한국윤활학회지(1997), 제13권 제4호
Journal of KSTLE(1997) Vol. 13, No. 4, pp.33~39

엔진 오일 열화와 피스톤 온도가 카본 디포짓 형성에 미치는 영향
Part I-가솔린 엔진의 디포짓 형성 특성

김종수 · 민병순 · 이두순 · 오대윤 · 최재권

현대자동차(주) 중앙연구소

The Effect of Gasoline Engine Oil Degradation and Piston Temperature on Carbon Deposit Formation; Part I-Characteristics of deposit formation on gasoline engine

Jong-Soo Kim, Byung-Soon Min, Doo-Soon Lee, Dae-Yoon Oh and Jae-Kwon Choi

Hyundai Motor Co., Central Research Center

Abstract—In order to establish a new temperature criterion to prevent the pistons from ring sticking due to deposit formation, bench test and engine test were performed. The effects of oil degradation and temperature on deposit formation was studied by a modified panel coking test. Oil degradation was analyzed by FTIR. Oil oxidation and nitration were selected as a factors to evaluate oil degradation. Bench test results show that oil oxidation is more effective to the deposit formation than oil nitration. And the temperature increase accelerates deposit formation and deposit formation increase rapidly above 260°C. Especially, in case of degraded oil, the deposit formation increases so rapidly that ring sticking can occur. The effect of piston temperature on the deposit formation was confirmed by engine test.

Key words—deposit formation, oil degradation, top ring groove temperature, panel coking tester, oxidation, nitration.

1. 서 론

최근 엔진은 고출력화되는 추세이며, 배기 가스 저감을 위하여 톱링 그루브의 위치가 상승되는 경향이다. 이러한 경향에 의하여 톱링 그루브에 가해지는 온도 조건은 점점 더 가혹해지고 있다. 피스톤의 온도가 증가하면, 재질의 강도와 내마모성이 떨어지고, 알루미늄 응착이 발생하며, 카본 디포짓 형성량이 증가하는 문제점이 발생한다. 특히 톱링 그루브에 형성되는 카본 디포짓은 링 고착을 유발하여 오일 소모를 급증시키고, 엔진의 손상을 발생시킬 수 있다. 그러므로, 엔진의 내구성을 확보하기 위하여 피스톤 톱링 그루브의 온도를 일정 수준 이하로 유지해야 하는데, 기존의 많은 연구 결과들은 240°C를 그 한계치로 설정하고 있다.

그러나 최근 들어 윤활유 및 부품의 재질에 많은 개선이 이루어짐에 따라 톱링 그루브 한계 온도치를 새롭게 설정할 필요가 대두되고 있다. 본 논문에서는 톱링 그루브의 온도를 규제하는 여러 판단 기준들 중 카본 디포짓에 의한 링 고착 방지라는 관점에서 연구하여 허용 가능한 새로운 온도 한계치를 설정하고자 한다.

디포짓 형성에 대한 연구는 주로 오일의 산화 안정성을 높이거나, 엔진 오일의 첨가제 조성을 변화시켜 오일의 열화를 방지하여 디포짓을 감소시키는 방향으로 수행되었다[1-4]. 그러나 실엔진 시험에서의 디

포짓 측정은 시간과 비용이 많이 소모되고, 디포짓 형성에 대한 각 인자의 영향을 독립적으로 파악하기 어렵기 때문에 시뮬레이션 시험 방법들이 연구되어 왔다[3,4].

본 논문에서도 패널 코킹 테스트 장치를 본 연구 목적에 맞도록 수정 제작하여 디포짓 형성에 대한 오일 성분 및 온도의 영향에 대해 연구하였다. 특히 오일의 열화를 판정하는 요소로 산화도와 질화도를 선정하여 이들의 변화량과 디포짓 형성량의 상관 관계를 연구하였다. 또한 벤치 테스트에서 정성적으로 파악한 디포짓 형성에 대한 온도의 영향을 실엔진 시험을 통해 확인하여, 엔진 시험과의 상호 관련성을 증명하였다.

이러한 벤치 테스트 결과와 엔진 시험 결과를 바탕으로 카본 디포짓에 의한 문제가 발생하지 않는 피스톤 톱링 그루브의 한계 온도를 제시하고자 한다.

2. 시험 장치 및 방법

2-1. 벤치 테스트

Fig. 1은 카본 디포짓 형성에 미치는 각 인자들의 영향을 관찰하기 위하여 제작한 벤치 테스트 장치이다.

오일 누설 장치를 통하여 오일이 공급되면, 공급된 오일은 전기 히터로 온도를 조절할 수 있는 시편 위를 흐르면서 디포짓을 형성한다. 디포짓 형성 조건을 실엔진과 유사하게 하기 위하여 챔버내의 온도도 전기 히터를 이용하여 조절하였다. 여기서, 시편 온도는 피스톤 톱링 그루브의 온도와 상사시켰고, 챔버 온도는 피스톤 톱링 그루브 주위를 흐르는 연소 가스의 온도와 상사시켰다. 디포짓 형성량은 시험 전후의 시편의 질량 차이를 측정하여 결정했다. Table 1은 벤치 테스트의 주요 시험 조건이다.

Table 1. Conditions of bench test

Oil leakage rate	1 g/hr
Atmospheric temperature	200°C
Inclined angle (θ)	4°
Panel Temperature	220~300°C
Elapsed time	20 hrs

2-2. 엔진 시험

벤치 테스트와 엔진 시험의 상관성을 확인하기 위하여 실엔진에서 피스톤 온도 측정 시험과 디포짓 형성 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 엔진은 LPG를 연료로 사용하는 spark ignition 엔진이다. Table 2는 엔진의 주요 제원을 나타낸 것이며, Fig. 2는 피스톤의 단면 형상과 온도 측정 위치이다.

피스톤의 정상 상태 온도는 K-type 열전대를 이용하여 측정하였으며, 신호선을 엔진 외부로 인출하기 위하여 Fig. 3에 나타낸 가위형 링키지 장치를 사용하였다.

피스톤의 온도를 측정하여 톱링 그루브의 온도가 최대가 되는 조건을 선정하여 디포짓 형성 시험을 하였다. 디포짓 형성량은 엔진 운전후, 피스톤의 단면을

Table 2. Specification of test engine

Engine type	Spark ignition
Displacement (cc)	2351
Compression ratio	8.6
Bore × Stroke (mm)	86.5 × 100
Lubricant	SH 7.5W30
Fuel	LPG

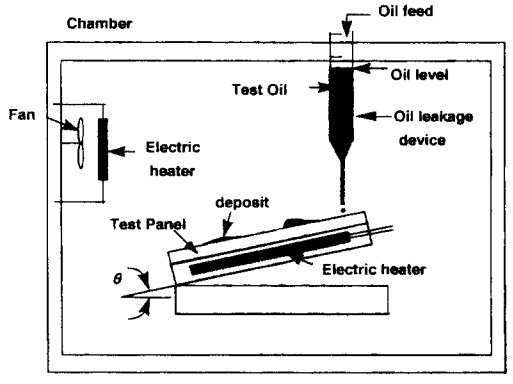

Fig. 1. Schematic diagrams of bench tester.

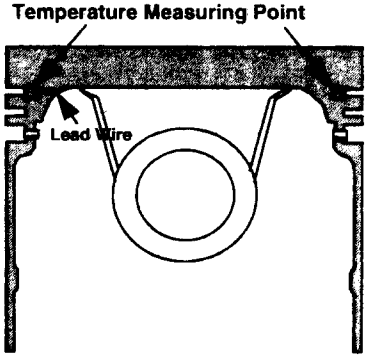

Fig. 2. Crosssection of tested pistons.

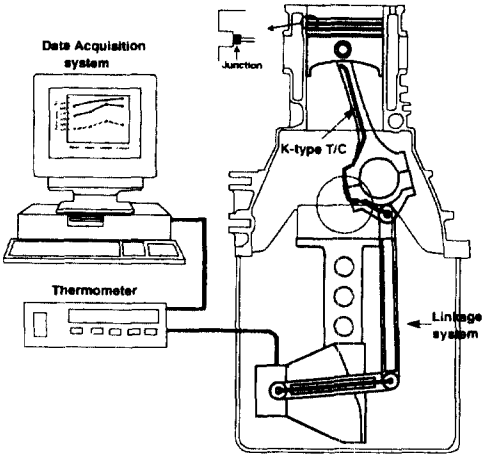

Fig. 3. Schematics of piston temperature measurement system.

절개하여 톱링 그루브에 퇴적된 디포짓의 두께를 측정하여 정량화 시켰다.

2-3. 엔진 오일의 성분 분석

오일의 열화도를 판단하기 위하여 FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)과 ON-SITE Analyzer를 이용하여 엔진 오일의 성분을 분석하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3-1. 오일 열화의 영향

3-1-1. 오일 열화도 분석

엔진 오일은 운전중 열과 산소에 의한 산화, 첨가제 효과의 감소, 그리고 블로우 바이 가스에 의한 질화 등에 의하여 열화된다. 이러한 오일의 열화 요소를 판단할 수 있는 인자를 선정하기 위하여 사용유에 대한 성분 분석을 하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Table 3은 시험 오일들의 내구 이력이다. 오일의 성분 분석은 FTIR 기법을 사용하였다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 실제 엔진 및 차량에서 샘플링한 오일 B, C, D는 산화와 질화가 동시에 진행되고 있으며, 오일의 열화가 심할수록 산화도 및 질화도가 증가하는 경향을 보인다.

본 연구에서는 FTIR의 샘플 두께가 동일하므로 산화도 및 질화도를 다음과 같이 신유에 대한 샘플링 오일의 IR 흡수율(Infrared absorbance)의 차이인 DIR (Differential InfraRed)로만 정의하였다.

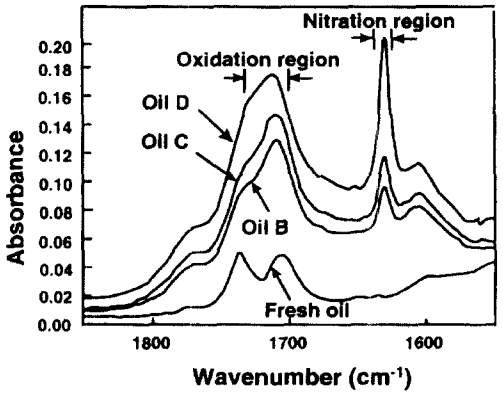

Fig. 4. IR Spectrum of degraded oils.

Table 3. Test mode and DIR of tested oils

	Test mode	DIR)oxi	DIR)nit
A	Fresh oil		
B	catalyst aging 100hrs.	0.080	0.066
C	catalyst aging 150hrs.	0.097	0.087
D	15000km car running	0.123	0.168

$$DIR_{oxidation} = Max(absorbance)_{sample} - Max(absorbance)_{fresh\ oil}$$

$1700 < wavenumber < 1730$

$$DIR_{nitration} = Max(absorbance)_{sample} - Max(absorbance)_{fresh\ oil}$$

$1625 < wavenumber < 1635$

Fig. 5는 엔진 운전 조건에 따른 오일의 열화 경향이다. 전부하 연속 내구 시험 조건에서 샘플링한 오일은 산화도가 높게 나타나며, 차량 시험에서 샘플링한 오일은 상대적으로 질화도가 높게 나타난다. 이 결과로부터 전부하 연속 내구 조건에서는 열에 의한 산화가 오일 열화의 주요 인자이며, 차량 시험에서는 블로우 바이 가스에 의한 질화가 오일 열화의 주요 인자임을 알 수 있다. 또한, 엔진 오일의 내구 한계는 엔진 운전 모드에 따라 다르지만 대체적으로 산화도가 0.1 이하, 질화도가 0.1 이하인 경우이다.

이러한 성분 분석 결과를 바탕으로 오일의 산화도와 질화도를 오일 열화를 판정할 수 있는 요소로 선정하고, 이들의 변화가 디포짓 형성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

3-1-2. 오일 산화도의 영향

디포짓 형성에 대한 오일의 열화 요소중 산화도의

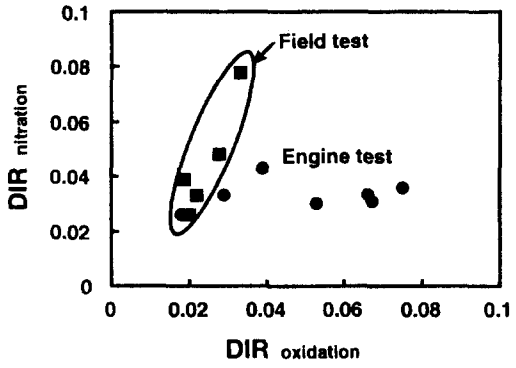

Fig. 5. DIR of degraded engine oils.

영향만 독립적으로 관찰하기 위하여 오일을 고온으로 일정 시간동안 가열하여 강제 산화(bulk oxidation) 시켰다. Table 4와 Fig. 6은 강제 산화 시킨 오일 E, F, G의 성분 분석 결과이다. 이 그래프에서 볼 수 있듯이 강제 산화시킨 오일은 질화도는 거의 증가하지 않고 산화도만 증가한다.

Fig. 7은 오일 E, F, G를 사용하여 오일의 산화도에 따른 디포짓 형성량을 측정한 결과이다. Fig. 7로부터 강제 산화시킨 오일의 디포짓 형성량은 오일의 산화도에 거의 일정하게 비례하는 경향(R^2=0.99)을 보임을 알 수 있다.

고온 디포짓은 오일의 산화 생성물의 중축합 반응

Table 4. Test mode and DIR of bulk oxidation oils

	Test mode	DIR)oxi	DIR)nit
A	Fresh oil		
E	280°C 5 hrs.	0.011	0.005
F	240°C 20 hrs.	0.051	0.013
G	280°C 20 hrs.	0.079	0.020

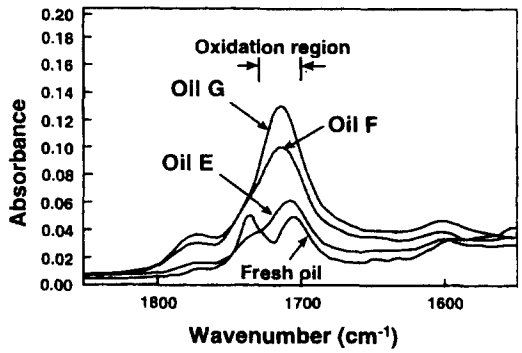

Fig. 6. IR Spectrum of bulk oxidation oils.

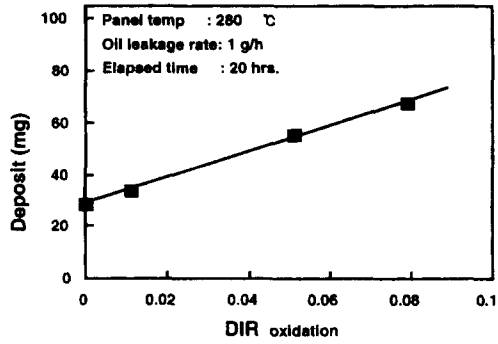

Fig. 7. Effect of oxidation on deposit formation.

을 통한 폴리머에 의해 형성되는 메카니즘을 가진다 [2,5]. 그러므로 오일내의 산화 생성물의 농도가 높을수록 디포짓을 형성할 가능성이 높아진다. 즉, 오일의 산화도에 비례하며 디포짓 형성량은 증가하게 된다.

3-1-3. 오일 질화도의 영향

디포짓 형성량에 대한 오일 질화도의 영향을 파악하기 위하여 산화도는 동일하지만, 질화도는 다른 오일을 이용하여 디포짓 형성 시험을 하였다. 시험에 사용된 오일은 15,000 km 주행한 실차에서 샘플링한 오일 H와, 이 오일을 각각 일정한 온도로 20분 동안 가열한 오일 I, 오일 J, 오일 K이다. Table 5와 Fig. 8은 오일 H, I, J, K에 대한 내구 이력 및 성분 분석 결과이다. Fig. 8의 성분 분석 결과에서 알 수 있듯이, 오일 H, I, J, K는 질화도는 다르지만 산화도는 거의 같다.

Fig. 9는 오일 H, I, J, K를 사용하여 오일의 질화도에 따른 디포짓 형성량을 측정한 결과이다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 디포짓 형성량은 DIR로 표시되는 오일의 질화도에 선형적으로 비례하며 증가하지만, 디포짓 형성에 대한 기여도는 산화도 증가에 의한 영향보다 낮게 나타난다.

오일의 질화도를 결정하는 $RONO_2$ (R:alkyl 기)는 저온에서는 비교적 안정된 상태로 오일중에 존재한다. 그러나 가열되면 $RONO_2$는 불안정해져서 일산화질소(NO)와 이산화질소(NO_2)로 유리되고, 오일내의 이산화질소 농도가 감소하므로 오일의 질화도는 감소

Table 5. DIR of nitrated oils

	Heating condition	DIR)oxi.	DIR)nit.
H		0.123	0.168
I	120°C 20 min	0.124	0.110
J	150°C 20 min	0.127	0.095
K	280°C 20 min	0.123	0.053

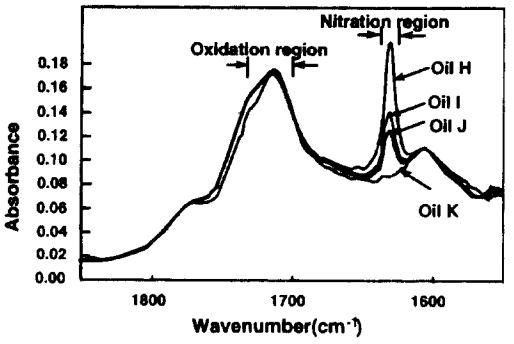

Fig. 8. IR spectrum of nitrated oils.

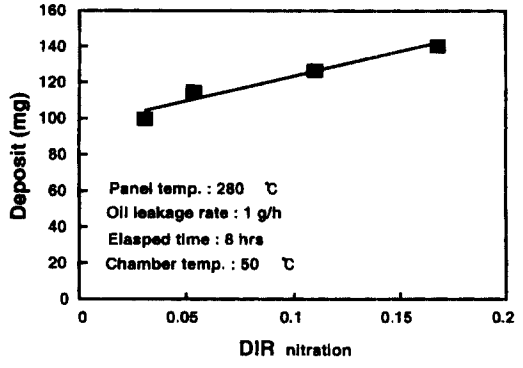

Fig. 9. Effect of nitration on deposit formation.

한다[6]. 즉, 실엔진에서 디포짓이 형성되는 조건에서는 오일내의 질화 성분이 급격히 감소하게 되므로 디포짓 형성에 대한 영향이 산화도보다 낮게 나타난다.

3-2. 시편 온도의 영향

Fig. 10은 디포짓 형성에 대한 시편 온도의 영향을 파악하기 위하여 시편 온도를 220℃~300℃로 변화시키면서 그에 따른 디포짓 형성량을 측정한 결과이다.

신유의 경우, 시편의 표면 온도가 220℃인 경우에는 미량의 성분이 산화되어 디포짓을 생성하기도 하지만, 대부분은 증발되거나 흘러내리기 때문에 디포짓은 거의 생성되지 않는다. 그러나, 시편 온도가 240℃~260℃인 경우에는 온도의 증가에 따라 디포짓 형성량이 서서히 증가하며, 시편 온도가 260℃를 넘으면서 디포짓 형성량이 급격히 증가하기 시작한다.

열화가 어느 정도 진행된 오일의 온도에 따른 디포짓 형성 경향은 신유와 비슷하지만, 열화유의 디포짓 형성량은 신유에 비해 많으며, 열화도가 높을수록 이러한 현상은 더욱 현저해진다.

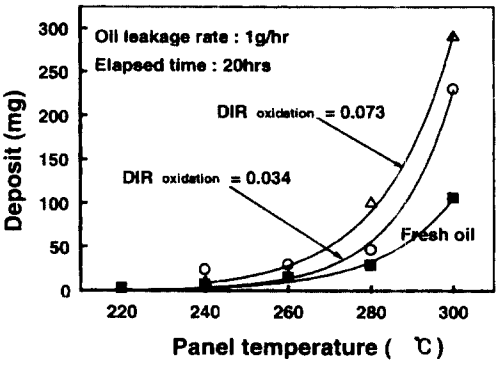

Fig. 10. Effect of panel temperature on deposit formation.

이 결과를 통해 실제 엔진 상태에서도 톱링 그루브의 온도가 260℃ 이상이 되면 디포짓 형성량이 급증하여 카본 디포짓에 의한 링고착이 발생할 가능성도 높아진다는 것을 알 수 있다. 특히, 오일의 열화가 심하고 피스톤의 온도가 높을 수록 디포짓에 의한 링 고착 문제가 발생할 가능성은 높아진다.

3-3. 오일 성분 변화의 영향

오일의 성분 변화가 디포짓 형성에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 오일의 첨가제 조합을 변화시켜 산화 안정성을 높인 오일을 제작하였다. Table 6은 SH 7.5W30 오일과 개선유의 성분을 비교한 결과이다.

Fig. 11은 온도에 따른 개선유의 디포짓 형성 특성 시험 결과이다. 시편 온도가 260℃ 이하인 경우에는 디포짓 형성량이 기존 오일과 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 온도가 260℃ 이상인 고온 영역에서는 개선유의 디포짓 형성량이 기존 오일에 비해 현저히 낮음을 알 수 있다.

Table 6. Comparison of oil components

		Conventional oil	Improved oil
Base oil		API I	API III
TBN (mgKOH/g)		6.21	7.33
Volitility (NOACK)		18%	8%
additive	Ca phenate	minor	major
	Dispersant	major	minor
Metal concentration (ppm)	Ca	470	1720
	Mg	380	220
	P	1120	910
	Zn	1260	890

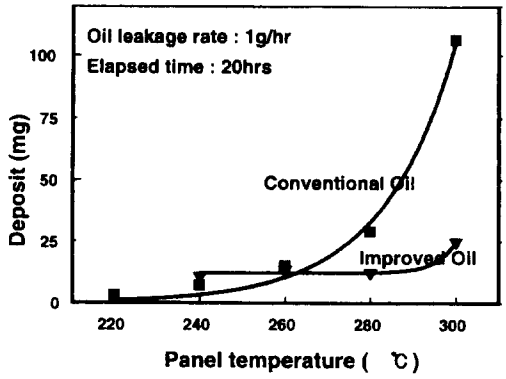

Fig. 11. Effect of oil component variation on deposit formation.

이는 Ca phenate 등 첨가제 성분이 고온에서 오일의 산화 안정성을 높이기 때문이다. 따라서 첨가제 조합의 최적화를 통하여 카본 디포짓에 의한 링 고착을 방지할 수 있고 그에 따라 피스톤의 허용 한계 온도도 높일 수 있다.

3-4. 엔진 시험 결과

벤치 테스트를 통해 정성적으로 파악한 디포짓 형성에 대한 피스톤 온도의 영향을 실엔진 시험을 통해 확인하였다. Table 7은 실엔진에서의 디포짓 형성량 측정 시험 조건이다.

3-4-1. 피스톤 온도의 영향

Fig. 12는 서로 다른 온도 조건에서 운전한 피스톤 톱링 그루브의 온도와 디포짓 형성량 측정 결과이다. 여기서 디포짓 형성비(deposit ratio)는 톱링 그루브의 배면 간극(back clearance)에 대한 퇴적된 디포짓 두께의 비로 정의했다.

$$deposit\ ratio = \frac{thickness\ of\ deposit}{back\ clearance\ of\ ring\ groove}$$

Piston I의 톱링 그루브 온도는 280°C이고, piston II의 톱링 그루브 온도는 260°C로 약 20°C 정도 차이가 있다. 그러나 piston I은 디포짓 형성비가 1로 카본 디포짓에 의한 링 고착이 우려되는 수준이지만, piston II는 디포짓 형성비가 거의 0으로 디포짓 형성량이 없음을 알 수 있다.

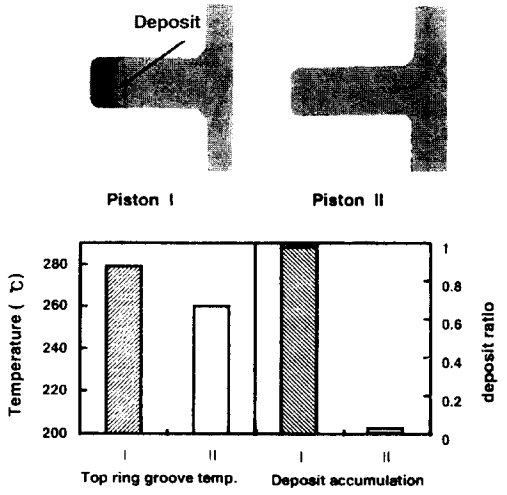

Fig. 12. Effect of piston temperature on deposit formation in engine test.

이 결과는 260°C 이상에서 디포짓 형성량이 급격히 증가한다는 벤치 테스트에서의 결과와 일치하는 경향이다.

따라서 카본 디포짓에 의한 링고착 문제를 발생시키지 않으면서 엔진을 안정적으로 운전하기 위해서는 톱링 그루브의 온도를 260°C 이하로 유지시켜야 한다.

3-4-2. 오일 성분 변화의 영향

Fig. 13은 오일 성분 변화의 영향에 대한 엔진 시험 결과이다.

피스톤 III과 피스톤 I의 톱링 그루브 온도는 동일하지만 디포짓 형성량은 큰 차이를 보인다. 이는 벤치 테스트에서 확인한 바와 같은 결과로 피스톤의 온도가 허용 한계치를 넘더라도 오일의 성분과 첨가제를 변화시켜 오일의 산화 안정성을 높이면 디포짓 과다 생성에 의한 링 고착 문제를 방지할 수 있다는 것을 의미한다.

Table 7. Conditions of engine test

Piston	Test condition	elapsed time	Tested oil
I	4000~5000 rpm	50 hrs	conventional
II	4000~5000 rpm	100 hrs	conventional
III	4000~5000 rpm	100 hrs.	improved

4. 결 론

카본 디포짓에 의한 링고착이 발생하지 않는 피스톤 톱링 그루브의 온도 한계를 연구하기 위하여, 벤치 테스트와 실엔진 테스트를 수행했으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 오일이 열화되면 디포짓 형성량이 증가하며, 디

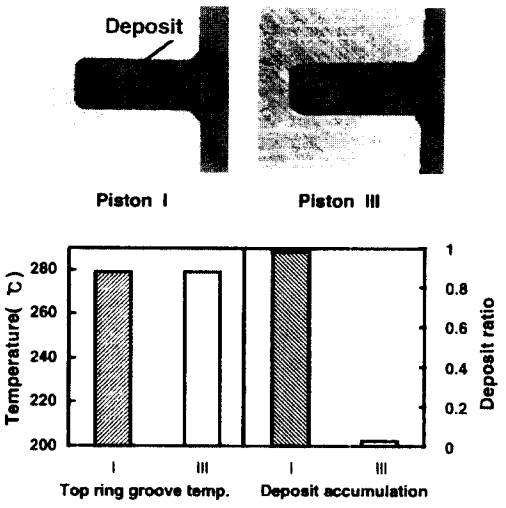

Fig. 13. Effect of oil component variation on deposit formation in engine test.

포짓 형성량은 DIR로 표현되는 산화도 및 질화도에 선형적으로 비례한다. 특히 오일의 산화도가 질화도에 비해 디포짓 형성량에 지배적인 영향을 미친다.

2. 벤치 테스트의 결과에 의하면, 시편 온도가 260°C 이하인 경우에는 디포짓 형성량이 서서히 증가하지만, 시편 온도가 260°C 이상이 되면 급격히 증가하기 시작한다. 특히 열화유의 경우는 신유에 비해 디포짓 형성량이 많으며, 열화도가 높을수록 이러한 경향은 현저해진다.

3. 피스톤 톱링 그루브의 온도가 260°C 이상이 되면 카본 디포짓 형성량이 급격히 증가함을 실엔진 시험을 통해 확인하였다.

4. 오일의 첨가제 성분을 변화시켜 산화 안정성을 높이면, 톱링 그루브 온도가 고온인 경우에도 디포짓 형성량을 감소시킬 수 있음을 벤치 테스트 및 엔진 테스트를 통해 확인하였다.

참 고 문 헌

1. P. Sutor, E.A. Bardasz and W. Bryzik, "Improvement of High-Temperature Diesel Engine Lubricants," SAE paper 900687, 1990
2. Y. Nomura, K. Ohsawa and T. Ishiguro, "Mechanism of Intake-Valve Deposit Formation. Part 2: Simulation Tests," SAE paper 900152, 1990
3. L.K. Lakatos, R.N. Jones and S.H. Roby, "Modelling of ASTM Sequence IIIE Piston Ring Land Deposit Formation," SAE paper 922293, 1992
4. K. Akiyama, F. Ueda and M. Okada, "Effect of Gasoline Engine Oil Components on Intake Valve Deposit," SAE paper 932792, 1992
5. W. Nahumck, C. Hyndman and S. Cryvoff, "Develpoment of the PV-2 Engine Deposit and Wear Test-An ASTM Task Force Progress Report," SAE paper 872123, 1987
6. Y. Murakami and H. Aihara, "Effects of NOx and Unburned Gasoline on Low Temperature Sludge Formation in Engine Oil," SAE paper 910747, 1991