

## Uni-flow 소기방식 2행정 프리피스톤 수소기관의 스트로크변화에 따른 역화 특성

조관연<sup>\*†</sup>, 조형욱<sup>\*</sup>, 이종태<sup>\*\*</sup>

\*성균관대학교 대학원, \*\*성균관대학교 기계공학부

## The Characteristics of Backfire for 2 stroke Free-Piston Hydrogen Fueled Engine with Uni-flow Scavenging

KWANYEON CHO<sup>\*†</sup>, HYUNGWOOK CHO<sup>\*</sup>, JONGTAE LEE<sup>\*\*</sup>

*\*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

Backfire characteristics for hydrogen fueled free piston engine with uni-flow scavenging is investigated with different stroke, exhaust valve opening timing and fuel-air equivalence ratio by using RICEM (Rapid Intake Compression Expansion Machine) for combustion research of free piston engine. As results, it is found that backfire can be occurred due to slow combustion of unhomogeneous mixture in the piston crevice volume or/and in the cylinder near piston head. And the more stroke of free piston H<sub>2</sub> engine with uni-flow scavenging is short the more opening timing of exhaust valve have to be advanced to control backfire.

**KEY WORDS** : Free-piston engine(프리피스톤 수소기관), Hydrogen(수소), Uni-flow(단류소기), Backfire(역화), Stroke(스트로크), Exhaust valve timing(배기밸브타이밍)

### 1. 서 론

프리피스톤 수소기관은 직선운동을 회전운동으로 변환하는 크랭크 기구가 없는데 따른 기계손실의 감소와 팽창길이 변화에 의한 유효일의 증가로 고효율을 달성하고 무공해 수준의 배기성능을 만족

할 수 있을 것으로 평가되고 있다<sup>1-3)</sup>. 통상적으로 연구되고 있는 2행정 dual type의 프리피스톤 수소기관의 기관성능은 소기성능에 의해 좌우되므로 적정소기방식의 결정이 중요하다<sup>4)</sup>. 저자들은 프리피스톤 수소기관에 적합한 소기방식의 결정을 위해 루프와 uni-flow소기방식의 소기유동을 해석한바 있다. 그 결과 프리피스톤 수소기관에서는 루프소기방식보다 uni-flow소기방식이 소기유동에 유리

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

[ 접수일 : 2009.8.28 수정일 : 2009.9.21 게재확정일 : 2009.10.23 ]

한 것을 확인하였다<sup>5,6)</sup>. 2행정 프리피스톤 수소기관의 성패는 역화발생 여부가 중요한 인자이므로 적정소기방식의 결정에는 소기효율뿐만 아니라 역화발생의 해석도 수반되어야 한다.

Uni-flow 소기방식을 갖는 2행정기관들은 통상적으로 스트로크/보어비율이 2이상으로서 기존의 루프소기방식보다 크다. 이것은 팽창말기의 실린더 내 압력이 떨어트려 불로다운 손실의 감소를 도모하기 위한 것이다<sup>7,8)</sup>. Uni-flow 소기방식의 프리피스톤 수소기관은 배기밸브가 실린더 헤드에 설치되어 있으나 흡기포트가 실린더 하단부에 위치 되어 있다. 이로 인해 crevice volume 내에서 느린 연소를 하는 화염이 팽창과정 중 흡기포트와 일치하게 되면 역화가 발생할 수 있다<sup>9)</sup>. 또한 배기밸브 열림시기가 지연되면 실린더 내의 국부적인 느린 연소에 의해 발생한 화염이 흡기포트 내의 신기와 접하여 역화가 발생할 가능성이 있다. 피스톤 crevice volume 및 피스톤 헤드부 주위에서 느린 연소를 하는 화염이 흡기포트와 접하는 기간은 기관의 스트로크에 의해 좌우된다. 따라서 스트로크/보어비는 uni-flow 프리피스톤 수소기관의 역화발생에 관여할 것이나 이에 대한 결과는 아직 명확히 보고되지 않은 상황이다.

본 연구에서는 역화 발생없이 고효율을 달성할 수 있는 프리피스톤 수소기관의 적정소기방식을 결정하기 위해 uni-flow 소기방식을 갖는 프리피스톤 수소기관의 스트로크 변화에 대한 역화특성을 해석하였다. 또한 각각의 스트로크에 대해 연료공기 당량비와 배기밸브 열림시기를 변화시켰다. 실험에는 연소연구용 RICEM(rapid intake compression expansion machine)장치를 사용하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 Uni-flow 소기방식 프리피스톤 수소기관 연소연구용 RICEM장치

Uni-flow 소기방식을 갖는 프리피스톤 수소기관의 연소연구용 RICEM장치의 실물 사진을 Fig. 1에 나타낸다. RICEM장치는 크게 나누어 연소가 일어

나는 연소실부, 배기가스를 배출시키는 배기밸브부, 점화장치부, 프리피스톤을 구동하고 동력을 흡수하는 피스톤 구동 및 동력흡수부로 구성된다. 연소실은 반구형 형상으로 실린더 헤드에 점화플러그와 실린더 헤드 중앙에 지름 34mm 밸브양정 8mm인 poppet valve형의 배기밸브를 설치하였다. 실린더 하단부에는 30°의 스윙각도를 가진 6개 흡기포트가 위치한다. 흡기포트의 높이는 스트로크 125mm에서 21mm, 85mm인 경우에는 17mm이다. 실린더 헤드 및 실린더 블록부에는 실제 기관의 벽면온도를 재현하기 위해 고온의 오일을 순환시킬수 있는 오일 재킷을 각각 설치하였다. 점화장치는 잔류전하에 의한 이상방전으로 역화가 발생할 수 있으므로 2차 코일을 접지시켜 잔류에너지가 쉽게 방출되도록 하였다. 배기밸브는 솔레노이드 밸브 및 공압 실린더로 구동되는 공압구동방식이다. 프리피스톤 구동 및 동력흡수부는 지름이 55mm이며 로드의 지름이 25mm인 복동식 유압 실린더로 구성된다. Table 1

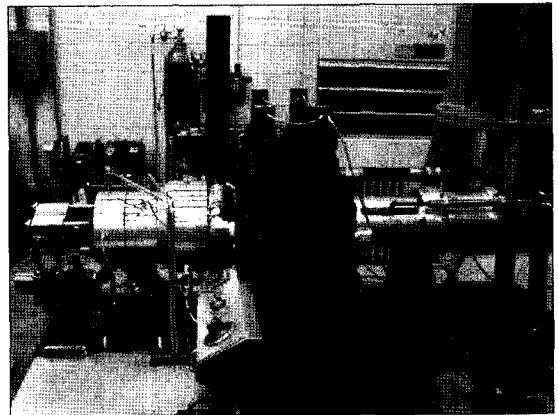


Fig. 1 Photograph of RICEM.

Table 1 Specification of RICEM apparatus

Bore×Stroke (mm)	80×125	80×85
Scavenging type	uniflow	uniflow
Displacement volume	628 cc	427 cc
Compression ratio	13	8.57
Stroke to bore ratio	1.56	1.06

은 프리피스톤 연소연구용 RICEM장치의 주요 제원을 나타낸 것이다.

## 2.2 실험장치

실험장치의 전체적인 개략도를 Fig. 2에 나타낸다. 실험장치는 전술한 uni-flow 소기방식을 갖는 프리피스톤 수소기관 연소연구용 RICEM장치, 역화발생 검출장치, 수소-공기 혼합장치, 변위측정부, 데이터취득장치, 기타계측장치 등으로 구성된다.

연소연구용 RICEM장치는 전술한 바와 같다. 역화발생 검출장치는 역화발생 여부를 파악하는 장치로서 체적이 17.6cc이고 지름16mm의 연결 통로로 흡기 챔버에 연결되는 구조이다. 역화발생 검출장치 상부에는 역화발생 시의 안전을 고려하여 3bar

의 압력에서 과열되는 지름30mm의 과열막을 설치하였다. 역화발생 검출장치의 실물사진을 Fig. 3에 나타낸다. 수소-공기 혼합장치는 스테인레스 재질로 되어 있으며, 혼합기의 균질도 향상을 위해 방폭 타입의 brushless 모터팬을 장착하였다. 변위측정부는 상·하사점 및 프리피스톤의 위치를 파악하여 접화시기 및 배기밸브 열림·닫힘 시기를 제어하는 부분으로 로터리 엔코더와 인덕턴스 타입의 리니어 변위센서(Faster.FS5000)로 구성된다. 배기밸브양정 및 열림시기는 레이저센서로 측정하였으며, 연소실 내 압력은 piezo type의 압력변환기(Kistler Co., 6056A1)를 삽입하여 측정하였다. 역화발생에 의한 흡기챔버 내의 압력 측정을 위해 역화검출장치에 압력변환기(Keller, PA-21SR)를 설치하였다. 각각의 압력은 charge amplifier(Kistler, 5011)에 의해 증폭된 후 A/D변환기를 거쳐 컴퓨터로 입력되고 해석된다.

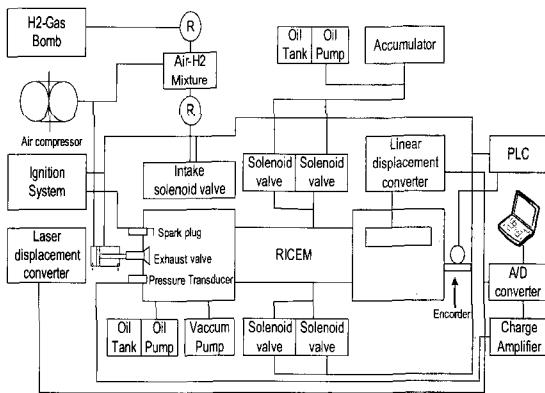


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.



Fig. 3 Backfire detection chamber.

## 2.3 실험방법

실험은 프리피스톤 수소기관의 스트로크, 배기열림시기 및 수소-공기 당량비를 변화시킨 경우에 대해 역화발생 및 제반성능을 파악하는 것이다. 스트로크는 85mm와 125mm인 두 경우이다. 배기밸브 열림 시기는 역화가 발생하지 않는 지점부터 역화가 발생하는 지점까지 지연시켰다. 수소-공기 당량비는  $\phi=0.6$ 에서부터  $\phi=1.0$ 까지 0.1간격으로 변화시켰다. 각각의 실험에서 실린더 벽면온도는 80℃로 유지하였다. 피스톤구동 오일압력은 55bar이며 배기밸브 구동압력은 8bar로 일정하게 하였다. 역화발생은 팽창말기에 일어나는 실린더내의 급격한 압력상승과 역화챔버에서 나타나는 압력상승 및 과열음으로 확인하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 Uni-Flow소기방식 프리피스톤 수소기관의 역화발생

Fig. 4는 uni-flow소기방식을 갖는 프리피스톤

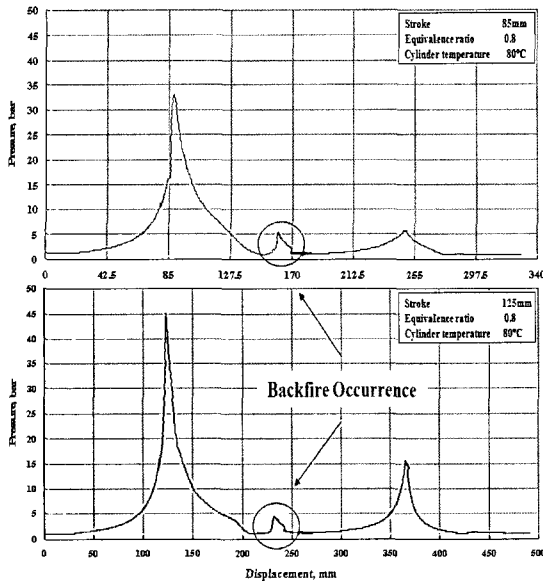


Fig. 4 Pressure curve in cylinder in the case of backfire occurrence for each stroke.

수소기관에서의 역화 현상을 파악하기 위해 각각의 스트로크에 대한 실린더 내의 압력선도를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 실린더 내 압력은 팽창 중 배기밸브가 열림과 동시에 급격한 압력강하가 이루어진 후 팽창말기에 역화발생에 따른 약간의 압력상승이 나타난다. 이후에는 역화에 의해 다음 행정에 필요한 흡기챔버 내의 혼합기가 미리 연소되어 비정상연소가 이루어지는 것을 보인다. 이와 같은 역화발생 시의 실린더 압력 양상은 스트로크가 변화하여도 대체로 유사한 것으로 볼 수 있다. 그러나 역화가 발생하는 시점은 다소 차이가 있으며 이것은 흡기포트로 역류되는 화염의 점화원이 다양하게 존재할 수 있음을 의미하는 것이다.

### 3.2 역화발생 원인 검토

#### 3.2.1 Crevice volume에 의한 역화

Fig. 5는 역화발생 원인의 하나로 지목되어온 것으로 피스톤링 groove와 피스톤링 사이의 틈새체적인 crevice volume 내의 혼합기가 실린더 내로 나와 느린 연소하는 화염에 의해 발생하는 역화를 나타

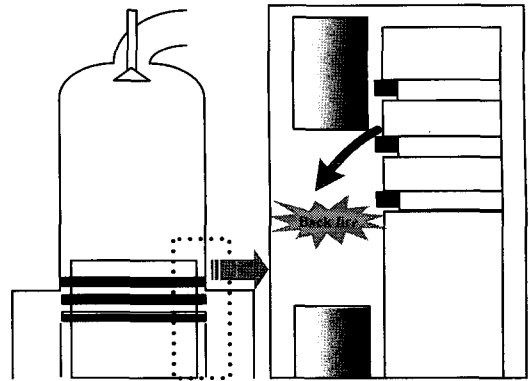


Fig. 5 Backfire occurrence due to slow combustion of mixture in the piston crevice volume.

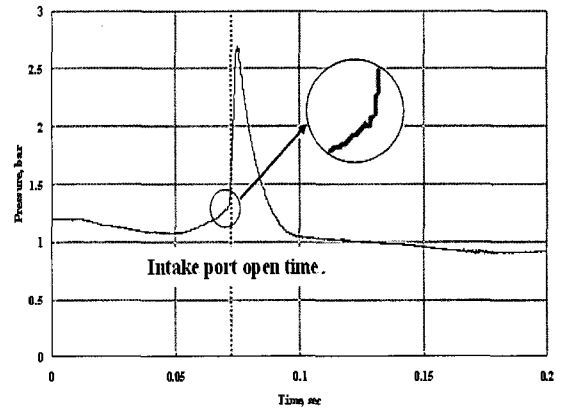


Fig. 6 Pressure curve in intake chamber showing backfire due to mixture in piston crevice volume.

낸 것이다. 수소는 소염거리가 짧은 특성을 가지고 있어 crevice volume으로 화염전파가 가능하다. 또한 수소연료는 가연한계가 넓기 때문에 crevice volume 내에 불균질한 혼합기에 화염이 전파된다면 팽창말기까지 느리게 연소를 할 수 있다. 프리피스톤기관은 피스톤 slap이 거의 없으므로 배기밸브가 열리더라도 crevice volume 내의 화염이 흡기포트로 유입되는 신기와 만나 역화로 이어질 수 있다. 만일 crevice volume 내에서 실린더 내로 나와 느린 연소를 하는 혼합기가 흡기챔버 내의 신기와 만나 역화가 발생된다면 역화발생시점에 crevice volume의 위치가 흡기챔버의 위치와 일치하게 될

것이다. 이를 확인하기 위하여 역화가 발생하는 시점의 흡기챔버 내의 압력변화를 나타낸 것이 Fig. 6이다. 그림에서 나타난 것과 같이 피스톤이 팽창하면서 흡기챔버 내의 압력이 점차 상승하다가 역화에 의해 급격히 압력이 상승하는 것을 나타낸다. 이때의 역화발생시점은 흡기챔버 내의 압력이 지속적으로 상승되는 시점으로 피스톤에 의해 흡기포트가 개방되기전이다. 이시점은 피스톤 crevice volume이 접하는 시점으로 확인되어 역화 발생 원인이 crevice volume내 혼합기의 느린연소에 의한다는 것을 보여 주는 결과이다.

### 3.2 실린더내의 화염에 의한 역화

Fig. 7은 실린더내의 국부적으로 느린 연소를 하는 역화를 나타낸 그림이다. 팽창말기 배기과정 중 미연소 된 수소연료는 가연한계가 넓기 때문에 국부적으로 연소가 가능하다. 또한 실린더 내의 압력이 급격히 감소하면 피스톤 crevice volume 내에서 느린연소를 하는 화염이 피스톤 탭랜드를 거쳐 피스톤헤드 주변으로 나올 수 있다. 상기와 같은 원인들에 의해 실린더내의 피스톤헤드부 주변에서 느린 연소를 하는 화염이 흡기포트 내의 신기와 만나게 되면 역화가 발생 될 수 있다.

Fig. 8은 실린더 내에서 느린 연소를 하는 화염에 의해 역화가 발생하는 것을 보여주는 흡기챔버의

압력선도이다. 전술한 바와 같이 흡기포트내의 압력은 피스톤이 팽창하는데 따른 압축효과에 의해 상승된다. 그리고 피스톤하강에 의해 흡기포트가 개방됨에 따라 흡기포트내의 압력이 강하하는 것을 볼 수 있다. 그 후 급격히 흡기챔버 내의 압력이 급격히 상승하며 이것은 역화가 발생된 것을 의미한다. 상기와 같은 결과는 피스톤 crevice volume 내에서 느린연소를 하는 화염이 직접 흡기포트 내의 혼합기와 접하지 않더라도 피스톤헤드 근방의 실린더 내에 발생된 모종의 점화원에 의해 유입되는 신기와 만나 역화가 발생할 수 있다는 것을 확인한 것이다.

전술한 두 원인에 의한 역화발생은 수소기관의 냉시동 시 불규칙적으로 발생하는 역화의 발생원인으로 작용할 가능성이 있다.

### 3.3 스트로크 변화시의 역화특성

Fig. 9는 스트로크가 85mm 및 125mm인 경우 각각의 수소-공기당량비에 대해 발생하는 역화의 발생유형을 나타낸 것이다. 3.2장에서 논한 바와 같이 흡기포트 개방 전에 발생한 역화를 crevice volume 내의 화염전파에 의한 역화로, 흡기포트 개방 후에 발생한 역화를 실린더 내의 화염에 의한 역화로 판단하였다. 스트로크가 125mm인 경우에는 역화가

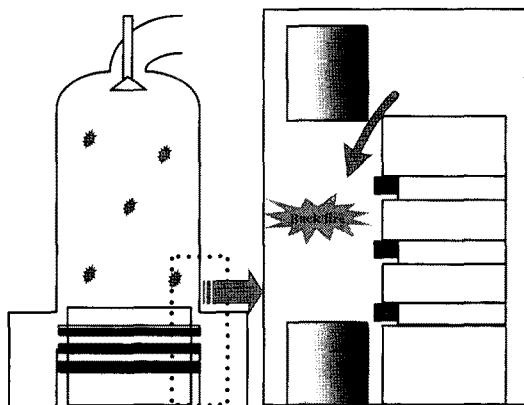


Fig. 7 Backfire occurrence due to slow combustion of inhomogeneous mixture in the chamber.

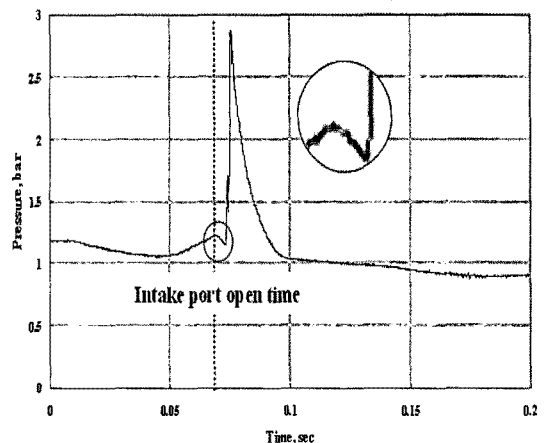


Fig. 8 Pressure curve in intake chamber showing backfire due to mixture in cylinder.

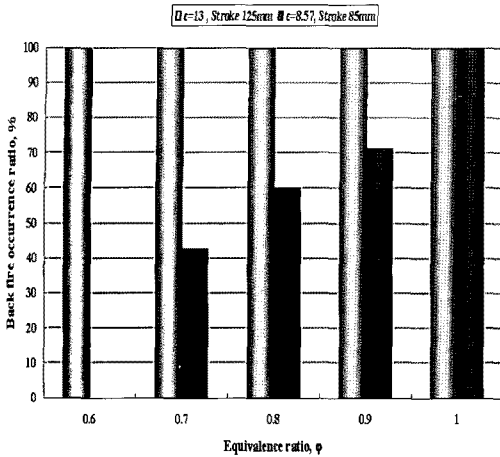


Fig. 9 Occurrence case of backfire for flame in crevice volume.

당량비  $\phi=0.6$ 에서  $\phi=1.0$ 까지 모두 흡기포트 개방 전에 발생하였다. 반면에 스트로크가 85mm인 경우에는 당량비가 감소할수록 발생한 역화 중에 crevice volume내의 화염전파에 의한 역화가 감소하는 것을 볼 수 있다. 스트로크 변화는 동일 실린더 및 연소실을 사용하여 행정길이만 변화시켰으므로 Table 1에 나타난바와 같이 스트로크가 클수록 압축비가 증가한다. 따라서 스트로크가 125mm인 경우 모든 당량비에서 역화가 흡기포트 개방 전에 발생하는 것은 압축비와 당량비가 증가할수록 화염속도가 증가하고 소염거리가 감소하여 crevice volume 내의 혼합기가 연소될 가능성이 증가한 것으로 볼 수 있다. 또한 압축비 증가에 따라 피스톤 crevice volume 내에서 느린연소하는 화염이 실린더 내로 역류되는 가능성이 감소하는 것도 수반된다.

### 3.4 역화한계 배기밸브 열림 시기

Fig. 10은 수소-공기 당량비변화에 대한 역화한계 배기밸브 열림시기를 각각의 스트로크에 대해 비교한 것이다. 여기서 역화한계 배기밸브 열림시기는 역화가 발생하기 직전의 정상운전이 가능한 배기밸브 열림시기로 정의하였다. 그리고 배기밸브 열림시기는 4행정기관의 크랭크 각도로 표현하였다. 그림에 나타난 바와 같이 역화한계 배기밸브 열

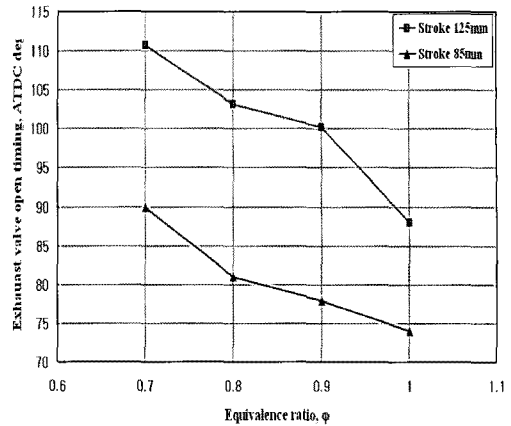


Fig. 10 Backfire occurrence with exhaust valve open time for each equivalence ratio.

림시기는 수소-공기당량비가 증가함에 따른 실린더 내의 국부적인 화염발생과 피스톤 crevice volume 내에서 느린 연소 화염의 잔존 가능성이 증가되는데 기인하여 당량비 증가에 따라 진각되는 것을 나타낸다. 또한 스트로크가 증가할수록 역화한계 배기밸브 열림시기는 지각된다. 역화한계 배기밸브 열림시기의 지각은 crevice volume내의 화염이 배기밸브를 통해 배출되는 기간이 길어지는 것을 의미한다. 당량비  $\phi=0.6$ 인 경우에는 공급열량이 적는데 따른 crevice volume으로의 화염전파가능성이 적어져 흡기포트 개방시점에 비해 배기밸브의 열림시기가 진각되어도 역화가 발생되지 않는다.

상기와 같이 역화 발생을 억제시키기 위해서는 배기밸브 열림시기를 진각시켜야하므로 이에 따른 출력 및 효율의 감소가 수반된다. 프리피스톤 수소기관의 실용화를 위해서는 반드시 역화가 억제되어야 하나 uni-flow 소기방식은 역화발생의 가능성이 상존한다. 따라서 역화를 억제하는 측면에서는 실린더하단부에 흡기포트가 위치하지 않는 소기방식이 적절할 것으로 예측된다.

## 4. 결 론

Uni-flow 소기방식을 갖는 2행정 프리피스톤 수소기관의 스트로크, 배기밸브 열림시기 및 당량비

를 변화시킨 경우의 역화발생 특성을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Uni-flow 소기방식은 실린더하부에 흡기포트가 위치하여 설계 및 운전조건에 따라 역화발생 가능성이 상존한다.
- 2) 수소기관에서 발생하는 역화원인이 피스톤 crevice volume내의 느린연소에 의한 역화와 피스톤헤드 부 근방의 실린더 내에 존재하는 모종의 국부적인 화염에 의한다는 것을 uni-flow 소기 연소실 내의 역화발생 현상으로부터 명확히 확인되었다.
- 3) Crevice volume내의 혼합기가 느린연소하는데 따른 역화발생 가능성은 압축비가 높고 당량비가 클수록 증가하는 것이 보여졌다.
- 4) 역화가 억제되는 배기밸브 열림시기가 스트로크의 증가에 따라 지각되어 역화 회피를 위해 uni-flow소기방식 수소 프리피스톤 기관에 장행정 적용이 유리하다는 것을 알 수 있었다.

## 우 기

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

## 참 고 문 헌

- 1) Peter A. J. Achten, "A Review of Free Piston Engine Concepts", SAE 941776, 1994.
- 2) Norman H. Beachley and Frank J. Fronczak,

"Design of a Free-Piston Engine-Pump", SAE 921740, 1992.

- 3) P. V. Blarigan, N. Pradiso and S. Goldsborough, "Homogeneous Charge Compression Ignition with Free Piston: A New Approach to Ideal Otto Cycle Performance", SAE 980204.
- 4) 고대권, 최재성, "저속 2행정 디젤 기관의 소기특성에 관한 연구", 한국박용기관학회지 제19권 3호, 1995, pp. 202-210.
- 5) 윤재성, 조형욱, 이종태, 이용균, "프리피스톤 리니어 동력시스템의 루프소기성능 향상을 위한 유동해석", 한국수소 및 신에너지학회 논문집 제19권 제2호, 2008.04, pp. 139-144.
- 6) 조형욱, 윤재성, 이종태, 임희수, "PIV를 이용한 Uni-flow소기방식 프리피스톤 수소기관의 실린더내 유동가시화", 한국수소 및 신에너지학회논문집 제19권 제3호, 2008.06, pp. 182-188.
- 7) Blair, G. P., "The Basic Design of Two-Stroke Engines", SAE, Warrendale, PA, 1990.
- 8) G. P., Blair, "Correlation of Theory and Experiment for Scavenging Flow in Two-Stroke Cycle Engine", SAE Paper NO.88125, 1988.
- 9) 조형욱, 윤재성, 이종태, "Uni-flow 소기방식 2행정 프리피스톤 수소기관의 역화발생", 대한기계학회 2008 에너지 및 동력공학부분 춘계학술대회, 2008, pp. 44-49.