

## Reverse uni-flow 소기방식을 갖는 2행정 프리피스톤 수소기관의 역화 현상에 관한 연구

변창희\*<sup>†</sup>, 조관연\*, 백대하\*, 이종태\*\*

\*성균관대학교 대학원, \*\*성균관대학교 기계공학부

## The Characteristics of Backfire for a Free-Piston Hydrogen Fueled Engine with Reverse Uni-flow Scavenging

CHANGHEE BYUN\*<sup>†</sup>, KWANYEON CHO\*, DAEHA BACK\*, 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., 300 Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 440-746, Korea

### ABSTRACT

In order to develop two-stroke free-piston hydrogen engine to obtain high thermal efficiency and low emission, backfire occurrence have to be prevented. In this research, backfire characteristics are analyzed as functions of the intake valve opening timing and compression chamber pressure under piston by using RICEM (Rapid Intake Compression Expansion Machine) that has reverse uni-flow scavenging. As the result, reverse uni-flow scavenging is advantage about back fire. but, it exists suitable intake valve opening timing and its timing become known that equivalence ratio 1 retard until the piston rises. Also, To rise chamber pressure of lower piston, this does not cause backfire occurs in equivalent ratio 0.6 observed back fire. Therefore, 2cycle hydrogen fueled free-piston engine is undesirable scavenging compression by compressing the piston.

**KEY WORDS** : Free-piston engine(프리피스톤기관), Hydrogen engine(수소엔진), Reverse uni-flow(역단류 소기), Backfire(역화), Suitable intake valve opening timing(적정 소기밸브 열림시기)

### 1. 서 론

2행정 프리피스톤 수소기관은 직선운동을 회전 운동으로 변환하는 크랭크기구가 없는 단순한 구조로 기계손실이 적다<sup>1,2)</sup>. 그리고 비열비가 크고 가연

한계가 넓으며 탄소성분이 없는 수소를 연료를 사용함으로써 고효율 및 저배기를 실현시킬 수 있을 것으로 평가되고 있다<sup>3,4)</sup>. 2행정 프리피스톤 수소기관에 적용 가능한 대표적인 소기방식은 loop, uni-flow, reverse uni-flow 소기방식이 있다. 흡기포트가 실린더 하단에 위치한 loop와 uni-flow 소기방식 프리피스톤 수소기관은 피스톤 팽창 말기에 크래비

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

[ 접수일 : 2010.2.21 수정일 : 2010.3.23 게재확정일 : 2010.4.20 ]

스 볼륨 내에서 느린 연소하는 것으로 추정되는 화염이 신기와 접하면서 역화가 발생할 가능성이 있음을 선행연구에서 밝혔다<sup>5,6)</sup>. 반면에 reverse uni-flow 소기방식은 배기포트가 하단에 위치하므로 상기 소기방식들에 비해 역화발생 관점에서 유리한 구조이다. 하지만 팽창말기까지 존재하는 모종의 화염이 배기포트로 배출되기 전에 실린더헤드에 설치된 소기밸브가 열리게 된다면 신기와 접촉하여 역화가 발생할 수 있다<sup>7)</sup>. 2행정기관의 신기는 통상 크랭크실로 흡입되어 피스톤의 하향운동에 의해 압축하여 실린더 내에 공급된다. 이 과정에서 압축 챔버 내 압력의 상승은 피스톤 크래비스 볼륨 내 잔존 화염을 실린더 내로 밀어 올릴 수 있어 역화 발생에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 2행정 프리피스톤 수소기관에 reverse uni-flow 소기방식을 적용하는 경우 역화가 발생되지 않는 적정 소기밸브 열림시기 및 소기압축실의 압축압력 영향에 대한 해석이 필요하지만 이에 대한 것은 아직 미지인 상황이다.

본 연구에서는 reverse uni-flow 소기방식을 갖는 2행정 프리피스톤 수소기관의 안정된 연소를 위해 프리피스톤 수소연소 연구용 RCEM(rapid compression expansion machine)을 사용하여 역화발생에 영향을 미칠 수 있는 소기밸브 열림시기와 압축 챔버 내 압력변화에 대한 역화현상 및 기관성능 등을 해석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Reverse uni-flow 소기방식을 갖는 2행정 프리피스톤 수소기관의 연소연구용 RCEM 및 기타 실험장치의 실물 사진을 Fig. 1에 나타낸다. RCEM은 크게 연소실부, 소기밸브부, 점화장치부, 피스톤 구동 및 동력흡수부로 구성되며 주요 제원은 Table 1과 같다. 연소실은 반구형 형상으로 실린더헤드 중앙에 지름 34mm인 poppet 밸브형의 소기밸브를 설치하였다. 소기밸브는 슬라이드밸브 및 공압실린더로 구동되는 공압구동방식이다. 실린더 하단부에는 가로, 세로 각각 10mm, 16mm의 배기포트가 4mm

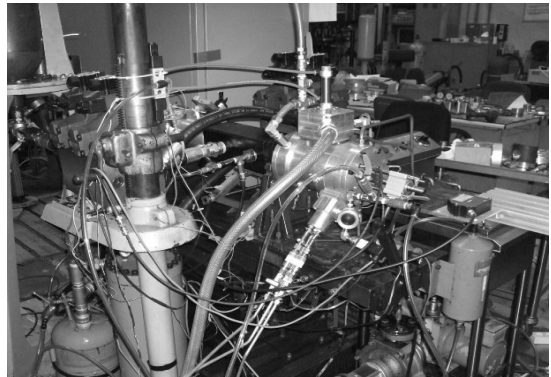


Fig. 1 Photograph of free-piston H<sub>2</sub> engine with reverse uni-flow scavenging.

간격으로 3개 위치한다. 또한 피스톤 하부에는 750cc의 소기압축챔버가 설치되어 있다. 압축챔버 내 압력조절을 위해 지름이 30mm인 3개의 슬라이드밸브를 장착하였고 피스톤의 변위와 연동되어 밸브 개폐시기가 제어된다. 프리피스톤 구동 및 동력흡수부는 지름이 55mm이며 로드의 지름이 25mm인 복동식 유압실린더로 구성된다.

기타 실험장치는 수소-공기 혼합장치, 역화발생 검출장치, 변위측정부 및 데이터 취득장치로 구성된다. 수소-공기 혼합기는 분압법에 의해 혼합되며 균질도 향상을 위해 방콕타입의 brushless 모터팬을 혼합장치 내에 장착하였다. 역화발생 검출장치는 혼합장치와 소기밸브 사이에 위치하며 체적이 17.6cc이다. 역화발생시 안전을 고려하여 3bar의 압력에서 파열되는 지름 30mm의 파열막을 검출장치 하부에 설치하였다. 변위측정부는 점화시기 및 소기밸브 개폐시기를 제어하기 위해 상·하사점 및 프리피스톤의 순간위치를 파악하는 부분으로 로터리

Table 1 Specification of RCEM apparatus

Bore×Stroke(mm)	80×85
Scavenging type	Reverse uniflow
Displacement volume	427cc
Compression ratio	8.47
Exhaust port opening timing	BBDC 16mm
Exhaust port closing timing	ABDC 16mm

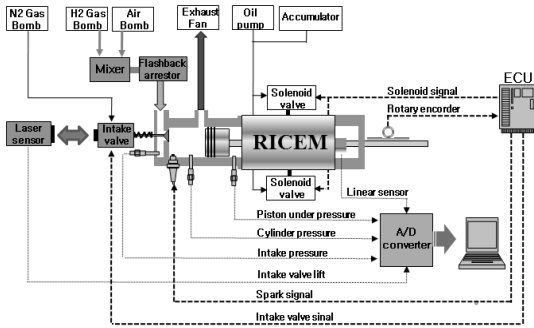


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

엔코더와 리니어 변위 센서로 구성된다. 실험장치의 전체 개략도를 나타낸 것이 Fig. 2이다.

## 2.2 실험방법

실험은 reverse uni-flow 소기방식을 갖는 프리피스톤 수소기관에서 수소-공기 혼합기를 공급하는 소기밸브의 열림시기와 피스톤 하부에 위치한 압축챔버 내의 압력변화에 대하여 역화 유무 및 기관 성능 향상에 적합한 소기밸브 열림시기를 파악하는 것이다.

소기밸브의 열림시기(intake valve opening timing, IVOT)는 배기포트가 개폐되는 시점인 BBDC 16mm 부터 ABDC 16mm까지 단계적으로 지각시킨다. 또한 소기압축챔버 내 압력은 1bar, 1.15bar 및 1.25bar 인 3가지 경우이다. 소기밸브 및 배기포트 개폐시기는 프리피스톤 기관의 피스톤이 직선 운동만을 하여 크랭크각으로 표시할 수 없으므로 피스톤변위로 표시한 것이다. 피스톤의 BDC와 TDC는 각각 피스톤 변위 0mm, 85mm에 해당한다. 상기 각 변수에 대해 수소-공기 당량비는  $\phi=0.5$ 부터  $\phi=1.0$ 까지  $\phi=0.1$ 씩 증가시킨다. 각각의 조건에 대해 연소실벽 표면온도는 60℃로 유지한다. 피스톤 구동압력은 55bar이며 이는 BDC에서 TDC까지의 평균 피스톤속도 1.8m/s에 해당한다. 역화발생은 팽창말기에 일어나는 실린더 및 역화챔버 내의 급격한 압력상승과 파열음으로 확인한다.

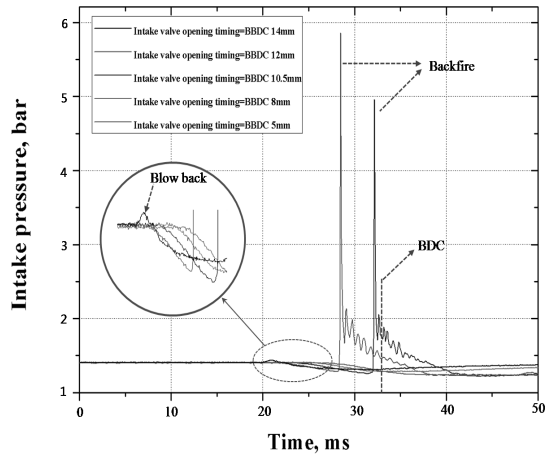


Fig. 3 Intake pressure for intake valve opening timing.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 Reverse uni-flow 프리피스톤 수소기관의 역화한계 소기밸브 열림시기

Reverse uni-flow 소기방식은 전술한 바와 같이 uni-flow 소기방식과 달리 배기포트가 실린더 하단에 위치하여 피스톤 팽창 말기 크레비스 볼륨 내에 잔존할 것으로 예상되는 화염이 배기 포트로 배출될 수 있는 구조이다. 하지만 모종의 화염이 배기포트로 배출되기 전에 소기밸브가 열려 신기가 공급되면 역화를 발생시킬 수 있다.

Reverse uni-flow 소기방식을 갖는 프리피스톤 수소기관에서 부적절한 소기밸브 열림에 의한 역화 발생여부를 파악한 일례를 Fig. 3에 나타낸다. 그림은 수소-공기당량비  $\phi=0.7$ 에서 소기관내의 압력 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 소기밸브 열림시기는 배기포트가 열린 시점인 BBDC 16mm보다 지연된 BBDC 12mm, BBDC 10.5mm, BBDC 8mm와 BBDC 5mm인 4가지 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 연소 후 피스톤의 팽창에 의해 배기포트가 개방된 직후인 BBDC 14mm에서 소기밸브를 열어준 경우 개방과 동시에 소기관내 압력이 약간 상승 후 하강하는 것을 볼 수 있다. 이는 실린더내 기연가스의 압력이 신기의 공급압력보다 높아 잔류가스가 소기관쪽으로 역류(blow back)에 의한 것으로 보인다.

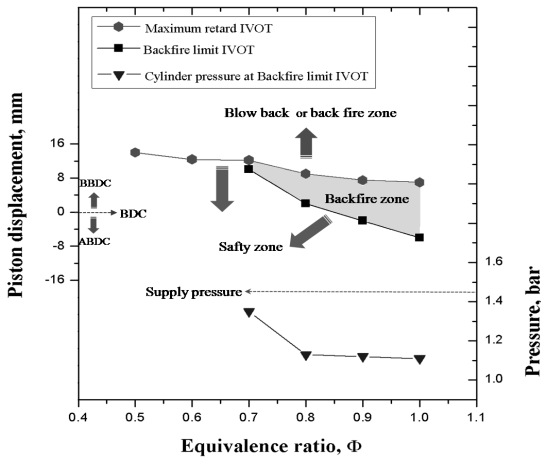


Fig. 4 Backfire limits zone for equivalence ratio.

다. 이보다 지각한 BBDC 12mm와 BBDC 10.5mm의 경우에는 신기공급에 의한 소기관내의 압력이 감소하는 도중에 급격한 압력상승, 즉 역화가 발생하는 것을 보인다. 그러나 배기포트가 반 정도 열린 시점인 BBDC 8mm 이후에 소기밸브를 열어준 경우에는 역화가 발생되지 않는 것을 나타낸다. 이것은 예상한 바와 같이 실린더 또는 피스톤 크레비스 볼륨 내에서 느린 연소하는 것으로 예상되는 모종의 화염이 배기포트로 충분히 빠져나가는데 의한 것으로 볼 수 있다. 그리고 이 시점을 reverse uni-flow 연소실을 갖는 프리피스톤기관에서 역화가 발생되지 않는 적정한 소기밸브 열림시기로 볼 수 있다. 한편 소기밸브 열림시기 BBDC 10.5mm인 경우 역화발생에 따라 상승되는 소기관내 압력의 최고치가 이보다 진각된 BBDC 12mm 경우보다 약간 감소하는 것을 보인다. 이것은 기연가스의 배출시간 및 배기포트 유로 증가에 의한 실린더내 압력감소의 차이에 의한 것으로 소기밸브 열림시기를 지각시킬수록 신기의 도입이 신속히 이루어진다는 것을 의미한다.

공급열량은 연소 및 팽창압력을 좌우하므로 역화가 발생하지 않는 적정소기밸브 열림시기가 변하게 된다. Fig. 4는 이를 파악하기 위해 당량비를 변화시킨 경우 역화가 발생하지 않는 역화한계 소기밸브 열림시기와 이 시기에서의 실린더 내 압력 그

리고 역류가 일어나지 않는 최대 소기밸브 열림시기를 나타낸 것이다. 여기서 역화한계 소기밸브 열림시기는 역화가 발생하지 않는 한계시점으로 정의되며 역화관점에서의 적정 소기밸브 열림시기에 해당한다. 압축챔버 내의 압력은 1bar로 설정하였다. 그림에서 보듯이 당량비가 변하게 되면 역화가 발생하지 않는 적정 소기밸브 열림시기인 역화한계 소기밸브 열림시기는 달라지는 것을 보인다. 이 역화한계 소기밸브 열림시기는 당량비가 감소할수록 즉, 희박할수록 지각되는 것을 보인다. 또한 역화한계 소기밸브 열림시기가 지각됨에 따라 실린더내 압력이 감소하는 경향이다. 특히  $\Phi=0.7 \sim \Phi=0.8$ 에서의 실린더내 압력 강하는 급격한 반면 수소-공기 당량비가  $\Phi=0.8$  이후 압력강하는 미미하였다. 이는 역화한계 소기밸브 열림시기가  $\Phi=0.8$  이후 피스톤의 상향운동 과정에 놓이기 때문에 배기포트개방면적이 감소하기 때문인 것으로 보인다. 그리고 수소-공기 당량비가  $\Phi=0.6$ 보다 희박한 영역에서는 소기밸브 열림시기에 무관하게 역화가 관찰되지 않았다. 또한 당량비가 증가함에 따라 역류가 발생하지 않는 최대 소기밸브 열림시기는 BDC쪽으로 지각되고 있음을 볼 수 있다. 이는 공급열량 증가에 기인하여 피스톤 팽창시의 실린더내 압력이 증가하면서 역화의 원인이 되는 모종의 화염 배출시간이 길어지기 때문인 것으로 볼 수 있다.

### 3.2 압축 챔버내 압력 변화

Fig. 5는 압축챔버 내 압력변화가 역화발생에 미치는 영향을 파악하기 위해 압축챔버 내 압력 변화에 따른 소기관 내 압력변화를 나타낸 일레이다. 여기서 당량비는  $\Phi=0.8$ 이며 소기밸브 열림시기는 BBDC 2mm이다. 그림에서 보는 바와 같이 압축챔버 내 압력이 증가함에 따라 소기밸브 개방시점으로부터 역화가 발생한 시점과의 시간이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 압축챔버 내의 압력상승에 의해 피스톤링에 실린더 방향으로 압력이 발생하면서 크레비스 내 잔존화염의 배출이 배기포트 외에도 실린더내로도 역류하게 되고 실린더내로 공급된 신기와 접하

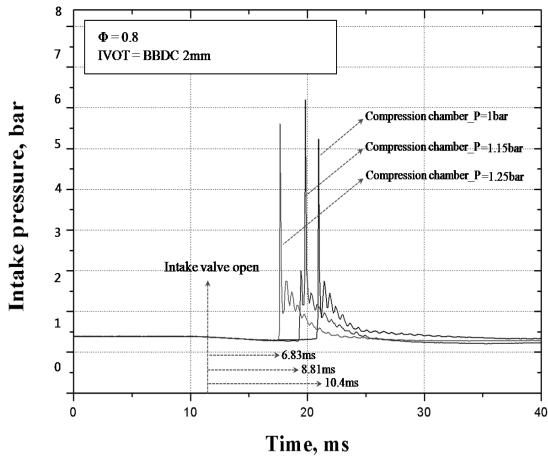


Fig. 5 Intake pressure by the compression chamber pressure.

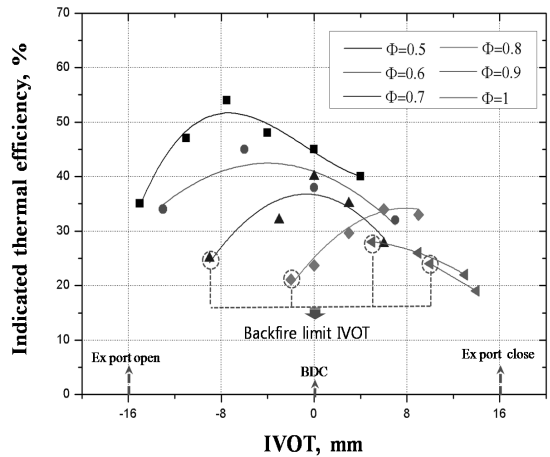


Fig. 7 Indicated thermal efficiency as respects intake valve open timing.

면서 역화발생 시점이 빨라지는 것으로 보인다.

Fig. 6은 압축 챔버내의 압력 변화가 역화 한계 소기밸브 열림시기에 어떠한 영향을 주는가를 파악하기 위해 압축 챔버 내의 압력 변화에 대한 역화 한계 소기밸브 열림시기를 각각의 당량비에 대해 나타낸 그림이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 압축 챔버 내의 압력을 증가함에 따라 역화한계 소기밸브 열림시기는 지각되는 경향을 보인다. 챔버 압력을 1bar에서 1.25bar로 증가함에 따라  $\Phi=0.7\sim\Phi=1$ 에 대해 각각 10mm, 6mm, 4mm, 5mm로 소기밸브

열림시기가 지각되었으며  $\Phi=0.6$ 에서도 역화 발생이 관찰되었다. 이는 압축챔버 내 압력의 상승으로 크래비스 내 화염이 실린더내로의 역류를 촉진하면서 배기포트로 배출되는 시간이 길어지기 때문인 것으로 보인다.

따라서 통상적인 2행정 기관에서의 압축챔버내 압력을 이용하여 혼합기를 실린더내에 공급하는 방식은 프리피스톤 수소기관에의 적용에 있어 챔버내 압력 상승에 의한 역화 발생을 가중시키므로 부적합한 것으로 판단된다.

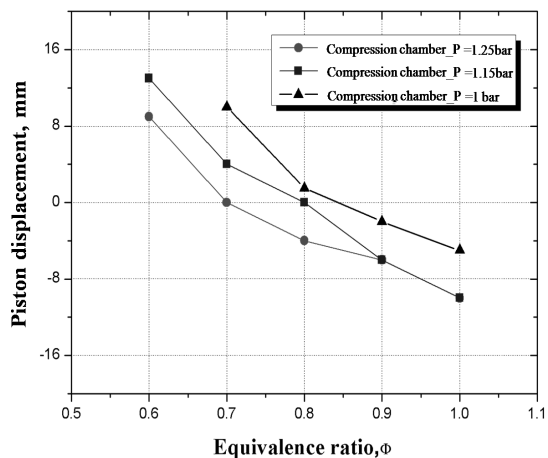


Fig. 6 Backfire limits zone by the compression chamber pressure.

### 3.3 열효율 향상을 위한 적정소기 밸브 열림시기

Fig. 7은 기관 성능 향상에 적절한 소기밸브 열림시기를 알아보기 위해 소기밸브 열림시기 변화에 따른 도시열효율을 각각의 당량비에 대해 나타낸 것이다. 여기서 소기밸브 열림시간은 피스톤의 이동 범위로 16mm이다. 그림에서 보는바와 같이 당량비가 증가함에 따라 최고 도시열효율은 감소하는 경향이며 각각의 당량비에서 최고 도시 열효율이 발생한 소기밸브 열림시기를 정점으로 소기밸브 열림시기를 진,지각함에 따라 도시열효율은 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히  $\Phi=0.5$ 에서 소기밸브 열림시

기가 BBDC 8mm 근방에서 최고 도시열효율은 54%로 가장 높았다. 이보다 지각된 BBDC 16mm의 경우 역류가 발생하지 않는 최대 소기밸브 열림시기보다 지각된 경우로 기연가스의 역류에 의한 신기의 유동저항의 발생으로 도시열효율이 낮게 나온 것으로 보인다<sup>8)</sup>. 또한 당량비가 증가함에 따라 최고 열효율이 나타나는 소기밸브 열림시기는 지각되는 경향을 보인다. 특히  $\Phi=0.9\sim\Phi=1$ 에서는 최고 도시 열효율이 나타난 소기밸브 열림시기는 역화 한계 소기밸브 열림시기와 동일하였으며 크래비스 볼륨내 화염의 배출이 원활하여 역화한계 소기밸브 열림시기가 진각 될 수 있다면 도시 열효율이 증가 될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

Reverse uni-flow 프리피스톤 수소기관의 안정된 연소를 위해 당량비, 소기밸브 열림 시기, 압축 챔버내 압력변화에 대한 역화현상과 기관성능을 해석한 결론은 다음과 같다.

Reverse uni-flow 소기방식 프리피스톤 수소기관은 구조적으로 역화관점에서 유리하지만 예상대로 역화가 발생되지 않는 적정 소기밸브 열림시기가 존재한다. 이 시기는 당량비가 증가할수록 지각되며 당량비  $\Phi=0.9$  부근 부터는 피스톤이 상향운동하는 시기까지 지각되는 것을 보인다. 압축 챔버내 압력이 증가할수록 역화가 발생하는 시기가 빨라지며 이로 인해 역화한계 소기밸브 열림시기는 지각된다. 또한 통상시 역화가 발생되지 않는 공기 연료당량비  $\Phi=0.6$ 에서도 역화가 관찰되어 2행정 프리피스톤 수소기관에서 피스톤압축에 의한 소기의 압축은 바람직하지 않은 것으로 생각된다.

기관 성능 향상을 위한 적정 소기밸브 열림시기는 당량비가 증가함에 따라 소기밸브 열림시기는 지각되며 최고 도시열효율은 감소하며  $\Phi=0.9\sim\Phi=1$ 에서는 최고 도시 열효율이 나타난 소기밸브 열림시기는 역화 한계 소기밸브 열림시기와 동일하였다.

## 후 기

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

## 참 고 문 헌

- 1) R. Mikalsen, A. P. Roskilly, "A review of free-piston history and applications", Appl. Therm. Eng., Vol. 27, 2007, pp. 2339-2352.
- 2) R. Mikalsen, A. P. Roskilly, "Performance simulation of spark ignite free-piston engine generator", Appl. Therm. Eng, 2008.
- 3) Jakob Fredriksson, Ingemar Denbratt, "Simulation of a Two-Stroke Free Piston Engine", SAE Paper NO. 2004-01-1871, 2004.
- 4) G. P., Blair, "Correlation of Theory and Experiment for Scavenging Flow in Two-Stroke Cycle Engine", SAE Paper NO. 88125, 1988.
- 5) H. W. Cho, J. S. Yoon, J. T. Lee, H. S. Lim, "Flow visualization used PIV of hydrogen fueled free piston engine with uni-flow scavenging", Trans. of the KHNES, Vol. 19, No. 3, 2008, pp. 182-188.
- 6) K. C. Noh, J. S. Yoon, S. W. Park, J. T. Lee, H. S. Lim, "A study on the Performance Improvement in the Hydrogen fueled Free-piston Engine", Proceeding of the KSAE Annual Spring Meeting 2006, Vol. 1, pp. 1872-1877.
- 7) K. Y. Cho, C. H. Byun, J. T. Lee, "The characteristics of backfire for a hydrogen fueled free-piston engine with reverse uniflow scavenging", Proceeding of the KSAE Annual Autumn Meeting 2009.
- 8) H. W. Cho, K. Y. Cho, J. T. Lee, "Flow characteristics in a hydrogen fueled free piston engine with reverse uniflow scavenging", Proceeding of the KSAE Annual Autumn Meeting 2008.