

피스톤링의 회전운동이 오일소모에 미치는 영향 - 제2보 : 링갭의 위상각과 오일소모와의 관계 -

Effect of rotational motion of piston ring on the oil consumption - 2'nd report : Relationship between phase angle of ring end gap and oil consumption -

민병순*, 김종수**, 오대윤**, 최재권*, 진준하***
Byungsoon Min, Joongsoo Kim, Daeyoon Oh, Jaekwon Choi, Joonha Jin

Abstract

In order to understand the relationship between the phase angle of piston ring and oil consumption, the ring rotation and instantaneous oil consumption were measured at the same time. The ring rotation was measured by radio-tracer technique. The instantaneous oil consumption was measured by analyzing CO₂ concentration in exhaust gas. The use of hydrogen fuel not gasoline makes this possible because all of the carbon component in exhaust gas can be assumed to be produced from oil. As a result of experiment, it is known that the oil consumption varies periodically and a specific location of ring end gap was found at each peak of oil consumption. Therefore, it was found that the oil consumption was not constant even at the same operating conditions and this is because the relative locations of top and 2'nd ring end gap change arbitrarily.

주요기술용어 : radio-tracer technique(방사능추적기술), instantaneous oil consumption(순간오일소모), hydrogen engine(수소엔진), CO₂ concentration(CO₂ 농도), ring gap phase angle(링갭 위상각)

1. 서론

엔진운전 중 소모되는 오일의 양을 줄이는 것

* 정희원, 현대자동차 선형연구소

** 현대자동차 선형연구소

*** 한국 원자력연구소

은 배기가스 규제의 관점에서도 중요하게 다루어지고 있다. 그런데 오일이 소모되는 경로 중 피스톤과 링팩을 통한 소모는 그 생성기구의 복잡성과 현상파악의 어려움 등으로 아직도 미해결과제로 남아 있으며 특히 오일소모의 순간적 변화는 그 측정기술 개발 등과 함께 많은 기술적 과제가 있다. 오일소모의 순간적 변화는 Hiruma 등[1]이 수소연료 엔진을 사용하여 오일소모를 순간적으

로 측정하였을 때 1.5cycle/min 간격으로 오일소모량이 변하였는데 그때 링의 축방향 거동패턴도 함께 변한다는 것을 알아낸 바 있고 그 후 Furuhashi[2]도 단폭 2-링 피스톤 사양으로 오일소모와 링거동의 변화 및 관련성을 증명하였다. 그러나, 무엇이 오일소모나 링거동의 변화를 유발하였는가는 명확히 밝혀내지 못하였다.

오일소모의 순간적인 변화를 측정하는 기술은 크게 세가지로 분류할 수 있다. 하나는 전술한 바와 같이 수소연료를 사용하여 배기가스 중 추출된 이산화탄소는 모두 오일에 기인한다는 가정 하에 배기가스의 변화를 계속 측정함으로써 오일소모량을 추정하는 방법이고 다른 하나는 연료에는 황을 최대한 작게 섞고 오일에는 황을 많이 첨가하여 배기가스 중 황화합물로부터 오일소모량을 측정하는 방법이다. 두 번째 방법은 Baily 등[3]과 Maeda 등[4]이 실험하고 발표한 바 있다. 그러나 이 방법은 연료 및 오일의 특수제작, 캘리브레이션(calibration) 등의 문제로 인하여 실용화되지는 못한 실정이다. 마지막 방법으로는 방사능 추적자를 이용하는 기술로서 Mayer 등[5]이 실험하였는데 이 방법은 앞의 두 방법에 비하여 반응속도가 늦어 순간적 측정에는 부적합하다. 이후에도 De Peris 등[6]이 이산화탄소 농도를 측정하여 오일소모를 측정하고 역 블로바이 등과의 관련성에 대하여 연구한 바 있으나 수소연료를 이용한 것이 아니고 가솔린엔진을 모터링시키고 실험하였기 때문에 실제 오일소모 특성과는 다소 거리가 있다.

본 연구에서는 오일소모의 순간적 변화특성을 연구하기 위하여 수소엔진을 쓰고 이산화탄소를 분석함으로써 오일소모를 측정하였다. 톱링과 세컨링의 회전운동을 동시에 측정하여 순간순간 변하는 오일소모와 링겍의 위상각과의 관계를 구하였다. 두 변수와의 관계로부터 오일소모 메커니즘을 분석하고 실제 오일소모가 증가하게 되는 상태를 알아내었고 피스톤 및 링의 설계를 변경하였을 때의 변화를 실험하여 오일소모를 저감하는 방안을 모색하였다.

2. 실험

2.1 실험엔진 및 피스톤계

오일소모를 순간적으로 측정하기 위하여 수소연료를 사용하였는데 주요 사양을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications of test engine

Item	Specification
Type	1-cylinder Spark Ignition
Fuel	Hydrogen(99.9%)
Bore×Stroke	82×93.5
Displacement	493.78 cm ³

피스톤과 링의 설계가 오일소모 변화에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 피스톤의 형상과 링의 사양을 몇 가지로 변경하며 실험에 사용하였는데 이를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Specifications of pistons and rings

사양		1	2	
피스톤	chamfer	無	有	
링	톱링	gap	0.2	0.2
	세컨링	gap	0.5	0.5
		undercut	無	有

2.2 오일소모 측정법

실험장치의 구성을 Fig.1에 나타내었다. 주요 구성장치로는 흡입공기의 유량을 측정하는 유량계(Laminar type air flowmeter)와 수소연료 공급장치 및 인젝터, 배기가스 샘플링장치, 가스분석기 등이 있다.

연료 중에는 탄소성분이 없어 배기가스에서 검출되는 CO₂는 모두 오일이 연소하여 생긴다는 가정 하에 오일소모와 CO₂ 농도와의 관계는 다음과 같이 유도할 수 있다. 탄소의 질량흐름 M_C(kg/hr)와 수소의 질량흐름 M_H가 완전히 산화

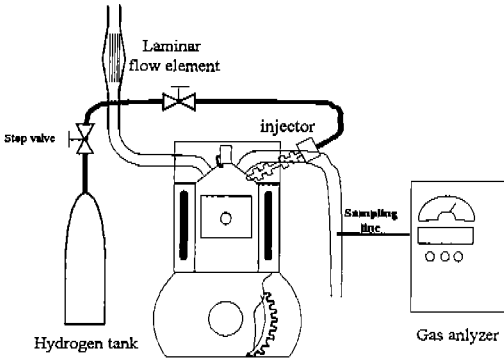


Fig.1 Schematic of oil consumption measurement

하는데 필요한 산소량 M_o 는 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있고 이를 또 부피관계로 나타내면 식 (2)와 같이 된다.

$$M_o = \frac{8}{3} M_c + 8M_H \quad (kg/hr) \quad (1)$$

$$V_o = \frac{24}{32} \times \left(\frac{8}{3} M_c + 8M_H \right) \quad (m^3/hr) \quad (2)$$

흡입공기량 V_{air} 와 배기가스량 V_{ex} 는 배기가스 중 수분이 모두 제거되기 때문에 식 (3)과 같이 되고 이에 식 (2)를 대입하면 배기가스량, 흡입공기량, 연료량과의 관계는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_{ex} = V_{air} - V_o + \frac{22.4}{12} M_c \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_{ex} &= V_{air} - \frac{22.4}{12} (M_c + 3M_H) \\ &\quad + \frac{22.4}{12} M_c \\ &= V_{air} - 5.6M_H \end{aligned} \quad (4)$$

소모된 오일은 대부분 산화하여 CO_2 를 형성 하지만 일부는 불완전연소하여 CO, HC의 형태로 배출되기도 한다. 따라서 본 연구에서는 편의상 CO, HC의 농도도 측정하고 CO_2 농도 측정값에 합하여 CO_2 농도값에 할당하였다. 드라이 배기가스 중 CO_2 농도를 ppm으로 표시하고 식 (4)를 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} [CO_2] &= \frac{V_{CO_2}}{V_{ex}} \\ &= \frac{(22.4/12) \cdot M_c}{V_{air} - 5.6M_H} \times 10^6 \quad [ppm] \end{aligned} \quad (5)$$

오일 내 탄소의 질량분율은 0.86 정도 이므로 식 (5)의 관계식으로부터 오일소모량을 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 배기가스 중의 CO_2 에는 오일 중의 탄소가 산화된 것 외에 공기 중에 존재하던 CO가 있으므로 이를 제거해 주었다.

$$M_{oil} = \frac{M_c}{0.86} = \frac{V_{air} - 5.6M_H}{1.6056} \times \{ [CO_2]_{measured} - [CO_2]_{base} \} \times 10^{-6} \quad (kg/hr) \quad (6)$$

위에서 $[CO_2]_{measured}$: 측정된 CO_2 농도

$[CO_2]_{base}$: 공기 중의 CO_2 농도

엔진시험에서 얻은 조건 별 공기유량으로부터 오일소모량에 대한 CO_2 농도의 변화를 보면 Fig.2와 같다. 오일소모량과 CO_2 농도는 서로 비례하고 속도가 증가하여 공기량이 많아지면 같은 오일소모량에도 CO_2 농도가 작아짐을 알 수 있다.

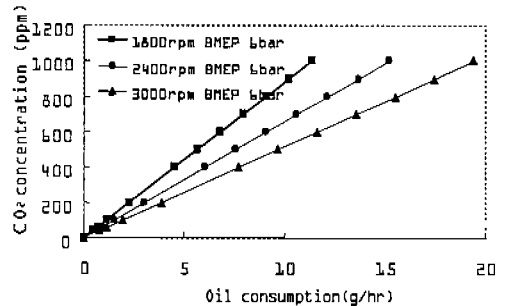


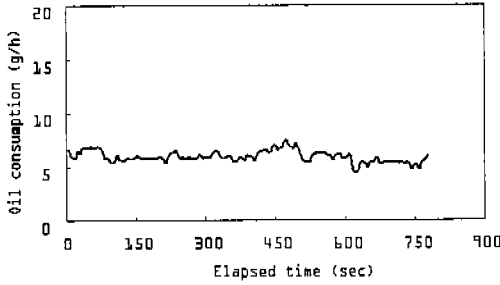
Fig.2 Change of CO_2 concentration by oil consumption

3. 결과 및 검토

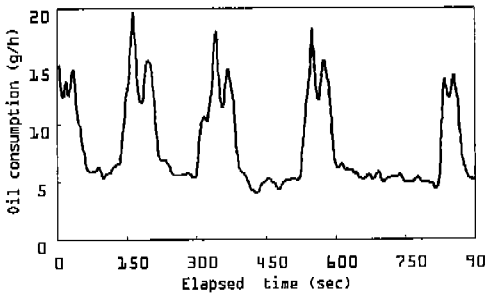
3.1 오일소모의 순간변화

Fig.3에 동일한 운전조건(4000rpm, BMEP 4bar)에서 순간오일소모의 변화를 나타내었다. 그림 중에서 (a)는 안정된 오일소모 값을 갖고 거의 변화가 없는데 반하여 (b)에서는 약 3분 정도의

주기를 갖고 3~4배까지 증가하였다가 원래대로 돌아오는 현상을 주기적으로 관찰할 수 있다. 즉 동일한 운전조건 하에서도 오일소모에 영향을 주는 다른 인자가 존재하며 그 인자는 나타날 수도 있고 나타나지 않을 수도 있다는 것을 보여준다.



(a) Test 1



(b) Test 2

Fig.3 Change of instantaneous oil consumption (4000rpm, BMEP 4bar)

본 연구에서는 그 요인을 링갭의 위상각으로 보고 링의 회전운동과 오일소모의 변화를 동시에 측정하였는데 그 결과를 Fig.4에 나타내었다. 그림에서 톱링과 세컨링의 갭각도(gap angle)는 링갭이 어디에 위치하는가를 나타내는 것으로 시간 경과에 따라 갭각도가 증가하는 것은 링이 시계 방향으로 회전하고 있다는 것을 의미하고 그 반대는 반시계방향으로 회전한다는 것을 의미한다. 엔진속도가 낮아 오일소모의 변화폭이 Fig.3의 중속조건에 비하여는 작지만 주기적으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 또한 그 주기가 링의 회전운동과 일치한다는 것도 알 수 있다. 이 조건에서

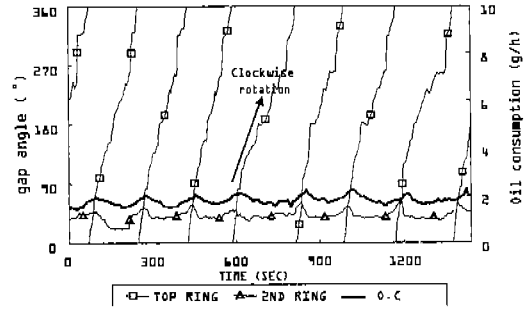


Fig.4 Change of oil consumption caused by the ring rotation (2000rpm, BMEP 2bar)

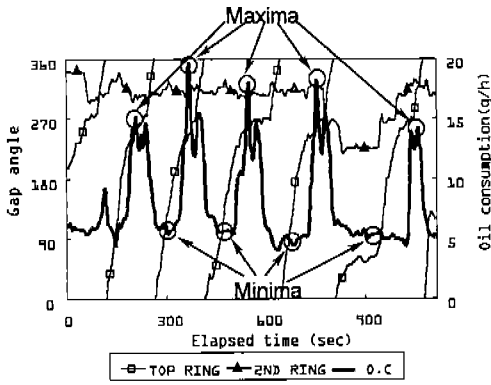
세컨링의 거의 고정되어 있어 오일소모의 변화는 거의 톱링의 회전주기와 일치하였다.

3.2 오일소모를 유발하는 링 갭각도

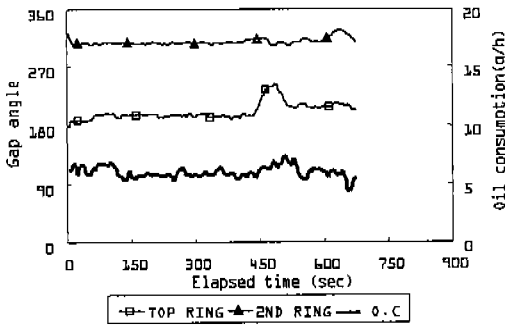
앞장에서 오일소모의 주기성이 링 회전운동의 주기성과 일치한다는 것을 보였는데 본 장에서는 구체적으로 피스톤링의 어떠한 위치가 오일소모를 증가시키는가를 논하였다. Fig.5에 중속 중부하 조건에서 오일소모가 순간적으로 변하는 조건과 변하지 않는 조건에서 오일소모와 링의 회전을 동시에 나타내었다.

예상했던 바와 같이 오일소모가 거의 일정한 조건에서는 두 개의 링이 모두 움직이지 않고 있으며 오일소모가 변하는 조건에서는 톱링이 오일소모와 같은 주기로 회전하고 있다. 즉 피스톤링갭의 특정한 위치가 오일소모를 유발한다고 보여진다.

어떠한 위치에서 오일소모가 커지는가와 작아지는가를 확인하기 위하여 오일소모가 극대값(Maxima)과 극소값(Minima)을 가질 때 링갭의 위치를 샘플링하여 Fig.6에 나타내었다. 그림에서 빗금친 부분은 톱링과 세컨링의 갭각도의 차이가 90° 이내인 영역이고 그 외의 부분은 갭각도의 차이가 90° 이상인 영역을 나타낸다. 그림에서 극대값은 모두 빗금친 영역, 즉 갭각도의 차이가 90° 이내인 영역에 모두 들어있고 극소값은 그 차이가 90° 이상인 영역에 들어있다. 즉



(a) Rotating case



(b) Fixed case

Fig. 5 Change of oil consumption at rotating and fixed ring condition

톱링과 세컨링의 갭이 서로 가까이 있을 수록 오일소모가 증가할 가능성이 커지고 멀어질수록 그 가능성이 작아진다는 것을 알 수 있다. 또한 오일 소모에 영향을 미치는 주요 인자는 링 갭각도의 특정한 위치 보다는 톱링과 세컨링의 상대적인 위치였다.

3.3 피스톤 및 링형상의 영향

순간 오일 소모 변화에 대한 피스톤 형상 및 링 갭비 변화의 영향을 파악하였다.

3.3.1 피스톤 링갭비 변화의 영향

Fig. 7은 피스톤 링갭비($C_1=0.5, C_2=0.5$)를 증가시킨 경우의 순간 오일 소모 경향과 피스톤 링 회

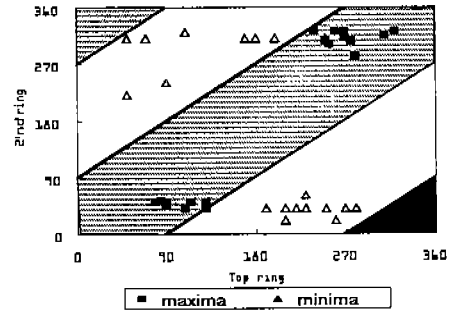


Fig.6 Scattering of gap angle at max. and min. oil consumption

전 운동을 측정된 결과이다.

피스톤 링이 회전함에 따라 순간 오일 소모도 주기적으로 최대치와 최소치가 반복되어 나타나는 경향을 보이며, 톱링과 세컨링의 상대적인 위치가 가까울수록 오일 소모는 증가하고, 멀어질수록 오일 소모가 감소하는 경향을 보인다.

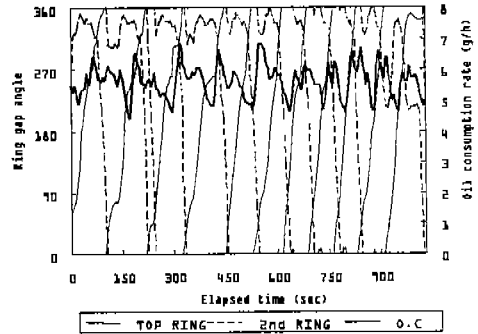


Fig.7 Oil consumption and ring rotation ($C_1=0.5, C_2=0.5, 4000\text{rpm}, \text{bmep } 2\text{bar}$)

3.3.2 제 3랜드 모따기의 영향

Fig. 8은 순간 오일소모 변화에 대한 피스톤 형상의 영향을 파악하기 위하여 피스톤의 제3랜드에 모따기를 설치하여 피스톤 링 회전 운동과 순간 오일 소모량을 측정된 결과이다.

링 회전운동의 패턴은 앞장에서 서술한 바와 유사하고 오일소모도 마찬가지로 링의 회전운동과 동일한 주기로 증가와 감소를 반복하고 있다.

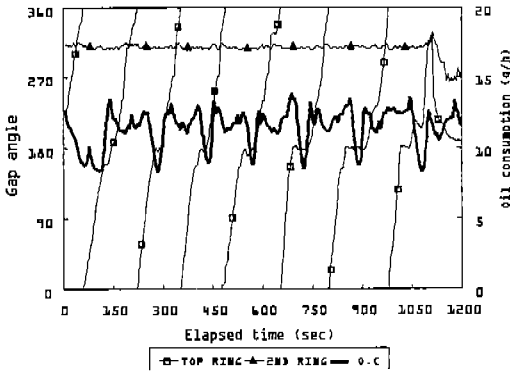


Fig.8 Oil consumption and ring rotation with chamfer and undercut(4000rpm, BMEP 2bar)

또한, Fig. 7의 사양과 비교해볼 때, 오일소모량도 증가하고, 오일소모의 변동폭도 증가하는 경향을 보인다.

이러한 현상의 원인은 추후 검토를 필요로 하지만 피스톤 및 링의 설계를 변경시킴에 따라 이와 같이 동적인 요인에 의해서도 오일소모의 변화가 있다는 것을 알 수 있었다.

3.4 검토

이상과 같은 순간오일소모 변화의 가능한 원인으로서는 다음 3가지 정도를 들 수 있다.

- (1) 보어변형
- (2) 블로우 다운(Blow down) 효과
- (3) 오일풀(oil pool)의 존재

가능한 원인 중 첫 번째로 보어 변형이 효과가 있는가를 확인하고자 보어변형을 측정하였는데 이를 Fig.9에 나타내었다. 그림에 나타난 3개의 점선이 깊이 방향으로 3군데 측정한 변형모양을 나타낸다.

엔진의 실린더는 볼트축력 등에 의하여 보어가 국부적으로 변형할 가능성이 있고 링갭이 이러한 변형부위와 일치하게 되면 오일소모가 순간적으로 증가할 가능성이 있다는 것은 기 보고된 바 있다. 그러나 본 실험은 단기통엔진에서 수행하였기 때문에 Fig.9에 나타내었듯이 보어의 변형이 양호하며 특히 국부적인 변형은 통상적인 다

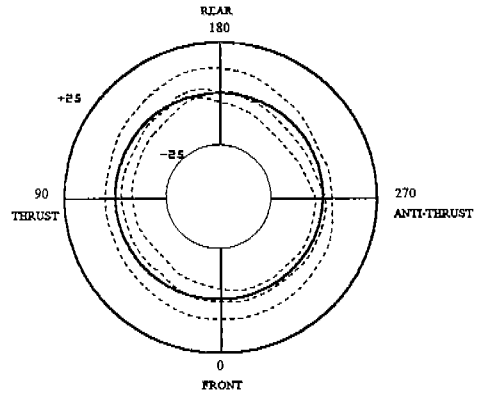


Fig.9 Cylinder bore distortion

기통엔진에 비하여 1/5 정도에 불과하였다. 따라서 보어변형에 의한 순간 오일 소모 변화에의 영향은 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

순간 오일 소모 변화에 영향을 주는 다른 요인으로는 Fig.10에 나타난 바와 같은 블로우 다운 효과를 들 수 있다. 블로우 다운이 톱링의 갭을 통해 들어오고 다시 세컨링의 갭을 통해 빠져나가는 과정에서 랜드 부의 오일을 쓸어내리는 효과가 있다. 이 효과는 두 링갭 간의 거리가 멀어지면 멀어질수록 커지는데 링갭이 서로 가까이 위치하면 그 효과가 거의 없어 오일소모가 순간적으로 증가할 수 있다는 것이 하나의 요인이 될 수 있다.

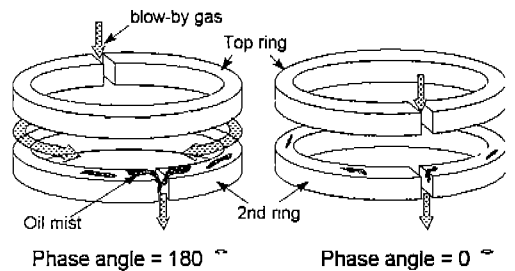


Fig.10 Effect of blow down

순간 오일 소모에 영향을 주는 다른 하나의 요인을 Fig.11에 나타내었다. 피스톤의 세컨랜드에는 오일이 균일하게 분포되어 있지 않고 군데군데 오일풀(oil pool)이 존재한다. 그런데 Fig.11의

우측에 나타낸 그림과 같이 톱링이 회전하다가 톱링갭이 오일풀 위에 위치하게 되면 오일이 톱링갭을 통해 연소실로 올라가기 쉽게 되고 그 반대로 좌측에 나타낸 그림과 같이 톱링갭 하부에 오일이 많이 존재하지 않으면 연소실로 오일이 올라가기 어렵게 된다. 이때 오일풀 존재의 가능성이 동일한 이유로 세컨링갭 근처에서 높게 된다. 따라서 톱링갭이 세컨링갭 근방에 위치하면 링갭이 오일풀과 만날 가능성이 커지고 그에따라 오일소모가 증가하게 된다.

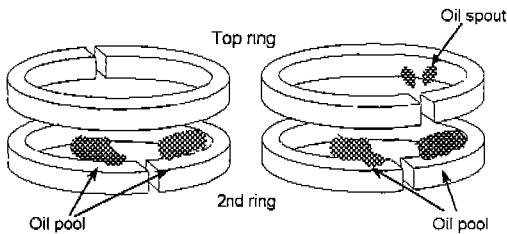


Fig.11 Effect of uneven oil distribution in second land on the instantaneous oil consumption

본 실험에서 얻은 결과의 원인을 위의 두 메카니즘으로 설명하였다. 저자의 의견으로는 하나의 메카니즘이 지배적으로 작용하는 것이 아니라 각각 상호 영향을 미치면서 복합적으로 오일소모를 변경시킨다고 생각된다. 여기서 알 수 있는 중요한 사실은 오일소모의 최종과정으로써 톱링이 제대로 긁어내리지 못한 오일의 양 뿐 아니라 각 랜드에서 가스의 흐름, 그 흐름에 영향을 미치는 링갭의 위치 또는 피스톤의 자세, 랜드의 형상 등도 크게 중요하다는 것이다. 위의 두 메카니즘은 현재 증명되지는 않은 가설이다. 하지만 이 메카니즘을 증명할 수 있다면 오일소모의 최종 과정을 이해하는데 큰 도움이 될 것이라 생각한다.

4. 결론

방사능 추적기술(Radiotracer technique)을 이용하여 링의 회전운동을 측정하였고 이와 동시에 오일소모의 순간변화를 측정하여 톱링과 세컨링의 꺾각도와 오일소모와의 관계에 대하여 다음과

같은 결론을 얻었다.

- (1) 엔진운전 중 동일한 운전조건 하에서도 오일소모는 일정하지 않고 주기적 또는 불규칙적인 변동을 나타내었다. 이러한 오일소모의 변동주기와 링의 꺾각도와와의 변동주기가 일정하다는 것으로부터 링의 꺾각도가 오일소모의 변동을 유발한다는 것을 알 수 있었다.
- (2) 오일소모가 클 때의 링 꺾각도를 종합해 보면 링갭이 어떤 특정한 위치에 있을 때 오일소모가 증가하는 것이 아니라 톱링과 세컨링의 상대적인 위치에 의해 오일소모 변동이 있다는 것을 알 수 있었다. 즉 톱링과 세컨링의 꺾각도가 서로 90° 이상 떨어져 있지 않을 때 오일소모가 증가하였고 그 이상 떨어지면 오일소모가 안정된 값을 나타내었다.
- (3) 본 실험결과에서 나타난 오일소모 변동의 원인은 실린더보어의 변형에 의한 것이 아니라 불로우다운 효과 또는 오일풀의 존재에 의한 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. M.Hiruma, H.Yoshida, S.Furuhama, K.Shin, "Effect of Piston Ring Movement upon Oil Consumption", JSAE Review, pp26-32, March 1983.
2. S.Furuhama, T.Hyuga, M.Takiguchi, S.Serizawa, "A Study of Decrease Oil Consumption for NSOR-Two-Ring Package Piston", SAE 910435, 1991.
3. B.K.Bailey, S.Ariga, "On-Line Diesel Engine Oil Consumption Measurement", SAE 902113, 1990.
4. Y.Maeda, T.Inoue, M.Nakada, Y.Hamada, "Investigation of the Transient Oil Consumption of Engine by the Newly Developed Oil Consumption Meter" SAE 860544, 1986.
5. W.J.Mayer, C.P.Moore, D.P.Krause,

W.H.Lange, C.B.Murphy, and
J.J.Klepaczik, "Rapid Precise
Measurement of Engine Oil Economy by
a Radiometric Method", SAE paper

660058, 1966.

6. C.De Petris, V.Giglio, G.Police, "Some
Insight on Mechanisms of Oil
Consumption", SAE paper 961216, 1996.