입자의 직경, D 는 입자의 단면적이며 E 는 레이저 광의 출력, 광학 시스템의 효율 등에 관계하는 상수이다. 식(7)을 다음과 같이 변형하자. 검지기 평면에서 반경이 s 인 원 내부에 포함되는 에너지의 전체에 대한 비율 $L(s)$ 는

$$L(s) = \frac{1}{E} \int_0^s \int_0^{2\pi} I(s) s ds d\psi \dots\dots\dots (8)$$

$$= \frac{D}{\lambda^2} \int_0^s \int_0^{2\pi} \left[\frac{2J_1(2\pi as/\lambda f)}{2\pi as/\lambda f} \right]^2 s ds d\psi$$

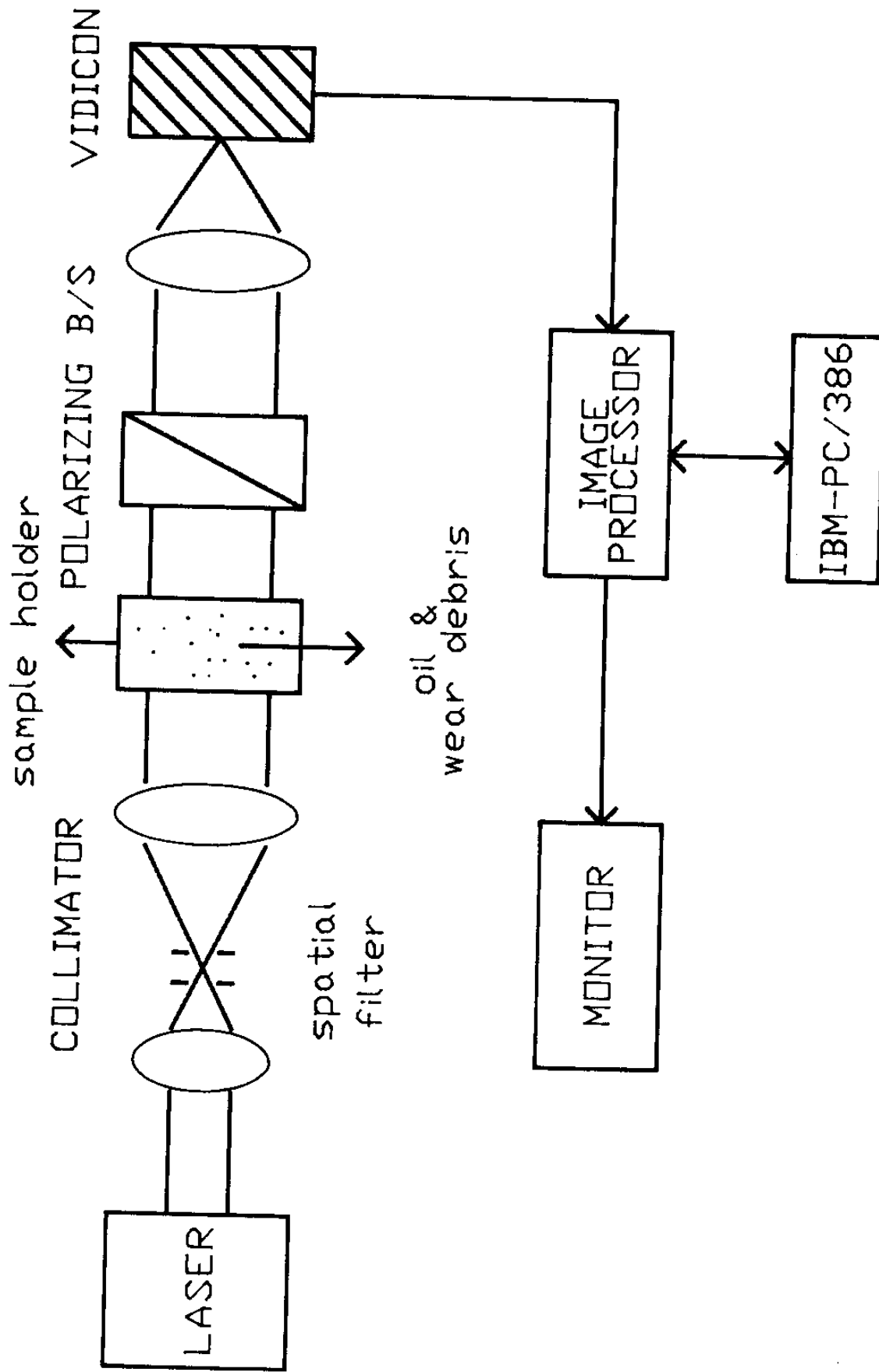


그림 5. 회절패턴 이용 마모입자 분포 측정 시스템

$2\pi as/\lambda f = x$ 로 두고 $D = \pi a^2/4$ 인 것을 적용하면

$$L(s) \sim 2 \int_0^x \left[\frac{J_1^2(x)}{x} \right] dx \dots\dots\dots (9)$$

Bessel 함수의 관계식들로부터

$$\frac{J_2^2(x)}{x} = -\frac{1}{2} \frac{d}{dx} [J_0^2(x) + J_1^2(x)] \dots\dots\dots (10)$$

따라서 식(9)는 다음과 같이 표현된다.

$$L(s) \sim 1 - J_0^2\left(\frac{2\pi as}{\lambda f}\right) - J_1^2\left(\frac{2\pi as}{\lambda f}\right) \dots\dots\dots (11)$$

이 식은 L. Rayleigh에 의해 얻어진 것인데, 본 연구에서는 이 식을 검지기 평면에서의 임의의 링내의 에너지 분포함수로 수정하여 이용하였다. 반경이 S_1 과 S_2 로 둘러싸인 링내에 포함되는 광 에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_{s_1, s_2} = E [J_0^2(2\pi as_1/\lambda f) + J_1^2(2\pi as_1/\lambda f) - J_0^2(2\pi as_2/\lambda f) - J_1^2(2\pi as_2/\lambda f)] \dots\dots (12)$$

이 식을 “에너지 분포함수”라 한다. 만약 N 개의 동일한 입자가 있다면 에너지 L_{s_1, s_2} 는

$$L_{s_1, s_2} = CN\pi a^2 [(J_0^2 + J_1^2)_{2\pi as_1/\lambda f} - (J_0^2 + J_1^2)_{2\pi as_2/\lambda f}] \dots\dots\dots (13)$$

로 주어 지는데 C 는 상수값이다. 입자의 분포가 mono-disperse 하지 않고 어떤 분포를 이루고 있다면 (poly-disperse) 식(13)은

다음과 같이 변형된다. 임의의 입자계에서 크기가 a_i 인 입자의 수를 N_i 라 하면,

$$L_{s_1, s_2} = C \sum_{i=1}^M N_i (\pi a_i^2) [(J_0^2 + J_1^2)_{2\pi a s_1 / \lambda f} - (J_0^2 + J_1^2)_{2\pi a s_2 / \lambda f}] \dots \dots \dots (14)$$

여기서 Σ 는 M개의 size grouping에 대한 합을 의미한다. 식 (14)를 행렬로 표현하면,

$$\underline{L} = \underline{T} \cdot \hat{\underline{N}} \dots \dots \dots (15)$$

$$\underline{L} = [L_{s_1, s_2}, L_{s_2, s_3}, \dots \dots \dots L_{s_N, s_{N+1}}]^T$$

: 각 링내에 포함되는 에너지 분포 행렬 (측정치)

$$\hat{\underline{N}} = [N_1, N_2, \dots \dots \dots N_M]^T$$

: 입자 분포 $[a_1, a_2, \dots \dots a_M]$ 에 대응하는 입자수 행렬 여기서 a_i 는 각 size group의 평균 직경 (추정치)

$$\underline{T} = \begin{bmatrix} a_1^2 [(J_0^2 + J_1^2)_{a_1, s_1} - (J_0^2 + J_1^2)_{a_1, s_2}] \dots \dots \dots a_M^2 [(J_0^2 + J_1^2)_{a_M, s_1} - (J_0^2 + J_1^2)_{a_M, s_2}] \\ \vdots \hspace{20em} \vdots \\ a_1^2 [(J_0^2 + J_1^2)_{a_1, s_N} - (J_0^2 + J_1^2)_{a_1, s_{N+1}}] \dots \dots \dots a_M^2 [(J_0^2 + J_1^2)_{a_M, s_N} - (J_0^2 + J_1^2)_{a_M, s_{N+1}}] \end{bmatrix}$$

: 입자의 분포에 따른 에너지 분포함수 행렬 (계산치)

식(15)의 해 ($\hat{\underline{N}}$)는 Non-negative least square 해로 주어지는데, 다음과 같다.

$$\hat{\underline{N}} = (\underline{T}^T \underline{T})^{-1} \underline{T}^T \underline{L} \dots\dots\dots (16)$$

2. 시스템 구성

전체 시스템은 그림 5 와 같은데 크게 광학부와 신호처리부로 대변할 수 있다. 광학부에서, sample holder까지는 모든 시스템 정수들이 앞절의 광 감쇄 이용 시스템과 동일하다. 그 다음 편광 빔 분할기를 통과하여 집광렌즈까지 도달한다. 집광렌즈는 직경 4 cm 의 초점거리 (f)가 8.5 cm인 볼록렌즈를 사용했고, 검지기는 512 × 512 개의 화소를 가진 비디콘을 사용했다. 보통 회절패턴 응용기기에서 검지기의 동특성 범위가 최소 30 dB 이상이어야 하나 실험에 사용한 비디콘은 대략 80:1 정도의 동특성을 갖고 있었다. 회절 에너지는 입사단면적의 제곱에 비례하므로 이 동특성 범위로는 최소 입력을 주는 입사 직경의 약 3 배 정도되는 입사의 직경 범위까지만 적용할 수 있다. 이 비디콘의 작은 동특성 범위로 인해 에너지가 큰 부분에서는 포화현상이 나타나는데 이것을 막기 위해 집광렌즈에서 약 7 cm 떨어진 곳에 편광 빔 분할기를 두었다.

신호 처리부는 그림 5 에서 VIDICON, IMAGE PROCESSOR 와 MONITOR, 그리고 IBM-PC/386 컴퓨터로 이루어 진다. 신호 처리 과정은 비디콘에 도달한 회절 패턴을 영상처리가 grabbing 하고 컴퓨터로 이 grab된 데이터를 처리하는 것으로 이루어 진다.

이때 모니터는 회절패턴을 영상처리가 grab 하거나, 편집하거나 (edit), 광학적 align이 잘 되었는지 검사할 목적으로 사용한다. 본 연구에 사용된 VIDICON은 화소수가 512×512 인 matrix형 카메라인데 에너지 분포함수로 회절패턴을 해석하기 위해서는 이 행렬을 극좌표 형태로 바꾸어야 한다. 그림 6에 나타나 있듯이 VIDICON 평면에서 회절패턴의 중심점을 모니터에 나타난 패턴을 보고 정한 뒤 이 점을 극좌표의 중심점으로 택한다. 그리고 반경 r 과 $(r+1)$ 을 그림과 같이 정하고 r 과 $(r+1)$ 로 둘러싸인 링내의 모든 화소에 대응하는 grey level 값을 읽어 에너지 분포함수값을 계산한다. 이렇게 해서 구한 에너지 분포함수값은 식 (15)의 L행렬을 구성하게 된다.

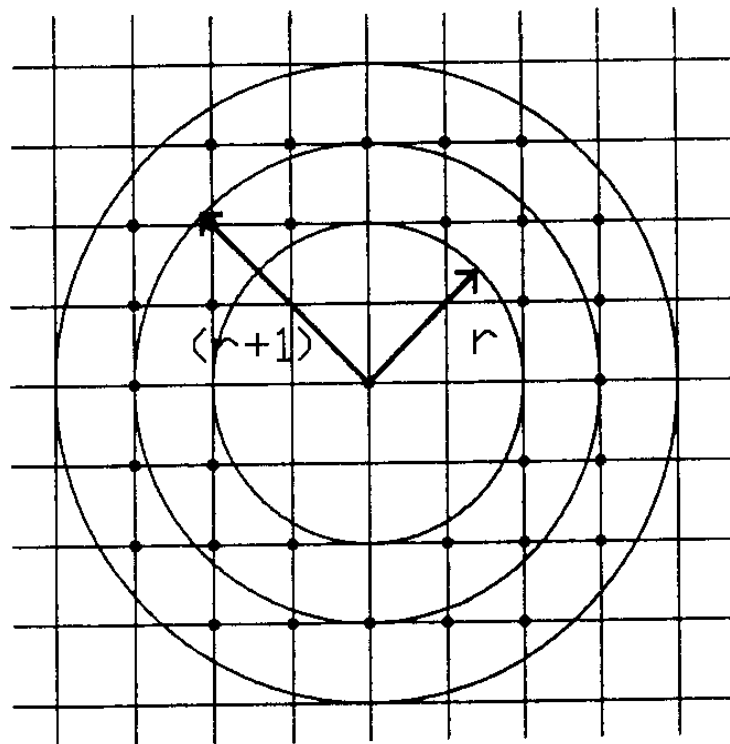


그림 6. 비디콘의 matrix형 화소를 극좌표로 변환하는 과정

영상처리는 512×512 화소의 회절패턴을 $256(2^8)$ grey level로 mapping 해주며, 회절패턴을 scan, grab, edit, 그리고 save/load 하는 기능을 갖고 있다. 영상처리에 load된 회절패턴은 컴퓨터에 의해서 C언어로 프로그램 처리할 때 2진 모드(binary mode)로 읽음으로써 데이터 파일로 만들 수 있게 된다. 이때 컴퓨터의 주 기억 용량이 제한적이기 때문에(IBM-PC/386의 경우 최대 3M bytes) 메모리 할당을 동적으로 해주어야 스택 메모리의 부담을 줄여 데이터 사이즈가 큰 회절패턴을 처리할 수 있다. 부록에 이상의 data acquisition 과정의 프로그램 리스트를 첨부하였다.

이 동적 메모리 할당 과정은 통상 PC로 데이터를 액세스(access)할 때는 한개의 pointer가 64 K bytes를 초과할 수 없기 때문에 반드시 huge pointer를 써야 하는데, huge pointer를 float형으로 씀으로서(4 bytes) $512 \times 512 \times 1(\text{bytes})$ 의 데이터를 $256 \times 256 \times 4(\text{bytes})$ 로 바꾸어 한번의 access 범위를 $\frac{1}{4}$ 로 줄이면서 4번 반복하여 전체 데이터를 access 하는 결과를 얻는 것이다. 이때 다이내믹 메모리, 곧 스택 메모리는 $\frac{1}{4}$ 로 축소되는 효과를 얻는 것이다.

3. 시스템 캘리브레이션(calibration)

에너지 분포함수는 특정 반경에서 최대치와 최소치를 갖는데 이것은 다음과 같이 구할 수 있다. 반경 s 인 원의 내부에 포함되는 에너지의 변화량을 구하면,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} L(x) &= - \frac{d}{dx} [J_0^2 + J_1^2]_x \\ &= - 2J_1^2(x)/x \end{aligned}$$

에너지 분포는 $2J_1^2(x)/x$ 에 따라 변하므로 최대치는 이 값의 미분치가 0인 지점에 위치한다.

$$d/dx \cdot \frac{2J_1^2(x)}{x} = 0 \dots\dots\dots (17)$$

그런데 $J_2(x) = d/dx \cdot J_1(x)$ 이므로

$$\frac{d}{dx} J_1(x) = \frac{1}{2} [J_0(x) - J_2(x)]$$

그러므로 식 (17)의 해는 $3J_2(x) = J_0(x)$ 를 만족하는 x 값들이다. 이 식의 최초의 해는 $x = 2\pi as / \lambda f = 1.375$ 인데 이 값은 에너지 분포할수 (식 (12))의 최초 최대치의 x 값이다. 반면에 최초 최소치는 $x = 2\pi as / \lambda f = 3.84$ 에 존재한다. 최초 최대치와 최초 최소치는 다음과 같은 상관관계를 갖는다.

$$x_{\max} = 2\pi as / \lambda f = 1.375 \dots\dots\dots (18)$$

$$x_{\min} = 2\pi as / \lambda f = 3.84 \dots\dots\dots (19)$$

$$x_{\min} = 2.8 x_{\max} \dots\dots\dots (20)$$

이 관계들에서 입자의 반경을 구하면,

$$a = 0.219 (f/s)_{\max}$$

또는

$$a = 0.61 (f/s)_{\min} \dots\dots\dots (22)$$

와 같이 된다. 그러므로 측정에 의해 에너지 분포함수가 최대가 되는 반경 또는 최소가 되는 반경을 구하면 식 (21) 또는 식 (22)에 의해 피측정 입자계의 지배적인 입자의 size를 알 수 있다. 또한 에너지 분포함수 최대치의 퍼짐 정도등을 고려하면 식 (16)에 의해 피측정 입자계의 입자크기 분포를 구할 수 있다. 회절 패턴의 최대로 가능한 입자의 농도(concentration)은 입자의 크기에 비례하는데 대략 50%의 transmittance의 경우 입자 stream의 폭을 L, 입자의 평균 반경을 r이라고 하면, 입자의 최대 농도 $N_m = 0.5/(\pi r \cdot L)$ 로 주어진다.

그림 7에 시스템의 calibration을 위해 50 μm 의 편흔을 사용했을 경우의 광강도와 에너지 분포함수값을 도시해 놓았다. 사진은 회절패턴이다. 회절패턴의 중앙포화가 일어났기 때문에 에너지 분포함수의 최초 최대치가 그림에서 오른쪽으로 이동되었다. 이 현상은 그림 8에서 이론치와 비교해 봄으로써 잘 알 수 있다.

그러나 최초 최소치는 r 반경이 95(50 μm 편흔)로 식 (22)와 잘 일치한다. 그림 7-b와 그림 8에서 x축을 나타내는 반경(NORMALIZED RADIUS)값 1은 비디콘의 한 화소 간격을 나타낸 값인데 그 실제값은 식 (22)와 그림 7-b, 그림 8를 이용해 구해보면 대략 14 μm 로 주어진다. 이렇게 해서 측정치에서 최초 최대치 또는 최소치에 대응하는 r값을 알면 거기에 대응하는 s값을 알 수

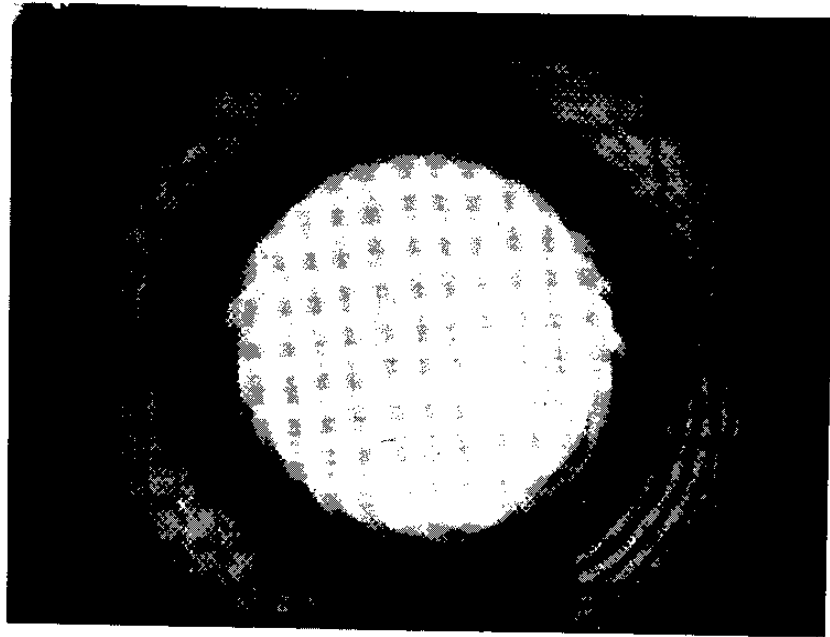


그림 7-a . 시스템 캘리브레이션을 위한 50 μm핀홀의 회절 패턴

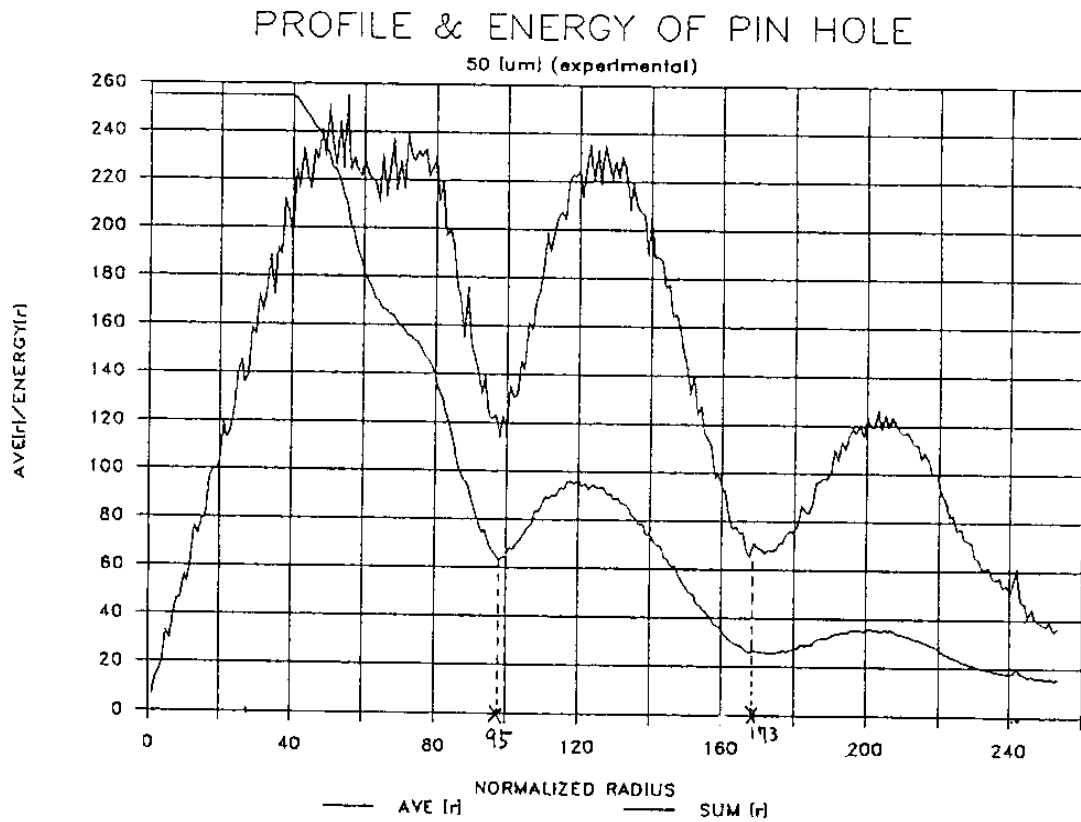


그림 7-b . 시스템 캘리브레이션을 위한 50 μm핀홀의 강도 및 에너지 함수값

ENERGY FOR 50 μm PINHOLE

[EXPERIMENTAL & THEORETICAL]

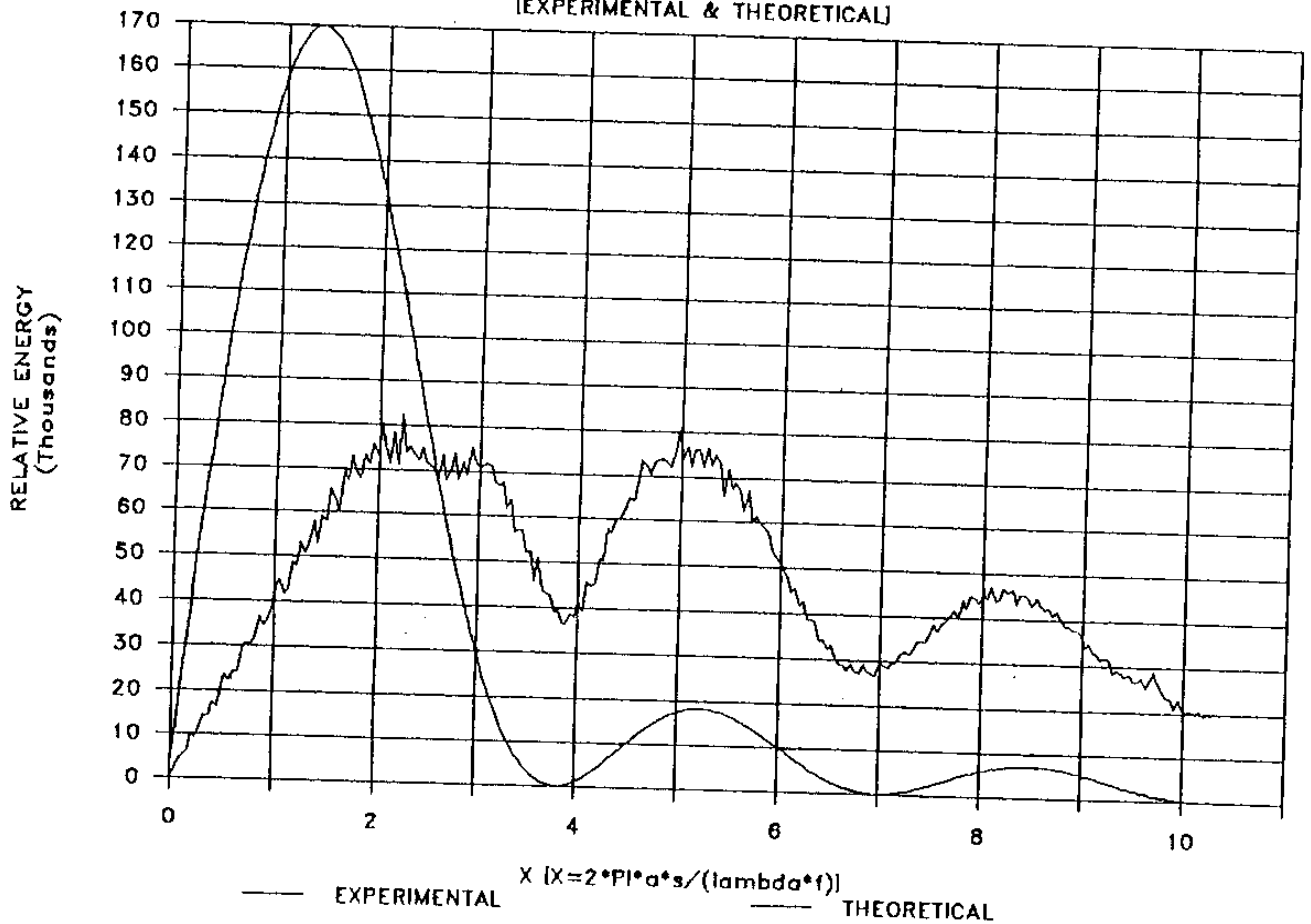


그림 8. 회절패턴의 중앙 포화로 인한 에너지함수의 최초 최대값의 차이 (50 μm 핀홀)

있고 식 (22)의 관계에서 a 값을 구할 수 있게 되었다.

그림 7-b에서 보이는 에너지 분포함수의 최소치들에 해당하는 반경은 각각 95와 173 정도로 ($173/93 = 1.82$) 회절 이론에서 주어지는 최소치의 값들 (7.02/3.83)과 잘 일치하고 있다. 그림 7과

8에서 에너지 분포함수의 최소치들이 이론치와 같이 0으로 떨어지지 않는 것은 잡음때문인 것 같다. 부록에 이렇게 구해진 실제 화소 간격을 데이터로 사용하여 식(16)을 구하는 프로그램 리스트를 첨부하였다.

제 3 장 실험결과 및 시스템 평가

제 1 절 측 정 결 과

그림 9 에, Sample holder 가 4 cc 와 2 cc 일 때의 전체 transmittance 의 측정결과를 각각 나타내었다. 이 값은 식(2)의 β 값에 해당한다. 윤활유와 마모입자를 전혀 넣지않았을 때는 식(3)의 β 값이 되어 식(3)에서 σ_1 값, 곧 holder 의 sili glass 의 감쇄계수를 구할 수 있다. 그 결과 σ_1 은 $2.96 \times 10^{-3} [/cm]$ 이었다. 이때 R_1 (유리와 공기간의 reflectance)은 0.034966 이었다.

그림 9 에서 심볼이 있는 부분이 실제 측정한 부분이며 이 값들을 단순 1차식으로 연결했을 때, 곡선은 $e^{-x \cdot k}$ 의 특성을 보이는데 이것은 식(2)에서 $e^{-\sigma_2 \cdot d_2}$ 항과 관계가 있다고 볼 수 있다. 그림 9 에서 입자의 농도가 실제 윤활시스템에서는 2000 [ppm] 이상은 무의미 하므로 2000 [ppm] 까지만 확대해서 다시 그림 10 에 나타내었다. 그림 10 에서 마모입자 농도가 0 [ppm] 일 때는 식(2)에서 σ_2 의 값이 순수하게 윤활유에서의 흡수에 의한 효과로 간주되며 이때의 σ_2 는 그대로 σ_a (그림 4 에서)가 된다. 계산결과 $\sigma_2 = \sigma_a = 2.9047 \times 10^{-2} [/cm]$ 이다. 그림 10 에서도 그림 9 와 마찬가지로 곡선이 전체적으로 $e^{-x \cdot k}$ 경향을 보이지만 그림 9 에 비해 훨씬 선형적임을 알 수 있다.

그림 11 에, 그림 9 에 나타나 있는 β (total transmission

TOTAL TRANSMISSION RATE OF CONTAMINATED OILS

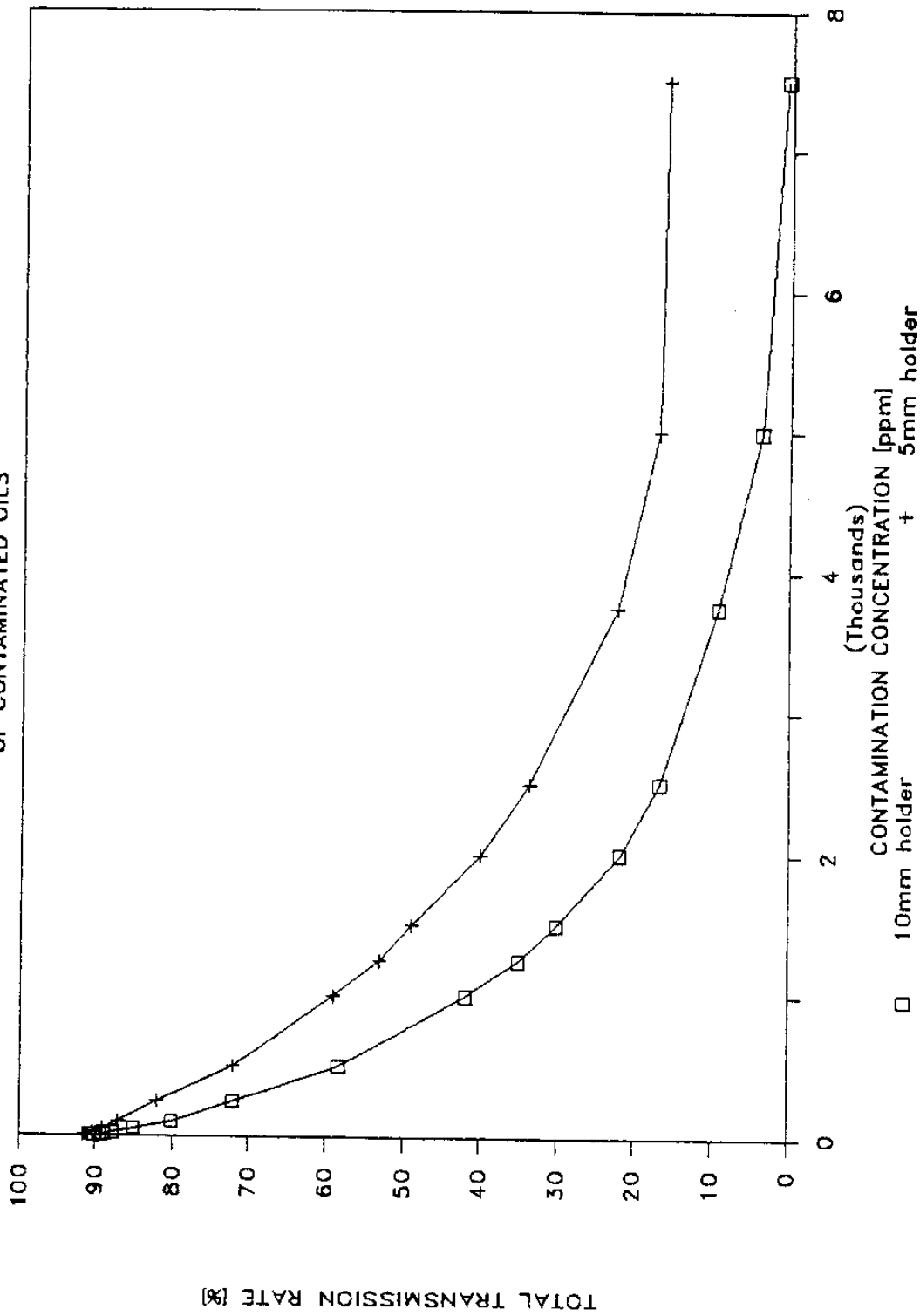


그림 9. Sample holder의 전체 transmittance 측정치

TOTAL TRANSMISSION RATE

OF CONTAMINATED OILS

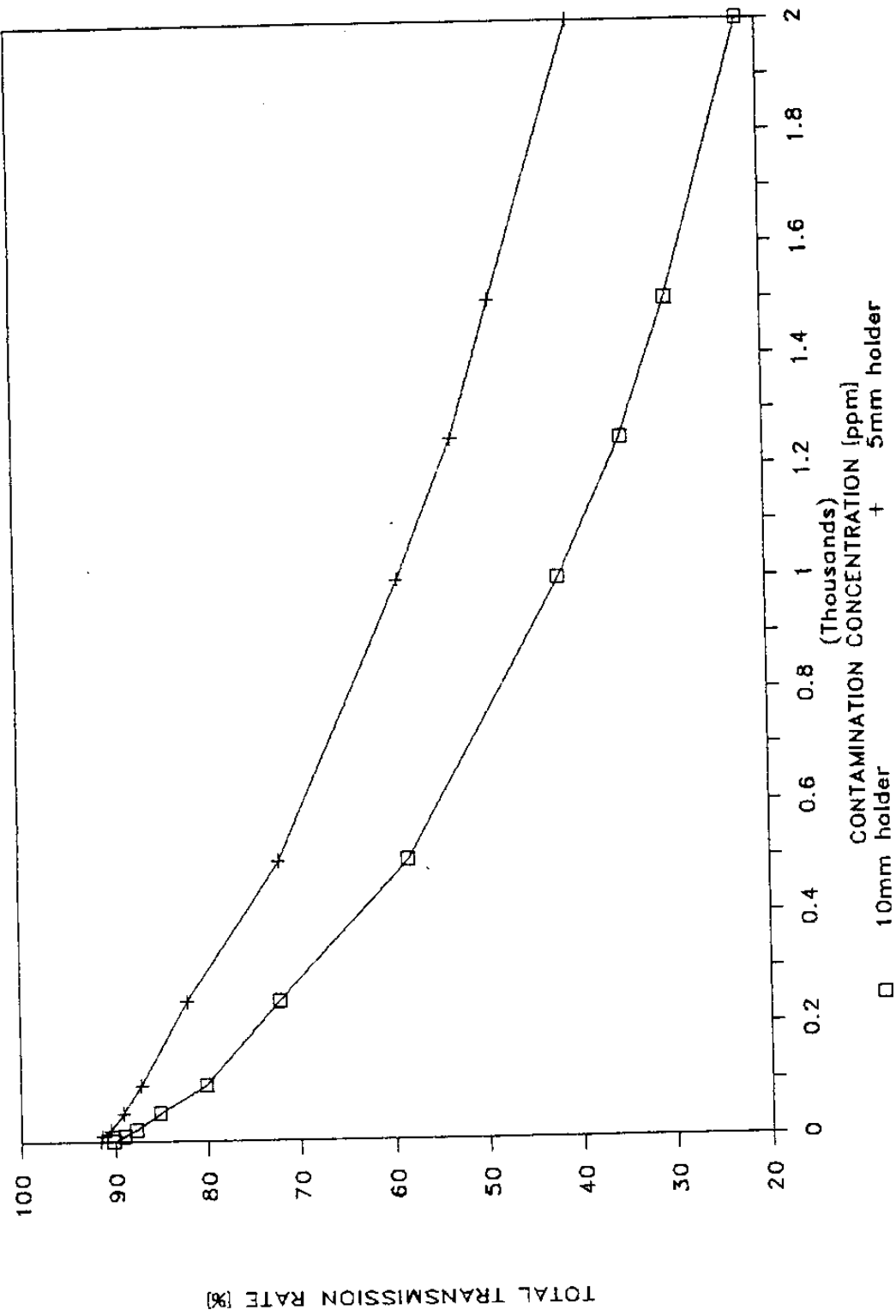


그림 10 . 그림 9의 저농도 (2000 [ppm] 까지) 부분

ATTENUATION COEFFICIENTS

OF CONTAMINATED OILS

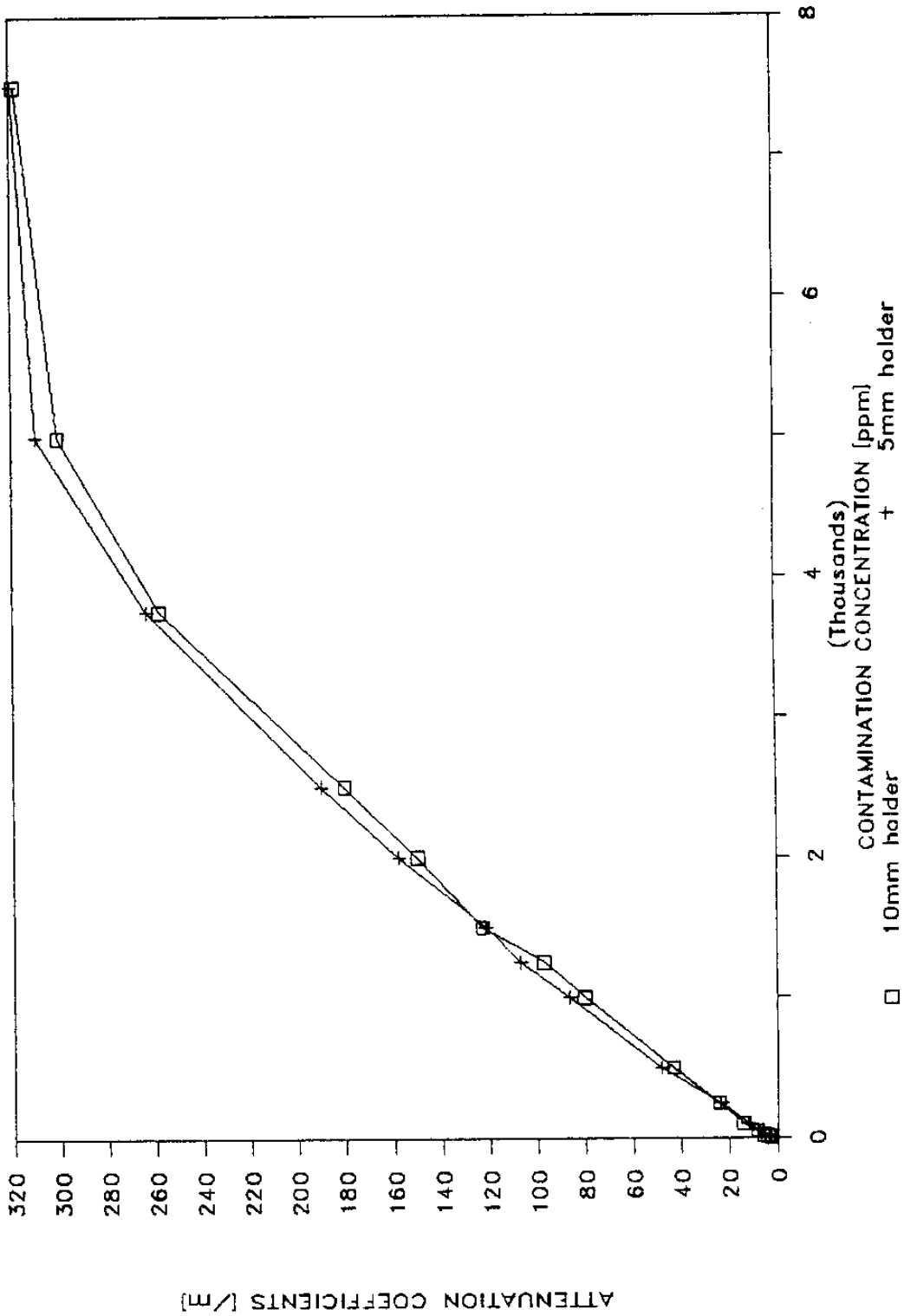


그림 11. 그림 9의 β 값에 따른 σ_2 의 계산치

rate)를 데이터로 해서 식(2)의 σ_2 값을 구해 놓았다. 먼저 알 수 있는 것은 sample holder가 달라도 σ_2 의 값은 거의 같다는 것이다. 이 사실은 σ_2 값이 단위 길이당 [$/cm$] 취해진 값인 만큼, 물성(유탄유 및 마모입자)이 같으면 같을 수 밖에 없는 것이다. 다음에 알 수 있는 사실은 마모입자의 농도가 작은 영역에서 σ_2 는 거의 선형적이라는 것이다.

이렇게 해서 σ_2 의 값을 구하면 $\sigma_2 = \sigma_a + \sigma_s$ 의 관계에서 σ_s 곧 마모입자의 산란에 의한 감쇄계수를 구할 수 있게 된다. 농도가 클수록 σ_2 의 값이 포화치에 이르는 현상은 σ_s 의 값이 완전히 선형적이지 않기 때문이거나 주변광의 영향을 완전히 제거시키지 못한 것에 기인하는 것 같다.

그림 12에 10 mm 두께의 sample holder(4 cc)에서 오일에 의한 투과율, 즉 $e^{-\sigma_2 \cdot L}$ (L : 광이 통과하는 오일의 두께) 값을 도시해 놓았다. 마모입자의 농도가 0일 때 투과율은 약 97%인데, 이것은 유탄유에 의한 흡수율이 약 3%임을 말해준다. 이 사실에서 역으로 σ_a 의 값을 구하면,

$$0.97 = 1 - e^{-\sigma_a \cdot 1}$$

$$\sigma_a = 3 \times 10^{-2} [/cm]$$

이값은 앞의 계산 결과(식(2)로부터) $\sigma_a = 2.9047 \times 10^{-2} [/cm]$ 과 거의 같다. 이상에서 유탄유의 흡수계수 σ_a 는 약 $3 \times 10^{-2} [/cm]$ 임이 분명해졌다.

그림 12의 곡선 역시 전체적으로 e^{-x} 의 형태를 보이는 것은

TRANSMISSION RATE OF CONTAMINATED OIL

FOR 10mm SAMPLE HOLDER

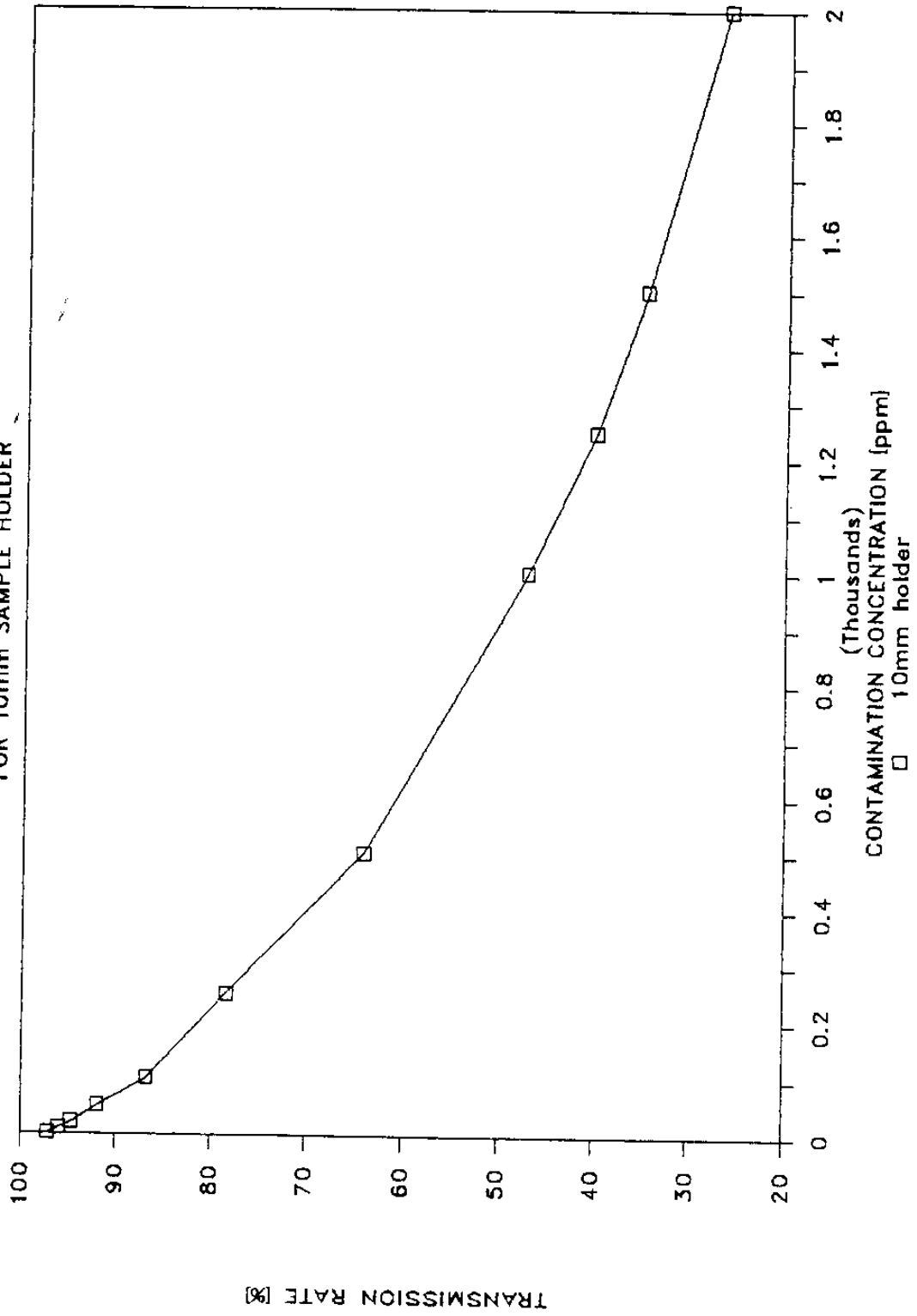


그림 12. 10 mm 두께의 sample holder(4 cc)의 오일에 의한 투과율

$e^{-(\sigma_s + \sigma_a)}$ 효과에 의한 것으로 여겨진다. 여기서 실험에 의한 σ_s 곧 $\sigma_s = \sigma_2 - \sigma_a$ 와, 앞 장의 광산란 이론에서 구한 σ_s 를 비교해 보자. 그림 13 에 실험에 사용된 규조토(diatomite)의 분포와 250 [ppm]일 때의 각 size group 별 입자수를 도시해 놓았다. i 번째 group의 입자수 N_i 는

$$N_i = x \cdot f_i / \left(\frac{4}{3} \pi r_i^3 \cdot \rho \right) \cdot \pi \left(\frac{bd}{2} \right) \cdot d \dots \dots \dots (23)$$

- x : 마모입자의 농도 [ppm]
- f_i : 마모입자의 weight fraction
- r_i : 마모입자의 반경 [cm]
- ρ : 마모입자의 평균 비중 [g/cm^3]
- bd : 레이저 빔의 빔직경 [cm]
- d : oil depth

광산란 이론에 따른 σ_s 의 값을 구하기 위해서는 식(4)를 다음과 같이 이산적으로 변형해야 한다.

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \frac{\pi}{4} \int_0^{D^\infty} C_n Q_s(x, m) N_r(D) D^2 dD \\ &= \sum_{i=1}^M Q_i N_i \dots \dots \dots (24) \end{aligned}$$

여기서 M 은 sample size, N_i 는 $C_n N_r$ 로 i 번째 사이즈의 입자수이며 Q_i 는 $Q_s \left(\frac{\pi D_i}{\lambda}, m \right) \cdot \frac{\pi}{4} D_i^2$ 이다. 그림 14 에 0 에서 200 [μm]까지의 각 입자에 대한 Q_i 값을 계산해 놓았다. 이때 윌활유의 굴절율은 1.46 으로 하였다. 계산 과정은 부록에 첨부하였다. 그림 14 에서 알 수 있듯이 Q_i 곡선은 입자의 직경에 대해 약한

PARTICLE DISTRIBUTION

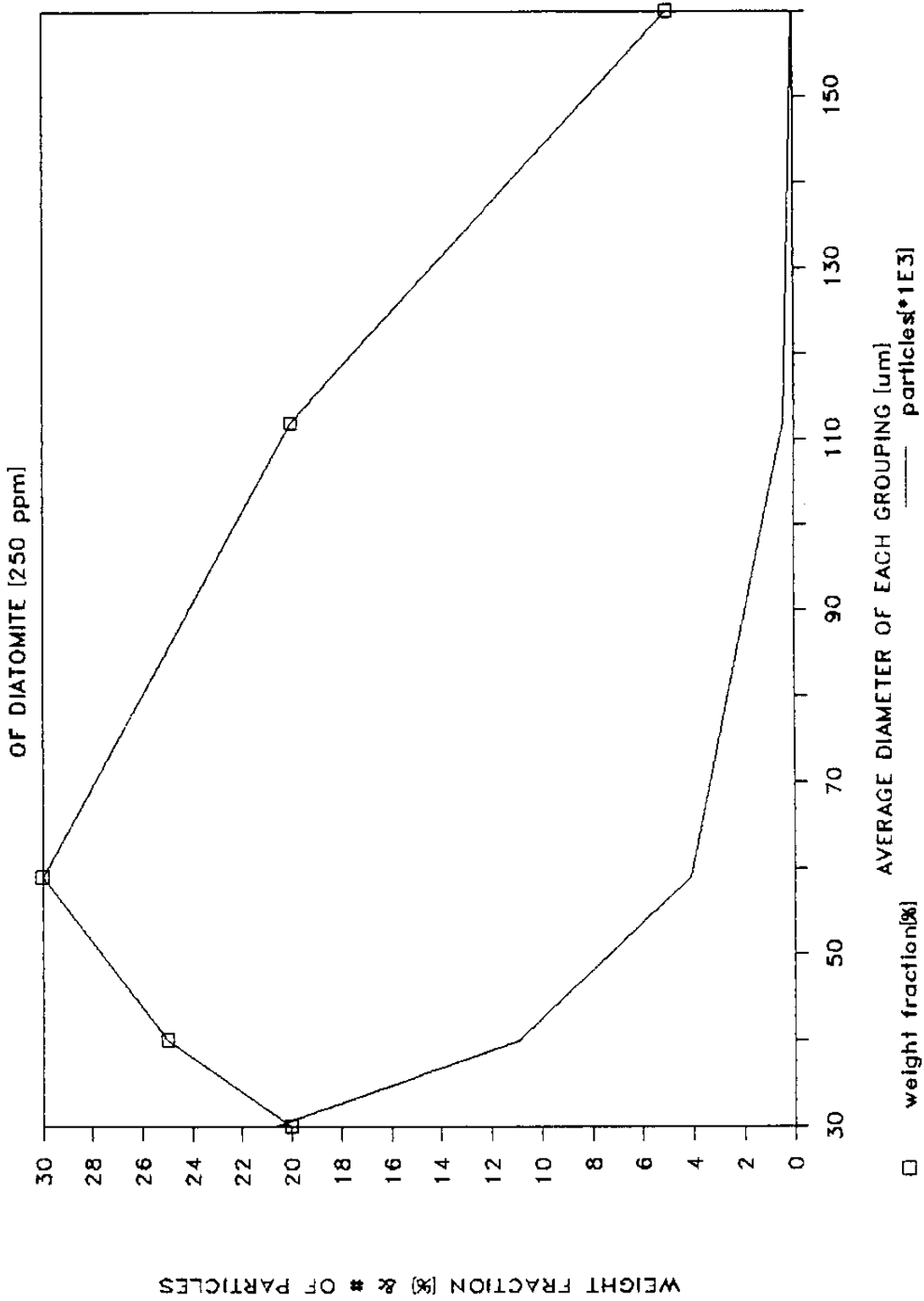


그림 13. 규조토의 분포 및 각 size group별 입자수

EFFICIENCY FACTOR FOR EXTINCTION BY SCATTERING OF CONTAMINATION PARTICLE

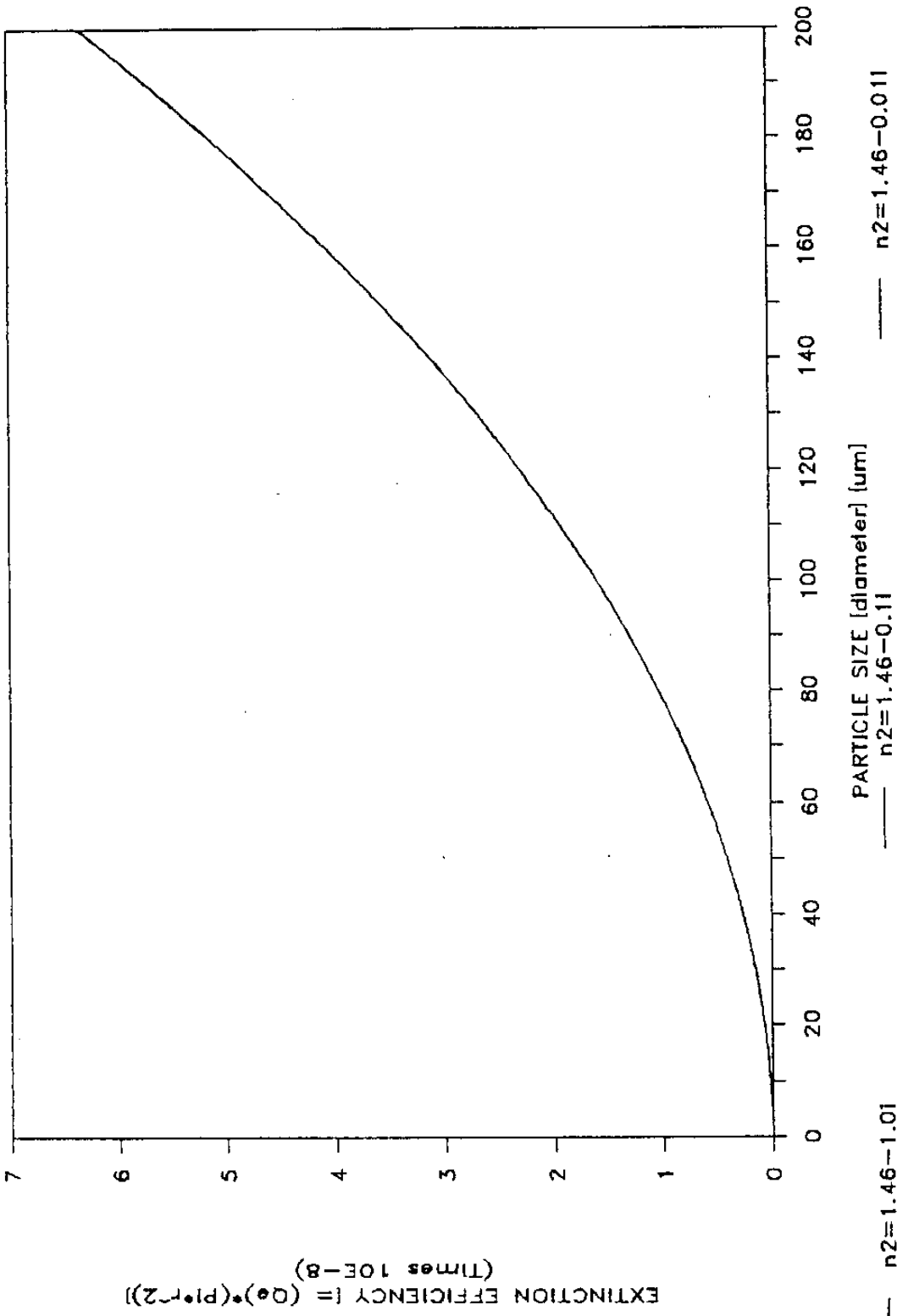


그림 14. 입자 직경 및 굴절률 변화에 따른 Q_s 값

e^* 특성을 보이고 있으며, 입자의 굴절율(n_2)의 허수부값에 매우 둔감하다. 즉 입자에 의한 흡수효과는 무시해도 좋을 정도인 것을 알 수 있다. 그림 14에 나타낸 Q_i 값과 식 (23)에서 구한 N_i 값을 곱하여 M개의 size group에 대해 합하면 σ_s 가 된다. 그림 15에 이렇게 해서 구한 σ_s 값과 실험에 의한 σ_s 값을 비교해 놓았다.

문제는 이론치와 실험치가 너무 차이가 나는 것이다. 현재로서는 그 이유를 규명하는 단계이다. 윤활유와 마모입자라는 시스템에 흡수, 산란, 반사 이외의 다른 기구가 존재할 가능성을 찾고 있으며 제 실험도 병행하고 있다. 현재로서 말할 수 있는 것은 계산 결과에 따를 때 실험치에 비해서 의외로 산란효과가 작게 나타난다는 사실이다.

그림 16과 그림 17에 최적의 sample holder를 설계하기 위한 데이터가 제시되어 있다. 최적의 sample holder를 설계할 때 고려 사항은 다음 두 가지이다. 첫째는 마모입자의 산란효과를 효과적으로 하기 위해서 가능한 많은 수의 입자가 레이저 빔 내에 있어야 하되 최소 검지가능 출력(minimum detectable power)을 만족시켜야 한다. 본 연구에서는 입력을 5 mW로 잡고 최소 검지가능 출력을 1 μ W로 했을 때 그림 12을 근거해서 오일의 두께를 구했다. 그림 16에서 보듯이 약 500 [ppm]일 경우 10 [cm]의 두께까지 만들 수 있다. 이점에서 그림 16은 최소검지가능 출력에 도달하기 직전까지의 sample holder의 최대 두께가 되겠다.

둘째, 검지기의 resolution이 1 μ W라고 할 때 각 농도에

ATTENUATION COEFFICIENTS

BY CONTAMINANT PARTICLES

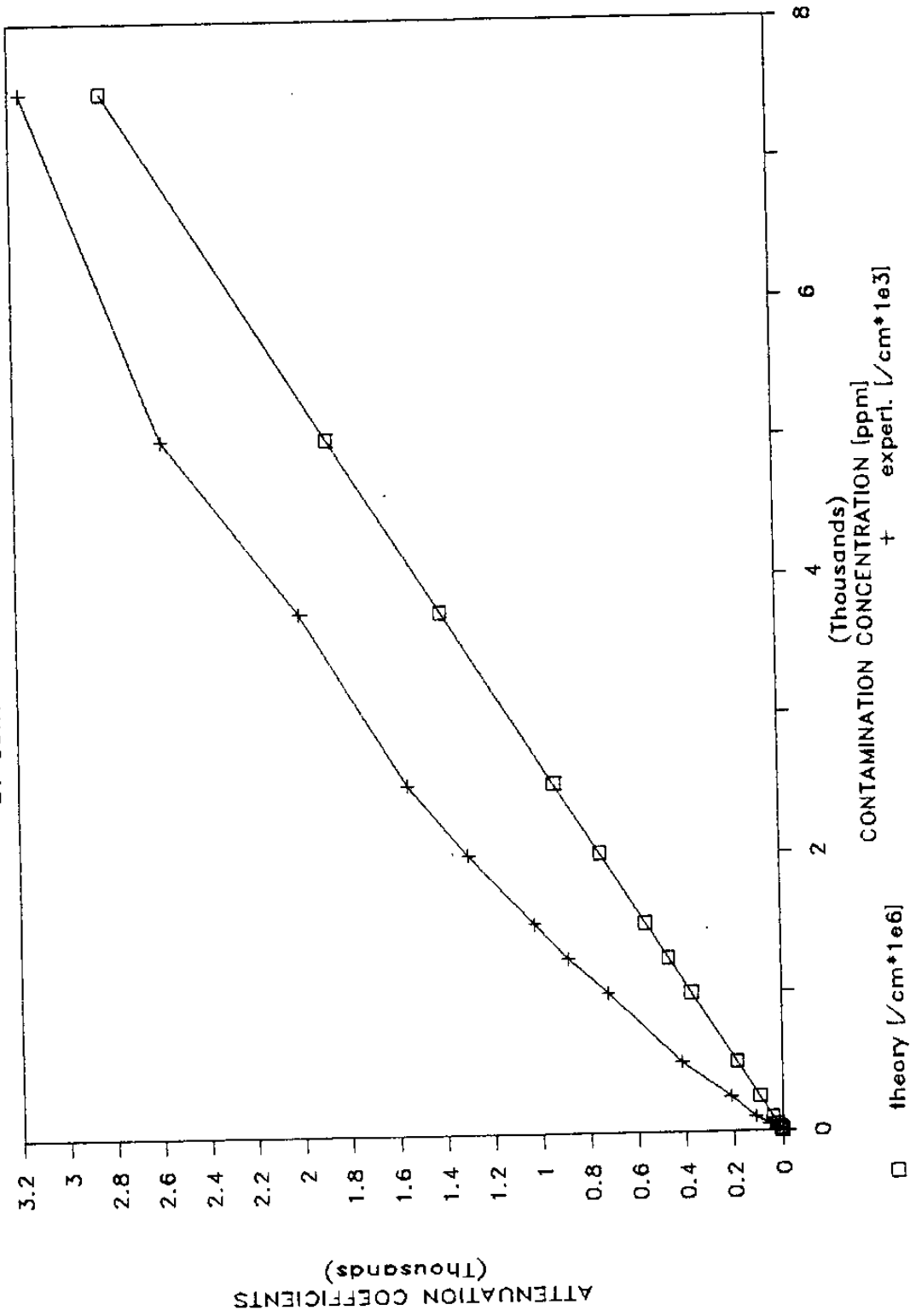


그림 15. σ_s 값의 이론치와 실험치의 비교

MAXIMUM OIL DEPTH FOR CONTAMINATION CONCENTRATIONS

Input power : 5 mW
Minimum detectable power : 1 uW

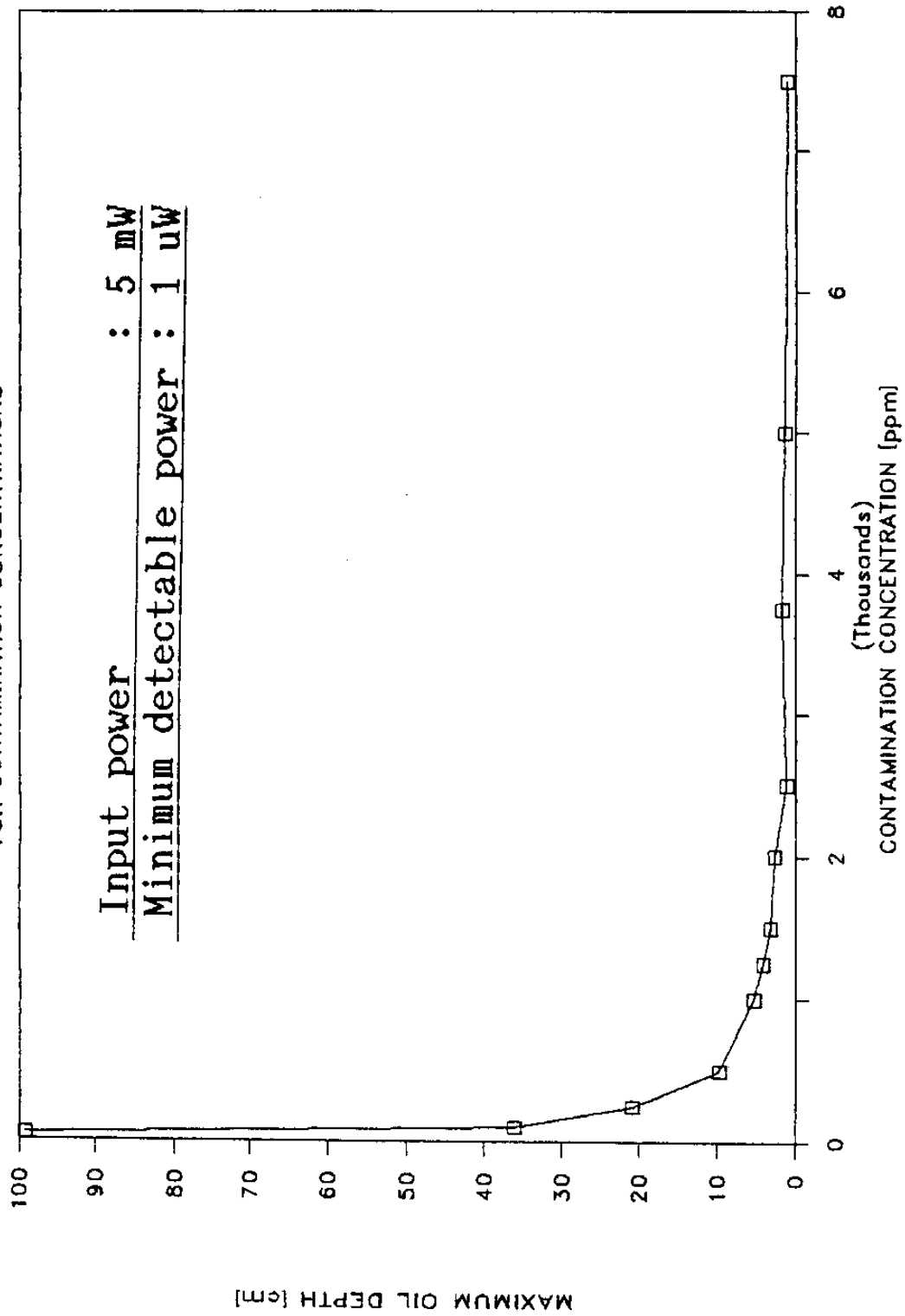


그림 16. 파모입자의 농도에 따른 sample holder의 최대 두께

MINIMUM OIL DEPTH

FOR 1 μW RESOLUTION

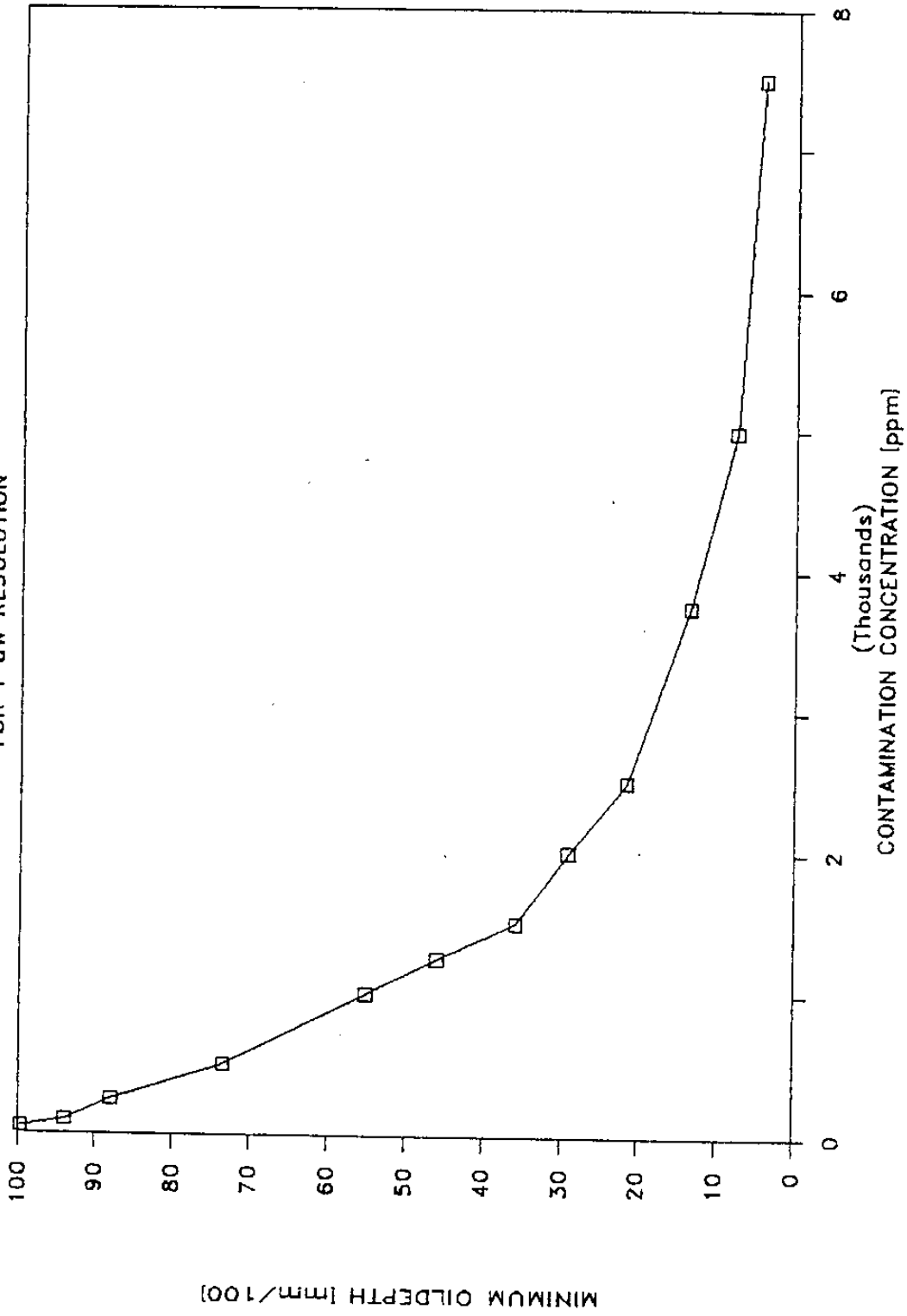


그림 17. 마모입자의 농도에 따른 sample holder의 최소 두께

따라 이 조건을 만족시키는 sample holder의 최소 두께를 고려해야 한다. 그림 17에 그 결과를 나타내었다. 마모 입자의 농도가 클 수록 그 두께는 얇아지는데 이것은 그만큼 마모 입자의 증가에 따른 감쇄효과가 크기 때문이다. 그림 17에서 알 수 있는 것은 각 농도에서 sample holder를 최소로 만들 수 있는 기준이다. 50 [ppm]의 경우 요구되는 holder 최소 size는 1 [mm] 정도임을 알 수 있다.

제 2절 시스템 평가

회절패턴을 이용한 마모입자의 분포를 구하는 실험은 현재 진행 중이다. 그림 18과 그림 19에 앞 장에서 논의된 방법대로 이루어진 에너지 분포함수를 나타내었다. 이 결과만으로는 입자수 N_i 를 구해내기가 쉽지 않았는데, 그 주된 이유는 현재 사용한 vidicon 카메라가 회절패턴을 감당하기에 동특성이 작기 때문인 것 같다. 동시에 비디콘 카메라에 들어온 회절패턴에 잡음이 많은 것도 이유가 된다. 앞으로는 동특성 범위가 크고 (30 dB 이상) 카메라의 센서 크기가 좀더 큰 ($1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 이상) 것을 사용하고 디지털 신호처리 기법을 통해 잡음을 제거하여 보다 정확한 회절패턴을 습득할 계획이다. 동시에 σ_s 의 이론치와 실험치와의 지나친 차이를 극복하는 과정도 연구 방향이 될 것이다.

ENERGY DISTRIBUTION FUNCTION

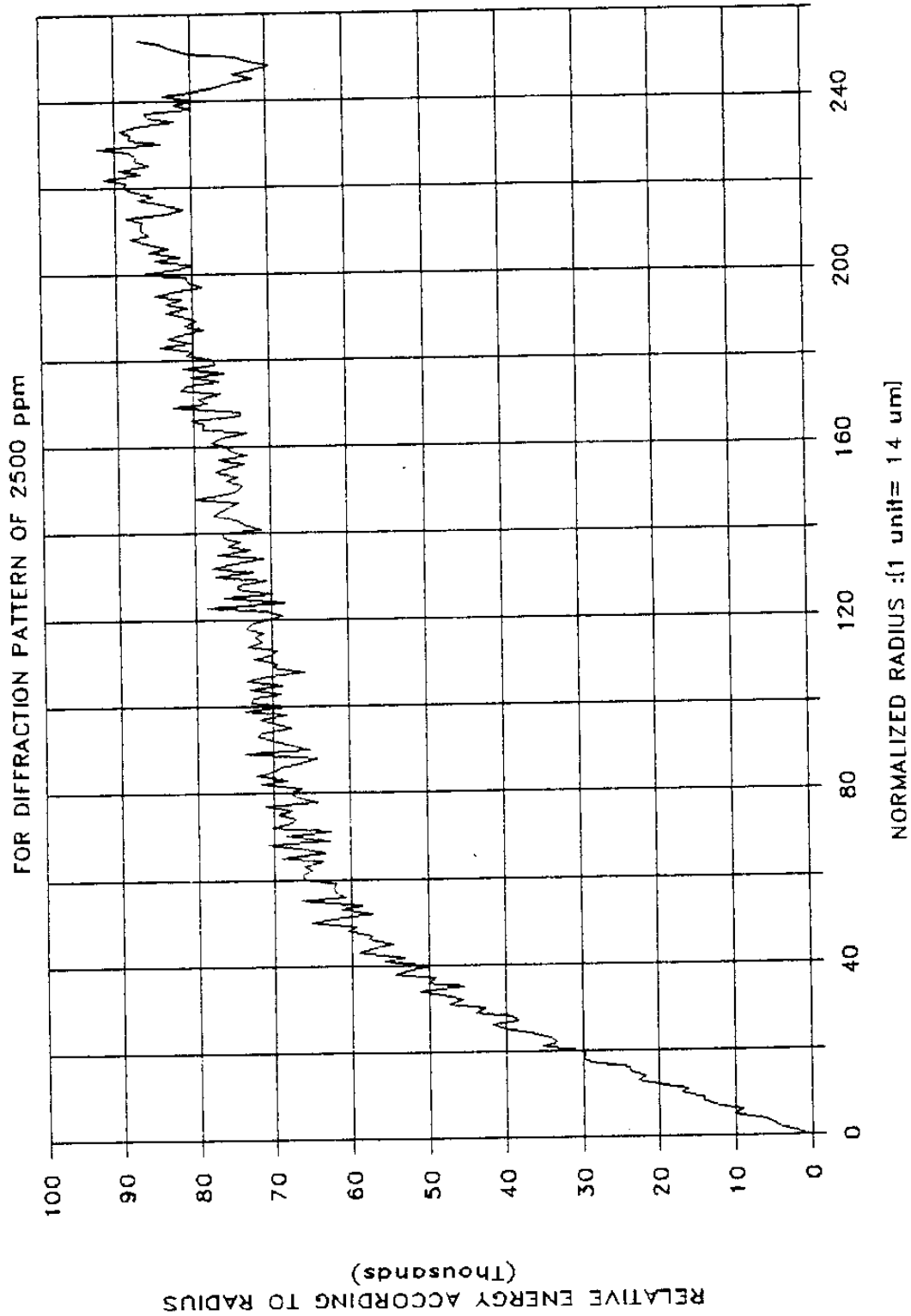


그림 18. 2500 [ppm] 일 때의 회절패턴에 대한 에너지 분포함수

ENERGY DISTRIBUTION FUNCTION

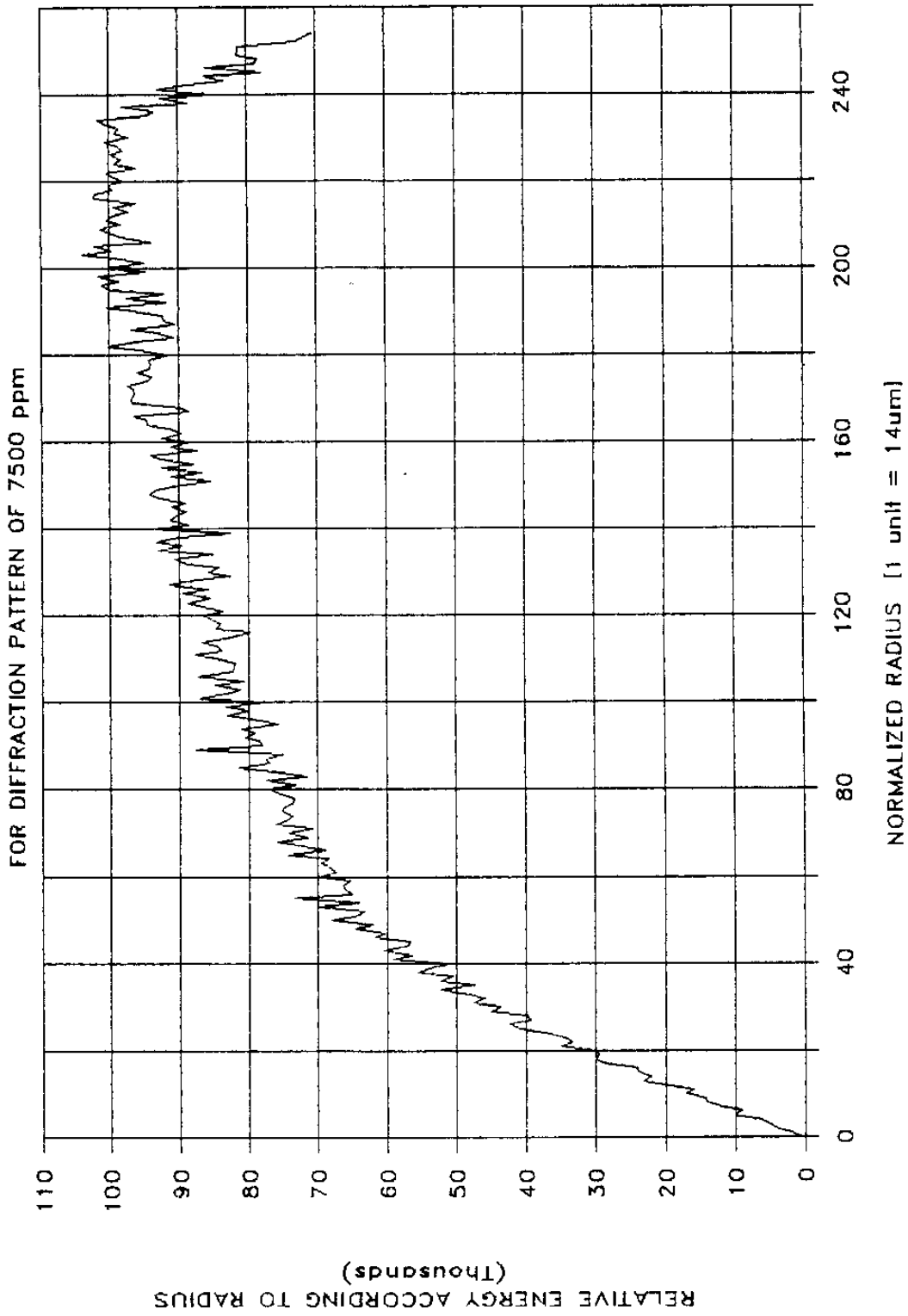


그림 19. 7500[ppm] 일 때의 회절패턴에 대한 에너지 분포함수

제 4 장 결 론

이상의 결과에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 마모입자의 농도를 측정하는 시스템은 평행 레이저 빔, sample holder, polarizing beam splitter 그리고 Photodiode Assembly로 간단히 구성할 수 있었다.
- 2) 마모입자의 농도에 대한 정보는 입자의 산란과 윤향유리 흡수에 의해 주어지며 실험과 수치해석을 통해 감쇄정수를 구했다.
- 3) 감쇄정수는 마모입자의 농도가 작은 영역 (2000 [ppm] 까지)에서는 선형성을 보였다.
- 4) 회절패턴 측정 시스템은 평행 레이저 빔, Fourier 변환 렌즈, vidicon 카메라, 영상처리기와 모니터 그리고 pc 컴퓨터로 구성할 수 있었다.
- 5) 마모입자계에 대한 회절패턴으로부터 입자계의 사이즈 분포를 추정할 수 있었는데, 이것에는 에너지 분포함수를 이용했다.
- 6) 마모입자의 산란에 따른 감쇄정수 (σ_s)가 이론치와 많은 차이를 보인점은 금후의 주요 연구과제이다.
- 7) 분포함수에 의한 matrix 변환 가미와 동특성 범위가 크고 센서 사이즈가 큰 검지기를 사용함으로써 회절패턴을 이용하는 입자분포 측정 기술의 정도를 향상시킬 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Wear, Vol.115, p.273, 1987
- (2) Mie, G. Ann. der Physik, Vol.25, 1908, pp.377-445
- (3) Ya.S. Zel'dovich et al., "Effect of Sizes of Anatase and Rutile Particle on the Intensity of Their Raman Spectra", Opt. Spectro SC. (USSR) 59, p.834, 1985
- (4) B.R. Jennings and D.M. Oakley, "Electric Birefringence Evaluation of Particle Size Distributions: Theory for Polydisperse Equivalent Spheres." Applied Optics, Vol.21, p.1519, 1982
- (5) A. Ya. Perelman et al., "Improvements to the spectral transparency method for determining particle-size distribution.", 1 June 1980/Vol.19, No.11/Applied Optics
- (6) J. Cornillaut, "Particle Size Analyzer", Applied optics II, pp.215-218 (1989)
- (7) J. Swithenbank et al., "A laser diagnostic technique for the measurement of droplet and particle size distribution", Proceeding of AIAA 14th Aerospace Sciences Meeting, Jan. 1976
- (8) H.C. Van de Hulst, *Ligst Scattering by Small Particles*, Wiley, New York, 1957

- (9) S.H. Lee et al., *Topics on Applied Physics-Optical Information Processing*, Springer-Verlag, 1981, Chap.5

부 록

- (1) Total transmission rate로부터 σ_s 구하는 과정
- (2) Q_s 구하는 과정
- (3) 회절패턴의 좌표변환 및 data acquisition
- (4) 에너지 분포함수로부터 입자수 (N_i) 구하는 과정



(1) Total transmission rate로부터 σ_s 구하는 과정

```

/*****
* This program aims at obtaining the refractive index &*
* the attenuation coefficient of the cell holder &*
* the oil having contamination particles . *
*****/

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <io.h>
#include <malloc.h>
#include <os2.h>
#include <memory.h>
#include <process.h>

#define ng 1.46 /* refractive ind. of glass*/
#define Rg ((ng-1)/(ng+1))*((ng-1)/(ng+1)) /* reflectance without oil*/
#define back 0.3e-03 /* background input power */
#define SAMX 15 /* sample dimension */
#define rho ((2.18+2.35)/2) /* [g/cm^3] */
#define bd (3.1e-01) /* [cm] : beam diameter*/
#define PI 3.141592
#define PG (5) /* # of particle groupings */

FILE *wfp1,*wfp2;
unsigned int i,j,k;
long int tn;
double sig1,sig2,sigs,sig2s;
double sig2o[SAMX+1],sig2c[SAMX+1];
double sig,s2; /* ftn.'s variables */
double x1,x2,x3,x4,y,y2,y3,y4;
double b[2+1][SAMX+1],bet2[SAMX+1];
double beta1,beta2,bets1,bets2;
double d1,d2,d3,d4,d5,d,depth[SAMX+1];
double ni[SAMX+1][PG+1],nq[SAMX+1],fpi[PG+1];
double sigmaca[SAMX+1],sigmap[SAMX+1],expoatt[SAMX+1];
double Ro,ffs,lef,rig,bt; /* ftn.'s variables*/

main(argc,argv)

int argc;
char *argv[];
{
double mg[SAMX+1],dia[SAMX+1];
double fr[SAMX+1],q[SAMX+1];
double sumni[SAMX+1];

/*****
***/

d1=1.125e-01; /* [cm] :depth of glass*/
d2=1.00 ; /* [cm] : depth of oil - square & round */
d3=5.0e-01 ; /* [cm] : depth of oil - slim type*/

beta1= ((4.315-back)/(5.020-back)); /* t.r. of the glass */
beta2= ((4.535-back)/(5.030-back)) ; /* t.r. of oil sans conta.*/

bets1= ((4.3165-back)/(5.022-back)); /*t.r. of slim type glass */
bets2= ((4.5950-back)/(5.019-back)); /*t.r. of slim type oil sans c
onta.*/

/* The case of contaminated oil: [ppm]*/

```

```

b[1][ 1]=-90.159*1e-02; /* 0 */
b[1][ 2]=-89.001*1e-02; /* 10 */
b[1][ 3]=-87.786*1e-02; /* 20 */
b[1][ 4]=-85.123*1e-02; /* 50 */
b[1][ 5]=-80.213*1e-02; /* 100 */
b[1][ 6]=-72.132*1e-02; /* 250 */
b[1][ 7]=-58.345*1e-02; /* 500 */
b[1][ 8]=-41.981*1e-02; /* 1000 */
b[1][ 9]=-35.121*1e-02; /* 1250 */
b[1][10]=30.100*1e-02; /* 1500 */
b[1][11]=-21.987*1e-02; /* 2000 */
b[1][12]=16.788*1e-02; /* 2500 */
b[1][13]= 9.164*1e-02; /* 3750 */
b[1][14]= 3.633*1e-02; /* 5000 */
b[1][15]= 0.513*1e-02; /* 7500 */

```

```

b[2][ 1]=-91.552*1e-02; /* 0 */
b[2][ 2]=-91.412*1e-02; /* 10 */
b[2][ 3]=-90.456*1e-02; /* 20 */
b[2][ 4]=-89.132*1e-02; /* 50 */
b[2][ 5]=-87.211*1e-02; /* 100 */
b[2][ 6]=-82.105*1e-02; /* 250 */
b[2][ 7]=-72.311*1e-02; /* 500 */
b[2][ 8]=-59.101*1e-02; /* 1000 */
b[2][ 9]=-53.001*1e-02; /* 1250 */
b[2][10]=-48.986*1e-02; /* 1500 */
b[2][11]=-40.321*1e-02; /* 2000 */
b[2][12]=-33.765*1e-02; /* 2500 */
b[2][13]=-22.345*1e-02; /* 3750 */
b[2][14]=-17.024*1e-02; /* 5000 */
b[2][15]=-16.046*1e-02; /* 7500 */

```

```

if((wfp1=fopen("contam1.out", "w"))!=NULL) {

    fprintf(wfp1, "\n\n Rg=%f\n\n", Rg);

    /*The case of glass only & pure oil --5mm */
    fprintf(wfp1, "\n***** 5mm sample holder *****\n");
    fprintf(wfp1, "bets1=%f | bets2=%f\n", bets1, bets2);
    sigma1(bets1);
    sig1s=x1;
    sigma2(sig1s, bets2, d3);
    sig2s=x2;
    fprintf(wfp1, "sig1s=%f[/cm] | sig2s=%f[/cm]\n", sig1s, sig2s);
    fprintf(wfp1, "exp(-sig1s*2*d1)=%f\n", exp(-sig1s*2*d1));
    fprintf(wfp1, "exp(-sig2s*d2)=%f\n\n", exp(-sig2s*d2));

    /* The case of contaminated oil --5mm */
    for(i=1; i<=SAMX; ++i) {
        fprintf(wfp1, "b[%d]=%f\n", i, b[2][i]);
        sigma3(sig1s, b[2][i], d3);
        sig2o[i]=x3;
        sig2c[i]=sig2o[i]-sig2s;
        fprintf(wfp1, "sig2c[%d] --1=%f[/cm] | sig2o[%d]=%f[/cm]\n",
            i, sig2c[i], i, sig2o[i]);
        fprintf(wfp1, "exp(-sig2c[%d]*d2)=%f | exp(-sig2o[%d]*d2)=%f\n\n",
            i, exp(-sig2c[i]*d2), i, exp(-sig2o[i]*d2));
    }

    /*The case of glass only & pure oil --10mm */
    fprintf(wfp1, "\n\n\n***** 10 mm sample holder *****\n");

```

```

fprintf(wfpl,"beta1=%f | beta2=%f\n",beta1,beta2);
sigma1(beta1);
sig1=x1;
sigma2(sig1,beta2,d2);
sig2=x2;
fprintf(wfpl,"sig1=%f[/cm] | sig2=%f[/cm]\n",sig1,sig2);
fprintf(wfpl,"exp(-sig1*2*d1)=%f\n",exp(-sig1*2*d1) );
fprintf(wfpl,"exp(-sig2*d2)=%f\n\n",exp(-sig2*d2));

/* The case of contaminated oil --10mm */
for(i=1;i<=SAMX;++i) {
  fprintf(wfpl,"b[%d]=%f\n",i,b[1][i]);
  sigma3(sig1,b[1][i],d2);
  sig2o[i]=x3;
  sig2c[i]=sig2o[i]-sig2;
  fprintf(wfpl,"sig2c[%d] --1=%f[/cm] | sig2o[%d]=%f[/cm]\n",
          i,sig2c[i],i,sig2o[i]);
  fprintf(wfpl,"exp(-sig2c[%d]*d2)=%f | exp(-sig2o[%d]*d2)=%f\n
\n",
          i,exp(-sig2c[i]*d2),i,exp(-sig2o[i]*d2));
}

/* Determination of maximum d (oil depth) */
/* Max d for max concentration is meaning! */
/* (to satisfy non-zero extinction) */

fprintf(wfpl,"\n\n\n*****MAXIMUM OIL DEPTH *****\n");
for(i=1;i<=SAMX;++i) {
  sigma4(sig1,sig2o[i]);
  depth[i]=d4;
  fprintf(wfpl,"depth[%d]=%f[cm]\n",i,depth[i]);
}

/* Determination of minimum d */
/* 4.999=5*exp(-sig2*d) --> d ? */
/* resolution as sensor */

fprintf(wfpl,"\n\n\n*****MINIMUM OIL DEPTH *****\n");
for(i=1;i<=SAMX;++i) {
  d5=-log(4.999/5.)/sig2o[i];
  fprintf(wfpl,"mini-depth[%d]=%f[cm]\n",i,d5);
}

fclose(wfpl);
}

```

```

/*****
/

```

```

/* Finding Attenuation coefficients */

```

```

mg[ 1]=(double) 0e-06 ; /* 0 [g] */
mg[ 2]=(double) 10e-06 ; /* 10 [g]=[ppm] for cc */
mg[ 3]=(double) 20e-06 ;
mg[ 4]=(double) 50e-06 ;
mg[ 5]=(double) 100e-06 ;
mg[ 6]=(double) 250e-06 ;
mg[ 7]=(double) 500e-06 ;
mg[ 8]=(double)1000e-06 ;
mg[ 9]=(double)1250e-06 ;
mg[10]=(double)1500e-06 ;

```

```

mg[11]=(double)2000e-06 :
mg[12]=(double)2500e-06 :
mg[13]=(double)3750e-06 :
mg[14]=(double)5000e-06 :
mg[15]=(double)7500e-06 :

dia[1]=(double)160e-04: /* [cm] : dia. of 160 um */
dia[2]=(double)112e-04:
dia[3]=(double) 59e-04:
dia[4]=(double) 40e-04:
dia[5]=(double) 30e-04:

fr[1]=(double) .05: /* 5 [%] weight fraction */
fr[2]=(double) .20:
fr[3]=(double) .30:
fr[4]=(double) .25:
fr[5]=(double) .20:

q[1]=4.1384e-08: /* Qe*(PI*r[i]^2) */
q[2]=2.0012e-08:
q[3]=5.8651e-09:
q[4]=2.6713e-09:
q[5]=1.5091e-09:

if((wfp2=fopen("contam2.out","w"))!=NULL) {
  for(j=1;j<=SAMX;++j) {
    for(sumni[j]=0,nq[j]=0,i=1;i<=PG;++i) {
      ni[j][i]=(double) mg[j]*fr[i]
        /(4/3*PI*pow(dia[i]/2,3)*rho)
        /(PI*(bd/2*bd/2)*d2) ;

      fprintf(wfp2,"ni[%d][%d]=%e | %ld\n",
        j,i,ni[j][i],(long)ni[j][i]) ;

      sumni[j] += ni[j][i];
      nq[j] += ni[j][i]*q[i];
    }
    /*fprintf(wfp2,"ftpi[%d]=%15.9e\n",j,ftpi[j]) */
    /*tn=(long) sumni[j];total # of particles of j'th sample */
    /*sigmaca[j] = -log(1.- tn*(1.- ftpi[j])) /d2:*/
    /*fprintf(wfp2,"sigmaca[%2d]=%e[/cm]\n",j,sigmaca[j]):*/

    sigmap[j]=(double)nq[j]; /* approximation of sigmaca */
    expoatt[j]=exp(-sigmap[j]*d2);/* exp(-sigmap*d2) */
    fprintf(wfp2,"sigmap[%d]=%e[/cm] | expoatt[%d]=%f[%%]\n\n",
      j,sigmap[j],j,expoatt[j]*100);
  }
  fclose(wfp2);
}

/* END OF main( ) */

/* Subroutine SIGMA1( ) */

```



```

sigma1(bt)
double      bt;

{
    lef=-1.;
    rig=20.;
    x1=(lef+rig)/2;
    yftn1(bt,x1);

    while(fabs(y) >= 1.0e-05) {

        if(y> 0.) {
            rig=x1;
        }
        else {
            lef=x1;
        }
        x1=(lef+rig)/2;
        yftn1(bt,x1);
    }

    return(x1);
}

/* END OF sigma1( ) */

/* Function of yftn1(bt,x1) */
yftn1(bt,x1)
double      bt,x1;
{
    y=bt- exp(-2*x1*d1)
        + Rg*( exp(-2*x1*d1) + 2*exp(-x1*d1) + 1 ) ;
    printf("y(%f)=%f\n",x1,y);
        /*monotonically increasing ftn.*/

    return(y);
}

/* END OF yftn1(bt,x1) */

/* Subroutine SIGMA2( ) */
sigma2(sig,bt,d)
double      sig,bt,d;

{
    lef=-1.;
    rig=100.;
    x2=(lef+rig)/2;
    yftn2(sig,bt,d,x2);

    while(fabs(y2) >= 1.0e-05) {

        if(y2> 0.) {
            rig=x2;
        }
        else {
            lef=x2;
        }
        x2=(lef+rig)/2;
        yftn2(sig,bt,d,x2);
    }

    return(x2);
}

```

```

}          /* END OF sigma2(sig1) */

/* Function of yftn2(sig,bt,d,x2) */
yftn2(sig,bt,d,x2)
double    sig,bt,d,x2:
{
    y2=bt - exp(-(2*sig*d1+x2*d))
        + Rg*(exp(-(2*sig*d1+x2*d)) + 1);
        /*monotonically increasing ftn.*/
    printf("y2(%f)=%f\n",x2,y2);
    return(y2);
}          /* END OF yftn2(sig,bt,d,x2) */

/* Subroutine SIGMA3( ) */
sigma3(sig,bt,d)
double    sig,bt,d:
{
    lef=0.;
    rig=1000.;
    x3=(lef+rig)/2;
    yftn3(sig,bt,d,x3);

    while(fabs(y3) >= 1e-06) {
        if(y3> 0.) {
            rig=x3;
        }
        else {
            lef=x3;
        }
        x3=(lef+rig)/2;
        yftn3(sig,bt,d,x3);
    }

    return(x3);
}          /* END OF sigma3(sig,bt,d) */

/* Function of yftn3(sig1,bt,x3) */
yftn3(sig,bt,d,x3)
double    sig,bt,d,x3:
{
    y3=bt - exp(-(2*sig*d1+x3*d))
        + Rg*(exp(-(2*sig*d1+x3*d)) + 1);
        /*monotonically increasing ftn.*/

    return(y3);
}          /* END OF yftn3(sig,bt,d,x3) */

```

```

/* Subroutine SIGMA4( ) */
sigma4(sig1,s2)
double sig1,s2;
{
  lef=0.;
  rig=1000.;
  d4=(lef+rig)/2;
  yftn4(sig1,s2,d4);
  while(fabs(y4) >= 5.e-06) {
    if(y4 > 0.) {
      rig=d4;
    }
    else {
      lef=d4;
    }
    d4=(lef+rig)/2;
    yftn4(sig1,s2,d4);
  }
  return(d4);
}
/* END OF sigma4(sig1,s2) */

/* Function of yftn4(sig1,s2,d4) */
yftn4(sig1,s2,d4)
double sig1,s2,d4;
{
  y4=1/5000. - exp(-(2*sig1*d1+s2*d4))
    + Rg*(exp(-(2*sig1*d1+s2*d4)) + 1);
  /*monotonically increasing ftn.*/
  return(y4);
}
/* END OF yftn4(sig1,s2,d4) */

```

(2) Q_i 구하는 과정

```
*****
c THIS program can calculate the visibility,scatter-intensity and
c phase angle into the given collecting aperture for particles
c passing thru the crossover region of two converging laser beams.
c BY changing parameters in the data file,visibility,intensity
c and phase angle of particles at any point in the space can be
c calculated.
*****
c
  real*4 alamd
  real*8 xt(200),extinc,wn
  real*8 x,rx,rfr,rfi,qext1,qext2,qextn
  real*8 t(5),ta(4)
  integer*4 neterm(200)
  complex*8 tii,aii,dii,anii,tt,din,anin
  complex*16 a(200,2000),b(200,2000),acbp(2000)
  complex*16 rf,rrf,rrfx,wml,fna,fnb,tcl,tc2,wfn(2),acap(2)
  equivalence (wfn(1),ta(1))
  EQUIVALENCE (FNAP,TD(1)),(FNBP,TE(1)),(FNA,TB(1)),(FNB,TC(1))
2220 format(3x,a9)
  1 format(3d15.5)
  2 format(2i5,6d13.5)
  3 format(1x,t3,' i ',t8,'J',t15,'ALPHA',t28,'BETA',t41,'THETA',
!t55,'PHI',t66,'THETA1',t80,'PHI1',t92,'THETA2',t106,'PHI2')
  4 format(1x,2i5,8(4x,f9.4)-)
  5 format(//t3,'I',t8,'J',t14,'THETA1',t30,'PHI1',t43,
! 'RE S1(t1)',t58,'IM S1(t1)',t73,'RE S2(t1)',t89,'IM S2(t1)')//)
  6 format(1x,2i5,6e15.6)
  7 format(//t3,'I',t8,'J',t14,'THETA2',t30,'PHI2',t43,
* 'RE S1(t2)',t58,'IM S1(t2)',t73,'RE S2(t2)',t89,'IM S2(t2)')//)
*****
  8 format(//t5,'SIZE PARA',t17,'PI*D/DELTA',t34,'V',t46,'WAC',t59,'W
D
!C',t69,'REAL W(1,2)',t82,'IMAG W(1,2)',t97,'ANGLE',t110,'QSCAT',/
)
13 format(//t8,'#/TERMS',t17,'PAR. DIA.',t30,
! 'REAL W(1,2)',t43,'IMAG W(1,2)',t56,'REAL W(2.1)',
! t69,'IMAG W(2.1)',t82,
! 'REAL W(1,1)',t95,'IMAG W(1,1)',t108,'REAL W(2,2)',
! t121,'IMAG W(2,2)')//)
  9 format(1x,9d13.5)
 10 format(1x,3i5,7f12.5)
9003 format(1x,3i5,7d13.5)
 11 format(//t7,'ALPH(1)',t20,'BETA(1)',t34,'GAMM(1)',t45,'THET(1)')//)
 12 format(//t7,'ALPH(2)',t20,'BETA(2)',t34,'GAMM(2)',t45,'THET(2)')//)
 14 format(1x,i13,9d13.5)
 30 format(1x,4e13.4,4d13.4)
 31 format(1x,8e13.4)
 32 format(1x,2i5,2(e13.4,d13.4))
 33 format(1x,4e13.4)
 34 format(1x,f8.5)
 39 format(//t3,'I',t8,'J',t12,'THETA PR',t29,'PHI PR',t43,
! 'PP(I,J)',t58,'QQ(I,J)',t73,'RR(I,J)')//)
1280 format(10f13.4)
1281 format(10i5)
1292 format(10f8.3)
1293 format(7i8,3f8.2)
1294 format(/t5,'TWO BEAM STOPS:L/S=',f7.3,5X,'P/S=',f7.3)
1295 format(1x,2i3,8d12.3)
1296 format(/t3,'SETS',t14,'ALPHZ',t23,'BETAZ',t36,'ZETA',
! t46,'DELTA',t59,'INSIDE ANG',t73,
! 'APER. HALF ANG',t90,'F/#',t103,'LAMBDA')
1297 format(/t5,'INDEX OF REFRACTION=(',f6.3,1x,f6.3,')')

```

```

1298 format(//t5,'(APERTURE INSIDE RADIUS/OUTSIDE RADIUS)=',f4.2)
1282 format(//t5,'ANGLE TO INSIDE RADIUS OF APERTURE=',f5.2)
1283 format(//,10x,'THE POLARIZATION ANGLE IS ',f6.2,'DEGREE',//)
1284 format(//,10x,'THE FIELD VECTOR,E. IS DIRECTED + X-AXIS.',//)
1299 format(3x,i3,3x,2(2x,f7.3),2x,2(2x,f9.5),2x,4(2x,f12.5))
3330 format(10f13.6)
3340 format(10e13.5)
*****
c OPEN(1,file='DISK$DSK2:[MHDDATA,SON]SCATT.DAT',status='old') *
c OPEN(2,file='PHASE.OUT',status='new') *
c OPEN(3,file='VISPH.OUT',status='new') *
c OPEN(4,file='mieph1.out',status='unknown') *
c OPEN(7,file='PHANG.OUT',status='new') *
c OPEN(8,file='DATA.PLT',status='scratch') *
c CALL TIME(TME) *
c WRITE(2,2220) TME *
*****
c
*****
c rfr: real part of index of refraction. rfi: imaginary part of i.o.r.
c NOSETS: TOTAL NUMBER OF DIFFERENT PARTICLE SIZES.
c DODBA: LOWER LIMIT OF PARTICLE DIAMETERFRINGE PERIOD.
c DODEC: DIAMETER INCREMENTFRINGE PERIOD. UPPER LIMIT OF PAR. DIA.
c WILL BE FRINGE PERIOD*(DODBA+DODEC*NOSETS). ALAMDA: WAVE LENGTH.
c DELTA: FRINGE PERIOD. FNO: F-NUMBER OF COLLECTING LENS.
c KCRITE: SPECIFY LOWER LIMIT OF SCATTERING INTENSITY FROM EACH
c POLES. ALPHZ: ROTATION ANGLE ABOUT Z-AXIS.
c BETAZ: ROTATION ANGLE ABOUT Y'-AXIS, ANGIN: INSIDE ANGLE OF
c COLLECTING LENS.
c JCRITE: SPECIFY SYMMETRICITY OF COLLECTING LENS LOCATION.
c (FOR SYMMERIC CASE JCRITE=1, UNSYMMETRIC CASE JCRITE=2.)
c ITNUM: TOTAL NUMBER OF COLLECTING LENS LOCATION.
c DEGINC: OFF-AXIS ANGLE INCREMENT. JAF: SPECIFY EQUALITY OF BETA(1)
c AND BETA(2) VALUE.
c MPOLA: SPECIFY POLARIZATION DIRECTION.(0=E VETECTOR IS IN X-AXIS.
c OTHERWISE SPECIFY POLARIZATION DIRECTION IS CHANGED.)
c ADDDANG: SPECIFY CERTAIN COLLECTING LENS LOCATION WHICH WILL NOT BE
c COVERED BY SPECIFIED DEGINC.
c POLANG: POLARIZATION ANGLE. 90 DEG.= H FIELD IS PARALLEL TO X-AXIS.
c 45 DEG. H AND E FIELD BOTH MAKE 45 DEG. WITH X-AXIS
c MIESCO: CONSTANT FOR WRITING MIE SCATTERING COEFFICIENTS.
c 1: NO WRITING, OTHERWISE WRITING.
*****
c
print*, 'Type real value of the refractive index !'
read*,rfr
rfr=rfr/1.46
print*, 'Type imaginary value of the refractive index !'
read*,rfi
rfi=rfi/1.46
alamd=.6328/1.46
c
c EVALUATION OF MIE SCATTERING COEFFICIENTS.
*****
c x : SIZE PARAMETER OF THE SPHERE.(2 * PI *
c RADIUS OF THE SPHER)/(alamd)
c rf : REFRACTIVE INDEX OF THE MATERIAL OF THE SPHERE.
c COMPLEX
c QUANTITY..FORM: rf= (rfr-i*rfi)
c FOR LENZ FORMULA AND TOTAL NUMBER OF TERMS(N) SHOULD
c BE EVALUATED
c FOR GIVEN SIZE PARAMETER,x, CONSULT
c 'MIE SCATTERING CALCULATIONS:
c ADVANCES IN TECHNIQUE AND FAST, VECTOR-SPEED
c COMPUTER CODES.' BY

```

```

c          W. WISCOMB.NCAR/TN-140+STR.
c frfr: SPECIFY LOWER LIMIT OF RFI VALUE OF GIVEN X FOR
c WHICH
c          LENZ FORMULA SHOULD BE APPLIED.

```

```

*****

```

```

PI=3.14159265358979d0
PI2=PI*2.
wn=PI2/alamd
con=PI/180.d0
maxit=10000
eps1=1.0e-2
eps2=1.0e-8
frfr=16.35*(rfr**2)+8.42*rfr-15.04
xt(1)=PI*160./alamd
xt(2)=PI*112./alamd
xt(3)=PI*59./alamd
xt(4)=PI*40./alamd
xt(5)=PI*30./alamd
do 1301 noset=1,5
  x=xt(noset)
  if(x.le.0.02) goto 501
  if(x.le.8.) goto 502
  if(x.lt.4200.) goto 503
  spn=x+4.*(x**(1./3.))+2.
  nn=spn
  goto 504
501 nn=1
  goto 504
502 spn=x+4.*(x**(1./3.))+1.
  nn=spn
  goto 504
503 spn=x+4.05*(x**(1./3.))+2.
  nn=spn
504 continue
  neterm(noset)=nn
  rf=dcmplx(rfr,-rfi)
  rrf=1.0d0/rf
  rx=1.0d0/x
  rrfx=rrf*rx
  xfrfr=frfr/x
  t(1) = dcos(x)
  t(2) = dsin(x)
  wml=dcmplx(t(1),-t(2))
  wfn(1)=dcmplx(t(2),t(1))
  wfn(2)=rx*wfn(1)-wml
  t(1) = rfi * x
  kount=0

```

```

*****
c IT LOOKS LIKE frfr IS NOT SUFFICIENT FOR THE
c CRITERION OF LENZ
c FORMULA APPLICATION. WHEN ior=1.95-i0.66.
c (NEED MORE STUDIES ??)

```

```

*****

```

```

  if(t(1).gt.43) goto 40
  if(rfi.gt.xfrfr) goto 40
**UPWARD RECURRENCE FOR PSI*(mx)/PSI(mx)**
t(3) = 0.5d0 * dexp(t(1))
t(4) = 0.25d0/t(3)
t(1) = t(3) + t(4)
t(2) = t(3) - t(4)
t(3) = t(2) * t(2)
t(2) = t(1) * t(2)
t(1) = t(3)
t(3) = rfr * x
t(4) = dsin(t(3))

```

```

t(3) = dcos(t(3))
t(1) = t(1) + t(4) * t(4)
t(3) = t(3) * t(4)
acap(1)=dcmplx(t(3),t(2))/t(1)
goto 50
**LENZ FORMULA FOR PSI*(mx)/PSI(mx)**
40 continue
write(*,6)
nnpl=nn+1
tii=nnpl*rrfx
mm=-1
nn2=2*nn+3
aai=(mm*nn2)*rrfx
dii=aai
anii=dii+1.0/tii
kount=1
233 kount=kount+1
if(kount.gt.maxit) goto 445
if(cabs(anii/aai).gt.eps1.and.cabs(dii/aai).gt.eps1) goto 440
*ILL-CONDITIONED CASE--STRIDE TWO TERMS INSTEAD OF ONE**
mm=-mm
nn2=nn2+2
aai=(mm*nn2)*rrfx
anin=aai*anii+1.0
din=aai*dii+1.0
tii=(anin/din)*tii
mm=-mm
nn2=nn2+2
aai=(mm*nn2)*rrfx
anii=aai+anii/anin
dii=aai+dii/din
kount=kount+1
goto 233
440 tt=anii/dii
tii=tt*tii
***CHECK FOR CONVERGENCE*****
if(abs(real(tt)-1.).lt.eps2.and.abs(aimag(tt)).lt.eps2) goto 45
mm=-mm
nn2=nn2+2
aai=(mm*nn2)*rrfx
anii=aai+1./anii
dii=aai+1./dii
goto 233
445 write(*,446)nn,x,rf,aai,anii,dii,tt,tii
446 format(///,'LENZ METHOD FAILED TO CONVERGENCE',/,'NN=',I6,/,
! 'SIZE PARA.',d13.5,/, 'INDEX OF REFRA.',2d13.5,/,
! 'AII=',2d13.5,/, 'ANII=',2d13.5,/, 'DII',2d13.5,/,
! 'TT=',2d13.5,/, 'TII=',2d13.5)
goto 444
*****
c ACAP(1)=DCMPLX(0.0d0,1.0d0) *
c WRITE(2,8) T(1) *
*****
45 acbp(nn)=tii
do 447 iw=1,nn-1
niw=nn-iw
acbp(niw)=(niw+1)*rrfx-1.d0/(((niw+1)*rrfx)+acbp(niw+1))
447 continue
tcl=acbp(1)*rrf+rx
tc2=acbp(1)*rf+rx
goto 448
***EVALUATION OF MIE SCATTERING COEFFICIENTS***
c fna:MIE SCATTERING COEFFICIENT a(n) *
c fnb:MIE SCATTERING COEFFICIENT b(n) *
*****

```

```

50 acap(2)=-rrfx+(1.d0/(rrfx-acap(1)))
   tc1=acap(2)*rrf+rx
   tc2=acap(2)*rf+rx
448 continue
   fna=(tc1*ta(3)-ta(1))/(tc1*wfn(2)-wfn(1))
   fnb=(tc2*ta(3)-ta(1))/(tc2*wfn(2)-wfn(1))
   a(noset,1)=fna
   b(noset,1)=fnb
   qext1=3.*(real(a(noset,1))+real(b(noset,1)))
*****
c  A(1)=CMPLX(SNGL(TB(1)),SNGL(TB(2)))      *
c  B(1)=CMPLX(SNGL(TC(1)),SNGL(TC(2)))      *
c  FNAP=FNA                                  *
c  FNBP=FNB                                  *
c  36 FORMAT(/T10,'N-',I5)                  *
c  37 FORMAT(4X,4E15.3)                      *
c  T(1) = 1.50D0                              *
c  TB(1) = T(1) * TB(1)                       *
c  TB(2) = T(1) * TB(2)                       *
c  TC(1) = T(1) * TC(1)                       *
c  TC(2) = T(1) * TC(2)                       *
c  QEXT = 2.0D0 * (TB(1) + TC(1))             *
c  QSCAT = (TB(1)**2 + TB(2)**2 + TC(1)**2 *   *
c          + TC(2)**2)/0.75D0*                *
c  CTBRQS = 0.0D0                              *
*****
   if(nn.eq.1) goto 100
   nmax=nn
   qextn=qext1
   do 65 n=2,nmax
c    write(*,*) n,noset
      t(1) = 2.d0*n - 1.d0
      t(2) = (1.d0*n) - 1.d0
      t(3) = 2.d0*n + 1.d0
      wml=wfn(1)
      wfn(1)=wfn(2)
      wfn(2)=t(1)*rx*wfn(1)-wml
      if(kount.gt.0) goto 449
      acap(1)=acap(2)
      acap(2)=-n*rrfx+(1.d0/(n*rrfx-acap(1)))
      tc1=acap(2)*rrf+n*rx
      tc2=acap(2)*rf+n*rx
      goto 450
449 continue
      tc1=acbp(n)*rrf+n*rx
      tc2=acbp(n)*rf+n*rx
450 continue
      fna=(tc1*ta(3)-ta(1))/(tc1*wfn(2)-wfn(1))
      fnb=(tc2*ta(3)-ta(1))/(tc2*wfn(2)-wfn(1))
      a(noset,n)=fna
      b(noset,n)=fnb
      qext2=(2*n+1)*(real(a(noset,n))+real(b(noset,n)))
      qextn=qextn+qext2
*****
c  A(N)=CMPLX(SNGL(TB(1)),SNGL(TB(2)))      *
c  B(N)=CMPLX(SNGL(TC(1)),SNGL(TC(2)))      *
c  FNAP=FNA                                  *
c  FNBP=FNB                                  *
c  T(5) = 1.0D0*N                              *
c  T(4) = T(1)/(T(5) * T(2))                   *
c  T(2) = (T(2) * (T(5) + 1.0D0))/T(5)         *
c  CTBRQS = CTBRQS + T(2)*(TD(1)*TB(1) +      *
c          TD(2)*TB(2) + TE(1)*TC(1)*        *
c          ! + TE(2)*TC(2)) + T(4)*(TD(1)*TE(1) + *
c          TD(2)*TE(2))                          *

```



```

c      QEXT = QEXT + T(3)*(TB(1)+TC(1))      *
c      T(4) = TB(1)**2+TB(2)**2+TC(1)**2 + TC(2)**2 *
c      QSCAT = QSCAT + T(3) * T(4)          *
c      T(2) = 1.D0*N * (N + 1)              *
c      T(1) = T(3)/T(2)                     *
*****
c
c      65 continue
c          extinc=qextn*PI2/(wn**2)*1.0e-12
c          write(4,50000) noset,extinc
c50000 format('noset=',i3,' |', ' extinc=',e14.5/)
50000 format(i3,5x,e14.5)
c      100 continue
c      1301 continue
c      444 stop
c          end

```

(3) 회절패턴의 좌표변환 및 data acquisition

```

/*****
 * This is a program for transforming rectangular *
 * coordinates into polar coordinates for energy *
 * diffraction patterns of sprayed particles *
 *****/

#include <stdio.h>
#include <io.h>
#include <malloc.h>
#include <math.h>
#include <direct.h>
#include <memory.h>
#include <os2.h>

#define X_MAX 512L
#define Y_MAX 512L
#define RADI 255L

unsigned char huge *a;
unsigned int r,rnum[RADI+1L],XM,YM;
unsigned int rnum1[RADI+1L],rnum2[RADI+1L];
float sum1[RADI+1L],sum2[RADI+1L];
unsigned long off;

FILE *rfp1,*rfp2,*wfp;
float huge *af;
float sum[RADI+1L],ave[RADI+1L];
unsigned long summ[RADI+1L];

main (argc,argv)
int argc;
char *argv[];
{
    if ( ( access(argv[1],0) ) == -1 ) {
        printf("\n\n** ERROR **\n image file not found --%s",argv[1]);
    }

    /* Input the center of the image */

    printf("Type XM (center of x) !\n");
    scanf("%d",&XM);
    printf("Type YM (center of y) !\n");
    scanf("%d",&YM);

    /* Dynamic Storage Allocation */

    off=(long)X_MAX*(long)Y_MAX;
    off=off/4L;
    if((af=(float huge*)halloc((long)off,(unsigned)sizeof(float)))==NU
LL)
    {
        printf("\n\n** Insufficient memory for AF (Float Huge) !");
        exit(1);
    }
}

```

```

/* Image file reading */

(long)a=(long)af;
if((rfp1=fopen(argv[1],"rb"))==NULL) {
    printf("\n I can't find the image file [%s].",argv[1]);
    putchar(7); putchar(7); putchar(7);

    abort();
}
else {
    fread((unsigned char*)af,(X_MAX/4L*sizeof(float)),Y_MAX,rfp1);
    fclose(rfp1);
}

sumr( );
for(r=0;r<(unsigned int)RADI;+r) {
    sum1[r]=sum[r];
    /*rnum1[r]=rnum[r];*/
}

/* Background file reading */
/*if((rfp2=fopen(argv[2],"rb"))==NULL) {
    printf("\n I can't find the background file [%s].",argv[1]);
    putchar(7); putchar(7); putchar(7);
    abort();
}
else {
    fread((unsigned char*)af,sizeof(float),RADI,rfp2);
    fclose(rfp2);
}*/

/* sumr( );
for( r=0; r<(unsigned int)RADI; +r ) {
    if(r<=19) {
        sum2[r]=0;
    }
    else {
        sum2[r]=sum[r];
    }
}*/

/* Output file generation */

if((wfp=fopen(argv[2],"w"))!=NULL) {

    for(r=0; r <(unsigned int)RADI;+r) {
        summ[r]=(unsigned long)(sum1[r]);
        ave[r]=(float)summ[r]/(rnum[r]); /*Average of sum[r] */
        fprintf(wfp," %10ld\n",summ[r]);
    }
    fclose(wfp);
}

/* End of main */

sumr( )
}

```

```

unsigned int      i,j,b;
float             dist;

    for (r=0; r <=(unsigned int)RADI ;++r){
        sum[r] =0 ;
        rnum[r]=0;
    }

    for (i=0 ; i <(unsigned int)X_MAX ; ++i){
        off=(long)i*(long)Y_MAX;
        for (j=0 ; j <(unsigned int)Y_MAX ; ++j){
            dist=sqrt(((long)i-XM)*((long)i-XM)
                +((long)j-YM)*((long)j-YM));
            r=(unsigned int) dist;

            if (r <=(unsigned int)RADI){
                rnum[r] += (unsigned int) 1;
                /* # of the same r's*/
                b=(unsigned int)*(a+off+(long)j);

                sum[r] +=(float)b;
            }
        }
    }
    return;
}

```

(4) 에너지 분포함수로부터 N_i 구하는 과정

```

/*****
* This is a program for getting weithing coefficients *
* which determine the distribution of size of      *
* sprayed water.                                     *
*****/

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <malloc.h>
#include <memory.h>

#define NR      255  /* # of rings */
#define M      10   /* # of size groups */
#define RSATP  0    /* saturation point (R) */
#define N      (NR-RSATP) /* # of rings except R */
#define BETA   1.0e+25
#define PI     3.141592
#define LAMBDA (0.632e-06) /* [m] :wavelenth of laser */
#define FOC    (8.5e-02) /* [m] :focal lenth */
#define DELSF  (14e-06/(LAMBDA*FOC)) /* real value of
                                         dels/(f*lambda) */

FILE *rfp1,*rfp2,*wfp;
double ener[NR+1],cener[NR+1];
unsigned int i,j,k,id[N+1][N+1];
float b[M+1];
float *af1,*af2;
double tinv[N+1][N+1];
double t[N+1][M+1],tt[M+1][N+1];
double x1,x2,Ni[M+1],fNi[M+1],sw;
double a[N+1][N+N+1],e[N+1][N+1];

main (argc,argv)
int argc;
char *argv[];
{
    if (argc < 3) {
        puts("\n I/O Parameter error...");
    }

    if ( ( access(argv[1],0) ) == -1 ) {
        printf("\n**ERROR**\nEnergy file not found--%s",argv[1]);
    }

    /* Dynamic Memory Allocation */

    if( ((af1=(float *)malloc((long)NR,sizeof(float)))!=NULL)||
        ((af2=(float *)malloc((long)M,sizeof(float))) !=NULL) ){

        printf("\n Insufficient memory for *af (float) !");
        exit(1);
    }

    /* Experimental value reading */

    if((rfp1=fopen(argv[1],"r"))!=NULL) {
        printf("\nI can't find energy file[%s].",argv[1]);
        putchar(7); putchar(7); putchar(7);
        abort();
    }
    else {

```

```

    fread((float *)af1,sizeof(float),NR,rfp1);
    fclose(rfp1);
}

/* Transforming pointers to array */
for(i=RSATP;i<NR;++i) {
    ener[i+1-RSATP]=(double)*(af1+i);
}

/* Reading of paticle size values */

if((rfp2=fopen(argv[2],"r")==NULL) {
    printf("\nI can't find the size group file[%s].",argv[2]);
    putchar(7); putchar(7); putchar(7);
    abort();
}
else {
    fread((float *)af2,sizeof(float),M,rfp2);
    fclose(rfp2);
}

/* Transforming pointers to array */
for(i=0;i<M;++i) {
    b[i+1]=(float)*(af2+i); /* b[i]:diameters of size groups */
}

/* Getting element of Bessel Ftn. Matrix (T) */

for(i=RSATP+1;i<=NR;++i) {
    for(j=1;j<=M;++j) {

        x1=(double)2*PI*b[j]*(double)(i-1)*DELSF;
        x2=(double)2*PI*b[j]*(double)i*DELSF ;
        printf("x1=%e | x2=%e\n",x1,x2);
        t[i-RSATP][j]=(double) BETA*(b[j]*b[j])*
            ( j0(x1)*j0(x1)+j1(x1)*j1(x1)
              -j0(x2)*j0(x2)-j1(x2)*j1(x2) );
        printf("t[%d][%d]=%e\n",i-RSATP,j,t[i-RSATP][j]);
    }
}

/* Getting T-transpose & T*(T-transpose) */
/* 1st, Getting T-transpose */
for(i=1;i<=N;++i){
    for(j=1;j<=M;++j) {
        tt[j][i]=(double)t[i][j];
    }
}
printf("tt[j][i] is successful!\n");

/* 2nd, Getting T*(T-transpose) */
for(i=1;i<=N;++i) {
    for(j=1;j<=N;++j) {
        for(k=1;k<=M;++k) {
            a[i][j] += (double) t[i][k]*tt[k][j];/* a=tpseudo */
            /*printf("a[%d][%d]=%e\n",i,j,a[i][j]);
        }
    }
}
printf("a[i][j] is successful!\n");

/* Bessel Ftn Matrix (T) inversion */

```

```

    gjseq( );
    printf("inv(t*tt) matrix is successful!\n");

/* Output file Obtaining */
for(i=1;i<=M;++i) {
    for(j=1;j<=N;++j) {
        for(k=1;k<=N;++k) {
            tinv[i][j]+=(double)tt[i][k]*e[k][j];
        }
        /*printf("tinv[%d][%d]=%e\n",i,j,tinv[i][j]);*/
    }
}
printf("tinv[i][j] is successful!!\n");

/* Number Ftn. by (Tinv*Ener) matrix */
if((wfp=fopen("number1.out","w"))!=NULL) {
    for(i=1;i<=M;++i) {
        for(k=1;k<=N;++k) {
            Ni[i]+=(double)tinv[i][k]*ener[k];
        }
        sw += Ni[i];
        printf(" Fraction of proposed sizes=%f\n",Ni[i]);
        fprintf(wfp,"Ni[%2d]=%e\n",i,Ni[i]);
    }
    fprintf(wfp,"-----\n");

    for(i=1;i<=M;++i) {
        fNi[i]=Ni[i]/sw*100; /* number fraction. [%]. */
        fprintf(wfp," \nfNi[%f][um]=%e\n",b[i],fNi[i]);
    }
    fprintf(wfp,"-----\n");
    for(i=1;i<=NR;++i) {
        for(j=1;j<=M;++j) {
            cener[i] += (double)t[i][j]*Ni[j];
            fprintf(wfp,"cener[%2d]=%e\n",i,cener[i]);
        }
    }
    fclose(wfp);
}

/* END of main( ) */

```

```

/*Subroutine for solving inverse matrix: G-J algorithm*/
gjseq()
{
    double          factor;
    for(i=1;i<=N;++i) {
        for(j=1;j<=N;++j) {
            if(i==j)
                id[i][j]=(unsigned)i;

            else
                id[i][j]=(unsigned)0;
        }
    }

/* Store knowns as part of matrix array */
for(i=1;i<=N;++i) {
    for(j=1;j<=N;++j) {
        a[i][j+N]=(double)id[i][j];
    }
}

```

```

}
printf("a[i][j+N] is successful!\n");

for(i=1;i<=N;++i) {
    if((a[i][i])) {
        /* Normalize diagonal element */
        for(j=1;j<=(N+N);++j) {
            a[i][j]=a[i][j]/a[i][i];
        }
        /*printf("\nNormalization of diagnal elements is success!\n"
);*/

        for(k=1;k<=N;++k) {
            if(k!=i) {
                if((a[k][i])) {
                    /* Set elements in column to zero*/
                    factor=a[k][i];
                    for(j=i;j<=(N+N);++j) {
                        a[k][j]=a[k][j]-factor*a[i][j];
                    }
                }
            }
        }
    }
    else
        printf("Element on main diagonal is zero.\n");
}

/* Getting the result */
for(i=1;i<=N;++i) {
    for(j=1;j<=N;++j) {
        e[i][j]=a[i][j+N];
    }
}
printf("e[%d][%d]=%e\n",i,j,e[i][j]);
printf("e[i][j] is successful!\n");

return;
}

```