

디젤 엔진오일 내 Soot 함량 증가에 따른 오염도 측정에 관한 실험적 고찰

조성용 · 공호성[†] · 윤의성 · 한흥구 · 정동윤*

한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터
*육군사관학교 무기공학과

An Experimental Study on the Measurement of Soot Contamination in a Diesel Engine Oil

Sung Yong Cho, Hosung Kong[†], Eui-Sung Yoon, Hung-Gu Han and Dong-Yoon Jung*

Tribology Research Center, KIST

*Department of Weapon Engineering, Korea Military Academy

Abstract – New method and device for the on-line measurement of soot concentration in a diesel engine oil are proposed, where the measurement principle is based mainly on attenuated internal total reflection. The detector were evaluated in various ranges of contaminated oils by carbon black particles. It was found that the proposed detector could be well used to monitor the oil deterioration due to soot contamination. Operational range of the detector was found from 0 to 5 mass percentage of soot content. Test results with water and fuel dilution showed that these effects were not remarkable. However, adsorption of carbon black particles onto the measurement surface was considered to be a critical problem of the detector. Effects of particle deposition on the interface was experimentally evaluated with the oil temperature and flow turbulence and discussed throughout this work.

Key words – soot content, oil deterioration, total internal reflection, adsorption.

1. 서 론

엔진오일의 수명은 보편적으로 엔진 주행거리인 마일리지나 사용 시간에 의하여 결정하고 있으나, 이와 같은 사항은 대상 엔진이 정상적인 조건 하에서 가동됨을 가정하여 설정된 것이며 실제적인 오일의 상태 변화를 염두에 두고 있지는 않다[1]. 따라서 오일의 성능은 엔진 사용 조건에 따라서 평균적으로 예정된 시간보다 빨리 혹은 늦게 변화할 수 있다. 오일의 열화는 사용 시간이 증가함에 따라 산화, 질화될 뿐만 아니라 산의 형성과 카본 soot, 금속 입자, 연료유, 수분 및 냉각수 등이 오일 내로 오염되어 발생된다. 최근 들어 디젤엔진 생산자들은 중장비에서의 엔진오일 교환주기를 100,000 km 이상으로 늘이려는 계획을 추진하고 있

음을 볼 수 있다. 이와 같은 가혹한 상황을 가능하게 하기 위해서는 무엇보다도 엔진오일 내에 soot 입자들이 분산된 형태를 잘 유지하면서 기본적인 윤활 특성을 지속적으로 보유하여야 할 것이다. 따라서 디젤 엔진오일 내 soot 함량을 실시간으로 측정함으로써 엔진 유 열화를 효과적으로 판단하는 측정 센서를 적용하는 것은 매우 바람직할 것으로 전망된다.

디젤 엔진 내에서 연료가 연소실로 분사되면 대부분의 연료들은 연소되나, 일부는 연소에 도달할만한 충분한 산소를 만나기 전에 높은 온도 하에서 열분해 되는데 이러한 성분들이 soot 입자들을 생성시키게 된다[2]. 이들 중 일부는 배기 가스에 의하여 대기로 방출되며, 일부는 엔진 윤활유 내에 남게 되는데 이와 같이 엔진 soot로 불리는 미세한 입자들은 피스톤 링을 통한 블로-바이에 의하여 혹은 실린더 링의 잔류 오일 굽음 작용에 의하여 엔진오일로 전달되게 된다. 윤활유 내에서

[†]주저자 · 책임저자 : hkong@kist.re.kr

soot들은 특히 분산제 및 세정제 등의 엔진 첨가제들과 상호 반응하여 주로 soot 입자들로 구성된 일종의 덩어리들을 형성하며, 바로 이러한 물질들이 엔진오일 점도를 크게 증가시켜서 유동성을 심각하게 저하시키거나 베어링, 실린더 등 여러 엔진 요소 표면의 지나친 마모를 초래하는 등의 엔진 성능 특성에 커다란 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다[3]. 따라서 디젤 엔진 오일 내의 soot 함량은 엔진오일 교환 주기의 판정에 커다란 영향을 미치고 있다. 디젤 엔진오일 내에서 허용되는 soot 함량은 엔진의 형태에 따라서 각기 다르지만 일반적으로 최대 허용 함량이 약 0.5%부터 4% 정도인 것으로 알려지고 있다[4]. 특히 디젤 엔진에서 생성되는 엔진 soot 입자들은 대략적으로 크기가 수 나노미터에서 70 나노미터에 이르기까지 매우 미세한 입자로서 일반적인 엔진 오일 필터로서 여과한다는 것이 불가능하며, 또한 이의 함량을 엔진 가동 중에 용이하게 측정하기도 결코 쉽지 않은 기술적인 문제점이 있다.

현재 이와 같은 목적으로 엔진 soot 함량을 정량적으로 측정하는 여러 측정 장치들이 알려져 있는데, 실험실적으로는 열중량분석기(Thermogravimetric Analyzer, TGA)를 이용하여 soot의 함량을 직접 측정하는 방법이 가장 보편적으로 사용되고 있다. 그러나 상기 방법은 엔진으로부터 일정 분량의 샘플 오일을 채취하여 실험실적으로 분석하는 방법이기 때문에 엔진 가동 중에 실시간으로 분석할 수 없는 문제점이 있다. 오일 내의 soot 함량을 실시간으로 정량 측정할 수 있는 방법 중의 하나는 엔진 사용 시간 증가와 함께 오일의 유전율(dielectric constant, permittivity)의 변화를 측정하는 것이다. 상기의 방법[5]은 대상 오일의 물리화학적 특성이 변화하는 바를 오일의 유전율을 측정함에 측정원리를 두고 있다. 그러나 상기 측정기는 오일 내에 오염된 soot 오염 외에도 수분 및 냉각수의 혼입과 오일의 산화 및 금속 마모 분들의 존재에 의하여도 매우 민감하게 반응하기 때문에, 오일 내의 soot 함량을 정확하게 측정함에 있어서 커다란 문제점을 본질적으로 지니고 있다. 또한 전기적 특성을 측정하는 대부분의 센서들에서 통상적으로 겪고 있는 전기적 외란, 측정결과와 온도 의존성 등에 의한 문제점이 상기 고안들이 디젤 엔진오일을 모니터링 하는 목적으로서 실제로 적용되는 것을 방해하고 있는 형편이다.

따라서 본 연구에서는 디젤 엔진오일 내의 soot 오염에 의하여 초래되는 오일 오염도를 측정하기 위하여 오일 굴절률을 측정하는데 측정원리의 기반을 둔 광학

센서를 이용하여 오일의 열화도를 실시간적으로 평가하기 위한 방법을 새롭게 제시하고자 하며, 실험실적인 시험평가와 함께 개발된 측정센서에서의 제반 문제점들에 관하여 고찰하고자 한다.

2. 측정 원리

본 측정장치의 측정 원리는 다음과 같다[6]. 일반적으로 오일의 굴절률은 복소수 형태로 나타낼 수 있는데, 즉 $\bar{n} = n - in'$. 이 때 n 은 실수부이고 n' 는 허수부이다. 굴절률의 실수부는 매체를 통과하는 파동의 위상차를 결정하는데, 오일의 산화, 연료유 및 냉각수의 혼입과 soot 입자의 오염 등의 요인들에 의하여 상기 값이 변화하는 것으로 알려져 있다. 반면에 허수부 n' 은 흡수 인덱스(absorption index) 값으로서 soot 오염의 결과로서 광이 흡수되는 정도를 결정한다. 본 연구에서는 이와 같이 디젤 엔진유 내에 soot 입자가 오염되는 결과로서 시험 오일의 굴절률이 변화하여 시험 오일 내에 잠겨져 시험 오일과 직접 맞대어 있는 광전달 소자 경계면으로부터 전반사되는 광출력 측정값이 변조되는 물리적 현상에 기초하고 있다.

서로 다른 굴절률을 가지는 두 물질 경계를 물질 1에서 물질 2 방향으로 빛이 통과할 때, 경계면으로의 입사각 (θ_1)이 다음 식 (1)과 같은 임계각(θ_{cr}) 이상인 조건 하에서는 전반사가 일어나게 된다. 즉,

$$\theta_1 \geq \theta_{cr} = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \tag{1}$$

이와 같이 전반사되는 광의 세기는 Fig. 1에서 보인 바와 같이, 매질 1 내부에서 광이 흡수되거나, 혹은 전술한 이른바 ‘Goos-Hanchen shift’ 현상[4]에 의하여, 매우 미약한 세기의 광이 매질 2 내부로 침입하였다가

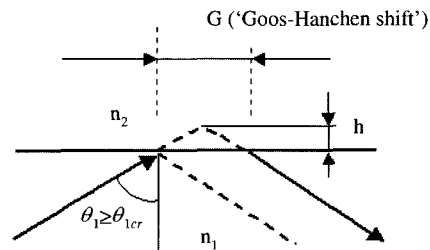


Fig. 1. Penetration of an electromagnetic field into the external medium by Total Internal Reflection (TIR).

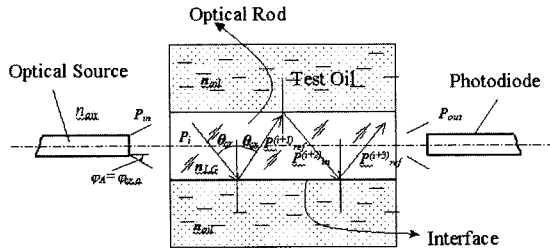


Fig. 2. Output power of optical radiation at the outlet of an optical rod.

반사되므로 상기의 매우 적은 두께 영역에서 매질 2 내부에 존재하는 오염 물질에 의하여 광이 흡수 또는 산란되어, 결국 전반사 되는 광의 세기가 감소하게 된다. 만약에 매질 1을 통한 광손실이 없는 경우에는, 혹은 상기의 영향이 무시할 정도로 적은 경우에는, 매질 1로부터 매질 2 내부로 침입해 들어가는 매우 적은 두께의 영역에 존재하는 매질 2 내부의 광 흡수 요인, 즉 본 연구의 경우 오일 내의 엔진 soot 오염도에 따라서 전반사되는 광의 세기가 감소하게 되며, 따라서 상기의 광 세기가 감소 특성에 의하여 오일 내의 엔진 soot 오염도를 측정할 수 있다.

그러나, 전술한 ‘Goos-Hanchen shift’ 현상에 의하여 오일 내부로 침입하였다가 반사되는 광의 세기가 매우 미약하므로, 하나의 경계 면에서만 전반사가 일어나게 된다면 오일의 오염도를 측정할 수 있을 정도로 충분한 감도를 얻기가 용이하지 않기 때문에, 적절한 방법으로 다수의 경계면에서 상기의 전반사가 일어나게 하고 상기에 의한 광감쇠 효과를 누적시켜 충분한 측정 변화를 얻는 것이 바람직하다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 2에서 도시한 바와 같이 실린더 형태의 광학봉으로 입사된 광이 시험 오일과 광학봉 경계에서 다수의 전반사를 행하게 하였다. 이 때, 최종적으로 반사되는 출력광의 세기(P_{out})는 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{out} = \int_{\varphi = -\varphi_{cr,a}}^{\varphi = +\varphi_{cr,a}} P_{in}(\varphi) \cdot R_{TIR}^m(\varphi, \bar{n}_{oil}) d\varphi \quad (2)$$

이 때 P_{in}(φ)는 광전달 소자로 입사된 광의 세기를 나타내며, φ는 광전달 소자로 입사되는 광선의 각도(optical ray angle)를, φ_{cr,a}는 공기로부터 광전달 소자로 입사된 광원이 광전달 소자 내부를 거쳐 광전달 소자와 시험 오일 경계면에서 전반사가 일어나는 임계각을, 즉 입사각(-φ_{cr,a} ≤ φ ≤ φ_{cr,a})에서의 상기 광선들이 전반사 조

Table 1. Degussa S-160 carbon black

Type	MCC (Medium Color Channel)
Blackness value my	263
Relative tinting strength IRB 3=100	121%
Volatile matter at 950°C	5%
Oil absorption yield point method	620 g/100 g
ph value	4
Sieve residue 0.044 mm	≤200 ppm
Ash content	0.02%
Extractables toluene	0.2%
Compacted density powder	120 g/l
Compacted density Beads	400 g/l
BET surface area	150 m ² /g
Average primary particle size	20 nm

Table 2. TGA results and kinematic viscosity vs. carbon black concentrations

Carbon Black, wt%	TGA Result, wt%	Kinematic Viscosity @40°C, cSt
0	0	109
1	0.9628	137
2	2.061	178
3	2.954	205
5	4.919	273

건을 만족하면서 광전달 소자를 통과하는 각도를, R_{TIR}(φ, n_{oil})는 상기 광선들이 시험 오일과 광전달 소자 경계를 통과할 때의 굴절률을, m은 입사된 광이 광전달 소자를 통과하기 전까지 시험 오일과 광전달 소자 경계면에서 총 전반사 되는 횟수를 의미한다.

이 때 R_{TIR}(φ, n_{oil})는 광반사계수(reflection coefficient)로서 매체 내에 어떠한 광흡수 요인들이 없는 한 1에 가까운 값을 가진다. 그러나, 매체 내에 광을 흡수하는 요인들이 있는 경우에는 광이 매체 내를 침입하는 층에서 광이 흡수되는 양만큼 반사계수가 1보다 작게 된다. 이와 같이 반사계수와 광을 흡수하는 요인이 존재하는 매체의 굴절률과의 비례 관계를 Fresnel's formula[7]에 의하여 정의된 대표적인 비례제안식을 사용하여 본 연구의 경우에 적용하면 다음과 같은 형태의 식을 얻을 수 있다.

$$R(\varphi, \bar{n}_{oil}) = 1 - \frac{4 \cdot n_{oil} \cdot \sin\varphi}{(n_{LG}^2 - n_{oil}^2)(n_{LG}^2 - n_{oil}^2 - \sin^2\varphi)^{1/2} n'_{oil}}$$

즉, 반사계수는, 굴절률의 실수부 값이 일정할 경우

에, 특히 오일 내의 엔진 soot가 오염된 경우에는, 오일의 흡수 인덱스(absorption index, n_{oil}) 값에 의하여 주로 결정된다. 따라서 광학봉으로 입사된 광의 세기가 시험 오일과의 경계면에서 시험 오일 내부의 엔진 soot 오염도 값에 주로 좌우되어 광감쇠 되며, 다수의 경계면들을 통과하여 전반사된 출력 광의 세기가 오일 내 엔진 soot 오염도에 비례하여 감소하게 된다.

디젤 엔진오일의 사용유의 경우에 있어서 오일 굴절률의 실수부는 엔진 soot 외에도 수분, 연료유의 혼입 그리고 오일의 산화와 밀접한 관련을 가진다. 수분 및 연료유의 혼입이 굴절률을 감소시키는데 반하여 오일의 산화는 굴절률을 증가시킨다.

3. 실험 장치

Fig. 3은 본 실험에 사용된 시험 장치를 나타내고 있다. 시험 장치에는 측정 오일이 과열되는 것을 방지하기 위해 중탕가열 방식을 이용한 오일 bath 상단에 soot 측정센서와 오일의 온도를 측정할 수 있는 온도 센서를 장착하였고, 실제 차량의 오일팬 내에서 일어날 수 있는 오일 유동 분위기를 유도하고 오일 내 투입된 카본 입자가 균일하게 분산될 수 있도록 하기 위하여 가감속이 가능한 교반기와 트로코이드형 오일 순환펌프(0.2 kW)를 설치하여 사용하였다. 본 실험에 사용된 측정센서[8]의 주된 구성원은 borosilicate crown glass 재질로 제작된 일정한 굴절률을 갖는 실린더형 광학봉(optical rod)으로서, 측정오일 내에 잠겨서 표면이 직접 시험 오일과 접하게 된다. 센서 내로 입사되

는 광은 파장이 940 nm인 적외선 다이오드(IR diode)를 사용하였다.

시험 오일은 점도가 15W-40 등급인 디젤 엔진오일(API CF-4 grade)을 사용하였으며, 디젤 엔진 내에서 발생하는 soot 입자와 유사한 형태 및 특징을 가지고 있는 것으로 알려진 Degussa S-160 카본 블랙 입자를 오염 입자로 사용하였다[2]. 사용된 카본 블랙 입자는 구형으로서 평균입자 크기가 20 nm 정도를 지니고 있다(Table 1 참조). 시험 오일 내에 카본 블랙 입자의 혼입은 중량비로 최대 5%까지 시험하였으며, 시료 오염원들은 일정 시간 동안 Kaddy mill형의 호모게나이저를 이용하여 시료 오일 속에서 강하게 분산시킨 후에 시험 오일 bath에 투입하였다. 카본 블랙 입자의 중량비 별로 오염된 시료들을 850°C 온도 조건 하에서 질소 가스를 불어넣으면서 TGA 분석을 한 결과 Table 2와 같은 측정값을 얻을 수 있었다. 상기 측정 결과는 본 실험에 사용된 카본 입자가 미세한 형태로 오일 내에 골고루 분포하고 있음을 나타내고 있다. 이와 아울러 Table 2에서는 카본 입자 함량 증가에 따른 동점도의 증가를 Brookfield 점도측정기를 이용하여 측정된 결과를 퍼센트 별로 보여주고 있다. 일반적으로 육상 디젤기관용 윤활유의 사용한계는 신유시의 $\pm 20\%$ 이내로 하고 있는데, 본 실험에서는 카본 입자 1 wt.% 이상 조건에서 이미 동점도가 20% 이상으로 증가된 것을 알 수 있었다. 또한 본 시험의 측정 중에는 계속적으로 교반기로 시험 오일을 강하게 회전시켜서 오일 내의 카본 블랙 입자들의 오염 분포를 균일하게 하고 입자들 상호간에 뭉치는 현상을 최소화하도록

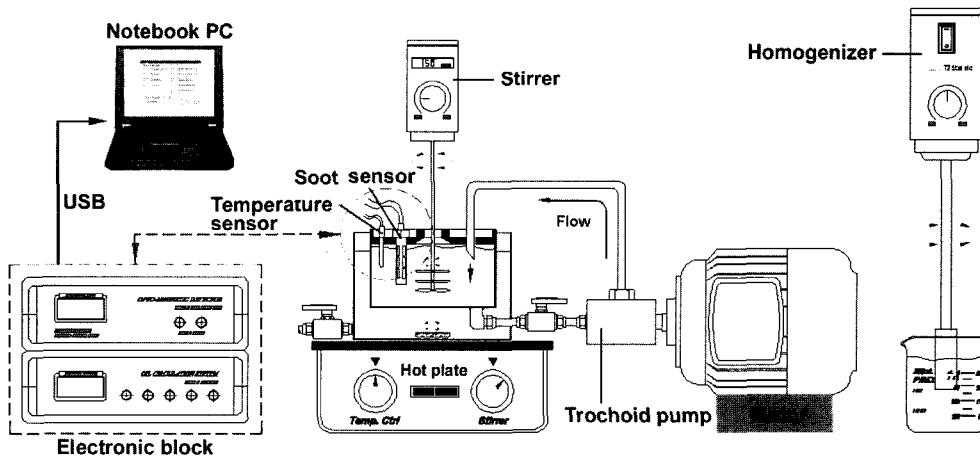


Fig. 3. Overall view of the test apparatus.

하였다.

디젤 엔진 오염원으로서 카본 블랙 입자 이외에도 수분 및 연료유의 혼입에 대한 영향을 알아보기 위해 물과 연료의 배질을 오일에 첨가하였다. 엔진 오일 내에 혼입되는 물 및 연료의 오염 조건은 부피비를 기준으로 한 퍼센트 단위를 사용하였으며, 육상 디젤엔진용 윤활유 사용한계를 감안하여, 수분은 최대 1%, 연료유는 최대 10%까지 시험 오일에 첨가하였다. 시료 오염원들 역시 일정 시간 동안 Kaddy mill형의 호모게나이저를 이용하여 강하게 분산시킨 후에 시험 오일 bath에 투입하였다.

4. 실험 결과

Fig. 4는 대기 온도 하에서 측정오일 내 카본 입자 함량 증가에 따른 측정센서에서의 오염도 값 변화를 나타내고 있다. 실험 중에 교반기(200 rpm)와 오일 순환펌프(8 L/min)를 병행 사용하여 오일 내 투입된 카본 입자가 균일하게 분산될 수 있도록 하였다. 측정센서에서의 오염도 값은 Lambert-Beer 법칙에 의한 입사광이 광감쇠되어 반사되는 비율로서 다음과 같이 정의하였다[9].

$$Contamination\ Index = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (3)$$

식 (3)에서 I 는 카본 입자들에 의하여 광감쇠된

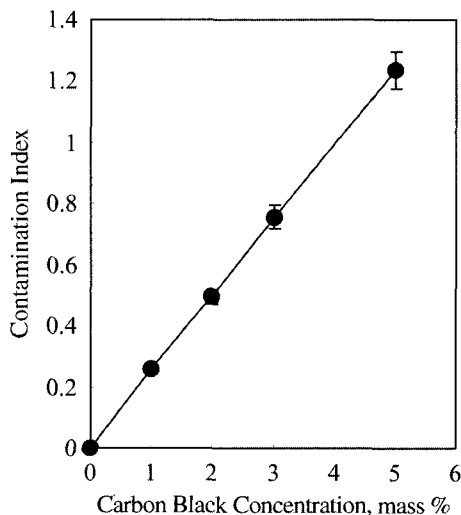


Fig. 4. Contamination index vs. carbon black concentration.

빛의 세기, I_0 는 신유에서의 빛의 세기를 각각 의미하며, 따라서 측정된 오염도는 신유와 카본 입자가 오염되어 빛이 어둡게 된 시험 오일과의 상대적인 광세기의 비를 의미한다. Fig. 4의 측정 결과에서 오염 인덱스 값의 변화는 오일 내에 카본 입자 오염 중량비에 따라서 선형적으로 증가함을 알 수 있었으며, 본 연구에서 사용된 측정 센서가 일차적으로 효용적임을 보여 주고 있다.

Fig. 5는 오일 내에 물을 부피비로 0.1%에서 1.0%까지 혼입하여 얻은 측정 결과이다. 일반적으로 디젤

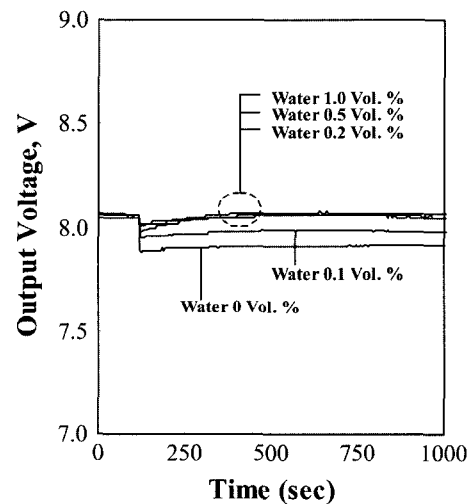


Fig. 5. Output signal variations with water content in a new oil.

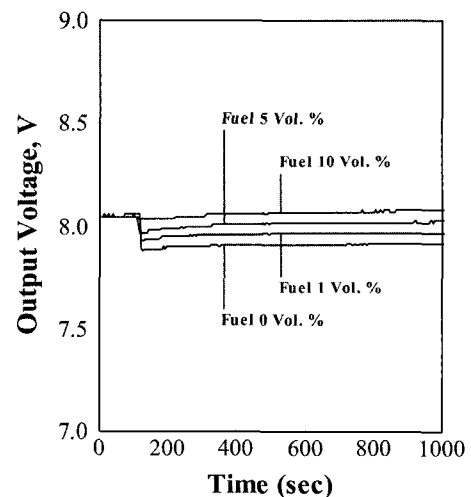


Fig. 6. Output signal variations with fuel dilution in a new oil.

엔진오일 내 수분 함량은 대략적으로 부피비를 기준으로 하여 최대 0.2% 정도까지 허용되는데, 상기 결과에서 오일 내에 수분 1.0%가 혼입되었을 때 측정값의 변화가 초기 신유 값에 비하여 약 1.8% 이내로 나타나고 있으므로, 본 연구에서 사용한 측정센서는 이와 같은 오일 내의 수분 혼입에 의한 측정값 변화 요인을 거의 무시할 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 6은 오일에 연료유를 부피비 기준으로 하여 1.0%에서 10%까지 혼입하여 얻은 측정 결과를 나타내고 있다. 오일 내에 연료 10%가 혼입되었을 때 측정값의 변화 역시 초기 신유 값에 비하여 약 1.8% 이내로 나타내고 있으므로 연료유 혼입에 의한 측정값 변화 요인을 거의 무시할 수 있음을 알 수 있었다.

한편 Fig. 4에서 나타난 측정값은 오일 내에 카본 블랙을 투입한 후 일정한 시간이 경과하여 측정값이 안정화된 상태에서의 값들을 기준으로 나타낸 결과이나, 실제적으로는 시험 초기에는 측정값이 급격한 변화를 나타내었다. Fig. 7은 카본 블랙 1% 시험 시의 측정값변화의 모습을 신유에서의 측정값과 비교하여 측정 시간에 따라 나타낸 결과이다. 신유의 경우에는 측정 센서가 시험 오일 내에 잠겨 광학봉 표면이 오일에 젖기 시작하면서 광학봉주변에 존재하는 오일 경계층에서의 광감 쇠 효과에 의하여 측정값이 급격하게 감소하다가 대략적으로 2,000 초 이후에는 더 이상의 감소 없이 안정화되는 모습을 보이고 있다. 반면에 카본 블랙 1% 시험에서는 2,000 초 이후에도 서서히 감소하는 모습을 보이며 안정화되는 시점까지의 시간

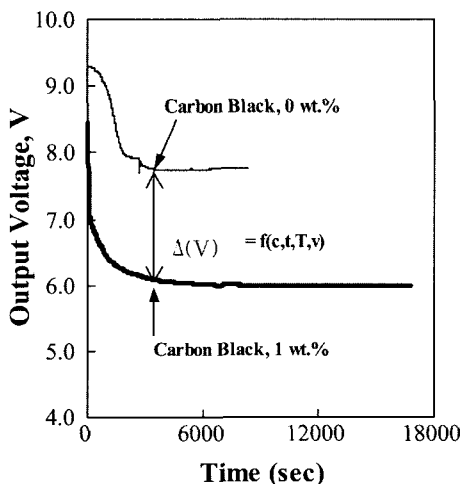


Fig. 7. Output voltage drop caused by carbon black 1 wt. % concentration.

이 상대적으로 길어지는 차이를 보이고 있다. 이와 같은 결과는 측정 센서의 광학봉이 시험 오일 내에 잠기면서 광학봉 표면 주위에 위치하는 카본 입자들의 농도(concentration)가 시간에 따라서 변하기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 시험 초기에 광학봉이 오일과 접하면서 광학봉 표면으로 점차적으로 카본 입자들이 확산되면서 측정값이 급격하게 감소하나, 점차적으로 광학봉 표면의 오염 농도와 시험 오일의 오염 농도 차이가 줄어들면서 광학봉 표면으로 카본 입자 물질확산 속도가 감소하게 되면서 측정값의 변화가 점차적으로 둔화되는 것으로 판단된다.

시험 오일 내에 분산되어 있는 물질이 경계층 표면 주위로 확산되고 표면으로 흡착되는 물리적 현상은 매질의 온도 및 유체 유동 상태와 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다[10]. 이와 같은 경계층 표면에서의 입자의 흡착 및 탈착의 물리적 현상을 Langmuir[11]의 고전적인 모델을 이용하여 본 시험의 경우를 적용하면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 매질의 온도 및 유체 유동상태 이외에 부가적으로 고려해야 할 사항은 카본 블랙 입자, 혹은 엔진 soot 입자들이 전기적인 부하를 띠고 있느냐의 문제이다. 엔진 연소 과정에서 발생하는 soot 입자들은 표면에 산소 및 수소 이온을 지니고 있으며, 오일 내의 윤활유 첨가제들과 물리화학적으로 반응할 가능성이 매우 높으므로 결과적으로 입자 표면이 미량의 전기적인 부하를 지니고 있는 것으로 알려져 있으며[2], 본 실험에 사용한 유리 광학봉 표면은 산화물의 영향으로 마이너스 부하를 띠고 있으므로 이들 상호 간에 정전기적인 힘이 작용할 가능성이 높을 것으로 판단된다. 상기와 같은 여러 요인들에

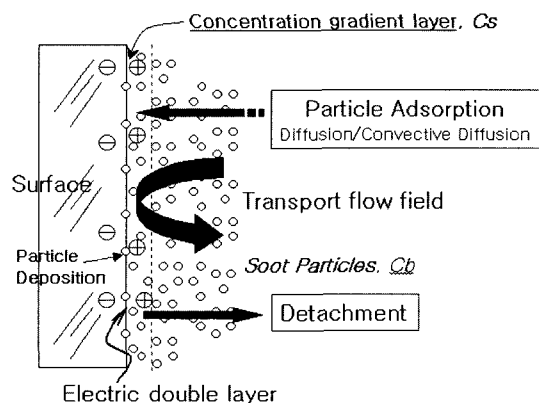


Fig. 8. Langmuir's attachment-detachment process of soot particles onto the surface.

의하여 카본 입자들이 광학봉 표면 경계층으로 물질 확산되고 표면으로 흡착 및 탈착하는 현상은 광감쇠 현상을 이용하여 soot의 함량을 측정하는 본 측정센서의 특성에 매우 중요한 영향을 미치는 사항이므로, 상기 요인들이 변화함에 따른 측정값의 변화 특성에 관하여 다음과 같은 부수적인 시험을 행하였다.

Fig. 9는 카본 블랙 입자 중량비 0.5% 오염조건 하에서 오일 bath 내의 유체 유동 변화에 따른 측정값의 변화를 나타내고 있다. 유체 유동은 최대 교반기 속도 (200 rpm)와 최대 유량(8 L/min) 조건 하에서 순환펌프를 가동하여 욕조 내의 유동을 최대로 강하게 한 경우

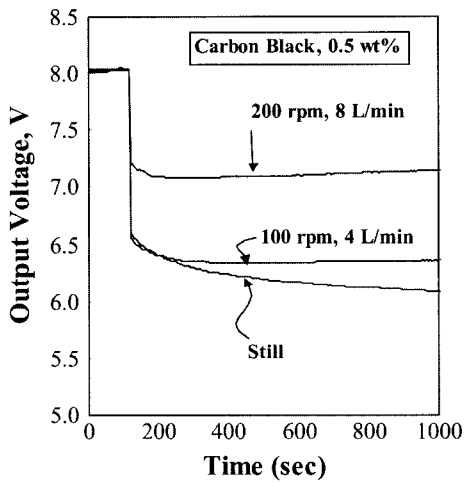


Fig. 9. Output voltage changes vs. the flow turbulence (for carbon black 0.5 wt. %).

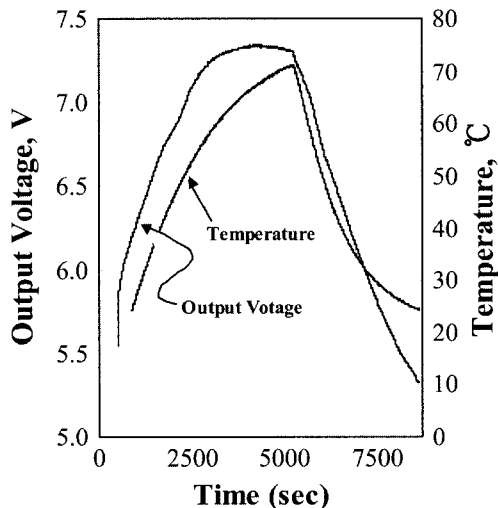


Fig. 10. Output voltage changes vs. the oil temperature (for carbon black 0.5 wt. %).

와, 교반기와 순환펌프 운전 조건을 상기의 반 수준으로 한 경우, 그리고 교반기와 순환펌프를 동작시키지 않아서 거시적으로는 유체가 정지되어 있는 경우로 변화하였다. 시험 결과, 유체의 흐름이 강해지면서 카본 입자 오염 측정값이 상대적으로 적게 측정됨을 알 수 있었다. 상기의 결과는 광학봉 표면 경계층에서의 유동 변화에 의하여 광의 반사 특성이 크게 영향을 받을을 나타내고 있는 듯이 보이나, 실제적으로는 유동이 강해지면서 수반된 오일 온도의 증가(최대 약 20°C)에 따른 영향에 의하여 주로 발생한 것으로 판단되었다.

Fig. 10은 카본 블랙 입자 중량비 0.5% 오염 조건 하에서 온도 변화에 따른 측정값의 변화를 나타내고 있다. 시험 시 욕조 내의 유체 유동은 없는 상태를 유지하였다. 상기 시험에서 측정값은 온도 변화에 따라서 비례적으로 변화하는 모습을 보이고 있는데, 이는 오일의 온도가 증가/감소하면 매질의 점도가 감소/증가함에 따라서 시험 유체에 의하여 광감쇠 되는 빛의 양이 감소/증가하는 것으로 판단된다. 한편, 오일의 온도가 증가하였다가 상온(25°C)으로 돌아올 때의 측정값이 초기의 값보다 감소한 것은 시험이 진행하면서 광학봉 표면에 흡착되었던 카본 입자들이 탈착되지 못하고 표면에 누적되어 나타난 결과인 것으로 사료된다. 따라서 본 측정센서를 엔진에서 사용하기 위해서는 온도 변화에 따른 특성 변화 및 광학봉 표면의 흡착 억제에 관한 보다 많은 연구가 후속되어야 할 것으로 판단되었다.

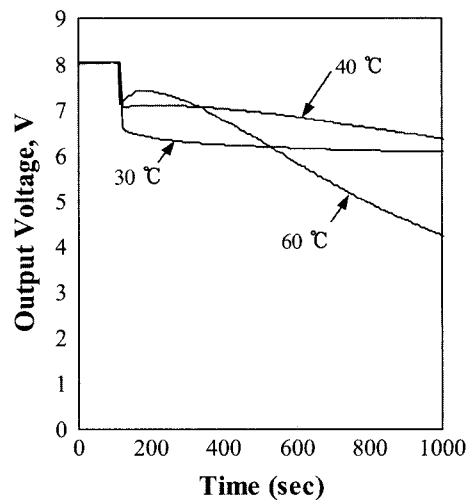


Fig. 11. Output voltage changes vs. the oil temperature (for carbon black 0.5 wt. %).

한편 Fig. 11은 카본 블랙 입자 중량비 0.5% 오염 조건에서 각 온도 조건 하에서 시간에 따른 측정값의 변화이다. 상시 시험에서도 bath 내의 유체 유동은 없는 상태를 유지하였다. 오일의 온도가 30°C로부터 40°C로 증가되었을 경우에는 Fig. 10의 경우와 같이 점도 증가의 원인에 의하여 측정값이 증가하는 모습을 보였으나, 60°C로 증가되었을 때는 시험 초기에는 증가하였으나, 대략적으로 200초 이후에는 급격하게 감소하는 모습을 보이고 있다. 상기의 예기치 못하였던 이상 현상의 원인은 본 연구에서 측정기 내에 발광원과 광학봉 사이에 위치하여 광 신호를 전달하도록 되어 있는 광섬유가 폴리머 재질로 되어 있는 것에 기인하는 것으로 밝혀졌다. 사용된 폴리머 재질의 광섬유는 온도 사용 한계가 55°C로서 그 이상의 온도에 이르면 광섬유를 통과하는 빛의 투과특성이 급격하게 변할 뿐만 아니라, 상대적으로 높은 열팽창계수에 의하여 광학봉과 광섬유 사이의 간격이 좁아지고 상호 간섭함으로써 광신호가 왜곡되었기 때문이다. 따라서 본 연구에서 사용한 측정 센서를 실제적인 디젤 엔진유를 대상으로 적용하기 위해서는 이와 같이 고온 조건에 대비한 광섬유를 사용해야 할 것으로 판단되었다.

본 논문의 일차적인 연구결과로서 광의 전반사 작용을 이용하여 디젤 엔진유 내의 soot 함량을 측정하고자 개발한 측정센서의 효용성은 확인하였으나, 사용 가능한 온도 범위가 55°C 이내로 제약을 받고 있음을 알 수 있었으며, 향후 현장 적용이 가능한 측정센서의 개발을 가능케 하기 위해서는 이러한 온도 제약을 극복함은 물론 오일 내의 soot 입자들이 광학봉 표면 경계층으로 물질 확산되고 표면으로 흡착 및 탈착하는 현상에 관하여 보다 많은 시험 평가가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

디젤엔진 오일을 대상으로 오일 내 soot 함량을 정량적으로 측정하기 위한 광측정 센서를 개발하고 이를 실험적으로 측정하고 평가한 연구 결과에서 다음과 같은 결과들을 얻을 수 있었다.

(1) 유리로 구성된 실린더형의 광학봉 표면과 시험 오일 경계면에서의 입사광의 전반사 현상을 이용하여 디젤 엔진유와 같이 광투과도가 낮은 오일에서의 오염도를 측정할 수 있음을 확인하였으며, 카본 블랙 입자를 최대 중량비 5 wt.%까지 시험 오일에 투입한 시험

결과에서 개발된 측정센서의 효용 가능성을 확인하였다.

(2) 개발된 측정센서는 디젤 엔진유 사용 한도 내로 규정된 오일 내 수분 및 연료유 혼입에 의하여 별다른 영향을 받지 않는 우수한 특성을 지니고 있음을 확인하였다.

(3) 광학봉 표면과 시험 오일 경계면에서의 광의 전반사 현상은 시험 오일 내에 분산되어 있는 카본 입자들이 광학봉 표면 주위로 확산되고 표면으로 흡착되는 물리적 현상에 커다란 영향을 받으며 특히 오일의 온도 변화와 매우 밀접한 관계를 지니고 있음을 알 수 있었다.

(4) 개발된 측정센서를 향후에 실용화하기 위해서는 실제적으로 디젤 엔진유가 사용되는 온도 및 유동 조건 하에서의 시험 및 평가가 후속되어야 할 것으로 판단되었다.

참고 문헌

1. “디젤 엔진오일의 최적 사용한계 설정에 관한 연구,” 한국석유품질검사소 연구보고서, 1994.
2. Clague, A.D.H., Donnet, J.B., Wang, T.K., Peng, J.C.M., “A Comparison of Diesel Engine Soot with Carbon Black,” Carbon 37, pp.1553-1565, 1999.
3. Kim, C.S., Charles, A.P. and Zang, D.M., “Relationship Among Oil Composition, Combustion-Generated Soot, and Diesel Engine Valve Train Wear,” SAE 922199, pp.1177-1191, 1992.
4. USA Patent No.5548393, “Oil Deterioration Detection Apparatus and Apparatus for Detecting Particle in Liquid,” 1996.
5. WO Patent 9850790, “Electrical Measurement of Oil Quality,” 1998.
6. “지능형 시스템 모니터링 기술개발,” 한국과학기술연구원 연구보고서, 2001.
7. Zatykin, A.A., Morshnev, S.K. and Francesson, A.V., “Interaction of Radiation with Absorbing Media in Optical Fiber Part with Sharp Bend (in Russian),” Quantum Electronics. 11 pp.2283-2288, 1989.
8. “디젤 엔진유 카본 수트함량 실시간 측정 센서,” 대한민국 특허출원번호 02-45777 및 미국 특허출원번호 10/291113, 한국과학기술연구원, 2002.
9. 조성용, 장철주, 공호성, 윤의성, 한홍구, “윤활유 오염에 따른 광투과율 변화에 관한 실험적 연구,” 한국윤활학회, 제17권, 제6호, pp.482-489, 2001.
10. Koopal, L.K., Avena, M.J., “A Simple Model for Adsorption Kinetics at Charged Solid-Liquid Interfaces,” Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects 192, pp.93-107, 2001.
11. Langmuir, I. and Am, J., Chem. Soc. 15 p.75, 1918.