

자동차 엔진오일의 마찰특성에 관한 연구

A Study of Friction Properties of the Automotive Engine Oils

강 석 춘*, 김 종 호**, 정 근 우**, 조 원 호**
 S. C. Kang, J. H. Kim, G. W. Jeong, W. H. Cho

ABSTRACT

Engine oil of the vehicle is very important to reduce friction and wear of the moving parts as long as possible without deterioration. As the technique of engine design and manufacturing improves, the performance of engine was increased greatly with the improvement of the quality of engine oil.

All the additives and formulations skill of engine oil produced in our country are imported from foreign country. So it is necessary to study the basic knowledge of the mechanism of friction and wear of engine oil for the development of our own formula and additives.

From this research, the basic mechanism of tribology and the change of oil properties were studied with a home made oil and two foreign oils by bench and engine test and laboratory works.

1. 서 론

자동차용 엔진 오일은 엔진 작동을 원활하게 해주고 각종 마찰부품의 마모를 억제해주며 오일의 물성 변화가 가급적 적으므로써 오일의 사용 수명이 충분히 길어야 한다. 따라서 이 모든 요구조건에 부합하면서도 경제성을 갖는 오일을 개발하기 위하여 윤활유 제조분야, 첨가제 제조 및 자동차 생산분야에서 꾸준한 연구개발을 시도해오고 있다.

본 연구에서는 첨가제 개발의 측면에서 새로 합성된 첨가제를 기유와 혼합하여 최근 (1988년)에 설정된 SG급 윤활유로 만드는 과정의 일부로써 벤치 시험과 엔진 시험을 병

합하면서 Tribology에 관련된 제반 사항을 연구, 조사 및 분석, 평가하고자 하였다.

먼저 상업용 오일 A, B와 국내 연구소에서 제조한 오일 C를 4-ball 시험에 의해 마찰면의 표면분석, 마모량, 마찰계수 등의 변화를 비교 측정하였고 엔진시험에서는 매 10시간 마다 오일을 샘플링한 후 물성변화, 4-ball 시험, 마모입자 및 농도분석을 하였다.

또 50시간 시험후 con-rod bearing의 마모량과 표면조도 분석 및 피스톤링의 마모량을 측정, 분석하였고 각 윤활유의 성능에 관한 비교와 엔진작동에서의 베어링과 링의 마모 관계를 조사하여 전반적인 윤활유와 엔진작동에 관련된 Tribology 분야의 연구를 실시하였다.

* 정희원, 공군사관학교 교수부

** 한국화학연구소, 공업화학연구소

2. 시험 윤활유와 재료

연구에 사용된 오일의 성분 분석에서 나타난 윤활유의 자료를 정리하면 아래와 같다.

4-ball 시험에서 사용한 볼 베어링의 재료는 AISI 52100으로 SKF 사에서 제작된 표준 베어링을 사용하였다. 또 자동차 엔진 베어링은 Cu-Pb 계열로써 윤활유 성능 실험에서 사용되는 재료와 같이 제작하여 시험하였고 피스톤링의 경우 1번링은 열처리후에 도금한 것으로 하고 2번링은 열처리만 한것을 사용하였다.

3. 시험기 및 시험방법

본 시험에서 사용된 마찰 및 마모 시험기로는 Cameron-Plint 사의 4-ball 시험기를 이용하였고 시험방법은 ASTM-D 2266 으로서 다음과 같은 조건을 갖는다.

윤활유온도: $75 \pm 1^\circ\text{C}$

회 전 수: $1200 \pm 5\text{rpm}$

시험 시간: 60분

시험 하중: 40 kg

엔진시험에는 현대자동차에서 제작된 Pony II용 1400cc 급의 새 엔진으로 30시간 길들이기를 한후 부터 시험에 이용되었다.

시험엔진 작동 조건은 다음과 같다.

엔진회전수: 2000 rpm

토크 크: 40 N-m

냉각수온도: $80 \pm 5^\circ\text{C}$

시험 시간: 총 540 시간

오일팬의 오일온도: $100 \pm 10^\circ\text{C}$

윤활유샘플채취: 매 10시간 시험후 50cc

총 시험소요일수: 매 오일의 경우 5일간 (50시간)

이상과 같은 조건으로 각 오일에 대해 엔진 시험을 한후 오일분석 및 베어링과 피스톤링의 마모 등을 조사 분석하였다.

마모량 측정은 엔진을 완전 분해하여 베어링과 링의 무게를 저울(10^{-4}g)에 의해 측정하였고 다음 시험을 위해서 새 베어링으로 교체하여 조립하였다.

Con-rad 베어링은 표준 베어링과 Cu-Pb 계열을 사용하였고 각 재료의 구성 성분은 다

표 1 시험오일의 성질 (Properties)

Oil sample Content (s)	A 10W-40, SG/CD	B 10W-30, SG/CC	C 15W-40, SG/CC
Viscosity, Kinematic, c St			
100°C	14.43	10.80	14.54
40°C	98.69	70.57	110.0
Viscosity Index	141	143	135
Pour Point, °C	-35		-30.0
Flash Point, °C	208		218
Foam	10/30/10		0/30/0
Foam Stability	0/0/0		0/0/0
Demulsibility	2/0/78(60)		1/0/79(60)
TAN	2.24	1.81	2.88
TBN	6.97		7.35
Metallic Component			
Ca (%)	0.13	0.088	0.17
Mg (%)	49(ppm)	0.078	66.5(ppm)
Zn (%)	0.14	0.11	0.16

음과 같다.

구분	성분	Cu	Pb	Sn	Al
표준베어링		1.0% 이하	-	17.5~22.5%	Bal
Cu-Pb베어링		Bal	23~27%	1.0% 이하	-

의 마모량에 관해 비교한 것으로서 1번 시린더에 부착된 표준 베어링의 마모량이 4번 시린더에 부착된 Cu-Pb 베어링보다 마모량이

4. 시험결과와 해석

4.1 베어링의 마모와 표면현상의 변화

시험에 사용된 Cu-Pb 계열의 베어링과 표준 엔진베어링(상업용)의 마모량에 대한 비교를 하여 보았다.

그림 1은 엔진 작동시간에 따른 1번째와 4번째 시린더에 장착된 윗쪽의 절반 베어링

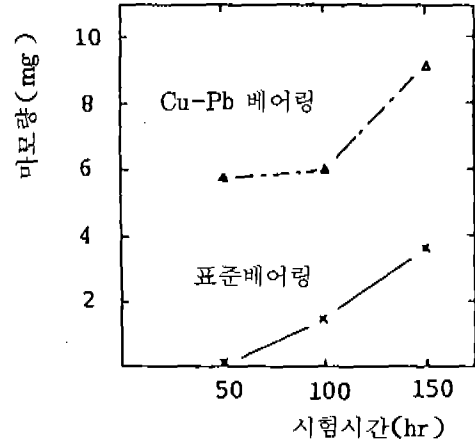


그림 1 시험시간에 따른 베어링 마모의 비교

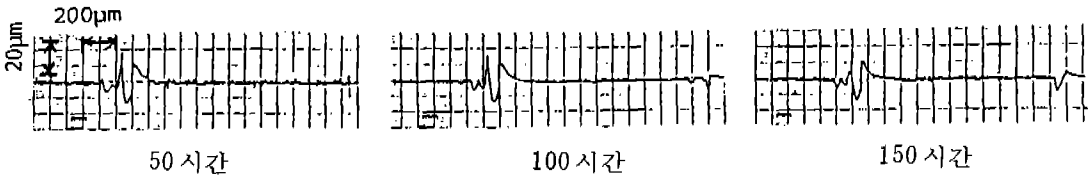


그림 2 시험시간에 따른 Cu-Pb 베어링의 형상 변화

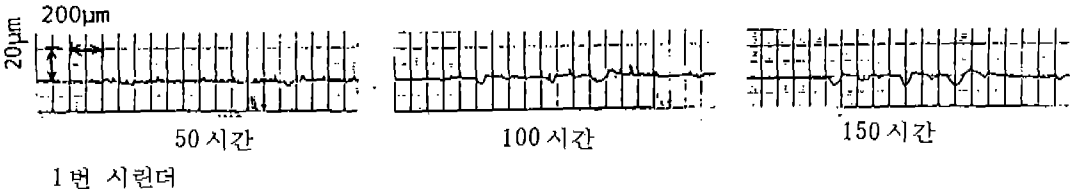


그림 3 시험시간에 따른 표준 베어링의 형상 변화

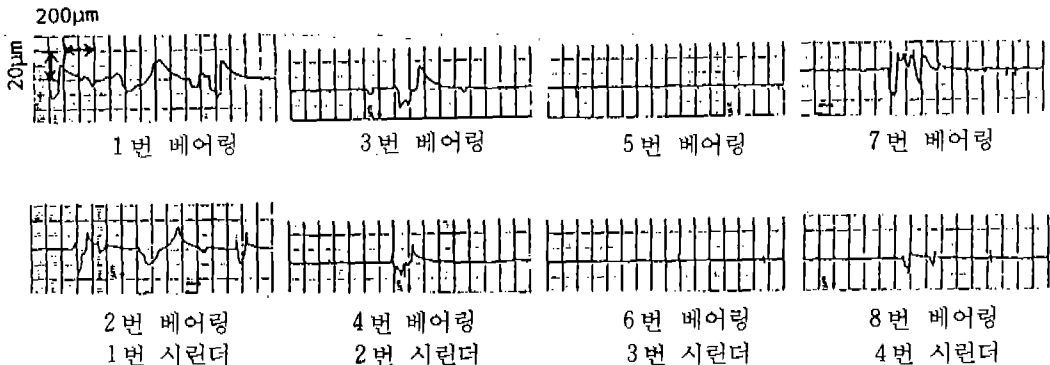


그림 4 300 시간 시험후 각 시린더의 베어링 형상 비교

상당히 적게 나타났고 엔진 작동에 따라 같은 비로 점차 증가하는 경향을 보여주고 있어 표준 베어링의 내 마모성이 우수함을 알 수 있다.

그림 2와 3은 베어링의 중간 위치에 대한 표면 현상의 변화에 관한 것으로서 1번 시린더의 경우 급격한 마모 증가의 흔적을 보이고 있지만 4번 시린더의 베어링은 처음에 생긴 마모 흔적의 모양이 계속 유지되고 있으므로 초기에 크랭크 축에 손상이 가해진 것이 새 베어링으로 교환하였을 경우에도 마모에 많은 영향을 미침을 알 수 있다.

그림 4는 300시간(6번째)을 엔진 시험한 후에 나타난 각 시린더의 베어링 표면 손상에 관한 비교를 위하여 표면 형상을 나타낸 것이다. 1번 2번 베어링은 다이노미터(동력계)를 향한 방향에서 첫번째 시린더에 부착되었던 1조의 베어링과 나머지는 연속해서 엔진의 팬이 부착된 쪽으로 3~8번이 되도록 배열한 것이다. 그림에서 1번, 2번 및 4번 시린더에 부착되었던 1, 2, 3, 4, 7, 8 번의 마모손상이 비교적 크고 특히 1번 시린더에 부착된 1, 2번 베어링의 표면 손상이 가장 심한 것으로 나타났다. 또 위쪽 베어링의 마모손상은 항상 아래쪽 보다 심하였으며 심하게 파인 부분은 상하 대칭을 이루므로써 크랭크 축에 생성된 손상의 영향이 베어링의 교환에 관계없이 계속 영향을 주고있고 중간 부분에서 크랭크축의 부하가 가장 적음을 보여준다.

그림 5는 각 베어링의 마모량의 비교를 나타낸 것으로써 그림 4와 상당히 연계되어 있음을 보여주며 상부 베어링의 마모량이 항상

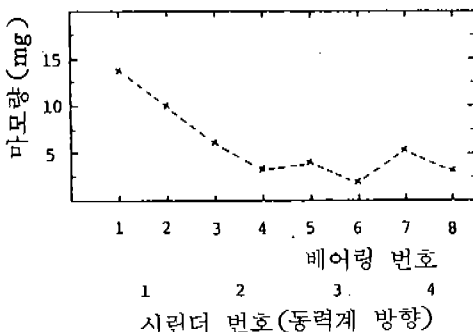


그림 5 각 시린더에 대한 베어링의 마모량비교

하부것보다 큼을 다시 확인하여 주고 있다.

따라서 새 엔진의 길들이기(break-in) 과정이 매우 중요하고 특히 동력전달 부분쪽의 베어링 손상이 심하므로써 과부하를 조심할 필요가 있음을 보여주며 가급적 고급 오일이나 저속, 저하중으로 길들이기가 끝날때까지 운전할 필요성을 제시하고 있다.

4.2 Oil 종류에 따른 con-rod 베어링과 피스톤 압축 ring의 마모

엔진오일 A, B, C를 엔진에 3.8ℓ씩 정확히 넣고 50시간의 시험을 한 후에 베어링과 피스톤링의 마모량을 측정하였다.

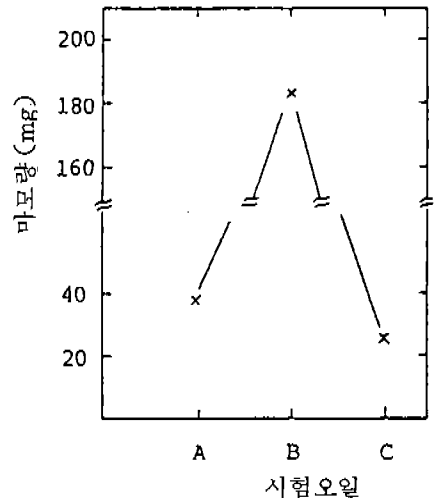


그림 6 각 오일에 대한 con-rod 베어링 마모량 비교

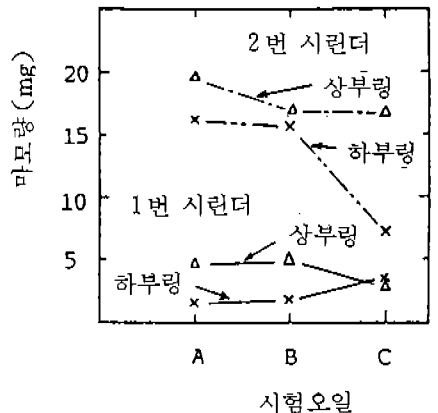


그림 7 각 오일에 대한 피스톤 링의 마모량 비교

그림 6에서는 8 개 베어링 전체의 마모량에 관한 비교로써 오일 B가 가장 많은 마모 현상을, 그리고 오일 C가 가장 적게 마모된 것을 보여준다. 특히 오일 B의 마모량은 다른 오일에 비해 마모가 4~6 배 가량 더 일어났으므로 베어링의 마모 억제 능력이 매우 부족한 것을 알 수 있다.

그림 7은 피스톤 링의 마모에 관한 것으로써 1번 시린더의 경우 압축링중에서 상부의 링이 A, B 오일의 경우에 하부쪽 링보다 더 많이 마모되었으나 오일 C는 큰 차이가 없었다. 그러나 2번째 시린더의 경우는 모두 상부 링이 많이 마모되었고 특히 C 오일의 경우에는 하부링의 마모량이 비교적 작았으나 전반적으로 2번 시린더의 피스톤 링은 1번 시린더보다 3~4배 더 많이 마모되었다.

따라서 각 시린더에 따른 피스톤 링과 con-rod 베어링의 마모 경향은 서로 다르다. 즉 피스톤 링은 1번 보다 2번 시린더가 더 많이 마모되는 반면 con-rod 베어링은 1번 시린더가 2번 시린더보다 더 많이 마모되는 경향을 보여 주고 있다. 그림 8과 9는 매 10 시간마다 엔진 시험과정 중에서 채취한 오일에 대한 금속 Cu 와 Fe 의 함유 농도를 Atomic Emission Spectroscopy 로 분석한 결과를 나타낸 것이다. 그림 8에서는 오일 B의 경우 구리농도가 가장 높게 나타나 있고 오일 A와 C는 크게 차이가 없다. 또 초기 10 시간 작동 후에는 오일 C의 농도가 높았으나 그 다음부터는 오일 A가 더 커졌음을 알 수 있다.

그림 9에서는 철의 성분이 오일 C에 가장 많이 포함되어 있고 오일 B가 그 다음이며 오일 A가 전 과정에서 가장 적게 포함되어 있다. 이들 결과와 그림 6 과 7에서 나타난 마모 관계의 결과를 연관시키면 엔진오일은 마찰금속의 종류에 따라 마모의 정도가 서로 다를 수 있다. 즉 오일 B는 Cu계열 베어링의 마모가 가장 많이 일어나므로써 오일 속 에 많은 농도가 함유되어 있으나 오일 C는 Cu 계열은 중간 정도 이지만 Fe 의 마모가 가장 적은 것으로 나타났다. 따라서 각각의

오일에 대한 마모특성은 마찰 금속에 따라 매우 다를 수 있음을 보여 준다.

4.3 사용한 오일에 대한 마찰 마모 특성의 비교

새 오일과 함께 엔진시험을 10시간, 30시간

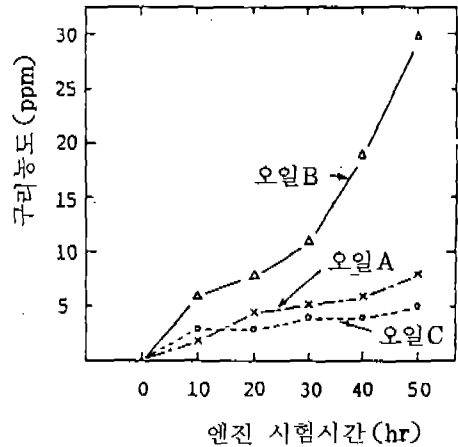


그림 8 엔진 시험시간에 따른 오일의 구리농도 비교

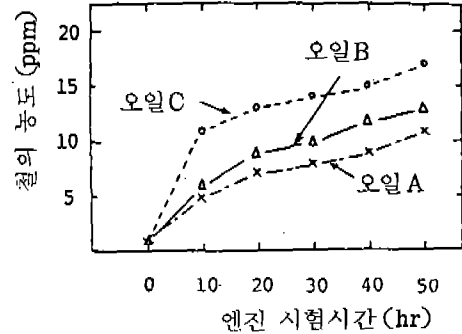


그림 9 엔진 시험시간에 따른 오일의 철농도 비교

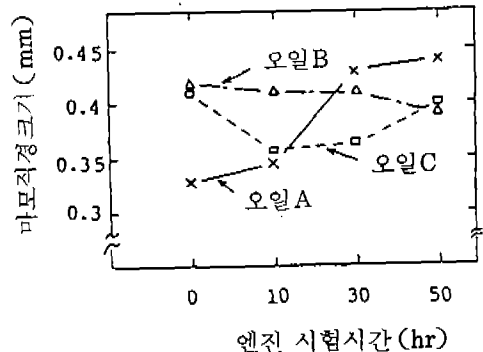


그림 10 각 오일의 엔진 시험시간에 따른 4-ball

간, 50시간씩 한 오일에 대해 4-ball 시험기로 마찰, 마모시험을 하여 윤활 특성의 변화를 조사하였다. 그림 10은 A, B, C 오일에 대한 4-ball 마모시험의 결과를 마모 직경의 크기로 비교한 것으로서 새 오일의 경우에는 마모직경이 오일 A의 경우에 가장 적었고 C가 가장 크게 나타났지만 사용한 오일의 경우에는 엔진작동 시간이 증가함에 따라 오일 A는 점점 증가하였으나 오일 B는 크게 변하지 않았으며 C는 급격히 감소하다가 다시 서서히 증가하는 경향을 보여 주었다. 따라서 오일의 마모 특성은 엔진 작동중에 변하고 있으며 따라서 내 마모성이 증가하는 경향을 보여주는 오일이 있으므로 새 오일에 의한 마모 특성의 분석으로는 충분히 비교할 수 없음을 알 수 있다.

그림 11-a는 4-ball 시험기에 의한 오일 A의 마찰 시간에 따른 마찰력의 변화를 나타낸 것이다. 새 오일은 마찰계수가 일정하게 낮았지만 사용 시간에 따라 마찰계수의 전이 현상이 생기며 전이되는 시간이 사용시간의 증가에 따라 점차 빨라지므로써 내 마모성의 저하와 함께 마찰계수와 마모량이 많아지고 있음을 의미하고 있다. (그림 10 참조)

그림 11-b는 오일 B의 경우에 대한 마찰계수의 변화 특성으로써 새 오일의 경우에 마찰계수의 전이현상이 나타나고 사용 오일의 경우에는 전이 시작 시간이 늦어지다가 50시간 사용 오일의 경우에는 시험시간 범위 이내에서는 전이 현상을 갖지 않으므로써 오일 A와는 정 반대의 경향을 보여준다.

오일 C의 경우는 그림 11-c와 같이 나타나며 새 오일은 마찰 시험중에 마찰 계수의 전이가 생기지만 10시간 시험한 오일은 초기에 가장 낮은 마찰계수를 갖다가 1단계로 증가하고 점차 조금씩 증가하였다. 그러나 30시간 시험 오일은 마찰계수의 전이가 새 오일 보다는 늦게 시작하지만 낮은 마찰계수를 나타내고 50시간 사용한 오일은 초기에 약간 높은 마찰계수로서 시험시간 끝까지 계속 유지되고 있어 오일 A와 B의 중간 성격을 갖는 복잡한 현상을 보여준다.

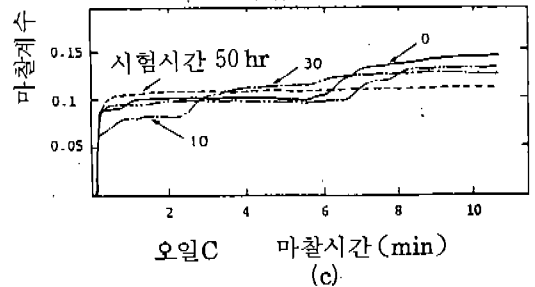
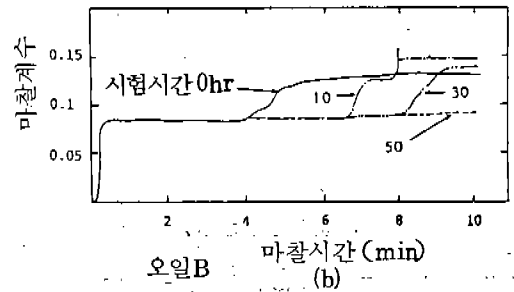
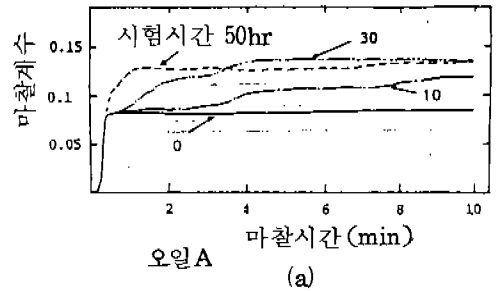


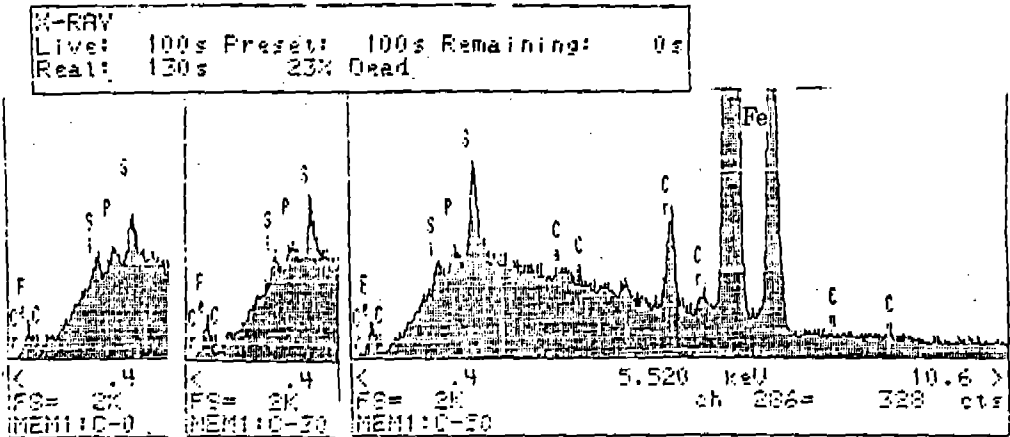
그림 11 각 오일의 엔진 시험에 따른 4-ball 시험에서 마찰 계수의 변화

따라서 마찰계수의 변화는 그림 10에서 보여준 마모량의 변화와 상관관계를 갖는다. 즉 오일 A는 마모량의 증가와 함께 마찰계수가 증가하고 오일 B는 마모가 점차 감소되면서 마찰계수의 전이 현상이 사라지며 오일 C는 낮은 마모와 마찰계수가 10시간 사용오일에 나타나다가 다시 증가하는 경향을 보여 주고 있음을 알 수 있다.

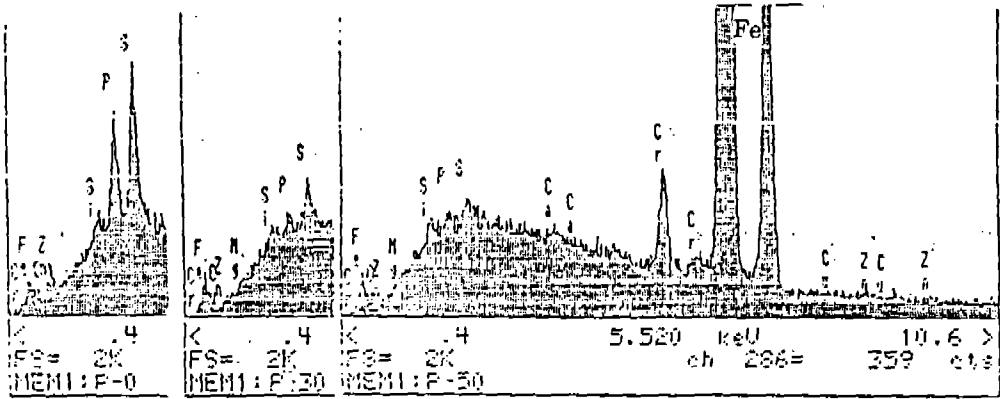
4.4 엔진 시험한 오일에 대한 4-ball 마찰 시험의 표면 분석 비교

앞에서 설명한 그림 10의 마모직경 크기를 측정했던 4-ball 마찰 시험의 표면 피막 성분을 EDX로 분석한 스펙트럼을 그림 12에 나타내었다.

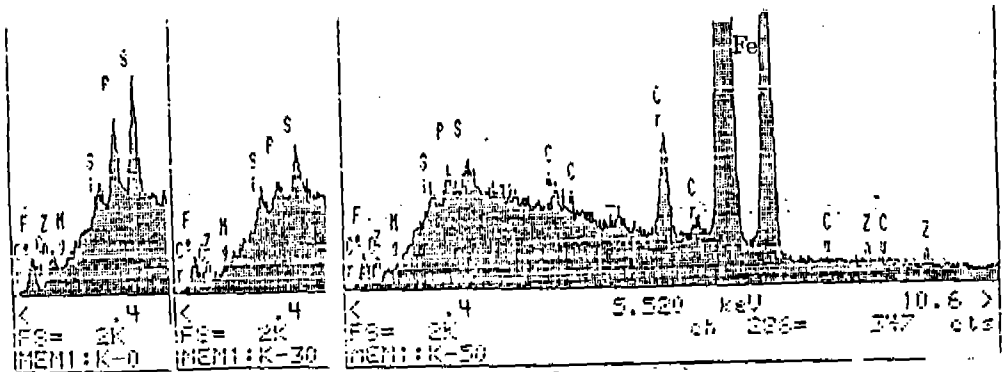
오일 A의 경우에는 그림 10에서 엔진 시험



a) 오일A



b) 오일B



c) 오일C

그림 12 각 오일의 엔진 시험시간에 따른 4-ball 시험 마찰 표면 분석

시간이 증가함에 따라 마모량이 증가하였는데 그림 12-a에서는 P와 S의 피크치가 새 오일의 경우에는 비교적 낮은 상태였으나 시험기간이 길어지면서 점점 높아지고 있다. 그러나 오일 B와 C는 그림 10에서 마모량이 감소하였고 그림 12-b, c에서는 피막중에 P와 S의 피크 크기가 사용시간에 따라 급격히 감소하였다. 따라서 오일에 상관없이 스펙트럼중에서 P와 S의 피크가 큰 경우에 마모가 많아지고 피크가 낮아지면 마모가 작아지는 경향을 보여주고 있어 마모와 표면 피막성분과 직접적인 관련이 있음을 알 수 있다.

이러한 원인중 하나는 엔진 작동 과정에서 첨가제 중의 Zn-DTP의 분해 반응시간이나 정도의 변화에 따라 피막 형성과 급속 마모가 지배를 받는 것으로 생각되며 더 많은 연구가 필요하다.

4. 5 엔진시험에 따른 오일의 물성변화

엔진 시험시간이 길어짐에 따라 엔진 오일은 불연소 혹은 연소된 연료와의 혼합이나 고온 부위에서의 열반응 등에 의해 물리적, 화학적 성질이 변하게 되고 윤활 성능이 감소되는 경향을 갖는 것으로 알려져 있다. 따라서 오일 A, B와 C의 시험 오일은 시험전과 시험시간의 증가에 따라 점도와 전산가 변화를 분석하였다.

그림 13은 새 오일과 10, 30, 50시간씩 시험한 오일을 채취하여 100°C에서 동점도를 측정 한 것으로써 오일 A는 10시간 시험후에 감소된 다음 거의 일정하였으나 오일 C는 서서히 감소하다가 30시간 이후에는 약간씩 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이 결과는 마모량 변화와 비슷한 현상을 보여주고 있고 오일에 따라 점도 변화 특성이 서로 다르고 그에 따른 내마모 성능도 관련이 있으며 엔진 윤활 마찰 부품에 직접적으로 영향을 주고 있는 것으로 생각된다.

그림 14는 시험 오일의 전산과 변화를 측정 한 것으로써 오일 B는 시험 시간에 따라 약간씩 증가의 경향만 보일뿐 크게 변하지 않았지만 오일 A는 10시간 시험후에 많이 증

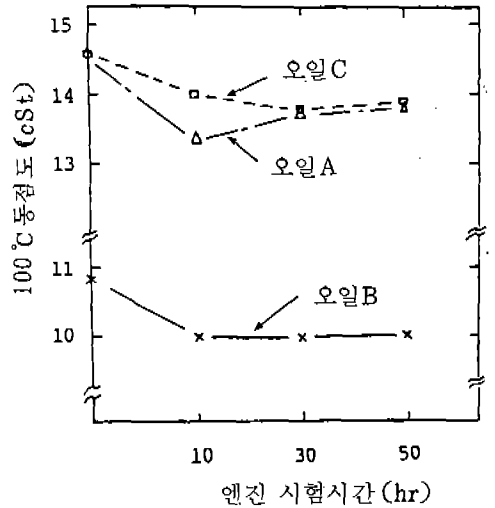


그림 13 엔진 시험시간에 따른 100°C 동점도 변화

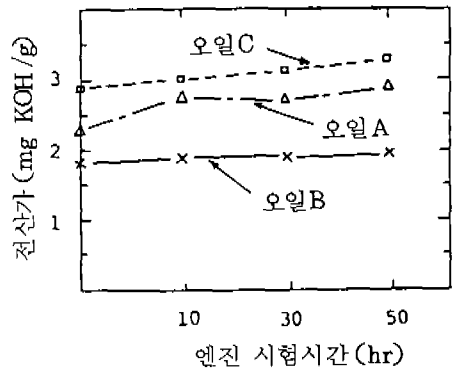


그림 14 엔진 시험시간에 따른 전산가(TAN)의 변화

가된 다음 약간씩 증가하는 경향을 보였고, 오일 C는 점진적으로 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이것은 오일 A가 사용에 따라 화학적 변화가 빨리 일어나면서 오일의 성능을 저하시키고 있고 오일 B는 비교적 느리게 또 서서히 감소하는 반면에 오일 C는 중간상태이며 오일 A의 마모증가 현상과 오일 B의 마모량이 크게 변하지 않은 그림 10과 직접 관련됨을 알 수 있다.

5. 결 론

성분과 제조회사가 다른 새 종류의 차동차 엔진 오일을 벤치 및 실제 엔진시험을 하면

서 각 오일에 대한 con-rod 베어링과 피스톤링의 마모 관계와 시험시간에 따른 오일의 내 마모성 변화, 마찰계수의 변화 등 윤활 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 엔진에서 동력 전달축과 가까운 con-rod 베어링의 마모가 가장 많고 중간이 적으며 크랭크축 표면의 초기 손상에 지배를 받고 각 베어링 모두는 상부에 위치한것이 하부보다 더 많이 마모되었다. 또 시험용 Cu-Pb 베어링은 표준 베어링보다 4~5배 가량 마모량이 증가하였다.

(2) 피스톤 압축 링은 중간 시린더에서 마모량이 많았고 코팅된 상부링이 코팅 안된 하부링 보다 비교적 많이 마모되었다. 또 오일에 따라 마모량의 크기는 4-ball 시험과 관련이 있음을 보여 주었다.

(3) 시험중의 오일에 대한 4-ball 마모시험에 의하면 오일에 따라 내마모 특성은 증가 또는 감소하는 경향을 보여주고 사용한 오일에서 철의 농도 변화와 상관 관계를 갖으며 구리의 농도와는 관련이 없음을 보여 주었다.

(4) 사용한 오일의 4-ball 마찰 표면 분석에서 마모가 많은 경우 마찰면에 P와 S의 피크가 크게 나타났고 이 경우에 마찰계수의 전이 현상이 일어나며 Zn 과는 관련이 없었다. 엔진 오일의 피막 형성과 마찰, 마모와는 상

관 관계를 갖고 있으며 사용중에 그 성질이 오일에 따라 서로 다르게 변함을 알 수 있었다.

(5) 엔진 사용 시간이 길어지면 사용중인 엔진 오일의 동점도는 감소하고 전산가는 증가하는 경향이 있으며 마찰, 마모의 증가가 비교적 큰 오일의 경우가 다른 오일에 비하여 더욱 심하였다.

참 고 문 헌

1. Samuel Eilon & O.A. Saunders, "A Study of Piston Ring Lubrication", I, Mech, E., 1957 pp 427~442.
2. T.S. Sudarshan & S.B. Bhaduri, "Wear in Cylinder Liners" Wear, 91(1983) pp 269~279.
3. S.L. Moore & G.M. Hamilton, "The Lubrication of Piston Rings in a Diesel Engine", J. Mech, Engr. Science, Vol. 20, No 6(1978) pp 345~352.
4. L.L. Ting & J.E. Mayer. JR., "Piston Ring Lubrication and Cylinder Bore Wear Analyses," Part I. II., Journal of Lubrication Technology, 1974 Paper No 73-Lub-27, pp 1~9, 305~314.