

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0093

피스톤 랜드 부에서 오일거동의 가시화 Visualization of Oil Behavior in Piston Land Region

민 병 순*
Byungsoon Min

ABSTRACT

In order to clarify the final process of oil consumption, the distribution and flow of oil through each ring were visualized by induced fluorescence method. Motoring and firing test were performed in a single cylinder research engine with transparent cylinder liner. The appropriate calibration techniques were used to solve the unstability of induced light intensity as well as to know the relation of the oil film thickness and output signal. Oil behavior was also observed at dynamic state by high speed CCD camera.

By analyzing the oil film thickness converted from the photographed image, it was observed that the main route of oil transport through each ring is the end gap under the usual operating condition, low engine speed and low load condition. Oil film thickness is observed to be irregular and tend to move in a body horizontally at a given piston land. And it is also found that oil flows through oil ring gap so quickly that it can be observed in a single cycle, but it flows so slowly through top and 2nd compression rings that it takes quite a long time to detect the flow.

주요기술용어 : Oil Consumption(오일소모), Visualization(가시화), Fluorescence(형광), Piston Ring Gap(피스톤 링 갭), Oil Film Thickness(유막두께)

1. 서 론

엔진에서 오일소모의 증가는 단순히 차량유지 비용의 상승 뿐 아니라 가솔린엔진과 디젤엔진 모두에서 배기가스에 악영향을 미치기 때문에 유해 가스 저감 및 환경보호의 점에서도 매우 중요

한 인자로써 이의 주요 경로로 알려져 있는 피스톤과 링에 많은 연구와 개선이 이루어져 왔다.

연구의 주요 대상으로는 링의 축방향 거동, 제 2랜드의 압력, 링-라이너 간 유막두께 등을 들 수 있다. 실제 엔진의 개발에서는 설계인자의 변경에 따른 오일소모와 이들 특성과의 관계를 규명하는 것으로 이루어지고 있어 이러한 물리량에 대한 이론 및 실험적 접근이 지속적으로 이루어지고 있다. 그러나 이상과 같은 접근방식은 실제

* 회원, 현대자동차 파워트레인 연구소

로 이루어지는 현상을 정확히 파악하지 못하기 때문에 단순한 추론에 그치고 있다. 따라서 실제로 어떤 과정을 거쳐서 오일 소모가 일어나는가를 관찰하여 좀 더 명확히 현상파악을 할 수 있다면 실제 문제의 해결을 쉽게 하고 개발의 초점을 맞추는 데 도움이 될 것을 기대할 수 있다.

이를 위하여 광학특성을 이용하여 오일의 흐름을 관찰하고 유막두께를 측정하는 방법이 발달되어 왔다. 가시화창을 설치하고 오일을 직접 카메라로 촬영하는 방법도 Nakashima 등¹⁾과 Saito 등²⁾에 의해 시도되었으나 이는 정량적인 분석이 어렵기 때문에 그 활용방안이 제한적일 수 밖에 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 오일의 형광을 이용하는 방법이 개발되었고 이 방법으로써 오일의 흐름 뿐 아니라 정량적인 분석까지도 가능하게 되었다. 최초로는 가시화창을 통해 레이저를 주사하고 오일에서 나오는 형광의 양을 광전자증배관(photo-multiplier tube)으로 측정하는 방법이 시도되었다. 이에 대하여는 Hault 등^{3,4)}이 이론적 배경을 제공하고 보정시험을 통해 유막두께와의 상관관계를 증명하였다. 이 방법은 한 점에서만 측정이 가능하도록 되어 있는데 Sanda 등⁵⁾과 Murakami 등⁶⁾이 폴리곤 미러를 회전시켜 측정영역을 넓힌 방법을 개발하였다. Richardson 과 Borman⁷⁾은 레이저 광을 투명실린더를 통해 주사하지 않고 라이너에 장착된 광섬유(optical fiber)를 통해 주사함으로써 투명실린더를 불필요하게 하여 측정시스템의 내구성을 크게 증가시켰다.

이상과 같이 레이저에 의해 유도된 형광을 이용하여 유막두께를 측정하는 방법은 정량적 분석은 할 수 있지만 폭방향의 변화를 측정할 수 없기 때문에 링 갭 및 랜드를 통한 오일의 흐름을 보기 어렵다. 따라서 정량적 분석과 함께 유막의 거동을 피스톤 링팩 전체에 걸쳐 2차원적으로 측정할 수 있는 시험방법이 요구되는데 이 방법의 원리는 Jakobs⁸⁾가 제시한 바 있다. 그런데 그 당시에는 화상으로 얻어지는 결과를 취득하고 분석하는 기술의 뒷받침이 없었기 때문에 시험방법이

발전하지 못했다가 최근들어 카메라 등 기초 측정기술의 개발과 함께 유막 측정기술도 크게 발전되었는데 이 방법을 이용하여 Inagaki 등⁹⁾이 측정법과 함께 오일의 상승모습, 랜드부 오일의 양과 오일소모와의 관계에 대하여 발표하였다.

본 연구에서는 피스톤 전체에서 유막을 측정할 수 있는 2차원적 실험방법을 채택하여 오일의 거동을 관찰하고 적절한 보정법을 통하여 유막두께를 정량화시켰다. 실제 피스톤과 링을 사용하여 점화상태에서도 실험을 수행하였다. CCD 카메라를 이용하여 정상상태와 천이상태의 유막거동을 촬영하였고 고속 CCD 카메라를 이용하여 동적인 상태에서 순간순간의 유막거동을 촬영하였다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 측정원리

Lux 등¹⁰⁾에 따르면 형광제를 적절히 섞으면 유막두께가 200 μ m에 이를 때까지 유막두께와 형광의 강도가 7% 내외의 오차로 선형적으로 비례하는 관계를 갖고 있다. 이러한 원리를 이용하여 링팩 내 오일의 거동을 관찰하고 유막두께를 측정할 수 있었는데 본 연구에 적용된 측정원리와 신호의 흐름을 Fig.1에 나타내었다.

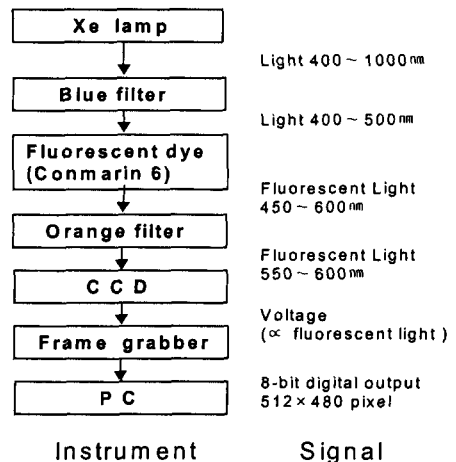


Fig. 1 Signal flow diagram of oil film thickness

광원으로는 제논 램프를 사용하였고 오일에 섞

는 형광제로는 Coumarin-6를 사용하였다. 적절한 필터를 사용하여 조사광과 형광의 파장대를 조절함으로써 유막두께에 비례하는 형광을 CCD 카메라로 취득하였고 이를 PC로 전송하여 데이터 처리 및 분석을 수행하였다.

2.2 측정장치

측정장치의 개략도를 다음 Fig.2에 나타내었다. 투명한 실린더를 갖는 단기통 엔진을 제작하였고 그 위에 제논램프로 빛을 조사하고 오일에서 나오는 형광의 양을 CCD 카메라를 이용하여 취득하였다.

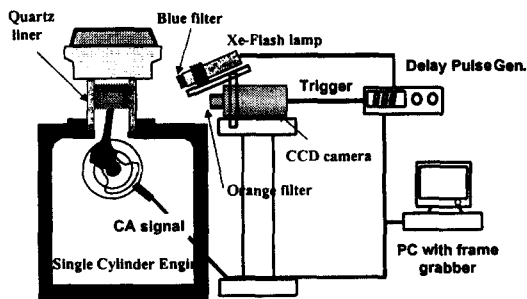


Fig. 2 Schematic diagram of measurement system

2.3 실험엔진 및 실험내용

본 연구에는 2.0 l 급 수냉식 4기통 엔진을 기본으로 개조한 단기통 엔진을 사용하였다. 주요 제원을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications of test engine

| Item | Specification | |
|-----------------------|---------------|---------------------------------|
| Displacement volume | 494cc | |
| Bore×Stroke | 82×93.5 mm | |
| Piston ring (폭×두께) | Top | 3.1×1.2 mm(C ₁ =0.3) |
| | 2nd | 3.1×1.2 mm(C ₂ =0.6) |
| | Oil | 3.1×2.5 mm |

위의 엔진을 이용하여 실험은 세 가지로 수행하였는데 그 내용을 Table 2에 나타내었다. 정상 상태 실험은 주어진 엔진의 운전조건에서 유막의 대략적인 패턴을 알아보기 위한 실험이다. 그리고 실제 차량 운전의 대부분을 차지하고 실차 오

일소모 및 마모에 증대한 영향을 미치는 천이상 상태에서 유막의 변화와 오일유동을 관찰하였다. 차량 시동시와 엔진브레이크를 천이상 상태 실험의 조건으로 삼았다. 마지막으로 피스톤 부위를 고속으로 촬영하여 실제 오일이 링을 거슬러 오르는 현상을 눈으로 확인하였다. 실험 중 정상상태와 천이상 상태의 실험에는 ICCD(Intensified Charge Coupled Device)를 사용하여 촬영하였고 동적 상태에서의 실험에는 순간적으로 변화하는 모습을 촬영해야 하기 때문에 촬영속도가 빠른 고속 CCD 카메라에 증폭기(Intensifier)를 부착하여 실험하였다. 고속 CCD 카메라의 최대 영상 취득속도는 500 (frame/sec)이다.

Table 2 Test code of visualization

| 항목 | 설명 | 조건 |
|----|-----------------|---|
| 1 | Steady state | 운전조건 고정 1000 ~ 2000rpm, motoring & firing |
| 2 | Transient state | 운전조건 변화 Engine brake (Firing→Motoring) Engine start (stop→motoring) |
| 3 | Dynamic state | 한 사이클 내 에서 변화측정 1000 ~ 2000rpm, motoring |

3. 보정실험 및 오차분석

3.1 보정실험

본 연구에서 형광의 양에 비례하여 촬영되는 이미지에서 오일의 형태와 거동을 관찰하였고 그 이미지로부터 유막두께를 정량화할 수 있는 방법까지 제시하였다. 이를 위하여 원주 외면에 계단식으로 홈이 나 있는 실린더를 제작하고 그 홈에 오일을 채워서 보정실험을 하였는데 이를 Fig.3에 나타내었다.

계단식 홈을 갖고 있는 실린더를 피스톤과 동일한 방식으로 투명실린더에 삽입하고 고정된 뒤 실제 실험과 마찬가지로 빛을 조사하고 이미지를 촬영하였다. 그 실린더의 외면에는 위의 Fig.3에 나타낸 바와 같이 기초원으로부터 10 μ m~100 μ m

까지 계단을 만들었는데 이 계단의 깊이를 유막 두께로 보고 그 점에서 형광강도와와의 관계를 미리 구하였다. 이 관계를 이용하여 실제 실험에서 측정된 이미지로부터 유막두께를 환산하였다.

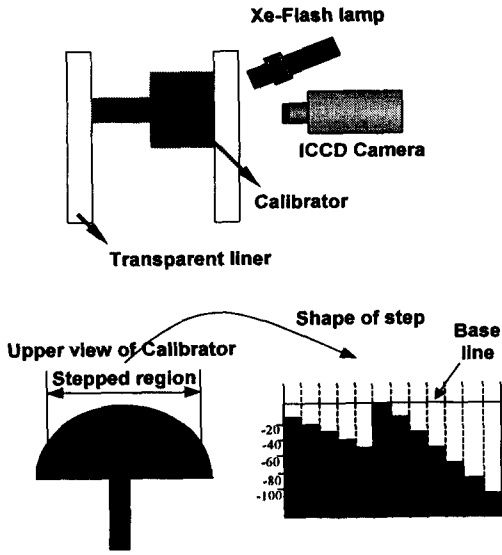


Fig. 3 Calibration system and calibrator

Fig.4는 임의의 세 점에서 보정시험의 결과를 나타낸 것이다. 유막두께와 형광의 강도가 서로 선형으로 비례함을 알 수 있다. 각 점마다 유막두께와 빛의 강도 사이에 선형성과 제로점이 조금씩 다르게 나타난다. 이는 각 측정점 마다 조사되는 빛의 강도와 유막의 각도 등이 다르기 때문이라고 판단된다.

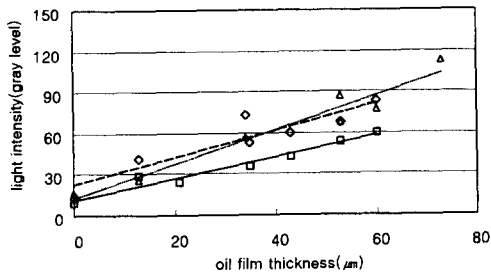


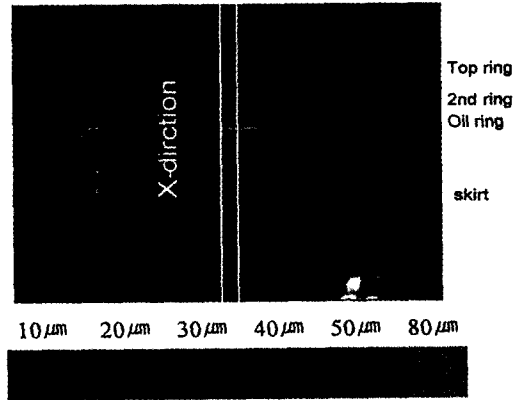
Fig. 4 Calibration chart of selected point

4. 실험결과

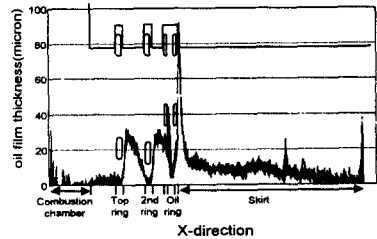
4.1 정상상태의 측정결과

4.1.1 유막두께의 분포

측정결과와 예로써 2000rpm, 모터링 조건에서 팽창행정 ATDC 45 °일 때 측정된 이미지와 그 이미지로부터 유막두께를 환산한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. (a)의 이미지에서 오일이 많이 존재하는 부분은 밝게 나타나고 오일이 적은 부분은 어둡게 나타나고 있다. 링 부분은 유막두께가 얇기 때문에 어둡게 나타나고 랜드 부와 스킨트는 상대적으로 밝게 나타난다. (b)의 그래프는 20개의 선을 겹쳐서 그려놓은 것이다. 각 링들이 오일을 상당량 긁어 내리고 있음을 보여준다.



(a) Image



(b) oil film thickness profile

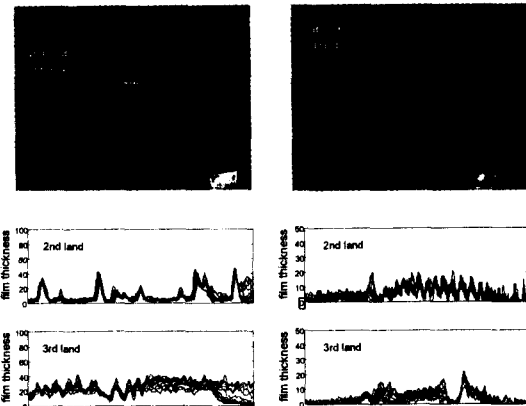
Fig. 5 Vertical distribution of oil film thickness (T/side, 2000rpm, motoring, EXP., atdc 45 °)

위의 그림을 보면 톱링과 세컨링의 유막두께보다 오일링의 유막두께가 크게 나타난다. 이는 이

른상 면압이 큰 오일링의 유막두께가 작아야 한다는 예상과는 다르게 나타난 것으로 실제 유막 두께가 작용하중 또는 링 외주면의 형태 보다는 계산에 고려하기 어려운 오일의 공급조건에 크게 좌우된다는 것을 의미한다.

앞의 그림에는 각 구성요소를 거치면서 변화하는 유막의 패턴을 나타내었고 동일한 기능영역인 제2랜드와 제3랜드에서 폭방향 유막두께의 변화를 Fig.6에 나타내었다.

랜드와 링을 통과하면서도 유막이 변화하지만 동일한 영역에서도 두께가 변화하고 있음을 볼 수 있다. 즉 오일이 랜드 영역에서 균일하게 분포되어 있지 않고 서로 뭉쳐서 움직이려는 경향을 갖고 있다고 말할 수 있다. 따라서 한 점에서만 유막두께를 측정하는 기존의 레이저 스캐닝 방법에 의한 결과로부터 현상을 파악하는 것은 오해를 불러올 가능성이 있다.



(a) A/thrust, 1000rpm (b) Thrust, 1000rpm
motoring, EXP, atdc 45 ° firing, COMP, btcd 30 °

Fig. 6 Horizontal distribution of oil film thickness

4.1.2 유막의 정량적 분석

본 연구에서는 보정실험을 통해 확립한 정량화 기법을 통해 엔진 운전 중 각 랜드에 실제로 얼마 만큼의 오일이 머물러 있는가를 분석해 보았다. Fig.7에 촬영영역에서 각 랜드의 오일량을 정량화하여 나타내었다.

촬영영역인 70 ° 내에서 톱랜드와 세컨랜드,

3rd 랜드의 오일량은 0.01~0.03cc 정도의 구간에서 대략 비슷한 값을 나타내고 있다. 또한 앞절에 나타낸 이미지로부터 예측할 수 있었던 바와 같이 스커트 상단의 오일량은 0.1cc 정도로 각 랜드에 비해 약 3~4배 정도 많은 오일이 머물러 있다. 여러 측정결과와 표준편차 영역을 'I'로 표시하였는데 각 랜드에서의 오일량이 약간의 편차를 갖고 있지만 대체로 각 기능영역에서 일정한 영역 내에서 움직이고 있음을 알 수 있다. 스커트 상단의 오일이 각 랜드에 오일을 공급하여 각 링의 윤회에 기여하고 최종적으로는 톱링을 통과하여 소모된다.

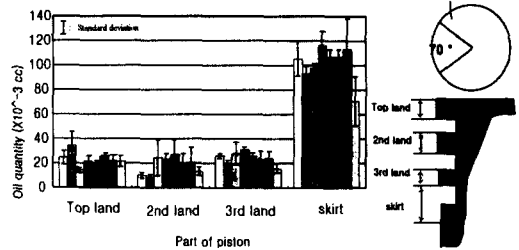


Fig. 7 Quantity of oil at each land of piston during engine operation(1000rpm, motoring & firing, Expansion, ATDC 45 °, A/thrust side)

4.2 천이상태의 측정결과

4.2.1 엔진브레이크 시

실제 주행 시 흔히 일어나는 운전 모드인 엔진 브레이크는 연소실에 큰 부압이 걸리기 때문에 링팩 내에서 일어나는 현상이 보통의 운전조건과 다른 양상을 나타내고 이것이 오일소모에 크게 영향을 미친다. 그러나 실제 엔진개발에 있어서는 오일소모는 주로 고속·고부하 조건에서 개발하여 실제 필드에서 흔히 발생하는 엔진브레이크 조건의 중요성이 간과되고 있는 실정이다.

이 조건에서 중요한 것은 링팩에서 가스의 유동방향이 바뀐다는 것이다. 즉 보통의 조건에서는 연소실의 압력이 높아 블로바이 가스가 각 링 겹을 통해 빠져나가면서 오일을 쓸어 내리지만 엔진브레이크 시에는 그 반대 방향의 유동이 생

겨 거꾸로 오일을 연소실로 쓸어 올리게 된다. 이를 실제로 확인하기 위하여 엔진 브레이크상태로 만들어 놓고 시간이 경과함에 따라 촬영하였는데 이 때 얻어진 이미지를 Fig.8에 나타내었다.

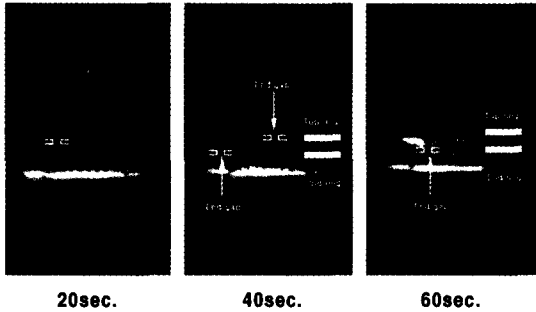


Fig. 8 Oil behavior under the engine brake condition

엔진브레이크 후 40~60초 사이에 상당량의 오일이 세컨링을 지나 세컨랜드로 올라가 있고 이러한 현상이 링갭의 위치와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 이는 실 엔진운전 상태에서의 오일소모의 주요 경로가 각 링의 갭이고 따라서 오일소모를 줄이기 위하여는 링갭의 위치와 관련된 가스의 역류 등에 좀 더 개발의 초점을 맞추어 한다는 것을 의미한다.

4.2.2 엔진 시동시

엔진을 오랫동안 정지시켜 놓으면 오일이 흘러내리기 때문에 링팩 주위에는 오일의 양이 많이 줄어들게 된다. 그런데 엔진을 다시 운전시키면 정상상태로 돌아오리라는 것을 예상할 수 있는데 그때까지 걸리는 시간과 변화 경향을 알아 보기 위하여 시동 후 유막거동을 측정하였다. 시동후 일정 시간 마다 톱랜드부터 스커트 상단부까지의 이미지를 확대한 것과 또 이를 오일량으로 환산하여 시간에 따라 나타낸 그래프를 Fig.9에 나타내었다. 랜드로 올라가는 오일의 대부분이 링의 갭을 통해 올라가기 때문에 톱링과 세컨링의 엔드갭을 위주로 촬영하였다.

먼저 이미지를 보면 11초 경과 후에는 톱랜드와 세컨랜드가 어둡게 나타나 거의 오일이 존재하고 있지 않음을 알 수 있다. 그런데 시간이 경

과함에 따라 주로 링갭을 기점으로 흐름이 형성되어 오일이 서서히 거슬러 올라가고 있음을 볼 수 있다.

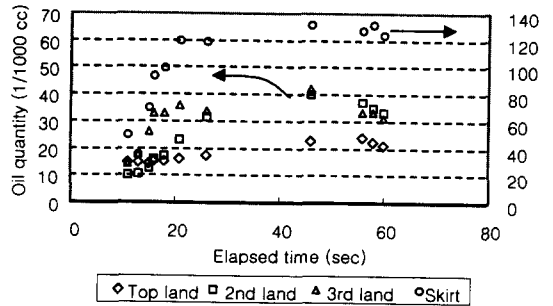


Fig. 9 Oil behavior after engine start

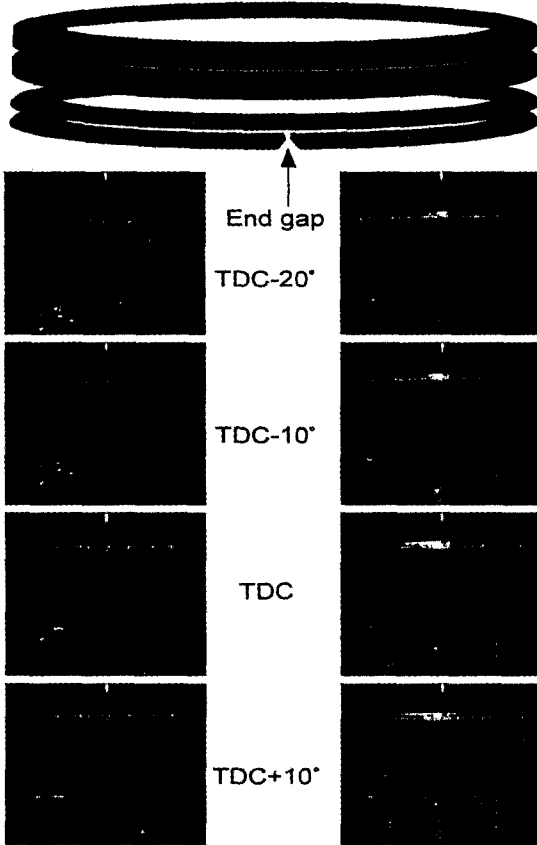
이들 이미지로부터 유량으로 환산하여 시간축으로 나타낸 그래프를 보면 시동후 약 30초까지 스커트 상단 뿐 아니라 각 랜드에 오일의 양이 급격히 증가하고 그 이후에는 그 양에 큰 변화가 없어 정상상태에 들어섰다는 것을 볼 수 있다. 즉 엔진시동도 앞 절의 엔진브레이크와 마찬가지로 엔진 운전 조건변화에 따라 링팩 주변의 오일량이 변하는데 이에 걸리는 시간은 대략 30~60초 정도라는 것을 알 수 있었다.

4.3 오일의 동적 거동

Fig.10은 오일링의 엔드갭을 전면부로 하고 한 사이클 내에서 오일거동을 고속카메라로 촬영한 결과를 TDC 근방에서 압축-팽창 행정과 배기-흡기행정으로 나누어서 나타낸 것이다.

배기-흡기 행정의 TDC 근방에는 오일링의 갭을 통해 상당량의 오일이 오일링 그루브와 제3랜드로 거슬러 오르고 있음을 볼 수 있다. Fig. 10의 우측에 표시한 원(○) 안에 이러한 오일 상승이 잘 나타나 있다. 반면에, 압축-팽창 행정에서는 그러한 현상을 거의 관찰할 수 없다. 이 결과

로부터 알 수 있는 것은 첫째, 오일링을 통과하는 오일의 흐름은 한 사이클 내에서 유동이 관찰될 수 있을 정도로 순간적으로 이루어진다는 것이고 두 번째로는 이러한 오일의 흐름이 압축-팽창 행정 보다는 연소실 압력이 낮아 가스가 역류되는 배기-흡기 행정에서 이루어진다는 것이다.

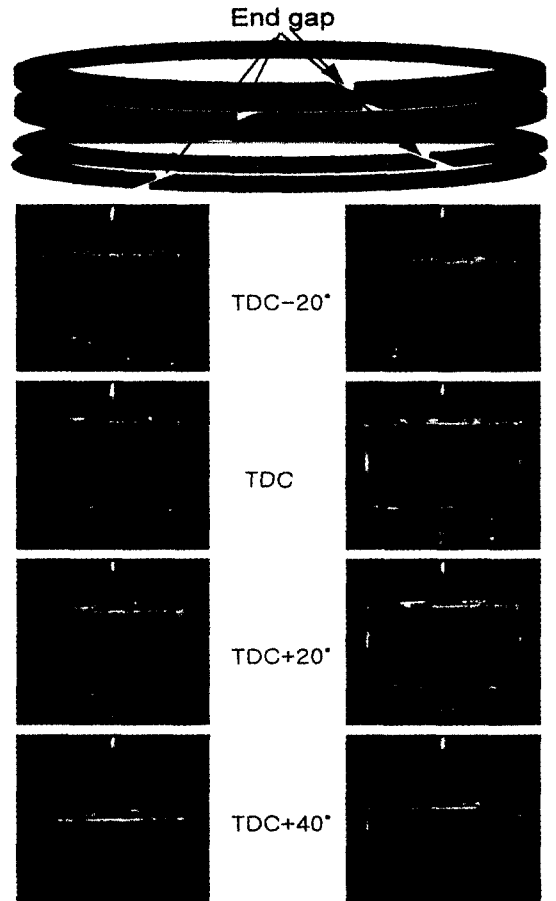


(a) Compression-Expansion (b) Exhaust-Intake
Fig. 10 Dynamic characteristics of oil flow through oil ring gap(1000rpm, motoring)

앞절에서는 오일링을 통한 흐름을 살펴 보았다. 톱링과 세컨링의 갭을 통한 오일의 흐름은 어떻게 형성되는가를 보기 위하여 톱링과 세컨링의 갭을 전면으로 놓고 촬영하여 그 결과를 Fig.11에 나타내었다.

톱링과 세컨링의 갭을 중심으로 오일의 흐름이 형성되어 있음을 알 수 있다. 그러나 오일의 혼

적이 변화가 없어 전술한 오일링의 갭을 통한 흐름과는 달리 동적인 변화는 관찰할 수 없다. 천이 상태에서는 톱링과 세컨링의 갭을 중심으로 각 란드의 오일량이 변화하여 링갭을 통한 오일유동을 추측할 수 있었다. 그렇지만 본 결과는 그러한 유동이 오일링을 통한 유동과는 달리 순간적으로 일어나는 것이 아니라 일정한 유동패턴을 갖고 서서히 일어난다는 것을 보여준다.

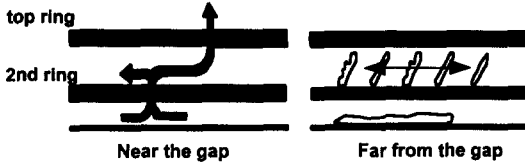


(a) Compression-Expansion (b) Exhaust-Intake
Fig. 11 Dynamic characteristics of oil flow through top and 2nd ring gap(1000rpm, motoring)

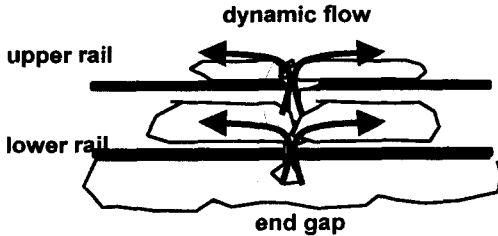
4.4 저·중속에서의 오일소모 메카니즘

이상과 같이 실제 주행 모드인 저·중속 운전과 엔진브레이크 상태를 모사한 운전조건에서

CCD 카메라를 이용하여 정상상태부터 천이상태와 동적상태에서 링팩에서의 오일거동을 관찰하였다. 이 결과를 바탕으로 실제 오일소모 현상을 모델링하여 Fig.12에 나타내었다.



(a) Oil flow through top and 2nd ring gap



(b) Oil flow through oil ring gap

Fig. 12 Modeling of oil consumption through each ring gap based on the observed phenomenon

먼저 톱링과 세컨링을 통과하는 오일 흐름은 대략 다음과 같은 패턴을 갖는다. 첫째, 오일은 주로 링갭을 통하여 이동한다. 따라서 링갭이 있는 부근에는 일정한 유선(streamline)을 형성하며 오일이 흐르고 있다. 그러나 링갭이 없는 부분에는 오일이 뭉쳐서 가스의 흐름에 의해 병진운동을 하는데 일정한 유동방향은 없다. 둘째는 운전조건이 변하여 링팩 내 가스유동의 패턴이 바뀌어도 오일의 흐름이 순간적으로 이루어지지 않고 일정 시간이 흘러야 유량변화가 나타난다. 오일량의 변화는 엔진브레이크와 엔진 시동시 모두 약 30~60초 정도 걸린다.

반면에, 오일링을 통한 오일의 흐름은 연소실에 부압이 걸리는 배기-흡기 행정 사이의 TDC 근방에서 급격하게 발생한다. 이때 많은 양의 오일이 오일링의 갭을 거쳐서 올라간다.

지금까지 유막두께의 차이가 주된 오일소모 경

로로써 인식되어 왔다. 따라서 이를 저감시키기 위하여 오일소모의 주된 인자로서 알고 있는 링의 장력을 증대시키는 것으로 대응해 왔다. 그러나 이 방안은 최근의 연비절감을 위한 엔진의 마찰력감소 경향에 배치되는 것이다. 따라서 링의 장력을 최소화 하여 마찰력을 줄임과 동시에 오일소모 문제를 야기하지 않는 엔진을 개발하는 것이 무엇보다도 중요한 과제이다. 본 연구의 결과로써 실제 차량상태에서 대부분의 운전이 일어나는 조건인 저속·저부하 영역에서는 가스의 유동이 활발하기 때문에 링갭을 통한 오일의 흐름이 오일소모에 지배적인 인자가 됨을 알 수 있었다. 따라서 추후에는 이같은 경로를 통한 오일소모를 효과적으로 방지함으로써 마찰력 증가를 수반하지 않고 오일소모를 저감하는 방안으로 엔진이 개발되어야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 유막가시화 시스템을 개발하여 실제 운전시 오일이 소모되는 현상을 관찰할 수 있도록 하였다. 또한 보정실험 방법을 개발하여 촬영된 이미지로부터 실제 유막두께를 환산할 수 있도록 하였고 이 결과로부터 링 팩의 각 란드에서 어느 정도의 오일이 존재하는가를 확인하였다. 이와같이 개발된 측정시스템을 이용하여 정상상태부터 천이상태, 동적상태까지 엔진 운전시 오일의 거동을 측정하였다. 그 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 실제 주행모드인 저속운전과 저속모터링에서 엔진오일은 주로 링의 갭을 통하여 연소실 쪽으로 올라간다.

2) 톱랜드와 세컨랜드에서 링갭 근처에는 일정한 유선을 갖고 오일이 지속적으로 흐르지만 링갭의 반대쪽에서는 오일이 일정량 씩 뭉쳐서 병진운동한다.

3) 운전모드를 변경하여 링팩에서의 가스유동의 패턴이 바뀌면 톱랜드와 세컨랜드에서의 오일량이 바뀌는 데 이에 걸리는 시간은 대략 30~60

초 정도이다.

4) 오일링을 통한 오일거동은 연소실의 부압이 높은 모터링시 배기-흡기 행정에서 급격하게 발생한다. 배기-흡기 행정의 TDC 근방에서 연소실의 부압에 의한 가스 역류에 의해 상당량의 오일이 오일링 겹을 거슬러 스커트로부터 제3랜드로 올라간다.

참 고 문 헌

- 1) K.Nakashima, S. Ishihara, K. Urano, K.Murata, "Lubricating Oil Flow into the Combustion Chamber and its Reduction Method in an Automobile Gasoline Engine", SAE 962034, 1996.
- 2) K.Saito, T.Igashira, M.Nakada, "Anaysis of Oil Consumption by Observing Oil Behavior Around Piston Ring using a Glass Cylinder Engine" SAE 8921072, 1989.
- 3) D. P. Hoult, J. P. Lux, V. W. Wong, S.A.Billian, "Calibration of Laser Fluorescence Measurements of Lubricant Film Thickness in Engines", SAE 881587, 1988.
- 4) D.P.Hoult and Masaaki Takiguchi, "Calibration of Laser Fluorescence Technique Compared with Quantum Theory", Journal of STLE, Vol. 34. 3, pp440-444, 1990.
- 5) S. Sanda, A. Saito, Y. Shimura, M.Murakami, T.Konomi, H.Nohira, "Analysis of Oil Film Behavior between Piston and Cylinder Liner by Using Scanning LIF", Journal of JSAE, Vol.24, No.3, 1993.
- 6) M. Murakami, T. Konimi, H. Nohira, S.Sanda, A.Saito, T.Noda, "Analysis of Oil Film Behavior between Piston and Cylinder Liner by Using Scanning LIF", J. of JSAE, Vol.24, No.3, 1993.
- 7) D. E. Richardson and G. L. Borman, "Theoretical and Experimental Investigations of Oil Films for Application to Piston Ring Lubrication", SAE 922341, 1992.
- 8) Rolf Jakobs, "Untersuchung der Kolbenschaftschmierung an einem Glaszylinder-Modellmotor", MTZ 40 (1979) 6.
- 9) H. Inagaki, A. Saito, M. Murakami, T.Konomi, "Development of Two Dimensional Oil Film Thickness Distribution Measuring System", SAE 952346, 1995.
- 10) J.P.Lux and D.P.Hoult, "Lubricant Film Thickness Measurements in a Diesel Engine Piston Ring Zone", Journal of STLE, Vol. 47, 5, pp353-364, 1991.