고출력 디젤 엔진의 On-Line 마모상태진단 기술 적용을 위한 기초연구

A Feasibility Study for Application of On-Line Wear Condition Monitoring Technique to the High-powered Diesel Engine

윤 민 호 * 정 동 윤 * 공 호 성 **
Yoon, Min-Ho Chung, Dong-Yoon Kong, Hosung
군사과학대학원* 한국과학기술연구원**

ABSTRACT - The calibration of O.M.D is carried out experimentally and is analysed theoretically. O.M.D experimentally measures the change in optical density of artificially contaminated oil which contains Fe powder of 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 200 ppm. The change in optical density, D_1 means the logarithmic transmittance of I_0 over I_1. D_2 denotes the logarithmic transmittance I_2 over I_1 on electromagnetic force which arranges the ferrous particles along the line of magnetic force. The theoretical D_1 which increases linearly as increasing Fe concentrations, is analysed by light attenuation theory. The difference between theoretical D_1 and experimental D_1 is due to the attenuation of micro bubbles and the agglomeration of fine particles in the sample oil. The calibrated O.M.D is applied to the sample oil from the high-powered diesel engine. Also the results are compared with those out of the off-line techniques such as JOAP and ICP.

key words : on-line, O.M.D, transmittance, optical density.

1. 서론

기계시스템에 적용되는 일반적인 정비기법은 경험이나 운행시간 또는 운행거리 등에 의하여 부품을 교환하는 예방정비(preventive)기법이다. 이는 매우 수동적인 방법으로서 앞으로는 보다 적극적인 예견정비(predictive)기법으로 발전하고 있는 추세이다[1,2]. 예견정비를 수행하기 위해서는 시스템의 상태진단이 이루어져야 한다. 상태진단기술은 기계상태에 관한 필요한 정보를 수집하는 방법에 따라 육안검사, 성능검사, 마모입자분석 그리고 진동검사 등으로 나눌 수 있다[3]. 이 중 마모

입자분석법은 오일 샘플링과 분석 위치에 따라 off-line, in-line, on-line으로 구분된다. In-line은 윤활유 순환계통 내에 마모입자를 탐지할 수 있는 탐지기를 장치하고 통과하는 모든 오일에 대하여 마모입자를 탐지하는 방법이다. 그러나 이 방법은 전체 오일을 검사할 수 있다는 장점은 있으나 오히려 오일의 흐름을 방해하여 또 다른 사고를 유발할 수 있다는 단점을 가지고 있다. Off-line은 작동중인 기계내에서 윤활유를 채취하여 마모입자를 분석함으로써 주기적으로 기계의 상태를 관찰하는 방법이다. 이 방법은 적용이 용이하고 가격이 가장 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 이와같은 off-line 방식은 샘플 오일의 채취 및 보관 그리고 분석에 이르는 과정에서 새로운 오염의 가능성에 노출되어 있을뿐만 아니라 예견되는 사고에 즉각 대처할 수 없다는 치명적인 약점을 가지고 있다. 이에 반하여 on-line 방법은 위의 두가지 방법의 단점을 보완한 것으로서 윤활계통으로부터 일부분의 오일을 우회시킨 곳에 탐지 시스템을 장착하여 작동중인 기계를 정지시키지 않고도 기계상태를 관찰하는 방법이다. 따라서 오일 내의 마모입자 분석을 통한 상태진단 기술의 과학화를 위해서는 on-line 센서의 개발이 필수적이라고 하겠다[4].

본 연구에서는 on-line 마모상태진단 기기를 개발함에 있어서 반드시 요구되는 측정센서의 보정(calibration) 작업을 이론과 실험을 통하여 실시하고 개발된 센서를 고출력 디젤엔진에 직접 적용하였다. 본 연구에서 사용한 on-line 센서는 O.M.D(Opto-Magnetic Detector)로서 센서를 통과하는 오일의 광 밀도 변화를 측정하여 윤활계통 내에 존재하는 철계 금속과 비철계 금속의 마모입자 농도를 선택적으로 측정할 수 있다. O.M.D의 이론적 보정을 위해서는 광 감쇠 이론을 이용하였다. 실험적으로는 기계윤활시스템에서 발생할 수 있는 마모입자 성분과 유사하게 95%이상이 구형입자인 표준 오염도 입자 carbonyl iron powder(굴절률 2.36, 평균크기 약 20 μm)를 인위적인 오염입자로 첨가하여 측정하였다. 또한 계측량의 정확도를 검증하기 위하여 기존에 널리 사용되는 off-line 방법인 JOAP(Joint Oil Analysis Program)과 ICP(Induced Coupled Plasma)를 이용한 결과치와 비교 평가하여 보았다.

2. O.M.D의 구조와 광 감쇠 이론

2.1 O.M.D의 구조

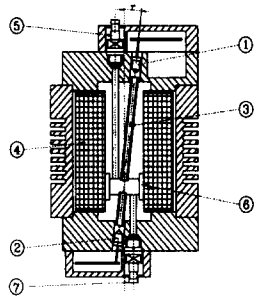

Fig. 1. Overall view of O.M.D.

Fig. 1은 본 연구에 사용한 O.M.D의 구조를 개략적으로 나타낸 것이다. Fig. 1에서 오일 inlet port(5)를 통하여 들어온 오일은 측정셀(6)을 거쳐 outlet port(7)로 나가서 오일 순환계통으로 다시 돌아가게 되어있다. 오일 순환중 light emitting diode(1)에서 나온 광은 glass fiber(3)를 거쳐 측정셀을 통과한다. 이때 오일속에

분산되어 있는 마모입자에 의한 광 감쇠로 인하여 광 세기가 photo diode(2)에서 측정된다. 한편 전자석(4)에 자장을 걸어주면 오일속의 철계 입자가 측정셀 속에서 자력선을 따라 배열됨으로써 주로 비철계 입자들에 의한 광 감쇠를 선택적으로 측정할 수 있다.

2.2 광 감쇠 이론에 의한 투과율 계산

광 감쇠 이론[5]에 의한 광의 세기는 식 (1)과 같다.

$$I_1 = I_O\, e^{-\sigma x} \qquad (1)$$

여기서, I_1은 투과된 광 세기, I_0는 입사광 세기, x는 광 투과거리이며 σ는 감쇠정수로서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \int_0^{\infty} Q_e(R) C N(R) A dR \qquad (2)$$

여기서 $A(=\pi R^2)$는 입자면적, $Q_e(R)$는 소광효율, C는 매질내 마모입자 농도, $N(R)$은 분포함수를 나타낸다. 실제 감쇠정수의 계산에는 대부분의 경우 적분이 불가능할 경우가 많으므로 식 (3)과 같이 $N(R)$을 이산화시켜 각 크기군의 대표치로 선정하여 계산한다.

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} Q_e C N(R) A dR \qquad (3)$$

마모입자의 분포는 일반적으로 Weibull 분포로 나타나는 것으로 알려져 있다[6,7]. 분포함수를 실험적으로 구하는 방법에는 Image Analyser등 여러 방법이 있으나 본 연구에서는 표준 오염도 시료의 분포함수를 이용하였다. 소광효율의 계산을 위해서는 굴절률을 정확히 알아야 하나 일반적으로 알 수 있는 값은 굴절률의 실수성분뿐이다[8]. 물질의 굴절률은 파장의 함수이며 복소수로 표시할 수 있다. 굴절률의 허수성분은 유전상수(ε ;permittivity)와의 관계로부터 구할 수 있다[9]. 허수성분이 작으면 입자에 의해 흡수되는 광의 양이 작다는 의미로서 입자내로 굴절되어 들어간 파의 일부가 소멸되지 않고 다시 나와 회절에 의해 산란된 파와 서로 간섭을 일으키게 된다. 대부분의 물질의 굴절률에서 허수부는 실수부보다 매우 작으므로 본 실험에서는 이론 계산시 허수부를 1.0, 0.5, 0.1로 사용하였다.

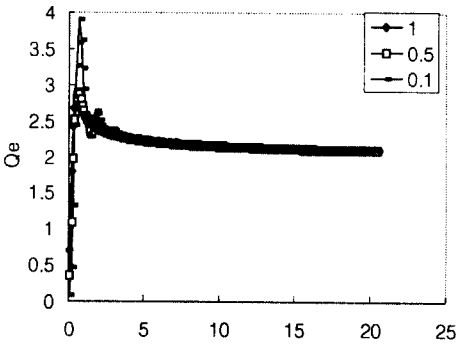

Fig. 2. The extinction efficiency curve for spherical particles of refractive index 2.36ix, where x is 1.0, 0.5, 0.1 respectively.

실제로 철 입자와 탄소는 지구상에 존재하는 물질 중에서 가시광선 부분에서 굴절률의 허수부가 1.0에 가까운 것으로 입자내부로 굴절된 파의 에너지를 상당수 흡수하게 된다[10]. 이론 계산시 사용된 파장은 O.M.D에서 사용하는 발광 다이오드의 적외선 파장대인 0.95 μm을 사용하였고 허수부의 값을 1.0, 0.5, 0.1로 변화시키면서 계산하였다.

Fig. 2는 수치해석을 통하여 입자직경에 따른 소광효율을 나타낸 것이다. 소광효율의 진폭은 허수부가 작기 때문에 생기는 것으로 그림에서와 같이 입자의 크기가 작을수록 간섭이 크게 일어난다. 이것은 입자가 작을수록 입자내에서 소멸되는 에너지가 약하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 가장 간섭이 작게 일어나고 안정된 효율을 나타내는 허수부의 값으로 1.0을 채택하였다. 한편, 투과율은 식 (1)로 부터 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_1}{I_0} = e^{-\alpha x} \tag{4}$$

식 (4)로부터 D_1을 식 (5)와 같이 정의하므로써 광 밀도 변화량과 감쇠정수의 관계를 선형적으로 나타낼 수 있다.

$$D_1 = \ln\left(\frac{I_0}{I_1}\right) = \alpha x \tag{5}$$

3. 실험 방법

실험은 Fe powder를 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 200 ppm씩 오일속에 넣고 균질한 오염도를 만들기 위해 휘젓기 과정을 거친다. 이때 순환 펌프는 Fe powder가 재연삭되지 않는 펌프를 사용하였다. 이러한 오일을 각 농도별로 O.M.D의 오일 순환계통에 넣은 후 D_1을 측정하고 자기장을 걸어준 후 D_2를 측정한다. 농도별로 광 밀도 변화값을 기록하여 curve fitting을 함으로써 농도 대 광밀도 변화값을 보정할 수 있다.

4. 결과 및 분석

4.1 O.M.D의 보정

O.M.D에서는 사용유에 대한 신유의 광 밀도 변화 D_1과 측정셀에서 자력선을 이용한 광 밀도 변화 D_2를 측정할 수 있다. D_2는 자기장을 걸어주어 측정셀에서 철계 입자들이 자력선을 따라 배열됨으로써 광 투과율을 높이는 원리를 이용하여 측정한다. 이때 D_2는 식 (6)과 같이 정의함으로써 측정 오일내 마모입자들 중 철계 마모입자와 비철계 마모입자의 상대적인 광 밀도 변화량을 구할 수 있다.

$$D_2 = \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \tag{6}$$

여기서 I_2는 자기장 하에서 사용유의 광세기를 나타낸다.

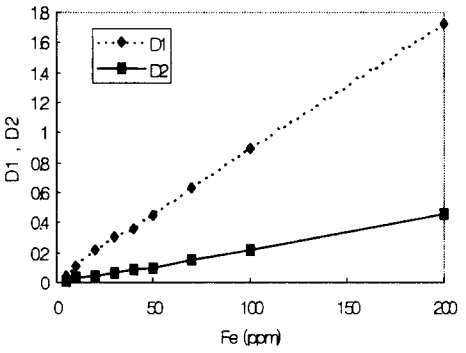

Fig. 3. Change in optical density D_1 and D_2 vs. concentration of carbonyl iron powder.

D_1값과 D_2값의 차이는 마모입자중 철계입자의 농도를 선택적으로 측정할 수 있다는 것을 의미한다. O.M.D를 이용하여

D_1과 D_2를 측정하기 위하여 시험 오일에 표준시료인 Fe 분말을 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 200 ppm씩 첨가하였다. O.M.D에 의한 광 밀도 변화 D_1과 자기장을 걸어주어 측정한 D_2가 Fig. 3에 나타나있다.

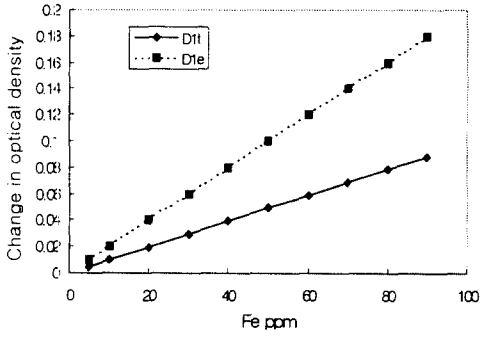

Fig. 4. Comparison the experimental measurement D_1(D_{1e}) with the theoretical result D_1(D_{1t}).

Fig. 4는 이론적 해석으로 구한 D_1과 실험으로 측정한 D_1을 비교한 것이다. Fig. 4에서 이론 D_1과 실험 D_1이 차이를 나타내고 있다. 이의 원인은 다음과 같이 세가지로 살펴볼 수 있다. 첫째, 비록 실험전에 진공펌프(1 torr)를 이용해서 오일속의 기포를 제거하였어도 미량의 기포가 존재하여 Fe 입자처럼 광 감쇠 작용을 하기 때문이다[11]. 둘째, 오일속의 기포에 의한 원인 이외에도 입자간 정전기적 인력과 유체가 가진 점착력 및 3상(고-액-기체) 응착력으로 인한 입자의 응집에 기인한 것이다[12]. 셋째, 식 (3)에서 감쇠정수에 영향을 미치는 변수중 입자면적이 차지하는 비중이 매우 크기 때문이다.

비록 큰 입자의 분포가 매우 적을지라도 한 두 개의 큰 입자가 감쇠정수에 미치는 영향은 매우 크다. 이상의 이유로 실험 D_1이 이론 D_1보다 큰 값을 보이고 있다.

그러나 무엇보다도 큰 문제점은 낮은 분포를 갖는 큰 입자들이 샘플 오일을 회석시키는 과정에서 검출될 확률이 더욱 낮아지는데 있다. 실제로 회석된 샘플 오일내의 마모입자 농도는 회석되지 않은 샘플 오일내의 농도에 비하여 지수함수적으로 감소하는 것으로 알려져 있다[13]. 실제 기계 시스템에서는 비록 적은 수 일지라도 이러한 큰 입자의 존재는 윤활성능 저하와 심각한 마모의 원인이 될 수 있다. 특히 O.M.D가 장착된 시스템에서는 상태진단시 경고치가 될 수 있다. 그러므로 회석 샘플 오일에 대한 O.M.D의 보정을 위해서는 이론식에 적절한 경험적 보정계수를 고려하여야만 한다[5]. 따라서 Fig. 4의 경우 이론값에 2.0의 보정계수를 곱할 경우 실험치와 일치되는 것을 알 수 있다. 보정계수는 산란이론에서도 그 근거를 찾아볼 수 있다. 실제로 본 연구에서는 단일산란(single scattering)이론을 적용하였다. 그러나 다중산란(multiple scattering) 이론을 적용할 경우 단일 산란에 비하여 2배의 농도 결과치를 구할 수 있다.

4.2 고출력 디젤엔진에의 적용

샘플 오일은 고출력 디젤 엔진을 사용하는 선박에서 채취한 것으로 신유로 교환 후 약 2 개월간 1000 시간을 사용한 것이다. 엔진 유형은 12V 956 MTU 엔진으로서 최대출력은 3600 마력이다. O.M.D 보정작업 결과와 비교 대상으로 삼은 off-line 기법으로는 JOAP과 ICP를 채택

하였다.

Fig. 5는 시험 엔진오일에서 검출된 Fe 마모입자의 농도를 분석기기별로 나타낸 것이다. Off-line에 의한 분석 결과 Fe 농도는 JOAP이 7.3 ppm, ICP가 6.4 ppm을 각각 나타내었다. 한편, O.M.D에 의한 Fe 농도 측정은 Fig. 3의 실험에 의한 보정 결과를 이용하여 ppm단위로 환산한 것이다. O.M.D(D_1)은 오일내 모든 마모입자에 의해서 광 감쇠 작용을 일으키므로 측정값은 off-line 분석기기에 의한 값 보다 크게 나타났다.

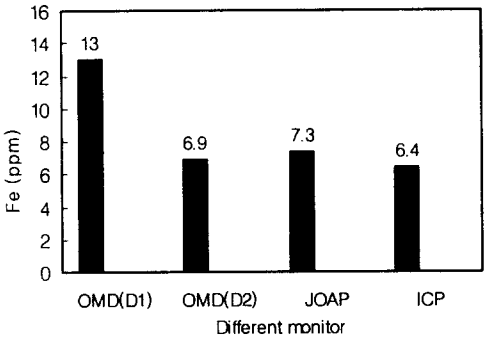

Fig. 5. Comparison results of Fe concentration measurement from JOAP, ICP and O.M.D.

따라서 O.M.D에 자기장을 가하여 D_2 값을 측정하고 Fig. 3의 실험에 의한 보정 결과를 이용하여 Fe 농도를 환산하였다. 그 결과 O.M.D에 의한 Fe 농도는 6.9 ppm으로서 다른 off-line 분석과 근사한 결과를 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 on-line 마모상태진단 기기로서 개발중인 O.M.D의 보정을 이론적 해석과 실험적 방법으로 실시하였다. 오일내 입자의 농도 증가에 따른 광 밀도 변화량 D_1은 이론 해석과 실험 결과 모두 농도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 이론값과 실험값의 차이는 광 밀도 변화량 D_1에 영향을 미치는 변수중 입자크기가 차지하는 비중이 매우 큰 것에 기인한다. 이러한 오차는 오일내 미세 마모입자의 거동과 상호작용에 대하여 앞으로 더 연구해야 할 과제이다.

또한 본 연구에서는 O.M.D를 고출력 디젤 엔진에서 채취한 샘플 오일에 적용하였다. 그 결과 O.M.D에 의한 광 밀도 변화량 D_1으로부터 측정된 마모입자의 농도와 off-line 방식의 상태진단기기를 이용하여 측정한 Fe 농도가 서로 차이를 보이고 있다. 이것은 O.M.D가 오일내 모든 마모입자에 대하여 반응하기 때문이며 D_2값을 구함으로써 보정할 수 있었다. 즉 자기장을 이용하여 Fe 입자를 제거하고 측정한 D_2값에 의해 환산된 Fe 농도를 확인한 결과 비교 대상으로 채택한 JOAP과 ICP의 Fe 농도와 매우 근사한 결과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. E.C.Fitch, Proactive maintenance for mechanical systems, Technology Transfer Series 5, 1992.
2. 정동윤, "Condition Monitoring기법을 이용한 한국형 기동장비의 엔진 상태진단에 관한 연구", 육사 논문집 제 51집, pp.7-9, 1996.
3. Trevor M Hunt, Condition monitoring of mechanical and hydraulic plant, Chapman & Hall.1996.
4. Trevor M Hunt, Handbook of Wear Debris Analysis and Particle Detection in Liquids, Elservier Applied Science, London & New York, 1993.
5. H.C. van de Hulst, Light Scattering by Small Particles, Dover Publication, Inc.New York, 1982.
6. Walodii Weibull, A statistical distribution function of wide applicability, J. of applied mech., Sep. 1951.
7. B.J. Roylance and G. Pocock, "Wear Studies Through Particle Size Distribution I : Application of the Weibull Distribution to Ferrography" Wear ,Vol.90, pp. 113-136, 1983.
8. CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press Inc, Boca Raton, 1983.
9. C.F.Bohren and D.R. Huffmann, Absorption and Scattering of Light by Small Particles, Wiley Interscience, New York, 1983.
10. 손정영, "입자가 첨가된 윤활유에 있어 광 감쇠 측정", 한국물리학회지, 제 2권, pp 133-138. 1991. 4.
11. Claus Bernhardt, Particle Size Analysis, Technical University Mining Academy, Freiberg Germany, Chapman & Hall, 1994.
12. K.Rietema, The dynamics of fine powders, Elservier Applied Science. 1991.
13. 권오관, "Ferrography에서 샘플 희석률이 마모입자 정량분석에 미치는 영향", 한국윤활학회지, 제1 권, 제1호, pp 38-45, 1985.