

윤활유 오염에 따른 광투과율 변화에 관한 실험적 연구

조성용 · 장철주 · 공호성* · 윤의성* · 한홍구*

오앤드브이 코리아(주)

*한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

An Experimental Study on the Light Transmission Characteristics with Oil Contamination

Sung Yong Cho, Chul Ju Jang, Hosung Kong*, Eui-Sung Yoon* and Hung-Gu Han*

O&V Korea Ltd.

*Tribology Research Center, Korea Institute of Science and Technology

Abstract – Changes in light transmission characteristics caused by various types of oil contaminations were experimentally measured with a built-in type wear monitoring device. Three kinds of iron powders of different size distribution, carbon dust, two kinds of solutions and grease were used for the test contaminants in this work. Light intensity of the transmitted light was measured with the contamination level. Results showed that the transmitted light intensity decreased linearly with the contamination concentration in the oil and the slope was affected by the size distribution. Light attenuation was also caused greatly by carbon dust, water contamination and polymeric fibers in terms of the light absorption. As a result, it was proved that the optical measurement device could be applicable effectively for detecting any significant change in lubricating oils.

Key words – light transmission, oil contamination, condition monitoring, wear.

1. 서 론

기계상태진단기술은 기계류의 작동상태를 계속적으로 또는 정기적으로 감지하여 파손발생을 사전에 예방 조치하는 데에 일차적으로 기술적인 중요성을 지니고 있을 뿐만 아니라, 나가서는 지속적으로 기계상태를 파악함으로써 차후의 시스템 개선 및 윤활 시스템 최적화를 위한 데이터베이스를 구축하게 함에 중요한 역할을 담당할 수 있다. 이와 같이 기계상태진단 기술을 유효 적절하게 잘 사용하면 상태진단기술에 투자한 첫 해 안에 상기 비용의 10-20배 이상의 경제적인 효과를 얻을 수 있다고 알려져 있다[1]. 현재까지 국내외를 걸쳐 사용되고 있는 특징적인 상태진단기술들을 분류하면 시스템 작동변수(온도, 압력, 속도 등), 부품과 윤활유(화학, 물리적 상태)의 점검, 마찰손실에너지(진동, 소음)의 탐

지 및 마모에 의한 재료손실의 탐지 등의 측정기술들을 들 수 있다. 이들 상태진단기술들은 측정 대상과 원리가 서로 다른 특성으로 인하여 고유한 장단점을 지니고 있는 것으로 알려져 있어서 상태진단 대상 기계 시스템 특성에 따라서 이에 적합한 상태 진단기술을 선택하는 것이 보편적이나, 최근에는 보다 정확한 상태진단을 수행하기 위하여 다 종류의 상태진단기술들을 병행하여 사용하고 이들로부터 종합적인 진단 및 처방을 내리는 이른바 통합상태진단기술의 중요성이 부각되고 있다. 기계상태진단기술 중 윤활유 내의 마모를 측정하는 기술은 동작중인 기계작동 상태에서 기계의 정지 및 분해 작업 없이 기계부품 및 요소부위에서 발생하는 파손 요인을 연속적으로 관측할 수 있다는 점 이외에도 발생된 마모입자들의 정성적, 정량적인 특징들이 기계 요소의 마모발생기구와 직결되어 나타나므로 이들로부터 기계상태변화 요인을 감지할 수 있는 장점이 있다 [2]. 상기기술은 Fig. 1에서 나타내고 있는 바와 같이

†주저자 · 책임저자 : hkong@kist.re.kr

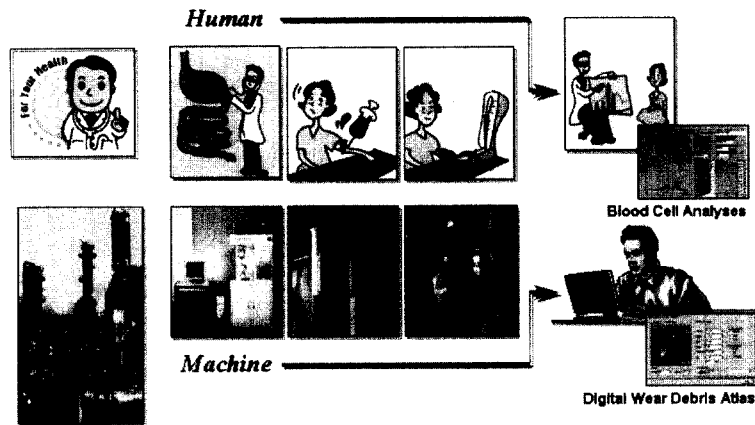


Fig. 1. Illustration of the human checkup vs. wear monitoring.

인체 건강진단을 위하여 혈액을 분석하는 방법과 유사성을 지니고 있다. 기계시스템 윤활유는 상대접촉운동을 행하는 기계요소 부위들을 순환하며 마찰을 저감하고 마모발생을 억제하며 발생한 열을 냉각하는 역할을 하면서 시스템에서 발생한 파손의 기록들을 마모입자에 머금은 채 순환한다. 따라서 상기의 마모입자들의 크기분포, 입자의 농도, 구성물질, 형태 등을 정밀하게 분석하면 기계시스템의 어느 부분이 파손되고 있으며, 어떠한 이유에 의하여 그런 지를 파악할

수 있게 된다.

윤활유 내의 마모입자를 측정하고 정량 정성적으로 분석하는 방법들로는 Magnetic Plug, Ferrography, Rotary Particle Depositor(RPD), Particle Quantifier(PQ) 및 입자계수기(Particle Counter) 등이 국내외적으로 잘 알려져 있으며[3], 산업계 현장에서 많이 사용되고 있다(Fig. 2 참조). 이들 기술 중 1970년대 말에 등장한 Ferrography 기술은 윤활유 내에 오염되어 있는 입자들을 윤활유로부터 분리하고 크기별로 유리판에 고착

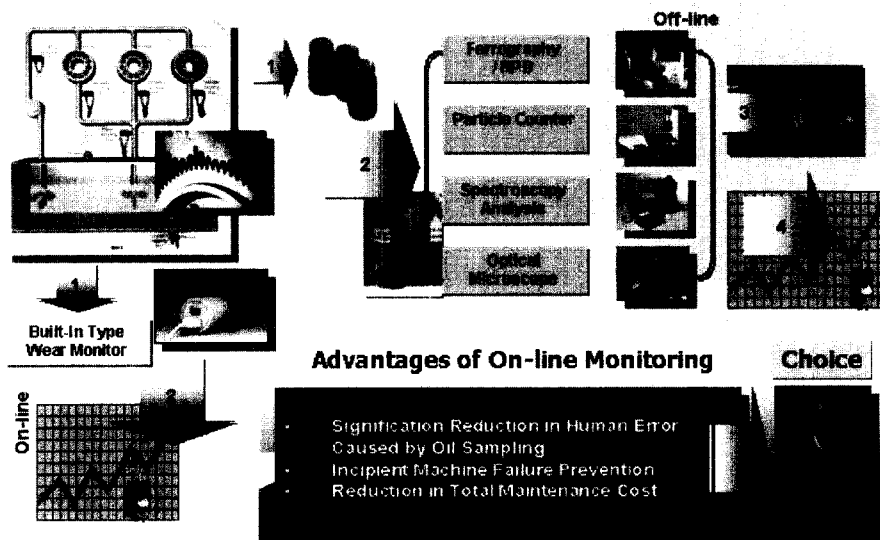


Fig. 2. Illustration of the on-line wear monitoring technology.

시켜 분석하는 기술로써 입자 하나 하나들의 모습과 특징들을 정밀하게 분석할 수 있는 방법을 제공함으로써, 마모입자들에 대한 이해와 마모발생기구에 대한 이후의 연구를 촉진시키는 역할을 하였다고 평가받고 있다. 그러나, 이들 기술들은 오염 분석을 위하여 대상 기계시스템으로부터 일정한 분량의 윤활유 시료를 off-line으로 채취해야 하는 공통적인 문제점을 지니고 있다. 올바른 윤활유 샘플 채취 방법에 관하여 많은 표준들이 제시되고 현장에서 실시되고 있으나, 기본적으로는 고가의 측정기기들이 수 cc 만큼의 윤활유 샘플 시료 내의 정보만을 분석함에 따르는 여러 가지 문제점들을 지니고 있다. 아울러 소량의 시료가 전체 윤활유의 오염 특성을 과연 잘 대변할 수 있는지의 문제, 시료 샘플링 시에 발생할 수 있는 다양한 human error 등과 아울러 효과적인 상태진단을 위하여 얼마나 빈번하게 윤활유 시료를 정기적으로 채취하고 분석해야 하는가의 문제 등이 현실적으로 거론되는 문제점이라 할 수 있다. Ferrography 기술 및 RPD 기술에서 나타나는 또 다른 문제점은 상기 기술을 산업 현장에서 효과적으로 사용하기 위하여 분석전문가가 필요하다는 것이며, 분석 결과가 주관적인 모습을 보일 수 있다는 점이다. 따라서 최근 산업계 현장에서 기계 상태진단 기술로써 점차적으로 실시간 및 삽입형 (in-line, built-in type) 측정기기들을 선호하는 경향을 볼 수 있다. 이들에 의한 측정 결과들이 고가의 off-line 측정기기보다 상대적으로 제한적일 수밖에 없는 단점이 있다 하더라도 기계상태 변화를 감지하여 파손 방지를 일차적으로 스크린 할 수 있다면 소기의 기계상태진단 목적을 거둘 수 있으며, 다수의 측정기기들을 기계시스템 여러 곳에 배치함으로써 파손이 발생할 수 있는 기계요소 부위의 판별이 용이한 장점을 활용할 수 있다.

현재 국내외적으로 상용화 개발되어 윤활유 내의 오염물을 실시간으로 측정하기 위한 측정기기들은; 전기저항, 전도도, 정전용량 등과 같은 전기적 특성을 측정하는 방법, On-line Ferrography에서와 같이 자기적 특성을 측정하는 방법 및 광 특성 변화를 측정하는 방법들을 대표적인 측정 원리로써 사용하고 있다[2]. 이들 중 전기적 특성을 측정하는 센서들에서는 전기적인 Noise 발생을 어떻게 효과적으로 줄이느냐가 기술적 관건이고, 자기적 특성 변화를 측정하는 센서들은 본질적으로 자성체 재질에 의한 오염원만을 측정하는 제한성을 지니고 있다. 광 특성변화를 측정하는 센서에서는 오염물질을 정성적으로 식별할 수 있는 능력을

부여할 수는 없으나 전기적 Noise 문제없이 간편하게 오염물 농도를 측정할 수 있는 장점 때문에 가장 보편적인 측정방법으로 사용되고 있다. 특히 최근 들어 고출력 반도체 광원의 등장과 아울러 광파이버 및 광감지기의 감도 향상 등의 요인들에 의하여 광을 이용한 오일 오염도 측정기기의 발전이 가속적으로 추진되고 있는 모습을 보이고 있다.

본 논문에서는 윤활유 내에 오염되어 있는 다양한 오염원들에 의하여 나타나는 광세기 감쇠 변화를 실험적으로 측정하고 분석함으로써 광측정 기술에 의한 기계상태진단기기의 특성을 고찰하고자 하였다.

2. 광측정 기술의 이론적 배경

오염입자들이 존재하고 있는 윤활유 내에 일정한 광세기를 갖는 광을 투사하면 광은 매질 내의 미소한 오염입자 표면과 충돌하여 산란되거나, 흡수되어 광 세기가 감소된다. 광의 산란은 입사광의 반사(reflection), 굴절(refraction) 그리고 회절(diffraction) 현상에 의하여 이루어지며, 입자의 크기가 상대적으로 클수록 반사에 의한 광감쇠가 지배적이 된다. 이와 같은 광감쇠 현상은 일반적으로 다음과 같은 Lambert-Beer 혹은 Bouguer's Law에 따르는 것으로 알려져 있다[4].

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\sigma L) \quad (1)$$

식 (1)에서 I 는 광감쇠되어 투사된 빛의 세기, I_0 는 입사광의 세기, σ 는 광감쇠 정수, L 은 광감쇠 경로의 거리를 각각 의미한다. 즉 오염물질에 의한 광감쇠 비인 광투과율(light transmittance)은 윤활유 내 오염물질의 농도의 지수 승에 비례한다. 만약 윤활유 내에 단위 체적당 크기분포함수 $N(r)$ 를 가지는 n 개의 입자들이 분포되어 있을 경우에 광감쇠 정수 σ 는 다음 수식 (2)와 같이 표현된다[5].

$$\sigma = C \int_0^{\infty} Q_c(r) n N(r) \pi r^2 dr \quad (2)$$

식(2)에서 C 는 오염입자의 농도, r 은 오염입자의 반경, $Q_c(r)$ 은 입자 단위 표면적당 광감쇠 효율을 의미한다. 상기 식에서 오염입자의 크기가 클수록 이에 의한 투과되는 광세기는 입자 크기의 곱에 비례하여 감소함을 알 수 있다. 식(1)과 (2)로부터 오염입자의 농도(C)는 다음 식과 같이 표현된다.

$$C = -\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{L \sum_{i=1}^n Q_i(r_i) N(r_i) \pi r_i^2 \cdot \Delta r_i} \propto \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (3)$$

상기 식으로부터 윤활유 내의 오염농도는 윤활유를 투과하는 광의 투과율을 측정함으로써 알 수 있다. 또한 윤활유 매질 자체를 통과하는 광감쇠 효과를 배제하고 윤활유 내의 오염도 지수만을 측정하기 위해서는 다음 식과 같이 오염이 되어 있지 않은 신유에서의 광 투과세기(I_{new})와 오염되어 있는 사용유에서의 광 투과세기(I_{old}) 비의 로그 (혹은 상용 로그)값으로써 오염도 지수(D)를 측정할 수 있다.

$$D = \ln \frac{I_{new}}{I_{old}} \quad (4)$$

그러나, 위의 식(4)만을 적용하여 산업용 윤활유 내에 존재하는 마모입자들의 농도를 측정하여 기계상태 진단을 행함에 있어서 여러 가지 문제점들이 존재할 수 있다. 첫 번째로는 윤활유 매질 자체의 광투과율 변화 요인이다. 윤활유 매질은 사용시간이 증가함에 따라 점차적으로 열화되어 점도가 증가하는 등의 요인으로 광투과율이 변화할 수 있고, 혹은 수분 및 연료유 등이 외부로부터 혼입되어 광투과율이 변화할 수 있다. 둘째, 식(2)에서 알 수 있듯이 오염농도는 오염물 입자의 크기분포와 밀접한 관계를 갖고 있으나, 광감쇠 비 측정결과만 가지고는 오염물 크기분포에 관한 정보를 알 수 없다.

따라서 본 실험에서는 이와 같이 다양한 윤활유 내의 오염 상태를 요인별로 상사하여 설정하고 이들에 따른 광감쇠 비를 각각 측정하고자 하였다.

3. 실험장치

Fig. 3은 본 실험에 사용된 장치의 모습이다. 실험장치는 윤활유 오염도 측정장치를 중심으로 실험용 오일을 담고 있는 오일 bath, 오일을 순환시키기 위한 트로코이드형 오일 순환펌프(0.2 kW)로 구성되었다. 오염도 측정장치 내에는 오일의 온도를 측정할 수 있는 반도체형 온도계가 설치되어 있으며, 오일 bath 내에 설치된 열선을 이용하여 오일의 온도를 조절하였다. 오일 bath 내에는 오염물 시료들이 혼입된 후에 균일하게 분산될 수 있도록 회전속도를 가변 할 수 있는 교

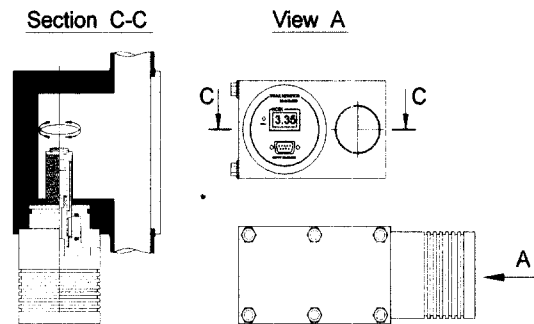


Fig. 4. A schematic view of the built-in type wear monitoring sensor.

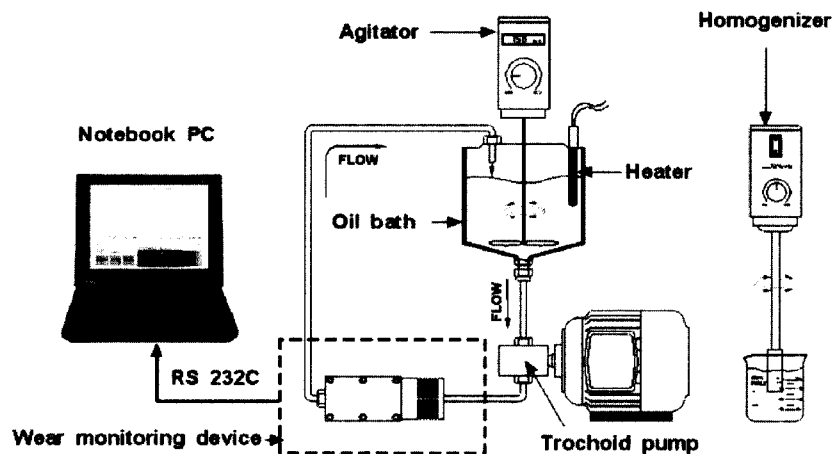


Fig. 3. Overall view of the test apparatus.

반기를 설치하였다.

윤활유 오염도 측정장치는 산업계 윤활시스템 배관에 직접 삽입형으로 설치할 수 있도록 고안된 형태로써, Fig. 4에서 도시한 바와 같이 장치 내를 통과하는 오일에 광을 투과하고 오염에 의한 광감쇠를 측정하도록 고안되어 있다[6]. 측정센서의 주요 구성 요소별 기능을 살펴보면, 일정량의 오일 샘플에 광센서(발신부: 발광 다이오드, 수신부: 포토 다이오드)를 이용하여 광을 투과시킨다. 투과되는 광을 평행광으로 만들기 위하여 광학렌즈를 사용하였으며, 다이오드에서의 온도 변화 특성을 보상하기 위하여 발광 다이오드로부터의 입사광을 측정하여 피드백 제어를 통한 일정 광량을 입사하도록 하였다. 또한 발광 및 수광 다이오드의 특성이 오일의 온도에 무관하도록 하며, 증폭기와 센서를 분리하기 위하여 광섬유를 사용하였다. 발광 다이오드로부터 입사되어 센서 내의 측정 대상 오일 내부를 평행으로 투과한 광은 오일 내에 함유된 불투명한 오염입자들에 의하여 광 밀도가 감소하게 되며, 수신부에 위치한 광학렌즈를 거쳐 집광된다. 상기 집광된 광은 광섬유를 거쳐 측정된 광량을 센서 뒤쪽에 위치한 증폭기로 보내져서 광감쇠된 양에 비례하는 오염입자들의 오염도를 측정한다. 증폭기 내에는 마이크로 프로세서를 내장하여 모든 측정 작업을 자동화하고 측정 결과를 연산하며, 메모리 내에 측정결과들을 저장하도록 되어 있다. 또한 메모리에 저장된 측정결과들은 RS232C 포트를 통하여 PC로 통신하도록 하였다. 한편, 오염도 측정장치 내부에는 측방향으로 회전할 수 있게 고안된 원통형의 커버가 위치하고 있다. 상기 부위의 반 쪽 부분은 그물망으로 구성되어 있고 다른 반 쪽 부분의 표면은 폐쇄되어 있어서, 원통형의 커버 위치가 회전하여 상기의 그물망 부분이 원통형 측정 장치가 180도 절개된 윗면에 위치하면 원통형 측정부위 내부로 오일이 순환되며, 정반대 방향으로 회전하여 위치하면 오일 저장통 내의 오일이 측정장치로 유입되는 것을 막고 180도 개폐된 측정장치 외부로 둘러싸움으로써 외부로부터의 오일 유입이 차단된 원통형 용기를 형성한다. 원통형 커버의 반 쪽 표면에 위치한 그물망은 오일 저장통 내에 있는 오일에 존재할 수 있는 크기가 큰 찌꺼기 등과 같이 오일의 오염도 측정과 직접적으로 관련이 없는 이물질이 측정장치 내로 유입되는 것을 거르는 작용을 할 뿐 아니라, 오일 내부에 존재할 수 있는 공기 기포들이 촘촘한 그물망을 통과하면서 표면장력에 의하여 깨지게 하여 상기 공기 입자들

이 오일의 오염도 측정에 미치는 영향을 최소화하는 부수적인 효과를 제공하고 있다. 원통형 커버의 회전 운동은 센서 내부에 설치된 소형 스텝모터의 구동에 의하여 행하여지며, 측정장치 증폭기 내의 제어기 신호에 따라서 정해진 회전운동을 하게 된다.

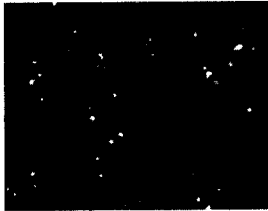
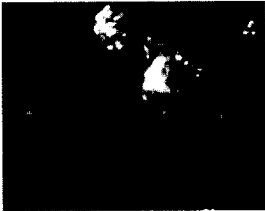
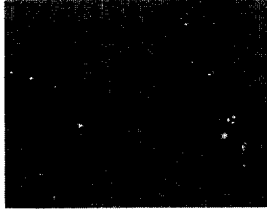
4. 실험 결과

본 실험에 사용한 오일은 터어빈유(ISO VG 32)를 사용하였다. 윤활유를 인위적으로 오염시키기 위하여 사용된 오염원으로는 4종류의 고체 성분의 오염입자, 2종류의 매질(물 및 헥산)과 오일 열화에 따른 friction polymer 생성 효과를 상사하기 위하여 그리이스(Lithium계) 물질들이 사용되었다(Table 1). 고체 성분의 오염원은 크기분포 및 평균입자 크기가 서로 다른 세 종류의 iron powder, carbon dust(입자 크기가 대략 250 nm인 channel type black)를 사용하였다. 오염입자에 의한 오일의 오염도는 고체 성분의 오염원 및 그리이스 물질 첨가의 경우 증량비를 기준으로 한 ppm 단위를 기준으로 하였고, 이종의 매질을 첨가한 경우에는 부피비를 기준으로 한 ppm 단위를 각각 사용하였다. 또한 시료 오일의 산화를 인위적으로 실험실적으로 상사하고 이에 따른 광감쇠 특성도 비교 분석하였다. 시료 오염원들은 소량의 오일에 일차적으로 혼합한 후에 Kaddy mill형의 호모게나이저를 이용하여 강하게 분산시킨 후에 진공펌프를 이용하여 공기 기포를 제거하고 실험용 오일에 투여하였다. Fig. 5는 iron powder 오염입자들(오염입자 A, B, C)의 오염 농도(50, 100, 150, 200, 300 ppm) 변화에 따르는 오염도 지수(D) 값의 측정결과를 보이고 있다. 각 오염입자들의 오염도가 증가함에 따라서 오염도 지수가 선형적으

Table 1. Various types of contaminants

Type	Contaminants	Remarks
Solid Contaminant	Carbonyl Iron Powder A	mean size: 7.6 m, spherical shape
	Iron Powder B	mean size: 8.7 m, plate shape
	Iron Powder C	mean size: 10.3 m, irregular bulky shape
	Carbon Dust	channel type black
Liquid Contaminant	Water	distilled
	Hexane	solvent
Etc.	Grease	Lithium type

Table 2. Typical particle shape of test iron powders contaminated

Solid Contaminant	Iron Powder A	Iron Powder B	Iron Powder C
Particle Shape			

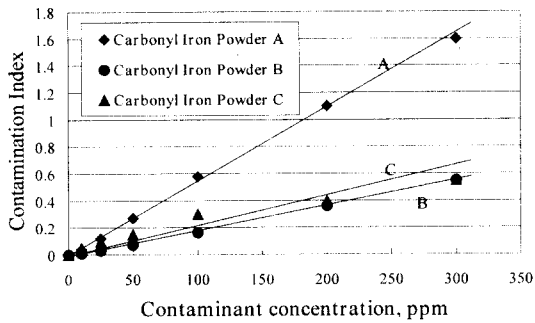


Fig. 5. Contamination index vs. Fe powder concentration.

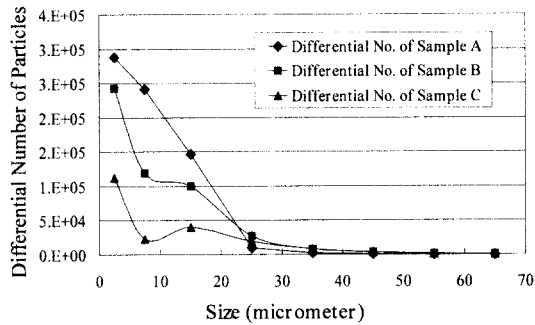


Fig. 6. Particle size distributions of three types of iron powders.

로 증가함을 보여주고 있다. 또한 입자크기 분포가 서로 다른 오염입자들에 의하여 오염도 지수가 상이하게 측정된 결과도 흥미로운 결과이다. Fig. 6은 오염입자들의 크기분포를 입자계수기(Hiac Royco, 8000A)를 이용하여 측정된 결과로써, 크기분포 변화에 따른 오염도 지수 차이를 다음과 같이 설명할 수 있었다. 오염입자 A는 B 및 C 입자들에 비하여 평균입자 크기는 작으나, 같은 중량비 기준의 ppm 단위 오염 시료에서는 상대적으로 많은 수의 오염입자들을 지니고 있

다. 오염입자의 형상을 구형으로 가정할 경우, 입자 크기가 감소하게 되면 전술한 수식(2)으로부터 입자 투영면적에 의하여 투사광이 감소하는 정도는 입자크기(r)의 제곱에 반비례에 비례하나, 오염입자의 총 개수(n)는 $1/r^3$ 에 비례하여 증가하므로 광감쇠가 증가하는 모습으로 나타날 것이다. 오염입자 C의 경우 B에 비하여 오염입자 수는 상대적으로 작으나 오염도 지수 측정결과는 유사하게 측정되었는데, 이는 C 입자의 평균입자 크기가 상대적으로 큰 효과에 기인된 것으로 사료된다. Table 2에서 나타난 바와 같이 광학현미경으로 입자를 분석한 결과에서 B 입자는 판상의 형태를 이루고 있었던 반면에 C 입자는 particle chunk 마모입자와 같이 bulky한 모습을 지님을 알 수 있었다. C 입자의 경우에 다른 입자들에 비하여 오염입자들이 오일 속에서 쉽게 가라앉는 모습을 관찰할 수 있었는데, 이러한 특성에 의하여 높은 오염농도(200 ppm 이상) 조건에서의 오염도 지수 값이 과소 평가된 것으로 사료되었다.

Fig. 7은 carbon dust 오염도 변화(1, 2, 4, 8 ppm)에 따른 오염도 지수 측정결과로써, 상기 결과에서도 오염도 증가에 따른 선형적인 광감쇠 특성을 보이고 있다. 상기 결과에서 특이한 모습은 전술한 Fig. 5의 결과에 비하여 오염 정도에 따른 광감쇠 정도가 상대적으로 매우 크다는 것이다. 본 실험 조건으로 오염도 조건을 중량비에 의한 ppm 단위로 통일한 바 있으나, 만약 체적비 기준으로 하였다면 카본입자의 밀도가 철입자보다 대략적으로 4배정도 적으므로 오염도가 현재보다 4배정도 커지게 되는 효과가 있을 것이며, 아울러 카본 입자 크기가 철입자 크기보다 매우 적으므로 총 오염입자 수가 상대적으로 매우 크기 때문에 광감쇠 정도가 크게 나타난 것으로 사료된다. 한편 오염도 측정 센서로 사용된 발광 다이오드의 파장이 660 nm 이었으나 본 실험에 사용된 카본 입자의 크기가 대략

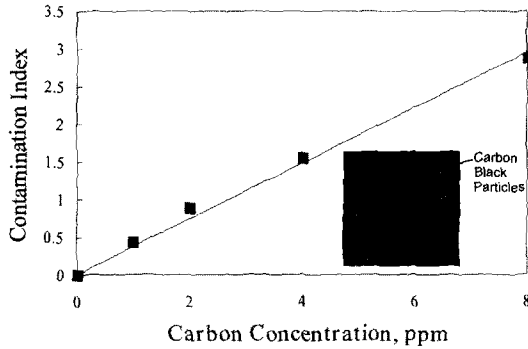


Fig. 7. Contamination index vs. carbon dust concentration.

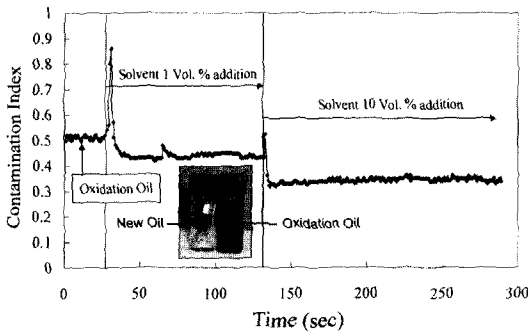


Fig. 8 (a). Contamination index vs. hexane concentration.

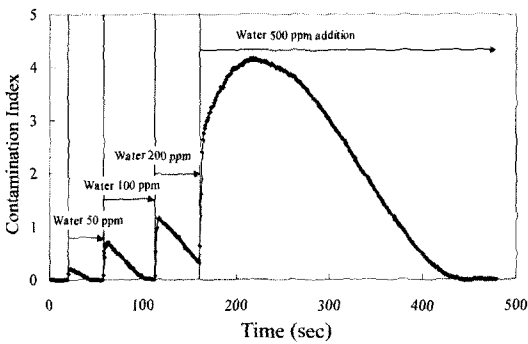


Fig. 8 (b). Contamination index vs. water concentration.

250 nm 정도로 상대적으로 작았음을 감안해 볼 때, 이와 같이 미세한 카본 입자들 표면에 입사된 광은 미세한 입자 표면에 의하여 광이 반사되었다고 해석하기보다는 광 투과 시에 빛을 일정량 흡수하는 성질을 지니고 있는 카본 물질의 특성에 의하여 광감쇠가 상당 부분 되었을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 오일 내에 물과 헥산과 같이 다른 종류의 매질을 혼입하여 오염시킨 경우로써 매질의 체적비 기준의 ppm 오염도 변화에 따르는 오염도 지수 측정 결과이다. 산업용 오일내에 물의 오염은 제지 및 제철용 기계시스템 등에서 흔히 발생하는 현상으로써, 물과 오일의 비중 차이에 의하여 물 성분이 오일탱크 바닥으로 가라앉기도 하지만, 강한 오일 순환 등의 요인에 의하여 오일 내에 일종의 오염입자 형태로써 혼재하는 모습도 보일 수 있다. 후자의 경우에 오일 내에 오염된 물 입자는 빛이 투사 될 때 광산란을 야기한다. 반면에 헥산은 오일 내에서 균일하게 용해되어 광감쇠 특성을 변화시킬 수 있는데, 내연기관용 엔진 윤활유에 연료유가 blow-by에 의하여 혼입되는 경우를 상사하여 실험을 설정하였다. Fig. 8(a)는 헥산을 오일 내에 순차적으로 1% 및 10% (부피비 기준) 혼입한 경우의 오염도 지수 측정 결과이다. 이 때 사용된 오일은 hot plate를 이용하여 150°C의 고온 하에서 10 시간동안 가열시켜 인위적으로 오일을 산화한 오일 시료를 사용하였다. 오일 내에 헥산이 혼입되면, 용해되며 희석되는 초기 과정에서 오염도 지수 값은 순간적으로 증가하는 모습을 보이고 있으나, 투명하고 동점도가 낮은 용제의 균일한 용해작용에 의하여 오염도 지수 값이 감소하는 결과를 보이고 있다. Fig. 8(b)는 오일 내에 수분이 질량비 기준으로 50, 100, 200 및 500 ppm 침투하였을 때의 측정결과이다. 오염된 수분은 사전에 호모게나이저를 이용하여 강하게 오일 내에 분산시켰기 때문에 미세한 크기의 물방울 형태로써 존재할 것으로 사료된다. 측정 결과에서 흥미롭게 관찰되는 현상은 수분이 오일에 혼입되는 초기 과정에서는 오염도 지수가 증가하나, 일정 시간이 지나면 초기 신유 상태의 값으로 감소하는 모습들이다. 미세한 물방울 입자들이 혼입되는 초기 과정에서는 이들의 입자들이 무수한 오염입자들로써 광감쇠 되는 효과를 보이고 있으나, 시간이 경과함에 따라서 이들 물방울들이 상호 뭉치고 결합하면서 오일 bath 바닥으로 침전되고 오일과 분리되어 오염입자로서의 효과를 상실하는 것으로 판단되었다. 이와 같은 추론을 뒷받침하기 위하여 오일 내에 계면활성제를 투입하여 오일의 유화가 지속되게 한 결과, 수분 혼입에 따라 증가된 오염도 지수가 전과 같이 감소하지 않는 모습을 얻을 수 있었다.

Fig. 9는 리듬 그라이스(soap content: 15%) 혼입에 따른 오염도 지수 변화를 보이고 있다. 그라이스 물질을 오염원으로 사용한 이유는 고온 조건하에서 사용하

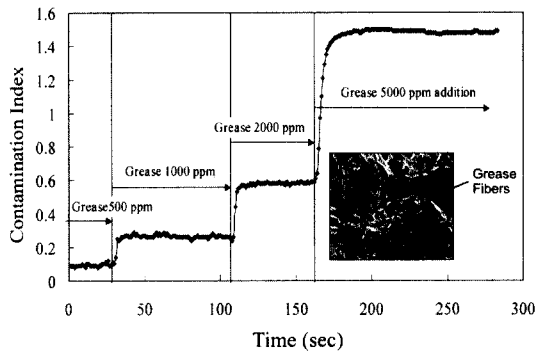


Fig. 9. Contamination index vs. grease concentration.

는 산업용 오일의 열화에 따른 광감쇠 특성변화 중, 오일 내에 friction polymer 생성 효과를 상사하기 위함이었다. 시험에 사용된 종류와 같은 비누계 그리이스는 지방산과 금속염과의 겹화 반응을 통하여 생성되는 미세한 두께의 망상 구조를 지니는 증주제(thickener)들이 기유를 균일하게 내포하고 있는 물질로서, 상기 물질에 광을 투사하면 섬유형태의 파이버들에 의하여 빛이 산란되고 흡수되어 광감쇠 되는 모습을 알 수 있었다. 그리이스의 섬유 파이버의 두께가 대략적으로 0.2 μm 정도이고 다공성임을 감안해 보면 광 흡수에 의하여 주로 광감쇠 될 것으로 사료되며, 감쇠 정도는 입자 형태를 지니는 오염물 및 카본 입자에 의한 것보다는 상대적으로 작음을 알 수 있었다.

5. 결 론

오일 내에 오염되어 있는 다양한 오염원들에 의하여 나타나는 광특성 변화를 실험적으로 측정하고 분석한 결과에서 다음과 같은 사항들을 발견하였다.

- 1) 오일 내를 투과하는 광 세기는 오염물질의 농도

에 비례하여 감소하며, 광감쇠 정도는 오염입자들의 형상과 크기분포에 많은 영향을 받는다.

- 2) 미세한 크기의 카본 성분이 오염되었을 경우의 광감쇠 특성은 입자 표면의 광 흡수에 의하여 주로 발생한다.

- 3) 오일 내에 이종의 용매가 혼합하였을 경우에 나타나는 광감쇠는 혼합된 매질이 오일에 용해성이 없는 경우에 크게 나타나며 특히 수분에 의한 오일의 유화 현상에 의하여 광감쇠 되는 정도가 크게 나타났다.

- 4) 오일의 열화에 의하여 발생할 수 있는 friction polymer의 생성에 의하여도 광감쇠가 발생하나, 입자 형태를 지니는 오염물 및 카본 입자에 의한 것보다는 그 영향이 상대적으로 작음을 알 수 있었다.

- 5) 사용 오일에서의 광감쇠 변화에 의하여 오일 내 오염물의 농도를 정량적으로 측정하여 대상 기계 윤활유 상태를 진단하고자 하는 측정방법의 유효성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. B.K.N. Rao, Chapter 1, Handbook of Condition Monitoring, 1st Edition, Elsevier Science Ltd, 1996.
2. Machine Health Monitoring 기술개발, 한국과학기술연구원 연구보고서, N131- 2432-2, pp. 24-33, 1986.
3. T.M. Hunt, Handbook of Wear Debris Analysis and Particle Detection in Liquids, Elsevier Applied Science, 1993.
4. H.C. Van Hulst, Light Scattering by Small Particles, Wiley, New York, 1957.
5. 고기능 정밀센서 기술개발, 한국과학기술연구원 연구 보고서, UCN718(2)-4223-4, pp. 33-39, 1991.
6. 오일 오염도 측정장치, 대한민국 특허출원번호 99-49045, 1999.