

## 루프소기방식을 갖는 2행정 프리피스톤 수소기관의 역화에 관한 연구

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

\*성균관대학교 대학원, \*\*성균관대학교 기계공학부

### Study on Backfire for a Two-Stroke Hydrogen Fueled Free-Piston Engine with Loop Scavenging

KWANYEON CHO\*<sup>†</sup>, CHANGHEE BYUN\*, 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.

#### ABSTRACT

For developing a two-stroke free-piston hydrogen engine with high efficiency and low emission, determination of the scavenging type is one of the most important factor. In this research, backfire characteristics for loop scavenging were analyzed with the number of piston crevice volume and piston expansion speed. Rapid Compression Expansion Machine, RCEM was used for combustion research of the free piston H<sub>2</sub> engine in the experiment. As the results, it was shown that although backfire occurring in a loop scavenging type can be partially controled by a complete exhaust of burned gas, possibility of backfire basically exist due to the structure which piston crevice volumes contact with fresh mixture in a scavenging port. However, a loop scavenging may be considered as combustion chamber of a free piston H<sub>2</sub> engine from the point of view that backfire does not occur nearby lean equivalence ratio obtained high thermal efficiency. It was also analyzed that an advances of backfire occurrence timing with increase of the fuel-air equivalence ratio were due to promotion of flame propagation into piston crevice volumes by decrease of the quenching distance.

**KEY WORDS** : Free-piston hydrogen engine(프리피스톤 수소기관), Loop scavenging(횡단소기), Expansion speed(팽창속도), Piston crevice volume(피스톤 틈새체적), Backfire control(역화억제)

#### 1. 서 론

2행정 복동식 프리피스톤 수소기관은 크랭크기

구가 없어 구조가 간단하고 스트로크가 구속되지 않아 고효율의 실현이 가능하다. 하지만 독특한 연소특성을 갖는 수소연료를 사용함에 따라서 역화가 발생되며 이는 소기방식에 의해서도 좌우된다<sup>1-3)</sup>. 수소기관에서 역화발생은 피스톤링의 틈새체적인

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

[ 접수일 : 2010.10.30 수정일 : 2010.11.17 게재확정일 : 2010.12.17 ]

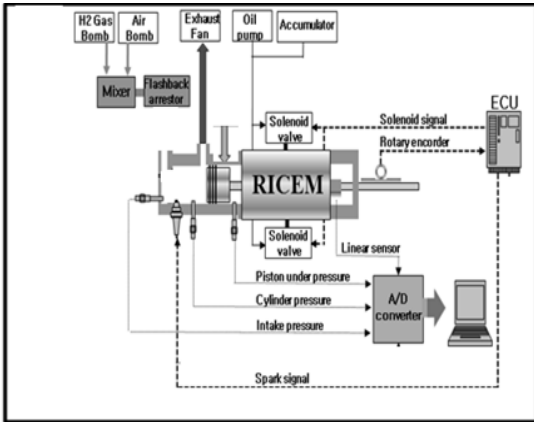


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

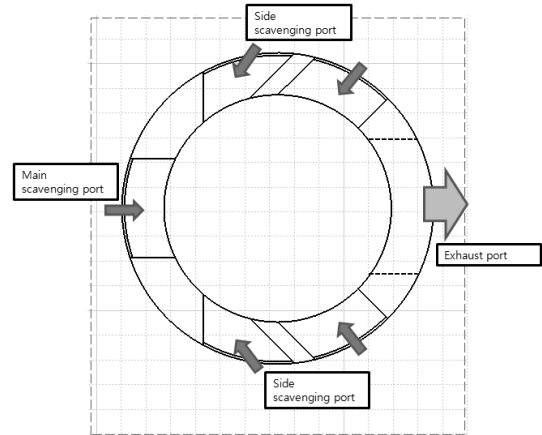


Fig. 2 Scavenging port position of loop scavenging.

crevice volume(추후 피스톤 틈새체적이라 칭함)내에서 느린연소하는 화염에 기인될 수 있다. 현재 개발연구 중인 프리피스톤 수소기관의 소기방식은 구조가 간단하여 통상의 2행정기관에서 사용하는 루프(loop)소기방식을 일반적으로 적용하고 있다. 소기 및 배기 포트가 고정된 루프소기방식 프리피스톤 수소기관은 피스톤 슬랩이 없어 피스톤 틈새체적 내에서 느린연소를 하는 화염원이 실린더 내로 역류될 가능성은 줄어든다<sup>4,5)</sup>. 그러나 구조상 피스톤 틈새 내의 화염원이 빠른 피스톤 팽창속도에 의해 배기포트를 통해 완전히 배출되지 못할 수 있다. 느린연소를 하는 화염원이 배기포트 바로 아래 위치한 소기포트에서 유입되는 혼합기와 접하면 역화가 발생된다<sup>6-8)</sup>. 상기를 고려하면 피스톤 틈새체적의 화염이 완전연소 또는 충분히 배출될 수 있도록 하면 역화발생이 억제될 가능성이 있다. 그러나 2행정 프리피스톤 수소기관 개발 연구는 국내외 모두 연구 초기단계이므로 이에 대한 것은 불명확한 것이 많다.

본 연구에서는 프리피스톤 수소기관에서 역화발생 없이 안정된 연소를 실현시키기 위해 루프소기방식을 사용한 경우의 역화발생 여부 및 제반현상 등에 대해 해석하였다. 실험에는 프리피스톤 수소기관 연소연구용 급속압축팽창기를 사용하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치의 전체적인 개략도를 Fig. 1에 나타낸다. 실험장치는 프리피스톤 수소기관 연소연구용 RCEM(rapid compression expansion machine)장치, 수소-공기 혼합기 장치, 역화발생 검출장치, 변위측정부 및 데이터 취득장치 등으로 구성된다.

RCEM장치는 크게 연소실부, 점화장치부, 피스톤 구동 및 동력흡수부로 구성된다. 연소실은 루프소기방식을 갖는 반구형 형상으로 실린더헤드 측면에는 점화플러그가 위치한다. 실린더 하단부에는 폭 34mm, 높이 32.5mm인 배기포트가 위치한다. 배기포트 16.5mm 밑에는 폭 27mm, 높이 16mm인 메인 소기포트와 소기유동을 증가시키기 위한 폭 12mm와 20mm, 높이 12mm인 2쌍의 사이드 소기포트가 위치한다. Fig. 2는 윗면에서 본 소기와 배기포트의 위치를 나타낸 것이다.

피스톤 구동부는 고압질소가스에 의해 압축된 작동유를 순간적으로 공급시키는 방식으로 고속구동을 실현하였다. 수소-공기 혼합기는 분압법에 의해 혼합되며 균질도 향상을 위해 방폭타입의 brushless 모터팬을 혼합장치 내에 장착하였다. 역화발생 여부 및 폭발시 안전을 고려하여 3bar의 압력에서 과열되는 역화발생 검출장치와 역화방지기를 부착하

Table 1 Specification of linear RCEM

Cycle	2cycle
Stroke × bore	85mm × 80mm
Compression ratio	8.57
Stroke volume	427cc
Ignition type	Spark ignition
Exhaust port open	BBDC 32.5mm
Intake port open	BBDC 16mm

였다. 피스톤의 변위는 랙과 엔코더가 연결된 피니언기구조로 측정하며, 점화시기 및 각종 밸브의 작동 트리거로 사용된다. 연소실내 압력은 piezo type의 압력변환기(Kistler Co., 6056A1)를 삽입하여 측정하였다. 역화발생으로 인한 소기챔버 내의 압력변화를 측정하기위해 역화검출장치에 압력변환기(Keller, PA-21SR)를 설치하였다. 각각의 압력은 charge amplifier(Kistler, 5011)에 의해 증폭된 후 A/D변환기를 거쳐 컴퓨터로 입력되고 해석된다. Table 1은 프리피스톤기관 수소연소 연구용 RCEM의 주요 제원을 나타낸 것이다.

## 2.2 실험방법

실험은 프리피스톤 수소기관에 loop소기방식을 채택한 경우의 역화발생 여부 및 특성을 파악하는 것이다. 실험변수는 피스톤링의 갯수 및 피스톤 팽창속도이다. 피스톤링의 갯수는 피스톤링의 틈새체적 내 혼합기의 느린연소에 의한 역화발생 원인을 확인하기 위한 것이다. 종류는 압축링이 1개, 2개와 피스톤링 4개인 기존 피스톤인 3종류이다. 피스톤 팽창속도는 배기 기간을 변화시키기 위한 것으로 RCEM 동력흡수부의 작동유체 배출량을 조절하여 평균피스톤속도를 약 1.8m/s에서 2.6m/s까지 변화시켰다. 각각의 경우 모두 수소-공기 당량비는  $\phi = 0.5$ 부터  $\phi = 1.0$ 까지  $\phi = 0.1$ 씩 증가시켰고, 연소실벽 표면온도는 80°C로 유지하였다. 역화발생은 팽창말기에 일어나는 실린더 내 급격한 압력상승과 역화 챔버에서 나타나는 파열음으로 확인하였다.

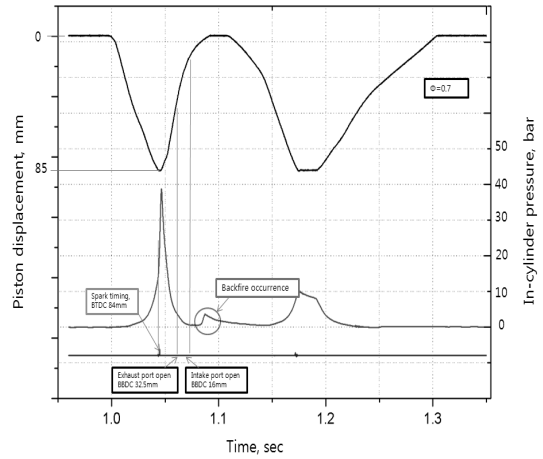


Fig. 3 In-cylinder pressure curve and piston displacement in the case of backfire occurrence.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 Loop소기방식 프리피스톤 수소기관에서의 역화발생

루프소기방식을 갖는 프리피스톤 수소기관은 예상한 바와 같이 고회박영역을 제외하고 역화가 발생되었다. 역화가 발생된 경우의 실린더 내 압력과 피스톤변위를 시간의 경과에 따라 나타낸 일례를 Fig. 3에 나타낸다. 여기서 당량비는  $\phi = 0.7$ 인 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 정상연소 후 팽창후기에 역화가 발생되며 통상과 마찬가지로 소기관 내에서 연소된 신기가 실린더내로 유입되어 다음 행정은 실화되는 것을 나타낸다. 역화가 발생하는 시점은 피스톤이 팽창하여 소기포트가 개방되는 근방이다. 이는 전술한 바와 같이 역화발생의 원인으로 추정되는 피스톤링 사이의 틈새체적 내의 모종의 화염원이 배기포트를 통해 충분히 빠져나가지 못하고 소기포트를 통해 유입되는 신기와 접하였을 시 역화가 발생할 수 있다는 것을 보여주는 결과이다. 역화발생 시점이 피스톤링 틈새체적과 소기포트 열림 시기와 일치하면 상기 원인이 설명된다. 이를 확인하기 위해 수소-공기 당량비  $\phi = 0.6$ 에서 역화가 발생된 경우 피스톤링 틈새체적의 위치와 소기챔버내의 압력을 Fig. 4에 나타낸다. 그림에서 보는 바와

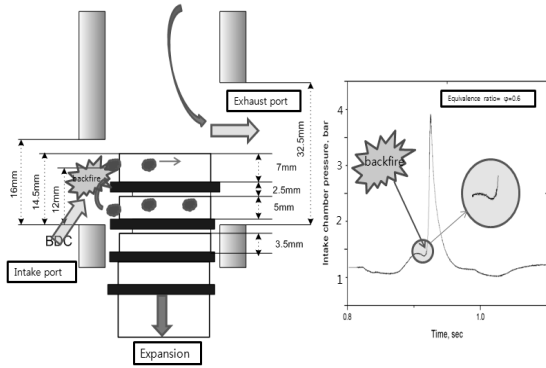


Fig. 4 Flame propagation into scavenging chamber from second piston crevice volume and pressure curve in scavenging chamber.

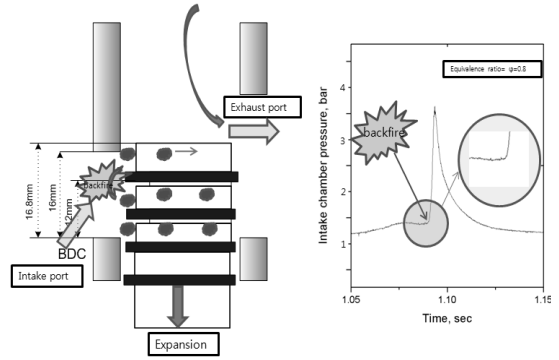


Fig. 5 Flame propagation into scavenging chamber from third piston crevice volume and pressure curve in scavenging chamber.

같이 top land와 second land가 소기포트와 접하는 시점(피스톤 변위로 BBDC 14.5mm)에서 역화가 발생되어 피스톤 틈새체적에 의한 역화발생 원인설명을 확인할 수 있다. 이 경우 소기챔버 내의 압력은 피스톤이 팽창하면서 점차 상승하다가 소기포트가 개방되면서 떨어지다 역화에 의해 급격히 상승되는 것을 나타낸다.

### 3.2 당량비증가에 따른 역화발생시점의 진각원인 해석

수소기관에서 피스톤 틈새체적 내 혼합기가 연소되는 것은 수소연료의 좁은 소염거리에 의한다. 당량비가 증가한다면 공급열량이 증가하여 소염거리가 줄어든다. 이로 인해 역화발생을 야기시키는 피스톤 틈새체적 내의 화염원은 top land에서 third land 아래까지 전파될 수 있다. 이것은 역화발생 시점이 진각되는 원인이 된다. 이를 확인하기 위해 third land까지 화염이 전파된 것을 Fig. 5에 나타낸다. Fig. 4에서 논한바와 같이 비교적 희박한 수소-공기 당량비  $\phi=0.6$ 인 경우는 top land와 second land가 소기포트와 접하는 시점에서 역화가 발생된다. 그러나 이보다 약간 농후한 당량비가  $\phi=0.8$ 인 경우는 second land를 지나 third land까지 화염이 전파되어 역화발생 시점이 BBDC 16.6mm로 진각되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 피스톤 링의 갯수를 변화시켜 틈새체적 내로 화염전파를 변화시킨 경우 각각의 당량비에 대해 역화가 발생하는 위치를 피스톤 변위로 나타낸 것이다. 역화발생은 전술한 바와 같이 당량비 증가 및 피스톤 틈새체적 내로 전파된 화염의 범위가 증가될수록 역화발생 시점이 진각되는 경향을 볼 수 있다. 상기와 같이 당량비 증가에 의한 역화발생 시기 진각은 소염거리 감소와 연소향상 등에 의해 피스톤 틈새체적 내로 화염전파가 원활히 이루어지는 측면에서도 설명될 수 있다. 또한 피스톤 틈새가 없다면 역화가 억제될 수 있다는 것도 의미한다. 하

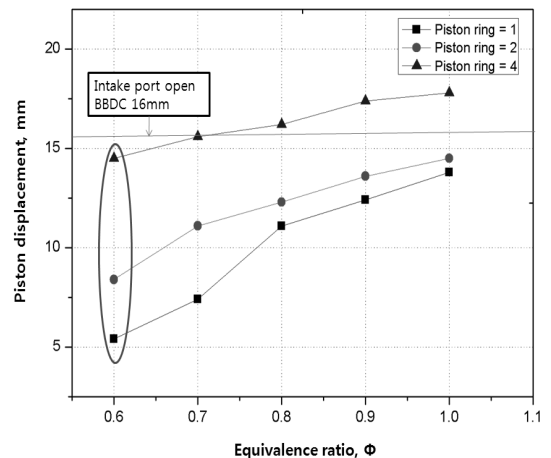


Fig. 6 Backfire occurrence piston displacement with number of the piston ring for each equivalence ratio.

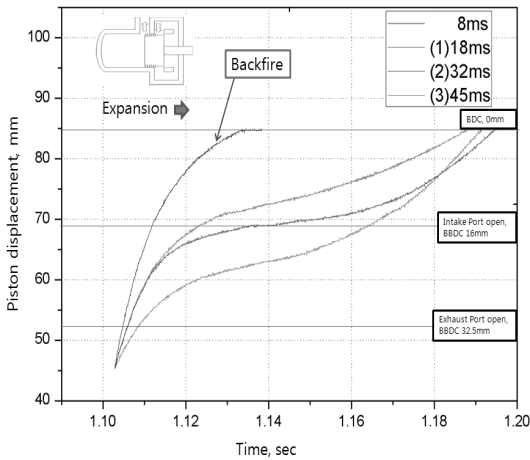


Fig. 7 Backfire occurrence piston displacement according to expansion speed of piston.

지만 피스톤링 사이의 틈새체적은 존재할 수 밖에 없으므로 모종의 화염원 배출이 충분히 이루어지는 것이 역화억제의 한 방안이 된다.

### 3.3 배기기간 증가에 따른 역화억제

Fig. 7은 역화가 발생하는 수소-공기 당량비  $\phi=7$ 에서 배기포트 개방시점의 피스톤 팽창속도를 감소시켜 배기기간을 증가시킨 경우 역화발생이 억제되는 것을 나타낸 것이다.

전술한바와 같이 피스톤 틈새체적 내에 존재하는 화염원과 소기포트를 통해 유입되는 신기와 접할시 역화가 발생한다. 그러나 배기포트가 개방되는 시점에서의 피스톤 팽창속도를 감소시켜 흡기포트가 개방되기 전까지의 배기기간을 증가시킬수록 역화가 발생하지 않는 것을 보이고 있다. 이는 프리피스톤 수소기관에서 피스톤 틈새체적 내의 모종의 화염원이 존재한다는 것을 의미한다. 또한 이 화염원이 역화발생에 영향을 미칠 수 있다는 것을 재확인하는 결과이다.

상기의 결과들은 역화측면에서 루프소기방식에서 당량비  $\phi=0.6$ 이상인 경우 역화가 항상 존재할 수 있다는 것을 의미하는 것이다. 루프소기방식은 소기 및 배기 포트가 고정되어 있어 구조적으로 배기

또는 소기밸브가 장착되어 있는 uni-flow 소기방식 및 reverse uni-flow 소기방식과 다르게 고부하 영역에서의 역화억제가 힘들다. 프리피스톤수소기관의 개발은 고효율을 달성하는 것이다. 수소기관에서 고효율이 발생하는 당량비는 통상적으로  $\phi=0.5$  근방의 고희박혼합기를 사용할 경우이다. 이 영역에서 운전시키면 역화가 발생되지 않는다. 따라서 구조의 간편성, 소형경량화 및 고효율의 측면에서 루프소기방식이 프리피스톤 수소기관에 유리할 수 있다. 단 이 방식을 채택하는 경우는 출력저하 대책의 강구가 요구된다.

## 4. 결 론

루프소기방식을 갖는 프리피스톤 수소기관을 대상으로 피스톤링 갯수와 피스톤 팽창속도를 변화시켜 역화현상을 파악하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 프리피스톤 수소기관에 루프소기방식을 채택하면 구조상 피스톤 틈새체적과 소기포트가 직접 접하게 되어 예상대로 수소-공기 당량비  $\phi=0.6$  이상부터 역화가 발생되었다.
- 2) 당량비를 증가시킨 경우에 역화발생 시기가 진각되는 것은 공급열량증가에 의한 소염거리감소와 연소향상으로 피스톤 아래쪽의 틈새체적으로 화염이 전파된다는 측면으로 해석할 수 있었다.
- 3) 피스톤 틈새체적 내의 모종의 화염원이 충분히 배출되도록 피스톤 팽창속도를 지연시킨 결과 역화가 발생하지 않는 현상으로부터 피스톤 틈새체적 내에 모종의 화염원이 존재하는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 루프소기방식은 구조적으로 역화발생 가능성이 있으나 고효율발생 수소-공기 당량비  $\phi=0.5$ 부근에서 역화가 발생되지 않으므로 고효율을 추구하는 프리피스톤 수소기관의 달성측면에서는 구조가 간단한 루프소기방식이 유리한 점이 많을 것으로 판단된다.

## 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) Jakob Fredriksson, Ingemar Denbratt, "Simulation of a Two-Stroke Free Piston Engine", *SAE Paper*, No. 2004-01-1871, 2004.
- 3) 고대권, 최재성, "저속 2행정 디젤 기관의 소기특성에 관한 연구", *한국박용기관학회지*, Vol. 19, No. 3, 1995, pp. 202-210
- 4) 조형욱, 윤재성, 이종태, "Uni-flow 소기방식 2행정 프리피스톤 수소기관의 역화발생", *대한기계학회 2008 에너지 및 동력공학부분 춘계학술대회*, 2008, pp. 44-49
- 5) K. Y. Cho, H. W. Cho, J. T. Lee, "The Characteristics of Backfire for a Hydrogen Fueled Free-Piston Engine with Uni-flow Scavenging According to Various Stroke", *Proceeding of the KHNES, Annual Autumn Meeting 2008*.
- 6) 윤재성, 조형욱, 이종태, 이용균, "프리피스톤 리니어 동력시스템의 루프소기성능 향상을 위한 유동해석", *한국수소 및 신에너지학회*, Vol. 19, No. 2, 2008, pp. 139-144.
- 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.