

리니어엔진을 이용한 파워팩의 운전조건에 따른 발전출력에 관한 연구

오용일¹ · 김강출² · 임옥택^{1†}

¹울산대학교, ²한국에너지기술연구원

A Study for Generating Power on Operating Parameters of Powerpack utilizng Linear Engine

YONGIL OH¹, GANGCHUL KIM², OCKTAECK LIM^{1†}

¹Department of Mechanical and Automotive Engineering, University of Ulsan, 102 Daehak street,
Nam-gu, Ulsan, 680-749, Korea

²Korea institute of Energy Research, 152 Gajeong street, Yuseong-gu, daejun, 305-343, Korea

Abstract >> The research shows the experiment results according to the combustion characteristics and configuration of the linear generator of powerpack for the generating power applying the 2-stroke compact linear engine. The powerpack used in this paper consists of 2-stroke linear engine, linear generator and air compressor parts. For identifying the combustion characteristics and generating power of linear engine, some parameters were varied such as electric load, fuel input calorie, spark timing delay and equivalence ratio. Also generating power was confirmed at each operation conditions, when the air gap length of linear generator part was changed as each 1.0 mm and 2.0 mm. During the all operations, intake air was inputted under the wide open throttle. Mass flow rate of air and fuel was changed using mass flow controller, after these were premixed by premixture device, and then premixed gas was supplied directly into each cylinder. As a result, piston frequency and combustion characteristics were different at each conditions according to parameters affecting the combustion such as fuel input calorie, resistive load, spark timing delay and equivalence ratio. Consequently, these had an effect on generating power.

Key words : Linear engine(리니어엔진), Linear generator(선형 발전기), Generating power(발전 출력), Input calories(투입 열량), Spark timing delay(점화시기 지연), Equivalence ratio(당량비), Air gap(에어갭)

Nomenclature

$L_{air\ gap}$: length between stator and translator, mm

LPM : flow ratio, liter per minute

V_{rms} : effective value of voltage, V

A_{rms} : effective value of ampere, A

aTDC : after top dead center, mm

bTDC : before top dead center, mm

1. 서 론

최근 환경오염과 에너지 고갈 및 대체 에너지 선
정 문제로 인하여 대체 고효율 내연기관과 하이브리
드 전기 자동차에 대한 연구가 큰 관심을 받고 있다.

[†]Corresponding author : otlim@ulsan.ac.kr

[접수일 : 2012.4.2 수정일 : 2012.4.16 게재확정일 : 2012.4.27]

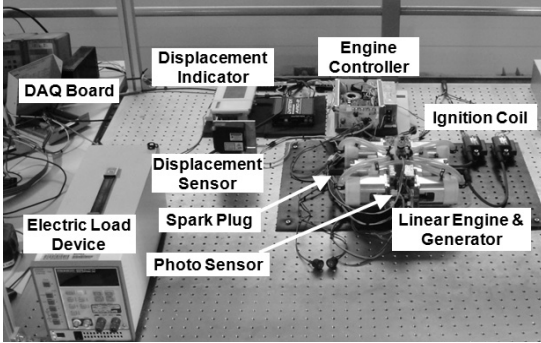


Fig. 1 A photograph for experimental setup

수많은 대체 내연기관 구성은 연비 향상과 배기 가스배출량을 줄이는 목적으로 연구되어지고 있다.

프리피스톤 엔진에 대한 연구는 프리피스톤 타입의 엔진 구성의 첫 제안 후 20세기 중반까지 정체되어 왔다. 하지만 프리피스톤 타입의 엔진은 그의 장점인 높은 효율성과 낮은 배출가스를 바탕으로 다시 한 번 관심을 얻고 있고, 수많은 연구진들은 프리피스톤 타입의 엔진을 향후의 대체 파워트레인, 하이브리드 자동차 시스템의 보조전원 및 리니어발전기를 접목한 리니어 교류발전기로 사용하는 것에 대한 연구를 시작하였다¹⁾.

프리피스톤 리니어엔진은 선형으로 운동하는 내

연기관이므로 크랭크샤프트와 같은 회전하는 부품이 존재하지 않는다²⁾. 기존 내연기관 내에서 큰 부피를 차지하는 부품이 존재하지 않으므로 그 설계 및 조립이 간단하여 경제적인 이득이 있을 뿐만 아니라 비교적 마찰손실이 적은 구조이다³⁾.

West Virginia University에서 행하였던 기존 연구 중 몇 가지를 살펴보면, 점화장치를 장착한 SI 리니어엔진의 안정적인 운전을 시연하고 다양한 결과를 도출했던 것을 알 수 있다. 리니어제너레이터는 리니어엔진과 성공적으로 결합되어 구동되었고, 하이브리드 차량의 추진에 적합하지는 않지만 어느 정도의 안정적인 전기출력을 생성하였다⁴⁻⁸⁾.

하지만 현재까지 발표된 연구결과에서는 리니어엔진의 어떠한 운전조건으로 인하여 리니어제너레이터의 발전출력이 영향을 받는가에 대한 연구내용이 매우 부족하다.

이에 본 연구에서는 2행정 리니어엔진을 적용한 파워팩의 발전출력과 이에 영향을 미치는 주요 인자를 파악하기 위해 연료의 투입 열량, 당량비 등과 같은 열역학적 조건과 점화시기 지연, 전기부하, Air gap length(이하 $L_{air\ gap}$) 등의 조건들을 가변시켜 엔진 성능시험을 실시하였다.

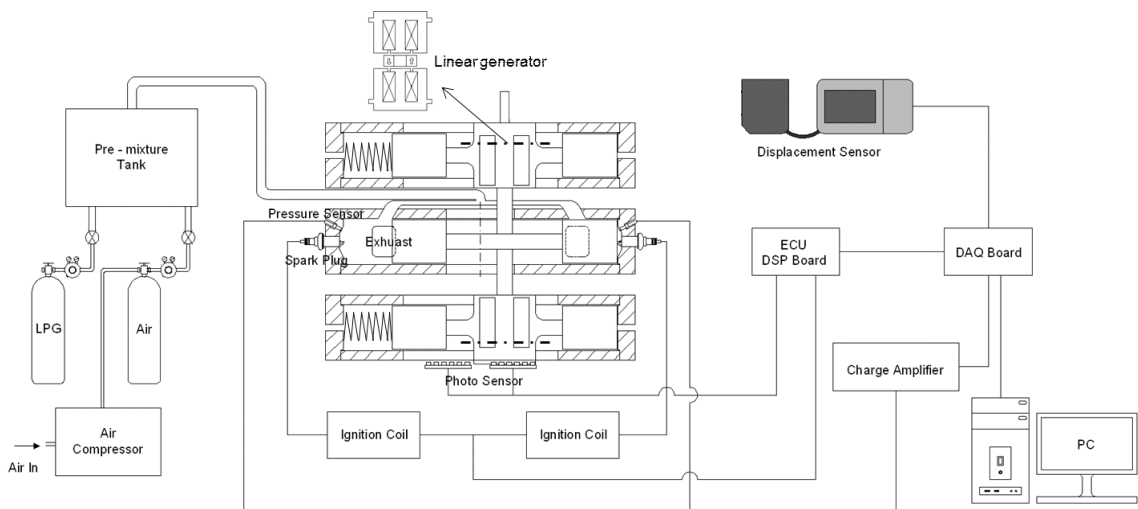


Fig. 2 A Schematic diagram of the experimental setup

Table 1 The specifications of compact linear engine

Parameters	Value
Engine type	Two-stroke linear engine
Bore [mm]	30
Maximum stroke [mm]	31
Effective max. stroke [mm]	18
Translator mass [kg]	0.8
Scavenging type	Cross-scavenged type
Compression ratio	varied
Max. compression ratio	27.23

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 실험 장치와 개략도를 Fig. 1 과 Fig. 2에 나타냈으며, 실험에 사용된 리니어엔진의 제원과 실험조건을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 기존의 파워팩은 엔진과 제너레이터를 축을 이용하여 직렬로 연결하기 때문에 회전형 발전기가 사용되었다. 하지만 본 실험에서는 리니어엔진과 일체형으로 리니어 제너레이터를 제작하여 전체적으로 시스템의 크기 및 부피를 최소화할 수 있도록 설계하였다⁹⁾. 실험 장치는 크게 리니어엔진 및 제너레이터, 센서와 점화장치 및 엔진 제어부, 데이터 취득부로 구성되었다.

2.1.1 리니어엔진 및 제너레이터

Fig. 3은 리니어엔진 연소실의 개략도를 나타내었

Table 2 Experimental conditions

Parameters	Value
Fuel type	Propane
Input calories value [kJ/s]	4.56, 5.21, 5.88, 6.53
Spark timing delay [ms]	0.5, 1.0, 1.5, 2.0
Equivalence ratio	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2
Air gap length	1.0, 2.0
Electric load	5, 10, 15, 25, 30, 40

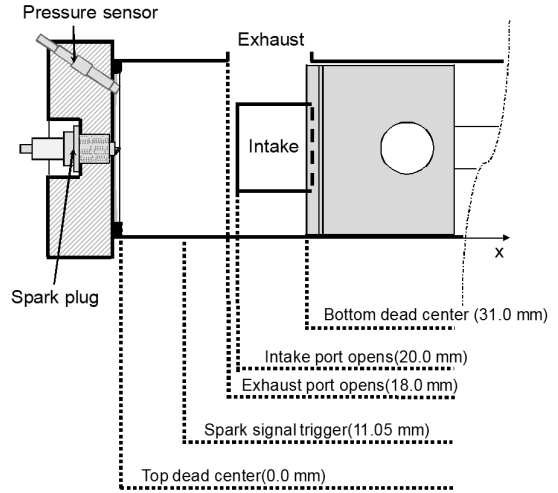


Fig. 3 A schematic diagram of the cylinder chamber

다. 리니어엔진의 총 행정길이는 31mm 이며 배기포트가 닫히고 나서 이루어지는 유효 행정길이는 18mm 이다. 리니어엔진은 각 행정마다 변동이 심한 운동특성을 가지므로 압축비 변동이 존재한다¹⁰⁾. 본 연구에서 사용된 리니어엔진의 설계상 최대 압축비는 27.23 이다.

Fig. 2에 리니어제너레이터의 위치와 개략적인 단면도를 나타내었으며, Fig. 4에 더욱 자세히 묘사하였다.

리니어제너레이터는 엔진 시동 시, 엔진 시동모터

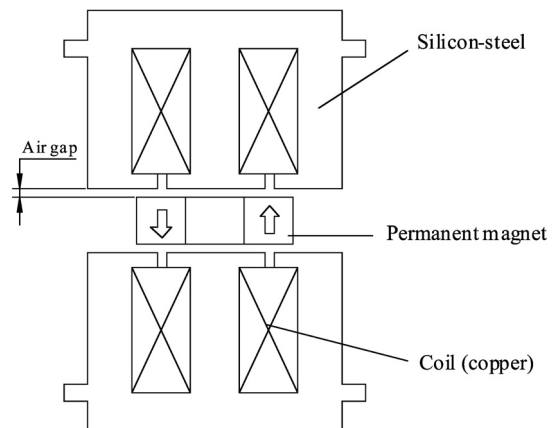


Fig. 4 A cross-sectional view of linear generator

역할을 하게 되며 점화가 일어나면 아주 짧은 사이클 동안 모터링과 점화가 동시에 일어난다. 그 짧은 사이클이 지나고 나면 리니어제너레이터는 시동모터 역할 대신 전기출력을 발전하는 발전기 역할을 하게 된다. 리니어엔진의 연소가 시작되면 이동자는 고정자를 지나게 되고 이들 사이의 왕복운동과 패러데이 법칙에 의하여 리니어제너레이터에서 전압이 유도된다.

영구자석을 사용한 리니어제너레이터는 기존의 로터리 발전기와 똑같은 기본적인 물리적 원리에 의하여 작동하기 때문에, 발전기에서 유도되는 전압은 식 (1)으로 표현되는 패러데이 법칙에 근거한 것이다¹¹⁾.

$$\varepsilon = -\frac{d\lambda}{dt} = -N_{coil} \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

$L_{air\ gap}$ 은 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 리니어제너레이터부의 이동자와 고정자 사이의 거리로 정의되며, 설계구조상 기본거리는 1mm 이다.

2.1.2 데이터 검지부 및 취득부

리니어엔진 이동자의 위치를 실시간으로 검지하기 위하여 광학 변위센서(KAIS Co. ; KL3A-N1)를 사용하였다. 또한, 이동자의 위치를 광투과형 포토센서(Sharp ; GP1S092HCPIF)를 이용하여 검지하고 포토센서에서 발생한 디지털 신호는 엔진제어기(ECU)로 입력된다. ECU에 입력된 디지털 신호는 Matlab simulink에 의하여 설정된 만큼 시간이 지연되어 점화코일(Dynatek ; ARC-2)로 보내지고, 지연된 신호를 받은 점화장치는 점화플러그(Denso ; UF22)로 신호를 실시간으로 보내어 점화 및 연소가 이루어지게 된다. 이동자가 포토센서에 의해 검지되는 위치는 Fig. 3에 나타내었다. 또한, Kistler 사의 압력센서(Kistler ; 6052C)를 이용하여 Front 및 Rear 연소실 압력을 측정하였고 증폭기(Kitsler ; 5018A)를 통하여 신호를 증폭시킨 후 최종적으로 아날로그 신호로 데이터를 취득하였다. 이동자의 위치, 연소실 압력 및 점화신호의 샘플링 시간은 100kHz 이었고, 각 센서에서 취

득한 데이터는 DAQ보드를 거쳐 컴퓨터에 텍스트 파일로 저장되었다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 리니어제너레이터가 결합된 2행정 리니어엔진을 이용하여 연료의 투입 열량, 점화시기 지연 및 당량비와 같은 열역학적 조건과 리니어제너레이터부의 이동자와 고정자 사이의 거리인 $L_{air\ gap}$ 와 같은 하드웨어적 조건을 변경하여 여러 가지 조건에서 리니어엔진의 발전출력에 관한 실험을 하였다.

첫째, 연료의 투입 열량과 전기부하에 따른 발전출력을 알아보기 위하여 프로판을 4.56, 5.21, 5.88, 6.53kJ/s 조건으로 공기와 예혼합하여 투입하였고, 당량비를 1.0으로 고정시키기 위해서 일정한 흡기 공급압력 하에서 흡기의 유량을 70, 80, 90, 100LPM으로 가변시켰다. 이와 동시에 전기부하를 5, 10, 15, 20, 30, 40Ω으로 가변시켰다.

이를 제외한 나머지 변수인 당량비, 점화시기 지연 및 $L_{air\ gap}$ 은 각각 1.0, 1.5ms 그리고 2.0mm으로 고정한 상태에서 엔진성능실험을 실시하였다.

둘째, 점화시기 지연에 따른 리니어엔진의 발전출력을 확인하기 위하여 엔진제어기에 설치된 Matlab simulink를 수정하여 점화시기 지연을 0.5, 1.0, 1.5, 2.0ms 으로 가변시켰다. 그리고 당량비 1.0 과 전기부하를 20Ω 으로, $L_{air\ gap}$ 및 연료의 투입 열량을 각 1mm와 5.88kJ/s 으로 고정시켰다.

리니어엔진의 구조적 특성으로 인하여 점화시기 지연은 이동자의 위치에 종속되어 가변되었다. 이동자에 달린 플레이트가 포토센서에 검지되어 5V의 디지털신호가 포토센서에서 엔진제어기로 전달되면 제어기에 입력된 Matlab simulink에서 점화시기를 0.5ms 부터 2.0ms 까지 각0.5ms 씩 지연시켜 점화장치로 신호를 보내는 방식으로 점화시기를 가변시켰다.

셋째, 당량비 조건에 따른 발전출력을 확인하기 위한 실험조건은 다음과 같다. 공기유량은 90.0 LPM으로 고정시키고 연료의 투입 열량을 각 4.70, 5.29,

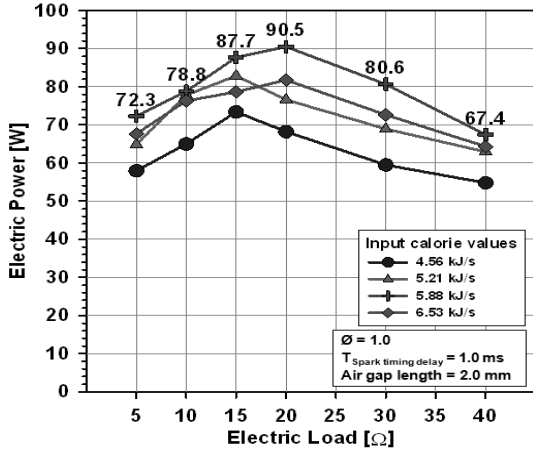


Fig. 5 The effects of fuel input calories on electric power output

5.88, 6.46, 7.05kJ/s 으로 하여 당량비를 0.8~1.2 까지 0.1 씩 가변시켰다. 이 때, 전기부하, $L_{air\ gap}$ 및 점화시기 지연은 각 30Ω, 1.0mm, 1.5ms 으로 고정시켰다.

마지막으로 $L_{air\ gap}$ 와 전기부하에 따른 발전출력을 확인하고자 $L_{air\ gap}$ 를 각 1.0mm와 2.0 mm 으로 가변시키고, 각 조건에서 전기부하를 5, 10, 15, 20, 30, 40 Ω으로 가변시켜 엔진성능실험을 실시하였다. 실험 시 당량비는 1.0, 점화시기 지연 1.5 ms, 공기유량 90.0LPM 그리고 연료의 투입 열량은 5.88kJ/s 으로 고정시켰다. $L_{air\ gap}$ 는 리니어제너레이터부의 고정자와 이동자 사이의 거리로 정의되며, 기본적으로 1mm 정도의 거리로 설계되었다. $L_{air\ gap}$ 는 리니어제너레이터의 고정자와 지지부 사이에 1.0mm 의 얇은 판을 넣어 가변시켰다.

리니어엔진의 연소가 시작되면 이동자는 고정자를 사이에서 왕복운동을 하게 되고, 리니어제너레이터는 초기 엔진의 시동을 거는 모터링모드에서 발전출력을 받는 연소모드로 역할이 바뀌게 된다. 고정자 사이에서의 이동자 왕복운동이 패러데이 법칙에 의해 전압이 유도되고 발전출력이 생성된다. 본 연구에서는 발전출력을 파악하기 위하여 리니어제너레이터의 고정자에 스크로메터(Fluke; Scope meter 199c)를 연결하여 전압과 전류의 실효치인 V_{rms} 와 A_{rms} 값을 측정하였고, 두 실효치를 곱함으로써 발전출력을 구하였다.

3. 실험 결과

3.1 연료의 투입 열량변화

전기부하와 연료의 투입 열량에 따른 리니어엔진의 발전출력특성을 파악하고자 당량비를 1.0, 점화시기 지연을 1.0ms, $L_{air\ gap}$ 을 2.0mm 으로 고정하여 엔진성능실험을 실시하였고, 이에 따른 실험 결과를 Fig. 5 에 나타내었다.

전기부하는 전기부하장치를 이용하여 리니어엔진의 제너레이터부의 저항을 직접적으로 걸어주고, 그 값을 5~40Ω 까지 각각 5Ω 씩 증가시켰다.

질량유량계를 이용하여 연료의 공급유량을 가변시켰고 이를 통하여 연료의 투입 열량은 4.56, 5.21, 5.88, 6.53kJ/s 으로 각각 가변되었다. 또한 연료의 투입 열량과 전기부하에 따른 발전출력을 알아보기 위하여 프로판을 4.56, 5.21, 5.88, 6.53kJ/s 조건으로 공기와 예혼합하여 투입하였고, 당량비를 1.0으로 고정시키기 위해서 일정한 흡기 공급압력 하에서 흡기의 유량을 70, 80, 90, 100LPM으로 가변시켰다. 이와 동시에 전기부하를 5, 10, 15, 20, 30, 40Ω 으로 가변시켰다.

실험 결과, 연료의 투입 열량과 공기유량 및 전기부하가 각각 5.88kJ/s, 90LPM, 20Ω 조건에서의 전압과 전류의 실효치는 각 43.5V, 2.08A 였으며, 가장 높은 발전출력인 90.48W이 생성되었다.

연료의 투입 열량은 질량유량계로 조절된 연료의 질량유량에 밀도 및 저위발열량을 곱하여 나타내었다. 리니어엔진 특성상 각 사이클 마다 행정의 변화가 크기 때문에 연료의 투입 열량의 단위를 kJ/cycle 대신 kJ/s 로 정의하였다.

연료의 투입 열량이 증가할수록 발전출력이 증가하는 것을 Fig. 5을 통하여 확인할 수 있다. 각 연료의 투입 열량 조건에서 전기부하가 20Ω 에서 40Ω 으로 증가할수록 발전출력이 증가하는 경향을 보였으나 20Ω 이상으로 증가하면 오히려 발전출력이 감소하는 경향을 보였다. 이는 일정이상의 전기부하는 이동자의 스트로크 및 속도에 미치는 부정적인 영향 때문이라고 생각된다.

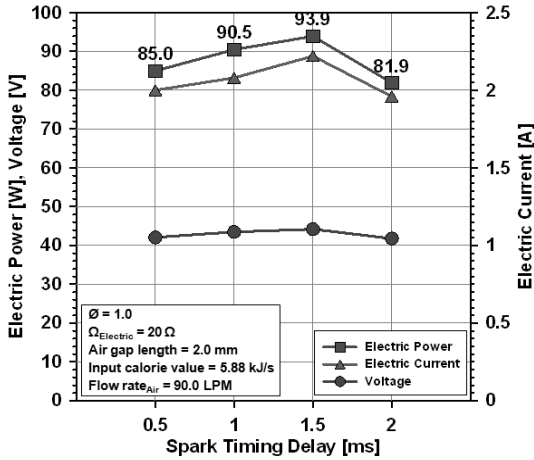


Fig. 6 The effects of spark timing delay on electric power output

3.2 점화시기지연 변화

점화시기 지연에 따른 발전출력특성에 대한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

3.1절에서 언급한 연료의 투입 열량과 전기부하에 따른 발전출력 실험결과에서 최대발전출력이 생성되었던 전기부하 20Ω, 연료 투입 열량 5.88kJ/s 과 그 외의 조건들은 동일하게 한 상태에서 점화시기를 가변시켜 그에 따른 발전출력특성을 파악하였다.

본 실험에서 점화시기 지연의 정의는 다음과 같다. 리니어엔진의 이동자의 왕복운동 시 이동자에 부착된 플레이트가 포토센서에 검지되고, 5V 의 디지털 전기신호가 포토센서에서 엔진제어기로 전달된다. 포토센서신호를 받는 엔진제어기는 그 시점을 기준으로 각 0.5, 1.0, 1.5, 2.0ms 만큼 출력신호를 지연시켜 점화장치로 보내는 것이다.

실험 결과, 점화시기 지연이 증가할수록 발전 출력이 증가하는 경향을 보였다. 특히 점화시기를 1.5ms 로 지연하였을 때 발전출력이 93.9W로 각 조건들 중 가장 높은 발전출력이 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 점화시기 지연을 1.5ms 로 했을 때 다른 조건에 비해 피스톤이 aTDC 근처에서 점화가 이루어 졌다고 판단할 수 있다. 점화시기 지연을 2.0ms 로 했을 경우 발전출력은 오히려 감소하였다.

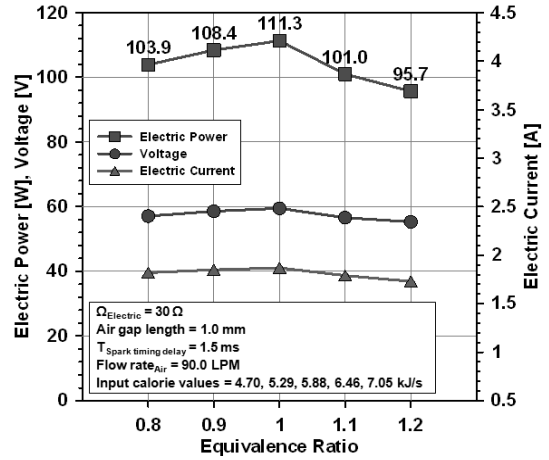


Fig. 7 The effects of equivalence ratio on electric power output

3.3 당량비 변화

당량비에 따른 발전출력변화를 Fig. 7에 나타내었다. 당량비를 가변시키기 위하여 공기유량은 90.0LPM 으로 고정시키고 연료의 투입 열량을 각 4.70, 5.29, 5.88, 6.46, 7.05kJ/s 으로 가변시켜 당량비를 0.8~1.2 까지 각 0.1씩 변화도록 하였다. 이 때, 전기부하, $L_{air\ gap}$ 및 점화시기 지연은 각 30Ω, 1.0mm, 1.5ms 으로 고정하여 실험하였다.

당량비가 0.8에서 1.0까지는 V_{rms} 와 A_{rms} 가 증가하면서 결과적으로 발전출력이 증가하는 경향을 보였으나 당량비 1.0 이후로는 점차 감소하는 경향을 보였다. 당량비 1.0 조건에서 발전출력이 가장 높은 것을 확인할 수 있었으며, 이는 사이클 당 피스톤의 일이 증가하였거나 피스톤의 속도가 당량비 1.0 조건에서 가장 높았을 것이라고 판단되어진다. 이에 대한 근거 제시는 차후에 언급하도록 할 것이다.

3.4 Air gap length 변화

리니어제너레이터부의 고정자와 이동자 사이의 거리인 $L_{air\ gap}$ 의 변화에 따른 발전출력을 알아보기 위하여 실험을 하였다. 이 때, 당량비 1.0, 점화시기 지연 1.5ms, 공기유량 90LPM 그리고 연료의 투입 열

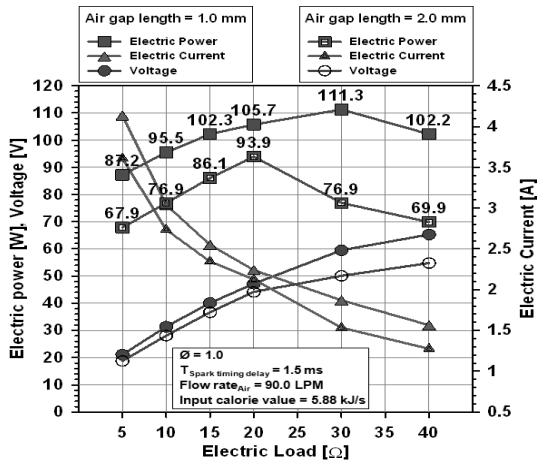


Fig. 8 The effects of air gap length on electric power output

량을 5.88kJ/s 으로 각 각 고정하였다.

고정자와 이동자 사이에 1.0mm 두께의 얇은 판을 추가하거나 제거하여 $L_{air\ gap}$ 을 1.0mm 과 2.0mm로 가변시켰다. 그리고 각 $L_{air\ gap}$ 조건에서 전기부하를 가변시켜 가며 V_{rms} 와 A_{rms} 을 측정하였다. 전압과 전류의 실효치를 서로 곱하여 발전출력 값을 계산하였으며, 그 결과들은 Fig. 8 에 나타내었다.

발전출력은 $L_{air\ gap}$ 이 1.0mm 일 때 2.0mm 보다 대체적으로 높게 생성되었다. 전기부하는 5 Ω부터 40Ω 까지 증가시켰으며, $L_{air\ gap}$ 이 1.00mm 일 때는 30Ω 일 때 가장 높은 발전출력이 생성되었으며, 전기 부하가 증가할수록 발전출력이 감소하는 경향을 보였다. $L_{air\ gap}$ 이 2.00mm 일 때는 20Ω에서 가장 높은 발전출력을 보였으며, 그 이후로 전기부하를 증가 시킬수록 발전출력은 점점 감소하였다. $L_{air\ gap} = 1.00mm$, 전기 부하 30Ω 조건일 때 $V_{rms} = 76.9V$, $A_{rms} = 1.45A$ 가 측정되었고, 계산을 통하여 최고발전 출력 111.3W를 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 2 행정 리니어엔진을 적용한 파워팩의 발전출력과 이에 영향을 미치는 주요 인자들

파악하기 위해 연료의 투입 열량, 당량비 등과 같은 열역학적 조건과 점화시기 지연, 전기부하, $L_{air\ gap}$ 등의 조건들을 가변시켜 엔진 성능시험을 실시하였다.

- 1) 연료의 투입 열량이 증가할수록 발전출력이 증가하는 것 실험을 통하여 확인하였다. 각 투입 열량 조건에서 전기부하가 20Ω 에서 40Ω 으로 증가할수록 발전출력이 증가하는 경향을 보였으나 20Ω 이상으로 증가하면 오히려 발전출력이 감소하는 경향을 보였다. 이는 일정이상의 전기부하는 이동자의 스트로크 및 속도에 미치는 부정적인 영향 때문이라고 생각된다.
- 2) 점화시기 지연이 증가할수록 발전 출력이 증가하는 경향을 보였다. 특히 점화시기 지연을 1.5ms 로 하였을 때, 발전출력이 93.9W 으로 가장 높았다. 이는 점화시기 지연을 1.5ms 로 했을 때 다른 조건에 비해 피스톤이 aTDC 근처에서 점화가 이루어 졌다고 판단할 수 있다.
- 3) 당량비가 0.8 에서 1.0 까지는 V_{rms} 와 A_{rms} 가 증가하면서 결과적으로 발전출력이 증가하는 경향을 보였다. 하지만 당량비 1.0 이후로는 점차 감소하는 경향을 보였다. 당량비 1.0 조건에서 발전출력이 가장 높은 것을 확인할 수 있었으며, 이 조건에서 피스톤의 속도가 가장 높았을 것이라고 판단된다.
- 4) 발전출력은 $L_{air\ gap}$ 이 1.0mm 일 때 2.0mm 보다 대체적으로 높게 생성되었다. 또한, $L_{air\ gap}$ 이 1.0 mm 일 때, 30Ω 조건에서 가장 높은 발전출력이 생성되었으며, 전기부하가 증가할수록 발전출력이 감소하는 경향을 보였다. $L_{air\ gap}$ 이 2.0mm 일 때, 20Ω에서 가장 높은 발전출력을 보였으나, 전기부하를 증가 시킬수록 발전출력은 점점 감소하였다.

고정자와 이동자 사이의 거리인 $L_{air\ gap}$ 은 발전출력에 충분한 영향을 준다는 것을 확인하였다. 거리가 짧을수록 발전출력이 증가한다는 것은 충분히 예측

할 수 있는 사실이다. 하지만 $L_{air\ gap}$ 이 짧아질수록 리니어제너레이터의 자기저항증가에 의하여 리니어엔진의 초기구동에 필요한 소비전력이 더 커지게 된다. 이를 고려하여 적합한 $L_{air\ gap}$ 조건을 찾는 것도 앞으로 추가적으로 수행될 것이다.

후 기

본 연구는 울산과학기술연구원지조성사업에서 지원을 받아 수행되었습니다. 관계자분들께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. R. Mikalsen, A.P. Roskilly, "A review of free-piston engine history and application", Applied Thermal Engineering, Vol. 27, 2007, pp. 2339-2352,
2. Qingfeng Li, Jin Xiao, and Zhen Huang, "Simulation of a Two-Stroke Free-Piston Engine for Electrical Power Generation", Energy & Fuels, Vol. 22, 2008, pp. 3443-3449
3. Jaeheun Kim, Gangchul Kim and Choongsik Bae, "The Effects of Spark Timing and Equivalence Ratio on Spark-Ignition Linear Engine Operation with Liquefied Petroleum Gas", SAE paper, 2012, 2012-01-0424.
4. P. Famouri, W. R. Cawthorne, N. N. Clark, S. Nandkumar, C. M. Atkinson, R. Atkinson, T. McDaniel, and S. Petreanu, "Design and testing of a novel linear alternator and engine system for remote power generation", in 1999 IEEE Power Engineering Soc. Winter Meeting.
5. N. N. Clark, T. I. McDaniel, R. J. Atkinson, S. Nandkumar, C. M. Atkinson, S. Petreanu, C. J. Tennant, and P. Famouri, "Modeling and development of a linear engine," in Proc. 1998 Spring Tech. Conf. ASME Internal Combustion Engine Division, Fort Lauderdale, FL, vol. 30-2, Apr. 26-29, 1998, pp. 49-57.
6. N. N. Clark, S. Nandkumar, C. M. Atkinson, R. Atkinson, T. McDaniel, S. Petreanu, P. Famouri, and W. Cawthorne, "Operation of a small bore linear two-stroke engine," in ASME Fall Internal Combustion Engine Conf., Clymer, NY, vol. 31-1, Sept. 1998.
7. C. M. Atkinson, S. Petreanu, N. N. Clark, R. J. Atkinson, T. McDaniel, S. Nandkumar, and P. Famouri, "Numerical simulation of a two-stroke linear engine-alternator combination," in SAE Congress, Detroit, MI, Feb. 1999, SAE 1999-01-0921.
8. N. Clark, S. Nandkumar, and P. Famouri, "Fundamental analysis of a linear two-cylinder internal combustion engine", 1998, SAE Technical Paper 982692.
9. Yongil oh, Gangchul Kim and Ocktaeck Lim, "A Study of Design and Dynamic Characteristics of Compact Linear Engine for Portable Powerpack", 2011, KHNES paper, Vol. 22, 4, pp. 512-519.
10. Goldsborough SS, Blarigan PV, "A numerical study of a free-piston IC engine operation on homogeneous charge compression ignition combustion", 1999, SAE Paper 990619.
11. W. Cawthorne, Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine, Thesis, West Virginia University, 1999.