



[2017-6-WE-005]

# 자기열량효과 물질을 이용한 저온도차 열변환발전 시스템의 성능 분석 연구

김원식<sup>1)</sup> · 정해준<sup>1)</sup> · 김영민<sup>1)</sup> · 천원기<sup>1)\*</sup>

## Performance Study of a Power Conversion System with Materials Showing a Magnetocaloric Effect in Harnessing Low Temperature Differentials

Wonsik Kim<sup>1)</sup> · Haejun Jeong<sup>1)</sup> · Yeongmin Kim<sup>1)</sup> · Wongee Chun<sup>1)\*</sup>

Received 10 February 2017 Revised 13 June 2017 Accepted 16 June 2017

**ABSTRACT** This paper discusses the production of power from low-grade thermal energy using materials with a magnetocaloric effect, such as gadolinium. Gadolinium generally retains its ferromagnetic property at temperatures below 20 °C, but becomes strongly paramagnetic above this temperature. Taking advantage of this magnetocaloric effect, the present research seeks various ways to develop power from low-grade waste heat, which are yet to be explored. This technology, if applied appropriately, will generate electric energy from the waste heat discarded by HVAC systems (of large buildings) and power plants. A series of experiments were carried out by designing and fabricating a prototype system using gadolinium to elicit the optimal conditions in utilizing waste heat below 80 °C. As a result, the maximum mechanical power of the gadolinium generator was 29.4 mW when the temperature difference was approximately 45 °C and the weight was 50 g, and the maximum electric power was calculated to be 0.0085 mW.

**Key words** Gadolinium, Low-grade waste heat, Magnetocaloric effect, Electric energy

### 1. 서 론

저온 폐열로부터 전력을 생산하는 기술은 화석연료를 대체할 수 있는 방안으로써 관심은 점차 증가되어지고 있다. 폐열을 전력이나 기계적 일로 변환하는 방식으로는 저온도차스털링엔진(LTD stirling engine), 열전소자(Thermoelectric) 및 형상기억합금(Shape memory alloy) 등을 이용하는 기술 방안이 있으며, 이 방식은 시스템 내의 온도차에서 전력

을 얻어낼 수 있다.<sup>[1-4]</sup> 위의 시스템들을 건물에 설치된 실외기, 냉각탑, 열 배관 등 폐열이 발생하는 부분에 적용하여 열에너지를 전기에너지로 회수한다면 에너지소비량을 절감시킬 수 있을 것으로 사료된다.<sup>[5]</sup>

본 연구에서는 아직 기존에 연구가 활발하게 되지 않은 가돌리늄(Gadolinium)을 활용한 열변환발전시스템을 연구하여 폐열회수를 위한 연구를 진행하였다. 가돌리늄은 약 20°C를 기준으로 하여 이보다 낮아질수록 점점 강자성을 띠며 이보다 높아질수록 상자성을 갖는 성질이 있다.<sup>[6-8]</sup> 본 연구에서는 가돌리늄의 이러한 특성을 이용하여 Generator coil과 AC 모터로 작동하는 두 가지 유형의 열변환발전시스템을 제작하고 각 각의 출력을 측정 및 산출하였다.

1) Department of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University

\*Corresponding author: wgchun@jejunu.ac.kr

Tel: +82-64-754-3646 Fax: +82-64-757-9276

## 2. 열변환발전시스템의 구조

전술했듯이 가돌리늄의 물리적 성질은 20°C를 기준으로 이하에서는 강자성을 띄며 20°C 이상에서는 상자성을 띄는 성질을 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 가돌리늄의 온도에 따른 자성 변화를 이용하여 발전장치를 구상하였다. 본 연구에 사용된 가돌리늄은 1cm \* 1cm \* 1cm 사이즈의 큐브형태이며 총 16 개의 가돌리늄을 회전축에 부착하여 사용하였다. 가돌리늄이 부착된 회전축의 한 쪽 편에 10cm \* 2.5cm \* 1cm 사이즈의 네오디움 자석을 매우 밀접한 0.1mm 이하의 간격을 두어 고정하였다. Table 1은 열변환발전시스템의 사양을 보여준다.

## 3. 실험방법

### 3.1 Mechanical power

실험진행시 고온의 물은 네오디움 자석이 고정되어있는 편에 흘러주어 자석 인근에서는 자력이 약해지게 하고, 자석과 떨어지는 부근에는 저온의 물을 흘러주어 강자성을 띄게 해 연속적인 회전을 하도록 하였다. 이 때, 회전하는 축에 추를 연결하여 온도차 및 질량에 따른 기계적 출력을 산출하였다. 추의 질량은 5g부터 10g, 20g, 50g 순으로 실험을 진행하였으며, 온도차는 20°C, 30°C, 40°C, 45°C로 설정하여 각각의 출력을 산출하였다. 고온의 물은 관내 직경 3.8Ø를 통해 300ml/min의 유량으로 네오디움 자석이 고정되어있는 부근에 흘러주었으며 저온의 물은 2개의 관을 사용하였으며 각각 120° 씩 떨어진 지점에 연결하였다. Fig. 1, Fig. 2에 각각 가돌리늄 발전장치 고온과 저온의 물이 투입되는 위치의 모습과 가돌리늄 발전장치에 추를 달아 기계적 출력을 측정하는 모습을 나타내었다.

Table 1. Specifications of gadolinium generator

Contents	Specification
Height	21 cm
Width	30 * 30 cm
Weight	2.3 kg
Temperature differential	20°C >
Gadolinium	1 cm * 1 cm * 1 cm x16
Neodymium Magnet	10 cm * 2.5 cm * 1 cm

### 3.2 Electric power

Electric power는 두 가지 방식의 열변환발전시스템의 출력을 측정 및 산출하였다. 첫 번째는 AC모터를 열변환발전시스템과 연결하여 발전기로 사용하였으며 열변환발전시스템의 축에 직경 Ø130mm의 휠을 부착하고 AC모터 측에 직경 Ø7.5mm의 휠을 부착하였다. 이때, 기어비는 약 1:17 정도로 설계되었다. AC 모터는 소형 풍력발전기 kit에서 구매한 것으로 자세한 스펙(권선 수 등)은 없다. Fig. 3에 AC 모터를 활용한 출력 실험을 나타냈다.

두 번째 방식은 Generator coil을 활용하여 발전장치를 구성하였으며, Generator coil의 권선 수는 약 750 회이며 총 6 개를 사용하였다. 이때, 자석이 상단에 설치된 코일에 영향을 끼치게 된다. 이에 열변환발전시스템을 자기장차폐체로 감싸 자장이 밖으로 흐르지 못하도록 제작하였다. Fig. 4에 Generator coil을 활용한 출력 실험을 나타냈다.

두 방식 모두 기계적 출력계산시 가장 높은 온도차였던 온도차 약 ΔT=45°C 사이에서의 시간에 따른 전압, 전류 및 출력을 측정하였다. Fig. 5에 전압 및 전류 측정 방법을

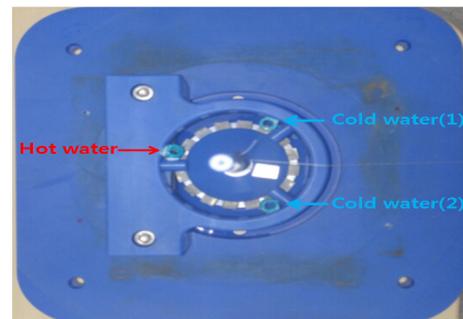


Fig. 1. Position of hot water and cold water in gadolinium generator

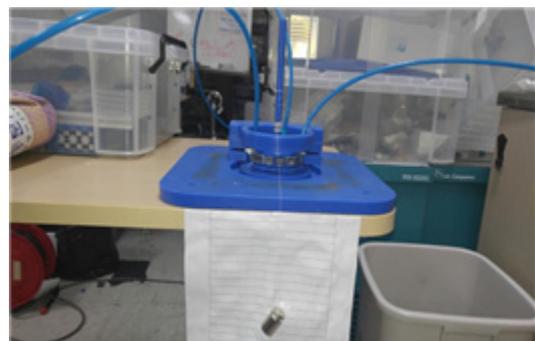


Fig. 2. System for mechanical power calculation in gadolinium generator



Fig. 3. Experiment of output using AC motor

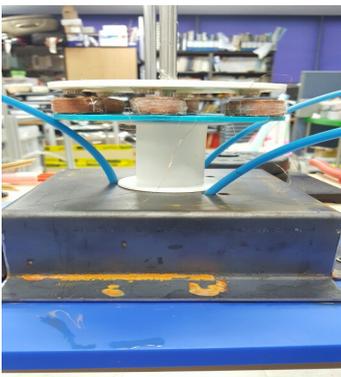


Fig. 4. Experiment of output using generator coil

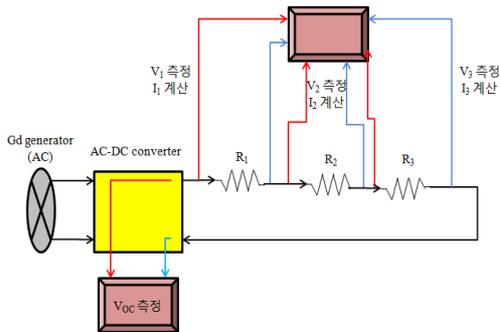


Fig. 5. Schematic of gadolinium electric generator

나타내었다. 여기서  $V_{oc}$ 는 개방회로이며  $V_1, V_2, V_3$ 는 각 저항의 양단에서 측정한 값이다.

## 4. 실험결과

### 4.1 Mechanical power

#### 4.1.1 열변환발전시스템 토크

기계적 출력을 계산하기위해  $\tau = F \times r = m \times g \times r$  식을

Table 2. Torque by mass

Gd generator			
질량(g)	중력가속도(m/s <sup>2</sup> )	반지름(mm)	토크(N*mm)
5	9.8	5	0.245
10			0.49
20			0.98
50			2.45

이용하여 본 연구에 사용된 열변환발전시스템의 토크를 계산하였다. 여기서,  $m$ 은 추의 질량,  $g$ 는 중력가속도,  $r$ 은 회전축의 반지름을 나타낸다. 5g, 10g, 20g, 50g과 추의 반경 5mm에서 열변환발전시스템에 걸리는 질량별 토크를 Table 2에 나타내었다.

열변환발전시스템의 각 질량별 토크는 질량 5g, 10g, 20g, 50g에 따라 각각 0.245[N\*mm], 0.49[N\*mm], 0.98[N\*mm], 2.45[N\*mm] 등으로 계산되었다.

#### 4.1.2 질량과 온도에 따른 열변환발전시스템의 출력 및 RPM

$\Delta T = 20^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}, 45^\circ\text{C}$ 에서 추 질량을 5g, 10g,

Table 3. Performance measurement of gadolinium generator ( $\Delta T = 20^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}, 45^\circ\text{C}$ )

Gd generator				
	추질량 (g)	토크 (N-mm)	출력 (mW)	분당회전수 (r/mim)
$\Delta T = 20^\circ\text{C}$	5	0.245	2.94	114.6
	10	0.49	5.39	105.1
	20	0.98	0	0
	50	2.45	0	0
$\Delta T = 30^\circ\text{C}$	5	0.245	3.136	107.0
	10	0.49	5.586	108.9
	20	0.98	9.8	95.5
	50	2.45	0	0
$\Delta T = 40^\circ\text{C}$	5	0.245	3.18	124.2
	10	0.49	6.664	129.9
	20	0.98	12.25	119.4
	50	2.45	20.09	108.9
$\Delta T = 45^\circ\text{C}$	5	0.245	4.067	158.5
	10	0.49	6.86	133.7
	20	0.98	12.93	126.1
	50	2.45	29.4	114.6

20g, 50g로 높여가며 측정하였다. Table 3에 측정 데이터를 나타냈으며 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9에 그래프로 나타냈다.

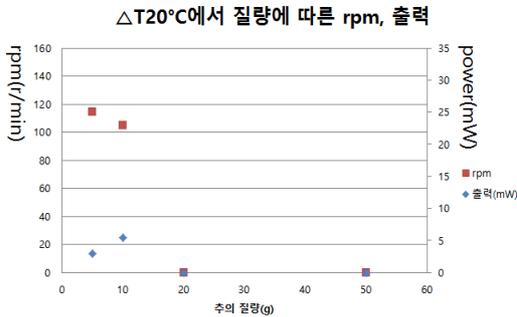


Fig. 6. RPM and mechanical power vs mass ( $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ )

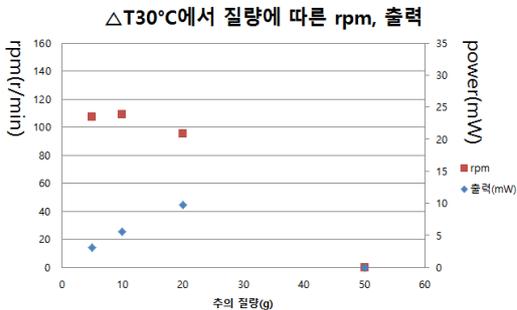


Fig. 7. RPM and mechanical power vs mass ( $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ )

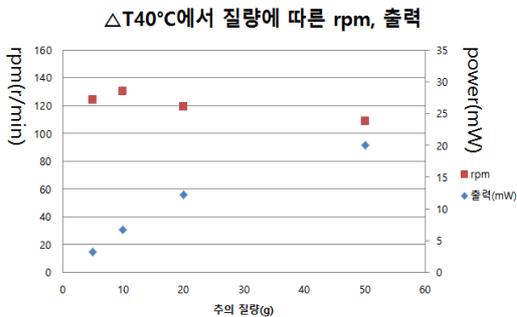


Fig. 8. RPM and mechanical power vs mass ( $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ )

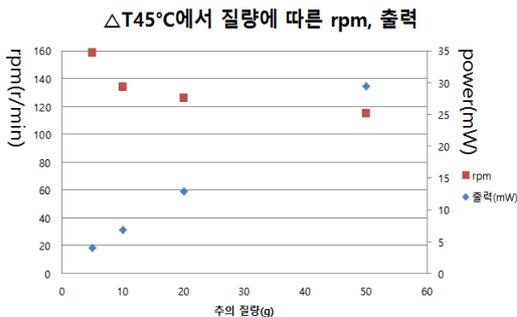


Fig. 9. RPM and mechanical power vs mass ( $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ )

## 4.2 Electric power

### 4.2.1 AC motor를 활용한 열변환발전시스템

Table 4, Fig. 10에 AC 모터를 사용했을 시의 열변환발전시스템의 출력을 나타냈다. 온도차 약  $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서 출력을 측정한 결과 개방전압은 약 1.58V가 측정되었으며, 100k $\Omega$ 의 저항 3개를 사용하여 측정했을 시의 전압은 각각 0.44V, 0.41V, 0.36V가 측정되었다. 이때의 출력은 각 0.0019mW, 0.0017mW, 0.0013mW로 산출되어, AC 모터를 사용했을 시의 총 출력은 0.0049mW로 계산되었다.

### 4.2.2 Generator coil을 활용한 열변환발전시스템

Table 5, Fig. 11에 Generator coil을 사용했을 시의 열변환발전시스템의 출력을 나타냈다. Generate coil을 활용한 실험은 AC 모터를 사용했을 시와 같은 조건인 온도차 약  $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서 출력을 측정하였다. Generator coil 활용 시 열변환발전시스템의 개방전압은 약 1.848V가 측정되었으며, 100k $\Omega$ 의 저항 3개를 사용하여 측정했을 시의 전압은 각각 0.51V, 0.54V, 0.546V가 측정되었다. 그 결과 Generator coil활용 시의 출력은 각 0.0019mW, 0.0017

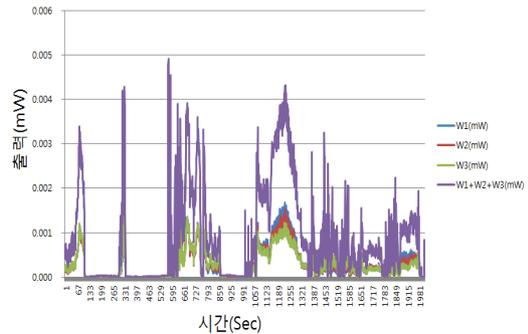


Fig. 10. Electric power change over time (AC motor)

Table 4. Performance measurement of gadolinium electric generator ( $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ ) ; AC motor

Gadolinium electric generator			
최대Voc = 1.58V, 저항 = 100k $\Omega$			
	전압(V)	전류(mA)	출력(mW)
1	0.44	0.0044	0.0019
2	0.41	0.0041	0.0017
3	0.36	0.0035	0.0013
Total	1.21		0.0049

Table 5. Performance measurement of gadolinium electric generator ( $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ ) ; Generator coil

Gadolinium electric generator			
최대Voc = 1,848V, 저항 = 100k $\Omega$			
	전압(V)	전류(mA)	출력(mW)
1	0,51	0,0051	0,0026
2	0,54	0,0054	0,0029
3	0,546	0,00546	0,003
Total	1,596		0,0085

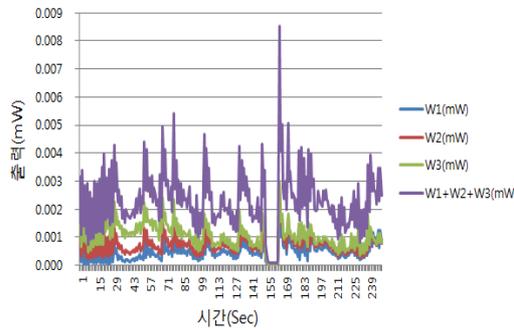


Fig. 11. Electric power change over time (Generator coil)

mW, 0.0013mW로 산출되어 총 출력은 0.0085mW로 나타났다.

### 4.3 Mechanical power vs. Electric power (AC motor, Generator coil)

Mechanical power는 29.4mW의 출력이 산출되었으며, Electric power는 AC motor 활용 시 0.0049mW, Coil 활용 시 0.0085mW 로 단순 수치상으로는 Generator coil 을 활용한 열변환발전시스템이 AC 모터를 활용했을 때보다 1.7배의 높은 출력을 나타냈다. 하지만 두 방법 모두 Mechanical power에 비해 출력이 매우 낮게 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서는 열변환발전시스템의 기계적 출력 및 열변환발전시스템에 접목시킨 다른 두 가지 유형의 발전기 출력을 측정 및 산출하였다. 이에 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 열변환발전시스템의 Mechanical power 최대값은 온도차 약  $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ , 추의 질량이 50g일 때 29.4mW로 산출되었다.
- 2) 열변환발전시스템에 접목시킨 두 가지 유형의 발전기는 AC 모터 및 Generator coil을 활용한 시스템이며, 온도차 약  $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$  상에서 각각 0.0049mW 및 0.0085mW 로 산출되었다.
- 3) 이에, 단순 수치상 비교 시 Generator Coil이 AC 모터를 활용했을 때보다 1.7배의 높은 출력을 보였다.
- 4) Mechanical power와 Electric power의 출력 비교 시 두 가지 유형의 발전기 모두 현저한 출력 차이를 보였다.

연구 결과 두 가지 유형의 Electric power는 Mechanical power와 비교 시 상당히 낮고 불안정한 출력을 보였다. 하지만, 여기서 산출된 기계적출력은 열변환발전시스템의 가능한 최대출력임을 고려하면 이는 향후 발전시스템을 최적화함으로써 개선할 수 있을 것이라 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2016학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원 사업에 의하여 연구되었음.

## References

- [1] 정선준, 이운표, 심규호, 2014, “스프레이 열전달을 이용한 저온도차 스텔링 엔진의 실험적 개념 연구”, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, **38**(6), 475-482.
- [2] Senft, J.R., 2010, An Introduction to Low Temperature Differential Stirling Engines, moriya Pr, U.S.A.
- [3] 황재업, 이혜진, 김정인, 김수연, 박진호, 2016, “폐열을 이용한 형상기억합금 발전기”, 한국생산제조학회 학술발표대회 논문집, 172-172.
- [4] Borset, M.T., Wilhelmsen, O., Kjelstrup, S., Burheim, O.S., 2017, “Exploring the potential for waste heat recovery during metal casting with thermoelectric generators: On-site experiments and mathematical modeling”, Energy, **118**, 865-875.

- [5] 김영민, 관첸, 천원기, 2016, “TM발전변환기 개발을 위한 저온도차 스텔링엔진(MM-7)의 성능실측 연구”, 에너지공학, **25**(1), 9-14.
- [6] 이종석, 2004, “가돌리늄의 자기열량효과에 대한 실증실험”, 설비공학논문집, **16**(4), 383-389.
- [7] 박준우, 2012, “여러 첨단 분야에서 중요하게 사용되는 희토류 원소 가돌리늄(Gd)”, [http://navercast.naver.com/contents.nhn?rid=44&contents\\_id=17034](http://navercast.naver.com/contents.nhn?rid=44&contents_id=17034).
- [8] Aprea, C., Greco, A., Maiorino, A., 2011, “A numerical analysis of an active magnetic regenerative cascade system”, International Journal of Energy Research, **35**, 117-188.