

양방향 스텔링엔진/발전기의 효율 특성 연구

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

A Study on Generating efficiency of the Double Acting Stirling Engine/Generator

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 305-343, Korea

Abstract >> This paper describes generating efficiency characteristics of the double acting Stirling engine/generator for domestic small-scale CHP (Combined Heat and Power) system. In small distributed generation applications, Stirling engine has competition from fuel cell, microturbine and etc. In order to be economical in the applications, a long life with minimum maintenance is generally required. Free piston Stirling engine (FPSE) has no crank and rotating parts to generate lateral forces and require lubrication. Double acting Stirling engine/generator has one displacer and two power piston which are supported by flexure springs. Two power pistons oscillate with symmetric displacement and are connected with moving magnet type linear generators for power generation from PV work. In experiments, 1 kW class double acting free piston Stirling engine/generator is fabricated and tested. Heat is supplied to hot end of engine by the combustion of natural gas and converted to electric power by linear generators which are assembled with power pistons. The electric parameters such as voltage, current and phase are measured with for variable flow rate of fuel gas. Especially, generating efficiency of FPSE is measured with three different measurement methods. Generating efficiency of the double acting Stirling engine/alternator is about 24%.

Key words : Double acting free piston Stirling engine/alternator(양방향 자유 피스톤 스텔링엔진/발전기), Generating efficiency(발전효율), Piston(피스톤), Displacer(변위기), Regenerator(재생기)

Nomenclature

C : 정전용량 [F]
I : 전류 [A]
L : 인덕턴스 [H]
P : 일률 [W]

Q : 열량 [W]
R : 전기저항 [Ω]
T : 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
v : 전압 [V]

1. 서 론

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

Received : 2015.11.9 in revised form : 2015.2.25 Accepted : 2016.2.28

Copyright © 2016 KHNES

스텔링엔진은 19세기 초반 영국의 Robert Stirling
에 의해 열 공기 엔진(Hot air engine)으로 개발된 외

연기관으로, 피스톤과 실린더로 이루어진 밀폐공간 내에 헬륨, 수소 등의 작동가스를 밀봉하고, 이를 외부에서 가열, 냉각시킴으로써 발생하는 피스톤의 운동을 통해 기계적인 에너지를 얻을 수 있다^{1,2)}.

1930년대 네덜란드의 필립사에 의해 군용발전기로 본격적인 개발이 시작되었으며, 1960년대 수백 kW급에 이르는 다양한 엔진이 개발되었다³⁾.

1970년대 필립스 및 포드사에 의해 저공해, 탈석유, 연비향상 등을 위한 차세대 자동차용 엔진을 위한 승용차 탑재용 스텔링엔진으로 개발된 바 있으며, 발전용, 태양열발전, 열펌프, 우주용 등의 목적으로 다양한 형태의 엔진이 개발, 적용된 바 있다⁴⁾.

외연기관인 스텔링엔진은 가스/액체/고체 연료를 모두 사용할 수 있으며, 최근에는 기존의 기구적인 구동방식에 비해 수명과 신뢰성이 높은 비접촉 방식의 자유피스톤 방식이 활발히 개발되고 있다^{5,6,7)}.

본 연구에서는 가정용 소형 열병합 발전시스템에 적용하기 위하여 1 kW급 양방향 스텔링 엔진/발전기를 설계, 제작하여 성능 실험을 수행하였다. 투입되는 연소 가스량을 변화시키며 열 투입 및 전기 출력 특성을 측정하였으며, 특히 엔진 발전 시스템에서의 에너지 출입량을 실험적으로 측정하여 엔진의 발전 효율을 측정할 결과를 제시하고자 한다.

2. 스텔링엔진/발전기 효율^{8,9)}

스텔링 엔진은 고온부에서 연소열을 흡수하여 전기 에너지로 일을 발생시키고 저온부로 열을 방출하는 스텔링 사이클로 작동하며, 엔진에서의 에너지 흐름은 Fig. 1과 같다.

연소가스의 연소에 의해 엔진 헤드에 공급된 열 (Q_{in})의 일부는 스텔링 엔진의 고온부로 흡수(Q_{eng})되어 엔진을 구동하고, 헤드로 흡수되지 못한 열은 배기가스로 방출된다(Q_{out}).

가정용 열병합 발전시스템에서는 보조 보일러를

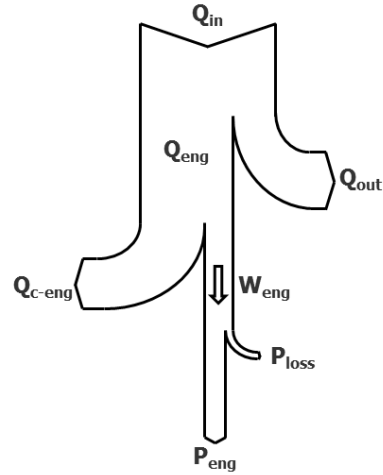


Fig. 1 Energy flow in Stirling engine

통하여 고온의 배기가스의 열을 온수 형태로 회수한다. 엔진으로 흡수된 열은 스텔링 사이클을 구성하면서 외부로 일(W_{eng})을 하고, 저온부로 열을(Q_{c-eng}) 방출한다. 스텔링 사이클에 의해 발생한 일은 선형 발전을 통해 전기 에너지로 변환되는데, 기계적, 전기적 손실(P_{loss})을 제외한 나머지가 전기 출력(P_{eng})으로 발생한다. 여기에서 스텔링 엔진의 효율과 전기 발전 효율은 각각 식 (1)과 식 (2)로 표현된다.

$$Engine\ Efficiency = \frac{W_{eng}}{Q_{eng}} \quad (1)$$

$$Electrical\ efficiency = \frac{P_{eng}}{Q_{eng}} \quad (2)$$

스텔링 엔진의 성능실험에서 발전기 내부에서의 손실은 측정이 불가능하기 때문에 엔진 효율 측정은 어렵다. 하지만, 연소가스 유량, 냉각수 입, 출구 온도, 배기가스 온도 및 성분, 전기 출력 등을 측정함으로써 스텔링 엔진의 발전 효율을 실험적으로 측정할 수 있다.

3. 실험장치 구성

실험에 사용된 양방향 스티링 엔진/발전기는 가정용 소형 열병합 발전 시스템용으로 Fig. 2와 같이 1 kW 전기 출력이 가능하도록 설계 및 제작되었으며, 일반 가정용 도시가스를 연소가스로 이용하였다. 엔진은 가정용 열병합 발전 시험 시스템에 설치되어 엔진 헤드에 설치된 연소가스 내부에서의 연소열에 의해 엔진으로 열이 공급된다.

성능 실험에서는 연소가스의 유량을 연소 공급 송풍기의 속도로 제어하며 엔진 헤드의 온도 및 전기 출력 특성을 측정하였다. Fig. 3에 스티링엔진을 RLC 직렬회로로 모사하고, 스티링엔진에 직렬로 커패시터를 연결하였으며, controller를 병렬로 연결한 후, AC 전원공급기와 발생한 전기를 소모하는 히터를 설치한 전기회로 구성을 나타내었다. 전압, 전류, 위상, 역률 등의 전기 출력 특성은 전력 분석기(WT1800,

Yokogawa)를 통해 측정되었으며, 각 측정 지점은 Fig. 3에 나타난 회로도에 표시하였고, 각 지점에 대한 설명은 Table 1에 나타내었다. 그리드 전원을 모사하기 위한 교류 전원 공급기(61605, Chroma), 발생한 전기 출력을 소모하기 위한 전기 부하(3261, Prodigit Electronics)와 스티링 엔진 전기 출력 회로가 병렬로 연결되어 전원 공급기에서 공급되는 전류가 전기 부하와 스티링 엔진으로 흐르는 방향을 양의 값으로 설정하였다. 엔진 초기 구동 시간 동안에는 엔진이 전력을 소모하고, 엔진이 정상적으로 작동하여 전기 출력이 발생하기 시작하면 전기 부하에서 소모되는 에너지의 일부를 엔진에서 발생한 전기 출력으로 충당하기 때문에 교류 전원 공급기에서 공급하는 전류 및 전력의 크기가 감소하게 된다.

연소 가스의 유량은 건식 가스 메타(DC-5A, Sinagawa)를 이용하여 측정하여 열 입력량을 계산하였다. 성능시험 시스템에서 냉각수는 스티링 엔진과 배기가스의 열을 회수하기 위한 보조보일러를 통과하는데, 각각의 입, 출구의 온도와 냉각수 유량을 측정하여 냉각수로 회수되는 열량을 계산하였다.

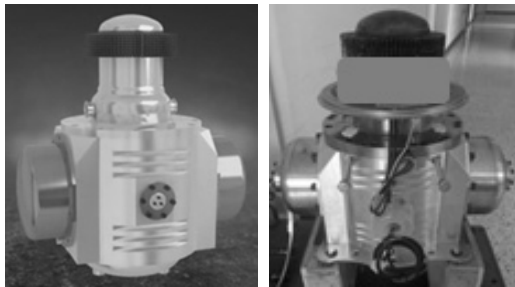


Fig. 2 Double acting Stirling engine/generator

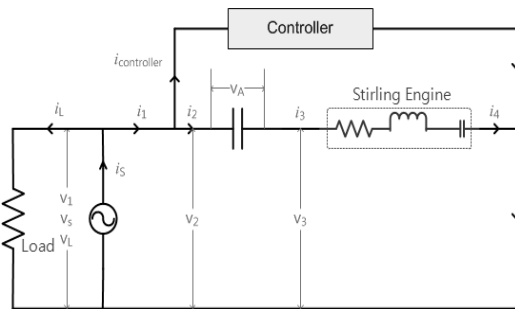


Fig. 3 Electric circuit of Stirling engine test setup

Table 1 Description of the electric circuit

Point	Description
1 (v1/i1)	<ul style="list-style-type: none"> • Grid voltage (Power source) • Current to CHP system • Power to CHP system
2 (v2/i2)	<ul style="list-style-type: none"> • Before capacitor • Current to capacitor • Power to Capacitor
3 (v3/i3)	<ul style="list-style-type: none"> • After capacitor / current to engine coil • Power to engine coil
4 (vA/i4)	<ul style="list-style-type: none"> • Between capacitor (=v2-v3) • Current from engine coil
5 (vS/iS)	<ul style="list-style-type: none"> • Grid voltage (Power source) • Current from power source
6 (vL/iL)	<ul style="list-style-type: none"> • Grid voltage (Power source) • Current to electric load • Power to electric load (1200 W, fixed)

4. 실험 결과 및 토의

성능실험은 연소가스 공급 송풍기의 속도를 2000, 2500, 3000, 3500, 4100 rpm으로 변화시키며 피스톤, 변위기의 운동 및 전기 출력이 안정화되는 정상 상태에서 각 지점의 온도와 전기 출력을 측정하였다. 실험 조건의 송풍기 속도에 따른 연소 가스 유량은 Fig. 4에 나타나는 바와 같이 송풍기 속도에 비례하여 증가한다. 송풍기 속도가 증가할수록 열 입력량의 증가로 인하여 Fig. 5와 같이 엔진 헤드의 온도 또한 260°C부터 550°C 까지 거의 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

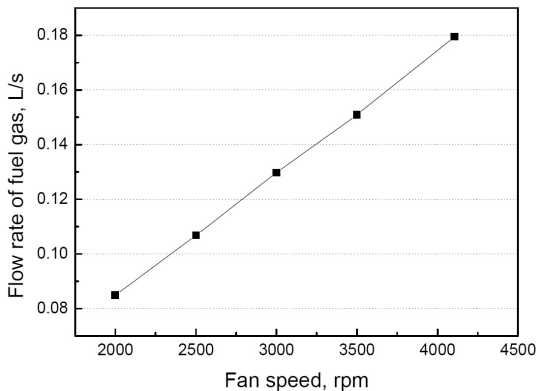


Fig. 4 Flow rate of fuel gas as fan speed

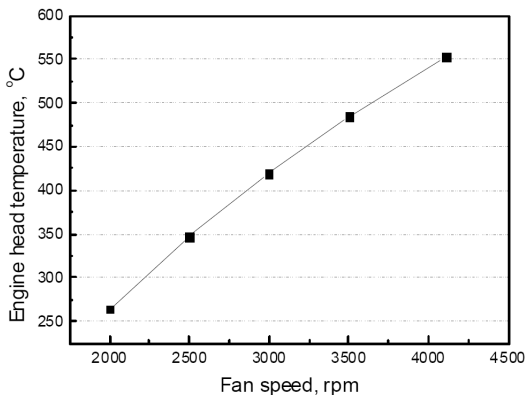


Fig. 5 Temperature of Stirling engine head

4.1 전기 출력 특성

Fig. 6은 송풍기의 속도에 따른 전기 출력 변화를 측정한 결과이다. Fig. 6 (a)의 전압 측정 결과에서 송풍기 속도가 증가하더라도 그리드와 병렬로 연결된 지점 2의 전압(v_2)은 220 Vrms로 일정한 값을 유지한다. 반면에, 스티어링 엔진 코일 양단에서 측정된 전압(v_3)은 송풍기 속도가 증가할수록 전압이 증가하여 최대 370 Vrms까지 측정되었다. 스티어링 엔진의 전기 출력이 증가할수록 내부에 포함된 선형 발전기에서의 역기전력이 크게 발생하여 전압이 크게 나타나기 때문이다. 그리드에서의 전압을 일정하게 유지하기 위하여 사용된 콘덴서 양단의 전압($v_a = v_3 - v_2$) 또한 코일 양단 전압과 유사한 경향으로 증가하지만 v_3 보다는 작은 값으로 측정되었다. Fig. 6 (b)의 전류 측정 결과에서 지점 1, 2, 3에서의 전류(i_1, i_2, i_3) 또한 송풍기 속도 증가에 따라 크기가 증가하는 것으로 나타났다. i_2 와 i_3 는 직렬로 연결되어 있기 때문에 동일한 값을 보이며, i_1 은 다른 두 지점에 비해 작은 값으로 나타난다. 이는 스티어링 엔진과 병렬로 연결된 제어기(Controller)에서의 전력 소모에 따른 결과이다. 송풍기 속도가 증가할수록 i_1 과 i_2, i_3 의 차이가 커지는데, 이는 제어기에서의 전력소모가 증가함을 의미한다. 이 차이는 대부분이 송풍기에서의 전력 소모량 변화로부터 기인하는 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 6 (c)는 지점 1, 2, 3에서의 전력 측정 결과이다. 여기에서 음의 값은 엔진에서 출력이 발생하는 것을 의미한다. 송풍기 속도가 증가할수록 엔진에서의 전기 출력량이 증가하여 최대 970 W의 전기 생산이 가능함을 확인하였다. Fig. 6 (b)의 결과에서 나타난 바와 같이 제어기에서의 전력 소모로 인하여 지점 1에서의 측정값이 지점 2, 3의 측정값에 비해 적게 측정되었다. Fig. 6 (d)는 콘덴서 양단에서의 역률(Power factor) 측정 결과이다. 전기 출력이 작은 경우에는 그리드(지점 2)에서의 역률이 1보다 작은 값으로 나타나지만, 일정값 이상의 전기 출력이 발생하

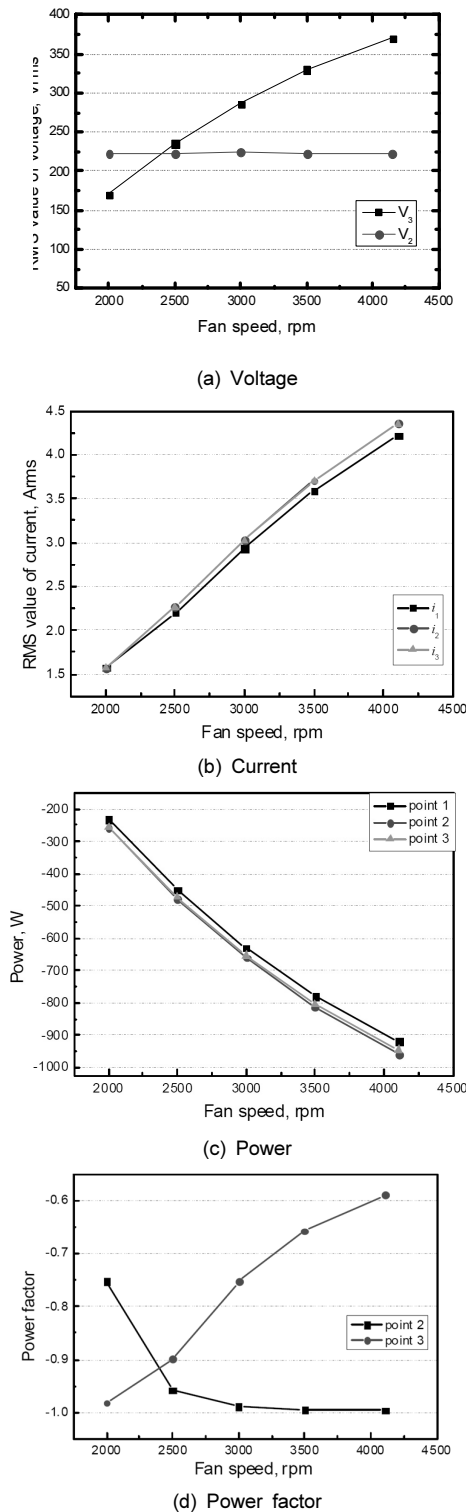


Fig. 6 Electric characteristics of the Stirling engine

는 경우에는 1의 역률을 보이고 있다. 본 연구의 측정 결과에서는 송풍기 속도가 3500 rpm 이상의 조건에서 1의 역률을 나타냈다. 역률이 1의 값을 갖는 것은 전압과 전류의 위상이 같음을 의미한다. 송풍기 속도가 증가할수록 선형 발전기에서의 역기전력이 증가하고 이는 역률이 감소하는 결과로 나타난다. 하지만, 지점 2와 3 사이에 위치한 콘덴서를 통해 그리드에서의 역률이 1로 맞춰지는 것을 확인할 수 있다.

4.2 스텔링엔진 발전 효율

스텔링 엔진의 발전 효율은 다음의 식 (3) ~ (5)에 나타난 세 가지 방법으로 계산이 가능하다.

$$\eta_1 = \frac{P}{Q_{c-eng} + P} \tag{3}$$

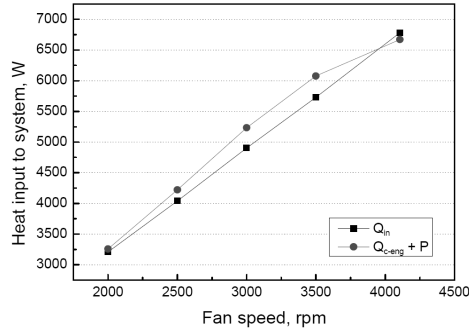
$$\eta_2 = \frac{P}{Q_{in} - Q_{out1}} \tag{4}$$

$$\eta_3 = \frac{P}{Q_{in} - Q_{out2}} \tag{5}$$

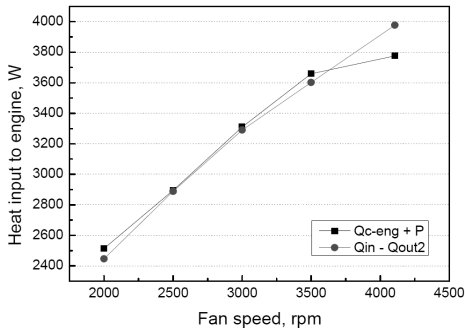
여기에서, Q_{c-eng} 는 엔진 냉각수에 의해 회수된 열로 스텔링 사이클에서 저온부로 방출되는 열을 의미하고, P 는 전기 출력, Q_{in} 은 연소가스의 열 입력량, Q_{out1} 과 Q_{out2} 는 연소기 출구에서 고온의 배기가스가 갖고 있는 열량을 의미하는데, Q_{out1} 은 보조 보일러의 냉각수에 의해 회수된 열량의 측정값이고, Q_{out2} 는 배기가스 성분 분석 결과를 이용하여 물성치로부터 도출한 값이다. 식 (3)에서 $Q_{c-eng} + P$ 는 열 입력량으로부터 엔진에서의 손실(P_{loss})을 뺀 값인데, 손실이 작다는 조건에서 열 입력량으로 근사할 수 있다.

Fig. 7은 엔진 발전 효율 측정 결과이다.

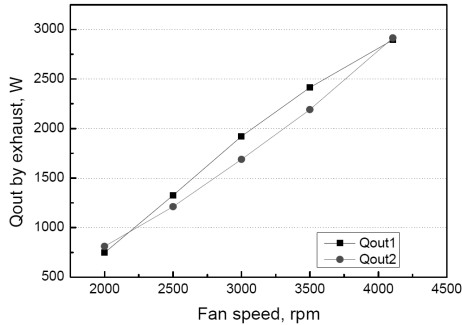
Fig. 7(a)는 열 입력량의 측정 결과인데, 이론적으로는 $Q_{c-eng} + P$ 의 값이 연소가스 유량 측정 결과로부터 계산한 열 입력량보다 작아야 하지만, 냉각수 온



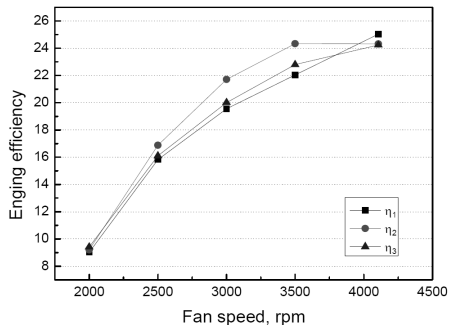
(a) Heat input (Qin)



(b) Heat input to engine (Qeng)



(c) Heat absorption from exhaust gas



(d) Efficiency

Fig. 7 Electric characteristics of the Stirling engine

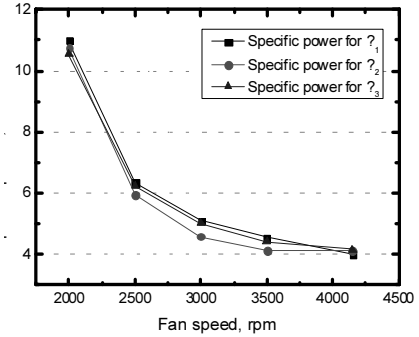


Fig. 8 Specific power of the Stirling engine

도와 유량 측정값의 오차가 증첩되어 오히려 더 큰 값으로 나타났다. 하지만, 최대 오차가 5% 이내이므로 공학적으로 허용할 수준이라 생각된다. Fig. 7 (b)는 열 입력량으로부터 배기가스의 열량을 뺀 값으로 엔진에 투입된 열량을 의미하는데, 냉각수 입, 출구 온도 측정의 오차로 인하여 두 가지 계산값의 오차가 나타난다. Fig. 7 (c)는 엔진 배기가스의 물성치와 보조보일러에서의 냉각수 입, 출구 온도로부터 계산한 배기가스에서 회수된 열량을 의미한다. 각각의 열량 및 전기 출력값으로부터 식 (3) ~ (5)에 의해 계산된 엔진 발전 효율은 Fig. 7 (d)에 나타내었다. 세 가지 방법으로 측정된 효율 값이 측정 오차로 인한 오차는 보이지만 전반적으로 유사한 결과를 보이고 있다. 연소가스 공급량의 증가로 인하여 열 입력량이 증가할수록 엔진 발전 효율은 2차 곡선 형태로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 엔진 전기 출력이 약 1 kW 발생하는 조건에서는 약 24 %의 발전 효율을 보이고 있다.

Fig. 8은 Fig. 7의 결과를 이용하여 η_1 , η_2 , η_3 에 대한 specific power를 계산한 결과이다. 작동회전수 약 4,200 rpm에서 엔진전기출력 1 kW를 발생시키기 위하여 약 4.2 kW의 열 입력량이 필요한 것을 알 수 있다.

5. 결 론

1 kW급 양방향 스텔링 엔진/발전기를 설계, 제작하여 성능 실험을 수행하였다. 투입되는 연소 가스량을 변화시키며 열 투입 및 전기 출력 특성을 측정하였으며, 특히 엔진 발전 시스템에서의 에너지 출입량을 실험적으로 측정하여 엔진의 발전 효율을 측정된 결과부터 다음의 결론을 얻었다.

1. 연소가스 유량이 증가하여 열 유입량이 클수록 엔진 헤드의 온도는 거의 선형적으로 증가한다.
2. 유입량이 증가할수록 엔진 코일에서전압의 크기는 증가하지만, 그리드와 엔진 코일 사이에 설치된 콘덴서를 통하여 전압이 일정하지 않은 엔진 출력이 그리드에 안정적으로 결합된다. 또한, 엔진 출력이 작은 경우에는 그리드에서의 역률이 1보다 작은 값으로 나타나지만, 약 800 W 이상의 전기 출력 조건에서는 엔진 코일에서의 역률은 1보다 작은 반면에, 그리드에서의 역률은 1의 값을 갖는다.
3. 세 가지 다른 방법으로 엔진 효율을 측정된 결과 측정 오차로 인한 결과의 차이는 나타나지만 다른 방법으로 계산한 결과들이 모두 유사한 것을 확인하였으며, 엔진 발전 효율 측정 방법의 타당성을 간접적으로 확인하였다.
4. 엔진 발전 효율은 열 유입량이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으며, 약 1 kW 전기 출력 조건에서 엔진 발전 효율이 최대 24 %가 되는 것으로 나타났다.

후 기

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

References

1. M.W.Bae, 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, 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. I.Knight, I.Ugursal, "Residential Cogeneration Systems : A Review of The Current Technologies", A report of Subtask of FC+COGEN-SIM The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems, IEA/ECBCS, ISBN 9780662462217.
5. I.Urieli and D.M.Berchowitz, "Stirling Cycle Engine Analysis", Adam Hilger Ltd., Bristol, 1984.
6. 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.
7. W.R.Martini, "Stirling Engine Design Manual", National Aeronautics and Space Administration, 1983.
8. 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.
9. 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.