

## 프리피스톤 수소기관의 연소안정화 및 성능향상에 관한 연구

노기철<sup>†</sup>, 윤재성\*, 김강문\*, 박상욱\*, 이종태\*\*

\*성균관대학교 대학원, \*\*성균관대학교 기계공학부

## A Study on the Combustion Stabilization and Performance Improvement in the Free-piston Hydrogen Fueled Engine

K.C. Noh<sup>†</sup>, J.S. Yoon\*, K.M. Kim\*, S.W. Park\*, J.T. Lee\*\*

\*Graduate School of Sungkyunkwan Univ.

\*\*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.300 Chunchun-dong Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 440-746, Korea

### ABSTRACT

A free-piston hydrogen fueled engine is considered as one of the next power systems which is able to obtain high efficiency and low emission, simultaneously. In this study, in order to ensure the possibility as the next generation power system, the combustion characteristics and the performance of the free-piston hydrogen fueled engine are analyzed by using the linear RICEM for the change of injection pressure and equivalence ratio.

As the results, in-cylinder maximum pressure is shown at injection pressure  $P_{inj}=6\text{bar}$ . Backfire phenomenon is not observed under experimental condition and knock occurs over  $\phi=0.8$ . The thermal efficiency is the highest at injection pressure,  $P_{inj}=6\text{bar}$  and equivalence ratio,  $\phi=0.7$ , respectively.

**KEY WORDS** : Free-piston hydrogen fueled engine(프리피스톤 수소기관), Linear RICEM(급속 흡입압축팽창기), Backfire(역화), Knocking(노킹), Piston crevice volume(피스톤 틈새 체적)

### 1. 서 론

프리피스톤 수소기관은 왕복구동식 기관의 크랭크 기구가 없는 단순한 구조로 인해 기계적 손실이 적다. 또한 비열비가 크고 탄소성분이 없는 수소를 사용하므로 고효율과 무공해 수준의 배기

성능을 동시에 만족할 수 있을 것으로 평가되고 있다.<sup>1-3)</sup> 그러나 탄화수소계 연료와 다른 수소연료의 독특한 연소특성은 기관의 성능향상에 유익한 점도 있지만 역화와 같은 이상연소의 원인이 되기도 한다.<sup>4)</sup> 또한 기관의 압축비가 연소상태에 따라 임의로 변화하므로 노크와 같은 이상연소로 기관 성능이 저하된다. 따라서 프리피스톤 수소기관을 차세대 동력시스템으로서 실용화하기 위해

<sup>†</sup>Corresponding author : pivboy@dreamwiz.com

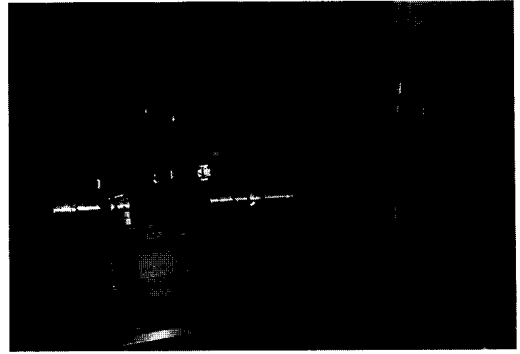
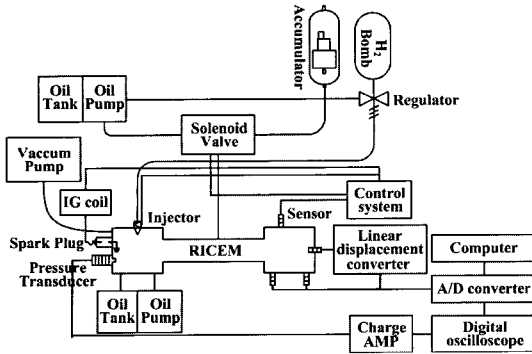


Fig. 165 Schematic diagram and photograph of experimental apparatus with the linear RICEM

서는 무엇보다도 프리피스톤 기관의 연소안정화 및 성능이 확보되어야 한다.

본 연구는 프리피스톤 수소기관의 실용화를 위한 기초단계로서 프리피스톤 연소 연구용 급속흡입압축팽창기를 사용하여 연료의 분사압력 및 연료-공기 당량비에 대한 프리피스톤 수소기관의 기본 특성에 대해 해석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치는 프리피스톤 수소기관 연소 연구용 RICEM, 수소연료 공급부, 역화발생 검출장치, 피스톤 구동 유압공급장치, 데이터 취득 및 제어부로 구성된다. 실험장치의 개략 및 실물사진을 Fig. 1에 나타낸다.

#### 2.1.1 연소 연구용 RICEM

프리피스톤 수소기관 연소 연구용 RICEM은 연소가 일어나는 연소실부, 점화장치부, 프리피스톤을 구동하고 동력을 흡수하는 피스톤 구동 및 동력 흡수부, 프리피스톤의 위치를 측정하는 변위 센서부로 구성된다.

RICEM은 행정체적  $V_d = 628.3 \text{ cc}$ ,  $\varepsilon = 13$ 의 dual type이다. 실린더 헤드부에는 점화장치와 연소실내 가스압력 측정을 위한 압력변환기(Kisler Co., 6056A1)를 삽입하였다. 그리고 실제기관의 온도장을 재현하기 위해 실린더 헤드부와 블록에

는 고온의 오일이 순환하는 오일 재킷을 각각 설치하였다. 점화장치는 수소연료가 탄화수소계 연료보다 이온량이 적어 잔류전하에 의한 이상방전으로 역화발생이 우려되므로<sup>5)</sup> 2차 코일을 어스 쪽과 연결하여 잔류에너지가 쉽게 방출되도록 구성하였다. 피스톤 구동 및 동력흡수부는 지름이 55 mm이며 피스톤 로드의 지름이 25 mm인 복동식 유압 실린더의 구조를 가진다.

변위센서부는 상·하사점 및 프리피스톤의 위치를 파악하여 점화시기 등을 제어하는 부분으로 3개의 포토센서와 리니어 변위센서로 구성된다.

#### 2.1.2 역화발생 검출장치

Fig. 2는 프리피스톤 수소기관에서 역화발생을 여부를 확인하기 위한 역화발생 검출장치를 나타낸 것이다. 역화발생 검출장치는 체적이 39 cc이

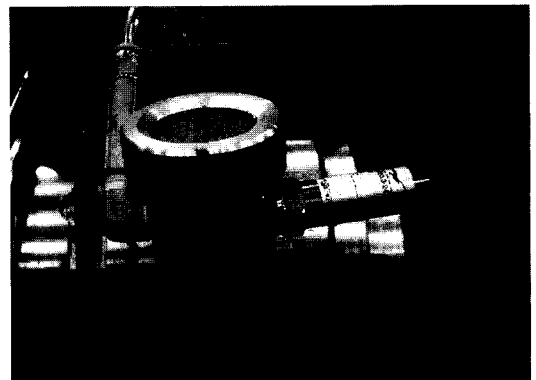


Fig. 2 Backfire detection chamber

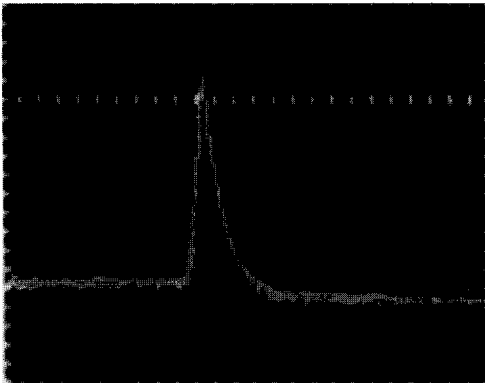


Fig. 3 Pressure curve in backfire detection chamber when backfire occurs

며, 흡입포트가 열리는 시점인 하사점 전 4 mm 지점에 설치하여 지름  $\varnothing = 6$  mm의 연결 통로로 실린더와 연결되는 구조이다. 장치의 상부에는 역화발생 시의 안전을 고려하여 파열압이 3 bar인 지름  $\varnothing = 35$  mm의 안전막을 설치하였다.

Fig. 3은 역화발생 검출장치에 이론적인 수소-공기 혼합기를 공급한 후, 점화장치에 의해 강제 착화 한 경우의 압력파형을 나타낸 것이다.

역화발생 검출장치 내에서 역화가 발생되면 그림에서 나타낸 바와 같이 급격한 압력상승 파형이 보인다. 최고 가스압력은 파열압인 3 bar이며, 각 변수에 대한 실험 시에 이와 같은 파형이 나타날 경우 역화발생으로 간주하였다. 역화발생 검출장치 내에는 연소실과 동일한 당량비의 수소-공기 예혼합기를 공급하였다.

### 2.1.3 피스톤 구동 유압공급장치

피스톤 구동 유압공급장치는 피스톤 구동부에 고압의 오일을 공급하는 부분이다. 이 장치는 피스톤 구동부가 충분한 피스톤 속도가 유지되도록 오일탱크, 오일펌프, 어큐뮬레이터 및 고압질소 볼베로 구성되는 질소가압 오일공급방식으로 구성하였다. 피스톤 속도는 오일의 공급압력을 조절하여 제어가능하다.

피스톤 구동부로 오일이 공급되면 어큐뮬레이터 내의 압력이 감소되어 피스톤 속도가 변화된

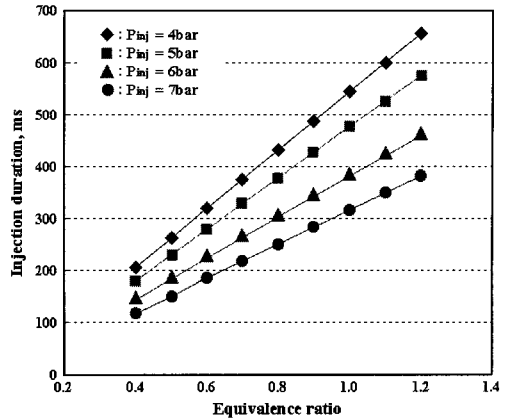


Fig. 4 Injection duration for required equivalence ratio versus injection pressure

다. 따라서 어큐뮬레이터 내의 압력감소가 2% 미만인 되도록 60 l 용량의 어큐뮬레이터를 사용하였다. 요구되는 부하를 얻기 위한 유량제어는 고속 서보 밸브 및 체크밸브에 의해 조절되며 토출된 저압의 오일은 오일탱크로 재순환된다.

### 2.1.4 데이터 취득 및 제어부

피스톤 구동을 위한 서보밸브 개방신호로부터 압축행정이 진행된다. 3개의 포토센서 및 리니어 변위센서로부터 피스톤의 위치가 제어 PC로 입력된 후 설정된 점화시기에 점화장치 및 서보밸브 쪽으로 동기신호를 출력한다. 그리고 연소실내 가스 압력은 charge Amp.(Kisler Co., 5011)와 A/D 변환기를 거쳐 제어 PC에 저장된다.

## 2.2 실험방법

실험은 분사압력 및 수소-공기 당량비에 따른 프리피스톤 수소기관의 연소특성 및 기관성능을 평가하는 것이다. 수소연료의 공급은 상용 GDI 인젝터를 사용하여 연소실 내에 직접 분사하였고 수소-공기의 혼합을 향상을 위해 일정 시간경과 후 실험을 진행하였다.

분사압력은 4~7 bar로 1 bar씩 단계적으로 증가시켰다. 수소-공기 당량비는  $\phi = 0.4 \sim 1.2$ 까지 변화시켰다. 수소-공기 당량비는 연료의 분사기

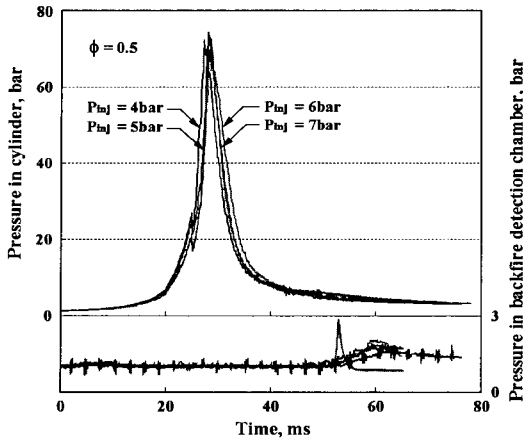


Fig 5 Pressure in-cylinder and backfire detection chamber for the change of injection pressure at  $\phi = 0.5$

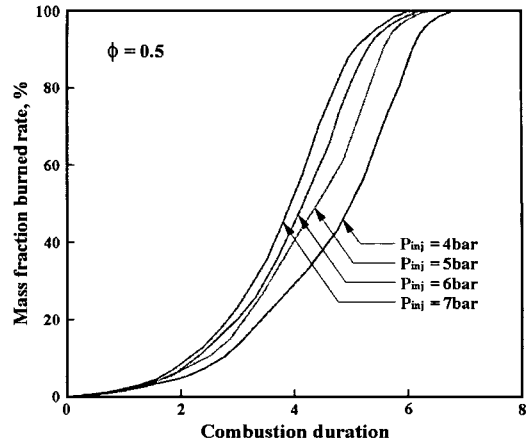


Fig. 6 Mass fraction burned rate for the change injection pressure versus combustion duration at  $\phi = 0.5$

간을 조절하여 요구되는 당량비를 맞췄다.

Fig. 4는 각 분사압력에 대해 요구되는 당량비를 얻기 위한 연료의 분사시간을 나타낸 것이다. 분사된 수소량은 수소 분사에 따른 차압을 측정하여 결정하였다.

실린더헤드 및 블록의 온도는 실제기관의 운전 조건을 고려하여 각각 100 °C 및 80 °C로 일정하게 유지시켰다. 그리고 피스톤 구동부의 오일공급 압은 60 bar로 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 분사압력 변화에 대한 연소특성

Fig. 5는 분사압력 변화에 따른 실린더 내 압력 및 역화발생 검출장치 내의 압력을 나타낸 것이다. 여기서 수소-공기 당량비는  $\phi = 0.5$ 이다.

수소연료의 분사압력이 증가할수록 연소실 내 최고압력은 약간 증가하다가 분사압력 7 bar에서 다소 감소하는 경향을 보인다. 분사압력 증가에 따른 최고압력의 증가는 분사압 증가에 의한 운동에너지 증가로 수소연료와 공기의 혼합이 촉진되는데 기인하는 것으로 판단된다. 분사압력 7 bar에서 최고압력이 다소 감소하는 것은 이 경우 발생하는 노킹을 방지하고자 점화시기를 약간 진각시키는데 기인한다. 즉, 프리피스톤 기관은 고정

된 상사점없이 연소 시의 연소압력에 의해 피스톤이 팽창하게 되므로 점화시기를 진각시키는데 따른 연소실 체적의 증가에 의한 것으로 볼 수 있다.<sup>5)</sup>

그리고 역화발생 검출장치 내의 압력선도는 연소에 의해 약간 상승하지만 전술한 역화발생 시의 압력선도와 상이한 것을 나타낸다. 이와 같은 양상은 분사압력이 변화하여도 동일하므로 분사압력 증가에 의한 연소향상은 역화발생에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 수소연료의 분사압력 변화에 대한 질량연소율을 나타낸 것이다.

질량연소율의 경과곡선은 분사압력의 변화에 대해 유사한 경향을 보이지만 100% 질량연소율이 나타나는 시점은 분사압력이 증가할수록 전반적으로 빨라지는 양상이다. 수소연료의 분사압력 증가에 따른 연소기간의 감소가 질량연소율의 어느 부분의 감소에 기인하는지를 파악하기 위하여 연소기간을 초기연소, 주연소, 후연소기간으로 구분하여 나타낸 것이 Fig. 7이다. 여기서, 질량연소율의 0~10%는 초기연소기간, 10~90%는 주연소기간 및 90~100%를 후연소기간으로 정의한다.

분사압력이 증가할수록 초기연소기간은 회박혼합기를 사용하는데 따라 전반적으로 긴 것을 나타내지만 분사압력이 증가할수록 감소하는 것을

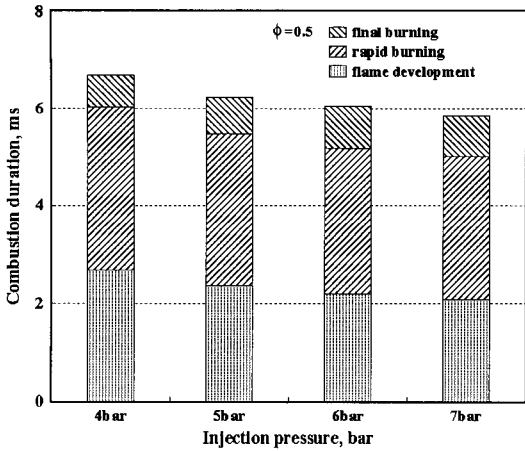


Fig. 7 Combustion duration versus injection pressure at  $\phi = 0.5$

나타낸다. 주연소기간은 감소하지만 후연소기간은 분사압력의 증가에 따라 약간 증가하는 경향이다. 따라서 수소연료의 분사압력 증가에 따라 전 연소기간의 감소는 초기연소기간 및 주연소기간의 감소에 기인하는 것을 알 수 있다.

분사압력 4 bar에서 7 bar로 증가시키는 경우 전 연소기간의 감소는 약 12%정도이며, 이 경우 초기연소기간은 29.3%, 주연소기간은 14% 정도 각각 감소하는 것이 보였다. 상기와 같은 연소기간의 감소는 분사압력 증가에 따른 수소연료와 공기의 혼합을 향상에 기인하는 것으로 판단된다.

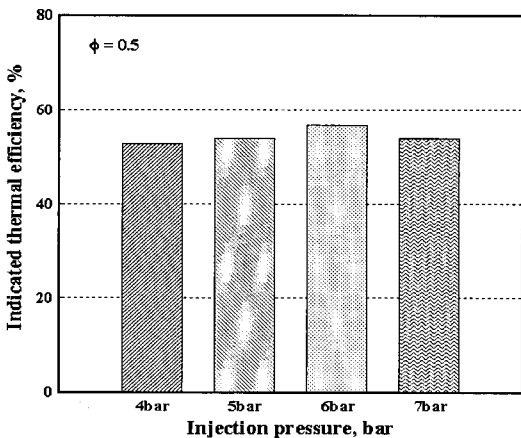


Fig. 8 Indicated thermal efficiency versus injection pressure at  $\phi = 0.5$

Fig. 8은 수소연료의 분사압력 변화에 대한 도시열효율을 나타낸 것이다.

그림에서 보듯이 도시열효율은 수소연료의 분사압력 증가에 대하여 분사압력 6 bar까지 증가하는 것을 나타낸다. 그리고 전술한 바와 같이 분사압력 7 bar정도에서 발생하는 노킹 억제를 위한 점화시기 진각에 의해 도시열효율은 감소하게 된다.

프리피스톤 기관의 도시열효율은 약 50%이상의 고열효율을 나타내며, 분사압력을 4 bar에서 6 bar로 증가시키는 경우 향상되는 열효율은 약 7.5% 정도인 것이 보여 졌다.

### 3.2 연료-공기 당량비에 대한 연소특성

Fig. 9 수소-공기 당량비 변화에 연소실 내 압력선도를 나타낸 것이다. 여기서 연료분사압력은 4 bar이다.

그림에서 보는 바와 같이 수소-공기 당량비를 농후하게 함에 따른 공급열량의 증가로 연소압력은 높아지고 연소기간은 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 수소-공기 당량비  $\phi = 0.8$  부근에서 노크 파형이 나타나며 혼합기가 농후해질수록 강한 압력진동을 갖는 노크 파형이 보인다. 이는 프리피스톤 기관의 특징인 상사점 부근에서 빠른 피스톤 속도<sup>6)</sup>로 인해 압력상승이 급격해지고 단

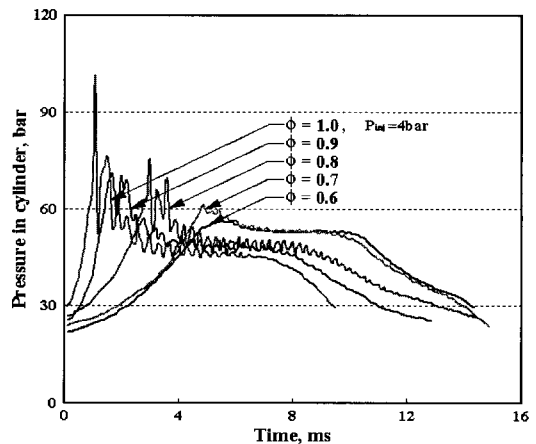


Fig. 9 In-cylinder pressure versus fuel-air equivalence ratio  $P_{inj} = 4$  bar when knock occurs

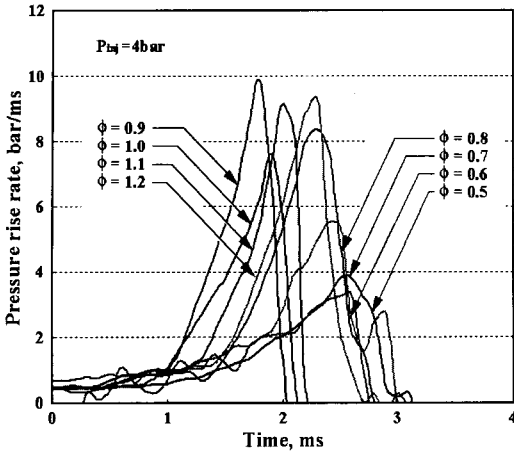


Fig. 10 Pressure rise rate versus fuel-air equivalence ratio at  $P_{mj} = 4\text{ bar}$

열화염온도가 높는데 따른 연소가스의 음속이 증가하기 때문에 판단된다.

Fig. 10은 프리피스톤 수소기관의 노크 억제를 위해 점화시기를 변화시킨 경우 수소-공기 당량비 변화에 대한 연소실 내 압력상승률을 나타낸 것이다. 점화시기는 당량비 변화에 대해 1~3 ms 진각시켰다.

그림에서 나타낸 바와 같이 수소-공기 당량비가 증가할수록 압력상승률이 증가하는 경향을 나타낸다. 수소-공기 당량비가  $\phi = 0.8$  이상인 경우의 압력상승률은 당량비  $\phi = 0.6$ 이하보다 약 2배 정도 큰 값을 가진다. 또한 이 경우 압력상승률의 구배가 급격한 것을 보인다. 이는 프리피스톤 기관의 연소안정화를 위해 점화시기가 수소-공기 당량비의 변화에 따라 적절히 제어되어야 한다는 것으로 의미한다.

Fig. 11은 수소-공기 당량비 변화에 대한 도시열효율을 나타낸 것이다.

도시열효율은 전반적으로 수소-공기 혼합기가 농후해질수록 증가하다가 당량비  $\phi = 0.8$  이후에 감소하는 경향을 보인다. 이는 노킹을 회피하기 위하여 점화시기를 진각시킨데 기인하는 것으로 수소-공기 당량비의 변화에 따라 점화시기를 보다 정확하게 제어한다면 도시열효율의 향상을 꾀할 수 있을 것으로 판단된다.

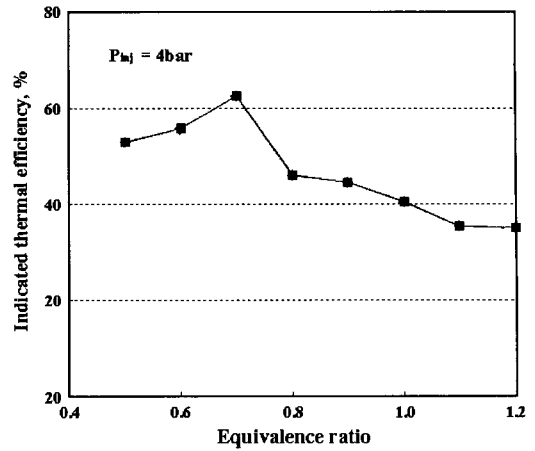


Fig. 11 Indicated thermal efficiency versus fuel-air equivalence ratio at  $P_{mj} = 4\text{ bar}$

일례로 당량비  $\phi = 0.7$ 에서 도시열효율은 약 62.3%의 고열효율을 나타냄을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

프리피스톤 수소기관의 연소안정화 및 성능향상을 연료분사압력 및 연료-공기 당량비에 대한 기초연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연소실 내 최고압력은 분사압 6 bar에서 나타나며 분사압력 증가에 의한 연소향상은 역화 발생에 영향을 미치지 않았다.
- 2) 연소기간은 분사압 7 bar에서 가장 짧으며 분사압 4 bar에서보다 약 12%감소하였다.
- 3) 도시열효율은 분사압 6 bar에서 가장 큰 값을 보이며 모두 분사압 조건에서 50%이상의 고열효율 값을 보였다.
- 4) 당량비  $\phi = 0.8$  이상인 경우 노크가 발생되며 당량비가 증가할수록 심한 노크를 나타낸다.
- 5) 당량비 변화에 대해 도시열효율이 당량비  $\phi = 0.7$ 에서 최대인 약 62.3%정도이며 당량비에 따른 점화시기 제어로 열효율 향상을 꾀할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 1) Norman H. Beachley and Frank J. Fronczak, "Design of a Free-Piston Engine-Pump", SAE paper 921740, 1992.
- 2) Peter A. J. Achten, "A Review of Free Piston Engine Concepts", SAE paper 941776, 1994.
- 3) P. V. Blarigan, N. Pradiso and S. Goldborough, "Homogeneous Charge Compression Ignition with Free Piston: A New Approach to Ideal Otto Cycle Performance", SAE paper 980204, 1998.
- 4) K. C. Noh, K. M. Kim, S. W. Park and J. T. Lee, "An Investigation on Backfire Phenomenon of Free-Piston Hydrogen-Fueled Engine", Proceedings of the KHNES Annual Autumn Meeting 2005, Vol. 1, 2005, pp. 161~166.
- 5) Y. Y. Kim, T. H. Ryu, and J. T. Lee, "Backfire Occurrence by Abnormal Electric Discharge in Hydrogen Fueled Engine", Trans of the KHES, Vol. 13, No. 1, 2002, pp. 65~73.
- 6) K. M. Kim, J. H. Lee, and J. T. Lee, "A Basic Study on the Combustion Characteristics of Linear Hydrogen Power System", Proceedings of the KHNES Annual Spring Meeting 2005, Vol. 1, 2005, pp. 88~94.