한국윤활학회지(1992), 제 8권 제 2호
Journal of KSLE(1992) Vol. 8, No. 2, pp.7~13

마찰저감제의 마찰특성에 관한 실험적 연구

문 우 식

(주)유공 울산연구소 윤활유연구실

Experimental Study on the Friction Characteristics of Friction Modifiers

Woo-Sik Moon

Ulsan Research Center, Yukong Ltd.

Abstract—Wear experiments were conducted using the SRV machine on the lubricated conditions of the several temperature and load. Oil samples were prepared by adding several friction modifiers into both paraffinic base oil and engine oil. Friction and wear characteristics of the oils were determined and are discussed in connection with the friction modifiers contained, the testing temperature and the load applied. From the study, it was found the MoDTC and the MoDTP, added into the engine oil, caused drastic increase in wear and had a tendency to lose the friction-reducing property on some specific conditions of temperature and/or load, though they had the good property on other conditions. Ashless friction modifiers and dispersed MoS_2 investigated showed the good friction-reducing property, but the loads, where they became active, were different.

1. 서 론

자동차의 연비를 향상시키는 방법 중에 엔진유의 성능 개선을 통하여 마찰손실을 감소시키는 법이 있다. 이러한 엔진유에 의한 마찰 감소에는 (1) 유체윤활영역에서 점도를 감소시키는 저점도화와, (2) 금속접촉이 일어나는 경계윤활영역에서 첨가제에 의하여 마찰을 감소시키는 저마찰화의 두 가지 방법을 생각할 수 있다.

미국 EPA 사이클로 측정한 승용차의 에너지 배분을 보면, 연소에너지 100% 중 엔진출력은 25%에 지나지 않고, 각종의 에너지 손실이 많은데 엔진내부에서 일어나는 마찰손실이 피스톤 부위의 3%를 포함하여 7.5%에 달하고 있다[1], 가능한한 이 손실을 줄이는 것이 연비개선과 직결되기 때문에 엔진내 접동부의 마찰손실을 윤활유에 의하여 개선하려는 시도가 많이 이루어지고 있다[2-5].

마찰손실이 주로 일어나고 있는 밸브계통, 베어링부, 피스톤링과 실린더라이너부 등의 마찰조건을 보면, 일반적으로 밸브계통이 혼합윤활영역, 베어링부는 유체윤활영역, 링과 라이너부는 유체윤활 및 혼합윤활영역에 포함된다[6, 7]. 따라서, 밸브계통의 마찰손실을 감소시키기 위해서는 오일 중의 마찰저감제가 효과가 있으며, 베어링에 대해서는 저점도화가 중요하다.

이와 같이 마찰저감제의 첨가에 의한 효과는 피스톤링과 라이너 사이 및 밸브계통 등의 경계윤활 및 혼합윤활 상태에 있는 부위에서 기대할 수 있으며 특히 저회전의 운전영역에서 밸브계통의 마찰감소를 통한 연비개선 효과가 크다. 엔진동력계를 이용한 연비시험 결과에 따르면 특히 고유온 운전조건에서 마찰저감제의 연비절감 효과가 있다[8-12].

또한, 엔진유의 대표적인 첨가제 중의 하나인 점도지수향상제는 여러 운전조건에서의 점도특성에 크게 영향을 미치기 때문에 그 종류에 따라 연비개선 특성이 크게 변화된다[11, 12].

엔진시험을 통한 연비성능의 평가 외에도 벤치 스크린 시험으로서 4-Ball 시험기, 저속마찰시험기(LVFA), SRV 시험기, Falex 시험기 등을 사용하여 마찰저감제의 마찰특성을 평가하고 있다[13, 14].

표 1. 사용한 마찰저감제의 종류

코드	종 류
FM1	MoDTC(Molybdenum dialkyl dithiocarbamate), Mo: 4.6%
FM2	MoDTP(Molybdenum dialkyl dithiophosphate), Mo: 8.1%
FM3	분산형 MoS2(MoS2+분산안정제), Mo: 6.0%
FM4	에스테르형
FM5	지방산아민형
FM6	스테아린산

표 2. 시료유

코드	배 합 식
A	파라핀계 광유, 점도(100℃): 4.1 cSt
B	A+FM1 (0.5 wt%)
C	A+FM2
D	A+FM3
E	A+FM4
F	A+FM5
G	A+FM6
H	가솔린엔진유: API SG급, 10W/30
I	H+FM1 (0.2 wt%)
J	H+FM2
K	H+FM3
L	H+FM4
M	H+FM5

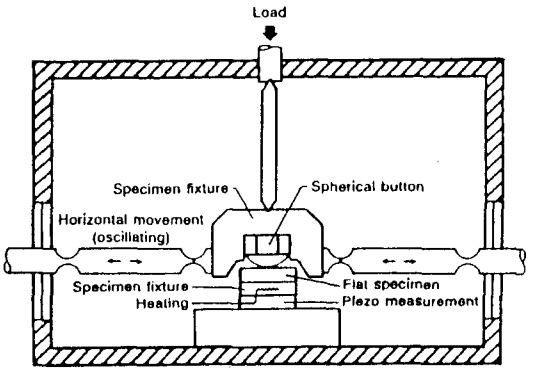

그림 1. SRV 시험기의 개략도

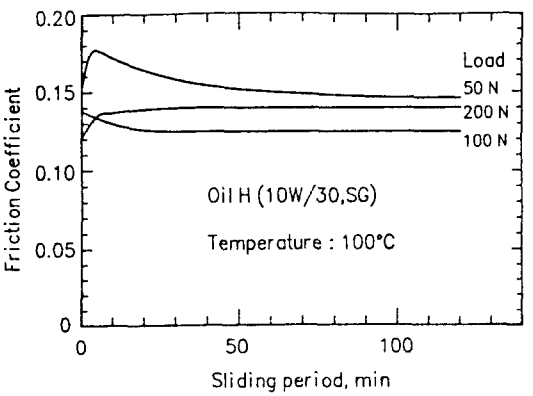

그림 2. 마찰계수의 측정예

본 논문에서는 시판되고 있는 몇 종류의 마찰저감제에 대하여 엔진유 및 기유에의 첨가에 의한 효과를 조사하기 위하여 왕복동식 마찰 시험기를 사용하여 수행한 실험연구의 결과를 보고하고자 한다.

2. 시 험

2-1. 시료유

시료유는 파라핀계 광유 및 엔진유에 마찰저감제를 일정량 첨가하여 준비하였다. 표 1에는 사용한 5종(FM1-FM5)의 마찰저감제에 대한 특성을 나타낸다.

FM1 및 FM2는 유용성 몰리브덴형이고, FM3는 MoS_2 분산형이며, FM4와 FM5는 무회형 마찰저감제이다. FM6의 스테아린산은 비교를 위하여 준비하였다.

표 2에는 위의 마찰저감제를 첨가한 시료유의 배합식을 나타낸다.

시료유 B-G는 광유 A에 FM1-FM6를 각각 0.5 wt% 첨가하여 제조하였으며, 시료유 I-M은 가솔린엔진유 H에 FM1-FM5를 각각 0.2 wt% 첨가하여 준비하였다.

2-2. 시험방법

표 2에 나열된 시료유들에 대한 마찰, 마모특성을 평가하기 위하여, 엔진의 피스톤링과 실린더라이너의 왕복 마끄럼운동을 모사하는 SRV 왕복동식 마찰시험기(Optimol모델)를 사용하였다. 그림 1에는 SRV 시험기의 개략도를 나타낸다. 하부의 디스크 시험편과 상부의 볼 시험편이 접촉된 상태로 볼에 하중을 가하며 왕복운동하는 볼/디스크형의 마찰시험기이다. 하중 및 마찰력은 디스크 시험편의 하부에 설치된 2차원 압전식 변환기를 사용하여 측정한다. 마찰계수는 볼의 각 왕복운동 주기에서의 평균값을 취하며, 기록계에 연속적으로 기록된다. 그림 2에는 마찰계수의 대표적인 측정예를 나타낸다. 초기의 브레이크인 이

표 3. 마찰시험 조건

시험모드	Ball-on-Disk
하 중	50, 100, 200 N
왕복행정	1 mm
왕복주기	50 Hz
총마찰거리	720 m
시험편온도	50, 100, 150℃
시험시간	2 hr

후에는 일정한 값의 마찰계수를 가진다. 각 시료유에 대한 마찰계수는 시험완료 시점에서의 값을 취하였다.

표 3에는 본 시험에 적용한 시험조건을 보여준다. 시험모드, 왕복행정, 주기, 총마찰거리, 시험시간은 모든 시험에서 동일하나, 하중 및 시험편 온도는 경우에 따라서 변경하여 시험을 수행하였다. 볼 및 디스크의 재질은 베어링강 (SUJ2)이며 볼의 직경은 10 mm이다. 마모량은 시험 후 광학현미경을 이용하여 볼에 발생된 마모흔의 직경을 측정하여 구했다.

3. 결과 및 검토

3-1. 마찰저감제에 의한 마찰, 마모특성의 변화-기유에의 첨가 효과

하중 200 N, 시험온도 50 및 100℃에서 윤활기유 A 및 마찰저감제 첨가유 B-G로 윤활하는 마찰시험을 실시하였다. 그림 3은 각 시료유에 대한 시험온도 50 및 100℃에서의 마모량을 마모흔의 직경으로 나타낸 것이다. 지방산아민형 마찰저감제를 사용한 오일 F와 스테아린산을 첨가한 오일 G를 제외한 모든 시료유는 기유인 오일 A보다 향상된 마모방지성을 가진다. 특히 오일 G는 스카핑을 일으킴으로써 첨가된 스테아린산이 이 시험조건에서는 악영향을 미침을 알 수가 있다. 오일 B, C, D, E의 경우 100℃ 보다 50℃의 저온시험조건에서 마모감소 효과가 크며, 특히 MoDTC를 첨가한 오일 B는 마모량이 40% 이하로 감소한다. 그러나, 100℃의 고온조건에서는 오일 D, E의 마모감소 효과가 없어지며, 유용성 몰리브덴 첨가제를 함유한 오일 B, C에서도 감소효과가 떨어진다.

그림 4에는 동일 시험에서 얻은 마찰계수를 기준유(오일 A)에 대비한 감소율로 나타낸다. 오일 D, E, F는 뚜렷한 마찰감소 효과를 가지지 못하는 반면, MoDTP를 첨가한 오일 C는 50 및 100℃ 모두의 시험조건에서 약 30%의 마찰계수 감소효과를 보이며, MoDTC 첨가유인 오일 B는 50℃ 조건에서 약 20%의

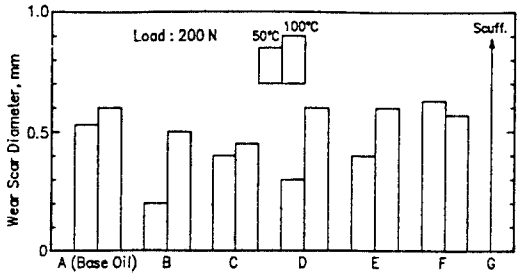

그림 3. 마찰저감제의 첨가에 따른 마모량의 변화(기유+FM)

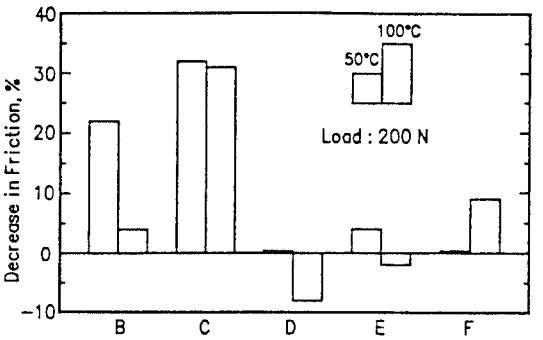

그림 4. 마찰저감제의 첨가에 따른 마찰계수의 변화(기유+FM)

감소효과를 나타내나 100℃의 조건에서는 그 효과가 없어짐을 알 수 있다.

그림 5에는 시료유 A-F에 대하여 시험온도의 증가에 따른 마모량과 마찰계수의 변화관계를 나타낸다. 기유인 오일 A 및 첨가유인 오일 B, C, D, E는 시험온도의 증가에 따라 마모량과 마찰계수도 함께 증가하나, 오일 F는 고온에서 오히려 감소되는 반대의 결과를 가진다. 이는 전자의 오일들에 첨가된 마찰저감제들은 그 효과가 고온에서 상대적으로 감소되고, 후자는 고온에서 오히려 효과가 증대된다는 것을 의미한다. 또한, 마찰계수의 변화에 대한 마모량의 변화율, 즉 그림 4에서의 기울기가 모두 시료유에 대하여 같은 결과를 보여준다. 오일 A, B, E의 데이터는 거의 동일 직선상에 존재하고 있으나, 오일 C는 좌상측으로 비교적 벗어나 있어 마모저감 효과보다는 마찰감소 효과가 상대적으로 우수함을 알 수 있다.

3-2. 마찰저감제에 의한 마찰, 마모특성의 변화-엔진유에의 첨가 효과

3-2-1. 시험온도의 영향

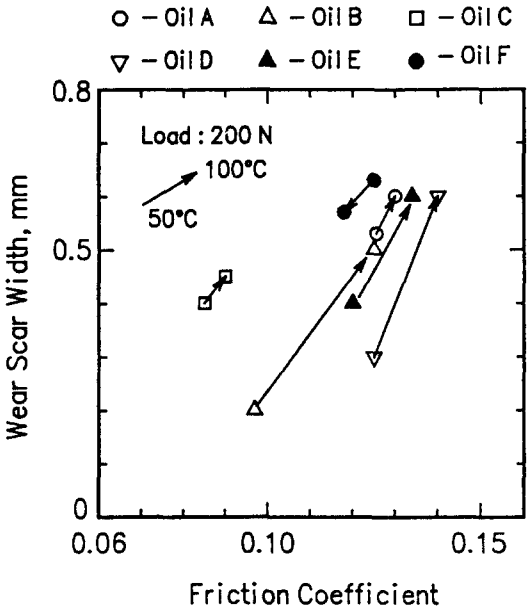

그림 5. 마모량과 마찰계수의 관계(기유+FM)-시험온도의 영향

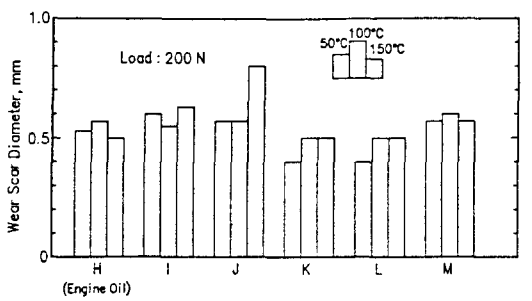

그림 6. 마찰저감제의 첨가에 따른 마모량의 변화(엔진유+FM)

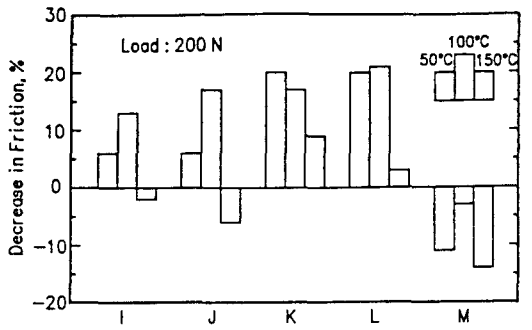

그림 7. 마찰저감제의 첨가에 따른 마찰계수의 변화(엔진유+FM)

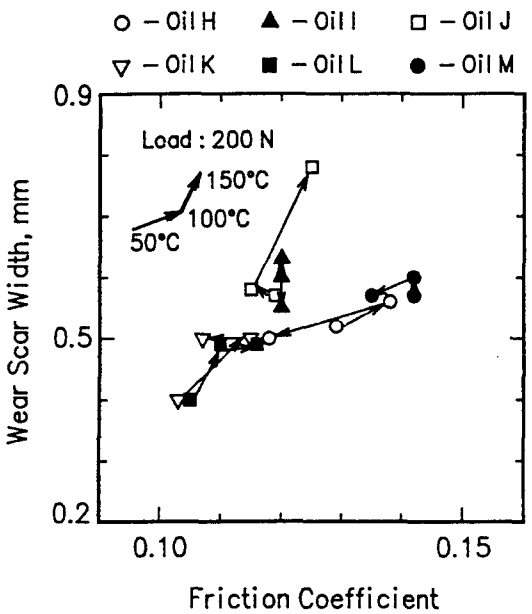

그림 8. 마모량과 마찰계수의 관계(엔진유+FM)-시험온도의 영향

하중 200 N, 시험온도 50, 100, 150℃에서 개솔린 엔진유 H 및 마찰저감제 첨가시료유 I-M으로 윤활하는 마찰시험을 실시하였다. 그림 6에는 각 시료유에 대하여 시험온도의 변화에 따른 마모량의 변화를 나타낸다. 무첨가 엔진유 A 및 첨가유 I, M의 경우 시험온도의 변화에 따른 마모량에 큰 차이가 없으며, 마찰저감제의 첨가에 따른 마모량의 변화도 크지 않음을 알 수 있다. MoDTP를 첨가한 오일 J는 50, 100℃에서의 마모저감 효과가 없을 뿐 아니라 150℃의 고온조건에서 오히려 마모량이 50% 이상 증가시킨다. 오일 K, L만은 저온조건(50℃)에서 마모저감 효과를 가지고 있으나, 온도의 증가에 따라 그 효과가 없어진다.

그림 7에는 동일시험에서 얻어진 마찰계수의 감소율을 나타낸다. 유용성 몰리브덴 첨가유인 오일 I, J는 50, 100℃의 시험조건에서 10% 전후의 마찰저감 효과가 있으나, 150℃의 고온조건에서는 그 효과가 없어지거나 오히려 악영향을 미치는 것을 알 수 있다. 오일 K, L은 최고 약 20%로 우수한 마찰저감 효과를 보이는데, 저온에서 특히 우수하며 고온에서는 그 효과가 저하된다. 오일 M의 경우는 모든 온도조건에서 오히려 마찰계수를 증가시키고 있어, 여타 표면활성 첨가제와의 상응성이 좋지 않음을 나타낸다.

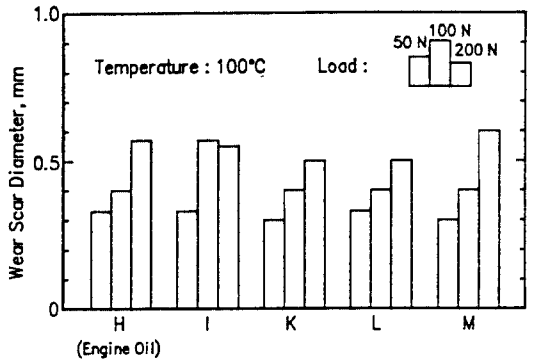

그림 9. 마찰저감제의 첨가에 따른 마모량의 변화(엔진유+FM)

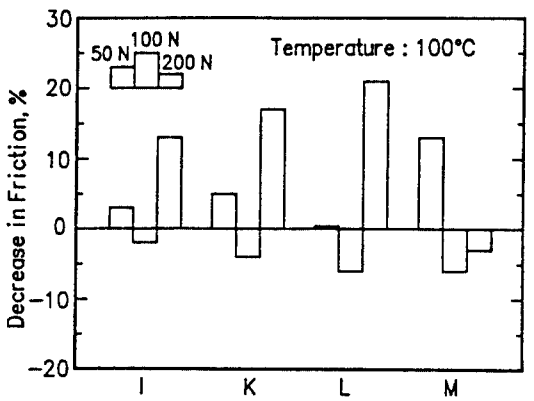

그림 10. 마찰저감제의 첨가에 따른 마찰계수의 변화(엔진유+FM)

그림 8에는 시료유 H-M에 대하여 온도조건의 변화에 따른 마모량과 마찰계수의 변화관계를 나타낸다. 오일 H, K, L, M의 데이터는 그림에서 보듯이 거의 한 직선위에 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 그림 5의 기유의 경우와 비교해 볼 때, 엔진유의 경우 그 기울기가 보다 완만하여, 시험온도의 변화 및 마찰저감제의 첨가에 따른 마모량의 변화가 적은 반면 마찰계수의 변화는 상대적으로 크다. 이는 엔진유에 함유되어 있는 마모방지제가 그 작용을 충분히 하고 있으며, 마찰저감제의 첨가가 마모방지성에 미치는 영향이 상대적으로 적다는 것을 의미한다.

한편 유용성 몰리브덴 첨가유인 오일 I, J는 타 오일과 다른 결과를 보이는데, 특히 오일 J는 저온조건(50℃)에서는 여타 오일과 비슷한 값을 가지나, 온도의 증가에 따라 마모가 급격히 증가되기 때문에 사용에 주의가 필요한데, 시험온도 100℃에서 150℃로의 변

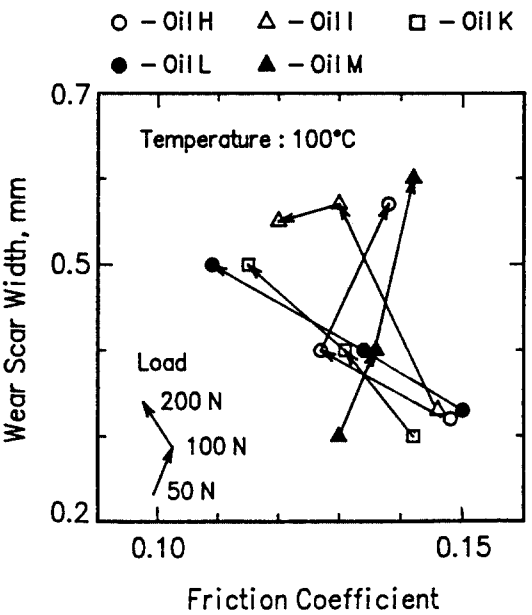

그림 11. 마모량과 마찰계수의 관계(엔진유+FM)-시험하중의 영향

화 기울기가 그림 5에서의 변화와 거의 같게 되는 것은 마찰저감제의 영향으로 마모방지제가 금속표면 보호작용을 하지 못하게 된다는 것을 의미한다.

3-2-2. 시험하중의 영향

일정온도(100℃)에서 하중을 50, 100, 200 N로 변화시켜, 엔진유(H) 및 마찰저감제 첨가유(I, K, L, M)로 윤활하는 마찰시험을 실시하였다. 그림 9에는 각 시료유에 대하여 하중의 변화에 대한 마모량의 변화를 나타낸다. 시료유 사이에 큰 차이가 없으며, 하중의 증가에 따라 마모량도 증가되는 서로 유사한 결과를 보이고 있다.

그림 10에는 동일시험에서의 마찰계수 감소율을 나타낸다. 오일 I, K, L의 경우 서로 유사한 경향을 보이고 있는데, 저하중(50, 100 N)에서의 마찰계수 변화는 적으나 200 N의 고하중시험에서는 약 10~20 %의 감소율을 나타낸다. 오일 M은 50 N의 저하 중에서 10% 이상의 감소율을 보이나, 100 N 이상의 고하중 영역에서는 그 효과가 없어진다.

그림 11에는 하중조건의 변화에 따른 마모량과 마찰계수의 변화 관계를 나타낸다. 오일 H의 경우 저하중(50 N)에서의 마찰계수가 0.15, 마모량이 0.33 mm인데, 하중 100 N에서는 마모가 증가하나 마찰계수는 감소하며, 200 N에서는 마모 및 마찰계수가 모두

증가된다. 오일 M을 오일 H에 비교하여 검토하면, 하중 50 N에서 마찰계수를 약 0.02 감소시키고 마모도 소량 감소시키는 효과가 있으나, 100 및 200 N에서는 마모량 및 마찰계수를 조금 증가시키나 그 변화는 적다. 반면 오일 K, L은 200 N에서 마모량 및 마찰계수를 크게 감소시키고 50 및 100 N에서는 약간 마찰계수를 증가시키나 이 하중에서의 영향은 적다. 즉, FM3 및 FM4는 200 N의 고하중영역에서, 그리고 FM5는 50 N의 저하중 영역에서 효과가 있으나, 효과가 없는 영역에서는 오히려 약간의 역작용이 있음을 알 수 있다.

MoDTC를 첨가한 오일 I는 하중 200 N에서의 마찰저감 효과는 크나, 100 N에서 마모가 오일 H에 비하여 약 40% 증가되어, 엔진유의 마모방지성에 악영향을 주는 것으로 판단된다.

본 연구에서 검토한 모든 마찰저감제는 그 작용영역은 서로 다르나 마찰 및 마모의 제어에 효과가 있음을 알았다. S화합물은 조건에 따라서는 마모를 증가시키는 것으로 알려져 있는데, 황화철을 형성시킴으로써 부식마모가 증가된다는 작용기구가 제안되어 있다[15].

유용성 유기몰리브덴 첨가제인 MoDTC, MoDTP는 마찰면에서 분해되어 MoS_2를 주체로 하는 표면막을 형성함으로써 마찰마모특성을 개선하는 것으로 알려져 있다[16]. 마찰저감제의 작용에는 엔진유에 포함되어 있는 여타 첨가제가 영향을 미치는데, 청정분산제는 MoS_2를 오일내에 안정하게 분산시켜 표면에서의 작용을 방해하며, S를 분자내에 가지는 극압첨가제는 MoS_2의 형성을 촉진시키는 상승효과가 있으며, 마모방지제인 ZDDP(Zinc Dialkyl Dithiophosphate)의 분해생성물은 MoS_2의 표면부착을 도운다는 보고 등이 있다[16, 17].

마찰저감제의 작용기구는 그 종류에 따라 다른데, 마찰면에서의 물리화학적 흡착, 분해, 보호막생성, 표면반응막 생성 등이 제안되어 있다[18]. 본 연구에서는 흡착에 의하여 마찰저감 작용을 하는 지방산아민계(FM5) 첨가제는 비교적 저하중에서 효과가 있으며, 분해 및 반응을 수반하는 MoDTC, MoDTP 등은 고하중에서 더 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 마찰저감제는 종류에 따라서 표면에서 마모방지제와의 경쟁흡착 및 어브레시브한 분해물의 생성 등으로 마모를 증가시킬 수도 있다[2].

4. 결 론

마찰저감제 첨가유의 마찰, 마모 특성을 조사하기 위하여 SRV 시험기를 사용하여 하중과 온도를 변경시키는 윤활 조건하에서 수행한 마찰시험의 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유용성 몰리브덴계 마찰저감제의 마찰저감효과는 전반적으로 우수하나, 고온 및 고하중의 일정 영역에서 각각 타첨가제보다 월등히 많은 마모를 발생시키고, 마찰저감효과도 저하되는 경향이 있어, 사용시에는 충분한 검토가 필요하다.

(2) 분산형 MoS_2 첨가제(FM3)와 무회형 첨가제(FM4, FM5)는 전반적으로 우수한 마찰저감 및 마모감소 효과를 나타내었는데, FM3과 FM4는 특히 고하중영역에서 마찰저감효과가 우수하며, 지방산아민형인 FM5는 저하중영역에서 마찰저감효과가 크다. 그러나, 효과가 없는 영역에서는 오히려 약간의 역작용이 있다.

작용영역이 서로 다른 첨가제들의 병용을 통한 마찰저감작용의 상승효과가 기대되는데, 향후의 연구과제로 삼고자 한다.

참 고 문 헌

1. O. Pinkus and D.F. Wilcock, The Role of Tribology in Energy Conservation, Lubrication Engineering, 34 (1978) 599-610.
2. C.Y. Tung, S.K. Hsieh, G.S. Huang and L. Kuo, Determination of Friction-Reducing and Antiwear Characteristics of Lubricating Engine Oils Compounded with Friction Modifiers, Lubrication Engineering, 44, 10 (1987) 856-865.
3. T. Yoshioka and S. Yoshida, Performance Characteristics of Fuel Efficient Motor Oil, トヨタ技術, 33, 2 (1983) 242-251.
4. J.G. Damrath and A.G. Papay, Fuel Economy Factors in Lubricants, SAE Paper 821226.
5. H. Hamaguchi, Y. Maeda and T. Maeda, Fuel Efficient Motor Oil for Japanese Passenger Cars, SAE Paper 810316.
6. M. Hoshi, Current Status and Future Trends of Tribology in Automobile Industry, 自動車技術, 45, 4 (1991) 6-12.
7. K. Hamai, Friction Reducing Technology for Improving Fuel Consumption of I.C. Engine, 自動車技術, 45, 4 (1991) 39-46.
8. C.A. Passut and R.E. Kollman, Laboratory Techniques for Evaluation of Engine Oil Effects on Fuel Economy, SAE Paper 780601.
9. W.B. Chamberlin and J.D. Sannders, Screening Tests Used for Developing Fuel-Efficient Engine Oils, Lubrication Engineering, 36, 2 (1979) 69-80.

10. D.H. Heath, J.G. Brown, G.R. Farnsworth, R.J. Patrick and T.L. Zahalka, ASTM's Development of the Sequence VI Fuel Efficient Engine Oil Dynamometer Test, SAE Paper 872120.
11. J.E. Clevenger, D.C. Carlson and W.M. Kleiser, The Effects of Engine Oil Viscosity and Composition on Fuel Economy, SAE Paper 841389.
12. S. Kennedy and L.D. Moore, Additive Effects on Lubricant Fuel Economy, SAE Paper 872121.
13. J.B. Retzloff, B.T. Davis, M.E. Gluckstein and J.M. Pietras, Fuel Economy Benefits from Modified Crankcase Lubricants, Lubrication Engineering, 35, 10 (1979) 568-576.
14. L.K. Kuo, S.T. Chang, S.K. Hsieh, C.Y. Chu and C.Y. Tung, Fuel Economy Engine Oils via Friction Modifier, Lubrication Engineering, 45, 2 (1988) 81-90.
15. 櫻井俊男, 新版 石油製品添加劑, 辛書房, 1986.
16. 山本雄二, MoDTC による表面膜生成條件とその性狀について, 潤滑學會誌, 36, 3 (1991) 235-241.
17. 松永正久, 固體潤滑ハンドブック, 辛書房, 1978.
18. 染谷常雄, 內燃機關の潤滑, 辛書房, 1987.