

트라이볼로지 관점에서 본 피스톤-실린더계의 연구개발



김 청 균

홍익대 트라이볼로지 연구센터

●1955년생.
●트라이볼로지를 전공하였으며, 윤활역학 해석, 열탄성 접촉역학, 의공학, 폭발에너지 공학에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

자동차의 신엔진 개발시 마찰손실을 고려하여 설계하려는 연구개발 노력은 자동차의 연료 및 오일의 소비를 감소시켜 성능 좋은 엔진을 개발하고자 하는데 있다.

자동차에서 에너지를 절약할 수 있는 방법으로는 크게 외부적으로 공기역학을 이용한 외형설계(aerodynamic design), 내부적으로는 연소효율을 향상시킬 수 있는 엔진설계, 즉 단열엔진의 개발,^(1~3) 터보차저(turbo-charger)의 설치, 마이크로프로세서를 이용한 점화, 연소유동률, 변속장치 등의 제어, 그리고 커넥팅로드와 크랭크축의 베어링, 밸브 트레인 시스템, 피스톤-실린더, 또한 오일펌프, 연료펌프, 물펌프, 팬, 벨트, 에어컨 등과 같은 접촉 운동부의 마찰력에 의한 기계적 손실 감소를 통하여 점진적으로 달성하고 있다.

그림 1에서 보여주고 있는 것처럼 연료에서 얻을 수 있는 에너지의 약 30%는 배기손실로, 약 30%는 실린더의 냉각손실로, 약 15%는 기계적인 마찰손실과 펌핑손실로 허비되며 단지 25% 정도만 유용한 에너지로 이용되고 있다.

냉각계통에 의하여 외부로 손실되는 양을 줄이기 위한 방법으로 피스톤 크라운 부분을 세라믹으로 이용한다든지 또는 피스톤 상층부에 공기층을 두어 연소실로부터 전달되는 열 유동

를 떨어뜨려 엔진의 성능을 향상시키기 위한 방법이 시도되고 있다.⁽⁴⁾ 특히 피스톤-실린더계에서 발생하는 마찰손실은 엔진에서 발생하는 전체 마찰손실의 약 30~40%로⁽⁵⁾ 엔진에서 피스톤-실린더에 관련된 분야의 트라이볼로지적 연구는 대단히 중요하다. 피스톤-실린더계에서의 마찰손실은 피스톤 링에 의한 손실과 피스톤 몸체에 의한 손실로 나뉘어질 수 있고, 이것은 연소가스의 압력, 관성력, 커넥팅로드의 길이 등에 의하여 커다란 영향을 받는다.⁽⁶⁾ 피스톤계에서 마찰에 의한 손실의 크기를 정량적으로 측정하기는 어려우나, 최근 초정밀 센서의 개발에 힘입어 피스톤계에서 발생하는 마찰손실의 크기를 측정하고 있으며,⁽⁷⁾ 이것을 바탕으로 실험식이 완성되어 피스톤계의 마찰손실량을 쉽게 해석할 수 있다.⁽⁸⁾ 또한 고속용 엔진에서 배기과정시 피스톤이 상사점에 도달할 때의 관성력이 동력행정시 얻는 출력보다 크기 때문에 제기되는 경우도 있다. 그래서 많은 연구가 피스톤-링-실린더 사이의 트라이볼로지적 거동을 해석하는데 집중되고 있다.

크랭크축과 커넥팅로드계에서 발생하는 마찰손실은 엔진의 전체 마찰손실중 30~40%에 달하며,⁽⁹⁾ 주로 저널 베어링에 의한 손실이 가장 크고, 오일 시일에 의한 손실도 약간 있다.

그림 2에서는 엔진의 트라이볼로지 요소에 의하여 발생하는 마찰손실을 도표화한 것을 보여주고 있다. Subaru 차종을 이용한 Hoshi

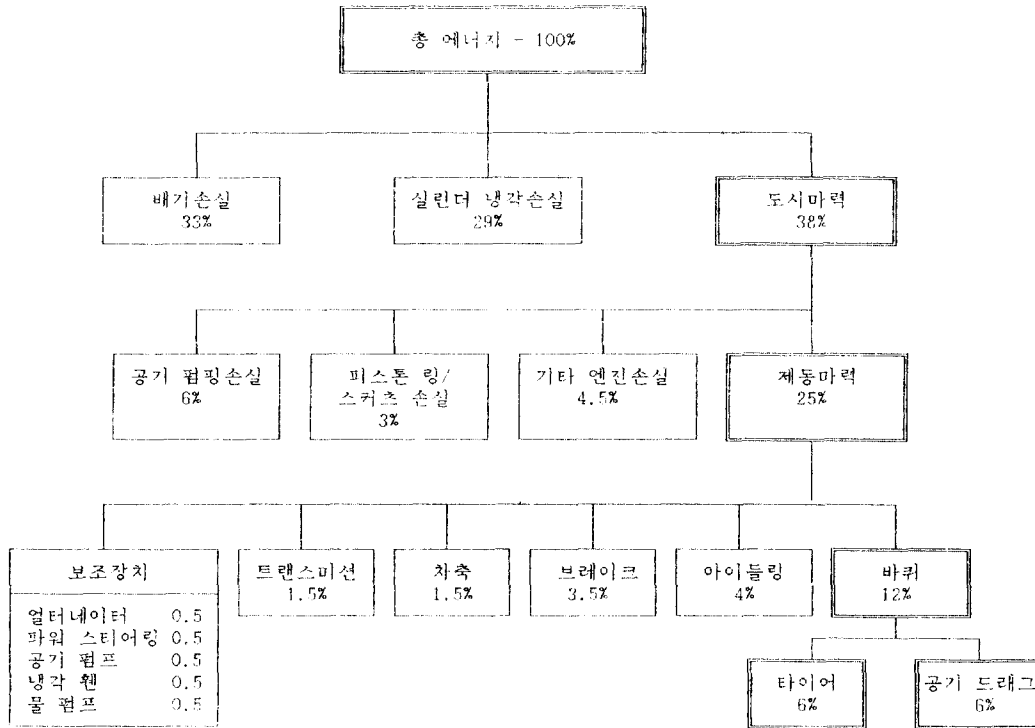


그림 1 시내와 고속도로에서 승용차의 에너지 분해도 (EPA 자료).

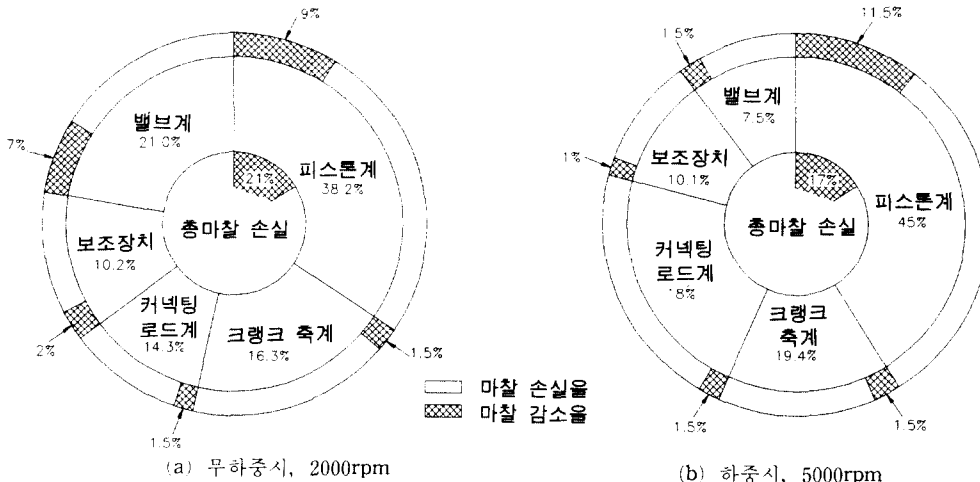


그림 2 전체 마찰손실과 감축효과에 대한 엔진 주요 부품에 대한 마찰분포도(1300cm³, 4기통, OHV, 자동차 엔진으로 SAE 10W-30 윤활유 사용, 유온도 80°C)

의⁽⁹⁾ 마찰손실에 관한 연구결과에 의하면 전체 마찰손실중 17~21%의 마찰을 감소시키게 되면 시내 주행의 경우 약 7% 정도의 연료를 절약할 수 있고, 고속도로 주행의 경우 약 3%의

절약 효과를 기대할 수 있다.

궁극적으로 내연기관에서 발생하는 모든 트라이볼로지 문제를 제기하고 해석하려는 노력은 연료 및 오일의 경제성 향상, 배기가스로 인한 대기오염의 해결, 엔진의 내구성 증가를 통한 시스템의 수명을 연장시켜 저렴하고, 성능 좋은 내연기관을 설계·제작하는데 있다.

2. 엔진 윤활유 기능

그림 3과 같은 자동차 엔진 윤활 시스템이 원만하게 운용되기 위해서는 접촉 운동면에 윤활유를 적절하게 공급하여 윤활작용이 원활하게 이루어지도록 해야 한다. 엔진에서 윤활 시스템은 운동면에서의 마찰손실을 감소시키고, 마멸을 방지할 수 있게 된다. 엔진에서 사용되는 윤활유의 일반적인 기능을 보면 감마작용, 냉각작용, 기밀작용, 세정작용, 압력분산작용, 방청 및 방식작용의 역할을 한다.

(1) 윤활작용

마찰 운동면에 윤활유를 공급하여 마찰 에너지에 의한 손실을 감소시켜 엔진의 성능 향상에 기여하는 윤활작용은 대단히 중요하다. 엔진의 구동부가 원활한 운동을 하기 위해서는

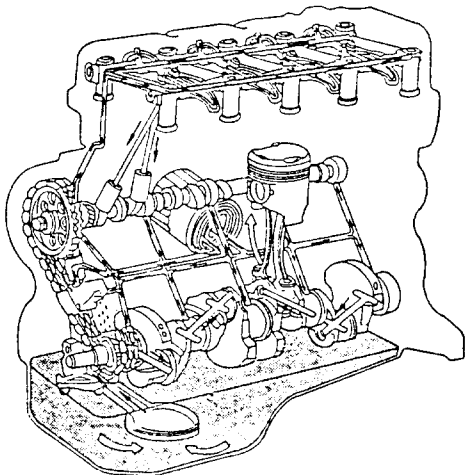


그림 3 엔진의 윤활시스템

우수한 윤활제의 선정과 적절한 윤활공급장치의 설계가 필요하다.

(2) 냉각작용

오일 펌프에 의하여 엔진 내부를 순환하는 윤활유는 엔진의 각종 마찰부위에서 발생하는 마찰열과 연소되면서 피스톤이나 실린더벽에 전달되는 연소열을 흡수하여 오일 팬으로 전달하는 열전달 매체의 기능을 갖고 있다.

윤활유에 의한 냉각기능이 떨어지게 되면 마찰열에 의한 접촉 운동면의 손상이 쉽게 예상되므로 윤활성능을 감시하기 위하여 자동차에 유압계나 적색 경고등을 설치하고 있다.

(3) 기밀작용

연소실내의 연소가스가 피스톤-실린더 사이의 간극을 통하여 크랭크 케이스로 누설되지 않고 피스톤 상부에 작용하여 엔진출력 향상에 기여하도록 하는 피스톤-실린더 사이의 윤활유막에 의한 밀봉작용을 말한다.

실린더의 접촉 운동면에 유막이 형성되지 않으면 연소실내의 연소가스가 크랭크 케이스 내로 누설되면서 엔진의 출력저하, 오일링의 산화, 윤활유의 노화현상이 진행되고, 윤활유가 연소실내로 유입하게 되면 윤활유가 소모될 뿐만 아니라 배기가스 오염에 중대한 영향을 주게 된다.

(4) 세정작용

엔진 윤활유는 마찰면에서 발생하는 마멸입자, 연소 생성물, 산화물질, 수분, 먼지나 침입된 이물질을 제거하는 세정작용을 한다.

오일에 의하여 크랭크 케이스로 운반된 각종 이물질 중에서 수증기나 연소가스와 같은 가스 성분은 통풍을 시켜줌으로써 제거되고, 비중이 높은 이물질은 침전이 되나 비중이 낮아 윤활유 중에 부유되는 이물질은 여과기에 의하여 대부분 제거되고 있다.

(5) 압력분산작용

엔진이 비정상적인 연소에 의하여 발생하는 충격하중이나 자동차 주행중에 도로여건이 나쁘거나 돌발사태의 발생, 또는 운전미숙 등에 의한 충격력은 윤활 운동면에 불안정하게 형성

된 얇은 유막을 파괴시키면서 접촉 운동면을 손상하게 된다. 윤활 운동면에 우수한 유막을 형성시키게 되면 이와 같은 충격력을 흡수하여 완화시키는데 이와 같은 감쇠작용을 압력분산 작용이라 한다.

(6) 방청 및 방식작용

윤활유가 노화나 열화현상이 진행되면서 윤활유에 함유된 산화물, 수분 등에 의하여 접촉 운동면에 부식이 발생된다. 운전중에 발생하는 마찰열에 의하여 산화된 윤활유나 연료의 산화 생성물로 인하여 베어링 등에 부식이 진행되거나, 엔진이 정지하게 되면 온도가 낮아지면서 연소 생성물이나 윤활유 중에 포함되어 있던 수분이 금속면에 접촉하게 되면서 부식이 촉진된다. 부식을 방지하기 위하여 윤활유에 유성항상제나 부식 방지제와 같은 첨가제를 사용하는 것이 유용하다. 윤활이 필요한 주요 엔진 구동부는 피스톤과 실린더 사이, 특히 피스톤 링의 윤활조건이 가장 중요하고, 크랭크축, 베어링, 캠, 오일펌프, 밸브, 밸브트레인 등이 있다.

3. 피스톤-실린더계에 대한 연구동향

피스톤-실린더계에서 발생하는 트라이볼로지적 문제를 해결하기 위하여 그 동안 이론 또는 실험적으로 진행되어온 피스톤-실린더계에 대한 연구 동향을 개략적으로 분류하면 다음과 같다.

- 1) 정지 또는 작동중인 피스톤의 온도 분포
- 2) 유막의 온도분포
- 3) 피스톤-실린더 내에서 발생하는 마찰력의 크기⁽⁹⁾
- 4) 유막의 두께 및 강성도^(10,11)
- 5) 피스톤 링에서의 마찰현상 해석^(12,13)
- 6) 마멸현상의 해석⁽¹⁴⁾
- 7) 유막의 압력 분포
- 8) 마찰,⁽¹⁵⁾ 마멸, 윤활의 오일 또는 연료 소비율과의 관계
- 9) 피스톤 스커츠와 실린더내경 사이의 상호 관계

- 10) 오일 소비율에 대한 피스톤 간극의 역할^(16,17)
- 11) 내구성 검토
- 12) 피스톤 또는 링의 동역학적 거동
- 13) 간극을 통한 블루바이(blow-by) 현상⁽¹⁸⁾
- 14) 링의 동역학적 거동이 오일 소비율과 블루바이에 미치는 영향⁽¹⁹⁾
- 15) 접촉 운동면의 상태(경계윤활, 유체윤활, 혼합윤활 등)에 따른 성능 해석
- 16) 피스톤 링과 실린더에서 표면조도의 역할(breaking 기술과 연관)⁽²⁰⁾
- 17) 연료 및 오일의 특성에 따른 부식 특성
- 18) 윤활계의 마찰 및 마멸에 대한 영향⁽²¹⁾
- 19) 재질에 관련된 연구, 특히 세라믹 관련 연구^(22~24)
- 20) 메탄올 연료 사용에 따른 실린더 상부에서의 부식마모 연구^(25~28)
- 21) 메탄올 연료의 사용에 따른 엔진오일의 기능 약화 연구

4. 연구개발 설계 예

엔진에서 피스톤-링-실린더계의 설계는 내연기관에서 핵심이 되는 부분으로 성능 향상(마찰력 감소, 밀봉기능 향상 등)을 통한 에너지(연료, 오일 등) 절약방안에 대한 그 간의 연구 개발에서 고려되었던 여러가지 방안에 대하여 간략하게 요약하면 다음과 같다.

- 1) 피스톤의 중량 감소
 - 관성력의 감소
 - 연료 소비율의 감소
 - 마찰력의 감소
 - 강성도의 약화
 - 온도 상승
 - 국부적인 접촉압력 증가
 (설계 예)
 - X-피스톤(AE BORGIO Spa, Italy, 1984)
 - (Alfa Romeo 엔진에서 채택)⁽⁵⁾
 - CA 20 엔진(Nissan Motor Co.,

Japan, 1982)

- 피스톤 어셈블리 -11% 감축
- 크랭크축 -32% 감축
- 커넥팅 로드 -29% 감축
- 기타

2) 피스톤의 스커츠 길이 감축

- 마찰손실 감소
- 중량 감소
- 관성력의 감소
- 엔진 높이의 감소
- 접촉압력 증가
- 온도 상승
- 밀봉 기능 저하
- 피스톤의 동적 안정성 약화

3) 접촉 단면적의 축소

- 마찰손실 감소
- 피스톤 안정성 향상
- 중량 감소
- 오일 소비율 감소
- 유막 형성의 어려움
- 블루바이현상 증가
- 국부적인 접촉압력 상승
- 국부적인 온도 상승
- 제작이 완벽하지 않으면 피스톤의 경사지는 현상 증가

(설계 예) AEConoguide 피스톤

4) 피스톤의 압축 높이 단축(3링→2링)^(29,30)

- 마찰손실 감소
 - 엔진의 소형화
 - 중량 감소
 - 동력 향상(약 4%)⁽²⁹⁾
 - 피스톤 제작비 감소
 - 연료 소비율 감소
 - Blow-by현상의 증가
 - 피스톤 크라운부의 온도 상승
 - 오일 소비율 증가
- (설계 예) 일본 Nippon 피스톤 링(주)의 피스톤 링

5) 공기막을 이용한 피스톤

- 냉각제통에 의하여 제거될 열량의 감소

○물 펌프 용량 감소

○팬 펌프 용량 감소

○소음 감소

6) 세라믹을 이용한 피스톤

- 냉각제통에 의하여 제거될 열량의 감소
- 물 펌프 용량 감소
- 팬 펌프 용량 감소
- 소음 감소

7) 피스톤 링 폭의 감소

8) 핀과 핀보스의 소형 경량화

9) 커넥팅 로드와 소형 경량화(중공식 커넥팅 로드)

5. 엔진개발에서 트라이볼로지의 역할

궁극적으로 피스톤-실린더에 관련된 엔진설계를 향상시키기 위한 연구 추이는 핵심 요소 및 시스템의 성능향상, 특히 1990년대에는 환경보전에 관련된 연구개발, 즉 배기가스, 소음 규제에 관련된 신기술 개발로 나가고 있다. 전통적인 피스톤-실린더 방식의 자동차 기술과 환경보전에 관련된 기술이 적절하게 조화를 이루면서 최근의 시대적 요구를 충족시키기 위한 트라이볼로지의 역할은 다음과 같다.

- 1) 밀봉기술 개발을 통한 저 블루바이(low blow-by)의 달성
- 2) 오일 기능향상을 통한 오일 소비율의 감소
- 3) 마찰손실 감소를 통한 연료소비 절감
- 4) 내마모성 향상을 통한 엔진의 수명연장
- 5) 마찰 및 마멸에 관련된 데이터의 체계화
- 6) 속도증가를 통한 엔진의 출력향상
- 7) 연료, 오일과 배기가스와의 상관관계 해석
- 8) 열변형에 따른 안정성 검토
- 9) 대체연료개발(알콜, 메탄올, CNG, LPG)에 따른 부식특성 해석
- 10) 진동, 소음, 마찰 및 마멸에 관련된 피스톤의 동역학적 해석
- 11) 세라믹 엔진개발을 위한 접합기술의 개발
- 12) 저마찰 패드식 피스톤 개발
- 13) 저가의 세라믹 피스톤 개발

- 14) 공기막 단열 피스톤 개발
- 15) 연료와 윤활유가 대기오염에 미치는 영향에 관한 연구
- 16) 폐 윤활유의 처리 대책 연구

6. 맺음말

신엔진 개발에서 동력을 증대시키려는 연구와 얻어진 에너지가 엔진을 구동시키기 위한 내부에너지로 소비되지 않고 가능한 재동마력으로 보내려는 에너지 절약의 측면에서 접근하려는 연구가 있다. 전자의 연구개발은 연료와 공기의 열유동 해석, 혼합비 조절, 점화시기 및 방법, 연료의 선정, 터보차저의 설치, 즉 엔진에 공급되는 고열원부의 열량 Q_H 를 증가시키든지 또는 대기중으로 방출하는 저열원부의 열량 Q_L 을 어떻게 감소시키느냐에 관심을 가지고 있는 연구이다.

그러나 후자의 경우는 이미 생산된 에너지를 가능한 한 소비시키지 않고 모두 재동마력으로 보내도록 노력하는 연구, 즉 트라이볼로지에 기초를 둔 연구개발 분야이다. 엔진개발에서 트라이볼로지의 역할은 대단히 중요하나 기술 자체가 대단히 미시적이기 때문에 신기술 개발이 대단히 어려우며, 이 분야의 필요성이 크게 대두된 것도 십수년 전에 불과하므로 기술축적이 많이 안된 분야 중의 하나이다.

앞에서 기술한 것처럼 트라이볼로지 기술의 필요성이 현저하게 부각되기는 하였지만 해결하기가 대단히 어려운 분야이다. 그러나 일단 섬세하고도 미시적인 트라이볼로지 기술의 벽을 극복하면 큰 효과를 발휘하게 된다. 고도의 첨단기술을 개발하고 적용해야 하는 선진기술국에서는 에너지 절약의 측면보다는 새로운 기술개발의 측면에서 트라이볼로지 기술을 적극적으로 지원하고 있다.

참고문헌

(1) Kamo, R., Bryzik, W. and Glance, P., 1987,

"Adiabatic Engine Trends-Worldwide," SAE Paper 870018.

(2) Bupara, S.S., 1979, "Analytical Feasibility Study of a Hydrostatically Supported Piston Ring for Application of Adiabatic Diesel Engines," Mechanical Technology Incorporated, Report MTI-79TR3.

(3) Brombolich, L.J., McCormick, H.E., 1988, "Tribological Aspects of Cylinder Kit Systems in Adiabatic Engines," SAE 880018.

(4) Parker, D.A. and Donnison, G.M., 1987, "An Air-Gap Insulated Piston," Industrial Lubrication and Tribology, pp. 124~131.

(5) Dann, R. T., "Auto Engines: Goodbye to Conventional Design," Machine Design, pp. 62~71.

(6) Hoshi, M. and Baba, Y., 1987, "A Study of Piston Friction Force in an Internal Combustion Engine," ASLE Trans. Vol. 30, No. 4, pp. 444~451.

(7) Furuhashi, S., 1979, "Measurement of Piston Frictional Force in Actual Operating Diesel Engine," SAE 790855.

(8) Hoshi, M., 1984, "The Study of Piston Friction in Internal Combustion Engine," JSME 61st Spring Annual Meeting, Preprint No. 1002.

(9) Hoshi, M., 1984, "Reducing Friction Losses in Automobile Engines," Tribology Int., Vol. 17, No. 4, pp. 185~189.

(10) Dowson, D., Economou, P. N., Ruddy, B. L., Strachan, P. J. and Baker, A. J. S., "Piston Ring Lubrication-Part II. Theoretical Analysis of Single Ring and a Complete Ring Pack," Ibid, Ref 1, pp. 23~52.

(11) Moore, S. L., 1985, "Piston Ring Oil Film Thickness-The Effect of Viscosity," SAE 850439.

(12) Jakobs, 1983, "Zur Reibung der Kolbenringe bei PKW-Ottomotoren-Rechnerische

- Abschätzung der Reibungs-und Kraftsof-
 ferverbrauchsreduzierung-Ergebnisse Motorischer
 Untersuchungen, Goetze Fachschrift
 K34.
- (13) Kuhlmann, P. F. and Jacobs, R. J., 1985,
 "Possible Reduction in Fuel Consumption by
 Modifying the Piston Rings," IMechE, pp. 33
 ~42.
- (14) Gumbleton, J. J., "Piston Ring and Cyl-
 nder Wear Measurements Illustrate the
 Potential and Limitations of the Radioactive
 Technique," pp. 333~349.
- (15) Kovach, J. T., Tsakiris, E. A. and Wong,
 L. T., 1982, "Engine Friction Reduction for
 Improved Fuel Economy," SAE Paper
 820085.
- (16) Daskivich, R. A., 1980, "Sensitivity of
 New-Engine Oil Economy to Cylinder Bore
 Characteristics," ASME Winter Annual
 Meeting, pp. 1~17.
- (17) Takiguchi, M., Kikuchi, H. and Furuha-
 ma, S., 1988, "Influence of Clearance
 between Piston and Cylinder on Piston Fric-
 tion," SAE 881621.
- (18) McGeehan, J. A., 1979, "A Survey of the
 Mechanical Design Factors Affecting
 Engine Oil Consumption," SAE Paper
 790864.
- (19) Truscott, R., Reid, J. and Ruddy, B., 1983,
 "Ring Dynamics in a Diesel Engine and Its
 Effect on Oil Consumption and Blowby,"
 SAE Paper 831282.
- (20) Rhode, S. M., 1980, "A Mixed Friction
 Model for Dynamically Loaded Contacts
 with Application to Piston Ring Lubrica-
 tion," Proceedings of the 7th Leeds-Lyon
 Symposium on Tribology, Leeds.
- (21) Saville, S. B., Gainey, F. D., Cupples, S.
 D., Fox, M. F. and Picken, D. J., 1988, "A
 Study of Lubricant Condition in the Piston
 Ring Zone of Single-Cylinder Diesel Engine
 Under Typical Operating Conditions," SAE
 881586.
- (22) Wacker, E. and Sander, W., 1982, "Piston
 Design for High Combustion Pressures and
 Reduced Heat Rejection to Coolant," SAE
 Paper 820505.
- (23) Wade, W. R., Harstad, P. H., Rao, V. D.,
 Aimone, M. G. and Jones, C. M., 1987, "A
 Structural Ceramic Diesel Engine-The Criti-
 cal Elements," SAE Paper 870651.
- (24) Parker, D. A., 1985, "Ceramic Tech-
 nology-Application to Engine Components,"
 Proc. Instr. Mech. Engrs., Vol. 199. No. A3,
 pp. 135~150.
- (25) Chamberlin, W. B., 1983, "Lubrication
 Experience in Methanol Fueled Engines
 under Short Trip Service Conditions," SAE
 831701.
- (26) Marbach, H. W., et al., 1983, "The Effect
 of Lubricant Composition on S.I. Engine
 Wear with Alcohol Fuels," SAE 8317012.
- (27) Baisly, H. W., et al., 1981, "Wear Char-
 acteristics of Fleet Vehicles Operating on
 Methyl Alcohol," SAE 811202.
- (28) Chui, G. K., King, E. T. and Pedrys, F.,
 1982, "Evaluation of Lubricants for Meth-
 anol Fueled Engines," Paper C3-1, Proc, 5th
 ISAFT, Auckland, New Zealand.
- (29) Furuham, S., Kojima, M., Enomoto, Y.,
 Yamaguchi, Y. and Kosan, I., 1984, "Some
 Studies on Two Ring-Pistons in Automobile
 Turbocharged Gasoline Engine," SAE Paper
 840183.
- (30) Furuham, S., Hiruma, M. H., Takamat-
 su, H. T. and Shin, K., 1985, "Development
 of a Two Ring-Piston with Low Friction,
 and Small Compression Height without
 Increase in Blow-By, Overheat, and Oil
 Consumption," IMechE, pp. 43~49. 