

양방향 스텔링엔진의 선형발전기 설계에 관한 연구

박성제[†] · 고준석 · 홍용주 · 김효봉 · 염한길 · 인세환
한국기계연구원 극한기계부품연구본부

A Study on Design of the Linear Generator in the Double Acting Stirling Engine

SEONGJE PARK[†], JUNSEOK KO, YONGJU HONG, HYOBONG KIM, HANKIL YEOM, SEHWAN IN

Department of Energy System, Korea Institute of Machinery & Materials
156 Gajeongbukro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

Abstract >> This paper describes the continuing effort to analysis and design on dynamic and electrical behavior of gamma-type free piston Stirling engine/generator with dual-opposed linear generator for domestic micro-CHP (Combined Heat and Power) system. The double acting Stirling engine/generator has one displacer and two power piston which are supported by flexure springs. Two power pistons oscillate with symmetric sinusoidal displacement and are connected with moving magnet type linear generators for power generation. To operate Stirling engine/generator, combustion heat of natural gas is supplied to hot-end and heat is rejected from cold-end by cooling water. The temperature difference across the displacer induces the oscillating motion, and it can be explained with mass-spring vibration system. The purpose of this paper is to describe the design process of linear generator for the double acting free-piston Stirling engine.

Key words : Double acting free piston Stirling engine/alternator(양방향 자유 피스톤 스텔링엔진/발전기), Linear generator(선형발전기), Piston(피스톤), Displacer(변위기), Operating frequency(작동주파수)

Nomenclature

A	: Area of the cross section	R	: Resistance
c	: damping constant	t	: time
i	: Current	v	: Voltage
I	: Amplitude of the current	V	: Amplitude of the voltage
K	: Thrust constant	W	: Work
m	: mass	x	: Displacement of the piston
p	: Pressure	X	: Amplitude of the piston
		ω	: Angular velocity
		ϕ	: Phase angle
		Le	: Inductance
		Csys	: Capacitance

[†]Corresponding author : sjpark@kimm.re.kr

Received : 2015.11.9 in revised form : 2015.12.10 Accepted : 2015.12.30

Copyright © 2015 KHNES

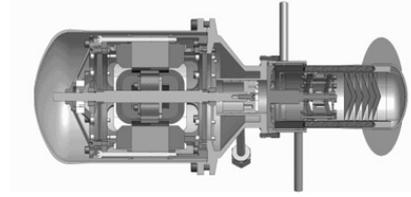
Subscripts

- i : Current
- m : Mean
- p : Pressure
- PV : Work
- v : Voltage
- x : Displacement of the piston

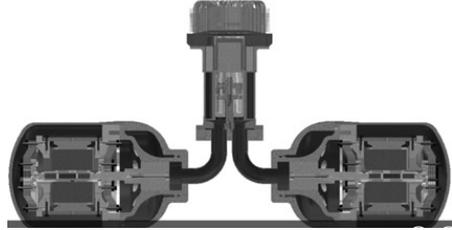
1. 서 론

스틸링 엔진은 외부에서 열을 받아 상온으로 방출하는 과정에서 변위기 및 피스톤의 운동으로부터 일과 전기를 생산하는 외연기관이다. 열역학적으로 주기적으로 반복되는 사이클을 형성하여 열에너지를 운동에너지 혹은 전기에너지로 변환하는 에너지 변환 기구의 일종이다^{1,2)}. 스틸링엔진 사이클은 Carnot 사이클과 동일한 효율을 가지는 이상적인 사이클로써 등온과정과 등적과정으로 이루어져 있으며, 1816년 이후로 미국과 유럽에서 상용화를 위한 노력이 이루어져 왔다³⁾.

현재의 전력 계통은 발전소에서 전력을 생산하여 전력망을 통해 수용가에 송배전하는 방식을 가지고 있어 송전 손실 및 대규모 정전 사고 위험의 문제를 가지고 있다. 가정용 초소형 열병합 발전시스템은 전기를 사용하는 가정에서 직접 전력을 생산하기 때문에 송전 손실을 줄일 수 있고, 전력을 생산하기 위한 준비 시간이 매우 짧기 때문에 전력 공급 부족에 즉각 대응할 수 있는 장점이 있다. 특히 가정용 초소형 열병합 발전시스템은 기존의 가정용 보일러에 열에너지로 부터 전기에너지를 생산할 수 있는 엔진을 장착하여 난방수 및 온수 공급과 함께 전력을 생산하는 시스템이다. 여러 형태의 엔진 중에서 외부로부터 열을 공급받는 외연기관인 스틸링 엔진이 효율과 안전 측면에서 가정용 시스템에 적합한 것으로 판단되고 있다.



(a) Single acting type Stirling engine/generator



(b) Double acting type Stirling engine/generator

Fig. 1 Single acting and double acting type Stirling engine/generator

Fig. 1은 단방향(Single acting type) 스틸링엔진/발전기와 양방향(Double acting type) 스틸링엔진/발전기의 구조를 비교한 그림이다. 단방향 스틸링엔진/발전기는 소형, 경량이며, 효율이 높지만, 상대적으로 소음, 진동이 크며, 대용량에 어려운 단점이 있어 외부 설치용으로 적합하다. 이에 비해 양방향 스틸링엔진/발전기는 대용량으로 확장이 가능하고, 상대적으로 소음, 진동이 적기 때문에 내부 설치용으로 적합하다⁴⁾.

본 연구에서 개발된 스틸링 엔진은 동력 피스톤과 변위기가 분리된 실린더에 배치된 Gamma형 엔진이며, 동력 피스톤이 기계적으로 구속되어 있지 않은 FPSE (Free piston Stirling engine) 형태를 갖는다. 이러한 형태의 엔진은 회전부가 없어 측력이 발생하지 않고, 윤활유를 사용하지 않고도 운전이 가능하며, 구동부의 부품이 작아 수명이 길고 신뢰성이 높은 장점이 있다^{5,6)}.

본 연구에서는 가정용 소형 열병합 발전시스템에 적용하기 위하여 1 kW급 양방향 스틸링 엔진/발전기의 선형발전기의 설계 과정을 서술하고자 한다.

2. 양방향스털링엔진/발전기 설계^{7,8)}

60 Hz, 1 kW급 스텔링엔진은 Fig. 2와 같이 두 개의 피스톤이 서로 반대되는 방향으로 움직이며 피스톤 운동에 의한 진동을 원천적으로 상쇄하는 Dual-opposed 형태가 고려되었으며, 1개의 변위기 및 1 kW급 선형 발전기로 구성되는 형태이다. 본 절에서는 새로운 설계 개념이 도입된 설계 내용을 설명한다. 한 쪽에 500 W급인 선형발전기 두 개를 배치하여 정상 상태 운전에서 1 kW의 전기 출력을 발생한다. 스텔링 엔진/발전기 설계에서는 선형 발전기의 가동 자석과 결합되어 운동하는 피스톤의 동특성 해석 및 가동 자석, 고정자 코일, 요크 등으로 구성되는 선형 발전기의 전자기 해석을 통해 주요 설계 인자인 피스톤 직경 및 행정, 선형 발전기 추력 상수, 기계적 강성, 피스톤 질량 등이 결정된다.

2.1 선형발전기 동특성 해석

선형 발전기는 스텔링 엔진에서 열역학 사이클에 의해 발생하는 기계적인 PV일을 전기 출력으로 변환하는 핵심 부품이다. 스텔링엔진에서의 전기출력은 선형발전기의 전자기적 특성뿐만 아니라, 동력 피스톤의 동적 거동 특성과 매우 밀접한 관계를 갖는다. 특히, 압축 공간 내부에서 피스톤 운동에 의해 생성되는 압력 파형에 의해 피스톤 양단에는 가스 힘

(Gas force)이 작용하고, 이는 피스톤 운동의 스프링 효과와 감쇠 효과로 나타나며, 피스톤 운동 및 전기 출력에 매우 큰 영향을 미친다.

스털링엔진 및 선형 발전기 내부에서의 운동은 정현파 형태의 왕복 운동으로 이루어지며, 피스톤 변위, 전류, 압축공간 내부에서의 압력 변동, 코일 양단의 전압을 다음의 식과 같이 표현하면 진폭과 위상의 관계로 위상자 해석(Phasor analysis)을 수행하여 선형 발전기의 동특성을 해석하기에 용이하다.

$$x(t) = X \cos \omega t \tag{1}$$

$$i(t) = I \cos(\omega t + \phi_i) \tag{2}$$

$$p(t) = P_m + P \cos(\omega t + \phi_p) \tag{3}$$

$$v(t) = V \cos(\omega t + \phi_{vi}) \tag{4}$$

Fig. 3은 스텔링 엔진의 피스톤이 공진 운동을 하며 정상 출력을 발생하는 경우의 위상 선도를 보여준다. 피스톤 변위의 위상을 기준으로, 기계적인 마찰 손실에 의한 감쇠 효과는 90° 앞서는 위상을, 피스톤 질량에 의한 관성 효과는 180° 위상 차이를 갖는다. 선형 발전기의 발전 효율이 최대로 되기 위해서는 전류 위상이 270° 위상을 갖도록 가스 힘 위상자의 크기 및 위상이 결정되도록 열역학 사이클이 구성되어야 한다.

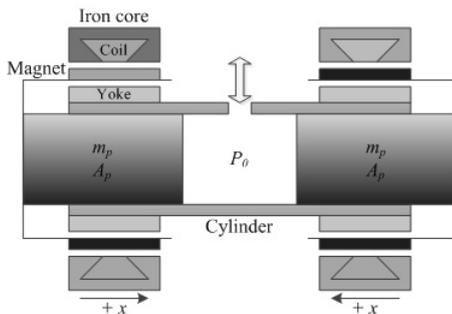


Fig. 2 Schematic diagram of the double acting type linear generator

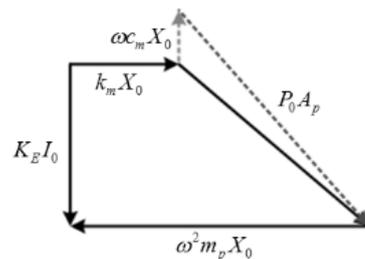


Fig. 3 Phasor diagram of Stirling engine

스티어링 엔진의 선형발전기에서 전기 출력은 다음의 식과 같이 피스톤 운동에 의해 발생하는 출력에서 코일, 요크, 철심에서 발생하는 저항 열을 제한 값으로 결정된다.

$$Power = \frac{1}{2} VI \cos\phi_{vi} = RI^2 - \omega K XI \sin\phi_{ix} \quad (5)$$

피스톤 변위와 전류 사이의 위상(ϕ_{ix})이 90°인 공진 조건에서 500 W의 출력을 만족하기 위해 요구되는 발전기 추력상수(K)는 48.09 N/A이지만, 공진 조건에서 $\pm 10^\circ$ 범위에서도 500 W의 출력을 발생시킬 수 있도록 하기 위해서는 48.83 N/A의 추력 상수 값이 요구된다. 이 값을 기준으로 동특성 해석이 수행되었다.

동력 피스톤의 운동은 다음의 운동 방정식에 의해 결정된다.

$$m_p \frac{d^2x}{dt^2} = -k_m x - c_m \frac{dx}{dt} - pA_p + K i \quad (6)$$

스티어링 엔진 열역학 사이클 운동에 의해 발생하는 PV일은 기계적인 마찰 손실 에너지를 제외한 만큼 전기적 에너지로 변환된다. 다양한 설계 변수에 의해 결정되는 PV일, 기계적 마찰 손실, 전기 에너지의 양은 각각 다음의 식에 의해 결정된다.

$$\dot{W}_{PV} = \frac{1}{2} \omega X P A_p \sin\phi_{px} \quad (7)$$

$$\dot{W}_{damp} = \frac{1}{2} c_m (\omega X)^2 \quad (8)$$

$$\dot{W}_K = \frac{1}{2} \omega X K I \sin\phi_{ix} \quad (9)$$

상기 서술된 관계를 이용하여 피스톤 질량, 피스톤 직경, 기계적 강성 변화에 따라 전류와 피스톤 변

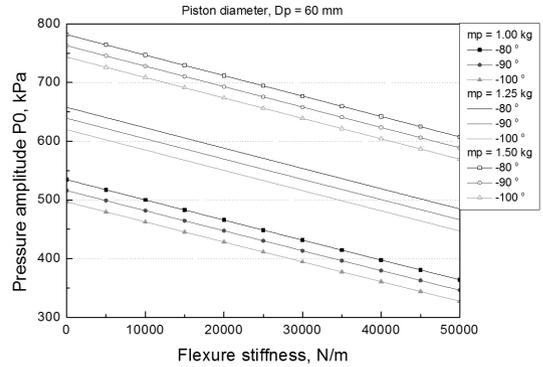


Fig. 4 Required amplitude variation of the piston mass

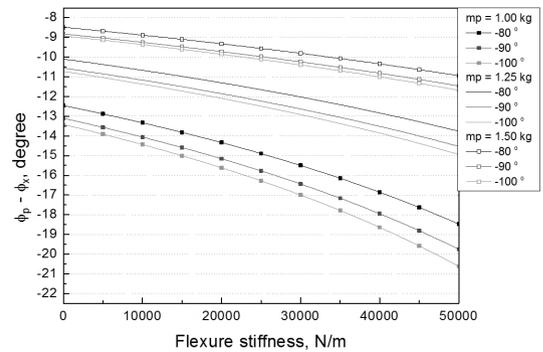


Fig. 5 Required pressure phase variation with the piston mass and mechanical stiffness

위의 위상이 80, 90, 100°인 경우에 요구되는 압력 파형의 진폭 및 위상을 계산하였고, Fig. 4와 Fig. 5와 같이 결과가 나타났다. 계산 결과 피스톤 직경이 60 mm일 때, 질량이 작을수록, 그리고 전류와 피스톤 변위의 위상차가 증가할수록 요구되는 압력 진폭이 낮아지는 것으로 나타났다. 요구 압력 위상은 피스톤 질량이 작고 전류와 피스톤 변위의 위상차가 증가할수록 더 큰 위상차가 요구되는 것으로 나타났다.

2.2 선형발전기 전자기 설계

500 W급의 선형 발전기가 Double acting 형태로 배치되는 경우의 전기 회로는 Fig. 6과 같이 두 개의 선형 발전기가 직렬로 연결되어 있는 것으로 해석할 수 있다. 이 경우의 엔진 코일 양단에서의 전압에 대

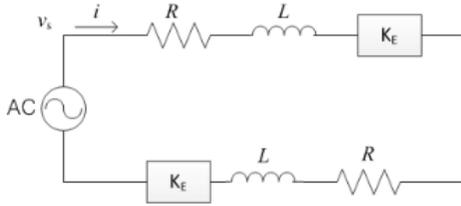


Fig. 6 Electrical circuit of the double acting Stirling engine

한 전압 방정식은 다음의 식으로 표현된다.

$$v(t) = 2 \left(R i + L \frac{di}{dt} + K \frac{dx}{dt} \right) \quad (10)$$

동력 피스톤이 공진 운동을 하는 경우에는 전류와 피스톤 변위의 위상이 270° 가 되기 때문에 피스톤 속도와 전류는 180° 위상을 갖는다. 코일의 인덕턴스 성분이 제거되어야 전압과 전류의 위상이 0° 혹은 180° 가 되어 역률(Power factor)이 1인 조건을 만족할 수 있다. 이를 위해서 CHP 시스템에서는 공진 커패시터가 사용되고, 커패시터 용량은 코일 인덕턴스를 상쇄할 수 있도록 다음의 식에 의해 산정되어야 한다. 공진 커패시터의 용량은 선형 발전기의 설계 변경이 이루어지는 경우에는 고정자와 요크가 결합된 상태에서 측정된 인덕턴스 값을 기준으로 반드시 재 산정되어야 한다.

$$\omega L_e = \frac{1}{\omega C_{sys}} \rightarrow C_{sys} = \frac{1}{\omega^2 L_e} \quad (11)$$

60Hz, 500W급 선형 발전기는 1 절에서의 Fig. 2와 같고, 직경 1mm의 구리전선으로 권선되는 코일, 전기강판 적층 구조로 제작되는 철심 코어, 순철 파워더로 성형 가공되는 요크, 네오디뮴 영구 자석으로 제작되는 가동 자석으로 구성되어 있다. 코일 권선수에 따른 전자기장 해석을 수행하였으며, 해석 진행 과정에서 필요에 따라 요크 두께 및 철심 코어의 형상을 변화시키며 500 W 출력에 필요한 추력 상수를

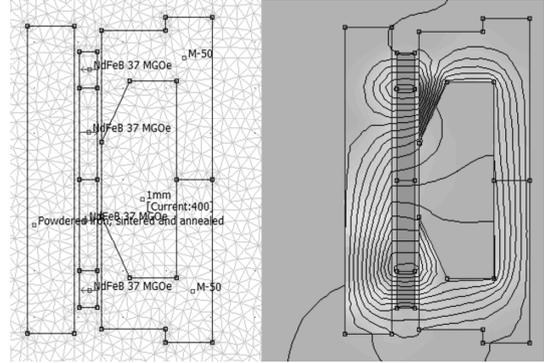


Fig. 7 FEMM analysis model of the linear generator

만족하는지 여부를 판단하였다. 전자기장 해석은 2차원 해석 프로그램인 FEMM을 이용하였으며, Fig. 7에 FEMM 해석 모델 및 해석 결과의 예를 나타내었다.

특히, 본 설계에서는 자기력에 의한 기계적 강성을 이용하기 위하여 스프링 자석이 적용되었으며, 이로 인해 가동자 위치에 따른 추력 상수 및 정자기력(Magnetostatic force) 특성이 변화하며, Fig. 8에 코일 권선수에 따른 영향을 나타내었다.

스프링 자석을 적용함으로써 모든 경우에 가동자가 중심부에서 ± 5 mm 내에 위치하는 경우에는 추력상수가 일정하고 정자기력이 작용하지 않는 반면에, 가동자가 중심부에서 5 mm 이상 벗어나 위치하는 경우에는 추력 상수는 중심부에 비해 20% 범위 내에서 더 큰 값을 보이고 정자기력은 중심부에서 거리가 멀어질수록 거리에 비례하여 증가하는 현상이 나타난다. 단일 피스톤 형태의 경우에는 중심부 기준으로 약 115 N/A의 추력 상수를 보이며, 양방향 피스톤 형태의 경우에는 코일 권선수가 200~400 턴 범위에서 50~95 N/A의 범위에서 변화하는 것으로 나타났다.

스프링 자석에 의한 정자기력은 양방향 피스톤 형태를 위한 500W급 모델에서는 코일 권선수에 영향을 받지 않고 선형발전기 형상 및 치수가 유지되는 경우에는 가동자가 끝단에 위치하는 경우에 약 400

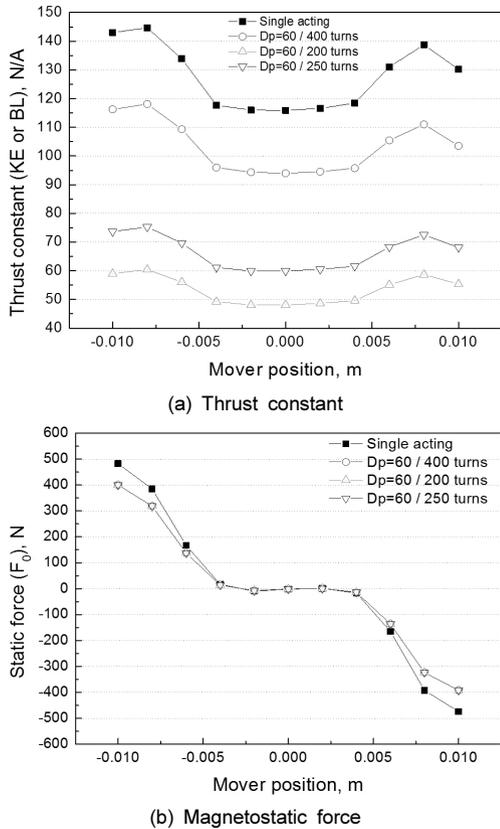


Fig. 8 Electromagnetic characteristics with the position of the mover

N의 복원력이 작용하는 동일한 특성을 보였으며, 단일 피스톤 형태 모델은 약 500 N으로 더 큰 값의 정자기력 특성을 보이는 것으로 나타났다. 이를 기계적 강성으로 환산하면 500 W급 모델에서는 약 40,000 N/m의 강성을, 1 kW급 단일 피스톤 형태 모델에서는 약 50,000 N/m의 값을 갖는 것으로 생각할 수 있다.

3. 결론

가정용 소형 열병합 발전시스템에 적용하기 위하여 두 개의 동일한 동력 피스톤 및 500 W급 선형 발전기가 서로 반대되는 방향으로 배치되는 Double acting 형태의 스티어링 엔진/발전기에 대하여 동특성 및 전자기 특성 해석을 통해 설계를 수행하였다.

선형발전기의 동특성 해석을 통해 피스톤 질량이 작을수록, 그리고 전류와 피스톤 변위의 위상차가 증가할수록 요구되는 압력 진폭이 낮아지는 것으로 나타났다으며, 요구 압력 위상은 피스톤 질량이 작고 전류와 피스톤 변위의 위상차가 증가할수록 더 큰 위상차가 요구되는 것으로 나타났다.

동력 피스톤이 공진 운동을 하는 경우에 코일의 인덕턴스 성분이 제거되어야 전압과 전류의 위상이 0° 혹은 180°가 되어 역률(Power factor)이 1인 조건을 만족할 수 있으며, 이를 위해서 공진 커패시터가 사용되어야 함을 알 수 있었다.

스프링 자석을 적용함으로써 자기력에 의한 기계적 강성을 이용할 수 있으며, 가동자가 중심부에서 ± 5 mm 내에 위치하는 경우에는 추력상수가 일정하고 정자기력이 작용하지 않는 반면에, 가동자의 위치에 중심부에서 5 mm 이상 벗어난 경우에는 추력 상수가 중심부에 비해 20% 범위 내에서 더 큰 값을 보이고 정자기력은 중심부에서 거리가 멀어질수록 거리에 비례하여 증가하는 현상이 나타남을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업융합원천기술개발 사업 및 한국기계연구원 주요사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. M. W. Bae, and H. S. Chang, "Performance Prediction of Solar Power System with Stirling Engine", Proceedings of KSME conference, 2001.
2. J. S. Kim, Y. H. Kang, S. N. Lee, H. K. Yoon, C. K. Yu, J. K. Kim, and D. K. Jo, "Performance of Dish-Stirling Solar Power System", Proceedings of KSRE conference, 2006.
3. W. Graham, "Stirling Engines", Oxford University Press, 1980.

4. N. W. Lane, and W. T. Beale, "Free-piston Stirling Design Feature", presented at the 8th Int. Stirling Engine Conference, May 27-30, Univ. of Ancona, Italy, 1997.
5. H. W. Brandhorst, and P. A. Chapman Jr., "New 5 kW free-piston Stirling space convertor developments", Gedeon Associates, Athens, OH, 2009.
6. J. G. Wood, and N. Lane, "Advanced 35 W Free-Piston Stirling Engine for Space Power Applications", AIP Conference Proceedings, USA, 2003, pp. 1-6.
7. J. S. Ko, Y. J. Hong, H. B. Kim, I. S. Kang, C. S. Lee, and S. J. Park, "Measurement of generating efficiency of Stirling engine for domestic micro CHP system", Proceedings of KSME conference, 2012.
8. J. S. Ko, Y. J. Hong, H. B. Kim, I. S. Kang, and S. J. Park, "Experiments on dynamic and electrical characteristics of 1 kW class Stirling engine", Proceedings of KSME conference, 2011.