

TM발전변환기 개발을 위한 저온도차 스텔링엔진(MM-7)의 성능실측 연구

김영민 · 관첸* · 천원기[†]

제주대학교 에너지공학과, *유타대학교 기계공학과

(2016년 2월 22일 접수, 2016년 3월 18일 수정, 2016년 3월 21일 채택)

An Experimental Study on LTD Stirling Engine (MM-7) for the Development of TM Electric Conversion System

Yeongmin Kim, Kuan Chen*, Wongee Chun[†]

Department of Nuclear and Energy Engineering Jeju National University,

*Department of Mechanical Engineering University of Utah

(Received 22 February 2016, Revised 18 March 2016, Accepted 21 March 2016)

요 약

본 연구는 주위의 온도보다 약 20~30°C 밖에 높지 않은 저온폐열을 활용하기 위한 TM(Thermal to Mechanical) 발전변환기의 개발을 위하여 저온도차 스텔링엔진의 하나인 MM-7에 대한 성능실측 연구를 수행하였다. 스텔링엔진의 흡열부와 방열부의 온도차에 대한 토크 및 분당회전수를 측정하고 이를 바탕으로 MM-7 엔진의 출력을 산출하였으며, 이를 통하여 효율적인 TM발전변환기의 개발 방안을 모색하였다.

주요어 : 저온 폐열, 스텔링 엔진, TM발전변환기

Abstract - This study has been carried out to develop TM (Thermal to Mechanical) conversion systems for electric power generation using one of the Low Temperature Differential (LTD) Stirling engines called MM-7 capable of harnessing low temperature waste heat whose temperature is only 20~30°C above the ambient. Measurements were made on the torque and rpm for a number of temperature differentials between the engine hot and cold ends, which could be effectively applied in developing the most suitable configuration for the high performance TM (Thermal to Mechanical) conversion system.

Key words : Low Temperature Waste Heat, Stirling Engine, Thermal to Mechanical Energy Electric Conversion System

1. 서 론

저온 폐열로부터 전력을 생산하는 것은 산업계에서 확대되는 주요한 기술이다. 대규모 기계 가공 및 전력 발전 시설들은 정상작동 시 다양한 공정에서 다량의 열

에너지가 발생하는데, 이와 관련하여 다양한 냉각 또는 HVAC(Heating, Ventilation, Air Conditioning) 시스템을 사용하게 된다. 특히, 이러한 시설들은 주위에 비해 20~30°C 정도 밖에 높지 않은 폐열을 지속적으로 발생 시키며, 이는 잠재적으로 유용한 에너지원으로서 에너지 신소재 및 폐열회수 기술의 개발과 함께 동력생산(발전)에 효율적으로 적용될 수 있다.

일반적으로 폐열회수와 함께 현재 고려될 수 있는 발전기술은 고가의 열전발전기(Thermoelectric generator)

[†]To whom corresponding should be addressed.
Department of Nuclear and Energy Engineering Jeju National University
Tel : 064-754-3646 E-mail: wgchun@jejunu.ac.kr

및 형상 기억 합금 활용 기술 등이며, 이들 방법을 통하여 열원과 열침원사이의 비교적 높지 크지 않은 온도차로부터 전력을 생산할 수 있다. 그동안 폐열원의 발전 적용과 관련하여 상당히 다양한 형태의 열전발전기 및 형상 기억 합금 발전 시스템이 개발되었으며, 최근에는 카르노 엔진에 가장 근접하다고 할 수 있는 하이트 엔진의 하나인 스티어링 엔진(Stirling engine)에 관한 연구도 꾸준히 이어오고 있다.

스티어링 엔진은 1816년 영국에서 로버트 스티어링에 의해 고안된 스티어링 사이클을 기반으로 닫힌 공간안의 작동가스를 서로 다른 온도에서 압축 팽창시켜 열 에너지를 기계적 운동에너지로 변환하는 열기관이다. 일반적으로 스티어링 엔진은 열원으로부터 열에너지를 공급받는 디스플레이서 피스톤과 기계적 동력을 발생하는 파워 피스톤, 효율 향상 위한 내부 열교환기인 재생기로 구성된다. 이 엔진은 이상적인 카르노 사이클에 필적하는 높은 효율, 운전 정숙성, 구조적 단순성, 다양한 열원에 대한 응용성 등 많은 장점으로 인하여 많은 연구가 진행되고 있다.^[1]

일반적으로 우리 주위에 상존하는 많은 에너지원이거나 폐에너지는 기술적인 한계 때문에 제대로 활용하지 못하고 있으며, 특히 열원의 온도가 낮을수록 그 활용 가능성도 비례하여 낮아진다고 할 수 있다. 저온도차 스티어링엔진은 이러한 열원을 이용하기 위하여 작은 온도차에서 작동할 수 있도록 구성된 스티어링 엔진으로서 지금까지 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다.

1982년 콜린는 끓는 물보다 낮은 온도에서 작동하는 스티어링엔진을 개발하였다.^[2] 1992년 James R. Senft는 온도차가 6°C에서 작동하는 스티어링 엔진을 개발하였으며^[3], 이 시스템을 개선하여 온도차가 0.5°C에서 작동하는 감마형 Ringbom 엔진을 개발하였다.^[4] 이처럼 저온도차 연구가 진행되고 있음에도 불구하고 이를 기계적 에너지로 변환시키는 연구에 대해서는 아직 미흡하다.

본 연구에서는 이러한 저온 폐열을 활용하기 위한 TM(Thermal to Mechanical energy)변환발전기의 개발을 위하여 저온도차 스티어링엔진의 기초실험을 진행하였다. 스티어링엔진의 흡열부와 방열부의 온도차에 대한 토크 및 분당회전수를 측정 및 산출하고 이에 따른 스티어링엔진의 출력을 산출하였다. 이를 통하여 TM발전변환기 개발방안에 대하여 모색하였다.

2. 시스템 구조 및 실험 방법

본 연구에 사용된 저온도차 스티어링엔진은 미국 American Stirling Company사의 MM-7 스티어링엔진이다. 피스톤과 파워 실린더 플라이휠의 재질은 각각 Graphite, Borosilicate Glass, Powder Coated Steel이며 스티어링엔진의 열전달에 가장 중요한 부분인 흡열부와 방열부는 Anodized Aluminum으로 제작되었다. MM-7 스티어링엔진의 최소 작동온도차는 4°C로 아주 작은 온도차로도 작동이 가능하다. Table 1은 MM-7 스티어링엔진의 사양을 보여준다.

Table 1. Specifications of the MM-7 Stirling Engine

Contents	Specification
Height	20.3 cm
Diameter Base	16.5 cm
Diameter Flywheel	12 cm
Weight	500 g
Temperature differential required	4°C
Piston Material	Graphite
Power Cylinder Material	Borosilicate Glass
Flywheel Material	Powder Coated Steel
Metal Parts	Anodized Aluminum and Steel

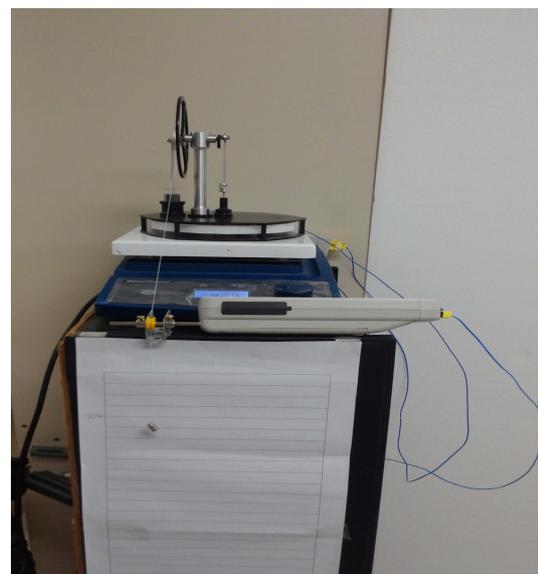


Fig. 1. Testing Setup

2-1. 시스템 구조

토크 및 플라이휠의 분당 회전수를 측정하기 위해 필라멘트 줄 끝에 추를 매달았으며, 다른 끝은 스텔링엔진의 크랭크축에 연결하였다. 열원을 공급하기 위하여 저온폐열을 대신하여 600W의 Heat Plate를 설치하였으며 스텔링엔진의 흡열부와 방열부에 열전대를 설치하여 온도차를 측정하였다. Fig. 1은 본 연구의 실험장치를 보여준다.

2-2. 실험방법

스텔링엔진은 Heat Plate에 의해 일정한 열원이 공급되면 작동이 시작되며 크랭크축이 회전할 때마다 크랭크축과 연결된 줄은 추를 들어 올리면서 크랭크축에 감기게 된다. 일정하게 유지되는 추의 무게는 축에 일정한 토크를 발생시킨다. 스텔링엔진이 시간의 흐름에 따라 일정한 온도차와 함께 안정적 상태에 도달하게 되면 추가 엔진에 의해 위쪽으로 당겨지기 시작하며 추의 이동 속도를 측정하기 위하여 영상 카메라로 관찰하였다. 실험은 추의 무게가 0.3-5.4g의 범위이며 전열판과 방열판의 온도차는 20, 25 및 30℃의 3개 온도차에서 이루어졌다. 본 실험은 오차를 줄이기 위하여 수차례 반복하였다.

3. 시뮬레이션 분석

본 실험에 앞서 실측 결과와의 비교 분석을 위하여 Matlab을 활용한 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 데이터 분석은 레이놀즈 수(Reynolds number)와 레일리

수(Rayleigh number) 등의 무차원수를 이용하여 수행하였다. 한편, 레일리 수는 누셀 수(Nusselt number)와의 아래와 같은 상관관계를 이용하여 계산하였다.

$$Nu = 0.54Ra^{\frac{1}{4}} \tag{1}$$

$$Ra = \frac{g \times \beta \times (T_s - T_\infty) \times (L^3)}{nu \times a} \tag{2}$$

$$h = Nu \frac{k}{L} \tag{3}$$

$$q = h \times A_s \times (T_s - T_\infty) \tag{4}$$

Nu = 누셀 수, Ra = 레일리 수, g = 중력 상수, β = 1/주위 온도, T_s = 상부 판 표면 온도, T_∞ = 주위 온도, L = 스텔링 엔진 상부 판의 지름, nu = 공기의 동점도, a = 공기의 열확산 계수, h = 대류 상수, A_s = 스텔링 엔진의 상부 판 면적, q = 열 손실을 나타낸다. 이 등식들은 레일리 수 > 104 경우 유효하다. 실험중 모든 조건에서 레일리 수는 임계값 104보다 낮았다고 가정하였으며, 주변으로 열손실은 다음의 식을 사용하여 산출하였다.

$$q = k \times s \times (T_s - T_\infty) \tag{5}$$

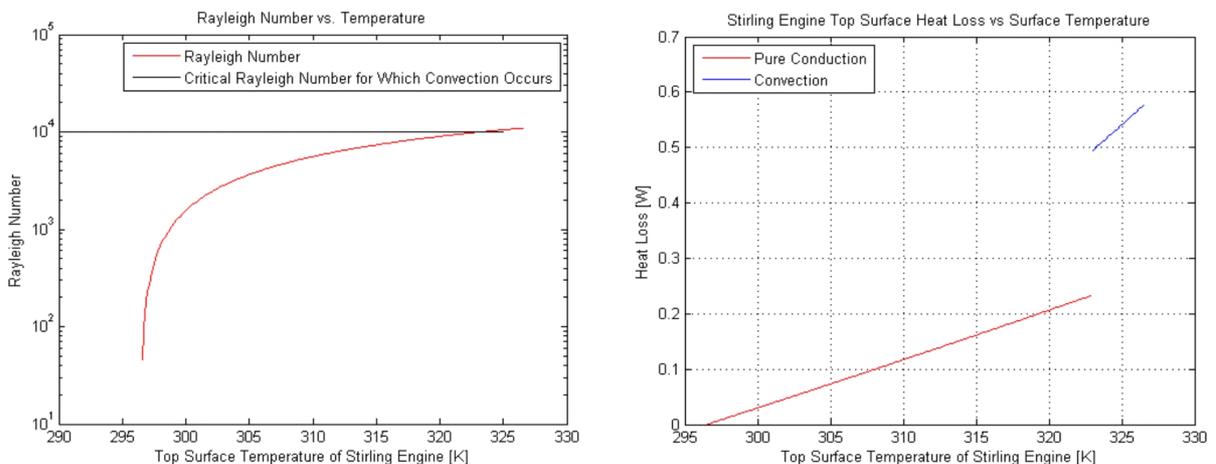


Fig. 2. Calculating the Heat Loss to Local Surroundings for a Horizontal Flat Plate

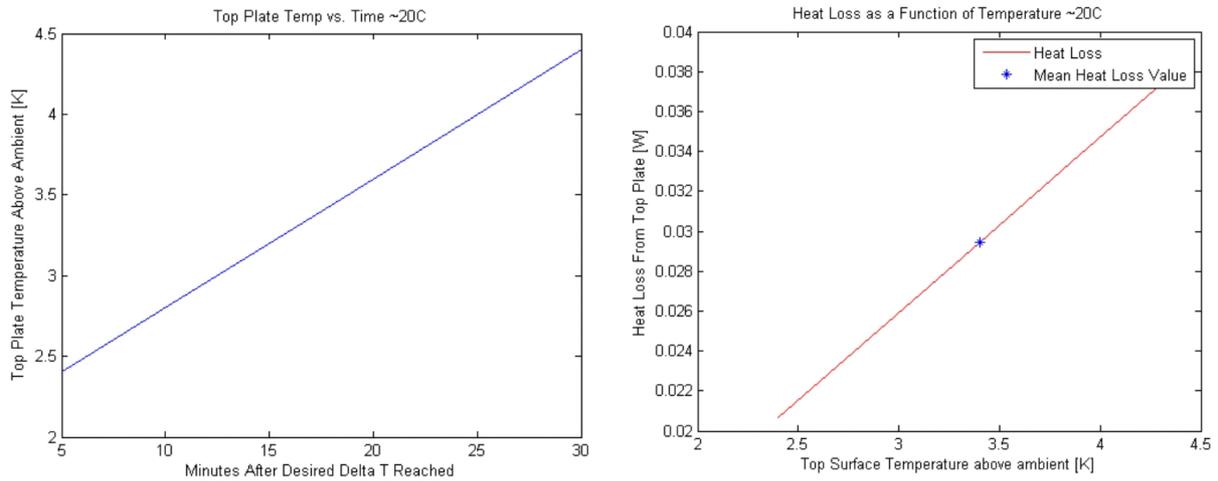


Fig. 3(a). Transient Top Plate Temperature and Heat Loss from Top Plate - $\Delta T = 20^{\circ}C$

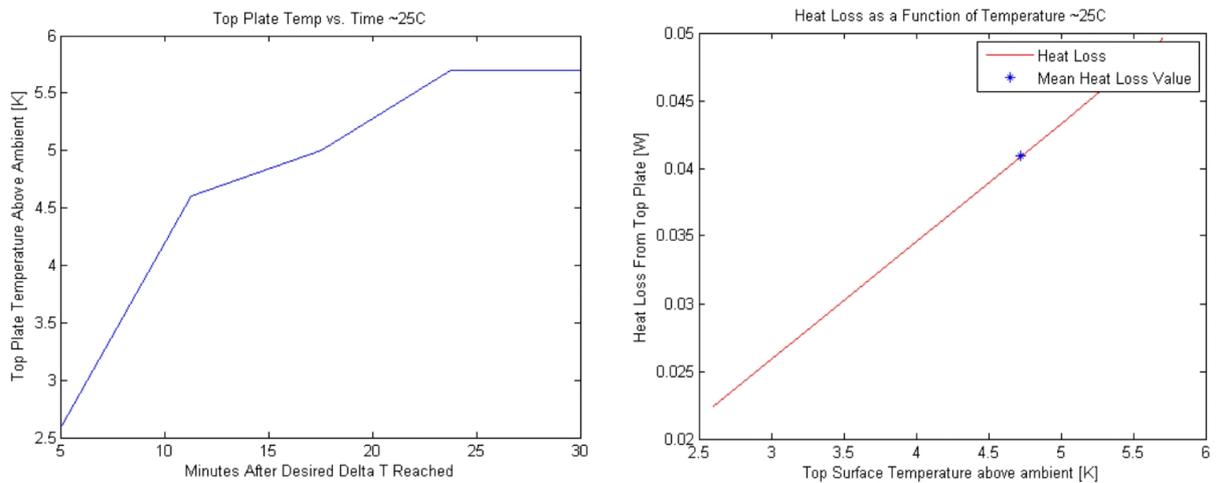


Fig. 3(b). Transient Top Plate Temperature and Heat Loss from Top Plate - $\Delta T = 25^{\circ}C$

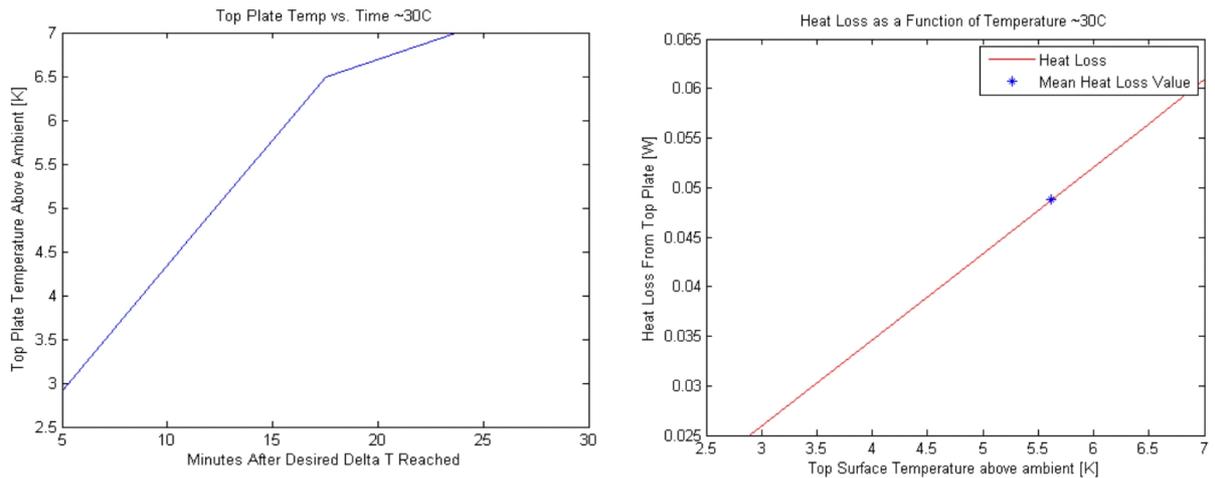


Fig. 3(c). Transient Top Plate Temperature and Heat Loss from Top Plate - $\Delta T = 30^{\circ}C$

Fig 3. Transient Top Plate Temperature and Heat Loss from Top Plate for Various ΔT

여기서, s 는 형상 개수로서 스텔링 엔진 상부 판 지름의 두 배이다.

이 식은 상부 판에서 주변 공기로의 열 손실을 측정하기 위해 사용되었다. 실험 과정에서 시간이 경과함에 따라 스텔링 엔진의 상부 판 온도가 상승하는 것을 알 수 있었으며 주변으로의 열 손실을 측정하기 위해 시간에 따른 상부 판의 온도변화 및 주변 온도 변화를 측정하여 분석하였다. 이 분석에서 상부 및 하부 판 온도 차를 각각 20, 25, 30℃로 설정하였으며 상부 판 온도는 원하는 온도 차에 도달한 5분 뒤부터 시작해 25분 동안 매 5분마다 측정됐다. Fig. 2는 수평 평판 및 상온일 때 레일리 수(Rayleigh No.)와 상판부에서의 열손실을 보인 것이다. 그림에서와 같이 상판부의 온도가 상승하여 레일리 수(Rayleigh No.)의 포화 값에 이르게 되면 열손실은 전도에서 대류로 변하며 열손실이 급격하게 늘어남을 알 수 있다. Fig. 3은 온도차가 이루어진 후의 상판 부 온도변화 및 열손실을 나타내고 있다. Fig 3(a), 3(b), 3(c)는 각각 ΔT 가 20℃, 25℃, 30℃ 일 때를 나타낸 것이며 이 때 열손실 값은 각각 0.0294, 0.0409, 0.0488로 산출되었다.

위와 같은 전력 출력 대비 상부 판 열 손실에 대한 분석에서 시스템 효율은 예상과는 달리 30℃가 아니라 20℃ 온도차에서 제일 높음을 알 수 있었으며 예측된 출력 값은 7mW이다. 시스템 효율이 20℃에서 가장 높은 이유는 보다 높은 온도차의 경우 상부판 온도가 빠르게 상승해 손실이 커지기 때문으로 생각된다.

4. 실험결과

본 실험에서 산출된 토크, 분당 회전수 및 출력은 아래의 수식에 의해 산출되었다.

$$Torque = F \times r = m \times g \times r \quad (6)$$

$$RPM = \frac{(V_{avg} \times 60)}{(2\pi r)} \quad (7)$$

$$Power = F \times V_{avg} = m \times g \times \left(\frac{distance}{time}\right) \quad (8)$$

여기서, m 은 추의 질량, g 는 중력가속도, r 은 줄이 연결된 크랭크축의 반지름, $distance$ 는 추의 이동거리,

V_{avg} 는 추의 평균 속도이다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 토크 대 속도, 토크 대 동력 결과를 보여준다. 실험에서 발생된 최대 전력 출력은 온도차가 30℃, 토크가 약 0.3 N·mm일 때 약 2.5mW로 산출되었다.

실험을 통해 산출된 약 2.5mW는 Matlab을 이용하여 예측된 출력 값 7mW의 35.8%이다. 실제 산출된 값과 시뮬레이션으로 예측된 출력 값이 다소 차이를 보이며 최대 출력이 실제 산출된 온도차와 시뮬레이션으로 예측된 온도차가 서로 다른 이유는 스텔링 엔진을 결합하기 위해 사용된 나사 및 기타 구성들이 흡열부와 방열부 사이의 열을 전달시켜 작동 유체로의 열전달을 감소시켰기 때문으로 사료된다.

Fig. 4와 Fig 5에서 확인할 수 있듯이 높은 토크와 출력을 얻기 위해서는 흡열부와 방열부의 온도차를 크게 하는 것이다. 그러나 시뮬레이션 분석을 통해 온도차가 클수록 열손실로 인해 시스템 효율이 떨어짐을 확인할 수 있었다. 따라서 스텔링 엔진을 활용한 TM발전변환기 제작 시 온도차에 맞는 최적화 된 설계 및 제작이 필요하다.

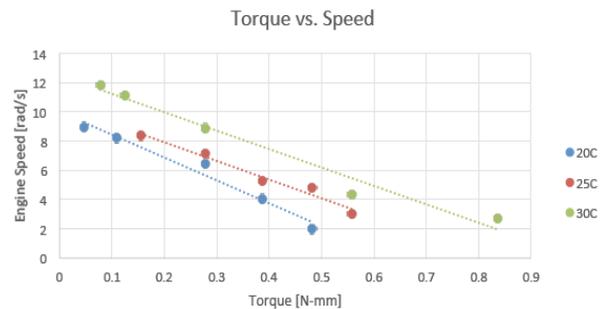


Fig. 4. Torque - Speed Curve

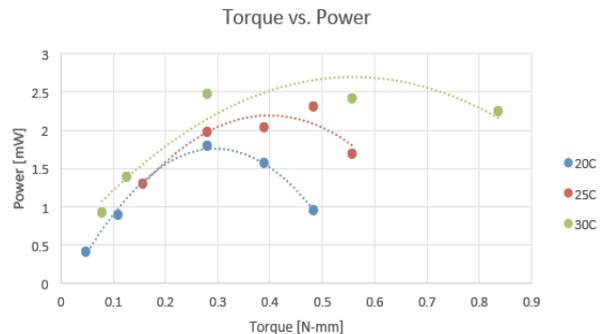


Fig. 5. Torque - Power Curve

5. 결 론

본 연구에서는 TM발전변환기 개발을 위하여 저온도차 스텔링엔진의 기초연구를 진행하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 Matlab을 이용하여 스텔링 엔진의 온도차에 따른 열손실을 예측하고 시스템 효율을 분석하였으며 실험을 통해 비교 분석하였다.
- (2) 시뮬레이션 분석에서 열손실은 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서 가장 높았으며 시스템 효율은 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 에서 가장 높게 예측되었다. 또한, 예상 최대 출력은 7mW로 측정되었다. 시스템 효율이 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 에서 가장 높은 이유는 온도 차가 클 경우 상부 판 온도가 빠르게 상승해 손실이 커지기 때문으로 사료된다.
- (3) 실측 실험결과에서 최대 출력은 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$, 토크가 약 0.3 N·mm일 때 약 2.5mW로 산출되었다. 실험을 통해 산출된 약 2.5mW는 Matlab을 이용하여 예측된 출력 값 7mW의 35.8%이다. 시뮬레이션 예측값과 실험 산출값이 많은 차이를 보이는 이유는 내부의 기계적 손실 및 열손실 등에 따른 것으로 사료된다.
- (4) 스텔링 엔진을 활용한 TM발전변환기 설계 및 제작 시 스텔링 엔진의 열손실을 줄이기 위한 방안을 모색하여야 하며 온도차와 출력간의 최적화가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서 스텔링엔진 내부의 기계적 손실 및 열손실 등은 포함하지 않았으며 주변으로 열의 전달은 고려하지 않았다. 이에 개선해야 할 여지가 있으며 차후 추가적인 실험을 통해 확인할 계획에 있다.

후 기

이 논문은 2015학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

References

1. Jang SJ, Lee YP, Sim KH., Experimental Feasibility Study on Low-Temperature Differential Stir-

- ling Engines with Water Spray Heat Transfer, Trans. Korean Soc. Mech. Eng., 38(6), pp. 476~482, 2014.
2. Kolin I., Stirling engine history-theory-practice (Dubrovnik, Zagreb University Publications, Ltd., 1991).
3. Senft JR., An Introduction to Stirling Engines, 1st ed., (Morilla Press 1993).
4. Senft JR., Ringbom Stirling Engines, (Oxford University Press, New York, 1993).
5. Bergman TL, Lavine AS, Incropera FP, DeWitt DP., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley and Sons 7th ed, 2011.
6. Cengel YA., Thermodynamics: An engineering Approach, McGraw Hill 7th ed, 2011.
7. "Thermoelectrics" <http://thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/engineering.html>.
8. Haywood D. An Introduction to Stirling Cycle Machines, http://www.occc.edu/gholland/Thermo/Stirling_Intro.pdf.
9. Thrasger M. IOP Science, <http://iopscience.iop.org/0964-1726/3/2/019/pdf/sm940219.pdf>.