

## 오일 소모 저감을 위한 역단류 2행정 프리피스톤 수소기관의 분리 윤활 특성 해석

변창희\*<sup>†</sup>, 백대하\*, 이종태\*\*

\*성균관대학교 대학원, \*\*성균관대학교 기계공학부

## An Analysis on Characteristics of Separate Oiling to Reduce Oil Consumption for a 2 Stroke Free-Piston H<sub>2</sub> Engine

CAHNGHEE BYUN\*<sup>†</sup>, DAEHA BAEK\*, JONGTAE LEE\*\*

*\*Grad. School of Sungkyunkwan Univ.,*

*300 Cheoncheon-dong Jangan-gu Suwon-si Gyeonggi-do 440-746, Korea*

*\*\*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.*

### ABSTRACT

In order to reduce the oil consumption for a 2 stroke free piston hydrogen fueled engine, the behaviors of residual lubricant oil of the cylinder wall surface were visualized and oil mass emitted into exhaust port was measured by using research engine with cross-head and eccentric crankshaft. As the results, it was shown that characteristics of residual lubricant oil such as oil thickness and distribution were remarkably different from a conventional 4 stroke engine. It was also analyzed that these tendencies relied on the configuration and installed position of the exhaust port, piston pin boss and so on.

**KEY WORDS** : Free-piston engine(프리피스톤기관), Hydrogen(수소), Separate oiling system(분리윤활), Oil consumption(오일소모), Reverse uni-flow scavenging(역단류 소기)

### 1. 서 론

크랭크기구가 없는 단순구조인 2행정 프리피스톤 수소기관에 적용 가능한 윤활유 공급방식은 혼

합윤활법과 분리윤활법이 있다<sup>1)</sup>. 수소연료에 미량의 윤활유를 혼합하는 혼합윤활법은 윤활유가 항상 연료와 함께 연소된다. 연소된 윤활유는 탄소와 황 성분의 유해가스를 생성시키므로 무탄소가 특징인 수소기관에 부적합하다. 분리윤활법은 배기포트하단의 실린더벽면에 설치된 다수의 미소 hole로부

<sup>†</sup>Corresponding author : bch1979@skku.edu

[ 접수일 : 2011.11.26 수정일 : 2011.12.14 게재확정일 : 2011.12.27 ]

터 윤활유가 공급되어 직접 연소되지 않는다. 하지만 윤활유 공급hole 바로위에 설치된 배기포트에 의해 공급된 윤활유가 직접 배기포트로 배출되고 피스톤과 실린더사이의 오일생성분포가 불균질해 질 수 있다. 이로 인해 피스톤의 하향운동시 오일링이 실린더벽면의 윤활유를 완전히 긁어내리지 못할 뿐만 아니라 회수되는 윤활유의 일부가 다시 배기포트로 배출된다. 실린더 벽표면에 남은 윤활유와 배기포트로 배출되는 윤활유량은 혼합 윤활에 비해 상대적으로 적지만 연소되어 유해가스가 발생된다<sup>2)</sup>. 따라서 무공해수준의 프리피스톤 기관을 개발하기 위해서는 윤활유 소모를 최소화하는 분리윤활법의 강구가 필요하다.

본 연구에서는 프리피스톤 수소기관에 분리윤활법 적용에 따른 오일소모량을 저감하기위해 윤활유의 공급압력에 대한 실린더라이너 내측면의 윤활유 분포특성과 배기포트로의 오일배출량을 해석하였다. 실험에는 프리피스톤기관의 구동특성을 갖고 데이터의 신뢰성을 높일 수 있는 2행정 수소연소 프리피스톤 상사기관을 사용하였다. 윤활유분포 해석에는 가시화기법을 활용하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치는 역단류 소기방식을 갖는 수소연소 프리피스톤 수소기관의 연소연구용 상사기관, 윤활유공급부, 가시화장치 및 기타 장치로 구성된다. 상사기관의 실물 사진과 기관 제원을 각각 Fig. 1과 Table 1에 나타낸다.

프리피스톤 상사기관은 피스톤 slap의 최소화와 프리피스톤 변위양상을 실현시키기 위해 cross head와 crank offset방식이 적용되었다. 피스톤의 중심부에는 운전시 가시화프로그램이 통과할 있는 홀( $\Phi$  8mm),

Table 1 Specification of test engine

Bore×Stroke (mm)	80×85
Scavenging type	Reverse uniflow
Displacement volume	427cc
Exhaust port open/close	BDC ± 16mm

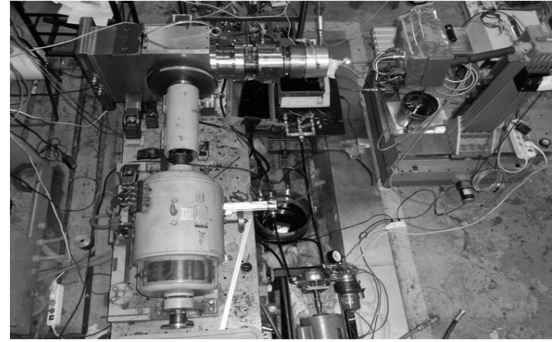


Fig. 1 Experiment setup

이 위치한다. 기관의 구동에는 10kw급 DC모터를 사용하였다. 피스톤링 및 스커트부에 윤활유를 공급하기 위해 실린더라이너에 4개의 윤활유 공급hole ( $\Phi$  1mm, 90° 간격)을 설치하였다. 설치위치는 피스톤이 하사점에 위치한 경우 1번 및 2번 압축피스톤링 사이인 BDC(하사점) 아래 7mm이다. 윤활유는 오일펌프에 의해 가압되며 압력조절밸브에 의해 요구공급압력으로 조절된다. 가시화장치는 실린더라이너 내측을 관찰할 수 있는 내시경 카메라와 관찰 위치를 PCB로 제어하는 트레버스장치로 구성된다. 트레버스장치에 설치된 2개의 스텝모터는 카메라를 X축과  $\theta$ 방향으로 구동하여 임의지점에 대한 영상 촬영을 가능하게 한다. 측정된 영상(640x480)은 필터링과 RGB값으로 변환된 색상값으로 라이너 내측의 윤활 분포성을 파악한다. 기타 장치로는 기관 동작시 배기포트로 배출되는 오일량을 측정하는 전자저울과 각종 온도 및 압력센서들로 구성된다.

### 2.2 실험방법

실험변수는 윤활유의 공급압력(추후 오일압력이라 칭함)이다. 통상적인 기관의 오일압력은 2~4bar 정도이지만 프리피스톤기관은 실린더하부에 설치된 윤활유 공급hole을 통해 피스톤에 직접 공급하므로 오일압력은 1.05bar ~ 1.25bar 범위로 설정하였다. 측정은 기관이 동작하여 10분이 경과한 시점에서 시작하였다. 실린더라이너 내벽면의 가시화영역은

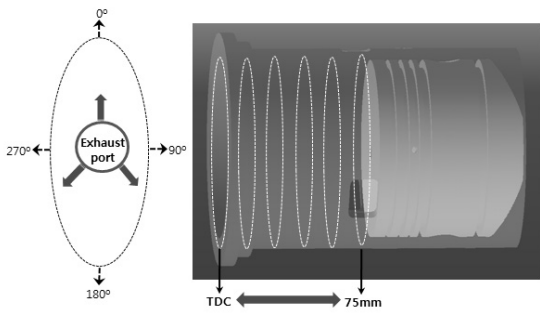


Fig. 2 Target window for the inner cylinder wall

Fig. 2에 나타난 바와 같이 피스톤 진행방향, 즉 라이너의 길이방향으로는 TDC(상사점)에서 ATDC(상사점후) 75mm이고 원주방향으로는 0~360°까지 30° 간격이다. 윤활유는 상용제품(10W30)을 사용하였으며 영상의 명암비를 높이기 위해 흑색 미세입자(1 $\mu$ m) 약 wt 1%를 윤활유에 첨가하였다. 기관 작동주파수는 10Hz(600rpm 상당)로 고정하고 모터링 운전하에서 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 2행정 프리피스톤기관의 실린더 라이너 벽표면 윤활분포 특성

Fig. 3의 (a)와 (b)는 오일압력이 1.05bar인 경우

실린더라이너 내 벽면에서의 윤활유 분포양상을 180~360°와 0~180°의 영역으로 각각 분리하여 나타낸 것이다. 측정영역은 피스톤 진행방향인 ATDC 5mm~ATDC 75mm이다. 가시화결과는 가시화 프루브가 피스톤 중심부를 통과하므로 피스톤 하향시, 즉 오일링에 의해 긁어 내린 후의 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 오일링이 있더라도 피스톤 하향시 실린더벽면에 윤활유가 잔존하는 것을 나타낸다. 피스톤 하향 후의 윤활양상은 원천적으로 상향운동시 형성된 유막두께에 좌우되므로 윤활분포양상은 다음과 같이 설명할 수 있다. 라이너 내측면에서의 유막두께는 피스톤 진행방향 65~75mm영역의 0°, 120°, 240°에서 가장 얇게 형성된다. 이것은 피스톤링에 공급된 윤활유가 배기포트를 거치면서 윤활유를 TDC(상사점)까지 올리지 못하고 배기포트로 배출되기 때문인 것으로 보인다. 0°와 180°의 경우 역시 윤활유공급hole이 위치한 영역이지만 배기포트로의 오일 배출과 자중에 의한 흘러내림으로 인하여 아래 부분인 180°부근이 다소 두꺼운 유막두께를 나타낸다. 한편 피스톤핀 boss의 개구부근방에 위치하는 윤활유는 핀내부의 중공축을 통해 배출되므로 배기포트가 위치하지 않은 60° 부근에서도 비교적 얇은 유막두께가 형성되는 것을 보인다. 이러한 배기포트 및 피스톤핀의 설치위치 영향으로 인해 라이너 내측면에 잔존하는 유막두께 및 분포에 불

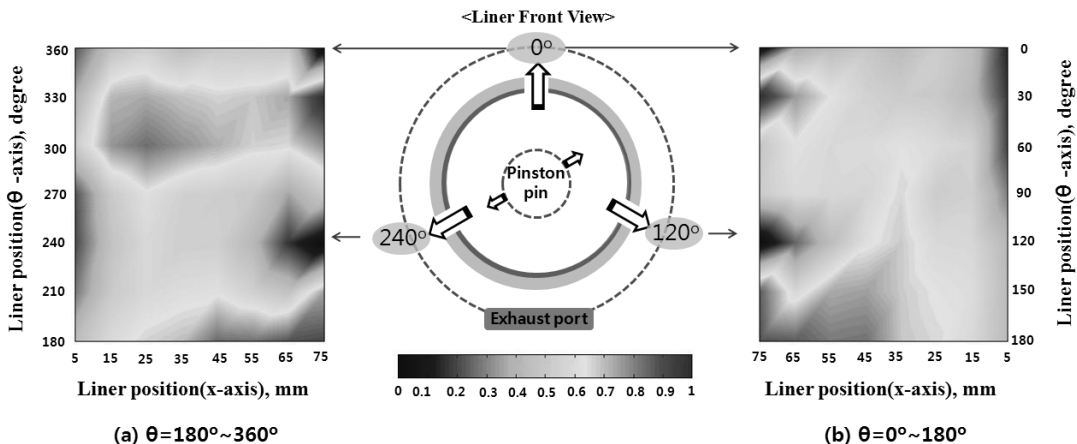


Fig. 3 Residual oil distribution of the cylinder liner surface(supply oil pressure : 1.05bar)

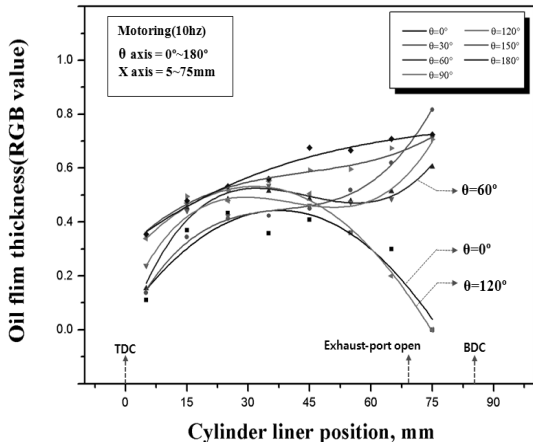


Fig. 4 Oil film thickness (RGB value)

균형이 야기되는 것으로 생각된다.

Fig. 4는 실린더라이너의 길이 방향위치에서 측정된 잔존 윤활유의 평균유막두께를 나타낸 것이다. 여기서 유막두께는 원주방향 0~180°에서의 공간평균치로서 RGB 상대값으로 정의되며 RGB 최대값은 1이다. 잔존한 윤활유의 공간평균 유막두께는 배기포트위치를 제외한 나머지 영역에서 TDC로 올라갈 수록 점차 얇아지는 것을 보인다. 통상적으로 4행정기관의 유막두께는 피스톤속도가 느린 상하점근방에서 최소이며 가장 빠른 행정의 중간에서 최대값이 나타난다<sup>3)</sup>. TDC와 BDC에서 최소유막두께를 보이는 것은 피스톤속도가 느려 피스톤링의 접촉력에 의해 라이내 벽면의 유막이 파괴되기 때문

이다. 하지만 그림에서 보듯이 2행정 프리피스톤기관의 경우는 4행정기관과 상이한 BDC에서 최대값을 보이고 있다. 이것은 4행정기관과 달리 BDC 근방의 실린더라이너에 설치된 윤활유 공급hole에서 직접 윤활유가 피스톤에 공급되는데 의한 것으로 볼 수 있다. 한편 0°와 120°의 잔존유막두께가 얇은 것은 배기포트로 빠져나가는 데 기인한다.

### 3.2 오일압력변화에 따른 윤활분포 양상

Fig. 5의 (a)~(d)는 오일압력에 대한 원주방향 0~180° 영역의 라이너 벽표면 윤활분포양상을 나타낸 것이다. 오일압력이 1.1 bar인 경우에는 진술한 바와 같이 오일의 자중에 의해 라이너 상하부의 잔류유막분포에 현저한 차이를 보인다. 그러나 오일압력이 점차 증가하면 이에 따른 윤활유 공급량의 증가로 위아래면 모두 비교적 두껍고 넓게 분포되어 있음을 보이고 있다. 하지만 이보다 더 오일압력이 증가된 1.25bar 경우에는 다시 라이너 상하부의 유막분포에 차이가 나고 동시에 TDC 및 BDC 부근에서도 현저히 잔존유막두께가 얇아지는 것을 보인다.

Fig. 6은 상기 결과로부터 구한 잔존윤활유의 공간평균 유막두께와 그 표준편차를 오일압력에 대해 나타낸 것이다. 평균 유막두께는 오일압력에 비례하여 증가하는 경향이지만 1.2bar 이상이 되면 반대로 감소하는 것을 보인다. 이는 피스톤측면부에 공급되는 오일량이 증가하지만 오일압력의 증가로 배기포

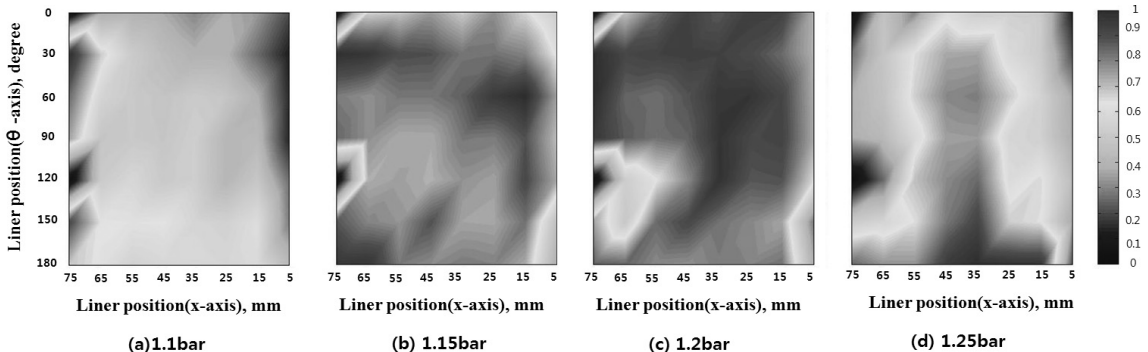


Fig. 5 Residual oil distribution of the cylinder liner surface with oil supply pressure

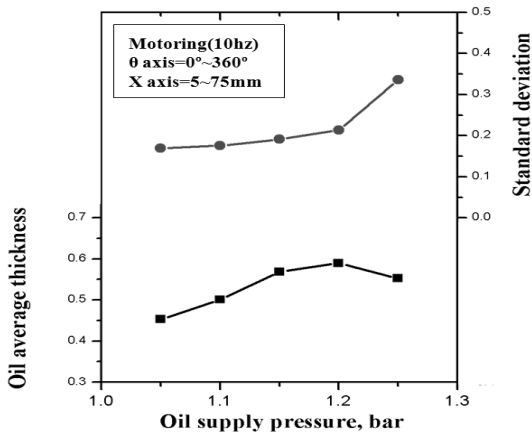


Fig. 6 Average oil thickness and standard deviation according to supplied oil pressure

트, 피스톤핀 보스부 및 오일 drain hole을 통한 피스톤 내부로의 오일배출량이 증가하는데 의한 것으로 생각된다. 한편 잔존유막두께의 표준편차는 오일압력이 증가함에 따라 전반적으로 증가하며 1.2bar 이상으로 되면 그 증가량이 현저해져 라이너내의 윤활유 분포성이 급격히 저하되는 경향을 나타낸다. 이는 2행정 프리피스톤기관에 윤활유공급hole 방식의 분리윤활을 적용하는 경우 통상의 4행정 크랭크식기관보다 낮은 윤활유 공급압력 사용이 적절하다는 것을 보이는 결과이다.

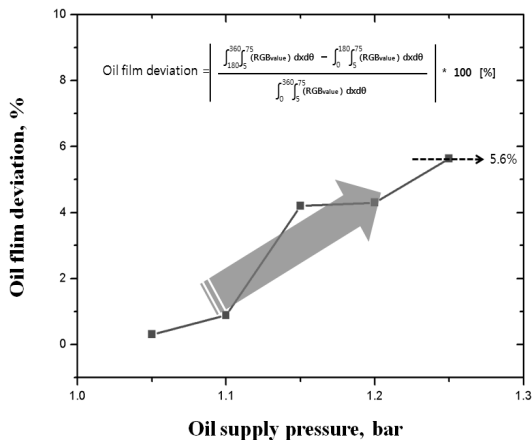


Fig. 7 Oil film deviation inner liner according to oil supply pressure

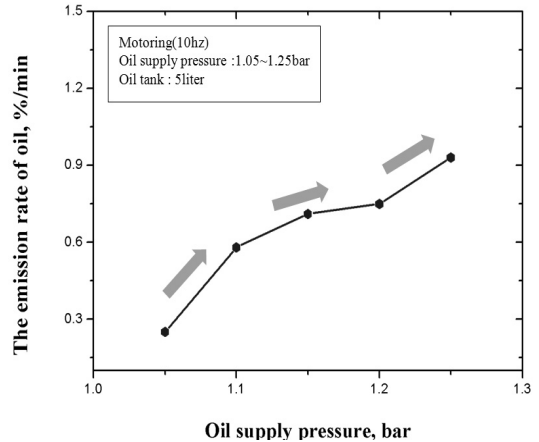


Fig. 8 The emission rate of oil according to oil supply pressure

Fig. 7은 실린더라이너 좌우 내측면의 잔류유막 분포 대칭성을 정량적으로 파악하기 위해 오일압력 변화에 대한 유막분포 편차율을 나타낸 것이다. 유막두께의 공간적 차이는 유막분포의 균질성을 대표한다. 따라서 유막분포 편차율은 실린더라이너 내벽면 오일두께의 공간적평균치에 대한 라이너 좌우(0~180°와 180~360° 영역)의 공간적유막두께 차이로 정의하였다. 잔류된 윤활유의 유막분포 편차율은 약간의 차이가 있지만 대체로 오일압력이 높아짐에 따라 증가하는 것을 나타낸다. 오일압력증가에 따른 유막분포 편차율이 거의 일정한 것은 본 기관에서 배기포트 및 피스톤핀 boss부의 위치가 윤활분포의 균질성을 좌우하는 주요한 인자들이라는 것을 의미한다. 이와 같이 라이너 좌우의 유막분포가 비대칭성을 보이거나 오일압력이 1.25bar일때의 편차율은 약 5.6%정도로서 그리 크지 않은 것으로 볼 수 있다.

### 3.3 배기포트로의 윤활유 배출율

Fig. 8은 오일압력을 증가시킨 경우 배기포트로 배출되는 윤활유 배출율을 나타낸 것이다. 여기서 윤활유 배출율은 오일탱크체적에 대한 배기포트로 빠져나가는 오일의 시간변화율이다. 그림에서 보듯이 오일압력이 증가함에 따른 운동에너지 증가로 배기포트로 빠져 나가는 윤활유 배출율이 증가한다.

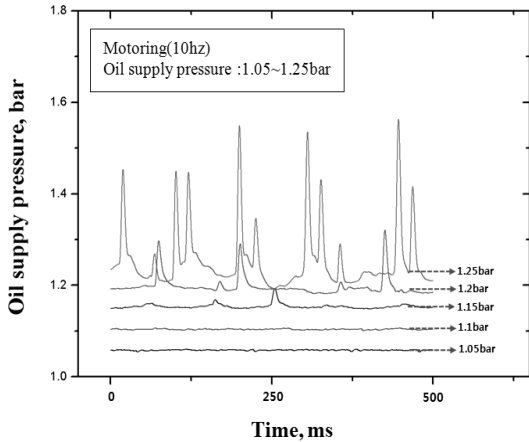


Fig. 9 Pressure pulsation of oil according to oil supply pressure

오일압력이 1.05bar에서 1.25bar로 증가함에 따른 배출량의 증가율은 최대 8%정도에 이른다. 그러나 오일압력 1.15bar 및 1.2bar 부근에서는 약간 증가율이 완만해지다가 다시 증가하는 것을 나타낸다. 윤활유배출량이 완만해지면 오일공급관내의 압력은 감소할 것으로 5cycle 동안 오일공급관내에서 측정된 압력경과를 Fig. 9에 나타낸다. 오일압력이 증가함에 따라 오일공급관내의 압력변동치가 점차 증가하는 경향이며 특히 1.25bar에서의 압력변동은 현저하다. 그러나 윤활유배출량이 완만해지는 1.15bar 및 1.2bar 영역과 오일공급관내의 압력이 대응하지 않는 것을 보인다. 따라서 윤활유배출량은 단순한 운동에너지 증가뿐만 아니라 윤활유 공급hole, 배기포트, 피스톤 각부와 같은 윤활에 관계되는 형상인자 등의 복합적인 원인에 의한 것으로 생각된다. 그리고 2행정 프리피스톤기관에 윤활공급hole방식에 의한 분리윤활의 경우 윤활유 배출량을 최소화를 위한 공급압력이 존재하는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

분리윤활시스템을 역단류소기방식의 2행정 수소연소 프리피스톤기관에 적용하는 경우의 오일소모 저감법 강구를 위한 초기단계로 실린더라이너 벽표면의 잔류윤활유를 가시화하고 배기포트로의 윤활

유 배출량을 파악하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 배기포트밑에 윤활유 공급hole이 있는 분리윤활의 경우 오일링이 있더라도 피스톤 하향운동 후 실린더벽면에 윤활유가 잔존하며 잔존윤활유 두께 및 분포는 불균형한 것을 보인다.
- 2) 잔존 윤활유의 공간평균 유막두께는 통상적인 4행정기관과 달리 배기포트위치를 제외하고 상사점으로 올라갈수록 점차 얇아지며 공급압력도 4행정기관의 경우보다 약간 낮은 것이 적절한 것으로 나타났다.
- 3) 그리고 배기포트 및 피스톤핀 boss부 등의 기하학적 형상 및 설치위치가 잔류윤활분포의 균질성과 실린더 좌우대성성을 좌우하는 주요인자라는 것으로 해석되었다.
- 4) 제시된 분리윤활의 경우 윤활유 배출량을 최소화를 위한 공급압력이 존재하지만 연속공급보다 피스톤위치에 대응하는 간헐적 공급방식의 검토도 요구된다.

#### 후 기

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) G. P., Blair, "Correlation of Theory and Experiment for Scavenging Flow in Two-Stroke Cycle Engine", SAE Paper NO.88125, 1988.
- 2) S. W. Cho, S. M. Choi, C. S. Bae, S. H. Noh, "Measurements of Piston Assembly Friction Force and Oil Film Thickness in an SI Engine", Proceeding of the KSAE Annual Spring Meeting 2007, pp. 1-3271.
- 3) B. S. Min, J. K. Choi, "Measurement of two dimensional oil film thickness in piston by induced fluorescence method", Journal of the KSTLE, 1998.11, vol. 28, pp. 3-370.