

엔진시린더의 마모가 오일 소모에 미치는 영향

The Effect of Cylinder Wear on the Oil Consumption

강 석 춘
Suk Choon Kang



강 석 춘

- 1949년 3월생
- 자동차운활관련분야 연구
- 정회원, 공군사관학교 교수부

1. 서 론

디젤엔진에서 윤활오일의 소모량이 점진적으로 증가하는 것은 비정상적인 시린더 라이너의 마모 때문이다. 시린더 라이너의 작동기구를 L-link 피스톤운동 측정 장치로 조사하여 피스톤 top-land의 탄소분 축적이 비정상 시린더 마모의 주요 원인임이 증명되었다.

또 피스톤 top-land의 축소는 마모방지의 유용한 방법인 것으로 이론과 실제에서 입증되었다. 오일 소모와 시린더 마모에 영향을 미치는 다른 요소들에 관해서도 살펴보았다.

2. 시린더 라이너의 마모와 오일 소모와의 관계

2.1 시린더 라이너의 탄소 연마 마모

시린더 라이너의 탄소 연마 마모는 고출력 디젤엔진에서 많이 생기고 점진적인 오일 소모의 증가와 엔진 수명을 감소시킨다. 최악의 경우 시린더라이너의 scuffing 을 유발할 수도

있다. 원유의 절약 측면에서 미래 디젤엔진의 요구는 높은 평균유효압력(bmep), 더 좋은 열 경제성, 수명과 오일 교환주기의 장기화 등이 포함된다. 또 낮은 등급의 연료 사용도 요구된다. 이런 요소의 혼합은 시린더라이너의 마모를 더욱 증가시킬 것이다. 따라서 시린더 라이너의 마모 메카니즘에 관한 연구와 엔진 요구를 충족시키기 위한 시도가 매우 필요하다. 본 review에서는 마모와 그 메카니즘을 밝히고 마모와 오일 소모를 감소시키기 위한 가능한 방법을 찾는 데 초점을 맞추었다.

2.2 오일 소모와 시린더 라이너

오일 소모량의 점진적인 증가에 관한 측정 은 내경 : 156mm, bmep : 10.3kg/cm²인 고출력 디젤엔진으로 실시하였다. 오일 소모율은 초기에 연료의 0.5% 수준에서 2000-3000 hrs 후에는 약 2%까지 증가하였다(그림 1 참조).

오일 소모 증가율이 점진적으로 증가하므로 어떤 부품의 나빠짐이 주요 원인인지 살펴보았다. 각 사용한 부품을 새것으로 교환해 가면서 40시간씩 시험한 결과가 그림 2에 제시되었다. 이 그림에서 시린더 라이너가 가장 영향을 많이 미치는 부분임이 밝혀졌고 따라서 시린더 라이너의 영향에 대한 집중적인 조사를 하였다.

먼저 시린더라이너의 축방향과 반경방향에 대한 변형의 영향을 먼저 조사하였다. 많은 연구를 한 결과에 의하면 오일 소모와 변형간에는 상호 관계가 없었다. 다음으로 표면의 마모를 살펴보았다. 몇몇 빛나는 부분이 마모가 많은 곳에서 관찰되었다. 그림 3은 표면 조도 측정 장비로 그 부분을 측정한 결과를 보여준다.

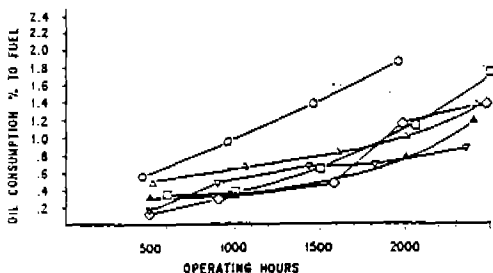


그림 1 고부하 디젤엔진에서 작동시간에 따른 오일 소모량의 증가

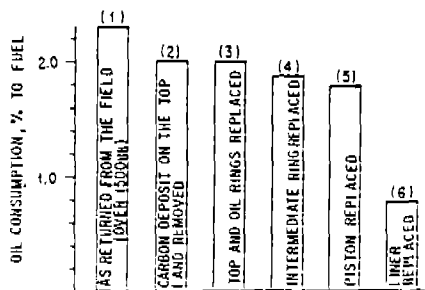


그림 2 손상된 부품의 교환후 오일 소모의 감소

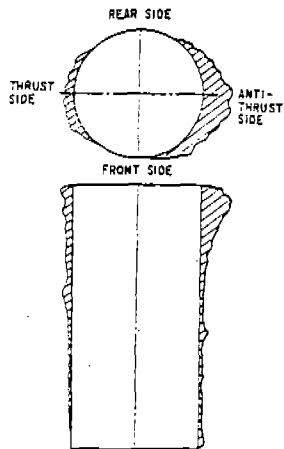


그림 3 시린더 라이너의 마모 형태

축 방향에 따라 마모 부분의 단면을 정량적으로 측정하고 오일 소모량과 대조하여 그림으로 그려보았다. 충분한 실험에 의해 그림 4에서와 같이 마모와 오일 소모량 사이에는 매우 밀접한 상호 관련을 갖고 있음을 보여주고 있다. 오일 소모에서 시린더라이너 마모의 영향은 피스톤링이 마모된 부분을 따라 들어갈 수 없으므로 더 많은 양의 오일이 링과 라이너의 사이로 흐를 수 있는 깊은 원주형 pockets를 만들고 있다고 설명할 수 있다.

2.3 시린더 라이너 마모의 관찰

관찰된 마모면은 다음과 같은 몇가지 분명한 특성을 갖는다.

1) 표면은 마치 lapping compound에 의해 연마된 것처럼 빛난다.

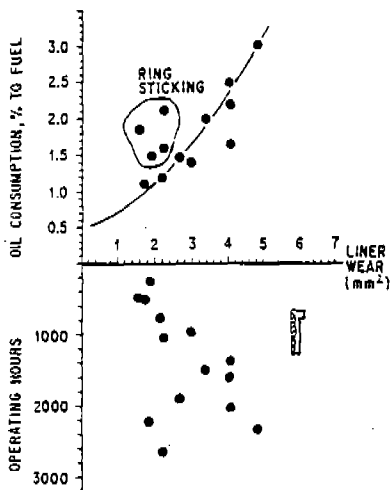


그림 4 오일 소모에 대한 라이너 마모의 영향

CYLINDER LINER TREATMENT	SCUFFING LOAD (KG)	RING TEMPERATURE (°C)					
		30	40	50	60	130	140 150 160 170
TUFTFRIDE A	PLATEAU I				■		
	PLATEAU II						☺
INDUCTION HARDENING	PLATEAU I				■		☺
	SINGLE				■		☺
ION NITRIDING	PLATEAU I				■		☺
SULFUR NITRIDING	SINGLE				■		☺
LUBRITE	SINGLE				■		☺
NO-TREATMENT	PLATEAU I				■		☺

그림 5 시린더 라이너의 scuffing 특성

2) 마모는 피스톤 타격력의 추력면보다 반대(비) 추력면에서 더 크다. 전면이나 후면에서는 마모가 측정되지 않았다.

3) 축방향에서 마모는 상부링의 상사점 바로 위에서 최대였다. 그러나 보통 마모는 상부링과 상사점의 상대면에서 가장 깊었다.

4) 시험 엔진에 사용된 라이너의 표면 처리는 현재 가능한 처리중 내마모, 내스커핑 특성이 가장 좋은 것이나 라이너 표면처리가 마모에 큰 영향을 미친다는 증거는 없었다(그림 5).

시린더라이너에 대해서 피스톤은 다음의 비정상적인 특성을 갖는다.

1) 두꺼운 탄소층이 피스톤의 상부면에 축적되어 있다.

2) 탄소가 축적된 면은 문지른 것처럼 매끄러웠다.

3) 탄소 축적물은 특수한 도구로 측정 한 결과 연필심의 9H와 같이 단단하였다. 그와 대조로 심한 마모가 없는 시린더라이너와 마찰한 피스톤에서의 탄소는 2H보다도 덜 단단하였다.

이상과 같은 관찰에서 마모는 시린더라이너와 접촉하는 piston의 top land(상부면)에 의해 일어난다. 그러나 타격력을 생각하면 추력 쪽보다 비추력쪽이 왜 더 많이 마모되는지 분명히 설명할 수 없었다. 따라서 피스톤 움직임을 더 자세히 연구할 필요가 있다.

2.4 피스톤의 움직임과 마모

피스톤의 움직임 특히 왕복운동을 L-link sys.에 의해 연속적으로 측정하였다(그림 6).

두 간격 센서를 비 추력쪽에 설치하여 피스톤의 기울음을 측정하도록 하였다. 계산을 하고 측정 한 것과 비교하였을 때 그림 7과 같고 비교적 일치하였다. 이 결과로써 그림 8과 같이 피스톤의 움직임을 그려보았다. 이 관찰에서 다음의 사실을 밝혀내었다.

1) 연소와 팽창 행정에서 상사점은 피스톤이 비추력 방향에서 추력쪽으로 움직인다. 이때 처음 피스톤 아래 부분은 피스톤 벽에서

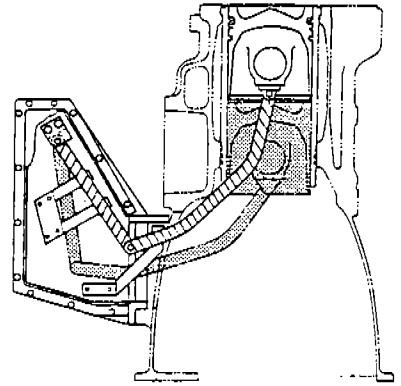


그림 6 피스톤 움직임 측정의 L-link 장치

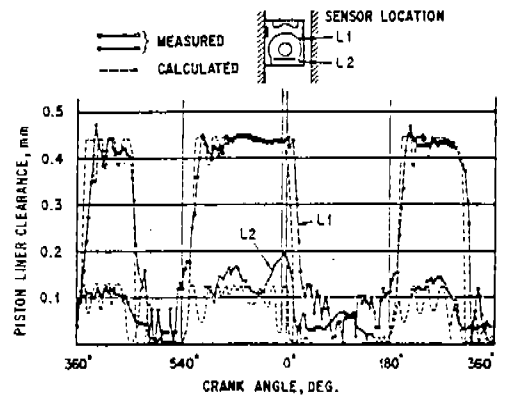


그림 7 피스톤 움직임의 이론 및 측정결과

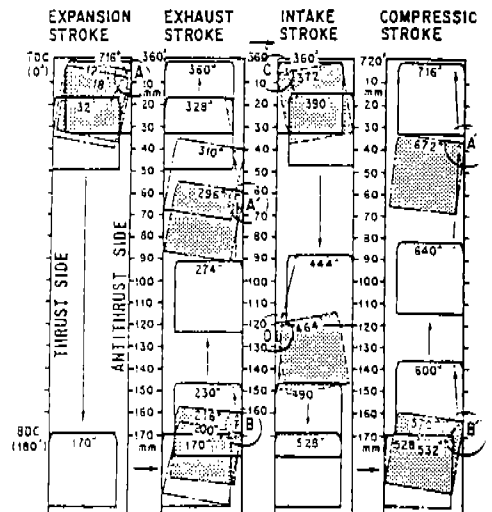


그림 8 피스톤 이동과 기울음 관계

떨어지고 반면에 위 부분은 벽위에 머물어 있어서 피스톤 상부가 오른쪽으로 기울어져 피스톤이 움직일 때 라이너의 비추력면에 대해 피스톤 상부가 누르게 되는 가능성의 결과를 가져온다(상부에서 5-10mm, A 점).

2) 배기행정 시작될 BDC에서 피스톤 상부는 벽에서 떨어지고 먼저 비추력쪽에 도달된다. 이때 오른쪽으로 기울음 역시 비추력벽을 상부면이 부딪치는 기회를 만든다(상부에서 170mm, B 점). 역시 배기행정 중간에서 피스톤은 추력쪽을 향해서 비추력 쪽에서 떨어진다. 이 점에서 피스톤은 다시 오른쪽으로 기울어짐을 보여주고 상부면이 비추력 시린더면을 문질러낸다(상부에서 0-70mm, A' 점).

3) 피스톤은 타격력이 연소시 타격력보다 작은 흡입 행정의 초기에 처음 얼마간 왼쪽으로 기울어진다. 이 점에서 피스톤의 상부면이 추력면 표면을 문질러대는 기회를 갖는다(상부에 5-30mm, C 점). 흡입행정 중간을 지난후 피스톤은 추력쪽으로 움직이기 시작한다. 피스톤 상부면은 두번째 왼쪽의 기울음을 보여주고 추력쪽과 접촉하게 된다(상부에서 120-130mm, D 점).

4) 마지막으로 압축행정의 마지막 종료 피스톤의 아래부분이 비록 다시 되돌아 온다 해도 얼마동안 벽에서 떨어져 있고 따라서 피스톤 상부가 벽면의 비추력 부분을 문질러낼 기회를 갖는다(상부에서 30-40mm, A'' 점).

이들 결과를 요약하면 시린더 라이너의 비추력면에서 피스톤의 상부면은 TDC 주변 A, A'와 A'', 5-70mm 지점에서 또 BDC 에서는 160-170mm 위치인 B와 B''에서 마모를 일으킨다.

추력면에서 상부면은 TDC(5-30mm, C)에서 벽을 문지르는 기회를 갖고 BDC의 2/3 지점인 120-130mm, D에서 문지르는 기회를 갖는다. 이것은 단지 온도와 시린더 압력이 비교적 낮은 흡입 행정에서 일어난다.

이것은 그림 9에서 실제 시린더 라이너 마모 위치와 비교하였을 때 마모와 피스톤 상부가 벽면과의 접촉 사이에 매우 잘 일치함을 발

견하였다. 이것과 상부면의 매끄럽고 단단한 탄소 축적 및 피스톤 상부면의 기울음에 의해서 시린더 라이너의 탄소 연마작용에 의한 것으로 결론을 얻을 수 있다.

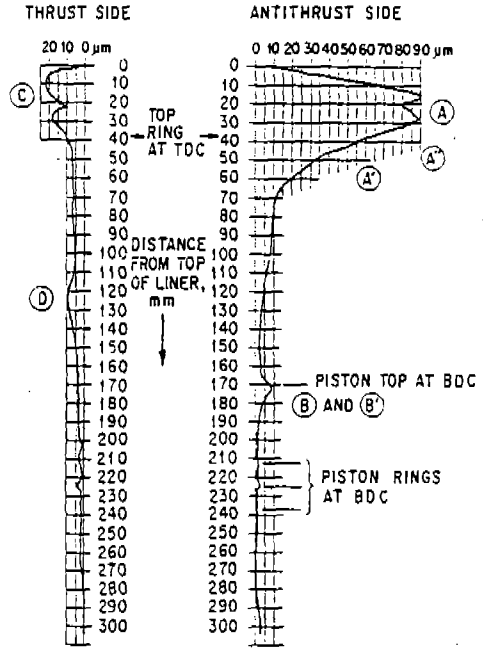


그림 9 추력과 비추력면의 중심선에서 라이너의 마모

2.5 피스톤 cut-back에 의한 탄소 연마 마모의 억제

탄소의 연마 마모가 시린더 라이너 표면과 접촉하는 상부면에 의해 일어나는 것이 분명하므로 피스톤이 기울어질 때 라이너 표면과의 접촉을 피하기 위하여 상부면에 큰 유격을 주는 것을 생각하는 것은 당연하다. 마모를 피하기 위하여 상부면에 유격을 넓혀준 피스톤을 cut-back piston으로 정의하고 시험을 하여 보았다. 그림 10은 2000 시간동안 시험한 후 보통 piston과 cut-back piston을 비교한 것이다(비추력면).

그림 10에서 상부면에 의한 정상 마모를 제외하고 cut-back piston이 사용된 면의 마모는 거의 없다. 또 2000 시간까지 오일 소모량도 크게 증가하지 않았다. 오히려 초기 오일 소모량보다 감소하기까지 하였다. 실제

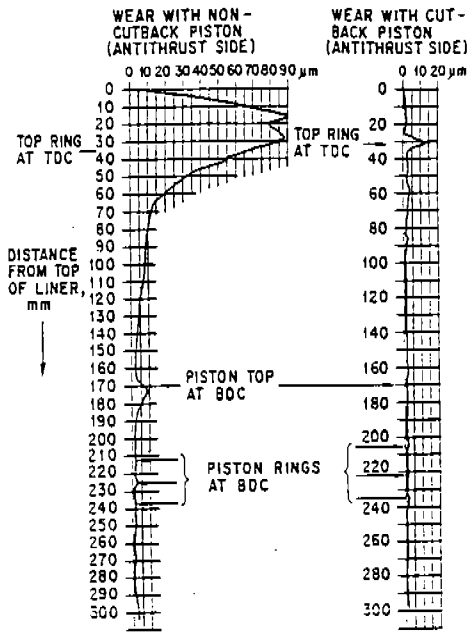


그림 10 Cutback과 non-cutback의 라이너 마모

와 벤치 시험에서 얻은 마모에 관한 자료가 그림 11에 제시되어 있다.

상부면에서 탄소 축적에 의한 마모 메카니즘이 그림 12에 있다. Cut-back 피스톤의 효과는 상부링의 큰 유격을 통하여 높은 가스압력에 의한 오일의 통과를 억제시켜 주므로서 오일 소모를 감소시켜 준다.

그러나 높은 가스압력은 사이클 과정에서 매우 짧은 기간 동안만 작용한다. 피스톤과 링의 상황 및 하향속도가 비교적 늦으면 오

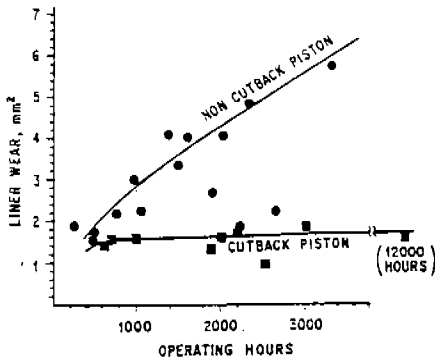


그림 11 시간에 따른 non-cutback와 cutback의 라이너 마모

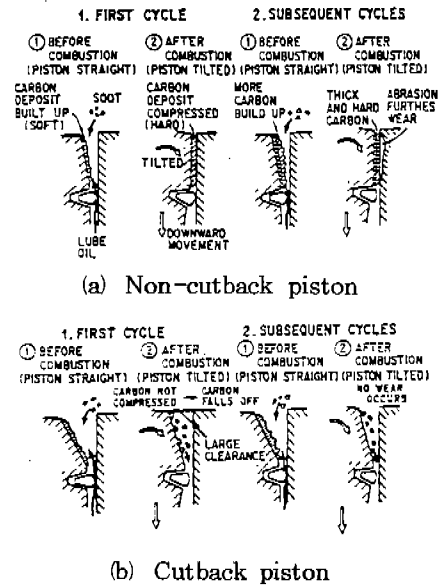


그림 12 피스톤 상부의 단단한 탄소 축적과 시린더의 마모 가설

일의 튀겨 올라감이 비교적 작고 따라서 오일의 소모는 작아진다. 연구에 의하면¹⁾ 유격이 극히 작은 경우 non-cutback 피스톤과 비교하여 가스압력에 따라 오일 소모의 증가를 보여주지는 않는다. 또 피스톤의 형태 변화(cutback)에도 오일의 소모량이 크게 달라지지 않았다. 따라서 cutback piston은 가스의 압력이 증가함에 따라 오일 소모의 감소 역할에는 효과가 별로 없음을 알 수 있다.

2.6 탄소 축적물의 성질

피스톤 상부의 탄소 축적물이 윤활 오일에 의해 생성되었는지 연료로 형성되었는지에 관해서 결론은 두가지 모두로부터 생겼다는 것이다. 축적물을 분석하였을 때 표 1과 같은 금속 첨가물이 발견되었다.

표 1 피스톤 상부의 탄소 축적물의 분석

Sample	C	Ba	Ca	Zn	Fe	Al	Mg	Si
1	43-65	<0.1	3.1-6.2	1.0-4.7	0.3-0.5	0.2-0.4	0.03-0.07	0.04-0.4
2	51	<0.1	1.8	2.3	0.3	0.2	1.6	0.1
3	60	7.0	9.9	1.3	0.2	-	-	-

연료가 다르면 탄소 축적물과 라이너의 마모에 상당한 차이가 있음을 보여주고 있어 윤활유와 연료로부터 생성된 것이고 이에 관한 설명으로는 연소된 탄소분이 상부면에 있는 윤활유에 달라 붙든지 혹은 윤활유의 산화에 의해 형성된 탄소로 되었을 것이다.

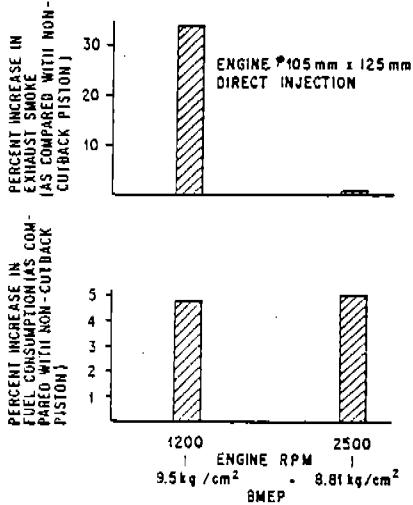


그림 13 엔진성능에서 cutback 과 non-cutback 피스톤의 비교

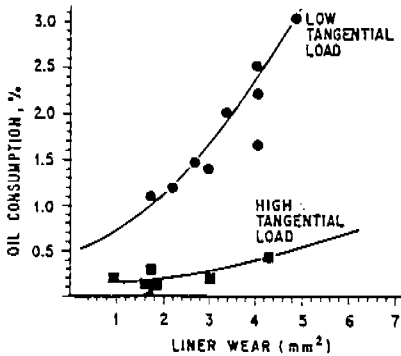


그림 14 오일의 소모에서 오일링 접선력 크기의 영향

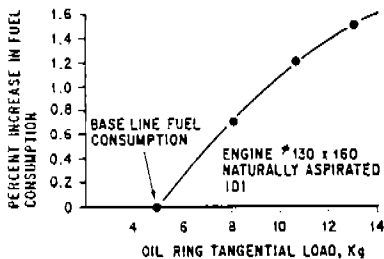


그림 15 엔진성능에서 오일링 접선력 크기의 영향

2.7 탄소 축적의 영향을 주는 요소들

앞에서 piston의 cutback은 시린더라이너의 탄소 연마 마모를 억제하는데 효과적임을 보여 주었다. 그러나 이 방법 역시 엔진성능과 배기가스에 나쁜 영향을 미친다(그림 13 참조). 특히 엔진속도가 낮거나 연소시 필요한 공기가 제한되어 있는 자연 흡입식 엔진에 대해서는 더욱 나쁘다.

라이너의 탄소 연마 마모가 있더라도 오일 소모량은 큰 점선력을 갖는 오일링의 사용으로 어느정도 조절이 가능하다(그림 14). 그러나 마찰을 증가시키므로 엔진의 연료 경제에 나쁜 영향을 준다(그림 15와 참고⁴⁾).

따라서 탄소 축적에 영향을 주는 다른 요소를 생각하고 piston의 cutback 보다 다른 방법을 찾아서 전반적으로 엔진을 최적화 할 필요가 있다.

3. 작동조건

3.1 최대 연소 압력

연소압력이 높아지면 피스톤에 더 큰 경사(기울음)력을 가한다. 탄소 축적물은 더 강하게 압축되고 따라서 탄소와 라이너 사이의 미끄럼 마찰력은 증가하여 연마 마모를 증대시킨다.

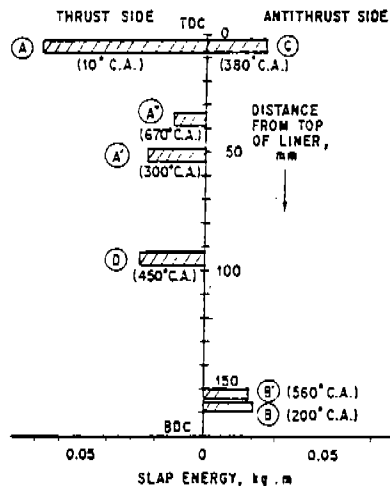


그림 16 피스톤의 위치에 따른 타격에너지의 크기

피스톤의 타격력은 그림 16 과 같이 계산되고 이 영향을 측정하기 위하여 라이너 마모인 그림 9 와 비교하였다. 가장 심한 마모는 최대 피스톤 타격력의 위치와 일치한다. 비록 타격력의 방향(추력축)과 마모(비추력 방향)가 반대이지만 경사력은 대략 타격력에 비례하는 것으로 생각된다. 마모 감소 수단으로 피스톤의 타격력은 낮아져야 하고 특히 온도가 높은 상사점에서 더욱 그렇다. 이 목적을 위해서 피스톤의 모양을 바꾸어 주는 것이 바람직하지만 정량적으로 분석되지는 못하였다.

3.2 피스톤 온도와 연소 온도

알루미늄 피스톤에 대하여 피스톤 온도가 높아지면 피스톤과 시린더 라이너의 간극은 작아지고 탄소 연마 마모의 기회는 커진다. 그래서 내부 냉각기 같은 것으로 피스톤의 냉각을 높여 주고 철이나 연한 주철같은 피스톤 재료로써 팽창계수를 낮추며 세라믹이나 스테인레스 왕관형 피스톤 같이 피스톤 상부 보조장치가 효과적인 것으로 생각된다.

더 높은 연소 온도는 상부면의 윤활유 탄소 생성에 불리할 수 있다. 반대로 연료는 높은 온도에서 검댕을 덜 생성할 것이다. 현재 어느 영향이 더 지배하는지 알려지지는 않았다.

앞의 두 변수인 압력과 온도는 만약 엔진 속도가 일정하다면 평균 유효 압력으로 대략 표시될 수 있다. 라이너마모에서 평균 유효압력(bmep)의 효과는 그림 17에 표시되어 있다.

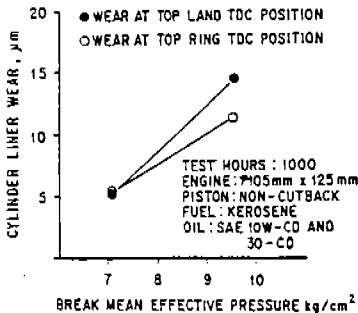


그림 17 시린더 라이너의 마모에서 엔진 부하의 영향

보통 자연 흡입 엔진보다 터보 과급 엔진이 더 많은 마모가 이루어지고 있음이 사실로 입증된다.

3.3 엔진속도

엔진속도의 영향은 속도를 바꾸면 bmep가 영향을 받기 때문에 쉽게 분리시킬 수 없다. 그러나 연소하는 시간의 관점에서 높은 탄소 복합체는 엔진속도가 낮을수록 깨끗이 연소될 기회를 더 많이 갖고 있다.

4. 설계요소

상부면 위로 윤활 오일이 적게 올라갈수록 상부면에서 오일이 탄화되고 축적될 기회는 적어진다. 따라서 오일을 잘 조절할 수 있는 링이나 라이너의 설계는 매우 중요하다.

5. 연 료

검댕 생성은 상부면의 탄소 형성에서 영향을 많이 주는 인자로 생각되어진다. 검댕은 작동조건 뿐 아니라 연료 성분에 의해서 영향을 받는다. 몇 개의 엔진시험을 표 2의 A 연료로 한 결과에 의하면 석유나 No. 2 디젤 연료로 한 경우보다 오일 소모가 급격히 증가하였음을 그림 18에서 보여주고 있다.

또 단단한 탄소의 축적과 시린더 라이너의 마모가 관찰되었고 피스톤의 cutback이 효과적인

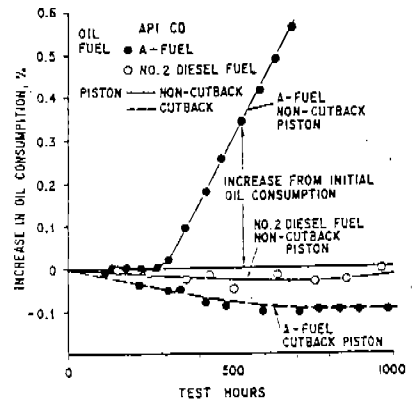


그림 18 오일 소모에서 연료의 영향

임을 증명해 주었다. 낮은 등급의 연료에 함유된 유황은 링과 라이너 마모에 부식 영향을 주는데 관심을 널리 끌고 있지만 고분자 성분을 많이 갖는 이들 연료는 엔진 마모를 다루는데 더 큰 고려를 해야 할 것이다.

표 2 엔진 시험에 사용된 연료의 물성

Physical Properties	No. 2 Diesel fuel	Kero-sene	A-Fuel
Viscosity at 50 °C CST	2~2.8	1~2	2~3.8
Specific Gravity g/cm ³	0.820~0.835	0.790~0.800	0.823~0.873
Pour Point °C	-35~-15	-50~-40	-35~-10
Carbon Residue % WT	0~0.04	0.02~0.2	0.26~0.95
Sulphur % WT	0.3~0.4	0~0.1	0.3~1.0
Cetane Index	50~61	50~53	48~60

6. 윤활 오일

내산화성, 청정성 및 분산성이 상부면에 탄소 축적을 최소화 하는 주요 요소로 생각되고 있다. 세가지 API 분류 오일인 CC, CD/SE 와 CD의 오일로 엔진 시험한 결과 그림 19 와 같이 오일에 따라 라이너 마모와 오일 소모에 상당한 차이가 있음을 보여준다. 따라서 윤활유 특성의 중요성이 입증되었고 이 영향은 효과적인 윤활유 및 첨가제 개발에 관심을 기울여야 함을 보여준다.

윤활 오일의 영향과 시린더 라이너의 탄소 연마 마모에서의 연료 및 오일 소모량의 관계가 그림 20 에 요약되어 있다.

7. 결 론

시린더 라이너의 탄소에 의한 연마 마모가 점진적으로 오일 소모량이 증가하는 원인임을 보여 주었다. 마모는 주로 피스톤의 기울어짐 과 피스톤 상부에서 탄소의 축적에 의해 이

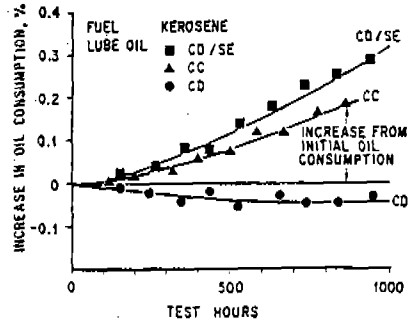


그림 19 오일 소모에서 윤활 오일의 영향

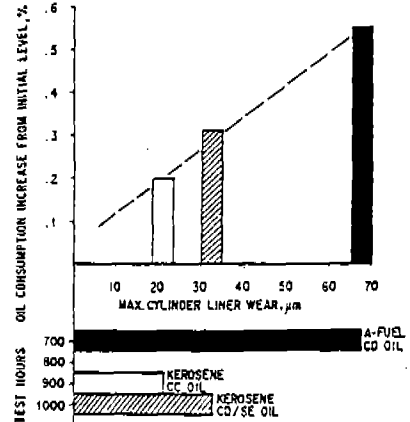


그림 20 시린더 라이너의 탄소 연마 마모에서 연료와 윤활오일의 영향

루어지고 있었다. 비록 piston의 cutback이 그러한 마모 억제에 유용한 것으로 생각되나 엔진 성능에는 불리한 영향을 주고 있었다.

다른 요소들 중에서 연료와 윤활유가 탄소 축적과 시린더의 마모에 상당한 영향을 미치므로 엔진의 설계 및 관리에서 앞으로 계속 연구할 과제임을 보여주고 있다.

참 고 문 헌

1. S. Furuhashi and M. Hiruma, "Unusual Phenomena in Engine Oil Consumption." ASLE preprint, October 1979.
2. J. A. McGeehan and B. J. Fontana, "Effect of Soot on Piston Deposits and Crankcase Oils." SAE Paper 801368.
3. J. A. McGeehan, "A Survey of the Mechanical Design Factors Affecting Engine Oil Consumption." SAE Paper 790864.