

## 부하 변화에 따른 리니어엔진의 동적·연소특성에 대한 연구

이재완<sup>1</sup> · 임옥택<sup>2†</sup> · 김강출<sup>3</sup>

<sup>1</sup>울산대학교 기계공학과 대학원, <sup>2</sup>울산대학교 기계공학부, <sup>3</sup>에너지기술연구원 에너지효율센터

### A Study About Effects of Changed Load on Dynamic · Combustion Characteristics of Linear Engine

JAEWAN LEE<sup>1</sup>, OCKTAECK LIM<sup>2†</sup>, GANGCHUL KIM<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduate of Mechanical Engineering, Ulsan University, 93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 680-749, Korea

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Ulsan University, 93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 680-749, Korea

<sup>3</sup>Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea

**Abstract** >> A linear engine has advantages in terms of volume and weight, because there are no rotating parts. Thus, it is considered that linear engines might be suitable in hybrid vehicles. However, the linear engine has challenges in terms of the engine ignition timing and efficiency, so the engine has not been commercialized yet. In this study, the dynamic and combustion characteristics of the linear engine might be specified by various loads which are changed by conductance. The engine used in this experiment consists of two combustion chambers, four compressors, two linear alternators and a mover with a piston head and magnets. The way fuel is supplied in the experiment is by propane fuel being mixed with air in the carburetor, then being delivered into combustion cylinders via compressors. In the experiment, conductance is altered from 0.04 to 0.16mho, and the ignition timing is ahead by just 5.0mm from the maximum stroke. As a result of the experiment, frequency, stroke, input calories and maximum pressure are decreased when the conductance is increased. Meanwhile, IMEP, generation efficiency and electric power are increased when the conductance is increased. Therefore, it might confirm that high conductance generates more efficient electric power, but that thermal efficiency is the highest in the state of 0.08mho.

**Key words** : Linear engine(리니어엔진), Linear alternator(리니어 발전기), Load(부하), Conductance(컨덕턴스), Dynamic characteristics(동적특성), Combustion characteristics(연소특성)

#### Subscripts

RE-EV: Range extended electric vehicle  
TDC: Top dead center  
aTDC: After top dead center

BDC: Bottom dead center  
IMEP: Indicated mean effective pressure  
COV: Coefficient of variation

#### 1. 서론

최근 배터리를 이용한 다양한 휴대용 상품들이 개발되고 있다. 그중에 전기자동차는 내연기관 자동차와 달리 화석연료를 사용하지 않아 배기가스가 전혀

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

[ 접수일 : 2013.3.26 수정일 : 2013.6.21 게재확정일 : 2013.6.30 ]

Copyright © 2013 KHNES

없고 가격이 저렴한 전기를 이용한다. 그러나 전기자동차는 제한적인 배터리의 성능 때문에 장거리 운행이 불가능하고 많은 충전인프라구축이 필요하다. 또한, 배터리의 충전시간이 매우 길기 때문에 장시간 연속적인 운행이 불가능하다. 이를 극복하고 전기차의 주행거리를 늘리기 위해서 주행중에 발전기를 이용하여 배터리를 충전하는 Range-Extended Electric Vehicle(RE-EV) 개발이 활발하다. 그러나 기존의 내연기관을 이용한 RE-EV는 크랭크샤프트와 플라이휠 등 불필요하게 회전하는 부품이 있어, 무게나 부피 측면에서 불리하다. 리니어엔진은 크랭크샤프트와 플라이휠 등 불필요한 부품이 없기 때문에 RE-EV에 Range-Extender로 적용시에 장점이 있고 리니어엔진은 압축비가 정해져있지 않기 때문에 다양한 연료를 자유롭게 사용할 수 있으며, 다양한 연소법의 적용이 쉽다.<sup>1,2)</sup>

리니어엔진을 이용한 파워팩은 앞으로 차세대 자동차인 전기자동차의 단점을 보완 할 수 있으나 리니어엔진은 사이클 마다 스트로크의 편차가 있어 점화의 제어가 어렵고 연소가 불안정하다. 또한, 체코에서 연구된 결과에 따르면 50cc 엔진에서 350W,<sup>3)</sup> 울산대에서 연구한 결과에 따르면 약22cc 엔진으로 110W로 출력이 상대적으로 낮으며 모두 압축공기를 사용하여 압축공기를 공급하는 추가적인 장치가 필요하다.<sup>4)</sup> 또한, 리니어엔진은 리니어엔진과 리니어발전기로 구성되어 있는데 이전의 연구들은 최종 출력에 대해서만 연구가 되어있다.

이에 본 연구에서는 압축기, 리니어발전기, 리니어엔진을 가지는 파워팩<sup>5)</sup>을 제작하고 리니어발전기의 부하에 따른 리니어엔진의 동적, 연소특성 및 리니어발전기의 발전특성을 컨덕턴스를 변화시켜 알고자 한다.

리니어엔진의 가장 큰 특징은 일반엔진과 달리 스트로크와 TDC가 정해져 있지 않고 다양한 변수에 의해 TDC가 결정된다. 또한 동적 특성이 변화하게 되면 그에 따른 연소특성도 같이 변하게 된다.

리니어엔진에 영향을 끼치는 다양한 변수를 알아

보기 위하여 리니어엔진에서 운동방정식을 식 (1)에 나타내었다.<sup>6,7)</sup>

$$P_t A - P_r A - F_f - F_c + F_{sl} - F_{sr} = m \frac{d^2 x}{dt^2} = ma \quad (1)$$

운동방정식은 양쪽실린더에서의 연소압력에 의해서 결정되는  $P_t A - P_r A$ 와 마찰에 의한 에너지 손실인  $-F_f$  그리고 압축기에 장착된 스프링력  $F_{sl} - F_{sr}$  그리고 리니어발전기와 무버의 자력, 발전기에 걸리는 부하에 의해 결정되는  $-F_c$  가 있다. 이와 같이 각 요소와 무버파트의 질량  $m$ 에 의해서 최종적으로 가속도  $a$ 가 결정된다. 각 행정시마다 결정된 가속도  $a$ 에 의해서 스트로크와 압축비가 결정된다.

리니어엔진에서 스트로크와 압축비를 결정하는 요소 중에 스프링력에 대한 연구는 선행연구로 진행을 하여 스프링력이 높을수록 스트로크가 증가하고 출력이 증가하는 결과를 얻었다.<sup>8,9)</sup> 본 연구에서는 부하에 따른 리니어엔진의 동적, 연소, 발전출력에 대하여 알아보하고자  $F_c$ 를 변경하고자 한다. 식(2)는  $F_c$ 에 대한 정리이다.

$$F_c = \frac{1}{R_t + R_L} \left( 1 - e^{-\frac{R_t + R_L}{L} t} \right) H^2 N_{coil}^2 4 B_m^2 \sin^2 \left( \frac{\pi x}{\tau} \right) \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

여기서  $R_L$ 을 제외한 요소는 리니어발전기 사양에 의해서 결정되고,  $R_L$ 은 부하기의 저항변화에 의해서 결정된다.  $\frac{1}{R_L} = G$ 로  $G$ 는 컨덕턴스이며 단위는 [mho]이다. 리니어엔진에서 컨덕턴스를 변화시키면  $F_c$ 가 바뀌어 엔진에 주는 부하가 변한다. 부하의 변화에 따라 리니어엔진은 스트로크와 압축비를 바꾸고 동적, 연소, 발전출력이 달라진다. 그러나 리니어엔진에서 컨덕턴스를 변화시켜 엔진의 부하를 변화시켰을 때에 대한 연구는 부족하다.

본 실험에서는 발전기용 리니어엔진에서 발전기의 컨덕턴스 조절을 통해 부하를 변화시켰을 때, 엔진의 동적 특성과 연소 특성 또한 발전출력이 어떻게 변하는지 알아보하고자 한다.

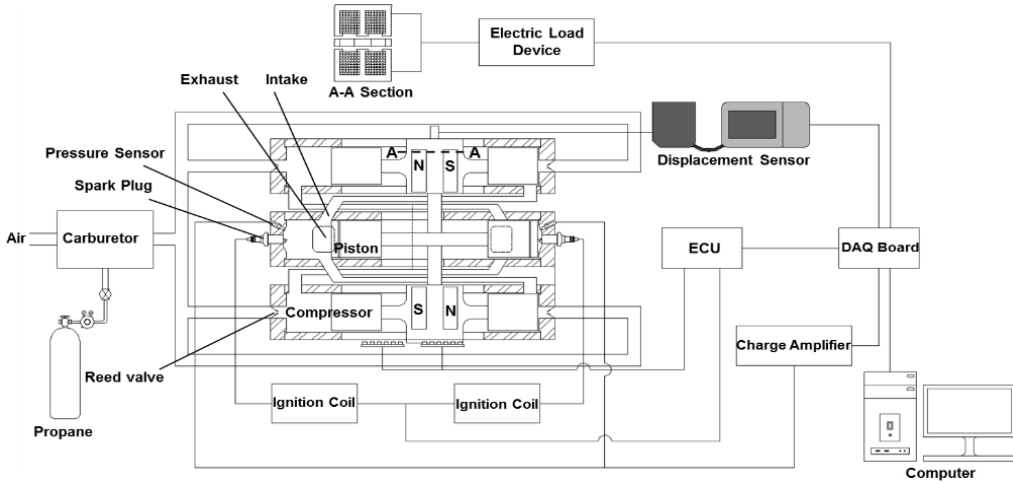


Fig. 1 A schematic of the experimental setup

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 중앙에 엔진의 연소실이 있으며 연소실에 압축공기를 엔진 자체에서 공급하기 위하여 연소실 양쪽에 피스톤의 힘으로 작동하는 압축기를 설계하였다.<sup>10)</sup> 엔진의 연소실은 Table 1에 나타낸 것과 같이 보어가 40mm 이고 최대로 운전 할 수 있는 스트로크는 49mm 이며 스트로크가 49mm 일 때 압축비는 약 46 이다. Fig. 2는 연소실의 형상의 측면도이다. 일반적인 엔진은 회전운동을 하므로 크랭크 축에서 TDC의 각도를 기준으로 하여 -30°aTDC ~ 10°aTDC 사이에 점화를 하는 것이 일반적이다. 그러나 리니어엔진은 크랭크 구조가 없기 때문에 각도를 기준으로 점화를 하는방법이 불가능하고, 피스톤이 특정위치에 왔을 때 점화를 해야 한다. 또한 TDC가 유동적으로 변하기 때문에 TDC를 기준으로 하지 않고 다른 기준점을 사용한다. 그래서 본 실험에서는 피스톤 커버 부분을 기준점(0mm, 최대 TDC)으로 하여 기준점으로부터 5.0mm 지점을 스파크 타이밍, 14.8mm 지점에서 모터링 트리거로 하였다. 즉 최대 TDC지점은 기준점이 되며 최대 BDC 지점은 49mm가 된다. 연소실은 측면에 흡기구가 양

Table 1 Engine specification

Engine type	Tow stroke linear engine
The number of cylinder	2
Bore [mm]	40
Maximum stroke [mm]	49
Maximum effective stroke [mm]	29
Compression ratio (Max.)	Various(46)

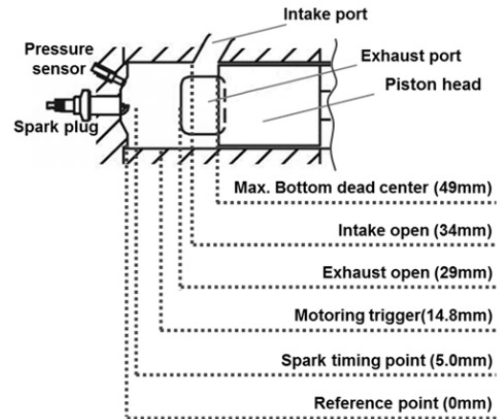


Fig. 2 A schematic of combustion chamber

방향으로 두 개가 있으며, 위쪽으로 배기구가 있다. 또한, 윤활을 적게 하여도 원활한 운전을 위하여 연소실을 알루미늄 세라믹으로 슬리브 형태로 제작하였고 연소실 피스톤역시 알루미늄 세라믹으로 제작

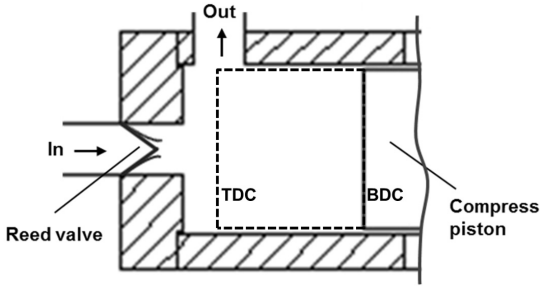


Fig. 3 A schematic of compressor

하였다. 그 외의 나머지 부분은 무게를 줄이기 위하여 알루미늄으로 제작하였다. 압축기는 두 개의 연소실 양옆으로 총 4개를 설계 하였으며 보어는 40mm이다. 압축기는 슬리브와 피스톤으로 구성되어있으며 경도향상과 경량성을 위하여 알루미늄을 아노다이징 코팅을 하여 제작하였고, 압축기피스톤에는 일반적인 엔진과 같이 피스톤링을 끼워서 사용한다. Fig. 3은 압축기의 단면도 이다. 압축기의 입구에는 리드밸브를 장착하여 압축기 피스톤이 BDC로 갈 때 압축기 내부의 압력이 떨어져서 흡기가 이루어지고 피스톤이 TDC로 갈 때 압축기 리드밸브에 의해서 역류가 방지되고 압축기 내부 압력이 상승하여 연소실쪽으로 혼합기가 원활하게 공급된다.

자석이 장착된 무버에는 연소실 피스톤과 압축기 피스톤이 연결되어 있어 피스톤이 움직일 때, 압축기가 같이 움직여서 공기를 흡입하고 연료는 압축기에서 흡입하는 흡입력을 이용하여 가스카브레터로 공급한다.

최초 설계시에는 압축기 내부에 스프링을 설계하였으나, 스프링이 압축기 공기 유동을 방해하여 스프링 없이 실험을 하였다.

## 2.2 실험방법

리니어엔진은 최초 모터링은 DC 48V 외부전원(DC POWER SUPPLY UP-5020)을 이용하여 리니어 발전기에 전원을 공급하면 무버파트는 플레밍의 왼손 법칙에 의해서 한쪽 방향으로 움직이게 된다. 이때 반대쪽 실린더에서 모터링 트리거 지점에서 피스

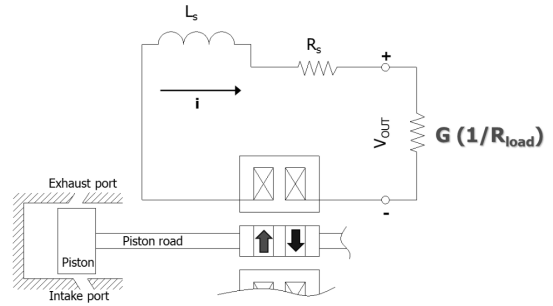


Fig. 4 Equivalent circuit of the linear alternator

Table 2 Experimental conditions

Spark timing (before cylinder cover) [mm]	5.0
Fuel type	Propane
Fuel input method	carburetor
Fuel pressure, Pf[MPa]	0.1
Intake temperature, Tin[K]	291±1
Conductance, G[mho] (1/Rload)	0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14, 0.16

톤의 위치를 검지하여 DC 48V 외부전원을 역극으로 공급하여 피스톤이 반대쪽으로 움직이게 한다. 모터링이 되면 압축기와 리드밸브에 의해서 공기의 흡입이 시작되고 가스카브레터에서 연료가 공급된다. 연료는 프로판(98%)를 0.1MPa로 공급하였다.

리니어엔진의 점화는 연소실 피스톤의 위치정보를 포토센서(SHARP, GP1S092HCPIF)를 이용해서 받아 기준점에서 5.0mm 지점에서 점화를 한다. 연소가 시작되면 연소의 힘에 의해서 피스톤은 움직이게 되고 모터링을 위한 외부전원은 공급을 중단한다.

Fig. 4는 리니어엔진의 발전 원리에 대한 그림이며, 피스톤이 연소에 의해서 움직이면, 그때 컨덕턴스의 값이 출력에 미치는 영향을 나타내었다.

컨덕턴스 변화에 따른 동적 및 연소특성의 변화를 알아보기 위하여 Table 2와 같이 컨덕턴스를 0.04에서 0.16mho까지 0.02mho씩 변화 시켰다. 컨덕턴스가 0.16mho를 초과 했을 때에는 엔진이 작동 되지 않았다.

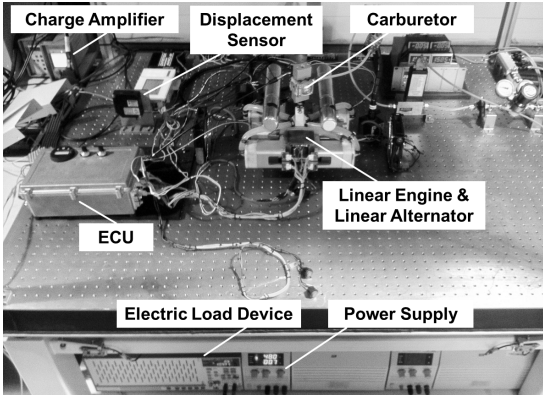


Fig. 5 Experimental system

### 2.3 데이터 취득방법

리니어엔진의 동적, 연소, 발전 특성을 연구하기 위하여 각 조건마다 2sec 동안의 무버의 변위와 실린더 내부압력 볼트와 암페어 연료의유량 등을 측정하였다.

무버의 변위는 레이저를 이용하여 삼각법으로 변위를 측정하는 레이저변위센서(CD5-W350)를 이용하였고 실린더 내부 압력은 압력센서(KISTLER, High-Temperature Pressure Sensor 6053C)를 이용하여 측정후 증폭기(KISTLER의 Charge Amplifier)를 이용 증폭하여 저장하였고, 발전력의 볼트와 암페어는 부하기(3260 Series High Power LOAD Operation Manual)를 이용하여 측정 저장 하였다. 연료의 유량은 열량형 유량계(LINE TECH, M2100V)를 사용하여 유량을 측정하여 저장하였다.

Fig. 5는 엔진실험을 위하여 모든 장치를 구성한 사진이다.

## 3. 실험결과

### 3.1 동적특성

Fig. 6 는 엔진의 기본 동적 특성인 변위와 속도 가속도를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 컨덕턴스가 증가함에 따라서 동일한 시간에 대한 엔진의 사

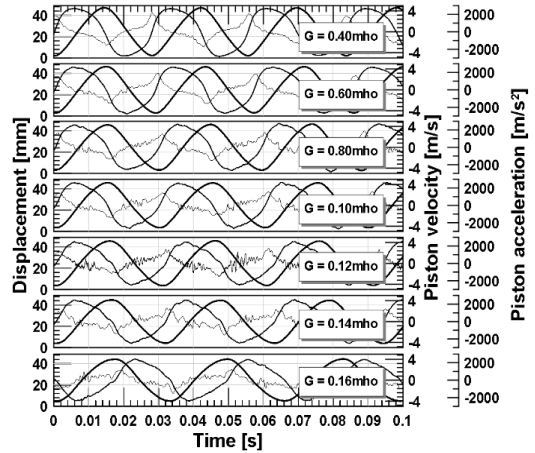


Fig. 6 Displacement, piston velocity and piston acceleration of various conductances based on time

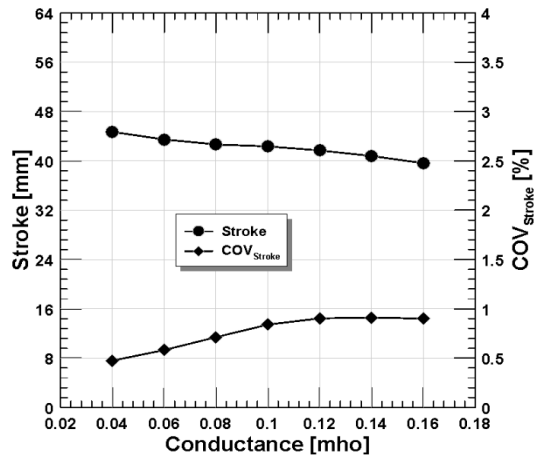


Fig. 7 Effects of conductance on stroke and COV<sub>stroke</sub>

이클 회수가 감소하였다.

리니어엔진은 각종변수에 의해서 스트로크가 결 변경된다. 그래서 컨덕턴스를 변화 시켰을 때 스트로크와 변동계수(표준편차÷평균×100)를 알아보기 위하여 Fig. 7에 나타내었다. 스트로크는 레이저변위센서로 측정된 변위로 계산을 하였다. 컨덕턴스가 0.04 mho 일 때 스트로크가 가장 컸고, 컨덕턴스가 점점 증가함에 따라서 스트로크는 감소 하였고, 컨덕턴스가 0.16mho일 때 가장 낮은 0000mm의 스트로크를 가졌고 컨덕턴스가 0.16mho 이상일 때에는 엔진이 작동되지 않았다. 변동계수는 컨덕턴스가 증가 할수

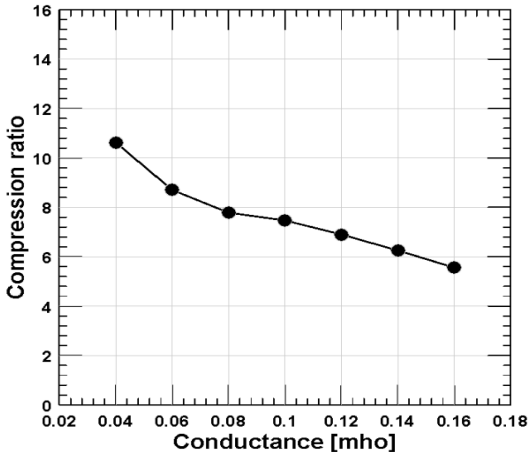


Fig. 8 Effects of conductance on compression ratio

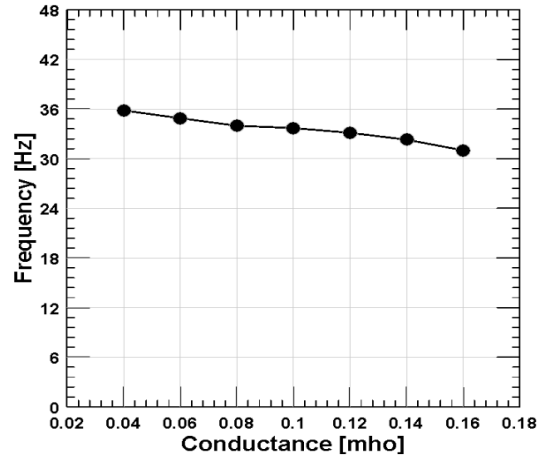


Fig. 10 Effects of conductance on frequency

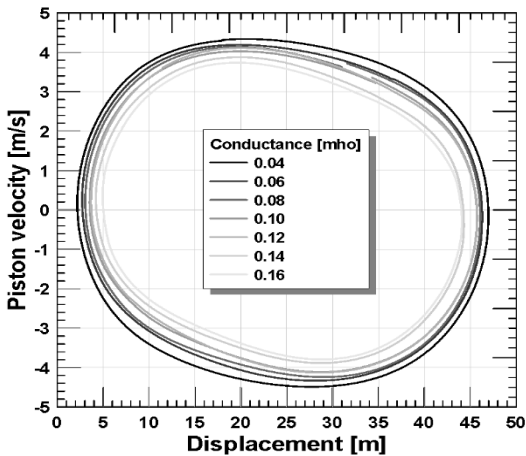


Fig. 9 Effects of conductance on piston velocity and displacement

록 증가하는 경향을 보였다.

리니어엔진에서 컨덕턴스의 변화는 스트로크를 변화시켜 압축비를 변화시킨다. 그래서 엔진의 스트로크에 따른 압축비의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 압축비는 전적으로 스트로크에 관련되어 있지만 스트로크가 커질수록 행정체적에 비해 간극체적이 크게 작아진다. 컨덕턴스가 0.04mho 일 때 압축비는 최대 10.8로 나타났고 컨덕턴스가 증가 할수록 감소하여 컨덕턴스가 0.16mho일 때 압축비가 5.7로 나타났다.

Fig. 9 은 피스톤속도와 변위의 그래프를 각 컨덕

턴스에 따라 그린 것이다. 스트로크가 클 때 피스톤 속도가 높게 나타났고, 컨덕턴스는 낮았다. 피스톤 속도를 좀더 자세히 알아 보기 위하여 피스톤 프리퀀시(1초당 피스톤의 행정수)를 Fig. 10에 나타내었다. 컨덕턴스가 가장 낮을 때 가장 높은 프리퀀시를 보였고 컨덕턴스가 증가 할수록 피스톤 프리퀀시가 감소 하였다.

### 3.2 연소특성

Fig. 11은 연소특성을 분석하기 위하여 가장 기초 데이터인 압력특성을 시간에 따라 나타내었다. 또한, Fig. 12는 리니어엔진에서 컨덕턴스에 따른 P-V 선도 이다. 최고 압력의 경향을 컨덕턴스가 증가 할 때 감소 하는 경향을 보인다. 최고압력과 최고압력의 변동계수를 Fig. 13에 나타내었다. 최고압력은 컨덕턴스가 증가 할수록 감소하였다 이것은 앞서 3.1 동적 특성에 Fig. 7 과 Fig. 8에서 스트로크가 감소하여 압축비가 낮게 나타났기 때문에 연소시에 낮은 압축비에서 연소가 이루어 졌기 때문이다. 최고압력의 변동계수는 컨덕턴스에 따른 큰 변화 없이 8% 정도로 비슷하게 나타났다.

엔진의 출력을 알아보기 위하여 IMEP를 계산하였다. IMEP는 1사이클 동안에 압력의 평균값으로 계산

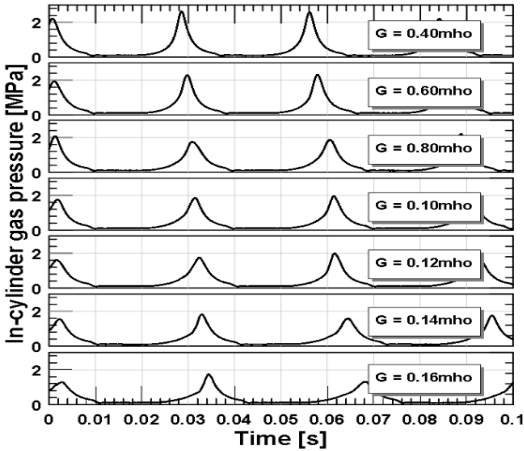


Fig. 11 In-cylinder gas pressure of various conductances based on time

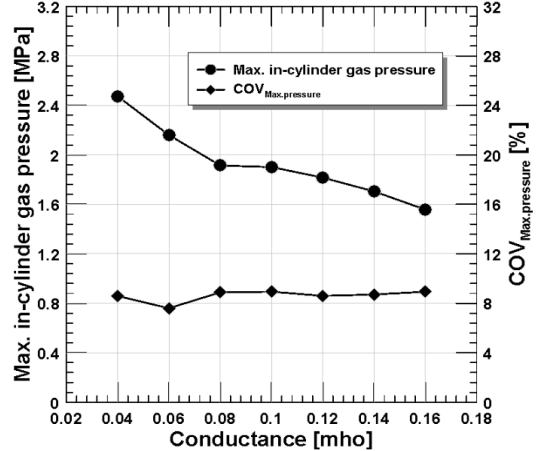


Fig. 13 Effects of conductance on max. in-cylinder gas pressure and  $COV_{max}$  in-cylinder gas pressure

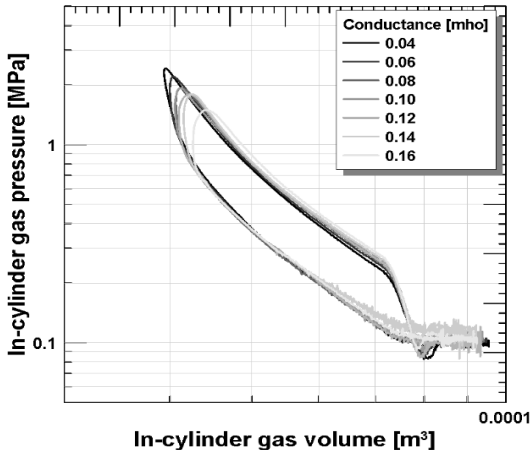


Fig. 12 In-cylinder gas pressure and In-cylinder gas volume at various conductances

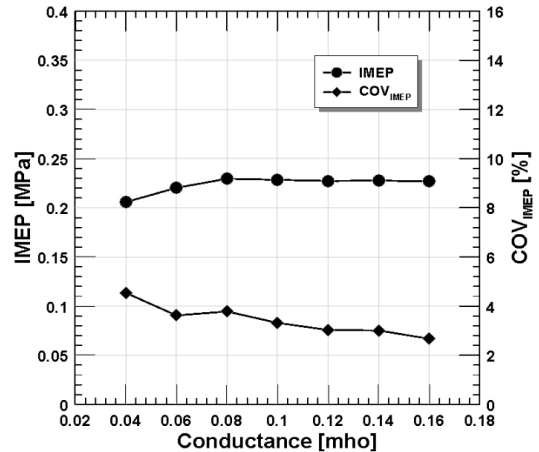


Fig. 14 Effects of conductance on IMEP and  $COV_{IMEP}$

하였다. Fig. 14는 각 컨덕턴스 값에 따른 IMEP값과 IMEP의 변동계수이다. IMEP는 최고 압력과 달리 컨덕턴스가 0.04mho 일 때 약 0.2MPa에서 컨덕턴스가 증가할수록 증가하였고, 컨덕턴스가 0.08mho 일 때 0.23MPa에 도달했고, 이후 컨덕턴스가 증가하여도 약 0.23MPa로 비슷하게 유지되었다. IMEP의 변동계수는 스트로크의 변동계수와 달리 컨덕턴스가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다.

본 실험의 연료 공급장치는 카브레터를 사용하여 압축기에 의해서 공기가 흡입되고 흡입유량에 따라 카브레터에서 연료투입열량이 변하게 된다. Fig. 15

는 각 컨덕턴스 조건별로 연료투입량을 열량으로 표시하였다. 투입열량은 열량형 유량계에서 나온 유량에 밀도와 발열량을 곱하여 구하였다. 또한 IMEP와 프리퀀시를 이용하여 시간당 엔진의 일을 표시하였다. IMEP와 프리퀀시를 이용하여 엔진일을 구하고 엔진일을 투입열량으로 나누어 열효율을 계산하였다. 열효율은 Fig. 16에 나타내었다. 열효율은 컨덕턴스가 0.08mho일 때 가장 높게 나타났는데 이때의 압축비는 약 1:8이다. 일반적으로 열기관은 압축비가 높을수록 열효율이 높게 나타난다. 그러나 본 실험에서는 열효율이 0.08mho에서 가장 높게 나타나는데,

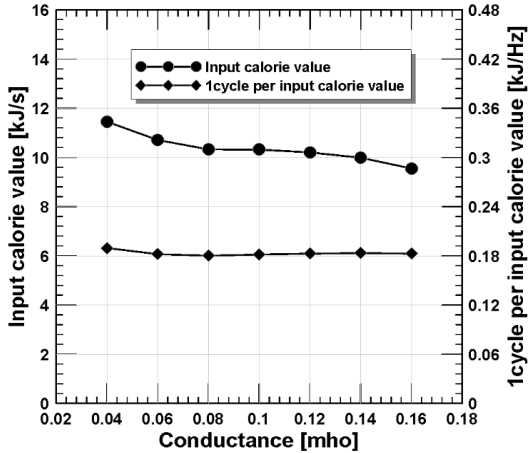


Fig. 15 Input calorie value and 1cycle per input calorie value at various conductances

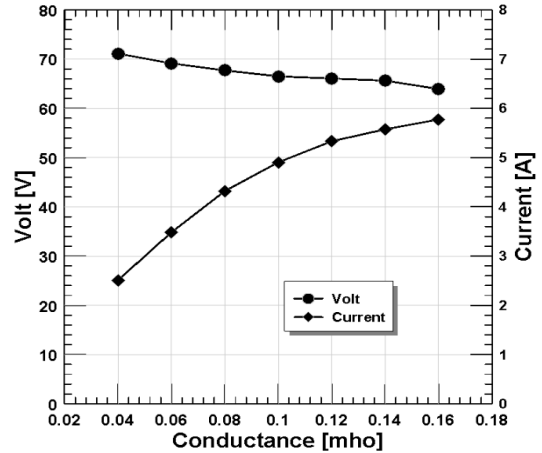


Fig. 17 Effects of conductance on volts and currents

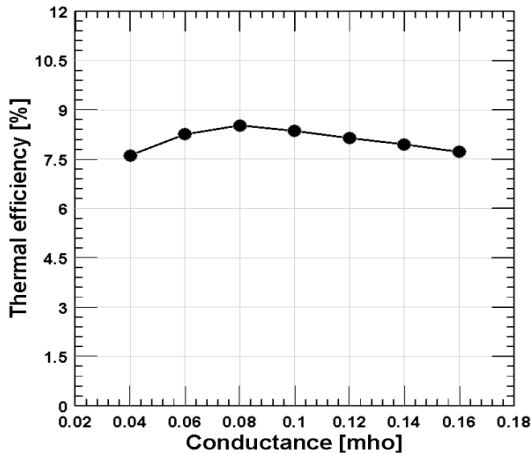


Fig. 16 Effects of conductance on thermal efficiency

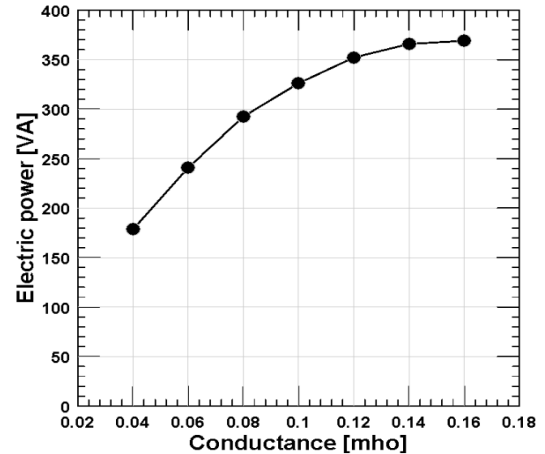


Fig. 18 Effects of conductance on electric power

이러한 현상은 점화타이밍을 5.05mm로 고정하여 실험을 하였기 때문에 점화타이밍에 가장 알맞은 스트로크가 0.08mho에서 형성되었기 때문이다. 또한, Fig. 14에서 압축비가 올라갈수록 IMEP의 변동계수가 상승하였는데 이러한 불안정성의 상승에 의해 압축비가 상승함에도 열효율이 감소되었다.

전체적인 열효율은 일반적인 엔진에 비해 비교적 낮게 나타났는데, 이 현상은 2행정 엔진에서 혼합기가 연소실로 모두 들어가지 않고 바로 배기구로 나가는 단절행정이 생기기 때문이며, 포트분사나 직접분사를 통해 개선이 필요하다.

### 3.3 발전특성

컨덕턴스에 따라 발전되는 전기와 전압, 전류 값이 변하게 된다. Fig. 17은 다양한 컨덕턴스에 따른 전압과 전류이다. 전압은 컨덕턴스가 증가할수록 미세하게 감소하였다. 그리고 전류는 컨덕턴스가 증가할수록 증가하였다. 특히 전압은 동적특성인 Fig. 10의 프리퀀시와 같은 경향을 보였다. 일반적인 원동형 발전기에서는 rpm에 따라 전압이 변하기 때문에 일정한 전압을 얻기 위해서 발전기는 일정한 rpm으로 구동된다. 리니어발전기도 동일하게 프리퀀시에 의



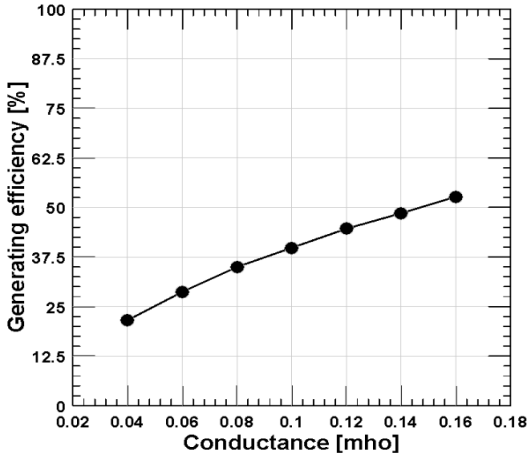


Fig. 19 Effects of conductance on generating efficiency

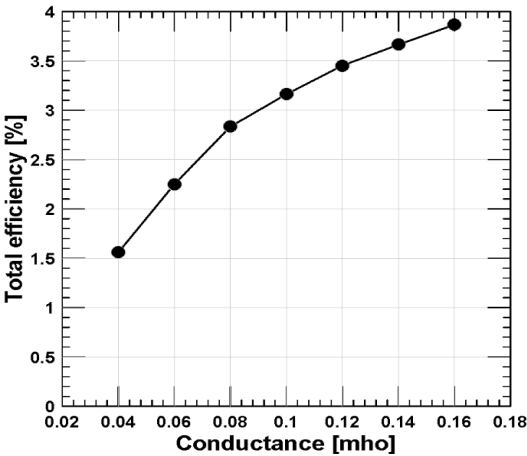


Fig. 20 Effects of conductance on total efficiency

해서 전압이 변하는 것을 확인 할 수 있었다. 전류는 컨덕턴스가 높을수록 컨덕턴스와 비례하여 생산량이 증가하였다.

최종적으로 발생하는 전기(VA)를 Fig. 18에 나타내었다. 발전량은 전압과 전류의 곱으로 계산하였으며, 컨덕턴스가 0.04mho일 때 약 175VA를 발전하였고, 컨덕턴스가 증가할 때 증가하였으나 프리퀀시가 감소하는 영향으로 점점 증가폭이 줄어들었다. 최종적으로 컨덕턴스가 0.16mho일 때 약 365VA를 발전하였다. 컨덕턴스가 0.16mho 이상일 때에는 엔진작동이 원활하게 되지 않았다.

엔진의 발전효율(발전량/엔진일)을 Fig. 19에 나타내었다. 발전효율은 전적으로 컨덕턴스에 의존하는 경향을 보이며, 컨덕턴스가 높을수록 높은 발전효율이 나타났으며, 컨덕턴스가 0.16mho 일 때 약 53%로 나타났다. 발전효율은 발전량을 엔진일로 나누어 계산을 하여 마찰일, 압축기 내부의 일 등이 고려되었음에도 불구하고 컨덕턴스가 0.18일 때 50%가 넘게 높은 효율을 보였다.

Fig. 20은 최종효율(발전량/투입열량)이다. 최종효율은 열효율의 변화량이 작기 때문에 발전효율에 많이 의존하며 컨덕턴스가 높을수록 많은 효율이 나왔다.

### 4. 결 론

본 실험은 리니어엔진을 적용한 발전기에서 부하 변화가 리니어엔진과 리니어발전기에 어떤 영향을 끼치는지 알아보기 위해 컨덕턴스를 변화시켜 실험을 하였다.

- 1) 컨덕턴스는 전기저항의 역수이며 컨덕턴스가 증가하면 리니어발전기에 부하가 많이 걸려, 운동에너지가 전기에너지로 많이 변환된다. 그 결과 무버의 속도가 감소하여 스트로크와 압축비가 감소한다. 또한 무버의 프리퀀시도 감소한다.
- 2) 컨덕턴스가 낮을 때에는 압축비가 높기 때문에 연소시 최대 압력이 높게 나고, 컨덕턴스가 높을 때에는 압축비가 낮기 때문에 최대 압력이 낮게 나타난다. 그러나 IMEP는 최대 압력과 관계가 없이 컨덕턴스가 0.04mho에서 0.08mho까지는 증가하고 이후 비슷한 값을 유지한다.
- 3) 열효율은 IMEP와 투입 열량 프리퀀시에 의해서 결정이 되는데 컨덕턴스가 0.08mho일 때 가장 높은 효율을 보였고 이때 스트로크가 5.05mm 점화 타이밍에 대한 최적의 스트로크가 형성되었기 때문이다.
- 4) 리니어 발전기에서 전압은 컨덕턴스와 관계없이 엔진의 프리퀀시에만 의존한다. 그러나 전류는 컨덕턴스가 증가 할수록 증가한다.

- 5) 최종발전전력과 발전효율은 컨덕턴스가 높을수록 높게 나왔으며 컨덕턴스가 높을수록 리니어발전기의 부하가 증가하여 스트로크는 감소하였으나, 리니어발전기에서는 저항에 의해 손실되는 에너지가 감소하여 큰폭으로 발전량이 증가하였다. 이 리니어엔진 발전기에서는 컨덕턴스가 0.16mho 일 때 가장 높은 발전 효율과 발전량을 보였다.
- 6) 리니어엔진 발전기의 발전량은 다양한 변수에 의해서 변하나, 다른 변수를 고정 시키고 컨덕턴스만 변화 시켰을 때에는 컨덕턴스를 높이는 것이 발전효율이 크게 상승한다. 그러나 열효율은 연료, 압축비, 점화타이밍, 엔진부하 등 다양한 변수에 의해서 결정된다. 그러므로 리니어엔진 및 리니어발전기를 설계 할 때에는 연소실을 먼저 설계하여 가장 높은 열효율을 나타내는 연소지점과 점화타이밍, 부하를 먼저 결정하고 이때 걸리는 부하에 맞는 리니어발전기를 최적화 시켜 설계를 해야 높은 열효율과 높은 발전효율을 얻을 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2013년 울산대학교 기계공학부 일류화 사업단의 연구비에 의하여 연구되었습니다.

## References

1. Douglas Carter and Edward Wechner, "The Free Piston Power Pack: Sustainable Power for Hybrid Electric Vehicles", SAE paper, 2003-01-3277, 2003.
2. Mikalsen R and Roskilly AP., "A review of free-piston engine history and applications", Applied Thermal Engineering, Vol. 27, pp. 2339-2352, 2007.
3. Pavel Nemecek, Michal Sindelka and Ondrej Vysoky, "Ensuring Steady Operation of Free-Piston Generator", SYSTMCECS, Vol. 4, pp. 19-23, 2006.
4. Yongil Oh, Gangchul Kim and Ocktaeck Lim, "A Study for Generating Power on Operating Parameters of Powerpack utilizing Linear Engine", KHNES, Vol 23, No. 2, pp. 183~190, 2012.
5. Douglas Carter and Edward Wechner, "The Free Piston Power Pack: Sustainable Power for Hybrid Electric Vehicles", SAE paper, 2003-01-3277, 2003.
6. Nguyen Ba Hung, Yongil Oh and Ocktaeck Lim, "The Research about Free Piston Linear Engine Fueled with Hydrogen using Numerical Analysis", KHNES, Vol 23, No. 2, pp. 162-172, 2012
7. Christopher M. Atkinson, Sorin Petreanu, Nigel N. Clark, Richard J. Atkinson, Thomas I. McDaniel, Subhash Nandkumar and Parviz Famouri, "Numerical Simulation of a Two-Stroke Linear Engine-Alternator Combination", SAE paper, 1999-01-0921, 1999.
8. Jaewan Lee, Yongil Oh, Gangchul Kim and Ocktaeck Lim, "The Experimental Research for the Combustion and Dynamic Characteristics of the Linear Engine on the Variable Spring Stiffness:", KHNES, Vol. 23, No. 6, pp. 619-627, 2012.
9. Nguyen Ba Hung, Yongil Oh, Kyuel Park and Ocktaeck Lim, "A Numerical Simulation for the Spring Hardness of a Free Piston Linear Engine", KHNES, Vol. 23, No. 4, pp. 404-411, 2012.
10. Pescara RP. Motor compressor of the free piston type. US Patent 2241, 957, 1941.