

엔진 과 Tribology

현대자동차 이 현 순

1. 서 론

Tribology는 상대운동을 통해 상호에 영향이 있는 두표면, 더불어 그것에 관련된 계 문제와 실제 응용에 관한 과학과 기술을 의미하며, 구체적으로는 마찰, 윤활, 마모를 대상으로 해서 이것의 문제에 대해서 물리학, 화학, 재료과학, 응용역학 등을 광범위하게 이용하는 하나의 새로운 학문이라 할수있다. 역사적으로 볼때, Tribology와 관련된 인류 최초의 고안품중의 하나인 Wheel은 물건의 원활한 장소 이동을 위해 BC 3500년 전부터 사용되었다고 기록되고 있으며, 그후 인류는 작은 힘으로 큰 물체를 움직이고자 할때, 상호 운동을 하는 물체의 효율을 증가시키기 위해 마찰 저감에 꾸준히 관심을 기울여 왔다. 이러한 과정이 학문적 배경이 없이 시행 착오적으로 진행되어 오다, 18세기에 산업혁명과 더불어 산업 전반에 Tribology와 관련된 기계류 개발이 본격화 되면서 Tribology 학문의 이론적인 체계화 작업이 수행되기 시작했다. 특히, 20세기 부터 본격화된 자동차 엔진은 2000 가지 이상의 Tribological 접촉이 이루어지는 복합체로, 10 만 mile 동안 정상 운전될 것이 요구되고 있기 때문에, 엔진의 마찰 운동부에 대한 Tribology 관점에서의 연구는 모든 엔지니어의 초미의 관심사가 되고있다. 더우기, 최근 엔진들의 고속화, 고성능화, 경량화, 저연비화, 저배기가스화 개발 추세에 따라 베어링, 피스톤 및 동변계 등의 엔진 습동부에 가해지는 조건이 점점 가혹해짐에 따라 엔진 마찰 운동면의 어느정도 초기상태로의 유지를 목적으로하는 내구성 확보가 시급한 해결 과제로 대두되어, 결국 내마모성 확보 및 윤활 대책에 대한 요구가 점차 증가하고 있다. 따라서 엔진 습동부의 신뢰성 확보을 위해, 자동차 엔진에서의 Tribology 기술의 역할은 그 중요성이 점점 강조되고 있으며 이와 관련된 수많은 연구가 이루어 지고있다.

2. 자동차 엔진의 Tribology 와 관련된 기술 및 기계요소

엔진의 효율 증대, 내구성 확보, 저공해, 소음 경감과 항상 밀접한 관계가 있을 뿐만아니라, 엔진의 돌발적인 Trouble 방지, 상태 유지 및 수명 연장과 운전 Cost 저감 등의 목적을 달성하기 위해서는 엔진의 Tribology에 관련된 기술 및 기계요소의 이해가 필요하다.

2.1 자동차 엔진의 Tribology 기술

- (1). 마찰면에서의 접촉 거동
- (2). 마찰, 마모 및 그 발생 Mechanism
- (3). 소착 방지 방법
- (4). 오일 소모 발생 및 Deposit 생성 Mechanism
- (5). Ventilation 계 및 Blow-by gas 흐름 경로
- (6). Piston, Bearing의 설계 관련 기계 요소
- (7). 최적 재료의 선정
- (8). 윤활유의 선택 및 그 관리
- (9). 마찰 운동면의 윤활 가능 허용 온도내 설계 및 개발
- (10). 급유 방식 및 오일의 거동

2). 경계 윤활 (Boundary Lubrication)

금속의 표면이 윤활유에 의해 분리되지 않고 Dry Contact 시와 필적할 만한 Area에서 접촉이 생길때를 경계 윤활이라 한다.

- ①. Valve Train 계 Idle Speed 이하 운전 영역
- ②. Piston Ring Assy 의 TDC 및 BDC 위치시

3). 혼합 윤활 (Mixed Lubrication)

유체 윤활과 경계 윤활의 중간 상태로 Asperity 간의 단속적인 접촉이 생기는 영역을 혼합 윤활이라 한다.

- ①. Valve Train 계 저속 운전 영역
- ②. Second Piston Ring 의 Down Stroke 시

4). 탄성 유체 윤활 (Elastohydrodynamic Lubrication)

고하중을 받는 운동면에서, Bearing Material의 국부적인 탄성 변형 및 윤활 유 점도 급증의 결과로 유막이 형성되어 유체 윤활의 형태를 취하는 윤활 영역을 탄성 유체 윤활이라 한다.

- ①. Cam & Tappet 윤활부
- ②. Oil Pump Gear 윤활부
- ③. T/M Gear 윤활부

4. 엔진 윤활유에 요구되는 성능

엔진 윤활유를 사용하는 주된 목적은 마찰손실 및 마모의 저감과 연소 및 마찰에 의하여 발생하는 열을 외부로 방산, 냉각시켜 엔진 습동부의 내구성 및 신뢰성을 확보하는 것이다.

4.1 엔진 윤활유에 요구되는 일반적인 기능

- (1). 윤활 작용
- (2). 냉각 작용
- (3). 기밀 작용
- (4). 청정 작용
- (5). 압력 분산 작용
- (6). 방청 및 방식 작용

4.2 엔진 기능과 구체적으로 관계되어 요구되는 엔진 윤활유 기능

- (1). 고온 운전 조건에서의 마모 및 Scuffing 저감
- (2). 저온 운전 조건에서의 마모 및 부식 저감
- (3). 윤활유 소비량의 저감
- (4). 저온 시동성의 향상
- (5). 연소실, Valve stem, Crankcase 등에 Carbon Deposit 생성 저감
- (6). 열에 따른 산화 안정성 확보
- (7). 저장중 윤활유의 변화 및 변질 특성 감소

5. 엔진 작동중 엔진 윤활유의 역할

5.1 엔진 윤활유와 Intake Valve Deposit 형성

1). Intake Valve Deposit 생성 요인

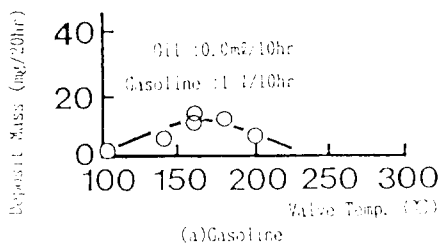
- ①. 엔진 형식 : 배기량, Valve Train System, T/C 적용 등
- ②. 사용 조건 : A/F Ratio, 대기 온도, 습도 등
- ③. 밸브 온도 : 150 ℃ ~ 300 ℃
- ④. 엔진 윤활유 : 열화 정도, Oil-Down 및 Oil-Out 량, T/C Oil Leakage 등
- ⑤. 사용 연료 : Detergent와 같은 첨가제 유무
- ⑥. Particles : E.G.R System 적용, 흡기계 Dust

2). Intake Valve Deposit 영향

- ①. Emission 악화 (특히 NO_x, HC)
- ②. 성능 저하
- ③. Driveability 저하
- ④. Warm-up 특성 악화
- ⑤. 축매 수명 단축
- ⑥. 연비 악화

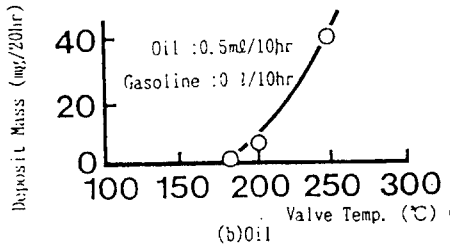
3). Intake Valve Deposit 생성 Mechanism

①. 연료에 의한 Deposit



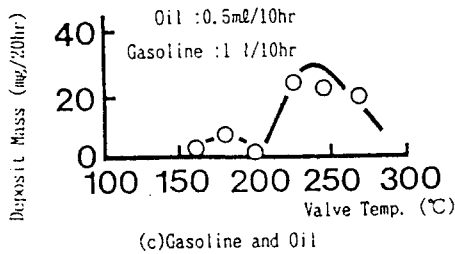
Intake Valve 온도 160 ℃ 근처에서 최대 Deposit 생성량을 보이며, 250 ℃ 이상에서는 연료에 의한 Deposit는 생성되지 않는다. 연료에 Detergent 첨가제를 사용 할수록 Deposit 량은 감소한다.

②. 윤활유에 의한 Deposit



Intake Valve 온도 250 ℃ 근처에서 최대 Deposit 생성량을 보이며, 180 ℃ 이하에서는 윤활유에 의한 Deposit는 생성되지 않는다. 윤활유의 열화 정도가 심할수록 Deposit 량은 증가한다.

③. 윤활유와 연료에 의한 Deposit



연료 분사량이 오일 Leak 량에 비해 약 2000 배 많음에도 불구하고 Intake Valve Deposit 량은 연료에 의한 것이 오일에 의한 것에 비해 약 1/3 밖에 안된다. 따라서 Intake Valve Deposit에 윤활유가 미치는 영향이 매우 중요함을 알수있다.

4. Intake Valve Deposit 억제 방안

- ①. 연료에 Detergent Additive 첨가
- ②. Intake Valve Temperature 감소
- ③. 흡기계를 통한 Dust 유입 억제
- ④. Valve Guide을 통한 Oil-Down 및 P.C.V.System을 통한 Oil-Out량 최소
- ⑤. 사용 엔진 윤활유의 열화 저감 (Ventillation System 개선)
- ⑥. 최적 오일 교환 주기 선정

5.2 엔진 윤활유의 마찰 저감 작용

1). 마찰 저감의 중요성

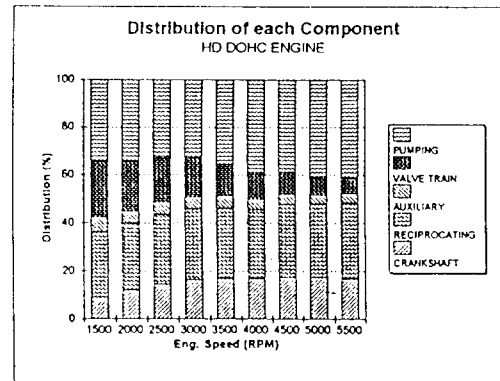
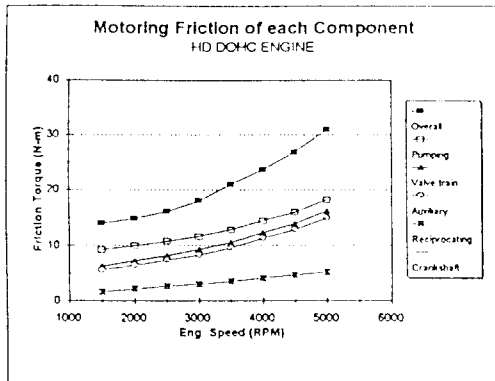
- ①. 연비 향상
- ②. 성능 향상
- ③. 마모 저감으로 내구성 향상

2). 엔진내 마찰 발생 인자

- ①. Pumping Losses
- ②. Mechanical Losses

- V/Train System
- Piston & Piston Ring
- Main & Con-rod Br'g
- C/Shaft Oil Seal & Oil Pump
- Auxiliary

3). 엔진 회전수에 따른 마찰



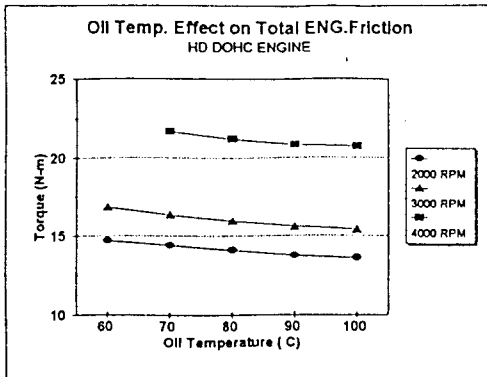
①. 엔진 회전수 증가에 따라 증가하는 마찰 유발 인자

- Overall Friction
- Pumping Losses
- Piston Assy & Con-rod Br'g
- C/Shaft Oil Seal & Oil Pump & M/Br'g
- Auxiliary

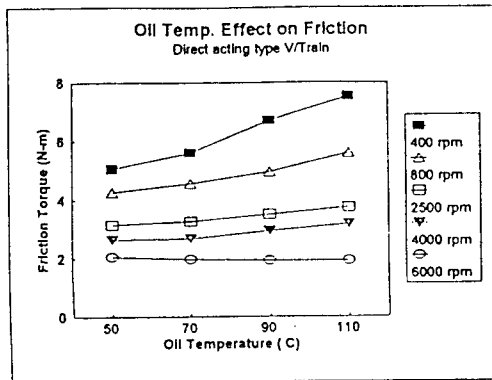
②. 엔진 회전수 증가에 따라 감소하는 마찰 유발 인자

- Valve Train System

4). 오일 온도에 따른 마찰 저감



Overall Friction은 오일 온도가 증가함에 따라 감소한다. 이는 엔진 전체로 볼때 대부분의 Moving Parts가 유체 윤활 영역에서 운전되고 있음을 의미한다.



V/Train 계 Friction은 고속을 제외한 전 운전 영역에서는 오일 온도가 증가함에 따라 증가한다. 이는 Valve Train 계 Moving Part가 혼합 또는 탄성 유체 윤활 영역에서 운전되고 있음을 의미한다.

5.3 엔진 윤활유의 마모 저감 작용

1). 마모를 유발하는 인자

- ①. 엔진 윤활유내 과다 이물질 존재
- ②. Oil Filter 성능 저하 (filter element pore size, relief valve)
- ③. Oil Pump의 토출 유량 부족 (side, tip clearance 과다)
- ④. 엔진 윤활유의 열화에 따른 점도 급증, 급감 및 TBN 감소
- ⑤. 흡기계를 통한 먼지 유입 과다 (air leakage, filter element)
- ⑥. 부적절한 운전 조건
 - 장기간 Parking
 - 장시간 Idling
 - 짧은 Warm-Up Time 후 급가속
 - 이상 연소 발생시
- ⑦. 부적절한 Material 사용
- ⑧. 마찰 운동면의 높은 작동 온도
- ⑨. 마찰 운동면의 기진 표면 조도

2). 마모 저감 대책

- ①. 윤활 이론을 기초로한 접촉 운동부 설계
 - Squeeze 및 Wedge action 으로 유압 형성 및 유막 유지 가능 형상을 선정
 - 왕복 운동부 : Tilting or Barrel face (Piston ring 및 skirt)
 - 회전 운동부 : 진원 또는 곡면 (Br'g 및 Cam lobe)
- ②. 접촉 운동하는 두 물체의 재질적 친화성 고려
 - DCI C/Shaft 와 Al 합금재 Br'g
 - Steel C/Shaft 와 동연 합금재 Br'g 조합이 양호등
- ③. 접촉 운동하는 두표면 사이의 적절한 표면조도 설정
 - Cyl.liner plateau honing 을
 - Crankshaft journal 및 Br'g cap 부 조도
 - Valve stem 부 조도
 - Piston 및 Cam 부 조도
- ④. 충분한 윤활유 공급
 - 각 접촉 운동부로 시동 직후 윤활유 공급
 - 안정된 오일 압력 유지
 - 오일 온도의 허용 한계내로 유지
 - Aeration 억제
- ⑤. 이물질 관리
 - 엔진 가공후 세척 및 조립시 청정도 유지
 - 초기 Break-in 후 윤활유 및 Oil filter 교환
 - 비포장 도로의 장기 운전시 Air filter 및 윤활유 교환
 - 엔진 내부 Sealing 유지

6. 엔진 윤활유 작동 조건

6.1 오일 소모

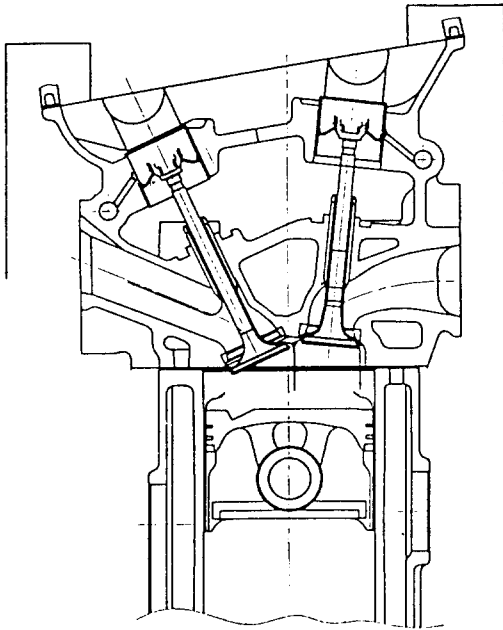
1). 오일 소모의 중요성

- ①. 자원절약
- ②. 오일교환주기 증가
- ③. 연소실 Carbon Deposit 형성 → 연소특성 변화
- ④. Intake Valve Deposit 형성 → 성능 및 Emission 악화
- ⑤. 흡기계 Clogging
- ⑥. Octane Requirement 감소
- ⑦. Catalyst Poisoning

2). 오일소모 Target 변화

년 대	% of fuel consumption
1960	2.7 %
1970	2.0 %
1980	0.2 %

3). 오일소모 경로



- 1). Oil Up : Piston Ring
과 Liner 사이 Oil Leakage
- 2). Oil Down : Valve Stem
과 Guide 사이 Oil Leakage
- 3). Oil Out : Ventilation
System 으로의 Oil Leakage
- 4). General Leakage : 각 종
Seal (T/C 포함) 및 Gasket
사이 Oil Leakage

4). 오일 소모 저감 대책

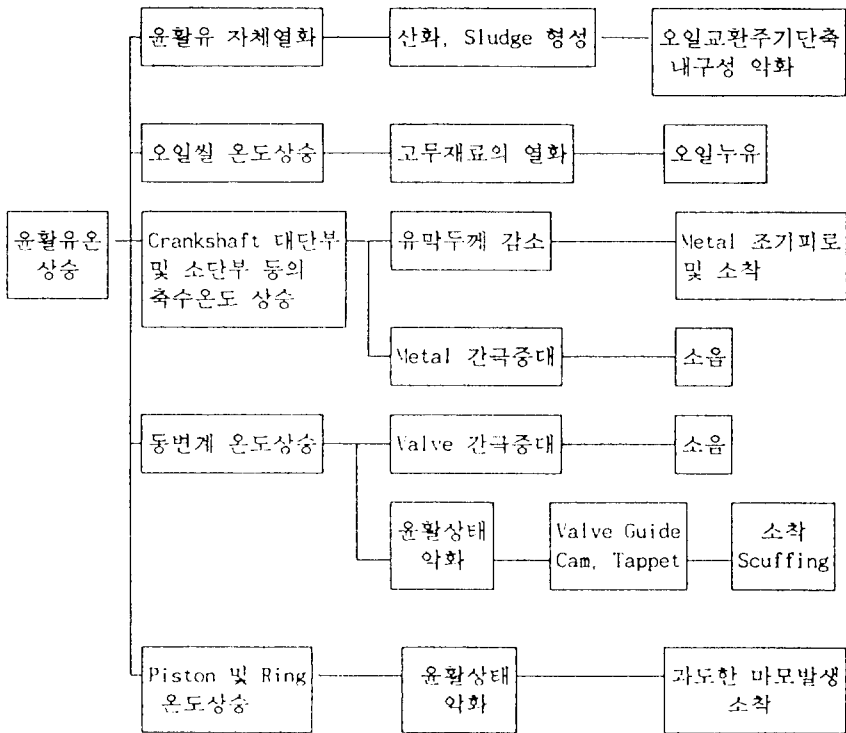
- ①. Piston 개발
- ②. Bore distortion, 특히 4th order 감소
- ③. Valve stem seal 개발
- ④. Ventilation 계 개발
- ⑤. 적절한 Cyl. liner honing
- ⑥. Ex. valve 온도 저감

6.2 엔진 오일 온도

1). 엔진오일 온도의 중요성

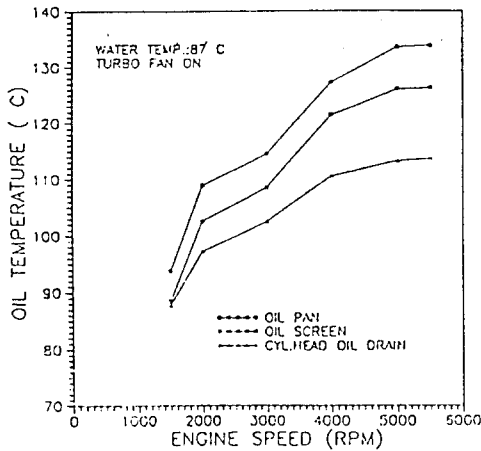
- (1). 엔진 내구성 확보
- (2). Friction 관련 주요 인자
- (3). 오일열화에 의한 오일교환주기 결정
- (4). 오일소모량에 영향
- (5). 엔진 소음에 영향

2). 과도한 오일온도 상승이 엔진에 미치는 영향



3). 엔진운전 조건에 따른 오일온도

①. 엔진회전수 변화에 따른 오일온도

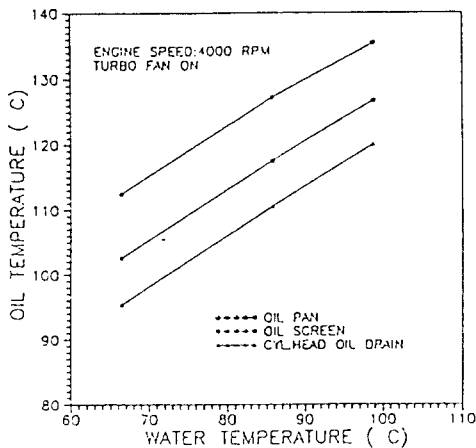


엔진회전수가 증가함에 따라 오일온도는 선형적으로 증가한다. 이 오일온도 증가는 연소열에 의한 증가보다는 엔진회전수 증가에 따른 마찰열 증가에 의한 것이라 할수있다.

②. 외기온도 변화에 따른 각부 오일온도

측 정 위 치	Rise in ambient Temp °C
Cyl. Wall	1.00
Oil Sump	0.95
Crankcase Atmosphere	0.85
Oil Pump Inlet	0.90
Main Bearing	0.83

③. 냉각수온도 변화에 따른 각부 오일온도



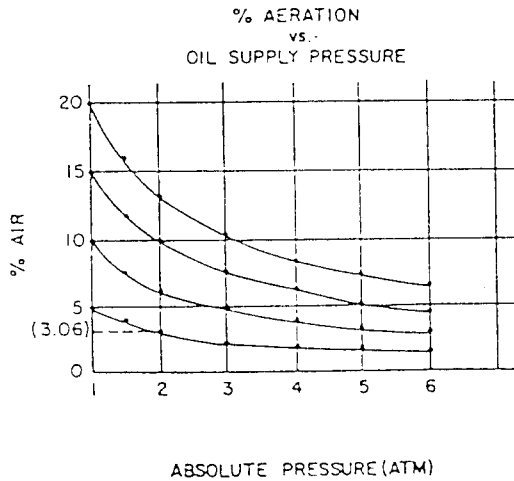
냉각수온도 1°C 증가에 오일온도는 약 0.5~0.8°C 비율로 증가한다. 이 비율은 엔진의 냉각회로 및 Cyl. Wall Thickness 차이에 의해 변화한다.

6.3 Aeration

1). Aeration 의 중요성

- ①. Oil Pump 흡입 능력 저하
- ②. Hydraulic Tappet 작동 불량으로 성능저하 및 소음발생
- ③. 습동부의 마찰, 마모 증가

2). Air 흡입 특성



at adiabatic condition

$$P_2/P_1 = (V_1/V_2)^{1.4}$$

- (1). Foaming : 지름 1 mm 이상
- (2). Aeration : 지름 $10^{-3} \sim 1$ mm

3). Aeration 측정법

- ①. 육안 검사
- ②. 부피 측정법
- ③. 밀도 측정법
 - 초음파 측정법
 - 무게

4). Aeration 발생 원인

- ①. Oil Pump 흡입부 Leak
- ②. Relief Valve Return 부위 설계방식
- ③. Oil Pump 설계방식
- ④. Crankshaft에 의한 Oil Pan 내 Oil Agitation
- ⑤. 빠른 오일 순환속도 : Oil Pan 내 오일의 잔류시간 적음
- ⑥. Oil Pan 용량 및 형상

5). Aeration 방지법

- ①. O.H.C 엔진에서 Valve Train 계에 의한 Agitation 방지를 위한 Oil Drain Area 확보
- ②. Oil Pump Inlet 에서 압력강하를 최소화
- ③. Relief Valve Bypass을 Oil Pan 보다는 Pump Inlet 으로 변경
- ④. Oil Sump내 Baffle 및 Windage Tray을 설치
- ⑤. 적절한 Oil Level 유지

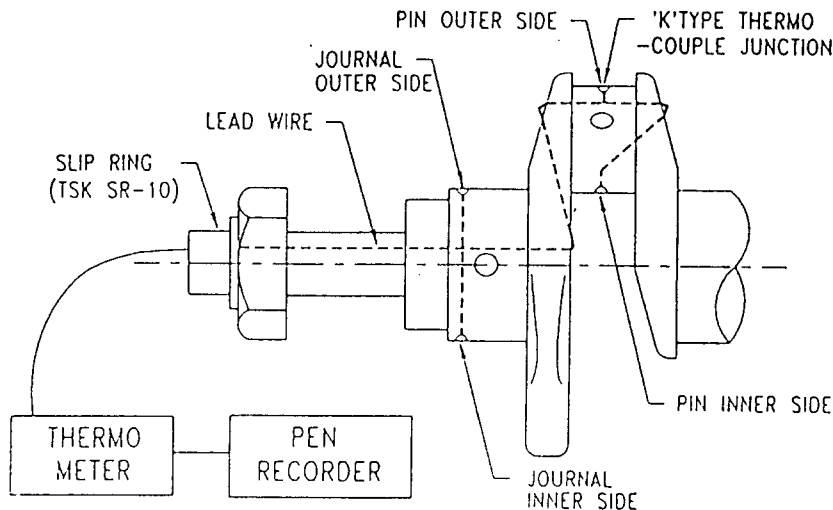
6.4 Crankshaft Pin 온도

1). Crankshaft Pin 온도의 중요성

- ①. Con-Rod Bearing의 Scuffing 및 Wear에 대한 신뢰성 평가
- ②. 각종 Bearing 재질 및 Crankshaft 재질 조합에 따른 성능 특성 평가
- ③. Bearing 부 오일온도 예측

2). 측정법

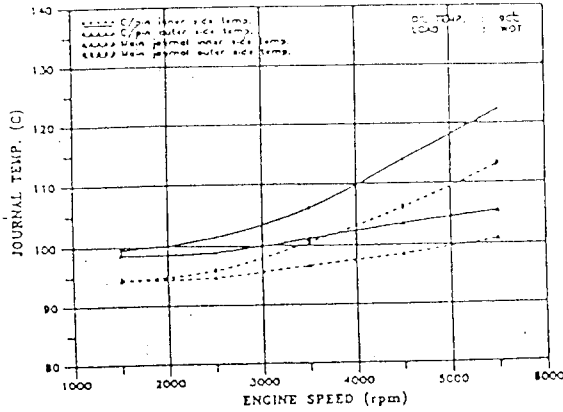
Crankshaft Pin 부의 Inner 와 Outer Side에 Hole을 뚫고 K-Type 열전대선을 장착하여 Slip Ring을 통해 엔진밖의 온도측정 계기까지 Lead Wire을 인출한다.



Method of the Surface Temperature Measurement of Crankshaft Journal

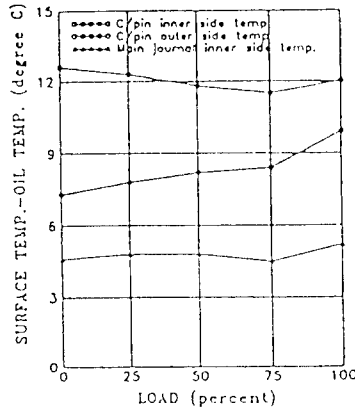
3). 엔진 운전조건에 따른 Pin 온도

①. 엔진회전수 변화에 따른 Pin 온도



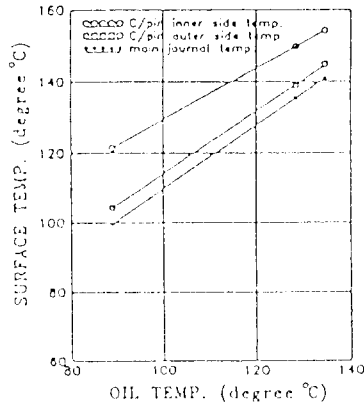
엔진회전수가 증가함에 따라 Pin 온도 역시 증가한다. 이는 회전속도증가로 유막내 오일의 Shear rate이 증가하고 이로인해 마찰열이 증가하기 때문이다.

②. 엔진부하 변화에 따른 Pin 온도



엔진부하 변화에 따른 Pin 온도 변화폭은 매우적다. 이결과로 Pin부 온도는 연소압력 보다는 Moving계의 Mass 및 Crank 회전반경 등에 관련된 관성력에 의한 영향을 크게 받는다는 것을 알수있다.

③. 윤활유온도 변화에 따른 Pin 온도



Pin Inner Side 온도가 오일 온도 증가량보다 적은데, 이는 오일온도가 증가하면 점도가 떨어지고 결과적으로 유막내 오일의 Shear rate에 의한 발열량이 감소하기 때문이다.

엔진운전중 Crank Pin 온도측정은 Con-Rod Bearing의 최소유막 두께 및 발생 위치와 밀접한 관계가 있으며 Bearing의 설계시 타당성 검토와 Scuffing 및 마모 특성을 정량적으로 평가할수 있는 중요한 판단기준이 된다.

6.5 Piston 온도 및 Ring Motion 측정

1). Piston 온도의 중요성

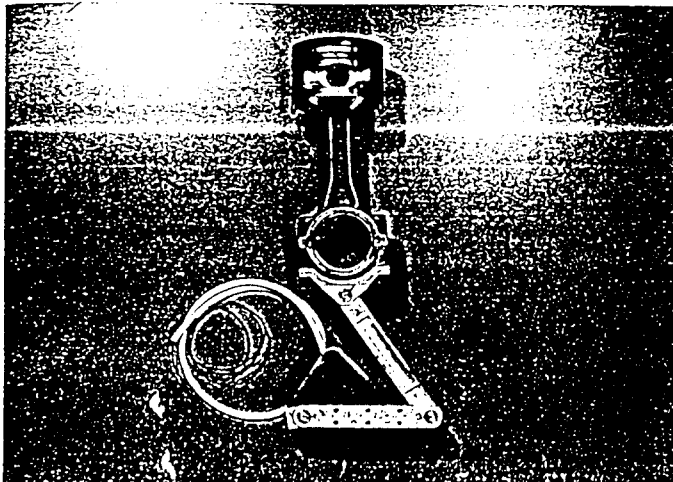
- ①. Piston의 Scuffing 및 Wear에 대한 신뢰성 평가
- ②. Piston Cooling Jet 적용 필요성 확인
- ③. Cyl.liner부 오일온도 예측

2). Ring Motion 측정의 필요성

- ①. Ring Motion에 따른 오일 소모 경향 파악
- ②. Ring 경량화 및 적정 Friction level 결정
- ③. 적절한 Ring 사양 개발

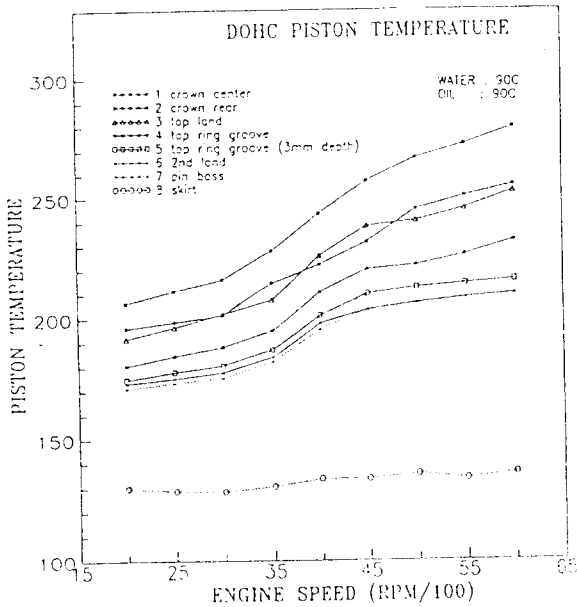
3). 측정법

Linkage System 개발로 운전중 Piston 각부위의 온도 변화 및 Ring의 운동을 측정한다.



View of Developed Linkage System

3). 엔진 회전수 변화에 따른 Piston 각부위 온도



Piston 중 가장 온도가 높은 부위는 Crown Center이고 본 시험 엔진에서는 최고 약 280°C 정도였다. 또한 Piston의 모든 부위는 엔진 회전수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타낸다.

7. 맺음말

현재 자동차 산업은 기계공업의 꽃이라 불리며 그중에 엔진은 자동차의 심장이라 할수있다. 본 강연에서는 이 중요한 엔진이 제대로 작동하기 위해 Tribology에 근거한 설계 및 개발이 어떤 부분에 얼마 만큼 필요한가에 대해 간단히 기술해 보았다. 여기에 기술한 내용은 지면 관계상 개괄적인 내용에 그칠수 밖에 없었지만, 간단히 말해서 '엔진은 Tribology의 덩어리'라고 표현할수 있을 것이다.

현대 자동차에서는 그 중요성을 인식하여 이 부분의 연구에 최선을 다하고자 노력하고 있다. 그러나 Tribology 라는 학문이 망라하는 분야가 깊고 넓을 뿐만 아니라 여러 학문과 연관되어 있어 자동차 생산 업체의 노력 만으로는 한계가 있다.

그러므로, 이제 Tribology 학문과 이에 근거한 기술의 발전을 위해 자동차 생산 업체는 물론 학계, 정유 업체 및 각 부품 업체의 긴밀한 협조와 공동 연구가 절실히 요구되는 시점이라 생각한다.