

가솔린 엔진의 저 연비화를 위한 엔진유의 기술적 과제

문 우 식
(주)유공 울산연구소



●1959년생.
●유허공학 중에서 유허 상태의 마찰·마모를 전공하였으며, 엔진유의 마찰·마모 특성에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

최근 자동차용 엔진은 고출력화 및 연비향상을 위하여 그 성능을 비약적으로 향상시켜왔는데, DOHC기구 및 흡배기밸브의 복수화가 승용차의 경우 이미 일반화되었으며 터보과급기 장착 차량도 증가될 것으로 전망된다.

엔진 배기량당 출력은 그림 1에 나타낸 바와 같이 매년 증가일로에 있으며 자동차가 존재하는 한 출력향상은 계속 추구될 것임에 틀림없다.⁽¹⁾ 한정된 크기의 엔진에서 큰 출력을 얻기 위해서 터보차저, 수퍼차저 등의 과급기장착, 엔진의 전자제어, 또는 DOHC에 의한 고회전

화 등의 방법이 채용되고 있다.

또한, 연비향상을 위한 노력도 계속되고 있는데, 차량전체를 경량화함으로써 주행거리를 향상시키는 방법이 주 대책이 되겠지만 강도 및 안전성과 관련되기 때문에 설계의 최적화만으로는 한계가 있다. 따라서 수지, 알루미늄, 마그네슘, 티탄 등의 경량재료뿐만 아니라, 세라믹 재료, 복합재료 등 신재료의 사용이 주목되고 있다. 현재 가장 많이 사용되는 경량재료는 수지와 알루미늄인데, 각 재료의 자동차 한대당 사용비율을 그림 2에, 그리고 엔진에서의 비율을 그림 3에 각각 예시한다.⁽²⁾ 한편, 굴림마찰을 이용하는 볼러 태핏을 적용함으로써 캠의 구동토크를 크게 감소시켜 마찰손실을 줄이

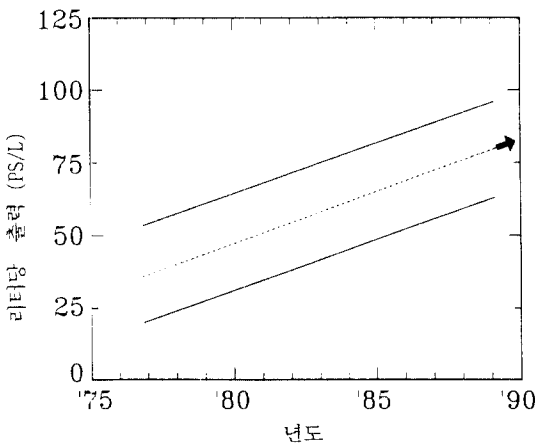


그림 1 엔진 배기량당 출력의 동향

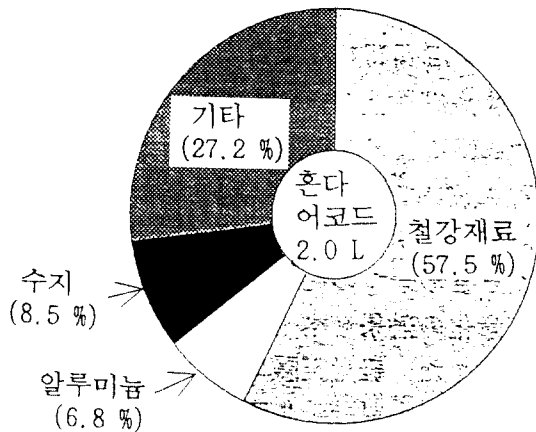


그림 2 자동차의 재료구성 비율

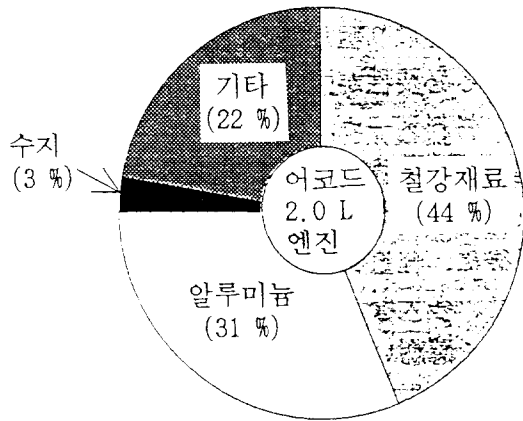


그림 3 엔진의 재료구성 비율

계속되고 있다. 표 1에는 최근 자동차용 엔진의 기술동향을 정리하여 나타낸다.⁽¹⁾

이와 같은 엔진의 고출력화에 따라 엔진유에 가해지는 열부하가 증대되어 산화열화가 촉진되기 때문에 엔진유의 고성능화가 절실히 요구되고 있다. 또한 연비향상을 위한 연구도 고성능화와 함께 계속되고 있으며, FFV(flexible fuel vehicle) 등에 대응하는 엔진유의 개발도 앞으로의 과제이다. 이러한 기술적 과제에 대응하기 위한 엔진유의 성능개선 및 처방을 표 2에 나타낸다.

이하에서는 최근의 엔진유를 통한 저연비화 기술동향에 관하여 기술하고자 한다.

표 1 최근자동차용 엔진의 기술 동향

기술동향	영 향
1. 고출력화	고온, 고속화
2. 연비향상	경량화 → 최적설계, 신재료 사용 마찰저감 → 기구의 변경, 엔진유 개선
3. 배기정책	엔진유의 인함량 제한
4. 신뢰성	마모저감, 강도의 확보, 재질의 안정화
5. 연료의 다양화	부식 대책

2. 엔진유를 통한 저연비화 기술

자동차의 연비를 향상시키는 방법 중에 엔진유의 성능 개선을 통하여 마찰손실을 감소시키는 법이 있다. 이러한 엔진유에 의한 마찰 감소에는, 유체유행영역에서 점도를 감소시키는 저점도화와 금속접촉이 일어나는 경계유행영역에서 첨가제에 의하여 마찰을 감소시키는 저마찰화의 두 가지 방법을 생각할 수 있다.

그림 4에는 미국 EPA 사이클로 측정된 승용차의 에너지 배분을 나타낸다. 그림 4에서 보는 바와 같이 가솔린의 전 연소에너지 100% 중에서 엔진에의 유효출력은 25%에 지나지 않고, 각종의 에너지 손실이 많은데 엔진 내부에서 일어나는 마찰손실이 피스톤 부위의 3%를

는 방법도 실용화되어 있다.

그 외에도 배기가스 대책, 내구성 및 신뢰성의 향상, 쾌적성의 추구 등을 위한 기술개발이

표 2 가솔린엔진유에 요구되는 성능과 대책

항 목	성 능	기 유	첨 가 제
고성능화 장수명화	산화안정성, 내질화성 내열성, 고분산성, 내마모성, 오일소모량	고정제기유, 합성유 내로우컷유	고성능산화방지제 고성능청정분산제
연비향상	저점도, 고점도지수, 저마찰	저점도유, 고점도지수유 내로우컷유, 합성유	고성능마찰저감제
연료다양화	산중화성, 내마모성		산중화제, 마모방지제

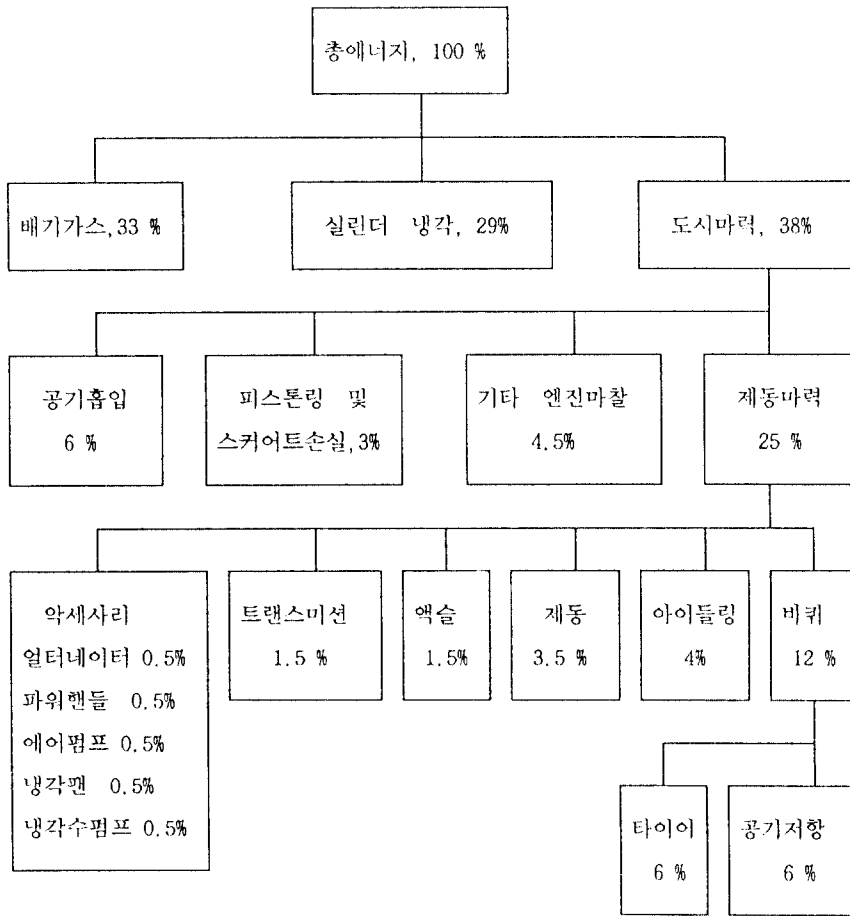


그림 4 EPA 시가지/고속 사이클에서의 승용차 에너지 배분

포함하여 7.5%에 달하고 있어, (3) 가능한 한 이 손실을 줄이는 것이 연비개선과 직결되기 때문에 엔진내접동부의 마찰손실을 윤활유에 의하여 개선하려는 시도가 많이 이루어지고 있다. (4~7)

엔진에서 마찰, 마모가 특히 문제가 되는 부위는 ①밸브계통, ②피스톤 및 피스톤링과 실린더 사이, ③크랭크축 및 커넥팅로드 등의 베어링 부위 등이다. 일반적으로 마찰면의 윤활영역을 결정하는 인자는 마찰면의 속도 N , 하중 P 와 윤활유의 점도 μ 이다. 그림 5에는 $\mu N/P$ (Sommerfeld수)와 마찰계수 f 와의 관계를 나타낸다. 표 3은 상기 세 부위에 대한 마

찰조건의 예이다. (8)

마찰손실이 주로 일어나고 있는 밸브계통, 베어링부, 피스톤링과 실린더라이너부 등의 마찰조건을 보면, 일반적으로 밸브계통이 혼합윤활영역, 베어링부는 유체윤활영역, 링과 라이너부는 유체윤활 및 혼합윤활영역에 포함된다. (9,10) 엔진의 마찰손실의 내용을 해석한 예를 그림 6에 나타낸다. (8) 피스톤부위 및 크랭크축에서의 손실은 회전수의 증가와 함께 같이 증가하는 반면, 밸브계통의 손실은 저속일 때 조금 크지만 대부분의 범위에서 회전수에 관계 없이 일정하다. 상대적으로 볼 때, 저속에서는 밸브계통에 의한 손실이 큰 반면, 고속에서는

표 3 엔진 접동부의 마찰조건의 예

	링/실린더	크랭크축베어링	캠/태핏
미끄럼속도	6.7	14~18	1.2
접촉압력	~300	550~1400	~7500
유막두께	0.3~15.7	3.75~3.25	0~1.0
전단속도	$10^5 \sim 10^7$	$10^6 \sim 10^7$	$10^7 \sim 10^8$
유막온도상승, °C (오일팬유온 대비)	~60	10~20	(150~210)
비 고	5.8L 디젤엔진 속도 1000 rpm 평균유효압력 64psi	1.8L 가솔린엔진 속도 5000~6500rpm 최대압력 234~398kg/cm ²	

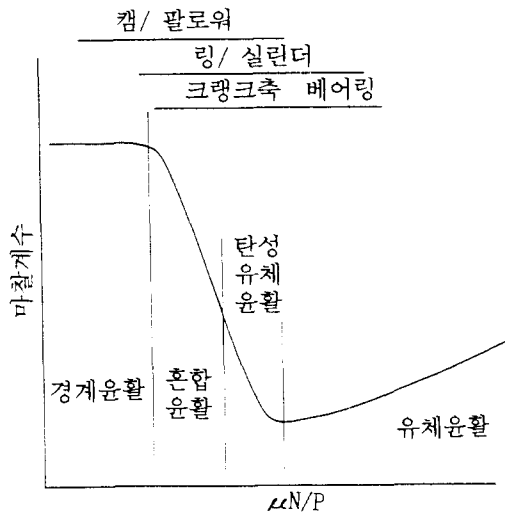


그림 5 스트리베 선도와 접동부의 유회영역

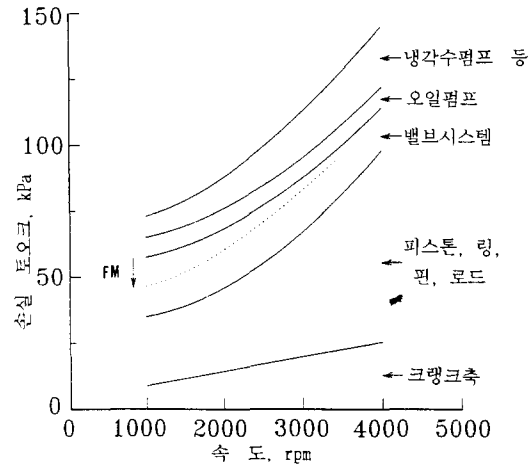


그림 6 엔진의 마찰손실 토크 비율

피스톤 부위 및 크랭크축에서의 손실비율이 크다. 이것은 피스톤 부위 및 크랭크축의 유회이 주로 유체유회이기 때문에 속도에 비례하여 마찰도 증가하는데 비하여, 밸브계통은 탄성유회 및 혼합유회이기 때문에 속도가 높아짐에 따라 유체유회영역으로의 이동이 시작되기 때문이다.

따라서 밸브계통의 마찰손실을 감소시키기 위해서는 오일 중의 마찰저감제가 효과가 있으며, 베어링에 대해서는 저점도화가 중요하다.

표 4에는 엔진유의 저마찰화를 위한 두 가지 방법을 나타낸다.

엔진유의 저점도화를 통하여 유체유회영역에서 운전되는 부위에서 유막의 전단에 필요한 에너지를 절감함으로써 저마찰화가 가능하지만, 점도를 낮추어 가면 저널베어링의 유막두께가 얇아짐에 따라 메탈마모의 증가, 소부의 발생 등의 문제를 야기시킬 수 있다. 그리고 엔진유의 증발량이 증가되어 오일소모가 악화되는 문제도 고려해야만 한다.

또한, 엔진유의 대표적인 첨가제 중의 하나

표 4 저연비 엔진유의 대응기술

방 법	문제점	대 책
저마찰화, 저점도화	마모, 소부	마모방지제의 개량 점도지수향상제의 개량
	오일소모	저휘발성기유의 채용
마찰저감제 첨가	부식	마찰저감제의 개량

인 점도지수향상제는 여러 운전조건에서의 점도 특성에 크게 영향을 미치기 때문에 그 종류에 따라 연비개선 특성이 크게 변화된다.^(11,12)

한편, 마찰저감제의 첨가에 의한 효과는 피스톤링과 라이너 사이 및 밸브계통 등의 경계 윤활 및 혼합윤활 상태에 있는 부위에서 기대할 수 있으며, 특히 저회전의 운전영역에서 밸브계통의 마찰감소를 통한 연비개선효과가 크다. 엔진동력계를 이용한 연비시험 결과에 따르면 특히 고유온 운전조건에서 마찰저감제의 연비절감 효과가 있다.^(11~15) 그러나 마찰저감제는 고가이기 때문에 엔진유의 가격이 높아지며, 물리브덴계의 첨가제와 같이 다량 첨가하면 금속표면을 부식시키는 경우가 있으므로 주의가 필요하다.

2.1 저점도화의 효과

윤활개선에 의한 연비절감으로 가장 큰 효과를 기대할 수 있는 것은 엔진유를 저점도화함으로써 엔진 각부에서의 교반손실 및 마찰손실을 감소시키는 것이다. 단급점도유의 경우 SAE 5W에서 40까지 점도등급을 변화시킬 경우 엔진동력계 시험에서 연비가 4% 이상 변화된다는 보고도 있다.⁽¹¹⁾ 그림 7에 그 결과를 나타낸다.

그림 8은 연비절감형 엔진유의 마찰손실을 모터링법에 의하여 측정된 결과의 예이다. 저점도화에 의한 토크의 저감효과는 저온일 때에 크고, 또한 같은 고온점도일 경우 단급점도유보다 다급점도유의 저감효과가 크다는 것을 알 수 있다.⁽¹⁶⁾

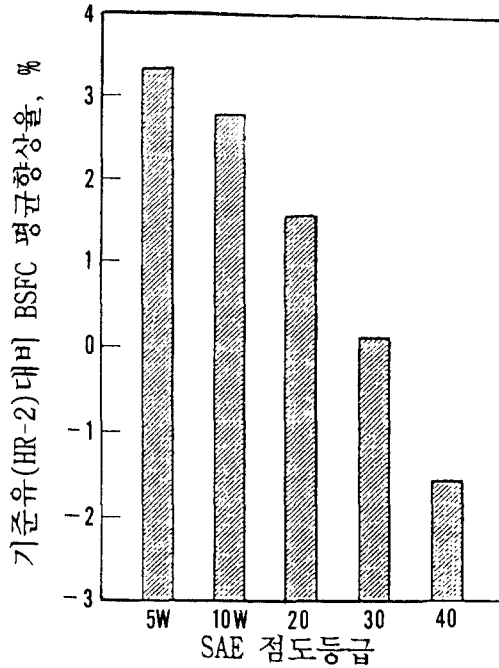


그림 7 연비에 미치는 점도등급의 영향

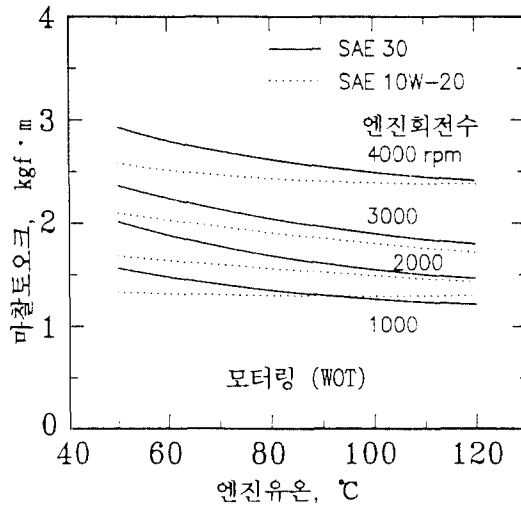


그림 8 엔진유의 마찰손실 토크

단급점도유보다 다급점도유가 연비절감성이 우수한 것은 전단속도가 큰 엔진 내의 점동부에서 폴리머인 점도지수 향상제가 전단방향으로 배열하기 때문에 일어나는 일시적인 점도저

하와 폴리머 분자의 영구적인 전단에 의한 점도저하에 의하여 엔진유의 실제점도가 저하되기 때문이라고 판단된다. 따라서 다급점도유의 경우 동일 점도유일시라도 점도지수향상제의 종류에 따라 연비성능이 달라진다. 그림 9에는 점도지수향상제가 연비에 미치는 영향을 검토한 예를 나타낸다.

또한, 100°C의 고온 고전단(HTHS) 점도와 연비개선을 사이에는 좋은 상관관계가 존재한다고 한다.⁽¹⁷⁾

그림 10에는 100°C의 고전단 점도와 연비성능과의 관계를 나타낸다. 단급점도유와 다급점도유의 결과를 같은 직선상에 표시할 수 있어,

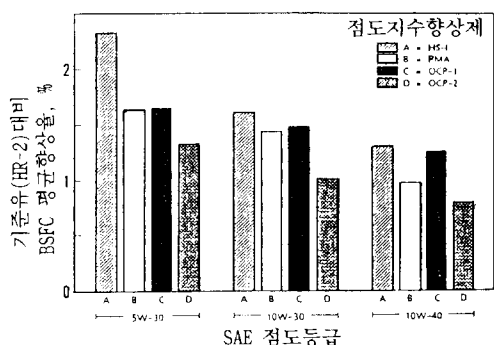


그림 9 연비에 미치는 점도지수향상제의 영향

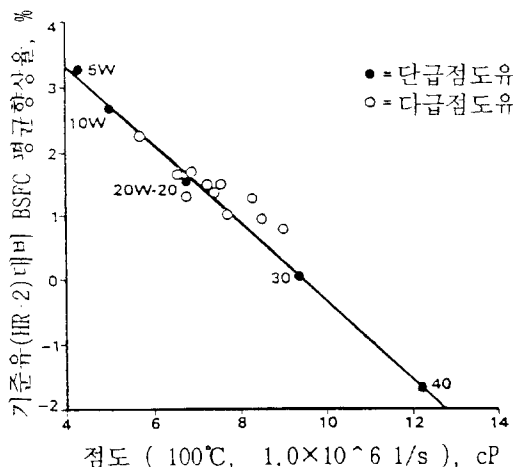


그림 10 연비성능에 미치는 고전단점도의 영향

100°C의 고전단 점도와 연비개선을 사이에는 좋은 상관관계를 가짐을 보여준다.⁽¹¹⁾ 또한 폴리머인 점도지수 향상제의 종류 및 분자량과 100°C의 고전단 점도와의 관계를 검토한 결과, 그림 11에 나타낸 바와 같이 100°C에서의 고전단 점도는 폴리머의 분자량이 증가할수록 저하되며, 폴리머의 종류에는 크게 관계되지 않는 것이 알려져 있다.⁽¹⁸⁾

이러한 결과들로부터 엔진유 점도의 최적화를 통하여 연비를 향상시키고자 할 경우, 단순한 저점도화뿐만 아니라 100°C 부근에서의 고전단 점도를 저하시키는 것이 효과적이다. 따라서 엔진유의 여타 성능을 저하시키지 않는

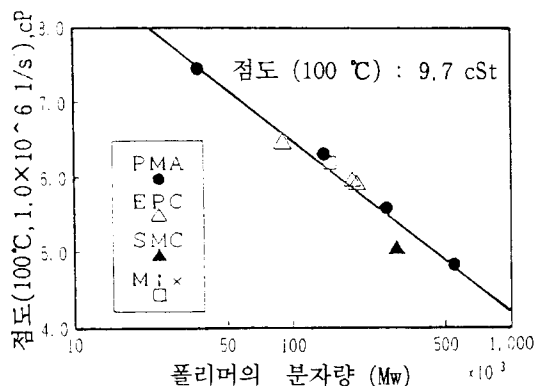


그림 11 폴리머의 종류 및 분자량과 고전단점도

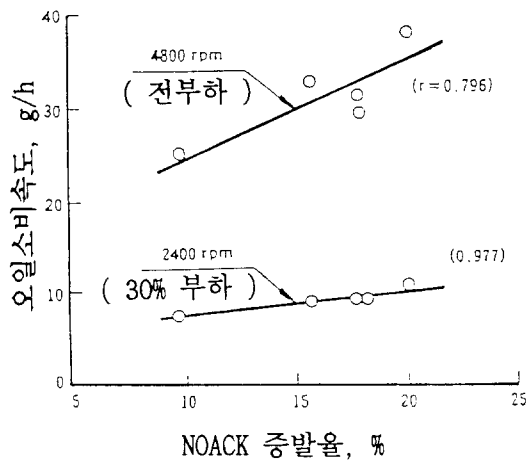


그림 12 Noack 증발률과 오일소비속도의 관계

범위 안에서 가능한 한 고분자량의 점도지수 향상제를 선정하는 것이 바람직하다고 하겠다.

저점도화가 연비개선에 매우 유효하게 작용하기 때문에, 미국에서는 소형차량에 대한 엔진유의 저점도화 연구가 일찍부터 진행되어, 과거에는 일부 한냉지용으로만 사용되었던 SAE 5W/30을 점점 4계절용으로 승인하기에 이르렀다. 현재, GM, 포드, 클라이슬러 등의 공장총진용 엔진유의 주종은 5W/30으로 되었으며, 일본에서도 얼마전부터 사용되기 시작하였다.

그러나 지나치게 저점도화하게 되면, 베어링의 마모 및 소부, 오일소모의 증가, 오일누설 등의 문제를 일으킬 수 있으므로 충분한 검토가 필요하다.

2.2 저점도화의 문제점

(1) 오일소모의 증가

오일소비는 엔진유의 점도, 증발성, 점도지수, 전단안정성 등의 영향을 받는데 특히 점도와 증발성의 영향이 크다. 그림 12에는 엔진유의 Noack 증발률과 오일소비 속도와의 관계를 예시한다.⁽¹⁹⁾ 그림 12에서 보듯이 오일소비 속도는 Noack 증발성과 상관관계가 있으며, 특히 고속영역에서 많아지는 것을 알 수 있다. 한편, 점도의 영향은 명확하게 밝혀져 있지 않은데, 증발성과 같은 명확한 효과는 없는 것 같이 보인다.

오일소비의 증가는 연소실 및 흡입밸브에의 퇴적물을 증가시킬 뿐만 아니라 배기가스 정화 촉매장치에의 피독작용 및 산소 센서의 기능을 저하시키는 등 엔진성능뿐만 아니라 대기오염의 관점에서 나쁜 영향을 준다. 또한, 링과 라이너 이상마모 및 ORI에도 중요하다. 엔진유의 저점도화에 일반적으로 저점도 기유가 사용되는데, 저점도의 기유일수록 분자량이 작고 증발되기 쉬운 결점이 있기 때문에 분자량 분포의 범위를 작게 하여 증발되기 쉬운 성분을 제거한 광유계 내로우컷 기유를 사용하거나, 고정제의 고점도지수 기유 및 합성기유의 적용

등에 관한 연구가 필요하다.

한편, 퇴적물 및 배기정화장치에의 악영향을 줄이기 위하여 첨가제의 선택시 금속청정제의 감소 또는 저회분화, 점도지수 향상제의 첨가량 저감 등을 검토할 필요가 있다.

(2) 마모의 증가

최근 엔진의 고출력화, 열효율의 향상 등으로 부하중이 증가됨에 따라 유온이 상승되고 전단력이 증가되어 엔진유의 점도저하를 일으

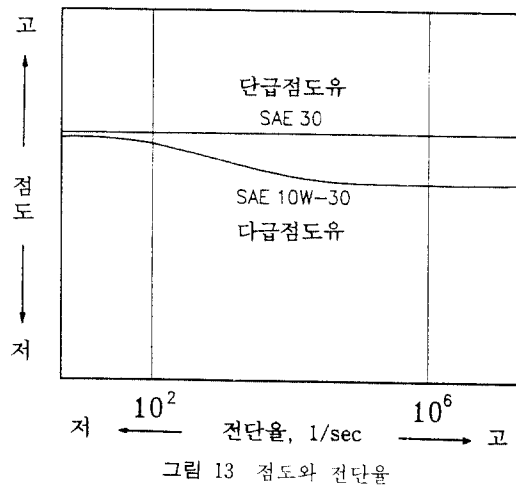


그림 13 점도와 전단율

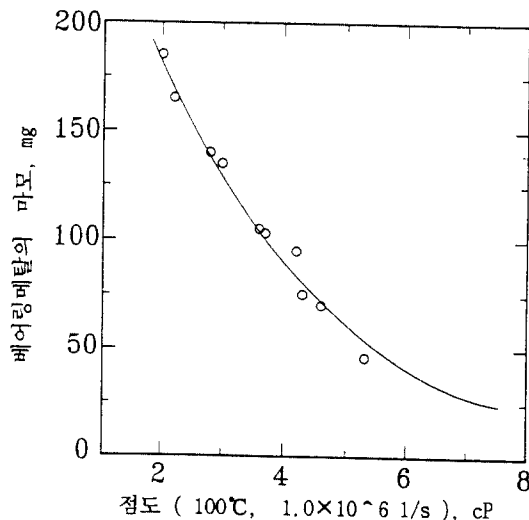


그림 14 고전단 점도와 베어링메탈의 마모

키기 쉽다. 이러한 가혹한 조건하에서 연비개선을 위하여 저점도화한다는 것은 마모 및 소부발생의 면에서 한계점도에 근접하고 있다고 볼 수 있기 때문에 충분한 점도가 필요하다. 특히, 마찰면의 유막온도, 압력, 전단속도를 고려하여, 이들이 점도에 미치는 영향을 잘 이해해야 하겠다.

저점도유일수록 유막두께가 얇아져 마모에 대해서 가혹해지게 되는데, 다급점도유는 저점도 기유를 사용하기 때문에 동일 점도의 단급점도유보다 일반적으로 마모에 대해 더 가혹하다.

오일의 점도는 엔진의 운전조건에 따라 변화된다는 것에 주의할 필요가 있다. 베어링 부위의 유막은 미끄럼에 의한 마찰열 때문에 유온이 상승하여 점도가 저하된다. 유온 상승은 고속일수록 커서 50°C까지 달하는 경우도 있다. 또한 유막에 작용하는 고전단 속도에 의하여 점도지수 향상제를 함유하는 엔진유는 점도저하가 일어난다. 그림 13에는 엔진유의 점도와 전단율의 관계를 나타낸다.

크랭크축 및 커넥팅로드 베어링은 통상 유체 윤활 영역에서 작동되나, 저점도유의 상용이나 극단적인 고온 고부하 운전의 경우에 베어링 부위의 유막이 파단되어 소부 및 과잉마모를 일으킬 수 있다. 베어링 메탈의 마모는 이 부위의 유막두께에 관계되는데, 이는 베어링부에서의 오일 점도에 따라 결정된다. 그림 14에는 오일의 점도와 베어링 메탈의 마모와의 관계를 나타내는데, 마모량은 150°C의 고온 고전단 점도와 좋은 상관관계를 가진다.⁽⁸⁾

피스톤과 실린더 라이너는 통상 유막을 통하여 접하고 있으며 유체윤활 영역에 있다. 그러나 피스톤의 상하점에서는 링의 미끄럼 방향이 바뀌어 속도가 영으로 되기 때문에 유막이 얇아진다. 특히 상사점에서는 링에 가해지는 압력이 최대로 되고 유온도 높기 때문에 유막 두께도 최소가 된다. 오일의 점도가 낮으면 유막 두께가 더욱 얇아지며 부하가 높은 상사점 및 폭발행정에서는 유막 파단이 일어나기 쉽고 마모가 발생된다. 그림 15에는 점도와 마모의 관

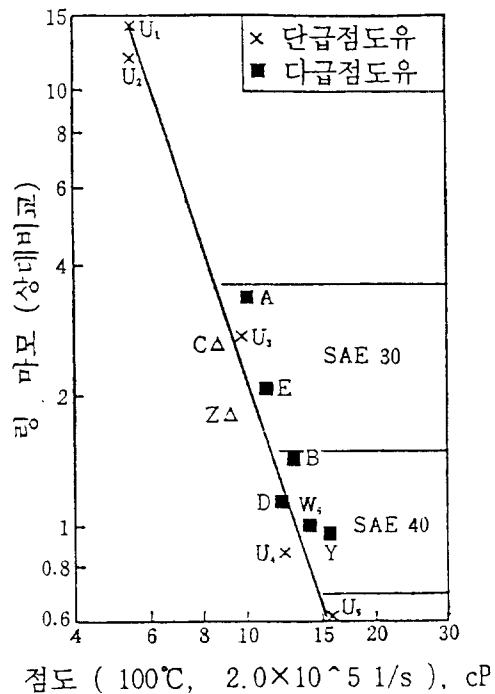
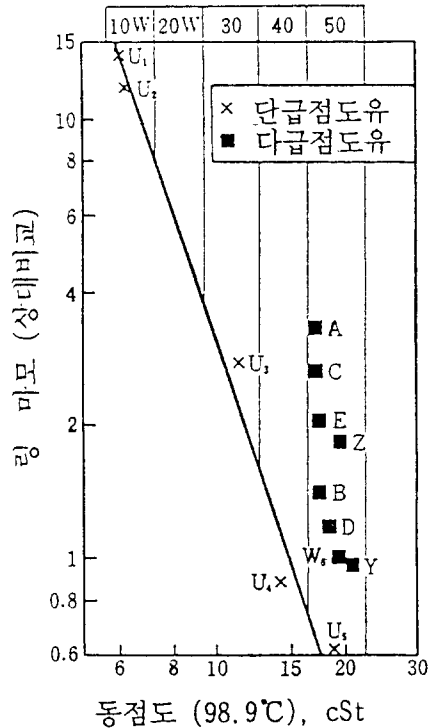


그림 15 엔진유의 점도와 링 마모

계를 나타낸다. 단급점도유 및 다급점도유 모두에 대하여 고전단점도와 마모량 사이에는 상관관계가 있음을 알 수 있다.⁽⁸⁾

2.3 마찰저감제의 효과

엔진유에 의한 연비절감방법으로서 저점도화 외에 마찰저감제의 첨가가 있다. 혼합운환 영역에서의 마찰계수는 오일의 마찰특성에 좌우된다. 그림 16에 나타난 바와 같이 혼합운환 영역에서 마찰계수를 저하시키기 위해서는 마찰저감제가 사용된다. 마찰저감제의 작용기구는 그 종류에 따라 다르며 다음의 세 가지로 분류가 가능하다.

1) 마찰면에 화학적 또는 물리적으로 흡착하여 표면에 흡착막을 만드는 것.

○지방산, 에스테르, 아미드, 이황화물리브덴, 흑연 등.

2) 마찰면에 흡착한 후 분해되어 보호막을 생성하는 것.

○MoDTP, MoDTC, 마찰폴리머형 저감제 등.

3) 마찰면에 흡착한 후 표면과 반응하여 저마찰의 표면층을 만드는 것.

○인산에스테르, 아린산에스테르 등.

마찰저감제의 첨가는 고유온 운전시의 연비절감에 효과적이며, 점도지수 향상제의 종류에 따라서도 그 효과가 다르다고 알려져 있다.⁽¹²⁾

그림 17에는 점도등급 5W/30의 엔진유에 대하여 마찰저감제의 첨가에 따른 연비향상 효과를 검토한 예를 나타낸다.⁽¹²⁾ 엔진시험은 미국 EPA에서 연비성능 향상물의 평가에 적용하고 있는 ASTM Sequence VI법이 사용되었다. 마찰저감제의 첨가는 고유온시의 연비절감에 효과적이며, 특히 점도지수 향상제 B의 경우에 그 효과가 좋다.

마찰저감제는 금속간 접촉이 일어나는 경계운환 및 혼합운환영역에서 마찰력을 저하시킨다. 따라서 유체운환상태에 있는 엔진내의 운환부위에서는 그 효과를 기대하기 힘들다. 피스톤링과 라이너 및 밸브계통 등의 경계/혼합

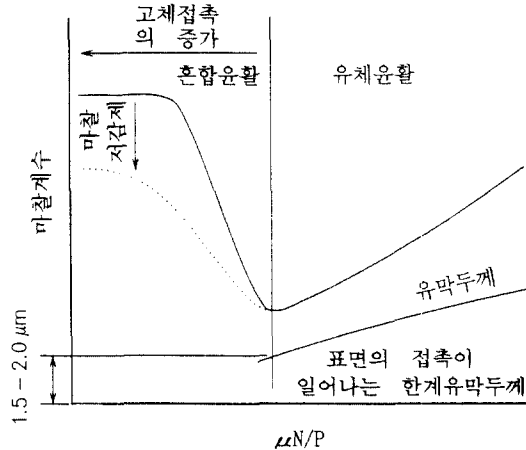


그림 16 마찰저감제에 의한 마찰계수의 저하

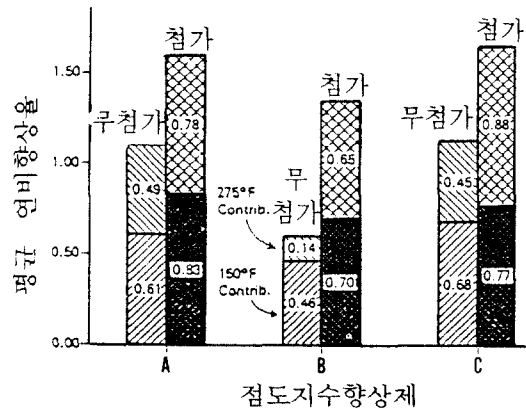


그림 17 마찰저감제의 효과(5W/30, Seq. VI 시험)

운환 상태에 있는 부위에서는 상당한 효과를 기대할 수 있다. 특히 저회전운전에서 밸브계통의 마찰감소를 통한 연비개선의 효과가 높다.

그림 6에 예시한 바와 같이, 밸브계통을 제외하고 여타 엔진부위에서는 회전수의 증가와 함께 마찰력도 따라서 증가된다. 이에 반해서 밸브계통은 그 경향이 반대로, 저회전일수록 마찰력이 증가되어 운환영역이 경계·혼합영역에 있다. 따라서 유효한 마찰저감제를 첨가함으로써 저회전 영역에서의 밸브계통 마찰을 감소시켜 연비개선을 할 수 있으리라 판단된다.

후루하마의 결과에 따르면 저회전속도인 1000rpm 및 중정도의 부하에서 마찰저감제의 첨가에 의해 벨브계통의 마찰손실을 반으로 줄이면 5~6%의 연비향상이 가능하다고 한다.⁽²⁰⁾ 그러나 통상의 엔진 속도에서는 여타의 마찰손실이 증가하기 때문에 마찰저감 효과가 상대적으로 감소된다.

3. 맺음말

가솔린엔진유를 통한 저연비화 기술, 문제점, 대응기술 등의 동향에 관하여 기술하였다. 저연비화 기술에는 저점도화 및 마찰저감제의 첨가에 의한 방법 등이 있으나, 실제 여타 성능을 향상시키면서 저연비화한다는 것은 매우 어려운 일이다. 우선, 고점도지수, 저회발성을 가지는 고정제기유 및 합성유인 PAO 등의 사용을 검토해야 하며, 여타첨가제가 연비에 미치는 영향도 충분히 고려해야만 한다. 또한, 가장 중요한 Cost의 면을 포함하여 시장의 요구를 십분 반영한 전반적인 성능 검토가 필요하다고 하겠다.

참고문헌

- (1) 川村益彦, 1987, “엔진의 트라이보로지,” 日本潤滑學會 第22回 夏期 세미나, pp. 1~16.
- (2) 吸澤一徳, 1991, “엔진輕量化とアルミニウム,” 自動車技術, Vol.46, No.5, p. 166.
- (3) Pinkus, O. and Wilcock, D.F., 1978, “The Role of Tribology in Energy Conservation,” *Lubrication Engineering*, Vol.34, pp. 599~610.
- (4) Yung, C.Y., Hsieh, S.K., Huang, G.S. and Kuo, L., 1987, “Determination of Friction-Reducing and Antiwear Characteristics of Lubricating Engine Oils Compounded with Friction Modifiers,” *Lubrication Engineering*, Vol.44, No.10, pp. 856~865.
- (5) Yoshioka, T. and Yoshida, S., 1983, “Performance Characteristics of Fuel Efficient Motor Oil,” *トヨタ技術*, Vol.33, No.2, pp. 242~251.
- (6) Damrath, J.G. and Papay, A.G., 1982, “Fuel Economy Factors in Lubricants,” SAE Paper 821226.
- (7) Hamaguchi, H., Maeda, Y. and Maeda, T., 1981, “Fuel Efficient Motor Oil for Japanese Passenger Cars,” SAE Paper 810316.
- (8) 染谷常雄, 외 7인, 1987, “內燃機關の潤滑,” 辛書房.
- (9) Hoshi, M., 1991, “Current Status and Future Trends of Tribology in Automobile Industry,” *自動車技術*, Vol.45, No.4, pp. 6~12.
- (10) Hamai, K., 1991, “Friction Reducing Technology for Improving Fuel Consumption of I.C. Engine,” *自動車技術*, Vol.45, No. 4, pp. 39~45.
- (11) Clevenger, J.E., Carlson, D.C. and Kleiser, W.M., 1984, “The Effects of Engine Oil Viscosity and Composition on Fuel Economy,” SAE Paper 841389.
- (12) Kennedy, S. and Moore, L.D., 1987, “Additive Effects on Lubricant Fuel Economy,” SAE Paper 872121.
- (13) Passut, C.A. and Kollman, R.E., 1987, “Laboratory Techniques for Evaluation of Engine Oil Effects on Fuel Economy,” SAE Paper 780601.
- (14) Chamberlin, W.B. and Sanders, J.D., 1979, “Screening Tests Used For Developing Fuel-Efficient Engine Oils,” *Lubrication Engineering*, Vol.36, No.2, pp. 69-80.
- (15) Heath, D.H., Brown, J.G., Farnsworth, G. R., Patrick, R.J. and Zahalka, T.L., 1987, “ASTM’s Development of the Sequence VI Fuel Efficient Engine Oil Dynamometer Test,” SAE Paper 872120.

- (16) 關克彦, 下山純也, 星滿, 1983, 低燃費型潤滑油の開発について, “潤滑,” Vol.28, No. 1, pp. 23~28.
- (17) Bates, T.W., 1990, “Oil Rheology and Journal Bearing Performance: A Review, Lubrication Science,” Vol.2, No.2, pp. 157~176.
- (18) 田本芳隆, 1991, “最近の自動車エンジンと省燃費エンジンオイル,” JASTライポロツ-フォーラム'91, pp. 43~84.
- (19) 井上清, 1990, “ガソリンエンジン油の技術課題,” Advanced Tribology in Automobile, JSAE '89 Symposium, No.13, pp. 55~61.
- (20) Furuhama, 1987, “潤滑,” Vol.32, No.9, p. 627. 