

자동차 엔진에서 윤활유 관련 트라이볼로지 고장 사례 연구

이일권 · 김청균

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Studies of Oil Related Tribological Failures of Automotive Engines

Il-Kwon Lee · Chung Kyun Kim

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract - This paper presents case studies on the oil related failures in automotive engines. In this study, engine oils play an important roles as a friction reducing materials and should be supplied to a tribological machine elements sufficiently. The starvation or depletion of a lubricant may seriously produce the tribological failures on the rubbing parts of the engine.

Key Words : engine oil, tribological failure, oil depletion, engine tribology, oil film

1. 서론

엔진은 수십개의 움직이는 기능부품으로 구성되어 있으며, 마찰 접촉운동을 해야 하는 개개의 부품은 유막(Oil Film)에 둘러싸여 마찰을 줄이면서 내구성이 확보될 수 있도록 윤활이 원활하게 이루어져야 한다. 만약 윤활유막이 형성되지 않은 상태에서 엔진 부품이 미끄럼 마찰운동이나 회전운동을 하게 되면 금속간의 직접 접촉으로 인한 건조마찰과 이에 따른 마멸이 발생하게 된다.

상대 접촉면의 운동이 원활하게 일어날 수 있도록 하기 위해서는 사용한 엔진오일의 가장 중요한 기능인 금속간의 건조마찰 접촉을 방지할 수 있는 충분한 유막을 형성하여 마찰력 감소와 마멸발생을 최소화시켜서 엔진의 내구성 향상과 수명을 연장하는 것이다. 엔진에서 마찰손실은 상대접촉을 하는 부품 사이에서 발생하는데, 새로운 엔진을 개발할 경우에 엔진의 효율을 높이면서 시스템의 안전성을 확보하기 위하여 엔진내부의 마찰을

감소시키고, 또한 내구성을 보장할 수 있는 트라이볼로지 관련 기술을 많이 필요로 한다. 가솔린 엔진 개발에서 윤활기술이 단순히 5~6%의 기계적 마찰손실 에너지를 줄여 주는 역할의 수행이라기 보다는 마찰 접촉 운동면을 갖는 기능 부품의 손상으로 인한 엔진 자체의 성능 저하내지는 고장으로 연결되는 문제점을 차단할 수 있도록 설계하고 유지·관리하는데 그 중요성이 있으며, 이러한 분야를 총합하여 엔진 트라이볼로지 (Engine Tribology)라 한다.

고온, 고하중, 미세 간극을 갖는 엔진의 상대 접촉 운동면에 유막을 형성하고, 또한 강인한 유막을 유지할 수 있는 고성능 엔진오일이 없다면 새로운 성능을 갖는 엔진개발 노력은 결실을 맺기가 어려울 것이다. 최근의 엔진오일은 유막을 형성하고 마찰을 감소시키는 것 이상의 역할을 필요로 한다.

엔진오일의 또다른 중요한 기능은 엔진내

부에서 발생된 열을 제거해 주는 냉각제로서의 역할이다. 엔진내부에서 발생하는 열은 연소열과 마찰열의 두가지가 있는데, 이 중에서 약 10%는 커넥팅 로드, 메탈 베어링, 캠 축 및 피스톤 링과 같이 피스톤 어셈블리에서 발생하는 마찰열로 반드시 윤활유에 의하여 제거되어야 한다.

본 연구에서는 윤활유가 엔진의 주요 핵심 부품에 대해 작용하는 역할과 윤활유 관련 문제점 및 실제의 고장사례를 연계하여 고찰하고자 한다. 엔진에서 주요 트라이볼로지 기소(Tribological Machine Element)에 대한 고장은 대부분 윤활유에 관련된 것으로 엔진의 특성과 윤활유의 역할을 설계와 관리 측면에서 동시에 이해를 해야 윤활 관련 문제점을 해결할 수 있다.

2. 엔진에서 트라이볼로지의 역할

엔진에서 기계적 효율을 극대화시킬 수 있는 요소로는 설계와 관리의 두가지 측면을 고려할 수 있다. 그 중에서도 윤활유 관련 트라이볼로지 분야는 엔진의 설계에도 직접 참여하지만, 엔진의 성능과 안정성을 확보하기 위한 유지·보수 측면에서 결정적인 역할을 하고 있다.

윤활유의 역할은 마찰 에너지 감소와 고장 기회 축소라는 고전적인 역할 이외에 최근의 배기가스 규제 측면에서 제시되는 각종 환경 기준에도 만족하는 기능이 추가되고 있다. 이와 같은 다양한 요구를 충족시키기 위하여 검토되는 엔진에서의 트라이볼로지 역할을 요약하면 다음과 같다[1].

- 밀봉기술 개발을 통한 저블로바이(Low Blow-By)의 달성[1]
- 유막의 온도, 압력분포 해석을 통한 간극 설계
- 피스톤-피스톤 링-실린더내에서의 발생하는 마찰손실 해석[2]
- 피스톤 링의 동역학적 거동이 오일 소비율과 블로바이에 미치는 영향
- 접촉 운동면의 상태(경계, 유체, 혼합 윤활 등)에 따른 성능 해석
- 피스톤 링-실린더에서 표면조도의 역할[3]
- 연료 및 오일의 특성에 따른 부식 특성
- 엔진오일의 마찰 및 마멸에 대한 영향
- 내마멸성 향상을 통한 엔진의 수명연장
- 엔진 회전수 증가와 엔진의 수명연장
- 연료, 오일과 배기가스와의 상관관계 해석
- 마찰열 변형거동에 따른 안전성 검토
- 진동, 소음, 마찰 및 마멸에 관련된 피스톤의 동역학적 해석

3. 엔진에서의 기계적 마찰 손실

엔진에서 피스톤 및 피스톤 링과 실린더 벽 사이에서의 미끄럼 마찰, 저널부에서의 마찰, 엔진의 운전에 필요한 보조장치를 구동하는데 소비되는 에너지를 총칭하여 기계적 손실이라고 한다.

압축비와 흡기압력을 증가시키면 실린더 내부의 압력은 높아지고, 저널부의 하중이나 피스톤 측면의 압력이 증가하면 기계적 마찰 손실은 증가하는 경향을 나타낸다. 또한 피스톤과 커넥팅 로드부와 같은 운동부의 질량이 커지면 관성력 증가로 인한 문제점이 많

이 발생하고, 특히 엔진의 회전속도가 증가함에 따라서 기계적 손실은 자승으로 비례하여 증대된다. 그러나 이들 모두는 엔진의 상태 접촉 운동면에 윤활유막이 형성되어 있는지 여부에 따라서 크게 달라지고, 이것은 엔진의 내구성과 수명에 직결되는 문제이다.

기계적 마찰손실 중에서 가장 큰 부분을 차지하는 것은 피스톤 및 피스톤 링과 실린더 벽면 사이의 미끄럼 마찰에 의한 것이지만 윤활 상태가 불명확하기 때문에 마찰에너지 손실 문제를 정확하게 예측한다는 것은 대단히 어려운 문제이다. 일반적인 완전 유체윤활을 한다는 저널부의 마찰력은 윤활유의 점성과 공급량, 저널부의 유막압력 및 주변의 속도와 온도에 관계가 깊다.

엔진에서 발생하는 기계적 마찰손실은 가솔린 기관의 경우 5~6%, 디젤 기관의 경우 5~7%이고, 자동차용 가솔린 기관에서 회전속도 변화에 따른 마찰손실과의 관계는 Fig. 1에서 제시하고 있다. 여기서 제시한 결과처럼 기계적 마찰 손실의 40% 정도는 피스톤과 실린더 사이에서 높게 발생되고 있음을 알 수 있다[4].

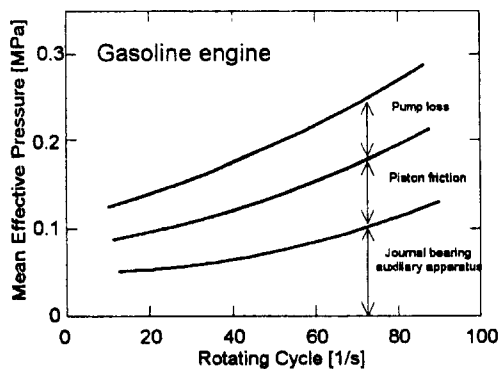


Fig. 1 Frictional mean effective pressure as a function of engine speed.

4. 엔진오일 관련 고장 사례 연구

오일이 엔진내에서 적절한 역할을 수행한다면 엔진오일은 정상적인 주행거리에 대하여 적은 양이 소모되어야 한다. 그러나 엔진은 제작과정에서 밸브 및 밸브 가이드 불량, 실린더 내벽의 가공 상태 불량, 피스톤 및 피스톤 링의 비정상적인 마멸, 각종 시일의 기밀성 불량 및 운전자의 비정상적인 운전습관 등이 복합되어 오일의 소모는 많아지게 된다.

왕복동식 엔진에서 오일의 자연 소모는 불가피하지만, 상기의 문제점을 완화시킨다면 엔진의 성능은 향상되고 오일의 교환주기를 연장시킬 수 있다.

본 연구에서는 엔진의 주요 핵심 부품에서 오일에 관련된 고장 사례를 중심으로 발생 원인과 대책에 대하여 고찰하고자 한다. 엔진의 기계적 마찰손실에 관련된 여러 가지 부품 중에서 오일의 비정상적인 소모에 관련된 고장 사례 몇 가지를 기술하면 다음과 같다.

(1) 밸브 스템 시일의 파손 사례

연소실내로 유입되는 오일은 Fig. 2와 같이 밸브 스템부의 접촉식 러버시일 파손에 관련된다. 밸브가 열리고 닫힐 때 밸브 가이드의 가공불량 또는 밸브 스템 시일의 설계 불량으로 오일은 지속적으로 실린더 내부로 유입하게 된다.

시일의 밀봉성능 불량으로 엔진오일이 밸브 스템을 타고 내려와 실린더로 유입하게 되면 스파크 플러그가 오염되어 점화에 문제

가 발생하고, 또한 연소과정 중에 연료와 함께 불완전 연소가 진행되면서 오염된 배기 가스를 방출하거나 밸브 헤드, 스파크 플러그, 피스톤 상단부의 오일연소 카본이 고착되어 노킹 발생의 원인이 되기도 한다.

이러한 문제점을 접촉식 시일의 내구성 향상을 통한 완벽한 밀봉기능 확보, 밸브 가이드의 가공 정밀도 향상을 통하여 연소실 내부로 유입하는 오일을 완벽하게 차단해야 한다.

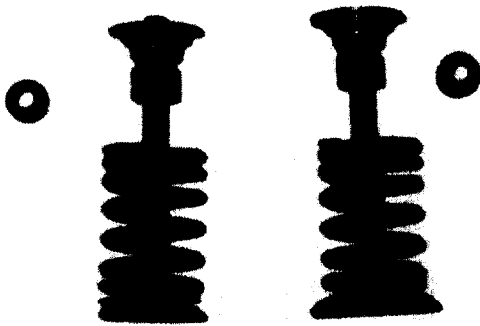


Fig. 2 Failure of oil seal for a valve stem.

(2) 피스톤 링 절개부가 일직선 물림으로 인한 고장 사례

피스톤 링 절개부 간극(Piston Ring Gap)은 조립 또는 열팽창 변형문제를 고려하여 설계하는데, Fig. 3과 같이 피스톤 링의 절개부 간극이 피스톤의 상하 왕복운동 중에 우연히도 일직선으로 배열되는 경우가 발생한다. 이 때에는 엔진오일이 수직 상방향으로 펴뿔하게 되어 피스톤과 실린더 사이의 유막형성에 의한 밀봉작용과 윤활작용을 하기보다는 오일이 과다하게 연소실 내부로 유입되고, 그 결과 불완전 연소로 인한 배기가스가 발생하게 된다.

여기서 피스톤 링 절개부의 일직선화는 부분적으로 유막이 깨지면서 연소가스의 블로바이 현상에 의한 효율감소와 윤활유의 기능저하에 따른 수명단축이 예상된다. 또한 피스톤 링 절개부의 일직선화는 오일의 지속적인 연소실 유입으로 유해 배기가스 문제가 발생하고, 지속적인 윤활유 부족으로 인한 여타 미끄럼 마찰부에서의 트라이볼로지적 문제점이 급격하게 증대된다.



Fig. 3 Piston rings which are adjusted in a column.

(3) 피스톤 마찰면의 마멸 사례

Fig. 4는 피스톤과 실린더 내벽 사이에 윤활작용이 원활하게 공급되지 못할 경우에 발생할 수 있는 피스톤 벨트(Piston Belt)와 스커츠(Skirt) 부분의 마멸 형상을 보여주고 있다. 피스톤의 벨트부는 피스톤 링과 오일 링을 갖고 있는 부분으로 연소실의 압축 및 연소압력을 유지해주는 기능과 오일을 이들 마찰 간극에 원활하게 공급해주는 역할을 한다. 또한 피스톤 스커츠는 피스톤의 동적 안

정성(Dynamic Stability)을 충분히 확보할 수 있도록 접촉면적을 충분히 확보한 구역이다.

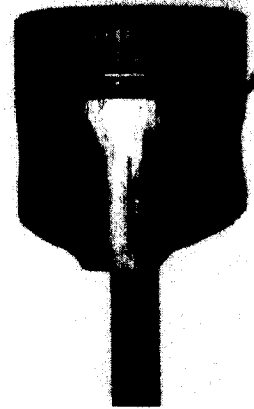
Fig. 4(a)에서 제시한 고장 사례는 피스톤과 실린더 사이에 윤활유막이 형성되지 않아서 피스톤의 상하 왕복운동시 피스톤 핀과 90° 되는 구역에 연삭마멸이 심하게 발생된 경우를 보여주고 있다. 이때에 유막 파손으로 인한 피스톤 링의 마멸 진행과 이어서 피스톤이 손상을 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4(b)에서 보여준 피스톤 스커츠에서의 마멸은 피스톤 핀의 유막간극 설계 불량, 피스톤 핀의 가공불량 또는 크랭크 케이스로부터의 오일 유입량 부족으로 인하여 피스톤의 스커트 부위가 손상된 경우이다. 피스톤 핀이 손상되면 피스톤은 상하 왕복운동시 유격이 발생하게 된다. 이 유격으로 인해 피스톤 스커트부와 실린더 내벽이 스커핑 마멸됨으로 실린더 내벽과 피스톤 링 사이의 실린더 간극이 규정값보다 크게 되면서 이곳을 통하여 오일이 연소실로 유입된다.

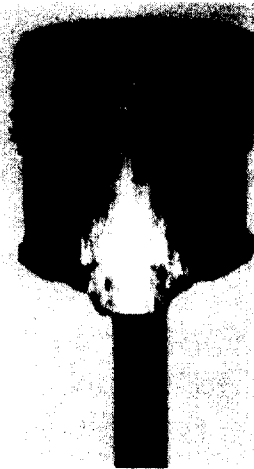
이러한 고장사례는 특히 공급되는 윤활유 부족이 주원인이 되고, 폭발압력으로 측벽면에 가하는 충격력, 피스톤 링과 실린더 사이의 유막설계 불량, 마찰면에서의 가공 정밀도 및 진원도의 문제점 등에 대한 트러블 슈팅이 있어야 한다.

(4) 메탈 베어링의 마멸 사례

Fig. 5에서는 엔진오일의 부족으로 인하여 커넥팅 로드의 대단부 캡과 크랭크축 사이의 메탈 베어링이 마멸되어 고착된 사례를 보여주고 있다. 엔진에서 메탈 베어링은 피스톤의 커넥팅 로드로부터 오는 전달력을 받아서



(a) Wear on the piston surface



(b) Wear on the skirt

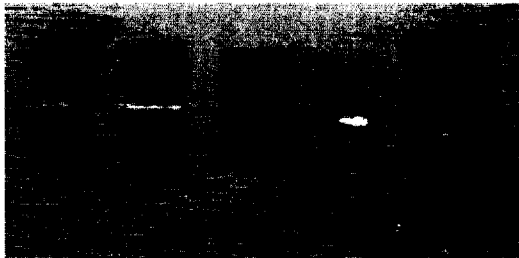
Fig. 4 Failure of piston ring belt and skirt.

크랭크축에 원활한 회전운동 에너지로 전환시켜 주는 역할을 수행한다.

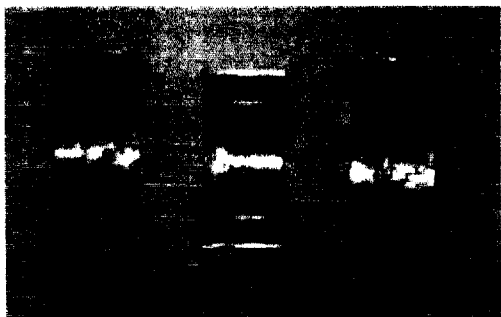
메탈 베어링은 720° 회전마다 연소실로부터 폭발 에너지에 의한 충격력을 받으므로 반드시 충분한 윤활유막을 형성시켜서 이들 충격력을 받아주어야 연소실로부터 전달되는

불규칙한 하중을 원활하게 크랭크축이 회전 운동을 할 수 있도록 한다. 그러나 크랭크축 내부에서 공급된 윤활유가 부족하면 베어링은 유체마찰에서 경계마찰 또는 금속간의 마찰로 변하면서 저널 베어링은 Fig. 5에서 제시한 고장 사례처럼 마멸, 시저 등 다양하게 손상을 받게된다.

Fig. 5(a)는 연삭마멸, Fig. 5(b)는 스커핑 마멸과 부식마멸이 진행된 사례로 윤활유 부족 또는 윤활유의 기능 저하로 기인한 마멸 모델을 보여주고 있다. 여기서 윤활유막의 파손은 마찰면에서의 마멸이 계속 진행되면서 소음과 진동을 수반하고, 궁극적으로는 마찰면이 용융되거나 열크랙의 발생으로 베어링은 회전운동 기능을 상실하게 된다.



(a) Abrasive wear



(b) Scuffing and corrosive wear

Fig. 5 Wear patterns of the metal bearing.

(5) 피스톤 압축링의 파손

Fig. 6은 피스톤과 실린더 내벽 사이에 윤활유 공급이 원활하지 못함으로 인하여 피스톤 압축링이 파손된 사례를 보여주고 있다. 피스톤 링은 피스톤 링 벨트(Ring Belt)의 홈에 두 개가 설치되어 피스톤과 함께 상하 왕복운동을 하면서 윤활 유막을 형성하여 피스톤의 측압을 균일하게 안정시키고, 연소압력의 블로바이 현상을 방지하는 밀봉기능을 수행한다.

피스톤 링은 자체의 장력, 피스톤의 관성력에 의한 측면 간극(Side Clearance)에서 발생하는 충격력(Slap Force), 피스톤 링과 실린더 사이의 유막압력 또는 왕복운동에 따른 피스톤 링이 실린더 벽면이나 홈 간극(Groove Clearance)에 가로 방향으로 가하는 주기적인 충격력 등에 의하여 파손된다.

이와 같이 피스톤 링은 엔진의 회전속도에 의한 관성력과 윤활유막의 형성여부에 따라서 손상 여부가 많이 결정되므로 윤활유 저장탱크로부터의 윤활유 공급부족은 피스톤 링의 급격한 마멸발생 뿐만 아니라 링의 파손이라는 심각한 문제를 유발하게 되므로 이곳에 충분한 윤활과 링 측면부에 대한 내마멸 코팅은 대단히 중요하다.

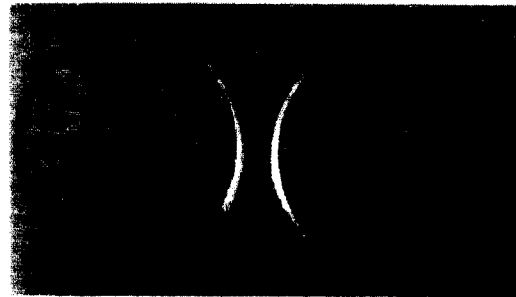


Fig. 6 Fracture of compression rings.

(6) 엔진오일의 첨가제 불량으로 인한 고장
엔진에서 오일은 마찰력 감소뿐만 아니라 다양한 기능을 요구하는 관계로 기유(Base oil)에 필요한 첨가제를 공급하여 특별한 사양을 맞춰준다. Fig. 7과 같이 부적절한 첨가제를 사용한 경우는 엔진오일이 오일 통로에서 고착되어 오일의 흐름을 방해함으로써 윤활유가 필요한 부위에서 윤체윤활이 아니라 경계 마찰 내지는 고체마찰로 급변하여 마찰이 급격하게 증가한다.

첨가제의 기능이 엔진오일의 성능을 좌우하기 때문에 엔진오일 청정 분산제, 감마제, 산화 안정제, 점도지수 향상제, 내마멸제, 내부식제 등 다양한 첨가제를 혼합하고 있으며, 이들 첨가제 기능이 약화되면 Fig. 1~7에서 보여준 결과처럼 엔진의 마찰 운동면에서는 심각한 고장을 유발하게 된다.

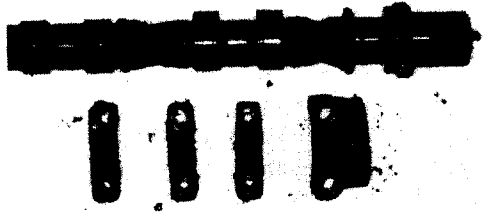


Fig. 7 Additive related oil failures.

5. 결 론

자동차에서 엔진은 그 회사의 국제 경쟁력에 관련된 가장 중요한 문제이기 때문에 자동차 시장에서 생존하기 위해서는 반드시 확보해야 할 기술 자립도이다. 우리 나라에서도 독자적인 엔진 개발에 많은 노력을 기울인 결과 가시적인 결과를 내고 있다.

동력을 생산하는 엔진이 제기능을 충분히 발휘하지 못한다면 자동차는 움직이지 못할 것이고, 엔진의 성능이 원활하게 운전하기 위해서는 엔진의 미끄럼 마찰 운동부에 적정량의 오일을 적기에 공급하여 마찰력 감소, 마찰열 제거, 내마멸성 유지, 냉각, 청정작용 등의 윤활유 기능을 발휘해야 한다.

엔진 내부의 오일이 실린더 헤드의 밸브 스템 시일을 통해 연소실로의 유입, 피스톤 압축링의 누설 방지 기능 불량, 피스톤이나 각종 시일의 불량으로 인해 과다하게 오일이 소모된다면 엔진 내부의 상대 운동을 하는 부품들이 고착되거나 비정상적인 운전상태가 계속 될 것이다. 그렇게 됨으로써 엔진 내부에서는 진동과 소음이 발생하고, 엔진의 작동 불능 현상으로 종국에는 엔진을 교환해야 할 것이다. 이러한 현상을 최소화시키기 위해서 설계자는 적정 주행거리에 오일 소모 및 점도 변화를 최적화시킬 수 있도록 엔진을 설계해야 하고, 엔진 생산자는 각각의 부품의 정밀도 및 품질을 최상으로 끌어올릴 수 있도록 해야 할 것이다. 마지막으로 운전자는 제작사에서 추천하는 오일 관리 사항을 바탕으로 오일의 상태를 점검하여 엔진의 운전상태를 최상으로 유지해야 한다. 그리고 오일 생산 업체에서는 엔진오일의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 오일 개발을 위해 엔진 메이커와 공동으로 노력해야 한다.

엔진에서 빈번한 고장사례의 대부분은 엔진 오일에 관련된 것으로 본 연구를 통하여 다시 한번 확인할 수 있었다. 엔진에서 윤활유에 의한 문제점을 적극적으로 해결하기 위해서는 자동차나 윤활유 메이커는 물론이고,

자동차 서비스 업체와 운전자의 이해와 협조가 더 큰 문제점이라는 사실에 비추어 자동차 메이커는 소비자에 대한 교육과 홍보에 보다 많은 투자를 해야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서 제시된 고장사례와 같이 대부분의 운전자들은 엔진오일을 본인이 직접 교환하는 것은 물론 점검조차도 하지 않는 경우가 대부분인 것으로 조사되었다. 그러나 선진국에서는 간단한 점검 및 정비를 직접 한다는 사실에 비추어 자동차 선진국과는 큰 대조를 이루고 있다. 이제 자동차가 대중적으로 보급된지도 10여년이 지났다는 사실을 고려하면 우리도 선진국의 운전자들과 같이 간단한 정비, 윤활관리 추세를 따라가야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. McGeehan, J. A., "A Survey of the Mechanical Design Factors Affecting Engine Oil Consumption," SAE Paper 790864, 1979.
2. Hoshi, M., "Reducing Friction Losses in Automobile Engines," Tribology Int., Vol. 17, No. 4, pp. 185-189, 1984.
3. Rhode, S. M., "A Mixed Friction Model for Dynamically Loaded Contacts with Application to Piston Ring Lubrication," Proceedings of the 7th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Leeds, 1980.
4. 김청균 외, "내연기관", 청문각, 1996.