

# 소형 LTD 히트 엔진의 종류에 따른 기계적 출력 비교 분석

김영민 · 김원식 · 정해준 · 천원기\*

제주대학교 에너지공학과

## A Comparative Analysis of the Mechanical Power from a Small LTD Heat Engine

Yeongmin Kim · Wonsik Kim · Haejun Jeong · Wongee Chun<sup>†</sup>

Department of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University

<sup>†</sup>Corresponding author: wgchun@jejunu.ac.kr

### Abstract

This paper compares the output power of different types of small Stirling engines in conjunction with the utilization of low grade thermal energy. A series of experimental measurements were performed to assess the output power of each engine under different conditions of the temperature difference between the hot and cold ends as well as applied weight. Results are presented in terms of torque and output power per heat transfer area. Among tested, the MM-7 engine produced the highest power of 4.455mW (321mW/m<sup>2</sup>) under a temperature difference of 40°C.

**Keywords:** LTD 엔진(LTD engine), 스텔링엔진(Stirling engine), 저온폐열활용(Waste heat utilization), 기계적 출력(Mechanical power)



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.37, No.2, pp.59-66, April 2017  
<https://doi.org/10.7836/kjes.2017.37.2.059>

pISSN : 1598-6411  
eISSN : 2508-3562

Received: 08 March 2017

Revised: 14 April 2017

Accepted: 24 April 2017

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 1. 서론

신재생에너지 분야에서 최근 주목받고 있는 주요한 기술 중 하나는 저온의 폐열원에서 에너지를 얻는 방법이다. 대규모 산업 및 전력 발전 시설들은 그 공정 후에 다량의 버려지는 에너지가 발생하는데 이를 이용할 수 있는 기술이 부족하고 비효율적이어서 활용되지 못하고 있다. 또한 그대로 버리거나 방치할 경우 환경에 미치는 영향이 크기 때문에 다양한 냉각 시스템을 활용하여 제거하고 있는 실정이다<sup>1)</sup>. 하지만 세계적으로 에너지 문제가 대두되고 신재생에너지가 주목을 받기 시작하면서 이러한 저온 폐열원으로부터 에너지를 얻을 수 있는 기술 또한 주목을 받고 있다. 현재까지의 기술개발을 보면 100 ~ 200°C의 중저온 폐열을 이용한 스팀터빈이나 폐열 회수 열교환기와 같은 시스템이 개발되었지만 이를 이용할 수 있는 시설이 많지 않아 더욱 저온의 폐열 회수 시스템이 필요한 실정이다<sup>2)</sup>. 이러한 저온 폐열 회수

시스템에 이용되는 기술 중 하나가 본 실험실에서 연구하고 있는 LTD 히트 엔진(Low Temperature Differential Heat Engine) 발전 시스템이다.

이 시스템은 상온과 20~30°C의 온도차를 목표로 개발되고 있으며 크게 2가지 시스템으로 나눌 수 있는데 하나는 Gadolinium Generator를 이용한 발전 시스템이고 다른 하나는 LTD 스텔링 엔진을 이용한 발전 시스템이다. 스텔링 엔진은 닫힌 공간 안의 가스를 서로 다른 온도에서 압축 팽창시켜 열에너지를 운동에너지로 바꾸는 장치이다<sup>3-5)</sup>. 이론적으로 열효율이 가장 높다는 스텔링 사이클을 바탕으로 제작되었으며 저온부와 고온부의 온도차를 이용해 발전하여 폐열뿐만 아니라 태양열·지열등과 같은 다양한 열원에서의 발전이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 현재 판매되고 있는 KS90 엔진, KS90Twin 엔진, MM-7 엔진과 MM-7 엔진을 바탕으로 제작한 사각 LTD 스텔링엔진을 이용하여 기초실험을 진행하였고, 이러한 LTD 스텔링 엔진의 종류에 따른 기계적 출력을 비교 분석하여 최적의 효율적인 LTD 스텔링 엔진을 찾는 데 목표를 두었다.

## 2. 시스템 구조 및 실험 방법

### 2.1 시스템 구조

본 연구에 사용된 소형 LTD 히트 엔진은 감마( $\gamma$ )형 스텔링 엔진으로 저온도차 스텔링엔진에서 보편적으로 사용되어지고 있다. 감마( $\gamma$ )형 스텔링 엔진은 두 개의 실린더에 각각 디스플레이서와 파워피스톤이 하나씩 위치해있는 형태이며 LTD엔진의 상판(방열부)과 하판(가열부)사이 에 디스플레이서가 위치하게 제작되었다. 파워피스톤은 상대적으로 디스플레이서가 들어가 있는 실린더보다 매우 작은 사이즈의 실린더에 위치해있으며 상단의 플라이휠과 연결되어 있다. Fig. 1에 그 실제 모습을 나타냈으며, Table 1에 LTD엔진의 사양을 나타냈다.

여기서 Fig. 1(a)는 MM-7 스텔링엔진으로 American Stirling Company사의 제품이다. Fig. 1(b)는 MM-7엔진을 기반으로 자체 제작한 사각 스텔링엔진으로 시스템을 모듈화하기 용이하도록 사각 형태로 제작하였다. Fig. 1(c)는 KS90 Single 스텔링엔진으로 Kontax사의 제품이며 Fig. 1 (d)는 KS90 Twin 스텔링엔진으로 Kontax사의 제품이다.

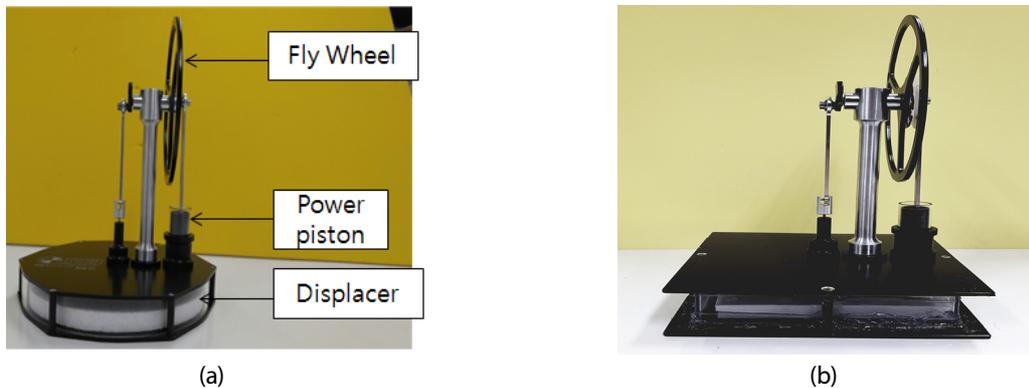


Fig. 1 Photograph of LTD stirling engines : (a) MM-7 engine (b) MM-7(rectangle) engine (c) single engine (d) twin engine



**Fig. 1** Photograph of LTD stirling engines : (a) MM-7 engine (b) MM-7(rectangle) engine (c) single engine (d) twin engine (Continued)

**Table 1** Specifications of LTD Stirling engines

	MM-7	MM-7 (rectangle)	Single	Twin
Displacer size	ø14 cm	11 x 11 cm <sup>2</sup>	ø7 cm	ø7 cm x2
Piston Material	Graphite	Graphite	Graphite	Graphite
Power cylinder Material	Borosilicate glass	Borosilicate glass	Borosilicate glass	Borosilicate glass
Flywheel	12 cm	12 cm	8.25 cm	8.25 cm
Overall height	20.3 cm	20.9 cm	13 cm	14 cm
Weight	500 g	524 g	172 g	350 g
Temperature differential required	4°C	4°C	10°C	10°C

## 2.2 실험방법

본 연구에서 사용된 LTD엔진의 기계적 출력을 실험을 통하여 산출하고 비교·분석함으로써 폐열활용의 적용 및 이용 가능한 수준을 고려해 볼 수 있다. LTD엔진의 기계적 출력을 구하기 위하여 LTD엔진 휠 축의 중앙에 추를 연결하여 엔진 작동 시 올라오는 추의 평균 속도를 구하였다. 이 때, 추의 질량(1g, 2g, 3g) 과 온도차( $\Delta T$ : 10°C, 20°C, 30°C, 40°C) 등으로 변화시키며 상황별 LTD엔진의 출력을 측정하여 가능한 최대출력을 산출하였다.

스털링엔진의 열원 공급은 600W의 Heat Plate를 이용하였으며 하부판과 상부판 중앙 위치에 열전대를 설치하여 상하부판의 온도차를 측정하였다.

또한, 본 연구에서 사용된 LTD엔진은 각기 다른 크기로 제작되어 각각 걸리는 토크가 다르게 측정되는데 그 계산은  $\tau = F \times r$  로써 힘에 반지름을 곱한 값으로 구할 수 있다. 여기서  $\tau = F \times r = m \times g \times r$  을 이용하여 본 연구에 사용된 LTD엔진의 토크를 계산하였는데 m, g, r은 각각 추의 질량, 중력가속도, 줄이 연결되어있는 크랭크축의 반지름을 나타낸다. Fig. 2는 기계적 출력 측정을 위한 본 실험의 실제측정구성을 보여준다.



Fig. 2 System for mechanical power calculation

### 3. 실험결과

#### 3.1 온도차 및 토크에 따른 LTD엔진의 출력 측정

추의 질량을 1 g, 2 g, 3 g 등으로 변경하며 측정하였으며 가열부와 방열부 간의 온도차 10°C, 20°C, 30°C, 40°C에 서 측정한 LTD 엔진별 토크, 출력, 단위면적 당 출력을 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6, Table 2, Table 3, Table 4, Table 5 에 나타내었다. 이때, LTD엔진의 출력은  $P = F \times V_{avg} = m \times g \times (distance/time)$  로 계산되어질 수 있다.

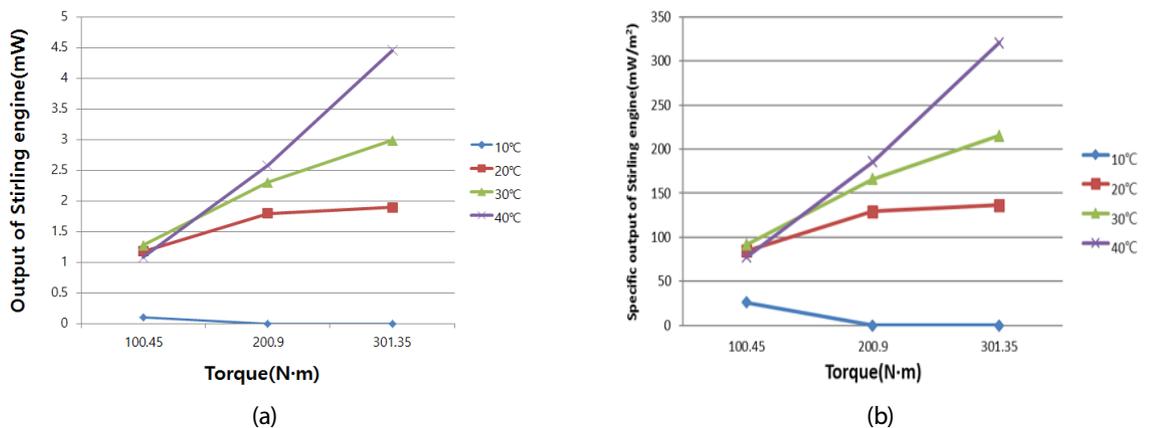
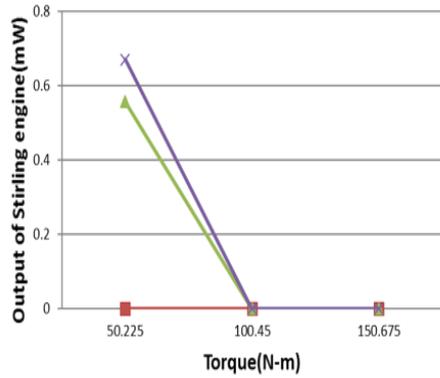
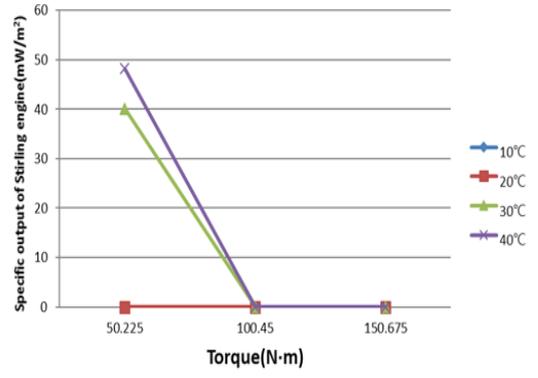


Fig. 3 (a) Output of Stirling engine against temperature difference and torque (MM-7) (b) Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque (MM-7)

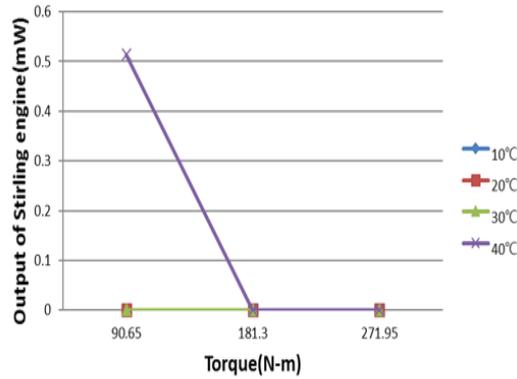


(a)

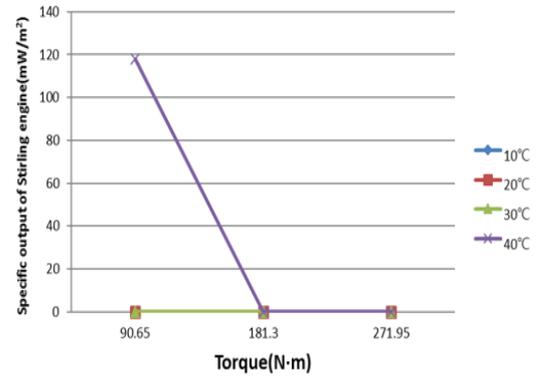


(b)

**Fig. 4** (a) Output of Stirling engine against temperature difference and torque (MM-7, rectangle) (b) Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque (MM-7, rectangle)

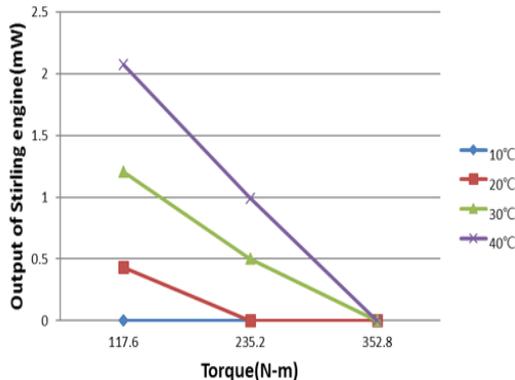


(a)

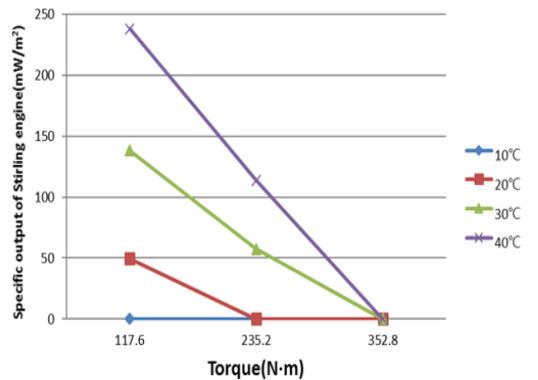


(b)

**Fig. 5** (a) Output of Stirling engine against temperature difference and torque(Single) (b) Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque(Single)



(a)



(b)

**Fig. 6** (a) Output of Stirling engine against temperature difference and torque(Twin) (b) Specific output of Stirling engine against temperature difference and torque(Twin)

**Table 2** Performance measurement of Stirling engine (MM-7)

MM-7												
$\Delta T$	10°C			20°C			30°C			40°C		
Weight (g)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Torque (N-m)	100.5	0.0	0.0	100.5	200.9	301.4	100.5	200.9	301.4	100.5	200.9	301.4
Power (mW)	0.363	0	0	1.176	1.795	1.893	1.274	2.305	2.988	1.078	2.579	4.455
Specific output (mW/m <sup>2</sup> )	26	0	0	85	129	136	92	166	215	78	186	321

**Table 3** Performance measurement of Stirling engine (MM-7,rectangle)

MM-7 (Rectangle)												
$\Delta T$	10°C			20°C			30°C			40°C		
Weight (g)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Torque (N-m)	0	0	0	0	0	0	50.2	0	0	50.2	0	0
Power (mW)	0	0	0	0	0	0	0.557	0	0	0.670	0	0
Specific output (mW/m <sup>2</sup> )	0	0	0	0	0	0	40	0	0	48	0	0

**Table 4** Performance measurement of Stirling engine (Single)

Single												
$\Delta T$	10°C			20°C			30°C			40°C		
Weight (g)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Torque (N-m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90.7	0	0
Power (mW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.514	0	0
Specific output (mW/m <sup>2</sup> )	0	0	0	0	0	0	0	0	0	118	0	0

**Table 5** Performance measurement of Stirling engine (Twin)

Twin												
$\Delta T$	10°C			20°C			30°C			40°C		
Weight (g)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Torque (N-m)	0	0	0	118.0	0.0	0.0	118.0	235.0	0.0	118.0	235.0	0
Power (mW)	0	0	0	0.431	0	0	1.204	0.501	0	2.072	0.992	0
Specific output (mW/m <sup>2</sup> )	0	0	0	50	0	0	138	58	0	238	114	0

### 3.2 온도차 및 토크에 따른 LTD엔진의 출력 비교·분석

온도차 및 토크에 따른 LTD엔진의 출력을 측정하고 MM-7엔진의 경우 온도차  $\Delta T=10^\circ\text{C}$ 일 경우 추의 질량 2g, 3g에서는 LTD엔진이 추를 들어 올리지 못하는 결과를 보였다. 100.45[N\*m]의 토크 값에서 온도차  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ 의 경우 서로 비슷한 출력을 보였으나 더 높은 토크 값을 가졌을 시에는 확연히 다른 출력 값이 측정되어 온도차  $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ 의 경우 4.455mW의 출력값을 보였다.

Single엔진의 경우  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 에서 질량 1g, 2g, 3g에서 추를 들어 올리지 못하였으며,

온도차  $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$  에서 1 g의 추를 들어올려 0.514 mW의 출력 값을 보였으나 후에 2g, 3g은 올리지 못하는 결과가 나왔다.

Twin엔진의 경우 온도차  $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ 에서는 본 연구에 사용된 추를 전부 올리지 못하였으며, 온도차  $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$  경우 질량 2 g과 3g,  $\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$  와  $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$  경우는 3 g을 올리지 못하였다. 이 중 온도차  $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$ , 1 g에서 2.072 mW의 출력 값을 보였다. Twin엔진의 경우 Single엔진 2개를 직렬로 연결한 구조로서 엔진의 출력에 가장 큰 영향을 미치는 디스플레이셔와 전열면적이 Single엔진에 2배이다. 따라서 엔진의 출력도 2배가 될 것이라고 예상하였으나 실제 출력 값은 4배로 측정되었다. 이는 디스플레이셔가 왕복 운동할 때 2개의 디스플레이셔가 서로 상호 작용을 하여 더 높은 출력을 보인 것으로 사료된다.

사각형으로 제작된 LTD엔진의 경우 실험 진행 중 온도차  $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$ 에서 추 1g을 올리지 못하였다. 이에 추의 질량을 500 mg으로 낮추어 실험을 진행하였으며 온도차  $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$ 에서 0.669 mW의 출력이 산출되었다.

이에, MM-7엔진의 경우 온도차  $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$ 에서 3g의 추를 들어 올려 기계적 출력이 4.455 mW로 본 연구에서 비교된 서로 다른 종류의 LTD엔진 중 가장 높게 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 소형 LTD 히트 엔진의 종류에 따른 기계적 출력을 비교 분석하였으며 이 중 저온폐열활용에 가장 적합한 LTD엔진을 찾자 하였으며 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 LTD엔진의 종류에 따른 토크 및 온도차에 따른 기계적 출력을 측정하고 비교 및 분석하였다.
- (2) MM-7엔진의 경우 온도차  $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$ 에서 기계적 출력이 4.455 mW로 본 연구에서 사용된 LTD엔진 중 가장 높은 기계적 출력을 나타냈다.
- (3) 단위면적당 출력 또한 MM-7엔진이 가장 높은  $321\text{mW}/\text{m}^2$ 의 출력을 나타냈다.
- (4) 이에, 본 연구에서 연구된 엔진 중 MM-7엔진의 출력이 전체적으로 높게 나온 점으로 보아 저온폐열활용에 가장 적합한 성능을 가졌다고 사료된다.
- (5) 또한, Twin엔진이 Single엔진보다 면적은 2배 넓지만 4배 더 높은 출력을 보였는데, 이는 두 개의 디스플레이셔의 상호 작용에 따라 높은 출력을 보인 것으로 판단된다.
- (6) 본 연구에서 얻은 결과를 바탕으로 추후 MM-7엔진을 Twin엔진과 같이 제작하여 모듈화 한다면 보다 높은 출력을 얻을 수 있을 것이라 사료된다.

#### 후기

본 연구는 한국연구재단 “저열원의 하베스팅을 위한 캐스케이드형 TM(Thermal to Mechanical Energy) 발전변환기술 개발”의 연구비 지원으로 수행되었음(과제번호: NRF-2017R1A2A1A05001461).

## REFERENCES

1. Kim, Y. M., Chen, K., and Chun W. G., An Experimental Study on LTD Stirling Engine (MM-7) for the Development of TM Electric Conversion System, *Journal of Energy Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 9-14, 2016.
2. Kato, Y., Indicated Diagrams of a Low Temperature Differential Stirling Engine Using Flat Plates as Heat Exchangers, *Renewable Energy*, Vol. 85, pp. 973-980, 2016.
3. Jang, S. J., Lee, Y. P., Sim, K. H., Experimental Feasibility Study on Low-Temperature Differential Stirling Engines with Water Spray Heat Transfer, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 38, No. 6, pp. 475-482, 2014.
4. SENFT, J. R., *An Introduction to Low Temperature Differential Stirling Engines*, Moriya Press, 2000.
5. Park, S. J., Ko, J. S., Hong, Y. J., and Kim, H. B., Technical Trend of Stirling Engine/Alternator, *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 5-12, 2015.