

수소를 연료로 하는 소형 파워팩 개발에 관한 연구 (I)

김남열*, 김강출**†, 임옥택***

*울산대학교 기계자동차공학과대학원, **한국에너지기술연구원 산업효율연구센터,

***울산대학교 기계자동차공학부

A Study for Development of Compact Powerpack used Hydrogen

NAMYUER KIM*, GANGCHUL KIM**†, OCKTAECK LIM***

*Graduate School of Mechanical & Automotive Engineering, Ulsan University, Mugeo-dong, Ulsan 680-749, Korea

**Green Transportation Research Group, KIER, 71-2, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

***School of Mechanical & Automotive Engineering, Ulsan University, Mugeo-dong, Ulsan 680-749, Korea

ABSTRACT

Current rechargeable battery cannot provide high energy density and the operational durations required. But linear engine/generators provide high energy density for portable power applications because fuel is more high density. In this paper, we suggest that basic design of powerpack using linear engine for assisting power output. Efficiency is relatively high because linear engine don't have crank mechanism compared with rotary engine. We made prototype engine and had experiments to know moving characteristic about the Linear Engine. It was possible to operate velocity at 50 Hz at the firing and pressure in cylinder was 16bar.

KEY WORDS : Powerpack(보조배터리), Linear engine(리니어 엔진), Linear generator(리니어 발전기), Free piston(프리피스톤), Hydrogen(수소)

Nomenclature

P : pressure, bar
T : time, ms
L, R : left, right
BTDC : before top dead centerms

ATDC : after top dead centerms

1. 서 론

기존 소형 엔진은 주로 2행정 회전 왕복기관(reciprocating engine)으로, 피스톤의 선형운동을 크랭크축과 플라이휠을 이용하여 회전운동으로 변환하게 된다. 반면에 리니어엔진은 피스톤의 선형

†Corresponding author: kimgc@kier.re.kr,

[접수일 : 2010.3.31 수정일 : 2010.6.23 게재확정일 : 2010.8.20]

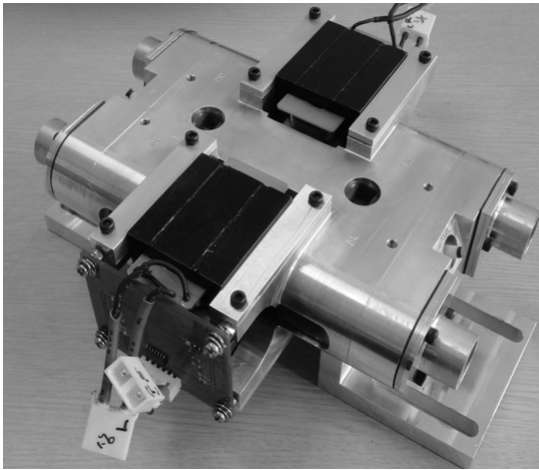


Fig. 1 View of compact linear engine and linear generator.

운동을 변환 없이 그대로 동력으로 사용하는 선형 왕복기관(linear reciprocating engine)이다. 크랭크 기구에 구속되어진 기존의 왕복운동형 내연기관은 직선운동을 회전운동으로 바꿔야 하는 기계적 손실과, 팽창행정의 제약으로 인해 효율향상에 한계를 가지고 있다¹⁾. 하지만 리니어엔진은 피스톤의 선형운동을 회전운동으로 변환하지 않기 때문에 기계적인 손실이 없고, 피스톤의 자유도가 높기 때문에 압축 및 팽창효과를 극대화할 수 있어서 엔진 효율을 크게 높일 수 있는 장점이 있고, 수소를 연료로 사용하는 경우에 초저공해의 실현도 가능하게 된다. 특히 최근 휴대 장비들이 계속적으로 증가하면서 동력을 지속적으로 공급할 수 있는 높은 에너지밀도 및 출력밀도를 갖는 발전기가 필수적으로 요구되고 있다. 현재 사용되고 있는 납축전지의 배터리 경우는 일반적으로 에너지밀도가 50Wh/kg로 매우 낮아서 휴대용으로 사용하기가 어렵다. 이에 대한 대안으로 본 연구 논문을 통해 높은 에너지밀도를 갖는 소형 파워팩 개발에 관해 발표하고자한다.

2. 수소를 이용한 소형 파워팩 개념설계

2.1 병렬형 세라믹 리니어엔진

본 연구에서 개발하고자 하는 파워팩은 Fig. 1에

Table 1 Specifications of linear engine and air compressor

Description	value
Bore of combustion chamber	20 mm
Bore of air chamber	24 mm
Maximum stroke	20 mm
Maximum swept volume of combustion chamber	14.5 cc
Maximum swept volume of air chamber	41.6 cc

서 보는 것처럼, 리니어엔진이 중앙에 있으며 좌우에 리니어 발전기 및 에어컴프레서가 대칭적으로 배치되어 있는 구조이다. 주요 제원은 Table 1에 나타낸다.

기존 파워팩의 경우는 대부분 리니어엔진의 중앙에 리니어 발전기가 오도록 설계된다. 이러한 경우에는 리니어엔진의 커넥팅로드가 길어져서 좌굴에 의한 편심 등에 의해 측면 하중이 증가하고, 내구성에 문제가 발생한다¹⁾. 따라서 본 연구에서는 리니어엔진, 리니어 발전기, 에어컴프레서를 병렬형 구조로 하여 커넥팅로드의 길이를 최소화하였다. 또한 에어컴프레서의 용량을 증가시켜 공기가 연소실에 과급될 수 있도록 설계하였다. 그리고 리니어엔진의 양쪽 연소실의 실린더슬리브를 일체형으로 설계하여 측면 하중을 최소화하도록 하였다.

기존 소형 2행정 엔진의 경우에는 연료에 윤활유

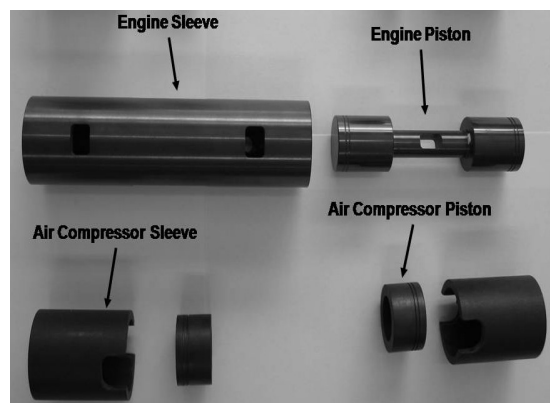


Fig. 2 Component of ceramic engine part and air compressor part.

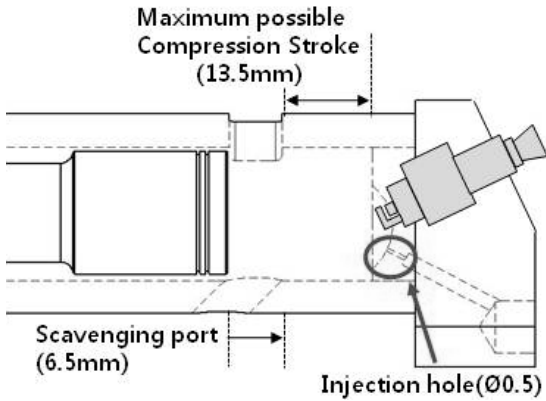


Fig. 3 Fuel supply and scavenging system.

를 혼합하여 사용하기 때문에, 윤활유의 연소에 의한 배기가스 및 효율 저하가 큰 문제로 되고 있다²⁾. 본 연구에서는 엔진의 내구성 및 효율을 증가시키기 위하여 Fig. 2에서 보는 것처럼, 실린더슬리브와 피스톤을 세라믹 재질로 제작하여, 무윤활 또는 저윤활에 의해 엔진이 작동될 수 있도록 하였다.

2.2 소기 및 연료공급 시스템

기존 소형 2행정 엔진에서의 소기시스템은 흡입행정에서 연료와 공기가 예혼합 되어 연소실로 유입되는 데, 흡기 및 배기 포트가 동시에 열려있기 때문에 연료의 손실이 발생하며, 이로 인해 배출가스 증가 및 효율 저하가 발생한다³⁾.

본 연구에서는 Fig. 3에서 나타낸 것처럼, 소기포트가 실린더슬리브의 하부에서 45° 각도로 설계하였다. 피스톤이 TDC에서 13.5mm 이동하여 소기포트가 열리고, 공기는 소기포트를 통해서 유입되어 배기포트로 이동하여 배기를 원활하게 하도록 설계를 하였다. 본 연구에서는 연료를 실린더헤드 하부의 인젝션 홀(0.5Ø)을 통해 연소실로 직접 공급된다.

2.3 공기의 흡입 및 공급 시스템

본 연구에서는 충분한 공기를 흡입하여 엔진에 공급될 수 있도록 Fig. 4와 같이 리니어엔진 좌우에

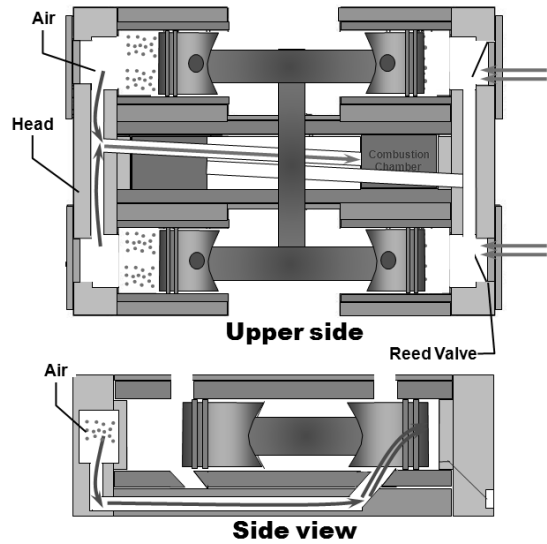


Fig. 4 Compressed air line in the cylinder.

에어컴프레서를 설치하였으며, 엔진블록 하부에 컴프레서와 연소실 사이에 공기 유로를 가공하였다. 컴프레서의 흡입행정시에는 연소실 피스톤에 의해 연소실 공기 흡입구가 닫히고, 압력차에 의해 컴프레서 헤드에 장착된 리드밸브(reed valve)가 열리면서 공기가 흡입된다. 그리고 컴프레서 압축행정시에는 리드밸브가 닫히면서 공기의 압축이 이루어지다가 소기과정에서 배기포트와 흡기포트가 열리면서 연소실로 공기의 공급이 이루어지게 된다.

2.4 평판형 영구자석 리니어 발전기

기존 파워팩은 발전기와 엔진을 축으로 연결하기 때문에 회전형 발전기가 사용되었다¹⁾. 하지만 본 연구에서는 리니어엔진과 일체형으로 리니어 발전기를 제작하여 전체적인 시스템 크기 및 부피를 최소화하도록 설계하였다. 리니어 발전기는 형상에 따라 원통형 또는 평판형으로 구분될 수 있는 데, 본 연구에서는 Fig. 5에서와 같이 구조상 평판형으로 설계하였다. 그리고 영구자석을 이동자(mover)로 하고, 영구자석 상하에 대칭적으로 코일(Ø0.9, 70턴)과 코어를 고정자(stator)로 배치하였다.

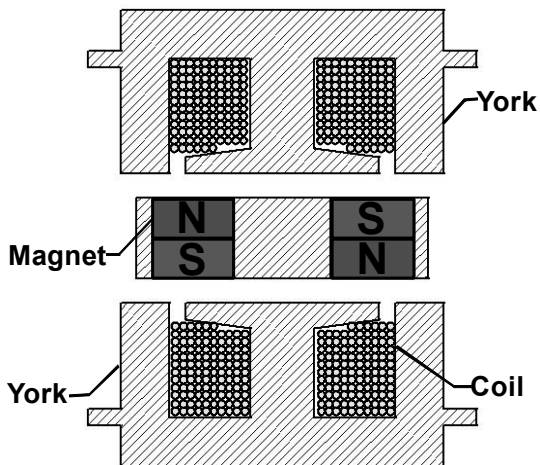


Fig. 5 Schematic of linear generator.

3. 실험장치 및 실험결과

3.1 실험장치

실험장치는 연소연구용 리니어엔진, 수소연료 공급부, 모터링 및 발전출력을 위한 리니어 발전기, 데이터 취득 및 제어부로 구성되며, 그 개략 및 실험장치 사진을 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타낸다.

사용된 고압수소(순도 99.99%)는 레귤레이터에 의하여 감압을 시켰지만 맥동이 심하여 어큐뮬레이터를 설치하였습니다⁴⁾. 이 고압의 수소가스는 솔레노이드밸브를 통하여 실린더내에 직접분사된다. 리니어엔진의 경우에는 크랭크 각 대신에 피스톤의 위

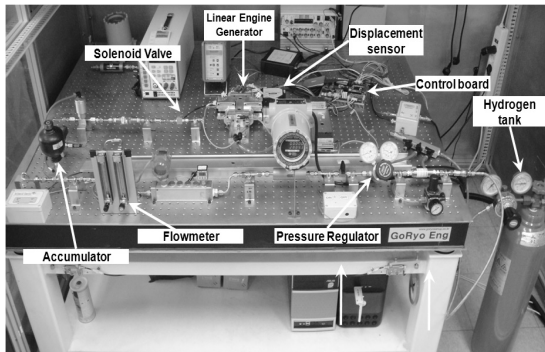


Fig. 6 Photographs for experimental setup.

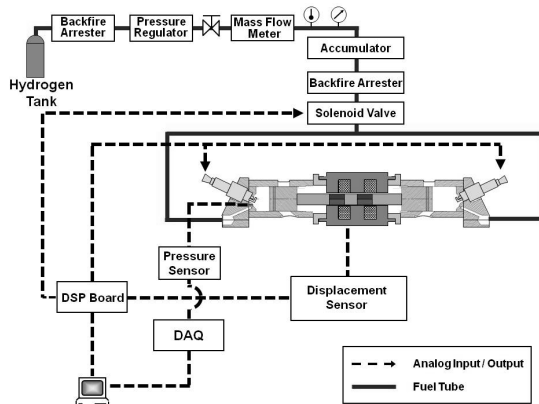


Fig. 7 Schematic diagram for experimental setup.

치를 측정하기 위하여 변위센서(model: optoNCDT 2200)를 이용하였다. 연소실내 압력을 측정하기 위하여 Kistler사의 6052B type 압력센서를 연소실내에 삽입하였다. 연료의 유량을 조절하기 위해서 LC-Global사의 솔레노이드 타입의 인젝터를 본 연구에서 사용하였다.

3.2 실험방법

실험은 Table 2와 같이 연료 분사압력은 2bar로 고정하였고 압축공기 압력은 0.5bar로 하였다. 점화시기는 포토센서에서 신호를 받아 2ms(BTDC 3.3mm)에서 점화를하였다. 엔진실험은 Fig. 8에서 나타낸 것처럼 매트랩 Simulink를 이용하여 모터링 방향 전환 시기 및 연료 분사 시기, 점화시기를 제어하였다. 데이터 수집은 NI사의 USB-6259 장비를 이용하여 0.5ms간격으로 데이터를 수집하였다.

Table 2 Experiment condition

Description	value
Fuel	Hydrogen
Injection pressure	2 bar
Spark delay timing	2 ms (BTDC 3.3 mm)
Air injection pressure	0.5bar

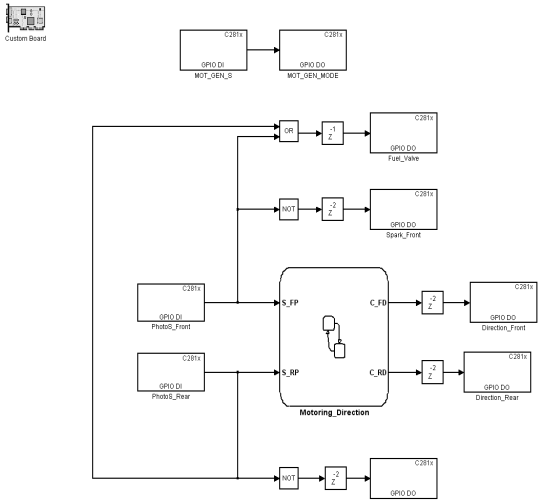


Fig. 8 Simulink model for the entire engine.

3.3 실험결과 및 분석

리니어엔진의 초기 시동조건 형성을 위한 모터링 상태의 운전특성을 알아보기 위해 운동궤적과 실린더 내 압축압력변화를 나타내 보았다. 실험엔진의 이동체의 질량은 0.28kg이며, 리니어발전기를 이용하여 모터링을 하였다. Fig. 9과 Fig. 10은 모터링시 운동궤적을 나타낸 것이다. 모터링시 좌/우 $\pm 5.5\text{mm}$ 의 스트로크로 충분히 흡기포트(중앙기준 $\pm 3\text{mm}$ 부

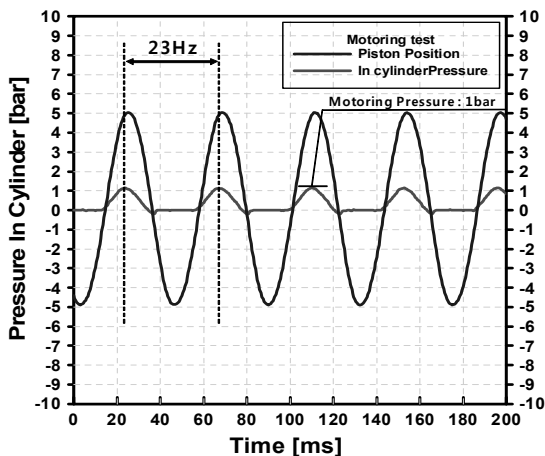


Fig. 9 Frequency and compression pressure of motoring.

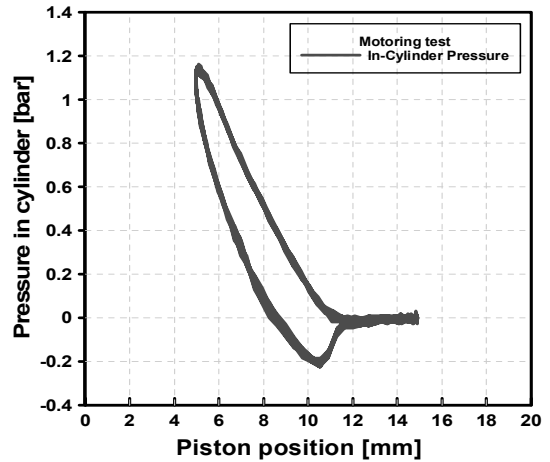


Fig. 10 In-cylinder combustion pressure versus position during motoring.

터 open)를 열어주고 있다는 것을 알 수 있다. 연소실내 압력이 1~1.2bar 정도 형성되어짐을 보여주고 있다. 또한 이때의 운전속도는 약 23Hz이다.

Fig. 11은 연소운전에서의 운동궤적을 나타내었다. 연소실험을 위한 엔진의 조건은 모터링과 동일하며, 수소의 분사압력은 2bar, 공기 공급압력은 0.5bar이다. 그래프는 모터링 구간과 연소의 힘만으로 운전이 이루어지는 구간으로 구분되어져 있다. 연소 후 진행거리와 연소압력이 일정하지 않게 나

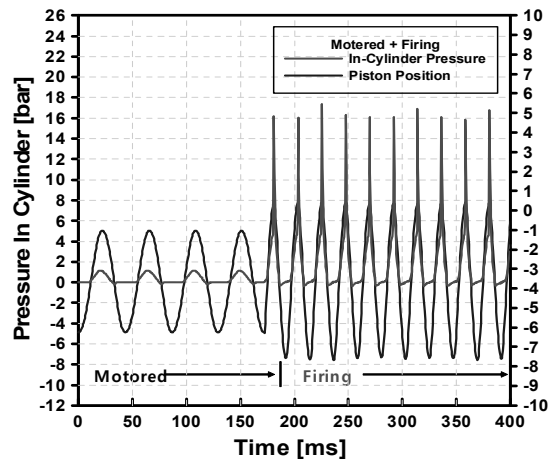


Fig. 11 Frequency and compression pressure of motoring/firing.

타나는 것이 보이는데 이것은 리니어엔진의 특성으로 크랭크의 구속이 없기 때문에 보여지는 것처럼 연소시마다 각각 다른 연소특성을 가지게 되는 것이다⁵⁾.

Fig. 12은 엔진제어시의 분사시기와 점화시기를 운동계적과 실린더내 압력과 같이 나타내었다. 운동계적에서와 같이 분사는 흡기포트가 열렸을 때 연소실 내부로 직접 분사하도록 시기를 결정하였다. 점화시기는 포토센서신호를 기준으로 결정하였으며 spark timing은 2ms로 하였다. 점화신호가 끝난 후 점화플러그에서 불꽃을 일으키면 연소가 이루어져 압력이 상승하는 것을 볼 수 있다. 피스톤 위치제어에 의한 강제 착화방식은 리니어엔진의 가변하는 연소조건을 제어할 수 없으므로 압축비를 높여 압축착화에 의해 운전되도록 한다면 항상 동일한 진행거리와 압축압력에서의 연소가 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 13은 연소시 운동계적과 실린더내 압력변화를 나타내었다. 연소 후 압력이 16bar 까지 상승하며, 또한 이때의 운전속도는 약 50Hz로 모터링 때와 차이를 보이고 있다.

Fig. 14는 피스톤의 위치에 따른 연소실내 압력을 나타낸 그래프이다. 수소의 연소속도는 이소옥탄에 비해 약 3배 빠르며⁶⁾, 연소곡선은 이런 특성을 잘

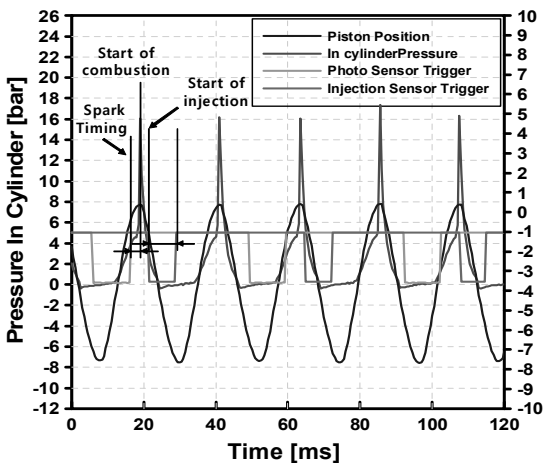


Fig 12 Signal of ignition delay time and ignition point.

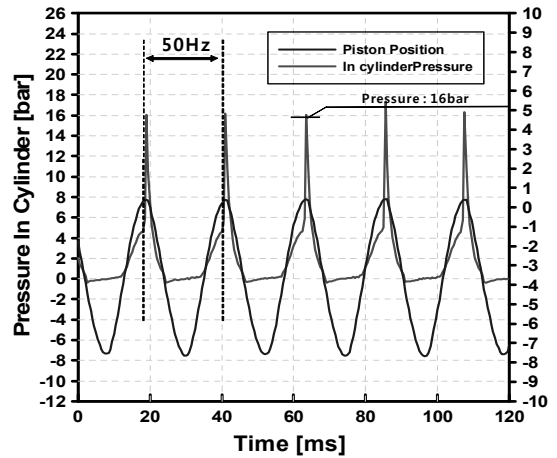


Fig 13 Frequency and combustion pressure of firing.

보여주고 있다. 점화는 TDC를 지난 후 이루어지기 때문에 압력이 감소하다 상승하는 형태로 나타난다. 화염전파속도가 빠르기 때문에 연소는 짧은 시간에 이루어지게 되어 압력이 급격히 상승하는 형태를 보인다.

4. 결론 및 향후계획

세라믹 리니어엔진의 운동 특성을 파악하기 위해 엔진을 제작하여 수소연료를 사용한 연소실험을 하

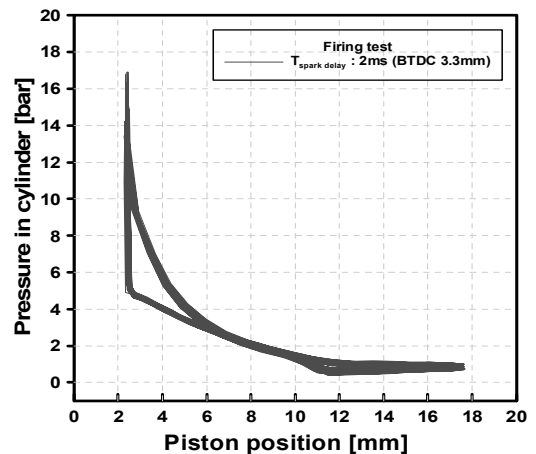


Fig. 14 In-cylinder combustion pressure versus position.

였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 모터링 운전시 속도는 23Hz 이었으며, 이때의 연소실내 압력은 1~1.2bar 이었다.
- 2) 리니어엔진은 불규칙적인 연소 및 운동특성을 갖는다. 운동패턴을 결정하는 구속기구가 없기 때문이며, 실험결과에서 보이는 것처럼 연소시마다 각각 다른 피스톤의 TDC 도달위치, 연소 압력, 운동궤적을 갖는다.
- 3) 프로토타입의 리니어엔진은 내구성이 약해 마모가 심하게 발생했으며 압력손실은 이러한 사실에 기인하고 있는 것으로 판단된다.
- 4) 수소를 연료로 하는 연소시 속도는 50hz 이었으며, 이때의 연소실내 압력은 16bar 이었다. 수소는 점화착화가 높고 화염전파속도가 빠르기 때문에 연소는 짧은 시간에 이루어지게 되어 압력이 급격히 상승곡선을 나타내었다.
- 5) 현재는 세라믹 리니어엔진 발전기의 설계 개념 및 변수에 대한 작동여부 및 가능성을 검증하는 차원으로 실험이 진행되었다. 그 결과 수소를 연료로 하는 리니어엔진의 작동 재현성을 확인하였다. 추후 압축공기 유로설계에 따른 유량을 측정하여 소기과정시 흡기포트의 각도와 크기를 최적화하여 성능 및 효율 등을 평가 할 계획이다.

후 기

본 연구는 민군겸용기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행된 결과의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 이영재, 김강출, 표영덕, “리니어 동력시스템의 국내외 연구개발 현황”, 한국수소 및 신에너지학회, 춘계 학술대회 논문집, 2004, pp. 135-151.
- 2) John B. Heywood and Eran Sher, “The two-stroke cycle engine”, Taylor & Francis, 1988, pp. 883-884.
- 3) Willard W. Pulkkrabek, “Engineering fundamentals of the international combustion engine, 2nd Edition”, Pearson Education, Inc., 2005, p. 148.
- 4) 이종태, 이성열, 이재천, 김용환, “수소엔진 개발에 관한 기초연구”, 한국자동차공학회 춘계학술대회, 1988, pp. 59-63.
- 5) 노태석, 김강출, 우영민, 이용균, 규정인, 이영재 “수소연소 리니어엔진의 동적 특성에 대한 연구”, 한국자동차공학회 춘계학술대회, 2006, pp. 1841-1846.
- 6) 이성열, “고급내연기관”, 보성각, 1999, pp. 711-714.