**Journal of the KSTLE** Vol. 20, No. 6, December 2004, pp. 343~349
The Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers

# 엔진 수트 측정 센서 표면에서의 흡착 오염 저감을 위한 실험적 연구 (I)

**김학열 · 공호성 · 한흥구 · 윤의성†**
한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

# An Experimental Study for the Minimization of Soot Adsorption on the Optical Surface of an Engine Soot Detector (I)

**Hak-Yal Kim, Hosung Kong, Hung-Gu Han and Eui-Sung Yoon†**
*Tribology Research Center, KIST*

**Abstract** – The adsorption of soot particles onto a sensor surface of the engine soot detector posses a critical problem in the measurement. In order to prevent the optical rod surface from soot contamination, various functional coatings and flow-induced cleaning were applied to the surface in this work. For surface coatings, various materials of self-assembled monolayers (SAM) such as OTS (octadecyltrichlorosilane), PFDTES (perfluorodecyl-triethoxysilane) and PFDTMS (perfluorodecyltrimethoxysilane) were coated on the optical rod surface, which have different characteristics in both hydrophobicity and oleophobicity. These coatings were tested with soot content varying from 0% to 3 wt% and oil temperature from 20 to 70°C. Test results showed that surface coatings were not effective for preventing the adsorption of soot particles on the surface of optical rod. It was thought that these coatings provided the surface with additional attractive surface forces. However, it was found that adsorption of soot particles onto a sensor surface was minimized by flow-induced cleaning. This effect was tested with varying the flow velocity.

**Key words** – engine soot, soot detector, surface coating, adsorption, flow-induced cleaning.

## 1. 서 론

디젤 엔진 내에서 연료가 연소실로 분사되면 대부분의 연료들은 연소가 이루어지나 일부는 산소를 만나 연소되기 전에 높은 온도 하에서 열분해 되는데 이러한 성분들이 수트(soot) 입자를 형성하여, 이들 중에서 일부는 대기로 Particular Matter(PM) 입자 형태로 방출되며 일부는 엔진 오일 내에 엔진 수트 형태로서 누적된다. 상기 수트 입자의 크기는 대략 수 나노미터에서 수십 나노미터[1]에 이르기 때문에 자동차용 필터로 수트 입자를 여과한다는 것은 거의 불가능하다. 이와 같은 미세입자인 수트는 그 함량이 증가하면 할수록 윤활유의 점도를 증가시켜서 유동성이 저하되며 오일의 온도가 상승하여 윤활유의 역할중의 하나인 냉각효과도 떨어지게 된다. 또한 수트 입자들이 상호 뭉쳐서 실린더나 베어링 등의 엔진요소 표면을 긁는 등 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다[2]. 통상적으로 디젤 엔진오일에는 이와 같이 수트 입자들이 상호 뭉치는 것을 방지하기 위하여 청정분산제가 첨가되는데, 엔진 오일 내에 수트 함량이 증가할수록 청정분산제의 효용성이 점차적으로 감소하게 된다. 따라서 이러한 엔진 오일 내의 수트의 증가는 엔진 오일의 수명과 직접적으로 연결되는 중요한 사항으로서 이를 정량적으로 측정하는 것이 필수적으로 요구되고 있다[3].

엔진 수트를 정량적으로 측정하는 방법으로서 열중량분석(TGA, thermogravimetric analysis)[4]이 보편적으로 사용되고 있다. 그러나 상기 측정 방법은 시간과 비용이 많이 들며 샘플 시료를 채취해서 실험적으로

†주저자 · 책임저자 : esyoon@kist.re.kr

분석해야 하기 때문에 오프라인으로 측정 할 수밖에 없는 단점을 갖고 있다. 이와 같은 문제점을 보완하는 방법으로서 광학 센서를 이용하여 오일의 오염도를 실시간적으로 비교적 정확하고 간편하게 측정하는 방법이 많은 연구자들의 관심이 되고 있다[5,6]. 최근 들어 실린더형의 광학봉(Optical rod)을 오일에 위치하고 광학봉 내부에서의 전반사(Total Internal Reflection) 현상을 이용하여 디젤엔진 오일의 엔진 수트 함량을 정량적으로 측정하는 방법이 발표된 바 있다[7-9]. 그러나 센서 부분인 광학봉의 표면이 오일 속에 장시간 위치할 경우 광학표면에 수트 입자가 흡착되어 측정값의 변화가 초래될 수 있는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 광학센서 표면의 흡착문제를 해결하고자 광학봉 표면에 여러 가지 기능성 박막 코팅을 하여 수트 입자와 광학 센서 표면 상호간에 attractive force 성분에 관하여 실험적으로 고찰하였으며, 또한 오일의 유속의 변화에 따른 표면 흡착의 영향에 대하여도 고찰하였다.

## 2. 실험재료 및 장치

### 2-1. 엔진 수트 측정원리

본 연구에 사용한 엔진 수트 측정 장치의 측정원리는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같다. 즉 오일 매질 내에 위치한 원통형 광학봉(Optical rod) 내부에서 빛이 전반사를 할 때, 전반사되는 빛은 'Goos-Hanchen shift' [8] 현상에 의하여, 매우 미약한 세기의 빛이 매질 2 내부로 침투하였다가 다시 매질 1 방향으로 반사한다. 만약에 매질 2 내부에서 상기의 매우 적은 두께(입사

$$h = \lambda \left\{ 2\pi (n_1^2 \sin^2\theta_1 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \right\} \approx \lambda$$

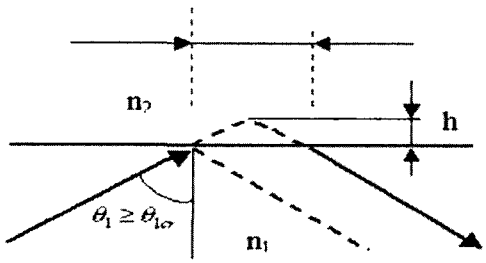


**Fig. 1. Penetration of an electromagnetic field into the external medium by Total Internal Reflection (TIR).**

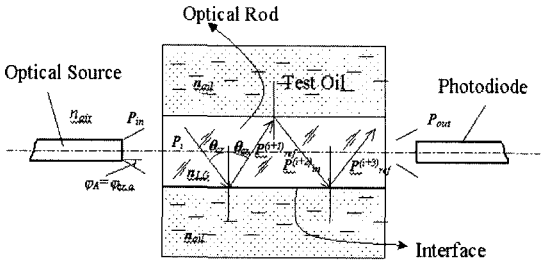


**Fig. 2. Output power of optical radiation at the outlet of an optical rod.**

광 파장의 두께에 해당함)의 영역에 빛을 흡수할 수 있는 요인이 존재한다면 전반사되는 광의 세기가 감소하게 된다. 따라서 본 연구의 경우에서와 같이 광학봉 센서 표면 주위에 엔진 수트 입자가 포함된 오일이 존재하여 빛을 흡수하면 광 출력값이 신유에 비하여 상대적으로 감소하게 되며, 이러한 변화를 이용하여 오일 내의 엔진 수트 오염도를 정량적으로 측정할 수 있다[9].

또한 오염도 변화에 따른 측정 정도를 증가시키기 위해 Fig. 2와 같이 원통형 형태의 광학봉으로 입사된 광이 시험 오일과 광학 봉 경계에서 다수의 전반사를 행하게 하여 광감쇠 효과를 누적시키도록 하였다. 이때, 최종적으로 반사되는 출력광의 세기(Pout)는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{out} = \int_{\varphi=-\varphi_{cr,a}}^{\varphi=\varphi_{cr,a}} P_{in}(\varphi) \cdot R_{TIR}^{m}(\varphi, \bar{n}_{oil}) d\varphi \qquad (1)$$

여기서 $P_{out}$은 출력광의 세기를 말하며 이후 실험결과에서 전압(Voltage) 형태로 측정되는 센서 출력값을 의미한다. $P_{in}(\varphi)$은 광전달 소자로 입사된 광의 세기를, $\varphi$는 광전달 소자로 입사되는 광선의 각도(optical ray angle)를, $\varphi_{cr,a}$는 공기로부터 광전달 소자로 입사된 광원이 광전달 소자 내부를 거쳐 광전달 소자와 시험 오일 경계면에서 전반사가 일어나는 임계각을, 즉 입사각($-\varphi_{cr,a} \le \varphi \le \varphi_{cr,a}$)에서의 상기 광선들이 전반사 조건을 만족하면서 광전달 소자를 통과하는 각도를, $R_{TIR}(\varphi, \bar{n}_{oil})$ 는 상기 광선들이 시험 오일과 광전달 소자 경계를 통과 할 때의 굴절률을, $m$은 입사된 광이 광전달 소자를 통과하기 전까지 시험 오일과 광전달 소자 경계면에서 총 전반사 되는 횟수를 나타낸다.

### 2-2. 실험장치

Fig. 3은 본 실험에서 사용한 시험장치의 전체적인

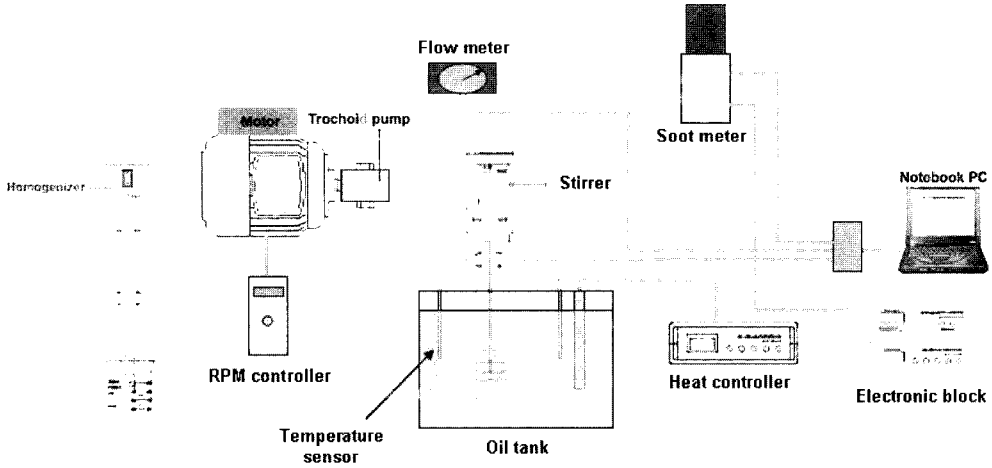


**Fig. 3. Overall view of the test apparatus.**

모습을 나타내고 있다. 시험 오일의 온도를 제어하기 위해 온도제어기를 사용하였고 오일 내부의 온도 분포를 균일하게 하고 카본입자를 균일하게 분산시키기 위해서 교반기를 이용하여 약 400 rpm 속도로 계속 교반하였다. 오일 순환 펌프는 트로코이드형 펌프를 사용하였고 유속을 조절할 수 있도록 콘트롤러를 사용하였다.

시험 오일은 15W-40 등급인 디젤엔진오일(API CF-4 grade)을 사용하였고, 오염 입자인 카본 입자는 디젤엔진 내에서 발생되는 수트 입자의 형태와 특징이 비슷하다고 알려진 Degussa S-160 Carbon black(Average Primary Particle Size : 20 nm)을 사용하였다[1]. 시험 오일의 오염도는 중량비 기준으로 0~3%까지 시험하였다. 그리고 오일에 수트 입자가 잘 분산되도록 하기위해서 Kaddy mill형 호모게나이저로 약 2시간 동안 30,000 rpm으로 강하게 분산시킨 후 오일 탱크에 투입하여 시험하였다.

### 2-3. 실험재료

본 실험에 사용된 측정 센서[9]는 Fig. 3에서와 같이 오일 순환 시스템 내에 위치하도록 설계되었으며, 기본적으로 borosilicate crown glass 재질의 실린더형 광학봉으로 구성되어 있다. 센서 내로 입사되는 광은 파장이 940 nm인 적외선 다이오드(IR Diode)를 사용하였다. 엔진 수트 입자들이 센서 표면으로 흡착되는 효과를 저감하기 위하여 Table 1에 나타난 바와 같이 광학봉 표면에 다양한 종류의 기능성 박막 코팅을 행하였다. 코팅 물질은 코팅된 광학봉 경계면에서의 전반사 조건을 위배하지 않도록 유리 재질과 유사한 빛 굴절률을 지니고 있어야 하며, 코팅 재료에서의 광감쇠 효과를 최소화하기 위하여 코팅 두께가 매우 얇아야 하므로 자기조립 단분자막(SAM : self-assembled monolayer)[10,11] 형태로 유리 표면에 박막 코팅이 가능한 재료들을 선정하고 시험 평가하였다. 본 연구에 사용한 기능성 코팅 물질로는 소수성(hydrophobic) 물질로 잘 알려져 있는 OTS(octadecyltrichlorosilane)와 소수성 및 소유성(oleophobic) 특성을 동시에 지니고 있는 불화수소계의 PFDTES(perfluoro decyltriethoxysilane)와 PFDTMS(perfluoro decyltrimethoxysilane)을 사용하였으며 코팅을 하지 않은 유리 재질의 광학봉과 비교 분석하였다.

**Table 1. The properties of various functional coatings tested**

| | OTS coating | PFDTES coating | PFDTMS coating |
|---|---|---|---|
| Formula | $CH_3(CH_2)17SiCl_3$ | $CF_3(CF_2)_7(CH_2)_2Si(OC_2H_5)_3$ | $CF_3(CF_2)_7(CH_2)_2Si(OCH_3)_3$ |
| Wetability | hydrophobic & oleophilic | hydrophobic & oleophobic | hydrophobic & oleophobic |
| Coating thickness (nm) | about 2.4 | about 1.0 | about 1.0 |

코팅을 위한 전처리 과정으로 광학봉 표면의 불순물을 제거하고 수산화(-OH)기를 형성시키기 위해 유리 재질의 광학봉을 피라나 용액($H_2SO_4$+$H_2O_2$, 7 : 3)에 약 5분간 처리 후 DI(deionized) water로 세척하고, 광학본 표면의 수분 제거를 위하여 IPA(isopropyl alcohol)를 사용하여 세척을 하였으며, 계속하여 $CCl_4$로 세척하고 마지막으로 $N_2$ 가스로 광학봉 표면을 건조시켜서 수산화기만을 생성시켰다.

OTS 코팅은 전처리 과정이 끝난 광학봉을 1 mM OTS($C_{18}H_{37}SiCl_3$+ 희석용제 toluene) 용액에 24시간 dipping하여, OTS가 표면의 수산화기와 가수분해하여 Si-O-Si의 화학적 결합에 의해 광학봉의 표면에 코팅되도록 하였다. 코팅 시편은 SAM 용액으로부터 꺼내어 $CCl_4$로 세척하고 질소가스로 건조하였다.

불화알킬실란계(fluoroalkyl silane)의 코팅은 상대적으로 소수성과 소유성 특성을 동시에 지니고 있는 물질로서, 반응기(functional group)에 붙은 알킬기의 크기가 서로 다른 PFDTMS와 PFDTES을 비교 시편으로 사용하였다. 코팅하기 위한 시편의 전 처리 과정은 OTS 코팅의 경우와 동일하게 하였다. PFDTMS 용액의 제조는 상온에서 비이커에 에탄올 80 g(1.75 mole)을 넣은 후 교반하면서 5 g의 $H_2O$(0.28 mole)과 HCOOH (pure : 0.055 mole)를 섞은 산성 수용액을 첨가하여 전체 용액의 pH가 약 3.5~4 정도가 되도록 조정하였다. 지속적으로 교반하면서 5.7 g(0.1 mole)의 PFDTMS ($C_{13}H_{13}F_{17}O_3Si$)를 서서히 적하(dropping)시켜 첨가한 후 약 5시간 동안 반응시켰으며, 반응이 완성된 용액에 457.5 g(9.95 mole)의 에탄올을 추가적으로 첨가하여 희석시킴으로써 코팅용액을 제조하였다. 코팅은 광학봉을 2시간 동안 상기 용액에 dipping한 후에 꺼내어 상온에서 약 15분간 건조시켜 에탄올을 휘발시킨 후 120°C의 강제 대류 형 오븐에서 30분간 열처리하여 완성하였다. 또한 PFDTES 코팅 용액의 제조는 상기 PFDTMS 원액의 제조 공정과 동일한 방법으로 수행하면서 단지 PFDTES($C_{16}H_{19}F_{17}O_3Si$)의 양을 2 g (0.01 mole)으로 농도를 줄인 상태에서 21시간동안 반응시켜 제조하였으며, 추가적으로 에탄올로 희석하지는 않았다. 코팅은 PFDTMS의 경우와 동일하게 행하였다.

## 3. 실험 결과

Fig. 4는 오일 내 카본입자 함량 증가에 따른 측정

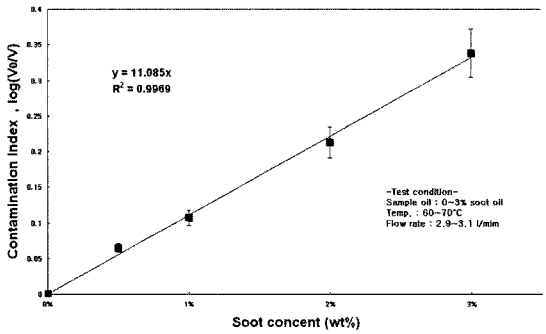


**Fig. 4. Contamination index vs. carbon black concentration.**

센서에서의 오염도 값 변화를 나타내고 있다. 상기 실험은 오일 내에 투입된 카본 입자가 실험 시간 중에 균일한 분산 상태를 지속시키기 위하여 Fig. 3의 시험장치에서 교반기의 작동과 아울러 오일 순환펌프를 가동시켜 시험 오일의 유량이 대략 3.0 l/min, 오일의 온도는 약 65°C 상태를 유지하였다. 측정 센서에서의 오염도 값은 Lambert-Beer 법칙에 의한 입사광이 광감쇠되어 반사되는 비율로서 다음과 같이 정의하였다[7].

$$Contamination\ Index = \log\left(\frac{V_o}{V}\right) \quad (2)$$

식 (2)에서 $V$는 카본 입자 오염에 의하여 광감쇠된 빛의 세기, $V_o$는 카본 입자 오염이 없는 신유에서의 빛의 세기($P_{out}$)를 각각 의미하며, 측정된 오염도는 신유와 카본 입자가 오염되어 빛이 어둡게 된 시험 오일과의 상대적인 광세기의 비를 의미한다. Fig. 4의 측정 결과에서 오염도 값의 변화는 오일 내에 카본 입자 오염 중량비에 따라서 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 사용된 측정 센서가 오일 내 카본 입자 농도를 정량적으로 측정함에 효용적임을 보여주고 있다.

그러나, 저자들의 지난 연구 결과[6]에서 나타낸 바와 같이 오일의 유동 조건에 따라서 센서의 측정값이 크게 영향을 받는 문제점을 갖고 있다. Fig. 5는 다양한 오일 유동 조건에 따르는 센서에서의 대표적인 측정값의 변화를 보이고 있다. Fig. 5에서 (a)는 오일 유량이 1.5 l/min, 온도 70°C 하에서의 측정 결과로서, 센서 내에 오일이 없는 초기에는 약 7.0 V 정도의 출력 값을 보이다가 카본 입자 중량비 1%의 시험오일이 센서 내로 진입하게 되면 빛이 감쇠되어 센서의 출력값이 급격하게 감소하는 모습을 보이나 시간이 지남에

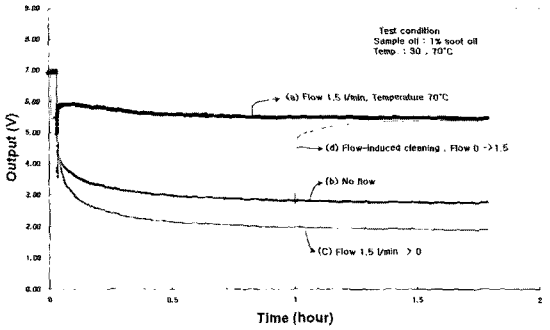


**Fig. 5. Changes of the sensor output in different oil flow conditions.**

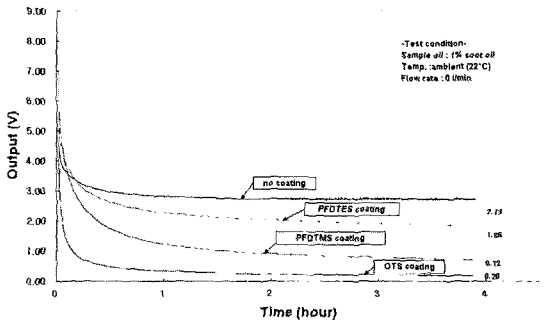


**Fig. 6. Sensor outputs with various coatings on the optical rod (1% soot oil).**

따라 점차적으로 안정된 출력 값(약 5.5 V)을 나타내고 있다. 반면에 (b)는 광학봉 센서를 센서 하우징으로부터 분리하여 카본 입자 중량비 1%의 시험오일이 들어있는 비이커 용기에 넣어 오일 유동이 없는 경우를 비교 측정한 결과로서, 전술한 (a)의 경우에 비하여 측정값이 상대적으로 낮을 뿐만 아니라 변화의 폭도 큼을 알 수 있다. (c)는 (a)의 경우와 같이 시험 초기에는 오일의 유동(1.5 l/min)을 주었다가 2분 후에 유동을 갑자기 중지했을 때의 결과로서, (b)의 경우보다도 상대적으로 낮은 측정값을 보여주고 있다. (d)는 전술한 (c)의 시험 조건과 동일하게 시험을 수행하다 1시간 이후부터 오일유동(1.5 l/min)을 재개한 결과인데, 측정값이 급속하게 증가하여 점차적으로 (a)의 경우와 같이 안정된 출력 값(약 5.5 V)을 보이고 있다.

상기 Fig. 5의 결과로부터 오일의 유동 조건이 일정한 속도 이하일 때에는 센서 부위인 광학봉 표면으로 오일 속에 있는 카본 입자들이 흡착(adsorption) 하는 것으로 판단되었다. 광학봉 경계면으로의 흡착은 시험오일, 카본 입자, 유리 재질의 광학봉 사이에 작용하는 다양한 표면력들의 상호 작용에 의하여 기인되는 현상으로 사료된다. 디젤엔진 오일 속에 존재하는 수트 (본 시험의 경우, 카본) 입자들은 청정분산제 혹은 기타 윤활 첨가제들과 물리화학적으로 결합하여 미량의 전기적 부하를 지니고 있는 것으로 알려져 있으며[12], 본 측정에 사용한 유리 광학봉 표면 또한 산화물의 영향으로 마이너스 부하를 띠고 있으므로 이들 상호 간에 정전기적인 힘이 작용할 가능성이 높을 것으로 판단된다. 특히 Fig. 5에서 (c)의 경우에서 제일 낮은 측정값을 나타낸 시험결과는 상기 정전기력(electrostatic force)과 관련하여 설명이 가능할 것으로 사료된다. 즉 시험오일이 광학봉 주위로 유동하게 되면 두 물질 사이에 마찰이 발생하게 되고 일함수(work function) 차이에 의하여 두 물체 사이에 마찰대전 현상이 발생하여 정전기력이 발생하는데, 상대적으로 일함수가 큰 광학봉 표면이 음극으로 대전되어 양극으로 대전된 카본 입자들이 광학봉 표면으로 흡착되는 현상이 더욱 가속화된 것으로 추정된다. 이와 같은 정전기력 외에도 광학봉 표면에는 van der Waals force, hydrophobic attractive force, 혹은 steric force 등과 같은 미소 표면력들이 존재하며 이러한 힘들이 복합적으로 나타난 것[12,13]으로 사료되나, 본 연구에서는 이들 표면력들을 정확하게 규명하고 고찰하지 않았다.

Fig. 6은 대기온도 하에서 Table 1의 기능성 물질로서 광학봉 센서 표면들을 코팅한 센서들을 이용하여 중량비 1% 카본 입자가 오염된 오일 시료를 시간에 따라 측정한 결과이다. 오일과 상호 간에 반발하려는 특성을 지니고 있는 소유성 물질인 불화알킬실란계 물질이 코팅된 센서의 경우, 탄소 입자들로 오염되어 있는 오일이 코팅 물질과 상호 반발력을 야기하여 광학봉 표면으로의 흡착이 저감될 것으로 기대하였으나, 실험 결과 코팅을 하지 않은 유리 재질의 경우보다 상대적으로 높은 측정값을 얻지 못하였다. 센서 표면이 시험오일에 젖기 시작하는 실험 초기에 유리 재질의 광학봉에 비하여 상대적으로 높은 측정값을 보이는 특성을 보인 것은 상기 코팅물질의 소유성에 기인된 결과로 추정되나, 이후에 급속하게 측정값이 감소하는 것으로 보아 실제적으로는 탄소 입자와 코팅 표면 사이의 흡인력(attractive force)이 오히려 상대적으로 커진 것으로 사료된다. 특히 OTS 코팅을 한 경우는 빠르게 카본 입자를 흡착하여 급격히 측정값이 감소함을 알 수 있었으며, 본 연구 목적에 적합한 코팅 물질이 되지 않음을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 사용된 센서는 광학봉 표면 주위에 위치하는 시험오일에서의 광감쇠 되는 양을 측정하는 것이므로, 실제적인 측정값은 광학봉 표면으로 흡착되는 수트 혹은 카본 입자와 관련된 표면력과 아울러 입자들을 표면으로부터 탈착(detachment) 시키는 힘 성분 사이의 평형상태(equilibrium state)에서 발생하는 광감쇠 특성에 의하여 좌우된다고 할 수 있다. 따라서 측정센서로서 요구되는 사항은 센서 표면으로 흡착하는 표면력이 존재한다 하더라도 적당한 방법으로 이를 탈착시킴으로써 광학봉 주위의 오염농도가 bulk 시험 오일의 오염농도와 같도록 유지시키는 일이다. 한편 경계층 표면에서의 물질 흡착 및 탈착현상은 일반적으로 매질의 온도와 유동 조건에 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있으며[7], 전술한 Fig. 5의 실험결과에서도 상기 효과를 보인 바 있다.

Fig. 7는 1.0% 카본 오염농도 조건 하에서 유리 재질의 광학봉의 경우, 오일 유동 변화에 따라서 카본 입자의 흡착 및 탈착이 어떻게 평형상태를 이루는가를 나타내고 있다. 상기 실험결과를 보면 센서 내부의 유속이 증가하여 약 100 mm/sec(오일 유량 조건 : 0.43 l/min) 이상의 유속에 도달하면 측정값이 안정화됨을 알 수 있다. 반면에 유속이 100 mm/sec 이하일 때에는 확대된 그림에서와 같이 출력값이 일정하지 못하고 시간에 따라 조금씩 감소하는 경향을 보이는 것을 보아 광학봉 표면으로의 카본 입자 흡착력이 유속에 의하여 발생되는 탈착력보다 상대적으로 큰 것으로 보인다. 따라서 이 실험결과에서 코팅하지 않은 유리 재질의 광학봉 표면의 경우 1.0% 카본 오염농도에서 안정성 있는 측정을 행하기 위하여 약 100 mm/sec 정도의 최소 유속을 갖는 오일 유동이 필요함을 확인하였다. 또한 상기의 최소 유속 조건은 카본 오염농도의 증가와 함께 증가하여, 3.0% 오염농도 시에는 약 150 mm/sec (오일 유량 조건 : 0.64 l/min)의 유속이 요구됨을 알 수 있었다.

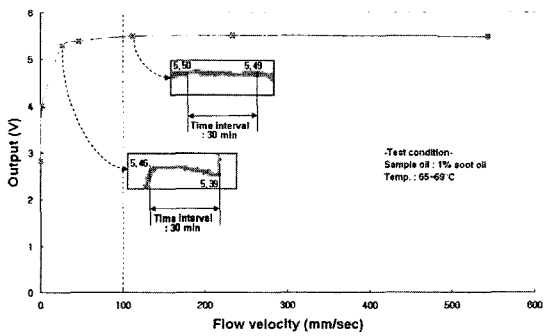


**Fig. 7. Sensor output of the glass optical rod vs. flow velocity.**

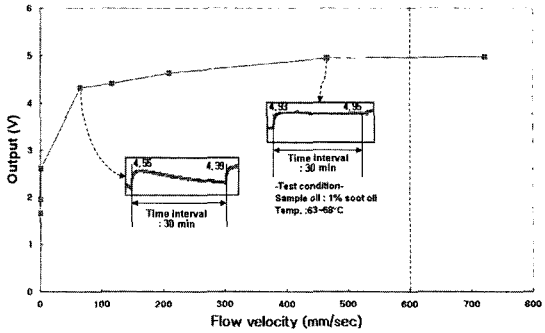


**Fig. 8. Sensor output of the PFDTES coated optical rod vs. flow velocity.**

한편 Fig. 8은 Fig. 7의 실험과 동일한 조건에서 PFDTES 물질을 코팅한 광학봉 센서에서의 실험 결과를 나타낸 것이다. PFDTES를 코팅한 광학봉의 경우는 유속이 약 600 mm/sec 이상에서 측정값이 안정화됨을 알 수 있었다. 최소 유속 이하의 유동조건(600 mm/sec 이하)에서의 결과를 살펴보면 초기의 값에서 시간에 따라 감소하는 현상이 코팅을 하지 않은 광학봉의 경우보다 기울기가 급하게 감소함을 알 수 있는데, 이는 PFDTES 코팅 표면과 카본 입자 사이의 attractive 성분의 표면력이 상대적으로 커서 카본 입자들이 광학봉 표면으로 흡착하는 현상이 강한 것에 기인된 것으로 판단되었다.

## 4. 결 론

본 연구를 통하여 디젤엔진 오일에서의 엔진 수트 함량을 정량적으로 측정하기 위한 수트 측정기의 문제점인 광학봉 센서 표면의 흡착에 의한 오염 문제를 해결하기 위해 다양한 실험을 수행한 결과들로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 오일 내 카본 입자들이 광학봉 센서 표면으로 흡착되는 현상은 시험 오일, 카본 입자 및 유리 재질의 광학봉 사이에 작용하는 다양한 표면력들의 상호 작용에 의하여 기인하는 것으로 사료된다.

2) 오일이 센서 내부에서 유동하면서 센서표면의 마찰로 인하여 광학봉 센서 표면에 마찰전기가 대전되며, 상기 현상에 의하여 카본 입자가 센서의 표면에 흡착되는 현상이 가속화되는 것으로 사료된다.

3) 자기조립 박막 형태의 OTS 코팅과 불화알킬실란계의 기능성 표면코팅을 통하여 센서 표면과 오일의 친화력을 저하시켜 카본 입자에 의한 센서표면의 오염을 방지하고자 하였으나, 오히려 센서 표면으로의 흡착이 증가되는 결과를 얻었다.

4) 센서 표면으로의 카본 입자 흡착은 센서 내부에서의 적당한 유속을 갖는 오일 유동에 의하여 효과적으로 최소화 될 수 있다. 또한 상기의 최소 유속 조건은 카본 오염농도의 증가와 함께 증가하여, 3.0% 오염농도 시에 약 150 mm/sec 의 유속이 요구됨을 알 수 있었다.

5) 광학봉 센서 표면의 흡착에 의한 오염 문제를 해결하기 위하여 마찰전기 대전을 최소화 할 수 있는 표면 코팅의 적용이 요구되며, 이와 아울러 장시간에 걸쳐서 측정센서를 유동이 정체되어 있는 오일 속에 방치하여 측정하는 경우에도 광학봉 표면과 수트 입자 사이에 흡착이 누적될 것으로 사료되어 이를 해결하여야 할 또 다른 연구의 필요성이 요구된다.

## 참고문헌


1. Clague, A.D.H., Donnet, T.B., Wang, T.K., and Peng, J.C.M., "A comparison of diesel engine soot with carbon black," *Carbon*, pp.1553-1565, 1999.
2. Gautam, M., Chitoor, K., Durbha, M., and Summers, J. C., "Effect of diesel soot contaminated oil on engine wear-investigation of novel oil formulations," *Tribology International*, Vol. 32 No. 12, pp. 687-699, 1999.
3. 디젤 엔진오일의 최적 사용한계 설정에 관한 연구, 한국석유품질검사소 연구보고서, 1994.
4. Seifert, William W., and Desjardins, B., "Measurement of soot in Diesel Engine Lubricating Oil," *SAE transactions*, Vol. 104, No. 4, pp. 638-643, 1996.
5. Sakurai, H., Tobias, H.J., Park, K., Zarling, D., Docherty, K.S., Kittelson, D.B., McMurry, P.H., and Ziemann, P.J., "On-line measurements of diesel nanoparticle composition and volatility," Atmospheric environment, Vol. 37, No. 9/10, pp. 1199-1210, 2003.
6. USA Patent No.5548393, "Oil Deterioration Detection Apparatus and Apparatus for Detecting Particle in Liquid," 1996.
7. 조성용, 공호성, 윤의성, 한흥구, 정동윤, "디젤 엔진 오일 내 soot 함량에 따른 오염도 측정에 관한 실험적 고찰," *한국윤활학회지*, 제19권, 제5호, pp. 251-258, 2003.
8. "지능형 시스템 모니터링 기술개발," *한국과학기술연구원 연구보고서*, 2001.
9. "디젤 엔진유 카본 수트 함량 실시간 측정 센서," 대한민국 특허출원번호 제10-2002-45777호, 2002.
10. Wasserman, Stephen R., Tao, Yu-Tai, Whitesides, and George M., "Structure and reactivity of alkylsiloxane monolayers formed by reaction of alkyltrichlorosilanes on silicon substrates," *Langmuir*, Vol. 5 No. 4, pp. 1074, 1989.
11. Choi, J., Ishida, T., Kato, T., and Fujisawa, S., "Self-assembled monolayer on diamond-like carbon surface: formation and friction measurements," *Tribology International*, Vol. 36, No. 4/6, pp. 285-290, 2003.
12. Koopal, L.K. and Avena, M.J., "A simple model for adsorption kinetics at charged solid-liquid interfaces," *Colloids and Surfaces*, Vol. 192 No. 1/3, pp. 93-107, 2001.
13. Israelachvili, Jacob N., Intermolecular and surfaces, Part 2, pp. 139-340, Academic press(second edition), 1991.