

프리-피스톤 수소기관의 동적 운전특성에 관한 기초연구

김윤영, 이종태

성균관대학교 대학원 기계공학과
성균관대학교 기계공학부*

A Basic Study on the Dynamic Characteristics of Free-Piston Hydrogen Fueled Engine

Y. Y. Kim, Jong T. Lee

Graduate School of Sungkyunkwan Univ.
School of Mechanical Engineering of Sungkyunkwan Univ.*

ABSTRACT

To clarify the cause of backfire occurrence and realize a hydrogen fueled engine linear alternator system, dynamic characteristics of a free-piston hydrogen engine were analyzed and compared with those of conventional reciprocating engines. It was found that the mean velocity and acceleration of a free-piston engine were higher than those of reciprocating engines. Piston displacement and compression ratio were varied with the change of the fuel mass flow rate. Therefore, the operational stability and controllability were the most important thinks of the development of a free-piston hydrogen engine.

주요기술용어 : Free-piston engine(프리피스톤 엔진), Hydrogen engine(수소엔진), Dynamic characteristics(동적특성), Linear alternator(리니어 발전기), Mean piston velocity(평균 피스톤속도)

1. 서론

수소기관의 역화발생 원인으로 crevice에 주목하여 여러 방지책을 검토하였지만 근본적인 역화 억제에는 이르지 못하였다¹⁻³⁾. 이것은 왕복구동식 기관의 피스톤 crevice가 운전중 크랭크 기구에

의해 변화되어 crevice내의 혼합기가 역류하는 것을 완전히 억제하지 못했기 때문으로 생각된다. 만일 피스톤이 직선운동을 하여 crevice의 변화에 의한 영향을 배제시킬 수 있는 프리-피스톤 수소 기관하에서 역화현상을 해석한다면 보다 명확한 원인규명과 방지책을 강구할 수 있을 것이다.

프리-피스톤 수소기관은 고효율, 저배기, 고비출력뿐만 아니라 저코스트화가 가능하므로 고성능 리니어 발전기와 결합시킬 경우 연료전지에 필적하는 차세대 발전시스템의 실현이 가능한 기관으로 주목되고 있다. 현재 연료전지는 고비용 및 시스템 신뢰성의 미확보로 실용화가 어려운 실정이므로 프리-피스톤 수소기관이 개발된다면 하이브리드 자동차 및 발전기이용 동력원으로 적극 활용될 것으로 전망된다⁴⁻⁵⁾.

그러나, 프리-피스톤 기관의 기본구조와 운전특성이 왕복구동식과 현저히 상이하므로 프리-피스톤 수소기관을 실현하기 위해서는 주요 설계인자 및 기본 운전특성에 대한 해석이 선행되어야 한다⁶⁻⁷⁾.

본 연구에서는 역화발생 원인 규명 및 프리-피스톤 수소기관 발전시스템의 개발을 위한 기초연구단계로서 프리-피스톤 기관의 동적 거동특성을 왕복구동식과 비교하고 주요 운전 특성을 해석하였다.

2. 프리-피스톤 기관의 기본구조 및 특징

2.1 프리-피스톤 기관의 기본구조

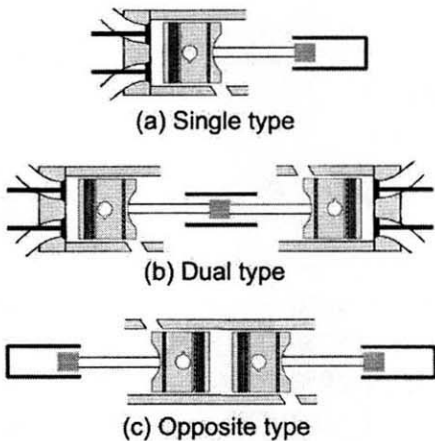


Fig. 1. Free-piston engine types

프리-피스톤 기관은 Fig. 1과 같이 피스톤의 개수와 배열에 따라 크게 single 피스톤, dual 피스톤, opposite 피스톤 방식의 3가지로 분류된다. 이중에서 dual 피스톤 방식은 시동 후 별도의 부가장치 없이 자력 운전이 가능하여 역화발생 확률이 용이하고 발전시스템으로의 활용도가 가장 높은 것으로 평가되고 있다. 따라서 본 연구에서는 dual 피스톤 형식의 프리-피스톤 수소기관에 대해 검토하였다.

Fig. 2는 프리-피스톤 기관의 구조를 설명하기 위해 프리-피스톤 기관과 왕복구동식 기관의 기본 구조를 개략적으로 나타낸 것이다.

왕복구동식 기관은 고온고압의 연소가스에 의해 직선운동을 하는 피스톤운동을 커넥팅 로드 및 크랭크 축으로 회전운동으로 변환시킨다. 반면에 프리-피스톤 기관은 크랭크 기구없이 양쪽 피스톤이 서로 연결되어 실린더내 압력차이와 피스톤 관성력에 의해 직선적인 왕복운동을 발생시킨다. 따라서 왕복구동식 기관은 회전관성력을 이용하여 2행정 또는 4행정 사이클을 적용할 수 있지만 프리-피스톤 기관은 구조상 2행정 사이클의 적용이 적합하다. 단 multi 실린더를 사용하여 4행정 사이클의 실현을 가능하게 한 연구가 보고

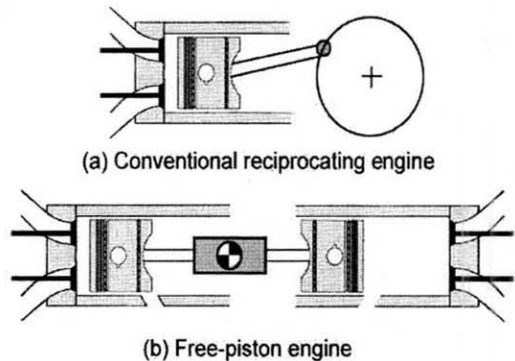


Fig. 2. Basic structures of reciprocating and free-piston engine

된 바 있다.

2.2 주요 작동 특징

프리-피스톤 기관은 크랭크 기구가 없어서 기계적 손실이 왕복구동식에 비해 작고 피스톤의 행정길이가 임의대로 변화되는 특징이 있다. 행정길이가 일정하지 않는 것은 실린더내 압력에너지를 최대한 팽창일로 전환시킬 수 있으며 피스톤 관성력에 의한 압축증대 효과를 얻을 수 있다. 또한 행정거리의 변화는 운전조건에 따라 압축비를 가변시킬 수 있다. 프리-피스톤 기관은 구조가 간단하고 소형이므로 고비출력의 실현이 가능하며 가솔린 또는 디젤 이외의 수소, 천연가스, 바이오 연료 등과 같은 청정대체연료를 사용할 수 있는 장점도 가지고 있다. 이와같이 프리-피스톤 기관은 기관 구조상 우수한 특성을 가지고 있어 내연 기관 개발초기단계부터 유압발생장치 및 가스터빈 등에 활용된 바 있다⁸⁾. 최근에는 프리-피스톤 수소기관으로 고성능 리니어 발전기의 이동자를 구동하여 전기적 에너지를 생산하는 발전시스템에 대한 기술개발이 착수되고 있다⁹⁾. 프리-피스톤 발전시스템은 연료전지 수준의 고효율, 저배기의 달성이 가능하고 소형경량의 유닛트화에 의한 고비출력 및 현용의 시스템 수준의 저비용을 실현할 수 있는 잠재적인 특징을 가지고 있다.

프리-피스톤 기관의 단점은 기관운전의 안정성과 제어성 확보가 쉽지 않다는 점을 들 수 있다.

왕복구동식 기관은 회전관성을 흡수하는 플라이휠에 의해 사이클 변동을 감소시킬 수 있지만, 프리-피스톤 기관은 각 사이클 마다 마찰력, 발생열량 및 부하율이 일정하지 않을 경우 불안정한 운전이 야기된다. 또한 프리-피스톤 기관에서 피스톤은 아무런 구속장치 없이 자유롭게 움직이므로 실린더내 누설과 밸브 오작동시 피스톤과 실린더헤드가 충돌하는 극단적인 파손이 발생할 수 있다. 따라서, 프리-피스톤 수소기관을 개발하기 위해서는 기관 운전의 안정성 확보 방안과 기관운전 제어기술 확립이 가장 중요할 것으로 생각된다.

3. 프리-피스톤 기관의 동적 거동 해석

3.1 프리-피스톤기관의 운동지배방정식

프리-피스톤 기관은 좌측 및 우측 실린더내 압력차이에 따라 좌우 직선적인 운동을 하게 되므로 프리-피스톤의 운동 지배방정은 (1) 식으로 나타낼 수 있다. 좌측 실린더내 압력 p_L 과 우측 실린더내 압력 p_R 이 프리-피스톤의 면적 A_P 에 작용한 힘은 프리-피스톤의 구동력(ma), 마찰손실($F_{friction}$) 및 부하(F_{load})의 합과 일치한다. 여기서 m 과 a 는 프리-피스톤 부의 질량 및 가속도이다.

$$(p_L - p_R)A_P = ma + F_{friction} + F_{load} \quad (1)$$

만약 프리-피스톤 기관이 마찰손실이 없는 무부하 상태에서 열역학적 이상 사이클을 이룬다면 프리-피스톤의 가속도 a 는 (2) 식과 같이 피스톤 면적, 피스톤 질량, 압력비($v = p_3/p_2$), 압축비(ϵ) 및 피스톤 변위(S_L)의 함수로 표시된다.

가속도는 상사점에서 양의 최대치, 하사점에서 음의 최대치를 보이며 그 크기는 $p_L A_P (v \epsilon^k - 1) / m$ 이다. 또한 양측 실린더내 압력 p_L 과 p_R 이 동일한 곳에서 가속도는 0으로 나타나며 그 지점은 행정거리의 중간에 해당한다. 여기서 p_L 은 압축초기

Table 1. Specifications and parameter conditions of free-piston and reciprocating engine

Stroke(mm)	49.6(typical)
Bore(mm)	50.6
Connecting rod length/crank radius	4
Compression ratio	5(typical)
Piston mass	3kg(typical)
Initial temperature	300K
Initial pressure	1 atm

실린더내 압력, V_d 와 V_c 는 행정체적 틸새체적을 나타내며 k 는 폴리트로픽 지수에 해당한다.

$$a = \frac{A_p p_1}{m} \left[\gamma \epsilon^k \left(1 + \frac{A_p}{V_c} S_L\right)^{-k} - \left(1 - \frac{A_p}{V_d + V_c} S_L\right)^{-k} \right] \quad (2)$$

프리-피스톤의 속도는 $ads=vdv$ 의 관계로부터 (3) 식으로 유도된다. 여기서 C 는 적분상수이다.

$$v = \sqrt{\frac{2p_1(V_c + V_d)}{m(1-k)} \left[\gamma \epsilon^{k-1} \left(1 + \frac{A_p}{V_c} S_L\right)^{1-k} + \left(1 - \frac{A_p}{V_c + V_d} S_L\right)^{1-k} \right] - C} \quad (3)$$

프리-피스톤 속도의 최대치는 가속도가 0이 되는 지점에서 발생하며 그 크기는 (4) 식과 같다.

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2p_1(V_c + 1/2V_d)^{1-k}}{m(1-k)} * \sqrt{\frac{(V_c + V_d)^k(\gamma + 1)}{m(1-k)} - C}} \quad (4)$$

식에서 나타난 바와 같이 압축비가 일정할 경우 프리-피스톤의 최대 속도는 피스톤 질량 및 압력비에 의해 결정됨을 알 수 있다.

또한 프리-피스톤 기관의 피스톤 변위에 대한 시간 관계는 (5) 식으로 나타낸다.

$$t = \int_0^{S_L} \left\{ \sqrt{\frac{2p_1(V_c + V_d)}{m(1-k)} \left[\gamma \epsilon^{k-1} \left(1 + \frac{A_p}{V_c} S_L\right)^{1-k} + \left(1 - \frac{A_p}{V_c + V_d} S_L\right)^{1-k} \right] - C} \right\} ds_L \quad (5)$$

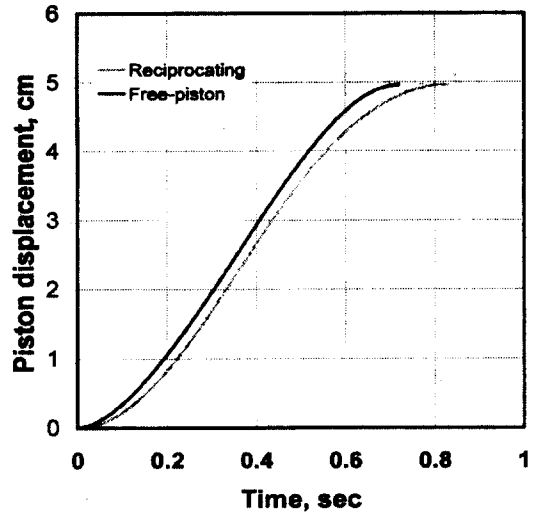


Fig. 3. Piston displacements of free-piston and reciprocating engine

3.2 프리-피스톤 기관의 동적 거동

왕복구동식 기관의 최대회전속도는 피스톤 최대속도에 의해 제한된다. 따라서 피스톤 최대속도가 동일한 조건에서 상기 식으로부터 프리-피스톤 및 왕복구동식 기관의 동적 거동 특성을 비교하였다. 사용된 주요 기관 제원 및 변수조건을 Table 1에 나타낸다.

Fig. 3은 프리-피스톤 및 왕복구동식 기관의 피스톤 변위를 시간 경과에 대해 나타낸 것이다. 여기서 피스톤 변위는 상사점에서부터 하사점로의 이동거리에 해당한다.

그림에서 보는 바와 같이 두 기관의 피스톤은 모두 상사점 부근에서 천천히 움직인 후 빠르게 움직이다가 다시 하사점 부근에서 천천히 움직이는 경향을 나타낸다. 그러나 동일 행정거리에 대해 프리-피스톤의 경우가 왕복구동식에 비해 보다 빨리 움직인다. 동일 시간에서 두 기관의 변위 차이는 상사점 부근에서 커진 후에 다소 일정하다가 하사점 부근에서 점점 크게 나타낸다.

이러한 프리-피스톤과 왕복구동식 피스톤의 거동 차이를 보다 분명히 알아보기 위하여 피스톤

변위에 대한 피스톤 속도를 조사하여 그 결과를 Fig. 4에 나타낸다. 두 기관의 피스톤 속도는 상사점 및 하사점 부근에서 급격히 증가 및 감소하는 경향을 보인다. 행정거리 초반의 프리-피스톤 속도는 왕복구동식에 비해 다소 큰 것을 나타낸다. 그러나, 행정거리 중반 이전에는 왕복구동식의 속도가 최대값을 보이면서 프리-피스톤의 경우가 오히려 왕복구동식보다 작은 것을 보이고 있다. 행정거리 중반이후 프리-피스톤의 속도는 중반이전의 속도증가 경향과 대칭으로 감소하는 반면에 왕복구동식의 피스톤 속도는 행정거리 중반 이전보다 다소 큰 경향으로 감소한다. 이로 인해 프리-피스톤 기관의 평균피스톤 속도는 7.94cm/sec으로 왕복구동식의 5.97cm/sec에 비해 33%정도 큰 것이 보여졌다. 동일한 피스톤 최대속도 조건하에서 두기관의 피스톤 변위에 대한 속도 차이가 발생하는 것은 왕복구동식의 피스톤이 일정 각속도로 회전하는 크랭크 기구에 의해 구속되지만 프리-피스톤의 경우 아무런 구속장치 없이 자유롭게 움직이는 것에 기인한다.

Fig. 5는 프리-피스톤 및 왕복구동식 기관의 피스톤 가속도를 피스톤 변위에 대해 나타낸 것이다. 두 기관의 피스톤 가속도는 상사점에서 최대치를 보인 후 피스톤 변위가 증가함에 따라 점차 감소하여 하사점에서 최소치를 나타낸다. 프리-피스톤의 가속도 변화 양상은 행정거리에 대해 좌우대칭으로 상사점 및 하사점 부근에서 크게 감소하고 행정거리 중반에 다소 작게 감소하는 경향을 보인다. 이에 반해 왕복구동식의 가속도 변화는 행정거리 중반 이전 부근에서 가장 크며, 상사점 및 하사점에서 다소 작은 것을 나타낸다. 또한 왕복구동식의 경우 상사점에서 발생하는 가속도의 최대치는 하사점에서의 음의 최소치보다 큰 것을 보인다.

프리-피스톤의 가속도 최대치는 57.1cm/sec로서 왕복구동식의 44.52cm/sec에 비해 약 28%정도 큰 것이 보여졌다. 이러한 프리-피스톤의 상대적으로 높은 피스톤 가속도는 기관 운전시 진동 및

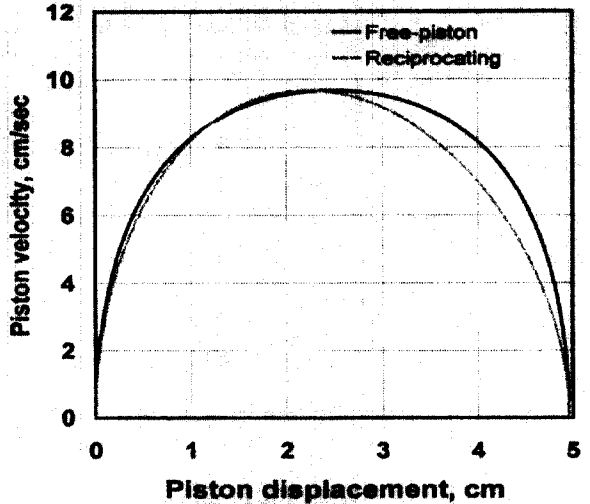


fig. 4. Piston velocities of free-piston and reciprocating engine

소음을 유발하거나 요소부품의 내구성 저하를 초래할 수 있다. 그러나 프리-피스톤은 왕복구동식과는 달리 단순한 직선 운동만을 하므로 그리 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

4. 프리-피스톤 수소기관의 운전특성

Fig. 6은 프리-피스톤 수소기관의 각 프리-피스톤 질량에 대한 피스톤 최대속도 및 운전주파수를 나타낸 것이다. 여기서 프리-피스톤 기관의 운전주파수는 1초당 압축행정 및 폭발행정을 수행한 사이클 수이다.

프리-피스톤의 최대속도 및 운전주파수는 피스톤 질량이 증가함에 따라 지수함수적으로 감소하며 질량 증가 율에 대한 최대속도와 운전주파수의 감소율이 거의 유사한 경향을 나타낸다. 프리-피스톤 기관에서 피스톤 속도와 운전 주파수의 감소는 결과적으로 기관 출력 및 출력밀도의 저감을 초래할 수 있다. 이것은 최대출력 및 비출력을 높이기 위해서 피스톤부의 질량을 가급적 감소시키는 것이 유리하다는 것을 의미한다. 그러나 피스톤 질량이 지나치게 작을 경우 피스톤 관성에 의한 압축비 증대 효과의 감소로 열효율이 낮

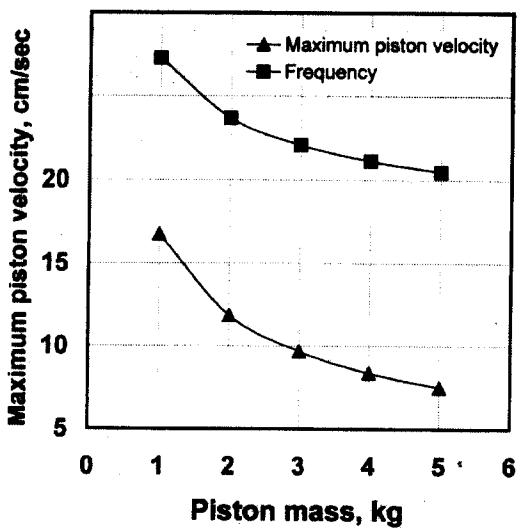


Fig. 6. Maximum piston velocity and frequency for free-piston engine

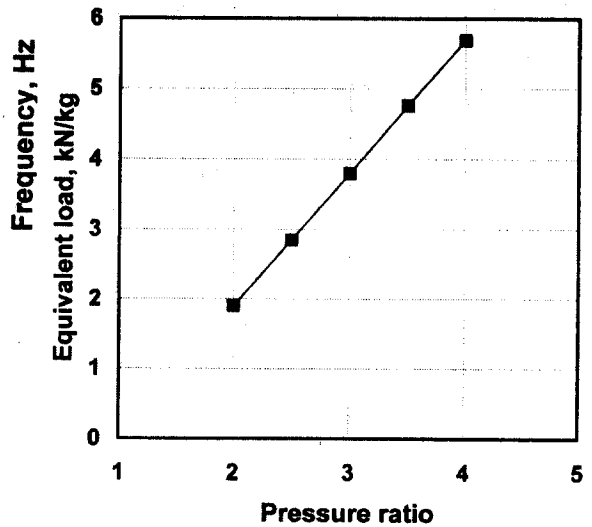


Fig. 7. Equivalent load as a function of pressure ratio.

아 질 수 있다. 그러므로 추후 프리-피스톤 기관의 설계시 기관 출력 및 열효율 측면을 다각적으로 고려하여 피스톤 질량이 선정되어야 한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 프리-피스톤 수소기관의 압력비 변화에 대한 상당 부하를 일정 압축비 및 행정거리 조건에 대해 나타낸 것이다. 여기서 프리-피스톤 기관의 상당 부하는 단위 피스톤 질량당 행정거리 전반에서 균일하게 작용하는 힘으로 정의한다. 그림에서 보는 바와 같이 프리-피스톤 기관의 상당 부하는 압력비가 증가함에 따라 1차 선형 함수의 관계로 증가한다. 이 경향은 압축비가 일정할 경우 프리-피스톤의 가속도 최대치가 연소최고압력, 즉 압력비에 대해 비례하는데 기인한 것으로 볼 수 있다.

전술한 바와 같이 프리-피스톤 수소기관을 개발하기 위해서는 기관운전의 안정성 확보가 가장 중요하다. 프리-피스톤 수소기관의 운전중 각 사이클마다 마찰력과 공급열량이 일정하지 않을 경우 피스톤 속도가 변화되고 이에 따라 압축비가 변화되어 기관운전이 불안정해질 수 있다. 이러한 사이클 변동정도를 파악해 보기 위해 연료공급량

변화에 대한 유효행정거리 및 유효압축비를 조사하여 Fig. 8에 나타낸다. 유효행정거리는 주어진 공급열량에 의해 프리-피스톤이 상사점에서부터 이동하여 피스톤이 정지하는 위치까지의 거리를 의미한다. 또한 유효압축비는 이때의 실린더내 압

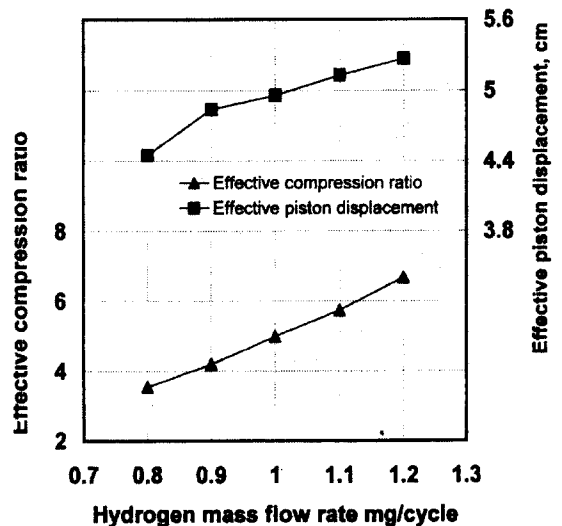


Fig. 8. Effective compression ratio and piston displacement at each condition

축압력에 상당하는 압축비로 정의한다. 여기서 프리-피스톤 기관의 상당부하는 3.52 kN/kg이며 연소 및 소기과정은 정적과정 하에서 순간적으로 이루어진다고 가정하였다.

프리-피스톤 기관의 유효행정거리는 공급연료량이 증가할수록 증가하며 이에따라 유효압축비도 높아지는 경향을 나타낸다. 수소가스량이 $\pm 1\%$ 정도의 오차내에서 공급되고 있다고 했을 때 분해조건하에서의 유효행정거리 변화율은 1% 미만이지만 유효압축비 변화율은 이보다 다소 높은 2~3% 정도로 보여졌다. 프리-피스톤 기관에서는 한 쪽 실린더내로 공급되는 연료량이 변화되면 반대편 실린더의 유효압축비가 달라지게 되고 이 영향은 다시 반대편 실린더의 압축압력에 영향을 미친다. 이러한 현상이 몇몇 사이클에 걸쳐 누적되거나 부하율 및 마찰력 등이 불규칙하게 변화되면 매우 불안정한 운전을 초래한다. 그러나 상기의 변화율은 그리 큰 값이 아니므로 연료공급 및 점화 제어시스템의 신뢰성이 확보되면 프리-피스톤 수소기관의 안정적인 성능을 유지하는데 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

또한 프리-피스톤 수소기관과 고성능 리니어 발전기로 구성된 발전시스템에서는 비록 기관운전변동이 불규칙적으로 발생한다고 할지라도 발전기-모터 전환기술을 적용할 경우 기관운전의 안정성과 제어성의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결 론

역화발생 원인규명 및 고성능 수소 발전시스템 개발 차원에서 프리-피스톤 수소기관의 동적운동 특성 및 주요 운전특성을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 프리-피스톤 수소기관의 동적거동 양상은 통상의 왕복구동식 기관과 매우 상이하고 프리-피스톤의 평균속도 및 최대 가속도의 크기는 왕복구동식에 비해 크게 나타났다.

2) 프리-피스톤 수소기관의 피스톤 질량은 출

력, 출력밀도 및 열효율과 같은 기관성능에 직접적인 영향을 미치므로 피스톤 질량은 기관운전조건 등을 고려하여 선정하는 것이 바람직하다.

3) 압력비가 증가함에 따라 연소최고압력 상승에 의한 피스톤 가속도의 증가 효과가 나타나며 이에따라 프리-피스톤 수소기관의 상당부하는 비례적으로 증가하는 경향을 보였다.

4) 프리-피스톤 수소기관에서 공급열량의 변동은 기관운전의 불안정을 초래하므로 기관 성능의 안정성과 제어성을 확보하기 위해서 연료공급 및 점화시스템의 제어기술과 리니어 발전기 접목기술의 확립이 필요함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 21세기 프론티어 고효율 수소에너지 제조저장이용 기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) 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
- 2) 백성호, 박재범, 김윤영, 이종태, "수소기관의 역화한계당량비 확장에 관한 연구", 한국수소에너지학회, 수소에너지, Vol. 8, No. 3, 1997.9, pp. 111-119
- 3) 백성호, 이종태, "흡기관 분사식 수소기관의 특성 및 역화한계당량비의 해석", 한국수소에너지학회, 수소에너지학회지, Vol. 7, No. 1, 1996. 6, pp. 55-62
- 4) Flynn, Jr., G. 1957. "Observations on 25000 Hours of Free-Piston-Engine Operation", SAE Trans., Vol. 65, pp. 508-515.
- 5) Noren, O. B., and Erwin, R. L. 1958 "The Future of the Free-piston Engine in

- Commercial Vehicles" SAE trans., vol. 66, pp. 305-314.
- 6) Olson, D. R. 1958. "Simulation of a Free-Piston Engine with a Digital Computer", SAE Trans., vol. 66, pp. 669-682.
 - 7) Achten, P. A. J. 1994. "A Review of Free Piston Engine Concepts," SAE Paper 941776.
 - 8) Baruah, P. C. 1988. "A Free Piston Engine Hydraulic Pump for an Automotive Propulsion System," SAE Paper 880658.
 - 9) Peter V. B. 2002. "Advanced Internal Combustion Electrical Generator", Proceedings of the 2002 U.S. DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-610-32405.Nomenclature