

## 휴대용 파워팩을 위한 소형 세라믹 리니어 엔진 설계 및 동적 특성에 관한 연구

오용일\*, 김강출\*\*, 임옥택\*\*\*<sup>†</sup>

\*울산대학교 기계자동차공학과 대학원, \*\*한국에너지 기술연구원, \*\*\*울산대학교 기계자동차공학부

### A Study of Design and Dynamic Characteristics of Compact Linear Engine for Portable Powerpack

YONGIL OH\*, GANGCHUL KIM\*\*, OCKTAECK LIM\*\*<sup>†</sup>

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

*\*\*Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, 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

BTDC : before top dead center  
ATDC : after top dead center

IMEP : indicated mean effective pressure  
ST : spark timing  
P3 : portable powerpack

#### 1. 서 론

최근 휴대장비들이 계속적으로 증가하면서 동력을 지속적으로 공급할 수 있는 높은 에너지밀도 및

<sup>†</sup>Corresponding author : otlim@ulsan.ac.kr

[ 접수일 : 2011.6.13 수정일 : 2011.7.20 게재확정일 : 2011.8.22 ]

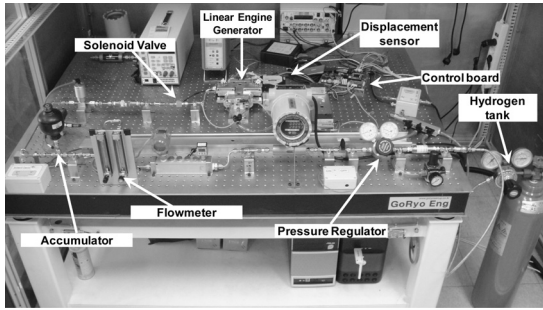


Fig. 1 Photographs for experimental setup

출력밀도를 갖는 휴대용 파워팩이 필수적으로 요구되고 있다. 현재 사용되고 있는 납축전지의 경우 일반적으로 에너지 밀도가 50Wh/kg으로 매우 낮아서 휴대용으로 장시간 사용하기가 어렵다. 이차전지로 주로 사용되고 있는 리튬전지의 경우도 100~150Wh/kg으로 에너지 밀도가 높지 않기 때문에 연속 사용 시 잦은 배터리 교체로 인한 비용 부담이 문제되고 있다. 또한 충전에 필요한 소요시간이 오래 걸리기 때문에 사용상의 불편함이 있다. 이에 대한 대안으로 수소연료를 사용하는 소형 리니어 세라믹 엔진 및 리니어 제너레이터를 이용하여 높은 에너지 밀도를 갖는 휴대용 파워팩을 개발 하고자 한다.

이에 본 연구에서는 소형 리니어 엔진의 출력을 100W 급으로 향상시키기 위한 기초연구로서 연료

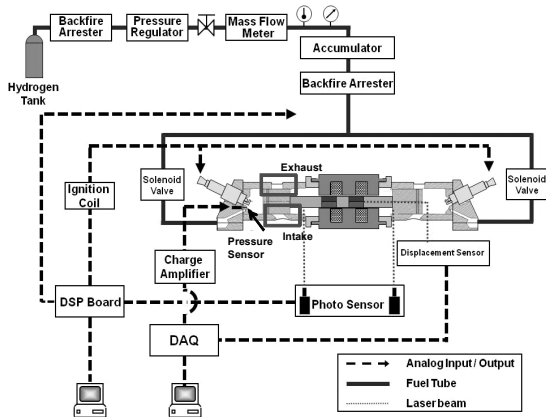


Fig. 2 Schematic diagram for experimental setup

Table 1 Specification of linear engine

Engine type	Two stroke linear engine
Displacement [cc]	4.45
Bore [mm]	20
Maximum stroke [mm]	20
Compression ratio	17.6
Total weight [kg]	3.4
Scavenging arrangement type	Cross-Scavenged type
Injection hole diameter [mm]	0.5

분사압력 및 점화시기에 따른 리니어 엔진의 동적 특성 및 성능특성을 파악하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치는 소형 리니어 엔진, 수소연료 공급부, 점화장치, 피스톤 구동을 위한 리니어 제너레이터, 데이터 취득 및 제어부로 구성되며 구성장치 및 개략도를 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 나타내었다.

#### 2.1.1 소형 세라믹 리니어 엔진

소형 세라믹 리니어 엔진, 리니어 제너레이터, 공기펌프를 병렬형 구조로 하여 커넥팅로드의 길이를 최소화하였다. 또한, 엔진피스톤과 공기펌프 피스톤을 하나의 링크로 연결하였다.

본 연구에서 리니어 엔진의 흡기포트는 실린더 슬리브의 하부에서 45° 각도로 설계되었다. 피스톤이 TDC에서 13.5mm 이동하여 흡기포트가 열리고, 공기는 흡기포트를 통해서 유입되어 배기포트로 이동하여 배기를 원활하게 하도록 설계를 하였다.

리니어 엔진의 주요 제원은 Table 1과 같다. 리니어 엔진의 행정체적(Vd)은 4.45cc이며, 양단에 연소실에 각각 배치된 듀얼 피스톤 구조이다. 피스톤이 이동가능한 최대의 스트로크는 20mm이고, 흡기포트가 닫힌 후 발생하는 유효압축행정은 13.5mm, 피스톤의 보어는 20mm이다.

또한, 리니어 엔진의 피스톤 질량은 0.28kg이며, 리

니어 제너레이터를 이용하여 모터링 실험을 하였다.

변위 센서부는 리니어 엔진의 위치를 명확하게 파악하여 점화시기를 제어하고자 포토센서와 변위 센서(Micro-Epsilon Co., optoNCDT 2200)로 구성하였다. 그리고 연소실내 압력을 측정하기 위하여 압력센서(Kistler Co., 6052B)를 삽입하였다.

한편, 엔진의 내구성 및 효율을 증가시키기 위하여 실린더 슬리브와 피스톤을 세라믹으로 제작하여 무 윤활 또는 저 윤활에 의해 엔진이 작동될 수 있도록 하였다.

### 2.1.2 연료공급장치 및 점화장치

수소연료는 고압수소(순도 99.99%)를 감압기를 이용하여 감압시켜 공급하였지만, 맥동이 심하여 어큐물레이터를 설치하였다<sup>1)</sup>. 수소 연료의 유량을 조절하기 위하여 솔레노이드 타입의 인젝터(LC Globe)를 사용하였고, 감압된 수소가스를 리니어 엔진 양단에 설치된 솔레노이드 타입의 인젝터를 통해 실린더 내에 직접 분사시켰다.

기존 소형 2행정 엔진에서는 흡기 및 배기포트가 동시에 열려있기 때문에 연료의 손실이 발생하며, 이로 인해 배출가스 증가 및 엔진효율 저하가 발생한다<sup>2)</sup>. 이러한 문제를 해결하고자 연료를 실린더헤드 하부의 인젝션 홀을 통하여 연소실로 직접 분사하였다.

엔진의 내구성 및 효율을 높이기 위해서 스파크 플러그 타입의 CDI(capacitor discharge ignition) 점화방식을 선택하였다. CDI 점화 장치는 다른 방식의 점화장치와는 달리 점화용 에너지를 IG코일에 자기로서 보류하는 것이 아니라, CDI내의 점화용 콘덴서에 고압의 전하로 보류하고, 점화 타이밍이 되었을 때 스위칭 반도체소자의 SCR(silicon controlled rectifier)가 ON상태가 되면, 콘덴서에 보류된 전하를 순간에 흐르게 한다. 이 때 점화 콘덴서의 SCR와 반대 측에 직렬로 접속 되고 있는 IG코일의 1차 측에도 전류가 통전 되어 IG코일의 2차 측에는 권수비배의 고압의(점화 플러그에 불꽃 방전을 일으킬 수 있는) 전류가 발생한다. 본 실험에서는 시중에 사용되고 있는 소형 엔진용 CDI 점화장치(C.H. Ignitions.Co)를 사용하여 점화시스템을 구성하였다.

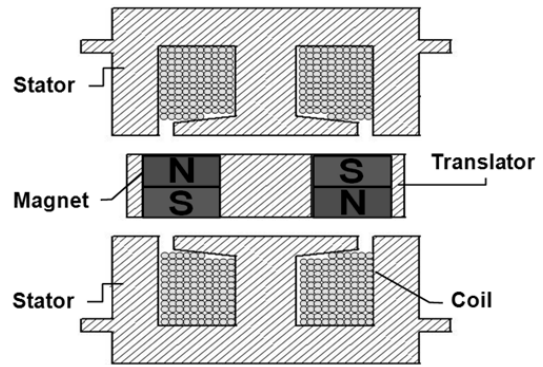


Fig. 3 The linear generator system

### 2.1.3 리니어 제너레이터 구동부

기존의 파워팩은 발전기와 엔진을 축으로 연결하기 때문에 회전형 발전기가 사용되었다<sup>3)</sup>. 하지만 본 연구에서는 리니어 엔진과 일체형으로 리니어 제너레이터를 제작하여 전체적으로 시스템의 크기 및 부피를 최소화할 수 있도록 설계하였다. 리니어 제너레이터는 형상에 따라 원통형 또는 평판형으로 구분될 수 있는데, 본 연구에서는 리니어 엔진의 구조적 특성상 Fig. 3과 같이 평판형으로 설계하였다. 그리고 영구자석을 이동자(translator)로 하고, 영구자석 상하에 대칭적으로 코일(Ø0.9, 70턴)과 코어를 고정자(stator)로 배치하였다. 리니어 제너레이터의 주요 제원은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Specification of linear generator

Stator	Stator type	Semi-closed
	Stator length [mm]	40
Slot pitch [mm]	14	
Tooth width [mm]	7	
Coil turns	70	
Wire diameter [mm]	Ø0.9	
Air gap	Air gap length [mm]	2.5
Translator	Magnet type	NdFeBr 35H
	Magnet length [mm]	45
	Magnet width [mm]	5

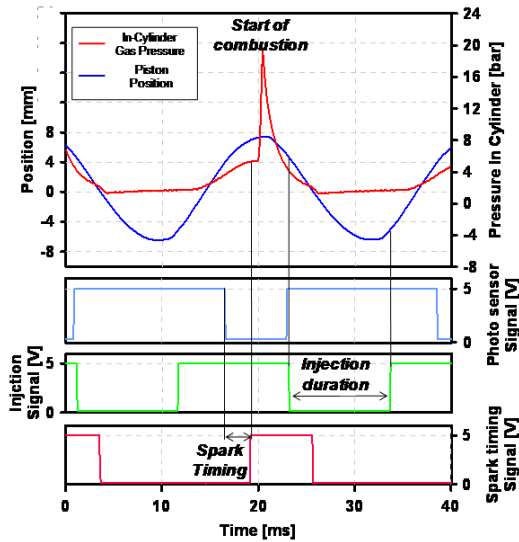


Fig. 4 Signal of spark delay time and ignition point

### 2.1.4 데이터 취득 및 제어부

모터링 구간에서는 우선 배터리의 전기에너지만으로 엔진이 구동된다. 모터링 시 리니어 제너레이터부에 설치된 포토센서를 통하여 피스톤 위치신호를 받게되고, 이 신호를 바탕으로 리니어 엔진의 압축행정이 진행되며, 이후 연소의 힘만으로 리니어 엔진이 구동된다. 포토센서 및 변위센서로부터 피스톤의 위치는 제어 PC로 입력된 후 설정된 점화시기에 인젝터로 동기신호를 출력한다. 포토센서(GP2S700HCP, SHARP)는 3mm 간격으로 위치해 있으며 측정물체가 지나갈 때 5V의 전압 값이 검출되며, 20 $\mu$ s로 매우 높은 응답 속도를 나타낸다. 또한, 위치센서(OptoNCDT-2200, Micro epsilon)는 5V의 전압출력이 나오며 측정속도와 측정범위는 각각 10kHz, 20mm이다.

연소실내의 압력은 Charge Amplifier(Kistler Co., 5011)와 A/D변환기(NI Co., USB-6259)를 거쳐 제어PC로 10kHz의 속도로 수집하였다.

제어부는 Matlab Simulink를 이용하여 자체 제작한 제어프로그램으로 리니어 제너레이터 초기 구동 및 연료분사시기, 점화시기를 제어하였다. 포토

Table 3 Experiment conditions

Fuel type	Hydrogen
Fuel injection pressure [bar]	2 / 2.5 / 3 / 3.5 / 4
Intake air pressure [bar]	0.5
Solenoid valve open timing [ms]	10
Spark timing [ms]	1 / 1.5 / 2 / 2.5 / 3 / 3.5 / 4 / 4.5 / 5
Piston mass [kg]	0.28

센서 신호를 기준으로 하여 2.5ms 만큼의 점화 진각에 따른 실린더 내 압력변화 특성 및 피스톤의 위치, 포토센서 트리거 신호, 점화 트리거 신호를 알아보았고 이를 Fig. 4에 나타내었다.

이 때 연료 분사압력은 3bar, 분사기간은 10ms, 공기 공급압력은 0.5bar이다.

## 2.2 실험방법

본 실험에서는 분사압력 및 점화시기에 따른 소형 세라믹 리니어 엔진의 성능을 평가하였다.

수소연료의 공급은 솔레노이드 타입의 인젝터를 사용하여 연소실 내에 직접 분사하였고, 흡기포트에 압축공기를 감압 후 공급하여 실험을 진행하였다. 실험 조건은 Table 3과 같다.

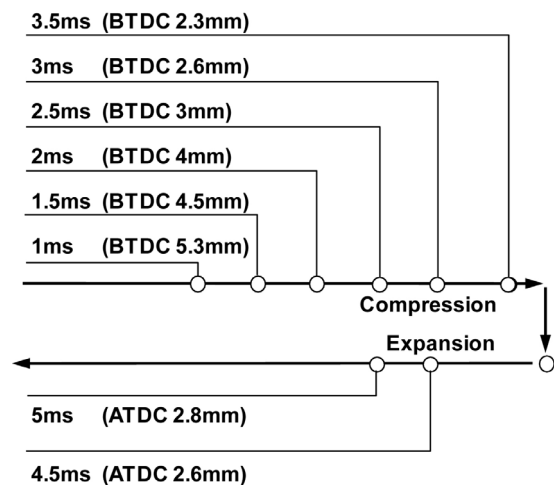


Fig. 5 Relation between spark timing and piston position

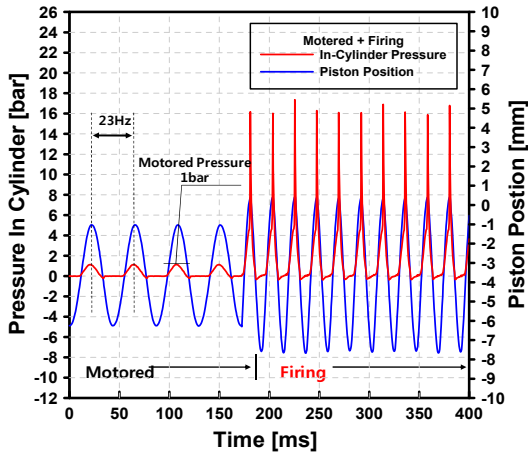


Fig. 6 Frequency and compression pressure of motoring/firing

분사압력에 따른 동적특성 및 성능을 측정하기 위하여 분사압력을 2~2.5bar 로 각 0.5bar씩 증가시켰다. 또한, 포토센서가 피스톤의 위치를 검지하고 2.5ms(BTDC 3.0mm)가 지난 후에 점화 신호를 보내는 것으로 점화시기를 고정하였다.

점화시기에 따른 동적특성 및 성능을 측정하기 위하여 0.5ms 간격으로 1~5ms 범위에서 증가시켰으며, 이 때의 분사압력은 2bar 로 고정하였다. 점화시기는 TDC 7mm에 위치한 포토센서로부터 신호를 받아 제어하였고, 충분히 빠른 소기과정을 위하여 흡기포트에 압축공기 0.5bar를 공급하였다. 인젝터 밸브 개폐시기는 팽창 행정 시 포토센서에서 신호를 받고 10ms 후로 설정하였다. Fig. 5는 상대적 점화시기의 조건을 변화시켰을 경우의 피스톤위치와 점화시기의 관계를 보여주고 있다.

### 3. 결론 및 분석

#### 3.1 리니어 엔진의 모터링 결과

리니어 엔진의 초기 시동조건 형성을 위한 모터링 상태의 운전특성을 알아보기 위하여 Fig. 6에 순수 모터로만 리니어 엔진을 운전시킨 구간과 연소로 인해 형성된 압력만으로 운전시킨 구간의 운동궤적을 나타내었다.

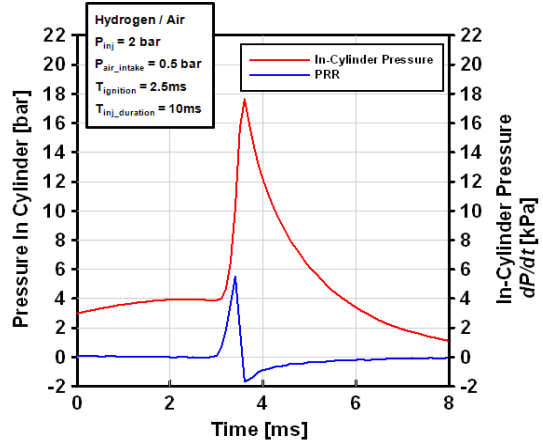


Fig. 7 Pressure in cylinder versus time

모터링 시 좌/우  $\pm 6.5\text{mm}$ 의 스트로크로 충분히 흡기포트(중앙기준  $\pm 3\text{mm}$ 부터 개방)를 열어주고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 모터링 시 연소실내의 압력은 1~1.2bar 정도로 형성되며, 이 때의 운전속도는 약 23Hz 정도였다. 연소구간에서는 연소실 내의 압력이 16bar 정도로 형성되며, 이 때의 운전속도는 약 50Hz이다.

2행정 리니어 엔진은 기존의 2행정 엔진과는 달리 크랭크기구에 의한 운동구속이 없기 때문에 Fig. 6에서 보는 바와 같이 연소 시마다 각각 다른 연소특성을 가진다<sup>4)</sup>. 이로 인해 연소구간에서 피스톤의 최대, 최소 스트로크와 연소압력이 각각 다른 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 리니어 엔진의 연소실험 결과

#### 3.2.1 분사압력에 따른 동적&성능 특성

수소연료의 분사압력 2bar, 점화 시기는 2.5ms로 고정하여 얻은 연소실 내 압력과 압력변동률을 Fig. 7에 나타내었다. 연소실 내 압력 선도는 상사점 부근에서 피스톤의 속도가 빠른 프리피스톤 시판의 특징을 잘 나타내고 있다. 수소의 연소 속도는 이소옥탄에 비하여 약 3배가 빠르며<sup>4)</sup>, 연소곡선은 이런 특성을 잘 보여주고 있다. 또한, 압력상승률 곡선을

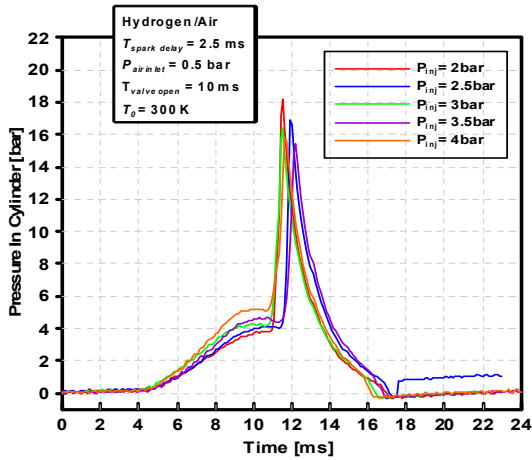


Fig. 8 Pressure in cylinder an different pressure

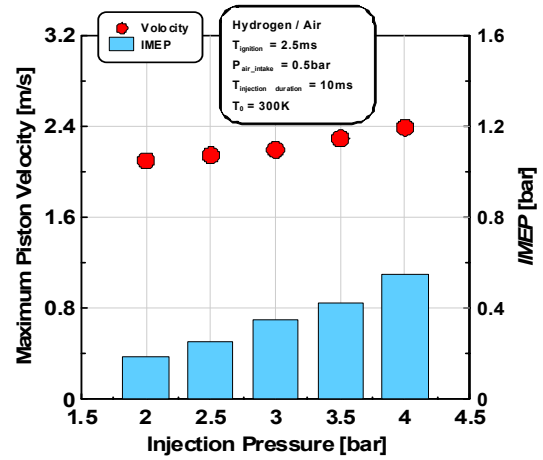


Fig. 9 Indicated mean effective pressure (IMEP) and max. piston velocity influenced by injection pressure

통해 연소소음 및 비정상적인 값을 확인하였다. 연소가 일어난 후 압력변동을 값은 0.05bar 미만의 값을 나타내었다.

Fig. 8에 수소연료 분사압력 변화에 따른 실린더 내의 압력 선도를 나타내었다. 이 때 점화 시기는 2.5ms, 흡기공기 압력은 0.5bar로 고정하였다. 수소연료의 분사압력이 증가할수록 연소실 내 최고압력은 약간 감소하는 경향이 보였다. 연료분사압력이 증가할수록 연료 분사량이 증가하게 되고 이에 피스톤 속도가 빨라진다. 따라서 피스톤이 BTDC에 더욱 근접하여 점화가 일어나기 때문에 연소실 최고압력이 감소하는 경향을 보였다고 판단된다.

Fig. 9에는 수소연료의 분사압력 변화에 따른 피스톤속도와 평균유효압력을 나타내었다.

소형 리니어 엔진을 이용한 파워팩의 발전 출력은 피스톤의 속도에 비례하기 때문에 연료 분사압력에 따라 그래프로 표시하였다. 연료 분사압력이 증가할수록 피스톤속도는 다소 증가하며, 평균유효압력 또한 증가하는 경향을 보였다.

연료 분사압력이 증가할수록 평균유효압력이 높은 것은 분사압력증가로 연료 분사량이 많아지고 이에 따라 열 방출량이 많아지기 때문이다. 분사압력 2bar에서 보다 대략 2배 높은 평균유효압력인 것을 확인할 수 있었다. 전반적으로 평균유효압력

을 높이고 피스톤속도를 증가시키기 위해서는 연료를 고압으로 실린더 내에 직접 분사되어야 한다.

### 3.2.2 점화시기에 따른 동적&성능 특성

Fig. 10에 점화시간에 따른 한 쪽 피스톤의 위치와 실린더 연소압력을 나타내었고, 이 때 연료분사압력은 2bar, 흡기 압력은 0.5bar로 고정하였다. 또한, 충분한 연료유량을 실린더 내에 분사하기 위하여

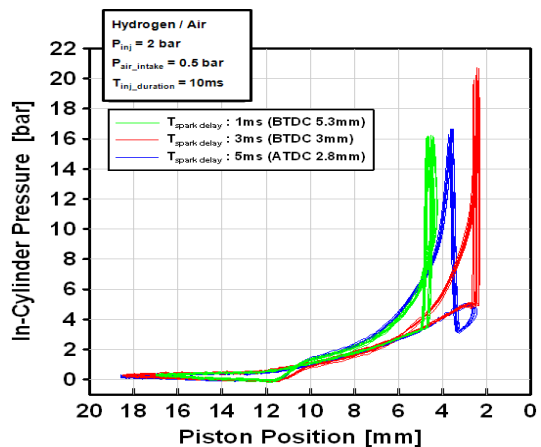


Fig. 10 In-cylinder combustion pressure versus position

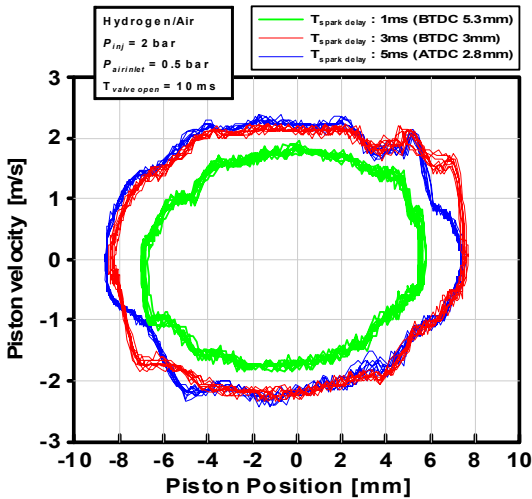


Fig. 11 Piston position versus position velocity

여 분사시간을 10ms으로 하였다.

피스톤의 위치 값은 부피 값과 비례하기 때문에 P-V 곡선에서와 같이 실린더 내 압력-피스톤 위치 그래프에서도 한 사이클 동안의 일을 구할 수 있다.

점화시기가 지각될수록 피스톤의 최대 스트로크가 증가하였으며, 연소실 최대 압력 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 동일한 조건에서 점화시기에 따른 피

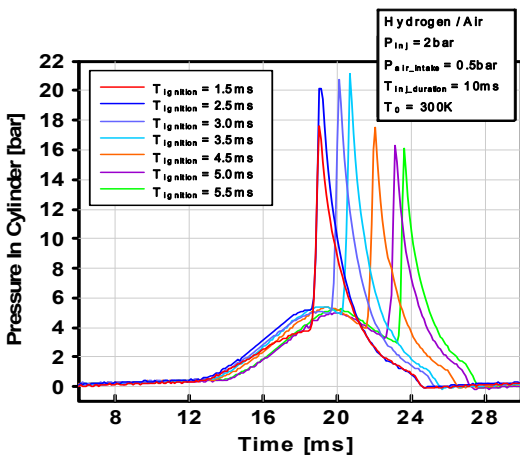


Fig. 12 In-cylinder pressure versus time with different spark timing

스톤의 위치 및 피스톤 속도를 나타낸 것이다. 점화 시기 3ms에서 피스톤의 속도는 약 2.2m/s였다. 점화시기가 상사점 부근일 경우 비교적 압축비가 높기 때문에 압축비가 증가하여 피스톤의 속도변화가 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 전체 행정구간에서 점화시기에 따른 연소압력변화를 나타내었다. 점화시기가 압축행정시 상사점 부근으로 지각될수록 최대연소압력이 증가되었고, 팽창행정까지 지각될 경우에는 오히려 최대연소압력에 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 본 실험에서는 점화시기가 3.5ms(BTDC 2.3mm)일 때 가장 높은 최대연소압력을 보였다.

#### 4. 결 론

휴대용 파워팩을 위한 소형 세라믹 리니어 엔진의 운동 특성 및 성능특성을 파악하기 위해 리니어 엔진 및 리니어 제너레이터를 제작하여 수소연료를 사용한 연소실험을 하였다. 결과는 다음과 같다.

- 1) 모터링 운전 시 속도는 23Hz이었으며, 이때의 연소실내 압력은 1~1.2bar이었다. 연소실 내 압력이 일정하지 않은 것은 기존의 2행정 기관과는 달리 크랭크 기구가 없어 운동의 단속이 되지 않기 때문이다.
- 2) 수소를 연료로 하여 연소 시 피스톤의 속도는 50Hz이었으며, 이때의 연소실내 최대 압력은 16bar이었다. 모터링 시와 마찬가지로 연소실 내 압력은 일정하지 않았다. 또한, 수소는 착화온도가 높고 화염전파속도가 비교적 빠르기 때문에 연소가 짧은 시간에 이루어지게 되어 급격한 압력 상승곡선을 나타내었다.

#### - 각각의 변수에 따른 결과 설명

- 3) 분사압력증가에 따라 실린더 내 최고압력상승은 감소하였다. 연료분사압력이 증가할수록 연료 분사량이 증가하피스톤의 속도가 증가한다. 이로 인해 또한, 분사압력 4bar에서 2.4m/s의 최고 피스톤 속도를 나타냈으며 평균유효압력 또한

증가하였다.

- 4) 점화 시기 1ms, 3ms, 5ms을 비교하였을 때 3ms (BTDC 3mm)에서 연소실 내 압력최고압력이 가장 높아 피스톤의 최대행정이 비교적 컸다. 점화시기를 좀 더 다양화 하여 실험한 결과 실린더 내 압력은 점화시기 3.5ms(BTDC 2.3mm)에서 최대값을 보였다. 추후 실험에서 점화시기를 다양화하여 점화시기에 따른 피스톤의 최대 행정에 대하여 더 알아 볼 필요성이 있다.
- 5) 현재는 휴대용 파워팩을 위한 세라믹 리니어 엔진의 기초 설계와 변수에 대한 작동여부 및 가능성을 검증하는 차원으로 실험이 진행되었다.

본 연구를 통하여 수소를 연료로 하는 리니어 엔진의 작동 재현성을 확인하였다. 추후 압축공기 유로설계에 따른 유량을 측정하고, 소기 과정 시 흡기 포트의 각도와 크기를 최적화하여 리니어 엔진의 성능 및 효율 등을 평가 할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 “울산과학연구단지육성사업”의 연구비 지원에 의해 수행된 결과의 일부이며 관계자 여러분께 심심한 감사의 말씀드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) 이종태, 이성열, 이재천, 김용환, “수소엔진 개발에 관한 기초연구”, Conference of KSAE, 1998, pp. 59-63.
- 2) Willard W. Pulkrabek, “Engineering fundamentals of the international combustion engine, 2nd Edition”, Pearson Education, Inc., 2008, p. 148.
- 3) 이영재, 김강출, 표영덕, “리니어 동력시스템의 국내외 연구개발 현황”, 한국수소 및 신에너지학회, 추계 학술대회 논문집, 2004, pp. 135-151.
- 4) 노태석, 김강출, 우영민, 이용균, 규정인, 이영재, “소형 리니어 엔진의 동적 특성에 대한 연구”, Conference of KASE, 2006, pp. 1841-1846.