

## 엔진 오일 열화와 피스톤 톱링 그루브 온도가 카본 디포짓 형성에 미치는 영향 Part II - 디젤 엔진의 디포짓 형성 특성

김중수 · 민병순 · 오대윤 · 최재권

현대자동차(주)

## The Effect of Engine Oil Degradation and Piston Top Ring Groove Temperature on Carbon Deposit Formation Part II - The Deposit Formation Characteristics of Diesel Engine

Joong-Soo Kim, Byung-Soon Min, Dae-Yoon Oh and Jae-Kwon Choi

Hyundai Motor Company

**Abstract**—In order to investigate the characteristics of top ring groove deposit formation in diesel engine, engine test and simulation test were performed. From component analysis of used oils sampled from actual running engines, soot content in engine oil was selected as a main parameter for evaluating oil degradation. Deposit formation is highly related to soot content in lubricating oils. And high soot content oil accelerates deposit formation even in low temperature region below 260°C. In low temperature region below 260°C, deposit formation rate is mainly affected by top ring groove temperature. However, in high temperature region above 260°C, deposit formation rate is affected by soot content as well as top ring groove temperature. Therefore, soot content as well as top ring groove temperature should be kept a certain level in order to prevent troubles due to carbon deposit formation.

**Key words**—oil degradation, carbon deposit, top ring groove temperature, modified panel coking test, soot content in oil.

### 1. 서 론

피스톤의 온도가 증가하면, 재질의 강도와 내마모성이 떨어지고, 알루미늄 응착이 발생하며, 카본 디포짓 형성량이 증가하는 문제점이 발생한다. 특히 톱링 그루브에 형성되는 카본 디포짓은 링 고착이나 라이너의 과다 마모를 유발시켜 엔진의 손상을 야기시킨다. 그러므로, 이러한 문제점들을 피하기 위해서는 톱링 그루브 디포짓 형성량을 일정 수준 이하로 유지하여야 하며, 이를 위해서는 카본 디포짓 형성 메커니즘에 대한 연구가 필요하다.

가솔린 엔진의 경우는 오일의 산화 안정성을 높이

거나, 엔진 오일의 첨가제 조성을 변화시키는 방법으로 오일의 열화를 방지하여 디포짓 형성을 저감하는 연구가 수행되어 왔다[1-4].

한편, 디젤 엔진의 경우는 연소 생성물인 수트(soot), 연료내의 황 함유량과 톱링 그루브 온도가 카본 디포짓 형성에 미치는 영향에 대한 연구가 주로 수행되어 왔지만[5-8], 그 특성에 대해서는 아직 많은 부분이 알려지지 않고 있다.

그러므로, 본 연구에서는 카본 디포짓 형성에 영향을 주는 인자들을 분석하고, 이들과 디포짓 형성량의 관계를 명확히 하고자 한다.

이를 위하여 전보에서는 가솔린 엔진의 톱링 그루

브 디포짓 형성 특성에 대한 피스톤 온도, 오일 열화와 오일 첨가제 변화의 영향에 대하여 기술하였고[9], 본 연구에서는 디젤 엔진의 톱링 그루브 디포짓 형성에 대한 엔진 오일의 열화와 톱링 그루브 온도의 영향을 규명하고자 한다.

실엔진에서 디포짓 형성량을 측정하는 것은 시간과 비용이 많이 소모되고, 디포짓 형성 특성에 대한 각 인자의 영향을 독립적으로 파악하기 어렵기 때문에 시뮬레이션 실험 방법들이 연구되어 왔다[3-4].

본 논문에서도 시뮬레이션 실험 장치를 개발하여 정성적인 카본 디포짓 형성 메커니즘을 연구한 후, 실엔진 실험을 통해 이를 확인하였다.

이러한 실험 결과를 바탕으로, 피스톤 톱링 그루브 카본 디포짓 형성에 대한 오일 열화 및 온도의 영향을 파악하여 카본 디포짓 형성 메커니즘을 분석하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2-1. 시뮬레이션 실험 장치

Fig. 1은 카본 디포짓 형성에 미치는 각 인자들의 영향을 관찰하기 위하여 제작한 시뮬레이션 실험 장치의 개략도이다.

오일 누설 장치를 통하여 오일이 공급되면, 공급된 오일은 전기 히터로 온도를 조절할 수 있는 시편위를 흐르면서 디포짓을 형성한다. 디포짓 형성 조건을 실엔진과 유사하게 하기 위하여 챔버내의 온도를 전기 히터를 이용하여 조절하였다. 여기서, 시편 온도는 피스톤 톱링 그루브의 온도와 상사되고, 챔버 온도는 피

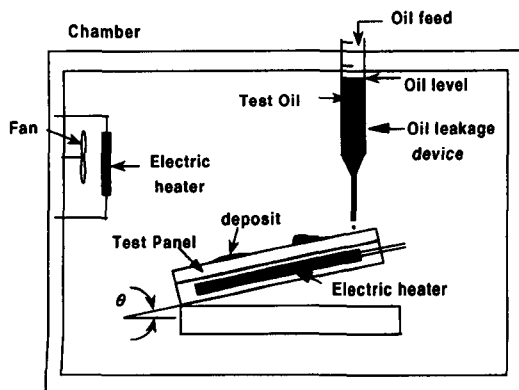


Fig. 1. Schematic diagram of simulation test apparatus.

Table 1. Conditions of simulation test

Oil leakage rate	1 g/hr
Atmospheric temperature	200°C
Inclined angle ( $\theta$ )	4°
Panel temperature	220~300°C

스톤 톱링 그루브 주위를 흐르는 연소 가스의 온도와 상사된다. 디포짓 형성량은 실험 전후의 시편의 질량 차이를 측정하여 결정했다.

시뮬레이션 실험의 주요 조건은 Table 1에 나타내었다.

### 2-2. 엔진 실험

시뮬레이션 실험에서 정성적으로 파악한 카본 디포짓 형성 메커니즘을 실엔진에서 확인하기 위하여, 실엔진에서 피스톤 온도 측정 실험과 디포짓 형성 실험을 수행하였다. 엔진 실험에는 간접 분사 방식 디젤 엔진과 직접 분사 방식 디젤 엔진 등 두 종류의 엔진을 사용하였으며, 실험에 사용된 엔진의 사양과 주요 제원은 Table 2에 나타내었다.

피스톤 온도 측정 위치는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 톱링 그루브 외주면의 4방향이며, K-type 열전대를 이용하여 정상 상태 온도를 측정하였다. 또한, 신호선을 엔진 외부로 인출하기 위하여 가위형 링키지 장치를 사용하였다.

피스톤의 온도를 측정하여 톱링 그루브의 온도가

Table 2. Specification of test engines

Engine type	Indirect injection	Direct injection
Displacement (cc)	2607	2497
Compression ratio	22	19.5
Bore × Stroke (mm)	91.1 × 100	91 × 96
Lubricant	CD 10W30	CD 10W30

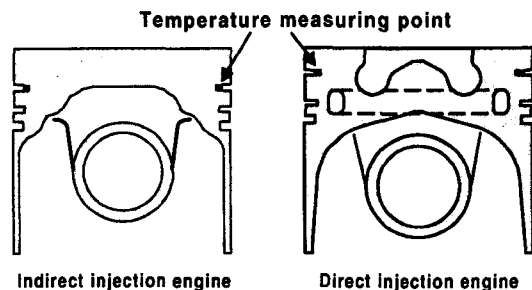


Fig. 2. Schematics of test pistons.

최대가 되는 조건을 선정하고, 이 조건에서 일정 시간 동안 엔진을 운전하여 디포짓 형성 실험을 수행하였다. 디포짓 형성량은 피스톤의 단면을 절개하여 톱링 그루브에 퇴적된 디포짓의 두께를 측정하여 정량화시켰다.

**2-3. 엔진 오일 및 디포짓의 성분 분석**

엔진 오일의 열화도를 판단하기 위하여, FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)과 ON-SITE Analyzer를 이용하여 내구 엔진 오일에 대한 성분 분석을 수행하였다. 또한, 저배율 입체 현미경(Stereoscopic microscope)를 이용하여 엔진 실험에서 구한 디포짓의 구조를 분석하였으며, 마이크로 비커스(micro-Vickers) 경도계를 이용하여 디포짓의 경도를 측정하였다.

**3. 실험 결과 및 고찰**

**3-1. 엔진 오일의 열화도 분석**

디젤 엔진 오일의 열화를 판정할 수 있는 인자를 선정하기 위하여, 내구 실험 엔진에서 샘플링한 엔진 오일의 열화도를 분석하였다. 엔진 오일은 실험중 오일 교환을 하지 않은 상태에서 일정한 간격으로 샘플링하였다. 실험에 사용한 오일은 CD 10W30이고, 실험 조건은 전부하 연속 내구이다. Fig. 3은 엔진 운전 시간에 따른 엔진 오일의 열화 경향을 보여준다. 이 결과에서 볼 수 있듯이, 엔진 운전 시간이 증가함에 따라, 오일의 동점도와 수트 함유량은 증가하는 경향을 보이며, 직접분사식 디젤 엔진 오일보다 간접 분사식 디젤 엔진 오일의 열화가 빨리 진행되고 있다.

가솔린 엔진의 경우, 엔진 오일의 열화는 TAN, TBN, 산화도, 질화도 등으로 주로 평가할 수 있지만 [10], 디젤 엔진의 경우, 오일 열화는 연소 생성물인

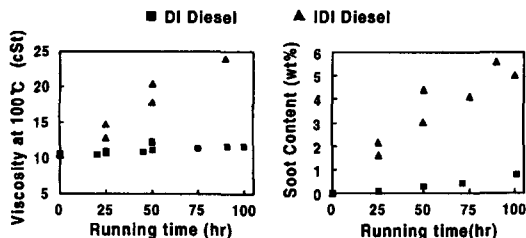


Fig. 3. Trends of engine oil degradation according to engine running time.

수트의 혼입에 의한 점도 증가로 주로 평가한다[11-14]. 간접 분사 방식 디젤 엔진의 경우, 오일의 수트 함유량이 높기 때문에 동점도 증가율이 직접 분사 방식 디젤 엔진보다 크게 나타난 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이러한 내구 엔진 오일의 열화도 분석 결과를 바탕으로, 오일의 수트 함유량을 오일 열화를 판정할 수 있는 주요 인자로 선정하였으며, 오일의 수트 함유량과 디포짓 형성량의 상관 관계에 대하여 연구하였다.

**3-2. 오일의 수트 함유량의 영향**

디포짓 형성에 대한 오일내 수트 함유량의 영향을 파악하기 위하여 신유에 수트를 혼합한 오일을 제작하였다. 내구 엔진 오일에 대한 분석 결과를 바탕으로, 오일의 수트 함유량은 최대 6 wt%로 설정하였다. 실험에 사용한 수트는 내구 엔진에서 샘플링하였으며, 교반기를 이용하여 엔진 오일과 일정하게 혼합시켰다. 또한, 이렇게 제작한 오일의 수트 함유량은 FT-IR로 측정하여 검증하였다.

Fig. 4는 디포짓 형성량과 오일의 수트 함유량의 상관 관계에 대한 시뮬레이션 실험 결과이다.

Fig. 4의 실험 결과에서 볼 수 있듯이, 엔진 오일내의 수트 함유량이 증가함에 따라, 디포짓 형성량은 급격히 증가하는 경향을 보인다. 즉, 오일의 수트 함유량이 높다면, 동일한 온도 조건에서도 디포짓 형성량이 증가한다.

시뮬레이션 시험에서 구한 카본 디포짓 형성량과 오일의 수트 함유량의 상관 관계를 실 엔진 시험을 통해 확인하기 위하여, 오일의 수트 함유량이 높은 간접

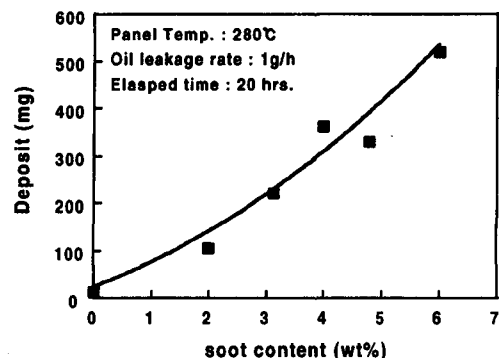


Fig. 4. Effects of soot content on carbon deposit formation.

**Table 3. Conditions of engine test**

Piston	I	II
Combustion type	Indirect injection	Direct injection
Test condition	4000 rpm	4000 rpm
Elapsed time	400 hrs	400 hrs
Soot content in oil	0 → 4 wt%	0 → 1 wt%

분사 방식 엔진과 오일의 수트 함유량이 낮은 직접 분사 방식 엔진의 디포짓 형성 특성을 비교하였다. 엔진 실험 조건은 Table 3과 같다.

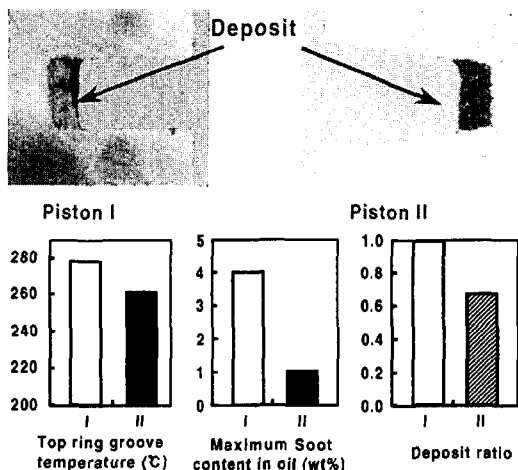
피스톤 I은 간접 분사 방식 디젤 엔진으로 엔진 오일내의 수트 함유량은 최대 4 wt%까지 증가하며, 피스톤 II는 직접 분사 방식 디젤 엔진으로 오일내의 수트 함유량은 최대 1 wt%까지 증가한다.

또한, 본 연구에서는 디포짓 형성량을 정량화하기 위하여 아래와 같이 디포짓 형성비를 정의하였다.

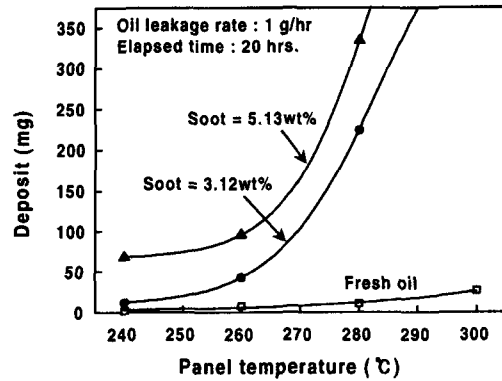
$$\text{Deposit ratio} = \frac{\text{Thickness of deposit}}{\text{Back clearance of ring groove}}$$

Fig. 5의 실험 결과에 나타난 바와 같이, 피스톤 I의 톱링 그루브 온도는 280°C이고, 피스톤 II의 톱링 그루브 온도는 260°C이다. 또한, 피스톤 I의 디포짓 형성비는 1.0이고, 피스톤 II의 디포짓 형성비는 0.7이다.

피스톤 I과 피스톤 II의 톱링 그루브 온도는 약 20°C의 차이가 있고, 피스톤 I과 피스톤 II의 디포짓 형성비도 차이를 나타낸다. 피스톤 I과 피스톤 II의 디포짓 형성비가 크게 차이가 나는 것은 톱링 그루브



**Fig. 5. Effect of soot content in oil-engine test results.**



**Fig. 6. Effect of temperature on carbon deposit formation.**

의 온도 차이 뿐만 아니라, Fig. 4의 시뮬레이션 실험 결과에서 나타난 바와 같이 오일의 수트 함유량이 다르기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

**3-3. 톱링 그루브 온도의 영향**

톱링 그루브 온도 변화가 디포짓 형성에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 오일의 수트 함유량이 동일한 조건에서 톱링 그루브의 온도를 변화시키면서 디포짓 형성량을 측정된 시뮬레이션 실험 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

디젤 엔진 오일의 경우, 가솔린 엔진 오일에 비해 산화 방지제와 분산제가 다량 함유되어 있으므로 온도가 260°C 이상으로 증가하더라도 신유의 디포짓 형성량은 크게 증가하지 않는다. 그러나, 오일내에 수트가 함유된 사용유의 경우는 시편 온도가 260°C 이상으로 증가하면, 디포짓 형성량이 급격히 증가한다. 또한, 피스톤 온도가 260°C 이하인 경우, 가솔린 엔진은 오일의 열화도가 높아도, 디포짓 형성량이 낮은 수준이지만[9], 디젤 엔진은 오일의 수트 함유량이 높을 경우, 피스톤 온도가 260°C 이하인 영역에서도 디포짓 형성량은 높은 수준을 나타낸다.

시뮬레이션 실험을 통하여 정성적으로 파악한 디포짓 형성에 대한 톱링 그루브 온도의 영향을 엔진 실험

**Table 4. Conditions of engine test**

Piston	I	III
Test condition	4000 rpm	4000 rpm
Elapsed time	400 hrs	400 hrs
Cooling gallery	non-exist	exist
Soot content in oil	0 → 4 wt%	0 → 4 wt%

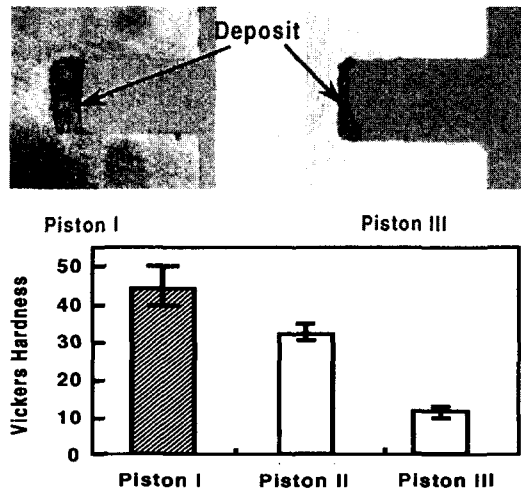


Fig. 7. Effect of top ring groove temperature-engine test results.

을 통해 확인하였다. 실험에 사용된 엔진은 간접 분사 방식 디젤 엔진이며, 실험 조건은 Table 4와 같다.

피스톤 톱링 그루브의 온도는 피스톤 냉각 방식을 변경하여 바꾸었다. 즉, 피스톤 I의 냉각 방식은 spray jet cooling type이며, 피스톤 III의 냉각 방식은 gallery cooling type이다.

Fig. 7은 톱링 그루브 온도와 디포짓 형성량의 상관관계에 대한 엔진 실험 결과이다.

피스톤 I의 톱링 그루브 최대 온도는 280°C이고, 피스톤 III의 톱링 그루브 최대 온도는 230°C이다. 또한, 피스톤 I의 디포짓 형성비는 1.0이고, 피스톤 III의 디포짓 형성비는 0.4이다.

피스톤 I과 피스톤 III의 경우, 오일의 수트 함유량은 동일하므로, 디포짓 형성비의 차이는 톱링 그루브 온도 차이에 기인하는 것으로 판단할 수 있다. 즉, Fig. 6의 시뮬레이션 실험 결과에서 나타난 바와 같이, 피스톤 I의 톱링 그루브 온도가 피스톤 III에 비해 약 50°C 높기 때문에 디포짓 형성비의 차이가 발생한다.

또한, 피스톤 III의 경우, 톱링 그루브 온도가 낮음에도 불구하고, 디포짓 형성비는 높은 수준인데, 이는 Fig. 6의 시뮬레이션 실험 결과에서 나타난 바와 같이, 톱링 그루브 온도가 260°C 이하인 경우에도 오일의 수트 함유량이 높으면, 디포짓 형성량이 높기 때문이다. 그러나, 톱링 그루브의 최대 온도를 260°C 이하로 유지한다면, 카본 디포짓 과다에 의한 문제는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

### 3-4. 카본 디포짓 구조 및 경도 비교

Fig. 8은 엔진 시험에서 구한 톱링 그루브 카본 디포짓의 구조 및 경도를 측정된 결과이다.

마이크로 비커스 경도계를 이용하여 디포짓의 단면 경도를 측정된 결과를 보면, 톱링 그루브의 온도가 높고 오일의 수트 함유량이 높은 피스톤 I의 경도가 가장 높으며, 오일의 수트 함유량은 높지만 톱링 그루브 온도가 가장 낮은 피스톤 III의 경도가 가장 낮다.

또한, 저배율 입체 현미경(Stereoscopic microscope)으로 디포짓의 구조를 분석한 결과에 의하면, 피스톤 I은 미세하고 치밀한 구조(fine and compact structure)의 디포짓 침적 양상을 나타내지만, 피스톤 II는 균열이 있는 취성면의 적층 구조(brittle and layered structure)의 디포짓 침적 양상을, 피스톤 III은 큰 입자 구조(large granular structure)의 디포짓 침적 양상을 나타내어 외관상으로도 피스톤 I의 디포짓이 톱링 그루브에 단단하게 밀착되어 있음을 알 수 있다.

즉, 오일의 수트 함유량이 높고 톱링 그루브의 온도가 높은 피스톤 I의 디포짓은 경도가 높을 뿐만 아니라, 구조도 치밀하여 카본 디포짓 과다 형성시 링 고착 및 라이너의 마모를 유발시킬 것으로 판단된다. 그러나, 톱링 그루브의 온도가 높지만, 상대적으로 오일의 수트 함유량이 낮은 피스톤 II의 디포짓은 상대적으로 경도가 낮고, 쉽게 부서지기 쉬운 취성면의 적층 구조로 되어 있으므로, 디포짓이 과다 형성되

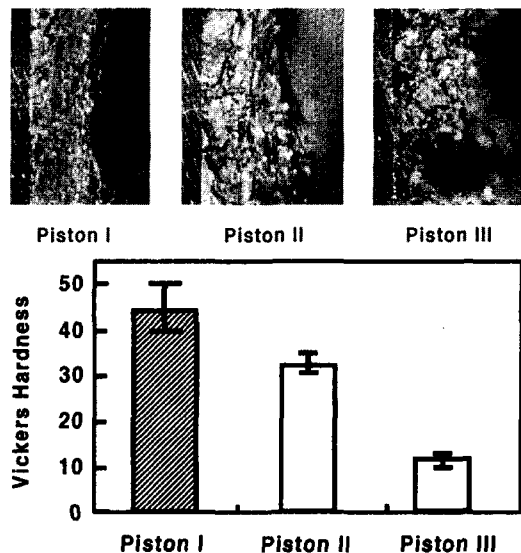


Fig. 8. Comparison of deposit structure and hardness.

라도 링 고착 등의 문제를 발생시키지 않을 것으로 판단된다.

디젤 엔진의 경우, 카본 디포짓 형성량은 오일의 수트 함유량이 낮은 경우에는 피스톤 온도의 영향을 크게 받지만, 오일의 수트 함유량이 높은 경우에는 톱링 그루브 온도 뿐만 아니라 오일의 수트 함유량에도 영향을 받는다. 또한, 오일의 수트 함유량이 높을 경우, 디포짓 과다 형성시 링 고착이나 라이너 과다 마모 등의 문제를 발생시킬 수 있다.

그러므로, 카본 디포짓 과다 형성에 의한 문제를 해결하기 위해서는 피스톤 톱링 그루브 온도를 일정 수준 이하로 유지시켜야 할 뿐만 아니라 오일의 수트 함유량도 일정 수준 이하로 유지하여야 한다.

#### 4. 결 론

카본 디포짓 형성 메커니즘을 규명하기 위하여 시뮬레이션 실험과 엔진 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 디포짓 형성량은 오일의 수트 함유량에 비선형적으로 비례하며 증가하는 경향을 보인다.
2. 톱링 그루브 온도가 증가하면, 디포짓 형성량은 증가하는 경향을 보인다. 특히, 피스톤 온도가 260°C 이상이 되면, 디포짓 형성량이 급격히 증가한다.
3. 오일의 수트 함유량이 높을 경우, 톱링 그루브에 퇴적되는 디포짓은 경도가 높고, 치밀한 구조를 형성하고 있으므로, 디포짓 과다 형성시 링 고착이나 라이너 과다 마모 등의 문제를 발생시킬 수 있다.
4. 디젤 엔진의 경우, 카본 디포짓 형성량은 오일의 수트 함유량이 낮은 경우에는 피스톤 온도의 영향을 크게 받지만, 오일의 수트 함유량이 높은 경우에는 톱링 그루브 온도 뿐만 아니라 오일의 수트 함유량에도 영향을 받는다.

#### 참 고 문 헌

1. Keller, G., Shimcoski, D. and Blatz, F., "Intake Valve Deposit Testing Using an Engine Dynamometer," Procedure, SAE paper 922261, 1992.
2. Cheng, S., "The Effects of Engine Oils on Intake Valve Deposits and Combustion Chamber Deposits," SAE paper 932810, 1993.
3. Lakatos, L. K., Jones, R. N. and Roby, S. H., "Modelling of ASTM Sequence IIIE Piston Ring Land Deposit Formation," SAE paper 922293, 1992.
4. Nomura, Y., Ohsawa, K. and Ishiguro, T., "Mechanism of Intake-Valve Deposit Formation. Part 2: Simulation Tests," SAE paper 900152, 1990.
5. McGeehan, J. A. and Fontana, B. J., "Effect of Soot on Piston Deposits and Crankcase Oils-Infrared Spectrometric Technique for Analyzing Soot," SAE paper 801368, 1980.
6. McGeehan, J. A., Fontana, B. J. and Kramer, J. D., "The Effects of Piston temperature and Fuel Sulfur on Diesel Engine Piston Deposits," SAE paper 821216, 1982.
7. Ripple, D. and Guzauskas, J., "Fuel Sulfur Effects on Diesel Engine Lubrication," SAE paper 902175, 1990.
8. Miyahara, M. and Watanabe, Y., "Investigation into Extending Diesel Engine Oil Drain Interval," SAE paper 912339, 1991.
9. Kim, J. S., "The Effect of Gasoline Engine Oil Degradation and Piston Temperature on Carbon Deposit Formation," Journal of KSTLE, Vol. 13, No. 4, 1997.
10. Inoue, K. and Yamanaka, Y., "Change in Performance of Engine Oils with Degradation," SAE paper 902122, 1990.
11. McGeehan, J. A., "Clean Diesel Exhaust but Sooty Engines : The Importance of the Crankcase oil," SAE paper 912342, 1991.
12. Dam, W. and Morris, J., "Diesel Engine Oil Dispersion Performance," SAE paper 941938, 1994.
13. Bardasz, E. A., "Understanding Soot Mediated Oil Thickening Through Designed Experimentation-Part 1: Mack EM6-287, GM 6.2L," SAE paper 952527, 1995.
14. Narita, K., "The Effects of Diesel Soot on Engine Oil Performance," Journal of Japanese Society of Tribologists, Vol. 42.

1. Keller, G., Shimcoski, D. and Blatz, F., "Intake Valve Deposit Testing Using an Engine Dynamometer,"