

유기형광법을 이용한 피스톤 유막두께의 이차원적 측정

Measurement of two dimensional oil film thickness in piston by induced fluorescence method

민병순 최재권

Byung-soon Min Jae-kwon Choi

현대자동차 중앙연구소

Central Research Center, Hyundai Motor Company

Abstract

The distribution of oil film thickness in piston were measured by induced fluorescence method. A Xe lamp was used as light source. Coumarine-6 was mixed with oil as the fluorescent dye. Fluorescent signal which is proportional to the oil film thickness was acquired by CCD camera and transmitted to the personal computer as video signal. In order to solve the problem of measurement system, irregular distribution and unstability of light intensity, as well as to know the relationship between the oil film thickness and output signal, three different calibration techniques were used. Motoring and firing tests were performed in a single cylinder research engine with transparent liner. By analyzing the oil film thickness converted from the photographed image, it was observed that each of three piston rings scrapes the oil both upward and downward and oil film thickness is not uniform horizontally at a given piston land. The amount of oil in each land was considerably affected by the engine load. It is thought that the blow-by gas blows the oil down to the crankcase.

Key word : Fluorescence, Oil film thickness, Visualization, Piston ring pack, Optical characteristics, Blow-down effect

1. 서론

피스톤링 팩 주변의 유막두께와 오일의 거동을 알아내는 일은 피스톤링의 윤활 및 마모 뿐 아니라 오일소모의 관점에서도 중요한 단서를 제공한다. 따라서 많은 선행 연구자들이 실험 및 해석에서 연구를 수행하였다. 피스톤 링 주변의 유막두께는 방정식으로는 고려할 수 없는 인자들이 너무 많이 있기 때문에 좀 더 신뢰성있는 결과를 얻기 위하여는 해석하는 것보다 실제 상태에서 원하는 물리량을 직접 얻어내는 방법이 선호된다. 유막두께를 측정하는 방법으로는 크게 전기적 특성을 이용하는 방법과 광학특성을 이

용하는 방법으로 구분할 수 있다. 전기적 방법으로는 주로 정전용량(capacitance)의 변화율 측정하는 방법이 사용되는 이에 관하여는 Hamilton과 Moore[1]의 연구결과가 있다. 이 방법은 양산엔진에 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있지만 측정할 수 있는 유막두께의 범위가 작고 오일의 유무를 구별할 수 없기 때문에 링 윤활의 유무족(oil starvation) 현상이나 오일이 링을 거슬러 올라 소모되는 오일이송(oil transport)현상 등을 규명하기는 불가능하다. 따라서 이같은 전기적 방법의 문제점을 해결할 수 있는 유막두께 측정 방법의 개발이 요구되어 왔다. 광학특성을 이용하여 오일의 두께를 직접 측정

함으로써 이와 같은 문제점을 해결할 수 있었는데 오일의 광학특성으로는 형광(fluorescence)이 주로 사용되어 왔다. 최초로는 가시화장을 통해 레이저를 주사하고 오일에서 나오는 형광의 양을 광전자증배관(photo multiplier tube)으로 측정하는 방법이 시도되었다. 이에 대하여는 Hoult 등[2][3]이 이론적 배경을 제공하고 보정시험을 통해 유막두께와의 상관관계를 증명하였다. 이 방법은 한 점에서만 측정이 가능하도록 되어 있는데 Sanda 등[4]과 Murakami 등[5]이 폴리곤 미러(polygon mirror)를 회전시켜 측정영역을 약간 넓은 방법을 개발하였다. Richardson 과 Borman[6]은 레이저 광을 투명실린더를 통해 주사하지 않고 라이너에 장착된 광섬유(optical fiber)를 통해 주사함으로써 투명실린더를 불필요하게 하여 측정시스템의 내구성을 크게 증가시켰다.

위에 서술한 방법들은 오직 한점에서만 측정이 가능하기 때문에 피스톤의 운동에 따른 유막의 변화패턴은 볼 수 있지만 폭방향의 변화를 측정할 수 없기 때문에 링갭 및 랜드를 통한 오일의 흐름을 보기 어렵다. 따라서 유막의 거동을 피스톤 링팩 전체에 걸쳐 2차원적으로 측정할 수 있는 시험방법이 요구되는데 Saito 등[7]이 오일에 색소를 첨가하고 카메라로 촬영한 결과가 있다. 이는 오일의 대략적인 거동패턴은 볼 수 있지만 정량적인 분석은 불가능한 것이었다. 유막의 거동과 함께 정량적 분석까지 하기 위하여는 유막의 형광을 이용하여야 하는데 이 방법도 원리는 오래전에 Jakobs[8]가 제시한 바 있다. 그런데 화상으로 얻어지는 측정결과를 취득하고 분석하는 기술의 뒷받침이 없어 시험법의 발전이 없다가 최근들어 카메라 등 기초 측정기술의 개발과 함께 유막측정기술도 크게 발전되었는데 이 방법을 이용하여 Inagaki 등[9]이 측정법과 함께 오일의 상승모습, 랜드부 오일량과 오일소모와의 관계에 대하여 발표하였다.

본 연구에서는 피스톤 전체에서 유막을 측정할 수 있는 2차원적 실험방법을 채택하여 오일의 거동을 보고 오일소모의 최종과정 및 작동구조를 파악하고자 하였다. 실험장치의 개선을 통하여 피스톤 전체에서의 유막관찰을 실제 점화운전에서도 할 수 있도록 하였고 보정방법(calibration method)을 개선하여 2차원 유막두께 측정법이 갖는 문제점을 개선하였고 유막두께를 정량화시켰다.

II 실험방법 및 장치

형광(fluorescence)이란 물질이 빛을 받으면 분자의 에너지 준위가 올라갔다 내려가면서 장파장의 빛을 발하는 현상을 말한다. Lux 등[10]에 의하면 형광제를 적절히 섞으면 유막두께가 200 μ m에 이를 때까지 유막두께와 형광의 강도가 7% 내의 오차로 선형적으로 비례한다. 이 원리를 이용하여 유막두께를 측정하는데 측정원리와 신호의 흐름을 Fig.1에 나타내었다. 제논 램프(Xe-lamp)로부터 400~1000nm의 파장분포를 갖는 빛이 발광하면 먼저 블루필터(blue filter)를 통과하게 되는데 이때 400~500nm 파장대의 빛만 통과하고 나머지는 차단된다. 이 빛을 유막에 조사하면 장파장(450~550nm)의 형광을 발하는데 오렌지 필터(orange filter)를 통과하면서 550nm 이하의 빛은 차단되고 그 이상의 빛만 통과하여 CCD 카메라로 들어간다. CCD 카메라에서는 각 부분에서의 빛 밝기를 구별할 수 비디오표로 만들어 PC로 전송하면 PC의 프레임 그래버(frame grabber)에서 화상을 취득하여 이미지 파일로 저장한다. 이를 추후에 이미지화일을 다룰 수 있는 프로그램으로 데이터 처리 및 분석을 행한다.

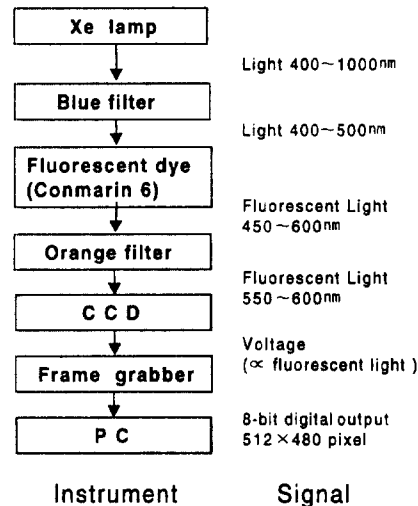


Fig.1 Signal flow diagram of oil film thickness

측정장치의 배치를 Fig.2에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 투명실린더를 갖는 단기통엔진을 제작하여 그 위에 제논램프로 빛을 조사하고 CCD 카메라로 촬영한다. 이때 중요한 것은 제논램프와 실린더 간의 거리이다. 제논램프에서

나오는 빛은 확산되기 때문에 램프를 실린더에 접근시키면 조사광의 강도가 높아 세밀한 측정이 가능하지만 화면의 중심부와 주변부 간의 빛의 강도 차이가 크게 되고 반대로 멀리 놓으면 빛의 강도가 약해져 원하는 감도를 얻을 수 없게 된다. 따라서 관심대상에 따라서 적절히 배치하여야 원하는 결과를 얻을 수 있다. PC로 전송된 데이터는 $2^8(=256)$ 의 분해능을 갖고 있는 480×512 개의 픽셀(pixel)로 구성된 이미지 파일로 저장된다.

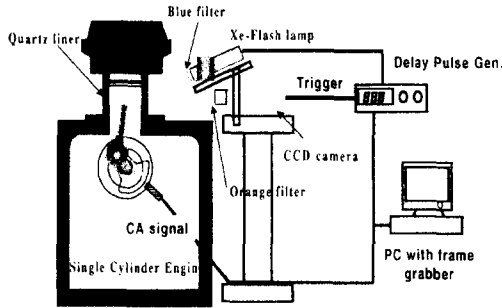


Fig.2 Layout of measurement system

III. 보정실험 및 오차분석

보정실험은 측정기서 나오는 출력값을 유막두께로 환산하는 계수를 구하는 목적과 측정시스템이 갖고 있는 문제점을 개선하는 두가지 목적으로 수행하였다. 이를 요약하면 다음 Table 1과 같다.

Table 1 Calibration items and purposes

	보정실험	목적
1	Spatial calibration	광원의 공간분포를 측정하여 추후 실험에서 입사광의 밝기를 보정
2	Static calibration	측정된 밝기를 유막두께로 환산하는 계수를 구함
3	Dynamic calibration	플래쉬 마다의 동적불안정을 보정

(1) 공간보정(Spatial calibration)

형광의 양은 유막두께에도 비례하지만 입사광의 강도에도 비례하는 특성을 갖는다. 그런데 본 실험에 사용한 제논램프는 램프에서 나온 빛이 확산하게 되어있다. 이러한 램프의 고유특성으로 인하여 측정영역의 중심부로는 많은 빛이 도달하고 주변으로는 적은 양의 빛만 도달하기 때

문에 동일한 유막두께라 하더라도 형광의 양이 광량에 비례하여 달라지게 된다. 이러한 외적요인을 상쇄시키기 위하여 Fig.4에 나타난 바와 같이 동일한 두께를 갖고 있는 유막을 이용하여 광량의 분포를 측정하였다.

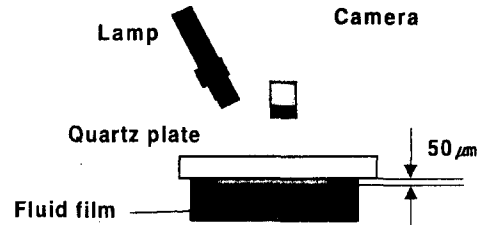


Fig.3 Measurement of light intensity distribution

Fig.3에 나타난 바와 같이 균일한 $50\mu\text{m}$ 두께의 유막을 촬영한 이미지와 밝기의 윤곽을 Fig.4에 나타내었다. 유막두께는 동일하지만 영역의 중심부는 매우 밝고 주변은 어두워 밝기 정도(gray level)의 차이가 크게 나타나고 있다. 이를 보정해 주지 않을 경우 측정결과는 실제 유막두께보다 광원의 위치, 각도 등에 의존하게 되어 의미가 없게 된다. 따라서 본 실험에서는 각 픽셀의 광량을 행렬(480×512)로 구성하고 추후 실험에서는 이와 동일하게 실험장치를 셋팅하고 각 픽셀에서 광량의 분포를 상쇄시켰다.

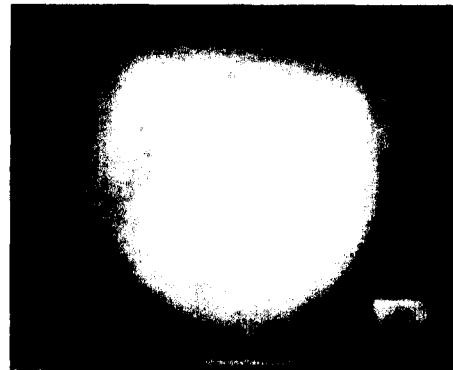


Fig.4 Measured distribution of light intensity

(2) 정적보정(Static calibration)

본 연구에서 측정된 형광의 강도를 유막두께를 환산해 주는 관계를 얻기 위하여 Fig.5과 같이 계단식으로 유막을 구성하고 static calibration을 수행하였다. $10\mu\text{m}$ 간격의 계단을 갖는 판을 미리

가공하고 오일을 채운 뒤 촬영한 결과를 Fig.6에 나타내었다.

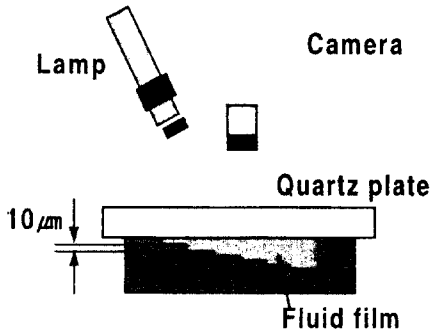


Fig.5 Static calibration system

Fig.6 (a)에 나타난 촬영된 원 이미지와 밝기(gray level)의 분포를 보면 계단식으로 된 유막 두께와 관계없이 빛의 밝기가 제멋대로 나타되고 있음을 알 수 있다. 이를 앞장에서 기술한 바와 같이 광량의 공간보정(spatial calibration)을 수행하고 그 결과를 (b)에 나타내었다. 원래의 측정결과와는 달리 형광분포가 유막두께에 따라 형성되고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 공간보정(spatial calibration)이 효력이 있다는 것과 유막두께와 측정신호와의 관계를 알 수 있었다.

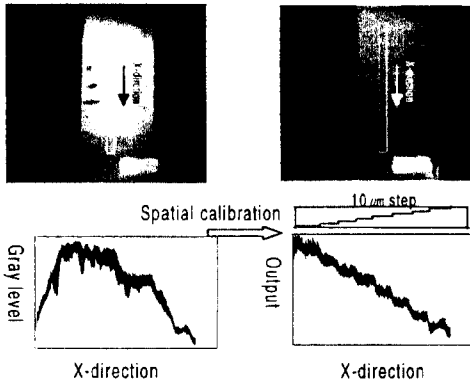


Fig.5 Measured sensitivity of fluorescence to the film thickness

Fig.7에 유막두께와 출력신호와의 관계를 나타내었다. 출력신호는 각 계단에서의 값을 그 영역에서 평균한 값을 나타낸다. 유막두께의 증가에 따라 출력이 선형적으로 증가하고 있으며 이때 감도는 0.92(output/ μm)이었다.

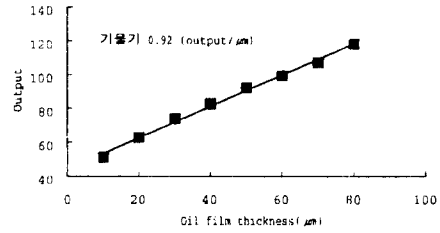


Fig.7 Relationship between oil film thickness and output signal

(3) 동적보정(Dynamic calibration)

제논램프가 유발하는 또 다른 오차요인은 매 플래시마다 5% 범위에서 광량이 변한다는 것이다. 이때의 오차도 최대한 제거해 주기 위하여 본 연구에서는 동일한 형광을 갖는 기준 표식(marker)을 측정영역의 구석에 설치하고 각 플래시마다 표식의값이 입사광량이라 가정하고 입사광량의 변화를 보정해 주었다. 이 보정방법의 효과를 검증하기 위하여 동일한 유막두께를 갖는 평판의 구석에 표식을 설치하고 10회 촬영하였다. Fig.8에 각 프레임(frame)에서 주어진 영역의 형광변화를 나타내었다. Fig.8에 나타난 결과 중 보정전에는 유막과 표식의 밝기(gray level)가 서로 비슷한 경향을 갖고 변해가고 있다.

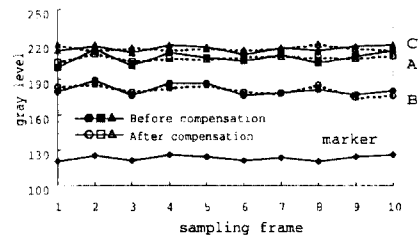
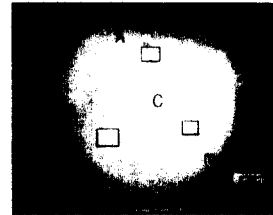


Fig.8 Fluctuation of inducing light

이 값을 표식의 밝기를 입사광의 강도로 가정하고 보정한 것을 점선으로 나타내었는데 변화모양이 다소 완화되고 있음을 보여준다. 변화폭들을 정리하여 Table 2에 나타내었다. 보정 전의 형광 변화폭은 제품의 카탈로그에 나타난 바와

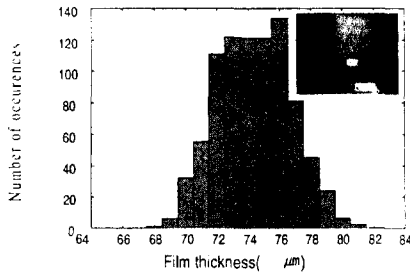
같이 5% 이내이었고 측정영역에서의 최대값은 4.5% 이었다. 이를 표식(marker)의 형광량을 기준으로 보정할 경우 그 변화폭이 다소 감소하였다. 그러나 아직도 3%가 넘게 변화하고 있어 본 방법의 효과는 있지만 좀더 개선의 여지가 남아 있음을 알 수 있다.

Table 2 Compensation of inducing light fluctuation

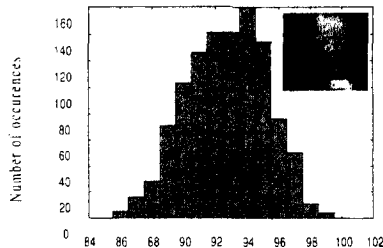
calibration region	Before	After
A	4.1%	1.9%
B	4.5%	3.4%
C	2.2%	1.5%

(4) 오차분석

Fig.6에 나타난 바와 같이 동일한 유막두께에서 나오는 형광의 값은 일정영역에서의 평균치는 유막두께에 비례하지만 개개의 픽셀(pixel)에서는 일정한 폭 안에서 계속 변동하는 불안정한 모습을 보인다. 동일한 유막두께를 갖는 유막의 일정영역에서 측정값의 분포를 Fig.9에 나타내었다. 동일한 유막두께를 갖고 있지만 측정된 형광은 평균값을 중심으로 정규분포를 보여준다. 이때 표준편차는 2~3 μm 이었다.



(a) step 3



(b) step 5

Fig.9 Histogram of measured fluorescence

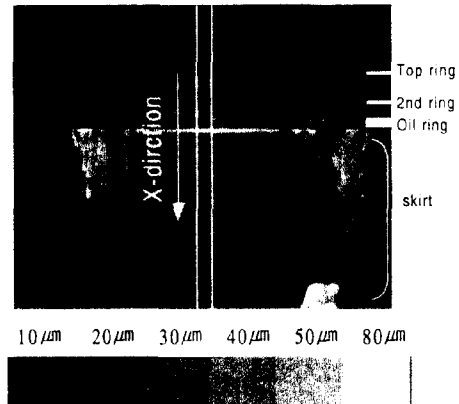
보정실험에서 나타난 이러한 특성이 실제 실험에서도 나타난다고 가정하면 95%의 신뢰수준에서 실험오차 한계는 최대 6 μm (=1.96 $\times\sigma$) 이다. 실험의 정밀도는 측정시스템의 배치에 따라 달라지는데 현 측정시스템의 배치는 각 랜드에서 오일의 거동을 보는데 적합하다고 판단된다.

IV. 결과 및 검토

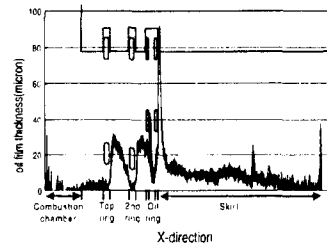
본 실험은 투명실린더를 사용하였기 때문에 그 내구성의 한계로 인하여 실험조건 상의 제약이 많았다. 엔진의 속도는 2000rpm까지 증가시켰고 모터링 실험을 스로틀을 연 상태(throttle)와 닫은 상태(boost)의 두가지 조건에서 수행하였고 실제 점화 운전은 BMEP 1.5bar에서 수행하였다.

(1) 측정된 이미지

측정결과 중 한 예로써 2000rpm, 부스트(boost) 조건의 팽창행정 ATDC 45° 일때의 측정결과를 Fig.10에 나타내었다.



(a) Image



(b) oil film thickness profile

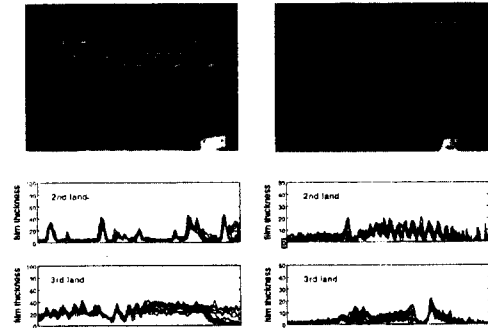
Fig.10 Vertical distribution of oil film thickness (T/side, 2000rpm, boost, expansion ATDC 45°)

(a)에 나타나 있는 이미지 중 오일이 많이 존재

하는 부분은 밝게 나타나고 오일이 없는 부분은 어둡게 나타난다. 링 부분은 유막두께가 얇기 때문에 어둡게 나타나고 링에 의해 긁어진 오일이 모이는 랜드 부 또는 스커트는 상대적으로 밝게 나타난다. 특히 오일링의 하단부가 가장 밝게 나타나 오일이 가장 많이 존재하고 있음을 알 수 있다. 유막두께를 좀 더 정확히 구별하기 위하여 이미지 중 A 영역의 밝기를 보정실험 결과를 바탕으로 정량화하여 (b)에 나타내었다. A 영역의 폭은 20픽셀로써 Fig.10(b)는 20개의 선을 겹쳐서 그려놓은 것이다. 하강행정 45° 경과 시점으로 각 링들이 오일을 상당량 긁어 내리고 있음을 보여준다. 톱링, 세컨링과 오일링의 하단에 상당량의 오일이 고여있고 특히, 오일링의 하단에 가장 많은 양의 오일이 머물러 있음을 볼 수 있다.

각 링에서의 유막두께를 보면 톱링과 세컨링의 유막두께 보다 오일링의 유막두께가 훨씬 두껍게 나타난다. 오일링은 톱링과 세컨링에 비하여 면적이 크기(약 4~5배) 때문에 이론상으로는 유막두께가 작아야 하는데 실제로는 크게 나타난다. 이는 실제 엔진운전 중 각 링의 유막두께는 작용하중 보다 오일의 공급조건에 더 많은 영향을 받기 때문이라고 생각된다. 따라서 실제 운전 중의 유막두께를 예측하기 위하여는 오일의 공급조건을 비롯하여 많은 변수들을 고려하여야 한다.

앞부분에서는 각 랜드와 링 그리고 스커트를 거쳐면서 오일유막이 어떻게 변화하는가를 살펴보고 Fig.11에는 동일한 기능을 하는 영역인 제2랜드와 제3랜드에서 폭방향의 유막두께 변화를 나타내었다.



(a) A/thrust, 1000rpm (b) T/side 1000rpm boost, Exp. ATDC 45 firing, Comp. BTDC 30
Fig.11 Horizontal distribution of film thickness

랜드 및 링을 통과하면서도 유막이 변하지만 동일한 영역에서도 두께가 변화하고 있다. 따라서 한 점에서만 유막두께를 측정하는 것은 현상에 대한 오해를 불러올 가능성이 있다

(2) 오일 긁어내림 효과

피스톤이 하강할 때는 라이너에 충분한 오일이 고여있기 때문에 각 링들은 그 오일들을 긁어내

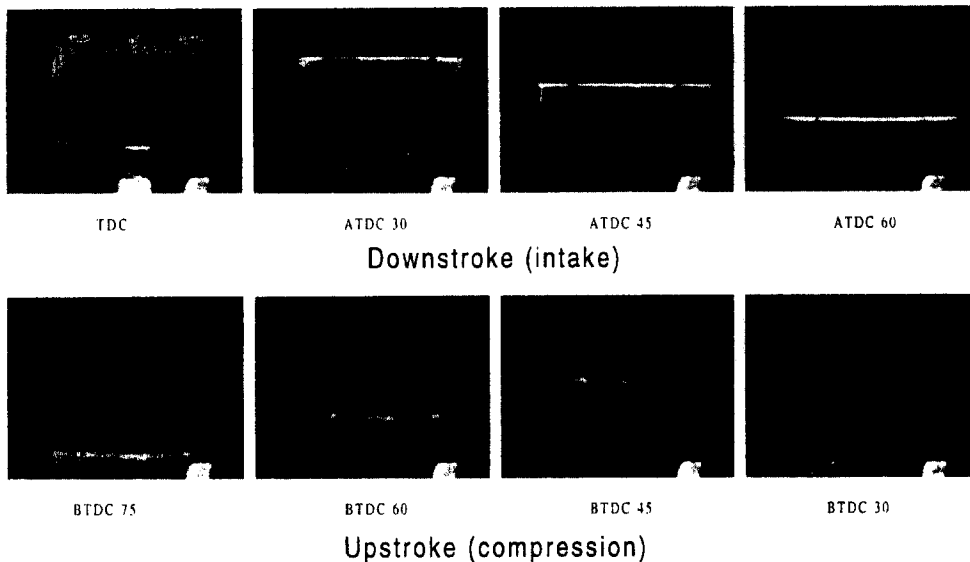


Fig.12 Oil scraping effect of piston rings at downstroke and upstroke (Thrust side, 2000rpm, throttle condition)

려 연소실로 못 올라가도록 해야하고 상승할 때는 라이너에 남아있는 미량의 오일과 각 랜드에 고여있는 오일이 윤활작용을 하게 된다. 이러한 차이점을 보기 위하여 상승행정과 하강행정에서 축적된 이미지를 Fig.12에 나타내었다. 각 랜드 (top land, 2nd land, 3rd land)에서의 유막은 차이가 거의 없어 그 오일들이 그대로 올라갔다, 내려오고 있다. 오일링 주변을 보면 하강행정에서는 오일링의 작용에 의하여 오일이 축적되어 ATDC 45°를 지나며 오일링의 하단에 많은 양의 오일이 급격히 축적되고 있다. 상승행정에서는 Fig.12에 나타낸 이미지들이 상승행정의 후반부임에도 불구하고 오일의 축적이 급격하지 않으며 스커트 상부와 오일링 사이에 넓게 퍼져 있다.

위와 같은 현상을 좀더 자세히 관찰하기 위하여 Fig.13에 유막두께의 분포를 각 행정별로 나타내었다. 앞장의 Fig.10과 마찬가지로 중앙의 영역에서 샘플링하였고 10개의 라인을 걸쳐서 나타내었다. 하강행정에서는 오일링의 하단에 오일의 형성이 급격하고 상승행정에서는 좀 더 넓고 완만하게 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 측정된 전 조건에서 톱링과 세컨링의 유막두께는 10 μ m 이내의 작은 값을 갖는데 오일링의 유막두께는 이보다 두껍게 형성되고 있다.

유막의 형성모습을 보면 굵은 링으로부터 급격

한 유막이 형성되고 이 유막이 선행링까지 서서히 감소하고 있다. 각 랜드에서는 후행링에 의해 오일이 긁어 올려지기도 하고 내려지기도 하는데 두 링의 사이인 랜드에 축적된 오일의 양은 큰 차이가 없다. 이는 링의 상승 및 하강운동 시 링과 라이너 사이의 유막을 통해 랜드 간을 이동하는 양은 많지 않다는 것을 의미한다.

(3) 엔진부하의 영향

스로틀(throttle)을 완전히 닫은 모터링 운전(boost)과 스로틀을 완전히 연 모터링 운전(throttle) 및 BMEP 1.5bar로 점화한 운전(firing) 등 총 3가지 조건에서 각 부하조건에 따른 유막 두께의 경향을 Fig.14에 나타내었다.

점화시의 유막두께는 모터링의 유막두께와 크게 차이가 난다. 모터링 운전조건에서는 각 랜드에 오일이 많이 고여 있으나 점화조건에서는 오일링의 주변을 제외하고는 각 랜드에 오일이 거의 존재하지 않는다. 엔진 운전의 대부분을 차지하는 실제 점화운전시에는 블로바이 가스(blowby gas)가 각 랜드를 통하여 크랭크케이스로 빠져나가기 때문에 랜드로부터 오일도 함께 빠져나가 랜드에 오일이 거의 존재하지 않으나 모터링 시에는 블로바이가 거의 없기 때문에 랜드로 올라간 오일이 그대로 유지된다. 특히, 흡기행정에서 연소실에 높은 부압이 형성되는 부스트 조건에서는 오일이 많이 올라와 있다.

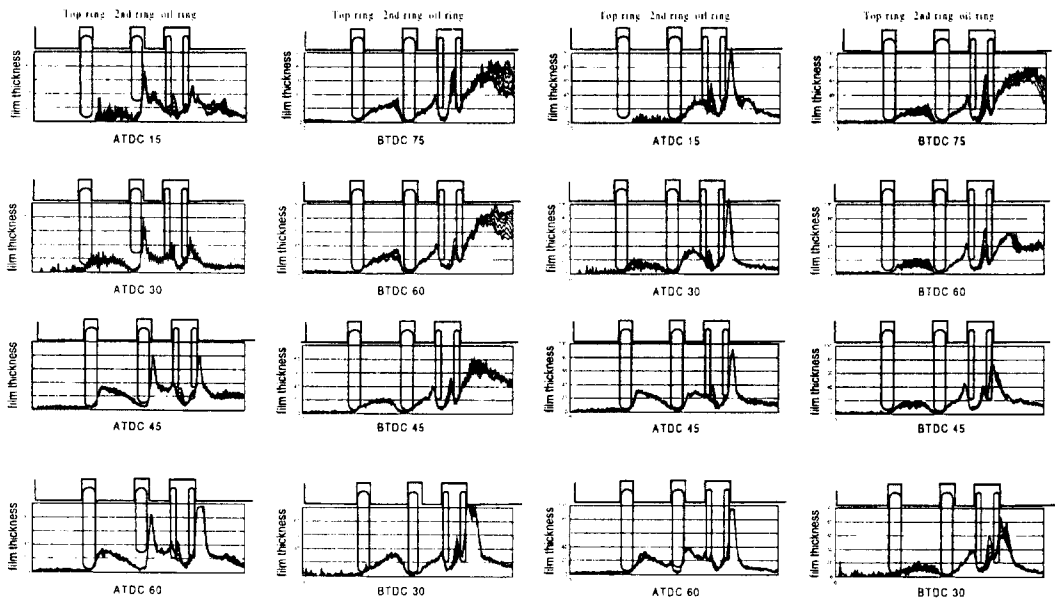


Fig.13 Measured profile of oil film thickness (Thrust side, 2000rpm, boost condition)

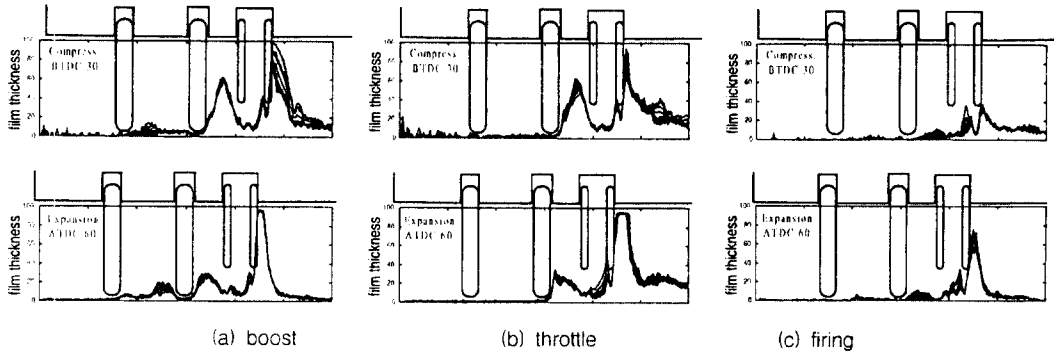


Fig.14 Change of oil film thickness profile according to the engine load (A/thrust, 1000rpm)

본 결과로부터 알 수 있는 것 하나는 엔진브레이크 주행시 오일소모가 급증하는 것이 연소실의 부압으로 인하여 가스가 오일과 함께 연소실로 역류하기 때문이라는 것이다. 다른 하나는 블로바이 가스의 오일 쓸어내림 효과가 매우 크다는 것이다. 실제 오일소모량에는 각 램드에서의 압력 발란스에 따른 블로방이 및 블로우업(blow-up) 가스의 양과 그 흐름의 경로가 매우 크게 영향을 미치리라는 것을 추측할 수 있다. 따라서 블로바이의 양 및 경로에 영향을 미치는 각 램드의 압력, 링갭의 위치 등의 효과를 좀더 상세히 연구할 필요가 있다.

V. 결론

1. Calibration 및 그 결과

- ① Spatial calibration : 광원의 공간분포 측정
→ 중심부의 광량이 주변부의 5~10배인 것을 보정
- ② Static calibration : 형광량을 유막두께로 환산
→ sensitivity : 0.92 output/ μm
- ③ Dynamic calibration : 광량의 fluctuation 보정
→ fluctuation을 30% 감소

2. 전 영역에서 오일링 주변 특히 하단에 가장 많은 오일이 고여 있었고 그에 따라 오일링의 유막두께가 톱링과 새컨링에 비해 두껍게 나타났다.

3. 하강행정에는 오일링의 긁어내림(scraping) 작용에 의해 오일링의 하단에 오일이 급격히 형성되어 있고 상승행정에는 그 형성이 완만하다.

4. 유막의 분포에 대한 부하의 영향은 크게 나타났다. 모터링에 비해 실 점화운전시에는 각 램드의 오일량이 크게 감소하였다. 이는 블로바이가스의 오일 쓸어내림 효과가 매우 크다는 것을

의미한다.

VI. 참고문헌

1. S.L.Moore, G.M.Hamilton, "The Starved Lubrication of Piston Rings in Diesel Engine", JMES, 20, 6, pp 345-351, 1978
2. 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
3. D.P.Hoult and Masaaki Takiguchi, "Calibration of Laser Fluorescence Technique Compared with Quantum Theory", Journal of STLE, Vol. 34, 3, pp440-444,1990
4. 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
5. 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
6. D.E.Richardson and G.L.Borman, "Theoretical and Experimental Investigations of Oil Films for Application to Piston Ring Lubrication", SAE 922341
7. K.Saito, T.Igashira, M.Nakada, "Anaysis of Oil Consumption by Observing Oil Behavior Around Piston Ring using a Glass Cylinder Engine" SAE 892107
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
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