

광감쇄를 이용한 마모입자의 농도 측정

강기호* · 손정영* · 전형욱* · 윤의성** · 안효석**

*한국과학기술연구원 응용전자연구실

**한국과학기술연구원 Tribology연구실

Wear Debris Concentration Measurement by Laser Beam Attenuation

Kiho Kang, Jung-Young Son, Hyung-Wook Jeon,
Eui Sung Yoon, Hyo Sok Ahn

Korea Institute of Science and Technology

Abstract—The size and concentration of wear debris in lubricating oil often reveal the operating condition of the rotating machinery. To evaluate the possible application of light attenuation measurement for the estimation of wear debris concentration in the lubricating oil, the light transmittance through the lubricating oil cell contaminated with various concentrations of diatomite particles was measured, the attenuation coefficient was estimated from the transmittance measurement and the coefficients were compared with those obtained from the scattering theory. The comparison showed good agreements between them. It is also noted that the experimentally determined attenuation coefficient showed almost linear relation with particle weight concentrations for the concentrations within the range of 2000 ppm.

For the case of 0 ppm weight concentration of diatomite particles in the lubricating oil cell, the thickness of the cell required to give 100 μ W light attenuation is 7.75 mm. This result indicates that the light attenuation method will be one of the possible candidates of machine failure diagnostic sensors for the estimation of wear debris concentration in the lubricating oil.

1. 서 론

윤활유내에 포함된 마모입자는 기계시스템의 상태를 잘 대변하여 주므로 마모입자의 크기분포(size distribution), 단위체적당 입자수(concentration), 구성성분(composition), 형상(shape) 등의 정확한 규명은 기계시스템의 상태진단을 위한 여러 정보를 제공한다.

현재 윤활유내의 마모입자 검출장비로는 자기력을 이용한 자성마모입자 수집용 ferrography, 이의 단점을 보완한 rotary particle depositor (RPD), magnetic plug 등이 주로 사용되어지고 있으며 크기분포, 입자수, 성분, 형상의 측정을 위해 optical microscope, PQ(particle quantifier), Image Analyzer, SEM & EDAX 등이

사용되는데 검출과 측정이 off-line으로 행하여지므로 시간이 많이 소요되며 분석을 위해서는 전문 인력이 요구된다. 특히 설비진단 기술은 계속적, 정기적으로 행하여야 하므로 on-line으로 구성되어져야만 한다.

광기술의 마모입자 측정분야에의 응용은 ferrography에 연결된 optical density[1] 측정이라든지, 영상 분석법[2] 또는 spectrometric oil analysis[3] 등 초보적인 것으로서 수집에 의존하는 것들이었다. 60년대 이후 레이저의 개발과 더불어 입자 측정을 위한 광기술도 on-line화로의 급속한 발전을 이룩하였으나, 윤활유내 마모입자의 측정에 있어서는 회전자계 내에서 ferrous 계통의 마모입자를 Fourier 변환방법을 이용 분석을 행한 것 외에는 없는 것 같다[4]. 이

방법은 비철계통 입자들에 대한 정보를 얻을 수 없어 유효할 상태 진단에 문제가 있다.

본 논문에서는 레이저광의 감쇄를 이용한 유효유내 마모입자(ferrous와 nonferrous 계통입자 포함)의 농도를 정량적으로 측정하기 위한 방법을 제안하고 이에 부수한 광학 시스템과 구조토(diatomite) 입자를 이용한 측정결과를 기술했다.

2. 광감쇄 이론

광감쇄는 빛이 매질내를 통과할 때 매질에 의한 흡수와 전파경로상에 놓인 미세입자 들에 의한 빛의 산란(scattering) 및 흡수(absorption)에 의한 것으로, 입자에 의한 감쇄정도는 입자 한개에 의한 감쇄량과 전파경로상에 놓인 전 입자수와의 곱에 관계한다. 물론 매질내 입자의 크기가 일정하지 않을 경우는 입자의 크기 분포를 고려해야 한다.

광감쇄의 정확한 측정을 위해서는 입사광의 강도(intensity)와 매질내의 전파경로를 정확히 알아야 하고, 매질과 매질내 입자들의 굴절율도 사전에 알아야 한다.

매질에 빛이 입사했을 때 매질표면에서 빛의 일부가 반사되는데 이 반사량은 매질내에서의 빛의 감쇄와는 상관없이 입사광이 매질에 입사했을 때 매질에서의 출력광은 다음식으로 주어진다[5].

$$I = I_0 e^{-\sigma L} \quad (1)$$

여기서 I_0 와 I 는 입사광과 출력광의 세기를 나타내며, L 은 빛의 전파경로, 그리고 σ 는 감쇄계수(attenuation coefficient)를 나타낸다. 입사광과 출력광의 비 I/I_0 , 즉 $e^{-\sigma L}$ 을 transmittance라고 한다. σ 는 다음식으로 주어진다[6].

$$\sigma = \frac{\pi}{4} C_n \int_0^{\infty} Q_e(x, m) N_r(D) D^2 dD \quad (2)$$

여기서 C_n 는 매질내 단위체적당 마모입자의 수, D 는 마모입자의 직경, $N_r(D)$ 는 마모입자의 분포함수 그리고 $Q_e(X, m)$ 은 감쇄효율(extinction efficiency)라고 하는데 m 은 상대굴절율(relative refractive index)로 입자와 매질 굴절율의 비를 나타내며, X 는 Size Parameter로서 $\pi D/\lambda$ 로 주어진다. 여기서는 매질내에서의 입사광 파장이다. 식 (2)에서 보는 바와 같이 σ 는 C_n 와 선형적으로 비례한다.

구형입자의 경우 $Q_e(X, m)$ [7]은

$$Q_e(X, m) = \frac{2}{X^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [\text{Re}(a_n) + \text{Re}(b_n)] \quad (3)$$

으로 주어지는데 여기서 a_n 과 b_n 은 X 와 m 의 함수로서 n 차 Mie Scattering Coefficient라고 한다. (2)식을 이산화시키면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^N M_i Q_e(X_i, m) D_i \quad (4)$$

여기서 M_i 는 $C_n \cdot N_r(D_i)$ 로 i 번째 크기 그룹내의 총 입자수를 나타내며, D_i 는 i 번째 크기 그룹의 평균 크기를 나타낸다. σ 를 i 번째 사이즈 그룹의 총무게 W_i 로 나타내면

$$\sigma = \frac{2}{3\rho} \sum_{i=1}^N \left(\frac{W_i}{D_i} \right) Q_e(X_i, m) \quad (5)$$

여기서 ρ 는 입자의 비중이다.

3. 측정 및 결과 분석

먼저 식 (3)은 IBM에서 개발된 Mie Scattering Subroutine을 사용하여 계산했다. 광감쇄를 이용 유효유내 마모입자의 농도를 측정하기 위해 Fig. 1과 같은 측정시스템을 구성했다. 먼저 입사광을 만들기 위해 수직 분극 출력이 최대 5.5 mW인 He-Ne 레이저를 공간여파기(spatial filter)와 렌즈를 이용하여 빔을 정화하고, 이것을 3 mm 직경의 평행빔으로 만들어 유효유와 오염입자들이 섞여 있는 샘플 셀(sample cell)

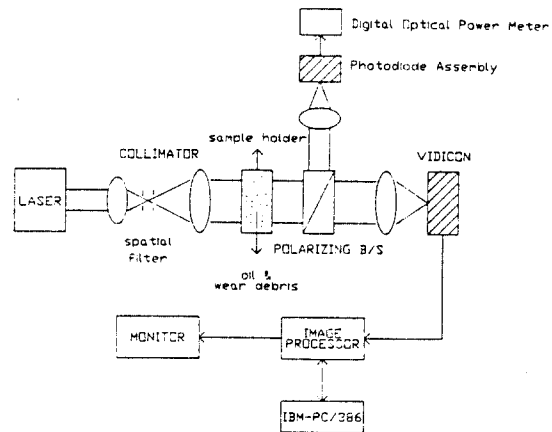


Fig. 1. The measurement system of the wear debris in lubrication oil

을 수직으로 통과하게 했다. 샘플 셀을 통과한 광 즉, 출력광은 편광 빔 분할기(polarizing beam splitter)에 의해 수직과 수평 성분으로 나뉘는데 수직성분만 광 검지기(photodetector)에 도달하여 출력광의 세기를 결정한다. 수평 분극 성분은 마모입자의 Fourier 변환상을 이용하여 숫자가 가장 많은 마모입자의 크기를 측정하기 위해 사용된다.

샘플셀은 굴절율이 1.46인 실리카 유리로 내폭이 1 cm인 직육면체이다. 따라서 입사광의 샘플셀 내에서의 전파 경로는 1 cm이므로 sensing zone은 직경이 3 mm이고 길이가 1 cm인 원통이다. 비교측정을 목적으로 실제 실험에서 폭이 5 mm인 샘플셀에서의 광 감쇄도 측정했다. 마모입자로는 크기분포가 알려져 있는 비철(non-ferrous) 입자인 규조토(diatomite)를 사용했다.

실험에 사용된 규조토는 실리카(SiO₂)와 알루미늄(Al₂O₃)가 전체 성분의 95%를 차지하는 혼합물로 비중이 2.18~2.35 g/cm³ 범위에 있고 굴절율은 1.522(이 값은 규조토 구성성분들의 굴절율을 성분비에 따른 산술적인 평균에 의해 구했다)이다. 이 규조토의 크기 범위에 따른 무게비와 이론치의 계산을 위해 사용한 각 사이즈 범위의 대표치가 Table 1에 주어져 있다. Fig. 2는 이 규조토를 1000배 정도 확대한 전자 현미경 사진이다. 사진에서 보는 것과 같이 이 규조토는 크기가 20 μm 이하인 것이 전체의 75% 이상을 차지하는 불규칙한 형태의 입자들로 구성되어 있다.

윤활유는 Regal R & O 46이라는 제품으로 굴절율이 알려져 있지 않으나 실험적으로 샘플셀이 빈 경우와 윤활유로 차있는 경우의 반사손실 차이를 이용, 계산하여 [부록] 1.46을 얻었다. 이 값은 일반적으로 알려진 왁스(Wax)들의 굴절율인 1.43~1.51 범위[9] 내에 있고, 또한 샘플셀 자체의 굴절율과 같아 샘플셀과 윤활유의 접촉부에서는 반사가 일어나지 않는다는 것을 의미한다.

Table 1. The weight fraction and the mean values of each size group of the diatomite

Size Distribution	Weight Percent	Mean Size
> 149 μm	0-5%	150 μm
149-741 μm	10-20%	93 μm
74-44 μm	20-30%	52 μm
44-37 μm	10-25%	39 μm
< 37 μm	30-50%	7.5 μm



Fig. 2. The shape of the diatomite

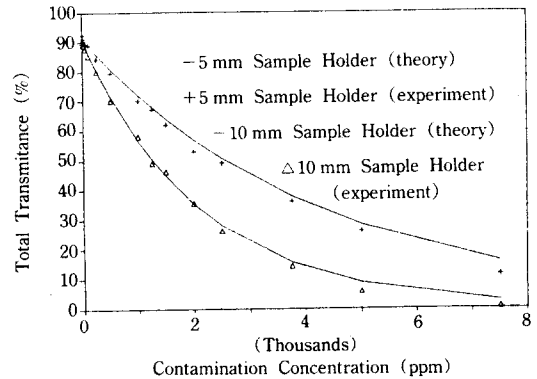


Fig. 3. Transmittances according to particle concentration

Fig. 3은 입자의 weight concentration(윤활유 1 cc 내에 있는 마모입자의 무게비를 ppm 단위로 표시)에 따른 폭이 1 cm인 샘플셀과 5 mm인 샘플셀에서 transmittance(I/I₀)를 각각의 이론치와 비교했다. 전반적으로 실험치가 이론치보다 작게 나타났으나 무게 농도가 2000 ppm 이하인 경우 이론치와 실험치의 차이는 transmittance로 대략 3% 미만이며 폭이 1 cm인 경우 그 차이가 더 작게 나타났다. 실험치와 이론치의 차이는 셀 표면 상태와 입사빔의 셀 입사각도의 변동과 불규칙한 형태의 규조토 입자를 원형입자로 가정된 이론치의 계산에 의해 야기된 것 같다.

Fig. 4는 Fig. 3의 측정 결과로부터 얻은 감쇄정수의 값을 weight concentration에 따라 도시했다. 4000 ppm 미만에서는 1 cm와 5 mm 샘플셀의 결과가 아주 잘 일치하고 있다. 또한 기울기에는 조금 차이가 있으나 농도에 거의 선형적으로 비례하는 것을 알 수 있다. 특히 weight concentration이 2000 ppm 미만의 경우

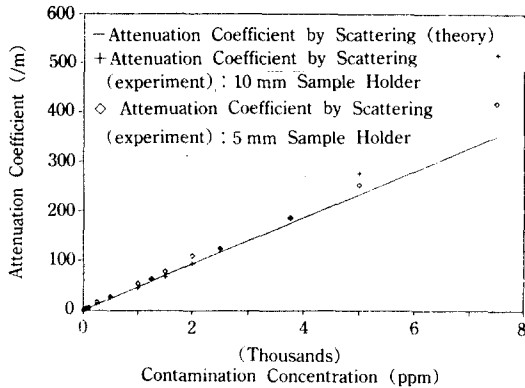


Fig. 4. Attenuation coefficients according to particle concentration

실험치와 이론치의 차이는 5% 미만으로 잘 일치하고 있다. Fig. 4의 또다른 특징은 σ 값이 샘플셀의 폭이 1 cm인 경우가 5 mm인 것보다 4000 ppm 이하에서는 더 작게 나타나, 그 이상인 경우 더 크게 나타난다는 것이다. 4000 ppm 이상에서의 이러한 현상은 오일내 입자의 중력에 의한 침전과 transmittance가 10% 미만이므로 (1 cm 셀의 경우) 상대적으로 주위 잡음에 의한 영향이 1 cm 폭인 경우가 5 mm인 경우보다 더 크게 나타난 것 같다. 4000 ppm 이하에서의 현상은 사용한 셀과 셀의 안치용 holder 등의 특성에 의해 입사 각도 등에 있어서의 오차가 5 mm 폭인 경우가 1 cm 경우보다 더 크게 나타난 것에 의한 것 같다.

광원으로서 레이저를 실제 사용할 경우 광원자체의 시간에 따른 출력이 변동이 있고(보통 $\pm 1\%$ 이하), 회절에 의한 영향, 주변광 등에 의한 영향 그리고 광검지기 자체의 잡음으로 인한 변동이 있다. 그러므로 Fig. 5는 상기의 영향을 고려한 광검지기의 정확한 동작을 위해서 최소 100 μ W의 광강도 감쇄를 가상하고 이 100 μ W의 광감쇄를 주는 오일의 깊이를 마모입자의 wieght concentration로 나타내었다. 순수 윤활유 오일의 경우 약 7.75 mm가 필요하며 무게농도가 2000 ppm인 경우 약 0.25 mm의 오일 깊이를 요구한다. 이는 아주 소량의 샘플로도 상태 검지센서가 가능하다는 것을 의미하므로 소형센서화의 가능성을 보여준다. 그러나 만약 광원자체의 시간에 따른 출력 변동만을 고려한다해도 출력 변동율이 $\pm 1\%$ 라면 10 mm의 레이저의 경우 약 $\pm 100 \mu$ W 출력이 변동하므로 저농도의 경우 측정 에러가 생기지 않도록 이론에 의해 구한 오일 깊이 보다는 실제로 폭이 더 깊어질 것 같다.

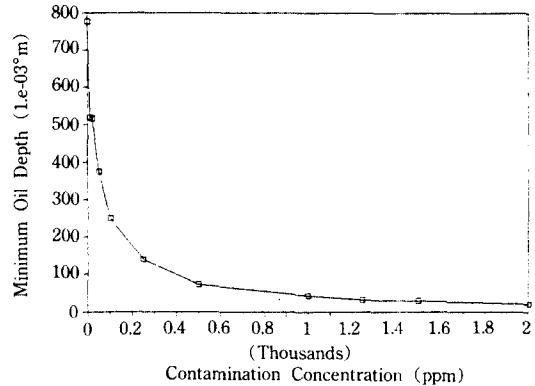


Fig. 5. Minimum oil depth for the detector resolution of 100 μ W according to particle concentration

4. 결 론

광감쇄를 이용하여 윤활유내 마모입자의 농도를 측정했다. 실험용 마모입자로서 수 마이크로에서 수백 마이크로 크기의 구조토를 사용하여 농도에 따른 transmittance와 광감쇄계수를 측정하였으며, Mie 산란 이론으로부터 얻은 결과와 비교하였다. Weight concentration이 2000 ppm 이하에서 광감쇄 계수의 실험치와 이론치의 오차는 5% 이하였다. 따라서 광감쇄를 측정하고 여기에 Mie 산란 이론을 적용할 때 윤활유내의 마모입자 농도를 추정(estimation) 할 수 있었다.

또한 실험치로부터 구한 감쇄계수를 사용하여 최소 100 μ W의 광강도 감쇄를 가상하고 이 100 μ W의 감쇄를 주는 오일의 깊이를 계산한 결과 2000 ppm 까지 1 cm 이하이므로 센서의 소형화가 가능함을 보였다.

본 연구는 과학기술처 특정연구비 지원으로 수행된 것임을 밝히며, 아울러 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Comrade Notes on Condition Monitoring, "No. 1 Ferrography-An Introduction", British Journal of NDT, 208, July 1982.
2. O.K. Kwon, H.S. Kong, C.H. Kim and P.K. Oh, "Condition Monitoring Techniques for an Internal Combustion Engine", TRIBGOLOGY International, V20, P153, 1987.

3. M.L. Atkin and E.D. Doyle, "The Condition Monitoring of Heavily Loaded Spur Gears", *Wear*, V88, P115 (1983).
4. T. Sato, O. Ikeda, T. Hatsuzawa, and M. Linzer, "Real Time Evaluation of Wear Particles Using Electromagnetic Forced Rotation and Laser Scattering", *Wear*, V115, P273, 1987.
5. C.F. Bohren and D.R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Wiley-Interscience, New York, 1983.
6. R.A. Dobbins and G.S. Jimagian, "Optical Scattering Cross-Sections for Polydispersions of Dielectric Spheres", *Journal of Optical Society of America*, V56, P1345, 1966.
7. H.C. Van de Hulst, *Light Scattering by Small Particles*, Dover, 1981.
8. J.V. Dave, "Subroutines for Computing the Parameters of the Electromagnetic Radiation Scattered by a Sphere", IBM Report No. 320-3237, May 1968.
9. CRC's *Handbook of Chemistry* 61th ed. 1980.

부 록

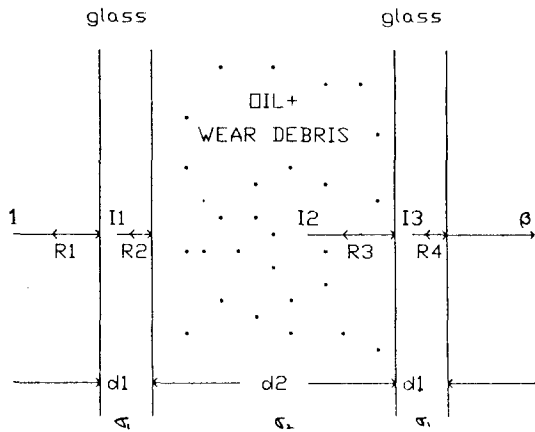


Fig. 1. Detail side view of the sample holder

Fig. 1에서 입사광을 1, holder의 각 표면 부분을 입사하는 광과 이때의 반사율을 각각 I_1 , I_2 , I_3 와 R_1 , R_2 , R_3 , R_4 로 나타내고, β 는 holder의 출력광을 나타낸다.

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

여기서 d_1 과 d_2 는 holder의 두께와 내폭을 나타내며 σ_1 과 σ_2 는 silica 유리와 용기 내 매질의 감쇄정수이다.

이상의 4개의 식을 β 에 관해서 정리하면

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

$R_1 = R_4$, $R_2 = R_3$ 이므로

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

여기서

$$\begin{aligned} R_1 &= \left(\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right)^2 (n_1 : \text{유리의 굴절율}(1.46)) \text{이며} \\ R_2 &= \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 (n_2 : \text{윤활유의 굴절율}) \text{이다.} \end{aligned}$$

n_2 를 구하기 위해서 먼저 윤활유를 넣지 않고 β 를 측정하여 σ_1 을 구한 후, 다음에 5 mm와 10 mm sample holder에 각각 윤활유를 넣고 β 를 측정한 후 그 값을 β_1 과 β_2 라 하면

$$\beta_1 = (1-R_1)^2 \left(1 - \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \right)^2 e^{-(2\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2)} \quad (3)$$

$(d_2 = 0.5 [\text{cm}])$

$$\beta_2 = (1-R_1)^2 \left(1 - \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \right)^2 e^{-(2\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2)} \quad (4)$$

$(d_2 = 1 [\text{cm}])$

(3)식과 (4)식을 수치해석적으로 풀면 유일해인

$$\sigma_2 = 0.0212 [1/\text{cm}]$$

$$n_2 = 1.46$$

를 얻는다.