

프리피스톤 수소기관의 역화 및 이상연소에 관한 연구

김강문*, 박상욱[†], 이재홍*, 노기철**, 이종태**, 이웅균***

*성균관대학교 대학원, **성균관대학교 기계공학부, ***코리아엔진텍

A Study on the Backfire and Abnormal Combustion in the Free-piston Hydrogen Fueled Engine

K.M. Kim*, S.W. Park[†], J.H. Lee*, K.C. Noh**, J.T. Lee**, Y.K. Lee***

**Grad. School of Sungkyunkwan Univ.*

***Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.*

300 Chunchundong Jananku, Suwon, Gyeonggido, 440-746, Korea

****Korea Engine Tech, 200 Dangiungdong, Gunposi, Gyeonggido, 435-712, Korea*

ABSTRACT

The free-piston hydrogen fueled engine is estimated as the next generation power system which can obtain high efficiency and low emission, simultaneously. In order to develop the free-piston hydrogen fueled engine, it is necessary to stable the combustion. The engine combustion, backfire and knock phenomenons were studied by using RICEM for researching combustion characteristics of free-piston engine. As the results, backfire occurrence was not observed in the free-piston engine under limited experimental condition. And knocking occurred in case of higher cylinder wall temperature.

주요기술용어 : Free-piston hydrogen fueled engine(프리피스톤 수소기관), Research RICEM(연소연구용 급속흡입압축팽창기), Backfire(역화), Abnormal combustion(이상연소), Piston crevice volume(피스톤 틈새체적)

1. 서 론

프리피스톤 수소기관은 비열비가 크고 탄소성분이 없는 수소연료를 사용하므로 고효율뿐만 아니라 무공해 수준의 배기성능을 달성시킬 수 있는 신동력 시스템의 하나로 평가되고 있다^{1,2)}.

수소연료를 내연기관에 사용하는 경우 탄화수

소계 연료와 다른 독특한 특성으로 인해 기관의 성능향상에 유리한 점도 있으나, 역화나 노킹, 연소불안정의 원인이 되기도 한다. 그리고 프리피스톤 기관은 기존의 크랭크식기관과 달리 플라이휠과 같이 사이클 중의 일을 균일하게 하는 장치를 장착하기 어려운 구조로 되어 있다. 따라서 두 연소실이 교대로 작동되는 대향식 프리피스톤기관에서 역화 및 이상연소가 발생하게 되면 기관 정지하거나 프리피스톤이 실린더 헤드와 충돌하는

[†]Corresponding author : swpark@katech.re.kr

상황을 초래할 수 있다.

역화는 수소기관의 실용화에 가장 큰 걸림돌로서 연소실내 생성된 모종의 착화원에 의해 흡입과정중의 혼합기가 착화되어 흡기밸브를 통해 그 화염이 역류하는 현상이다³⁾. 착화원에 대한 발생원인은 아직 불명확하나 저자들은 크랭크식 왕복구동기관에서 연소실내의 피스톤 crevice volume에 존재하는 수소-공기 혼합기가 느린 연소를 하여 배기과정 말이나 흡입과정 중에 연소실내로 역류하게 되어 역화발생에 영향을 줄 수 있는 가능성을 확인한 바 있다⁴⁵⁾. 반면, 프리피스톤 수소기관은 피스톤이 직선적인 왕복운동만 하므로 기존의 크랭크식기관과 달리 발화운전시 피스톤 slap이 미미하다. 이로 인해 피스톤 crevice volume내 혼합기가 연소실내로 역류되는 가능성이 줄어들어 역화발생이 억제될 것으로 생각된다.

프리피스톤기관의 압축비는 연소상태에 따라 임의로 변화되므로 노크와 같은 이상연소가 발생될 가능성이 있다. 프리피스톤 수소기관의 역화 및 이상연소현상의 해석은 프리피스톤 수소기관 개발에 중요한 기술이 되나 이에 대한 것은 아직 명확하지 않다⁶⁾.

본 연구에서는 프리피스톤 수소기관의 역화 및 이상연소현상을 파악하기 위한 연구로서 프리피스톤 연소연구용 RICEM을 사용하여 분사압력, 혼합비, 연소실 주위온도변화 등에 대해 역화발생 여부 및 노킹현상을 해석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 실험장치의 구성을 Fig. 1에 나타낸다. 실험장치는 프리피스톤 연소연구용 RICEM, 피스톤 구동을 위한 유압구동부, 수소연료 공급부, 데이터 취득부와 제어부로 구성된다.

2.1.1 프리피스톤 연소연구용 RICEM

연소연구용 RICEM은 수소연소가 일어나는

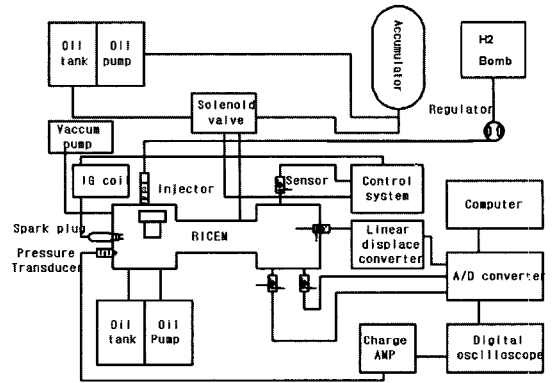


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus with the linear RICEM

연소실부, 프리피스톤을 구동하고 동력을 흡수하는 피스톤 구동 및 동력흡수부, 프리피스톤의 변위를 측정하고, 트리거 신호를 주는 변위센서부, 반대편의 압축일을 모사하는 압축실린더부로 구성된다.

연소연구용 RICEM의 행정체적은 683 cc, 압축비는 $\epsilon = 13$, Bore \times Stroke는 80 mm \times 125.4 mm인 dual type이다. 수소연료는 수소분배에서 감압기로 감압된 후, 인젝터를 통해 연소실로 직접 분사된다. 프리피스톤은 140 bar의 유압에 의해 압축되고, 강제착화되어 연소하고 팽창하여 한 사이클을 마친다.

2.1.2 역화발생 검출장치

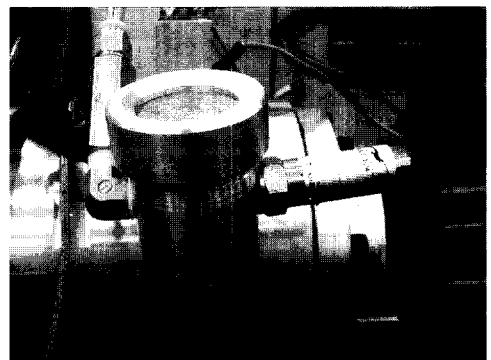


Fig. 2 Backfire detection chamber

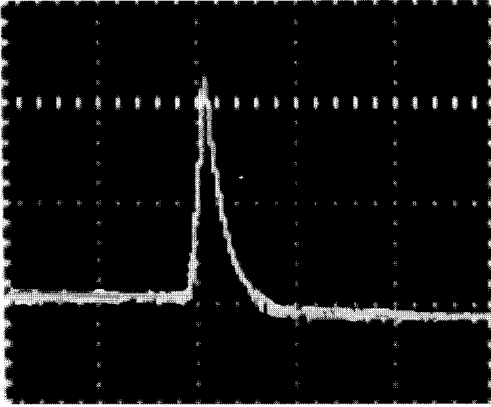


Fig. 3 Pressure curve in backfire detection chamber by spark plug

Fig. 2는 프리피스톤 수소기관에서 역화 발생을 파악하기 위한 검출장치를 나타낸 것이다. 검출장치는 체적이 39 cc로써, 흡입포트가 열리는 시점인 하사점 전 4 mm에 위치하며, 직경 6 mm의 연결 통로로 실린더와 연결되어 있다. 검출장치의 상단부에는 파열압력 3 bar인 파열막을 설치하여 역화발생시의 안전을 고려하였다. 그리고 검출장치에는 연소실과 동일한 당량비의 수소-공기 예혼합기를 공급하였다.

Fig. 3은 역화발생 검출장치에 이론적인 수소-

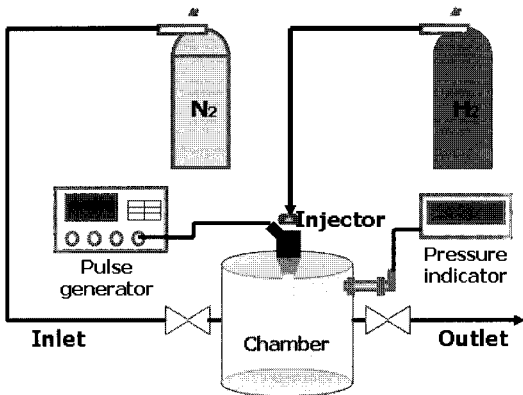


Fig. 4 Schematic of experimental apparatus for hydrogen injection rate measurement

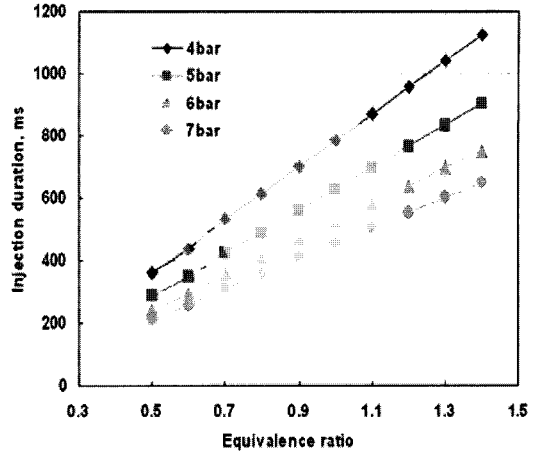


Fig. 5 Injection duration curves as a function of injection pressure and required equivalence ratio

공기 혼합기를 공급한 후, 점화플러그에 의해 강제착화 된 경우의 압력파형이다. 최고압력은 파열 압력인 3 bar를 나타내며, 역화 발생시에 이와 같은 파형이 나타나게 될 경우 역화발생으로 간주할 수 있다.

2.1.3 수소분사량 측정장치

단발연소를 하는 연소연구용 RICEM에서 매 사이클 마다의 연료 분사량은 동일하여야 한다. 또한, 분사압을 고정하고, 요구되는 당량비를 설정하기 위해서는 분사시간에 대한 분사량을 파악하여야 한다. 이를 확인하기 위해서 수소분사량 측정장치를 Fig. 4에 나타낸다. 분사압은 4~7 bar로 1 bar씩 실험하였으며, 인젝터의 분사시간은 펄스제너레이터를 사용하여 제어하였다. Fig. 5는 분사압력과 원하는 당량비에서 분사시간을 나타낸 선도이다. 실험에 요구되는 당량비를 얻기 위해 분사압력과 분사시간을 설정 하였다.

2.2 실험방법

실험은 수소분사압력, 당량비, 피스톤 crevice volume의 유무 및 연소실 주위 온도에 대해 역화 발생 및 노크발생 등을 파악하는 것이다.

실험마다 공급되는 혼합비의 변동을 줄이기 위

해 실린더내 직접분사하였으며, 분사압력은 4~7 bar로 변화시켰다. 당량비는 실제 기관에서 역화가 관찰되는 당량비 $\phi = 0.8$ 에서부터 더 농후한 영역인 $\phi = 1.2$ 까지 변화시켰다. 피스톤 crevice volume의 유무에 대한 역화발생을 파악하기 위해 피스톤 탭랜드부에 오링을 삽입한 경우와 기존의 압축링이 삽입된 경우를 비교하였다. 연소실 주위 온도는 80 °C부터 실제 기관의 실린더 헤드 평균 온도인 140 °C까지 20 °C씩 증가시키며 이상연소 현상을 파악하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 6은 수소 연료의 분사압력 변화로 인해 실린더내의 수소-공기 혼합 상태가 달라져 연소상태가 변화될 수 있음을 보인 일례이다. 그림에 나타난 바와 같이 실린더내의 연소압력으로부터 구한 연소초기의 압력상승율은 분사압력이 증가할수록 전반적으로 증가하는 것을 나타낸다. 이것은 분사압력 증가에 따른 수소연료의 운동에너지의 증가로 연료와 공기의 혼합율이 향상되어 연소가 촉진되는데 기인하는 것이라 생각된다. 분사압력을 4 bar에서 7 bar로 증가시킨 경우 연소초기의 압력상승율은 최대 약 20 %정도 증가하는 것을

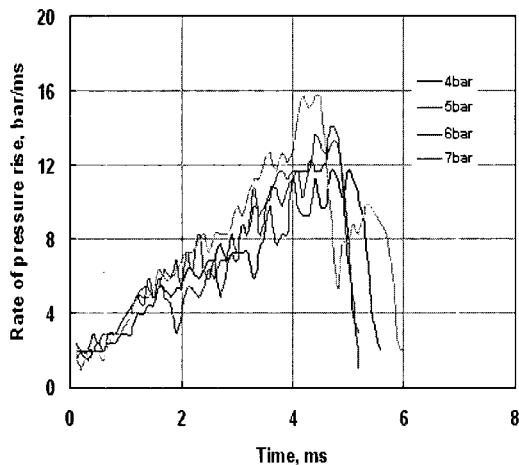


Fig. 6 Rate of pressure rise according to injection pressure

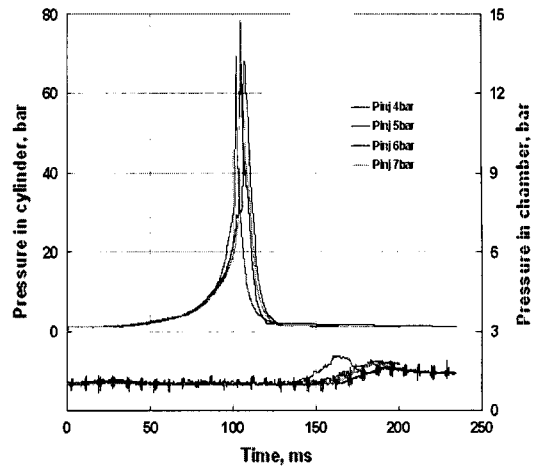


Fig. 7 Pressure curves in cylinder and pressure chamber at various injection pressures

보이며 이는 역화발생에도 관여할 것으로 생각된다.

따라서 수소-공기 혼합 상태를 좌우하는 수소 연료의 분사압력 변화에 대해 역화발생 여부를 나타낸 것이 Fig. 7이다. 당량비는 $\phi = 1.0$ 이며, 분사압력은 4~7 bar로 변화하였다. 그림에서 보는 바와 같이 분사압력에 따라 연소실내 압력은 다소 차이가 있으나 역화발생 검출장치내 압력진동은 분사압력에 상관없이 3 bar에 못 미치며, 이때

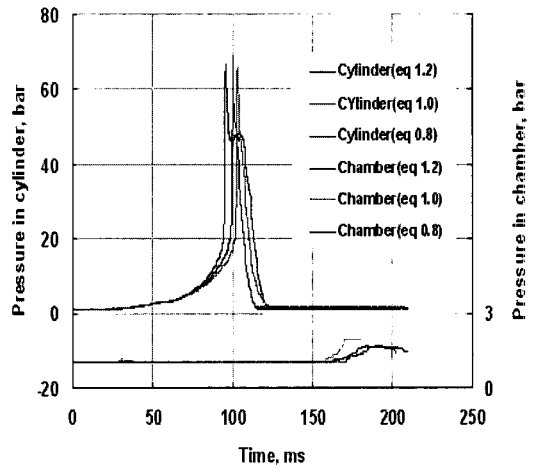


Fig. 8 Pressure curves in cylinder and pressure chamber at various equivalence ratios

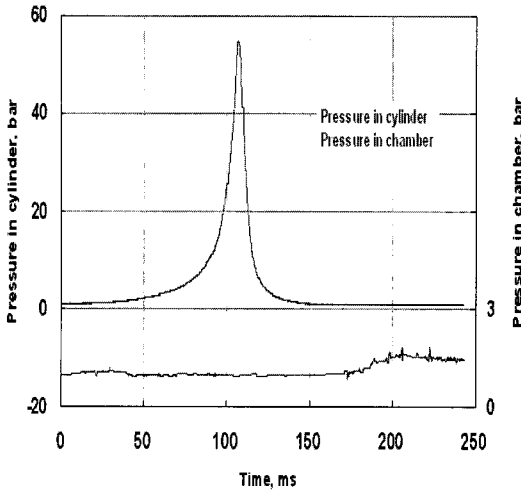


Fig. 9 Pressure curves in cylinder and pressure chamber with O-ring

의 압력상승은 팽창말기에 흡기포트가 열리는 시점에서 팽창가스의 유입에 의해 상승하는 것으로 보인다.

당량비 변화는 역화발생 여부를 파악하는데 있어 중요한 인자로, 당량비 변화에 대한 역화발생 여부를 Fig. 8에 나타낸다. 그림은 분사압력 5 bar일 때, 당량비 $\phi = 0.8, 1.0, 1.2$ 로 변화시킨 경우이다. 실린더내 압력파형은 당량비의 변화에 대해 약간의 차이를 보인다. 역화발생 검출장치내 압력파형은 다소 차이가 있으나 역화발생시 압력인 3 bar에는 미치지 못하며, 팽창가스의 유입에 의한 압력상승으로 생각된다.

피스톤 crevice volume의 영향이 역화발생에 어떻게 관여하는지 파악하기 위해 피스톤의 crevice volume을 최소화한 바이톤 오링을 삽입한 경우와 통상의 피스톤 crevice volume을 유지한 압축링을 삽입한 경우를 검토하였다.

Fig. 9는 피스톤의 crevice volume을 최소화한 경우의 실린더내 압력과 역화발생 검출장치내 압력을 나타낸 것이다. 이때 피스톤 crevice volume에 잔류하는 혼합기는 탭랜드와 실린더벽 사이에 존재하며 그 양은 아주 미소한 것으로 생각된다. 역화발생 검출장치내 압력파형은 역화발생시의

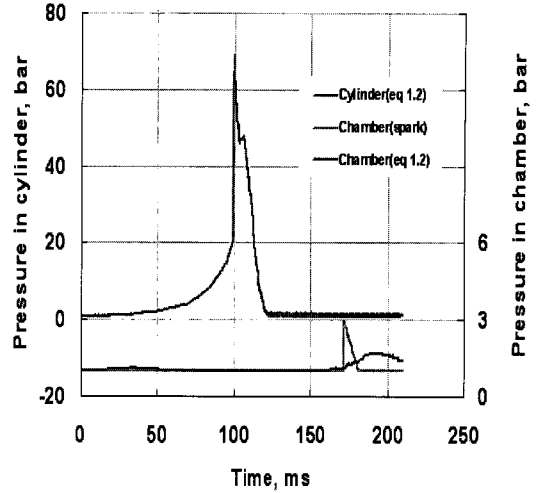


Fig. 10 Pressure curves in cylinder and pressure chamber with compression ring

파형과는 다름을 알 수 있다. 이것은 역화가 관찰되지 않은 것으로 생각된다.

Fig. 10은 피스톤 crevice volume이 존재하는 경우를 나타낸 것이다. 이 경우 피스톤 crevice volume은 탭랜드와 제 1 및 제 2 피스톤링사이의 랜드부 그리고 제 1 및 제 2 피스톤링 그루부에 해당한다. 그림에서 나타난 바와 같이 검출장치내 압력파형은 전술한 바이톤 오링을 사용하여 피스톤 crevice volume을 최소화하였을 때와 유사한 파형을 보이고 있다. 피스톤 crevice volume이 존재할 경우에도 역화가 관찰되지 않았다.

Fig. 11은 연소실내 주위 온도 변화 시 역화발생 검출장치내 압력파형을 나타낸 것이다. 이때의 분사압력은 5 bar이며, 당량비는 이론공기연료비인 $\phi = 1.0$ 이다. 검출장치내 압력파형은 온도변화에 대해 유사하며, 역화발생시의 파열압력인 3 bar에 이르지 못하고 있다. 온도가 높을수록 압력인 낮아지는 경향은 연소실내 온도 증가로 인한 체적효율의 감소로 배기말단의 연소가스 압력이 낮아 그림과 같은 경향을 보이는 것으로 생각된다. 연소실 주위온도 변화에 대해서도 역화발생은 관찰되지 않았다.

전술한 바와 같이 수소기관의 역화발생은 느린

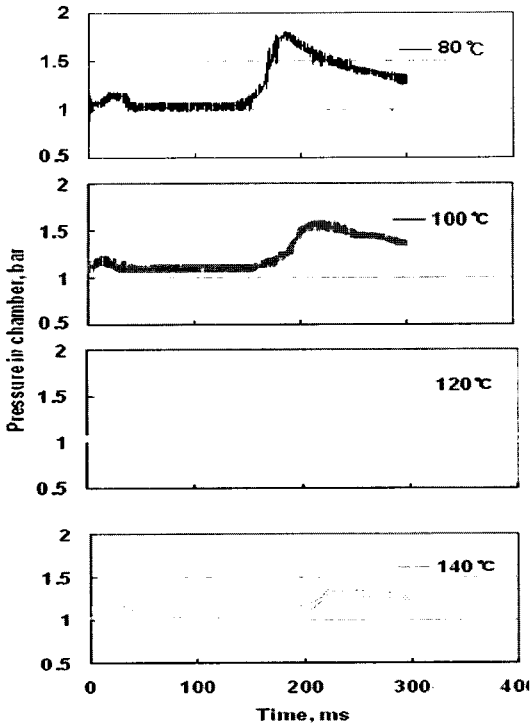


Fig. 11 Pressure curves in backfire detection chamber according to temperature variation

연소를 하는 피스톤 crevice volume내의 혼합기가 피스톤 slap에 의해 연소실내로 역류하는데 기

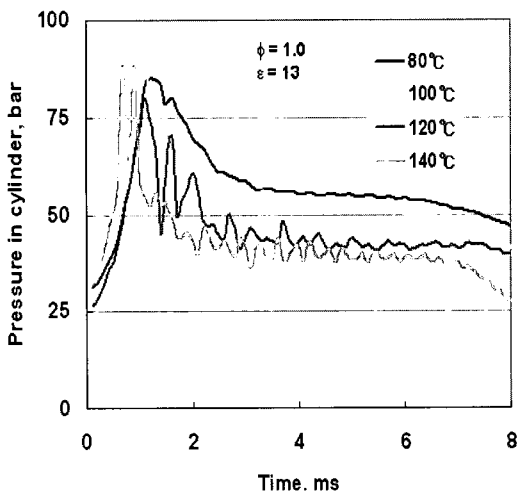


Fig. 12 Pressure curves in cylinder according to temperature variation

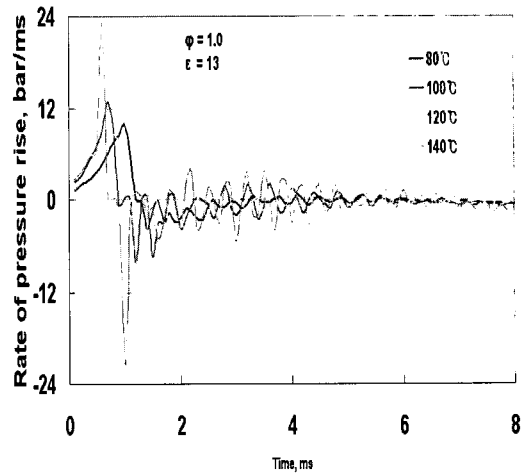


Fig. 13 Rate of pressure rise in cylinder according to temperature variation

인할 수 있다. 그러나 프리피스톤 수소기관은 직선왕복운동만을 하게 되어 피스톤 crevice volume내의 혼합기가 실린더내로 역류되는 가능성이 적으므로 상기와 같이 역화가 발생되지 않는 것으로 생각된다.

Fig. 12는 당량비 $\phi = 1.0$ 에서 연소실 주위 온도 변화에 대한 노킹 발생을 점화가 이루어진 때부터 압력진동이 줄어드는 시점까지 나타낸 것이다. 연소실 벽표면 온도가 80 °C인 경우에는 압력진동이 관찰되지 않으나, 100 °C부터는 다소 나타나는 것을 알 수 있다. 실제기관에서 실린더 헤드의 평균온도인 140 °C에서는 heavy한 노크 파형을 관찰할 수 있다.

Fig. 13은 Fig. 11과 같은 경우의 압력상승율을 나타낸 것이다. 노킹이 발생할 경우 정상연소의 압력변화량보다 빠른 속도로 변화하므로 시간에 대한 압력변화량을 구하면 그 값이 커짐을 알 수 있다. 이와 같이, 온도가 상승함에 따라 압력진동이 극심해 지는 것은 가스의 미소한 압력변동인 음파의 전달속도 $\omega = \sqrt{kRT}$ (k : 비열비, R = 기체상수, T = 기체의 온도)에 의해 수소의 온도가 상승하여 연소 시 음속이 증가되기 때문인 것으로 판단된다⁷⁾.

4. 결 론

프리피스톤 수소기관 개발을 위해 역화 및 이상연소에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 역화는 본 연구의 실험조건에서 관찰되지 않았다. 이것은 크랭크식 왕복기관과 달리 피스톤 slap이 없어 피스톤 crevice volume내 혼합기가 팽창 말기에 연소실로 역류되는 현상이 감소하는데 기인하는 것으로 생각된다. 그러나 본 실험에 사용된 유압방식의 동력흡수에 따른 팽창기간의 증가로 흡기포트가 열리기전에 피스톤 crevice volume내 혼합기의 연소가 완료될 가능성이 있으므로 추후 결과에 대한 상세한 확인이 요구된다.
- 2) 노킹의 경우 온도가 상승할수록 압력진동이 심해지는 것을 알 수 있으며, 이것은 수소 연료의 음속 증가로 heavy한 압력진동이 발생하는 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구개발사업(수소에너지사업단)의 일환으로 수행되었습니다.

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) K. Koyanagi, M. Hiruma and S. Furuham, "Study on Mechanism of Backfire in Hydrogen Engine", SAE 942035, 1994.
- 4) C.W. Lee, T.S. Oh, Y.Y. Kim, J.T. Lee, "Effect of Crevice Volume on the Backfire Occurrence in Hydrogen Engine", Proceedings of KSME 1996 autumn, 1996, pp. 646-651.
- 5) J. T. Lee, Y. Y. Kim, C. W. Lee, "An Investigation of a Cause of Backfire and its Control Due to Crevice Volumes in a Hydrogen Fueled Engine", ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines, Vol. 123, 2001.1, pp. 1-7.
- 6) Y.Y. Kim, H.S. Lim, J.T. Lee, "A Basic Study on the Development of Free-Piston Hydrogen Fueled Engine", Proceedings of KHNES 2002 autumn, 2002, pp. 174-182.
- 7) Y.T. Kim, J.T. Lee, "The Characteristics of Performance in the Medium Duty Hydrogen-CNG Fueled Engine with Compression Ratios and Rate of Hydrogen Additions", Proceedings of KHNES 2005 spring, 2005, pp. 326~335.