

# 고분자 필름의 두께변화에 따른 열전소자의 출력 특성변화에 관한 연구

장 호 성<sup>†</sup>, 김 재 정, 김 인 관\*, 김 영 수\*\*  
부경대학교 냉동공조공학과, \*부경대학교 RRC, \*\*부경대학교 기계공학부

Research on the Output Characteristic of Thermoelectric Module according  
to the thickness variation of Polymer Pad

Ho-Sung Jang<sup>†</sup>, Jae-Jung Kim, In-Kwan Kim\*, Young-Soo Kim\*\*  
*Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong University, Busan 608-739, Korea*  
*\*Regional Research Center, Pukyong University, Busan 608-739*  
*\*\*School of Mechanical Engineering, Pukyong University, Busan 608-739*

**ABSTRACT:** In case of attaching thermoelectric module and heat source, the polymer pad is attached on the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> plate, which is cooling side of thermoelectric module, in order to enhance mechanical safety of the system. It is impossible to calculate the exact distribution of temperature and flow pattern of inner gap of thermoelectric module. Therefore CFD(Computational Fluid Dynamics) analysis was executed to determine the thermo-fluid phenomena and distribution by Fluent. As the result of these analysis, heat transfer was dominated by conduction and the difference of temperature was linear distribution according to the thickness of polymer sheet.

**Key words:** CFD(Computational Fluid Dynamics), Polymer Pad, Thermoelectric module, Thermal distribution

## 기 호 설 명

- $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]
- $g$  : 중력가속도 [m/s<sup>2</sup>]
- $\beta$  : 열팽창계수
- $T$  : 온도 [K]
- $U$  : 속도 [m/s]
- $p$  : 압력 [N/mm<sup>2</sup>]
- $C$  : 정압비열 [j/kg·K]

$k$  : 열전도율 [W/m·K]

## 1. 서 론

열전 발전이란 열에너지를 직접 전기에너지로 변환하는 방식이다. 고온부분과 저온부분 사이의 온도차에 의해 발생하는 열이 이동하려고 하는 에너지를 전기에너지로 변환시키는 것이 그 원리이다.

Fig. 1은 열전발전을 나타낸 것으로 그림과 같이 P형과 N형의 반도체를 접합한 단위 소자를 사용해서 발전한다. 그 원리는 소자의 한쪽을 저온으로, 다른 한쪽을 고온으로 유지하면 소자를 통해서 고온측에서 저온측으로 열류가 발생하는

<sup>†</sup>Corresponding author  
Tel : +82-51-620-1503; fax: +82-51-623-8495  
E-mail address: hodolly@nate.com

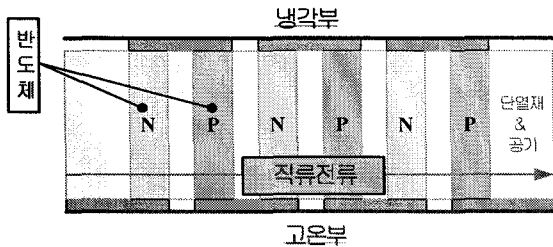


Fig.1 Fundamental of Thermoelectric Module

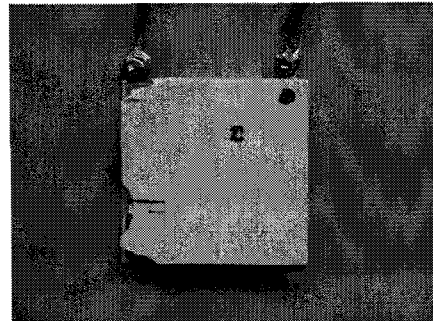


Fig. 3 Damaged Module

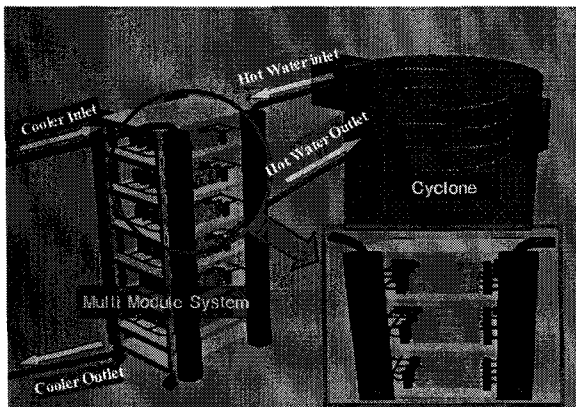


Fig. 2 Thermoelectric Generation System

데 고온측에서 소자안으로 열에너지가 유입되어 소자를 통과해서 저온측으로 방출된다.

이 때 소자안에 유입된 열에너지의 일부가 방출되지 않고 소자 내부에서 전기에너지로 변환되어 외부 부하에 의해 전력으로서 추출된다.

Fig. 2는 소각로에서 발생하는 폐열을 이용한 열전발전 시스템의 도면을 나타내고 있다. 기본적으로 열전발전 시스템은 Multi 시스템으로 구성되는데 체결 도중 열전모듈의 구성 부품인 알루미늄의 파손이 열전소자 파손의 원인이 되어 전력손실을 가져 온 것을 연구도중 발견하였다. 열전소자는 2개의 알루미늄 판 사이로 P형과 N형 반도체가 교차로 접합되어 있는데 이러한 열전소자의 경우 열적으로 병렬로 연결되어 있지만 전기적으로는 직렬로 연결되어 있기 때문에 열전모듈의 국부적인 파손은 시스템의 일부분에만 영향을 미치는 것이 아니라 시스템 전체에 영향을 미치는 치명적인 결과를 초래한다. 이러한 열전

모듈의 파손으로 인해 Multi system 장치구성 시 모듈 양단에 Damping 역할을 할 수 있는 고무패드를 삽입하여 열전모듈의 파손을 방지하였다.

하지만 고무의 낮은 열전도도로 인해 약 64%의 출력손실 초래하여 고무재질에 비해 열전도도가 우수하고 충격완화 역할을 할 수 있는 대체 재료 개발에 필요성을 인식하고 연구를 실시한 결과 열전도성 Polymer Pad를 Sheet Type으로 고안하였다. (본 연구에서는 열전도성 Polymer Pad를 단순히 Polymer Pad로 칭하기로 한다.)

하지만 열전모듈 양단에 Polymer pad를 장착하였을 때 출력변화 및 구조적 안정성에 관한 정량적인 Data뿐만 아니라 열전발전 Multi System에 적용하기 위한 선행연구가 부족한 상황이다. 따라서 본 연구는 Polymer Pad의 두께변화에 따른 출력변화에 대한 D/B를 구축함과 동시에 Polymer Pad 뿐 아니라 열전도성 수지를 이용하여 Pad를 제작하였을 시 출력변화가 어떻게 되는지 수치해석을 통해 정량적 Data를 확보함에 목적이 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치 및 방법

열전특성 평가장치는 Fig. 4와 같이 측정기기와 이를 제어하는 PC로 구성되어있다. 측정 기기는 Agilent사에서 제작된 34970A data logger를 사용하였으며 고온부와 저온부의 온도는 T형 열전대를 사용하여 측정하였다. 열전발전으로 인해 얻어지는 기전력은 직류전압으로 측정할 수 있었으며 부하특성시험에서는 고온단과 저온단의 온도와 전기적 부하(5Ω)에 따라 변하는 전류와 전

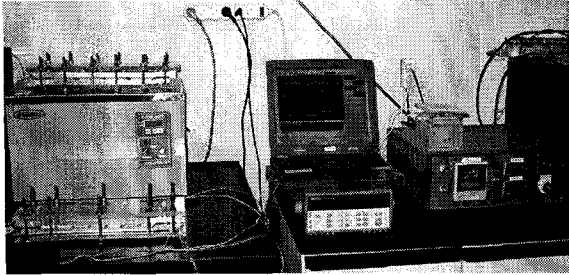


Fig. 4 Experimental equipment of thermoelectric system

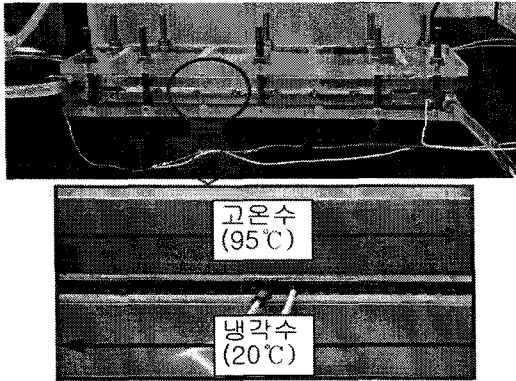


Fig. 5 Experimental equipment of single type system

압을 측정하여 전기적 부하에 따른 열전발전기의 전기적 특성을 평가하였다. 모듈 특성 평가는 하나의 Single System에 러시아 Foton사의 RIF module (크기 40mm×40mm) 14개를 사용한다. Fig. 5에서와 같이 온도 제어가 가능한 히터와 항온조를 부착하여 고온부는 95°C의 온수로 저온부는 20°C의 냉각수로 균일하게 유지하였다. Fig. 6은 Single system 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

열전모듈의 파손으로 인해 부착한 고무패드의 낮은 열전도성으로 인해 약 64%의 출력손실을 개선하기 위해 열전모듈 양단에 Polymer Pad를 부착하여 출력을 측정하였고, Polymer Pad의 두께변화(0.4, 0.6, 1.0mm)에 대한 출력변화를 실험을 통하여 측정하였다.

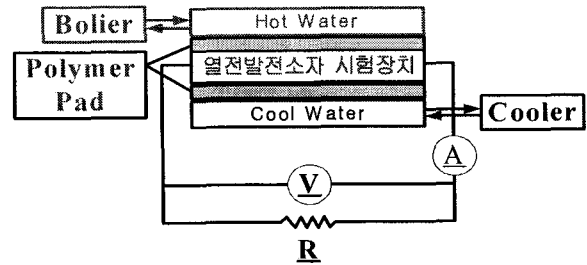


Fig. 6 Outline of thermoelectric experiment system

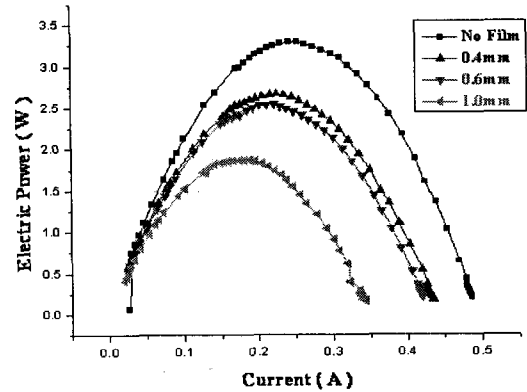


Fig. 7 Results of Polymer Pad

## 2.2 실험결과

Polymer Pad의 두께를 0.4, 0.6 그리고 1.0 mm로 변화를 주어 열전발전 Single system에 부착하여 출력을 측정하였으며 그 결과는 다음과 같다.

Fig. 7은 Polymer Pad의 두께에 따른 출력 변화이며, Fig. 8은 Polymer Pad와 Rubber Pad 장착 시 출력 차이를 보여주고 있다.

Polymer Pad의 두께변화에 따른 출력변화를 Table 1에 나타냈다. Polymer Pad를 부착하지 않은 경우에 비해 Polymer Pad의 두께가 두꺼워질수록 출력 손실이 크게 나타났으며, 1.0mm의 Polymer Pad와 고무패드를 비교한 결과 Polymer Pad의 출력이 고무패드의 출력에 비해 20.3% 우수한 것으로 나타났다. 이것은 Table 2에서와 같이 Polymer Pad가 가지는 열전특성이 고무에 비해 높기 때문인 것으로 사료된다.

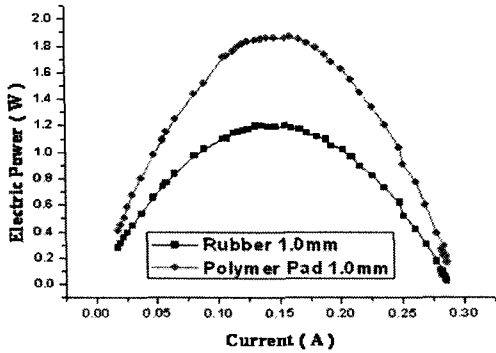


Fig. 8 Results of Polymer and Rubber Pad

Table 1 Electric power variation of single system by using each pad

	No pad	Polymer 0.4 mm	Polymer 0.6 mm	Polymer 1.0 mm	Rubber 1.0 mm
Power (W)	3.30	2.66	2.45	1.87	1.20
Power lossr (W) (each-No pad)	0	-0.64	-0.85	-1.43	-2.1
Power percentage (%)	100	80.9	74.2	56.7	36.4

$$\text{Power percentage} = (\text{each power} / \text{No pad power}) \times 100$$

### 3. 수치해석

Polymer Pad의 두께가 1.0mm일 경우 일반 고무에 비해서는 열전도 특성이 떨어졌지만 43% 정도의 출력손실을 가져온다는 것을 확인할 수 있었는데, 이러한 출력은 시스템 전체로 볼 때에 큰 손실이라는 것은 명백하다. 따라서 첨가제 사용으로 인한 전도도 개선 및 재료의 물성변형으로 출력의 개선이 어렵기 때문에 Polymer Pad의 대체재로 열전도성 수지가 댐핑재로 사용되었을 경우 열전도도 양단의 온도차 및 출력 개선율을 선행 연구로서 예측할 필요성이 있다.

예상출력에 대한 수치는 실험적으로 접근하는 것은 불가능하기 때문에 수치해석을 통하여 Polymer Pad가 0.4, 0.6 그리고 1.0mm의 두께로 열전도도 양단에 부착 할 경우 소자 양단의 온도차를 수치해석을 통하여 계산한 후 실험 Data와 비교 해석하여 신뢰도를 확보한 후 열전도성 수지를 Polymer Pad의 대체재로 사용할 경우 최대 개선 출력에 관한 정량적 Data를 예측하는데

수치해석의 목적이 있다.

본 연구에 사용된 수치해석은 열·유동 전용 해석 프로그램인 Fluent 6.1을 사용하였다.

### 3.1 지배방정식

#### 3.1.1 보시니스크 모델 (Boussinesq Model)

많은 자연대류 유동에서 보시니스크 모델을 사용함으로써 유체의 밀도를 온도의 함수로 정한 것보다 더 빠르게 수렴할 수 있다.

$$(\rho - \rho_0) g \cong -\rho_0 \beta (T - T_0) g \quad (1)$$

여기서  $\rho_0$ 는 유체의 밀도(일정),  $T_0$ 는 동작 온도, 그리고  $\beta$ 는 열팽창계수다.

#### 3.1.2 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (2)$$

$$(\nabla \cdot U) = 0 \quad (3)$$

$$(3) \text{식에서, } U = (u \cdot v), \nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$$

#### 3.1.3 운동량 방정식

자연대류에서 Navier-Stokes 방정식을 보시니스크 근사를 사용하면 아래의 식과 같이 나타난다.

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$\rho \frac{dU}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 U + g(\rho_0 - \rho) \quad (5)$$

여기서  $U$ ,  $p$ 는 각각 공기의 속도와 압력이며,  $\rho$ ,  $\mu$  및  $g$ 는 공기의 밀도, 점성계수, 중력가속도를 나타낸다.

#### 3.1.4 에너지 방정식

$$\rho C \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T \quad (6)$$

여기서 T는 공기의 온도이며, C와 k는 공기의 정압비열, 열전도도를 나타낸다.

### 3.2 경계조건

수치해석에 사용된 경계조건은 실제 고온수의 경우 최대 368.5K, 냉각수는 일반 상온 293.5K로 조절되기 때문에 열전모듈 양단에 Polymer Pad를 부착한 후 상부를 고온부(368.5 K)로 하부를 저온부(293.5 K)로 등온 처리하였다. 수치해석에 사용된 물성치의 경우 열전소자 내부의 공기는 온도차에 의한 자연대류가 지배적일 것으로 사료되어 이를 효율적으로 계산하기 위해 공기의 밀도를 Boussinesq 근사로 부여하였다. 그 외 열전소자 및 Polymer와 Rubber pad의 물성치는 Table 2와 같다. 수치해석은 Table 4의 조건으로 실시하였고, Polymer Pad의 대체재로서 성능개선을 예측하기 위한 열전도성 수지의 물성치는 Table 3, Table 4와 같다.

### 3.3 수치해석의 신뢰도

Polymer Pad의 대체재로 열전도성 수지를 사용할 경우 출력 개선율을 예측하기에 앞서 수치해석의 신뢰도를 확보하기 위해 실험과 수치해석

을 실시하였다. 실험은 열전모듈 저온부의 온도를 20℃로 일정하게 한 후 고온부의 온도를 30℃ ~ 95℃까지 5℃간격으로 최대 출력을 측정하였으며, 이를 이용하여 저온부의 온도가 20℃일 때 온도차에 따른 출력변화에 대한 정량적 데이터베이스를 구축하였다. 수치해석은 열전소자 양단에 Polymer Pad를 부착한 형상을 모델링하여 고온부의 온도를 95℃로 저온부의 온도를 20℃로 부여하여 열전소자 양단의 평균온도를 구하여 Polymer Pad 두께 별로 부착하였을 때 소자 양단의 온도차를 계산하였다. Fig. 8은 저온부의 온도가 20℃일 때 온도차에 따른 출력변화 그래프와 두께별 온도 및 출력변화를 나타내었다.

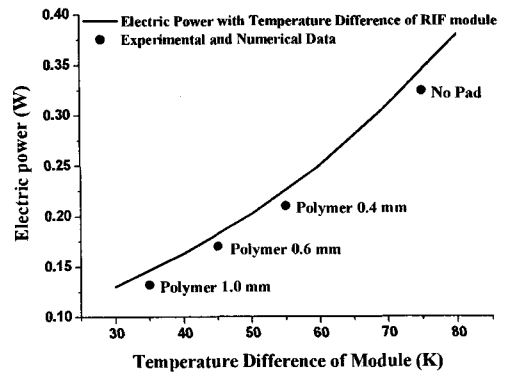


Fig. 8 Comparison between experimental and numerical data

Table 2 Material properties

Material	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$c_p(\text{J/kg}\cdot\text{K})$	$k(\text{W/m}\cdot\text{K})$
Air 0°C, 1 atm	1.2874	1006.08	0.002267
Semiconductor	7730	16	3
Alumina	4000	850	25
Polymer pad	1150	1460	1.04
Rubber	1610	1000	0.19

Table 3 Comparison properties of Coolpolymer goods

Product name	D3602	D3604	D5104	D5106	E4503
Resin	PA 4, 6	PA 4, 6	PPS	PPS	PC
k(W/mK)	1.2	1.75	4.5	2.0	10
Specific Gravity	1.4	2.2	1.9	2.8	1.4

Table 4 Comparison properties of LG Chem. goods

Product name	PN-9007	PN-9008	PN-9019	PX-9001FE
Resin	PPS	PPS	PPS	PBT
k(W/mK)	1.6	1.7	15	1.9
Specific Gravity	1.96	1.95	1.95	1.8

Table 5 Error and error rate with each pad

Pad Thickness (mm)	0	0.4	0.6	1.0
Error (W)	0.020	0.016	0.012	0.014
Error Rate (%)	6.1	4.9	3.7	4.3

### 3.4 수치해석 결과

열전도 Polymer Pad의 두께를 0.4, 0.6 그리고 1.0mm로 하여 실험 및 수치해석을 실시하여 실험 Data와 수치해석 Data의 비교해석을 통해 수치해석의 정량적 신뢰도를 확보하였다. 이를 이용하여 Polymer Pad의 대체재로 열전도 플라스틱을 사용하였을 경우 정량적 출력 개선율을 예

Table 6 Temperature difference and electric power by using thermal conductive plastic

Thermal conductive plastic	Thickness (mm)	Temperature difference(K)	Expected power(W)	Improving rate(%)
CASE 1 (D3604)	0.4	58.7	0.244	16.2
	0.6	52.9	0.215	26.5
	1.0	43.9	0.176	46.7
CASE 2 (D5104)	0.4	67.6	0.295	40.5
	0.6	64.4	0.276	62.4
	1.0	58.6	0.244	103.3
CASE 3 (D5106)	0.4	60.3	0.253	20.5
	0.6	54.9	0.225	32.4
	1.0	46.3	0.186	55.0
CASE 4 (PN-9008)	0.4	58.3	0.242	15.2
	0.6	52.5	0.213	25.3
	1.0	43.4	0.174	45.0
CASE 5 (PX-9001FE)	0.4	59.7	0.250	19.0
	0.6	54.1	0.221	30.0
	1.0	45.4	0.182	51.7

측하기 위해 5가지 종류의 열전도 플라스틱을 선정하여 수치해석을 실시하였고, 각 수치해석에 대한 결과는 Table 6과 같다.

수치해석 결과 PN-9008을 pad로 대체하였을 경우 열전소자 양단의 온도차가 가장 작게, D5104를 pad로 대체하였을 경우 온도차가 가장 크게 나타났다. 이것은 열전소자 내부의 지배적인 열전달 메커니즘이 전도이기 때문에 열전도성 플라스틱이 가지는 열전도도의 차이 때문으로 사료된다.

#### 4. 결 론

열전소자 양단에 Rubber Pad의 낮은 열전도도를 개선하기 위하여 Polymer Pad를 개발하였으며 출력 개선율을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 획득하였다.

(1) Rubber pad 1.0 mm를 장착한 열전발전 Single system 출력의 경우 pad를 장착하지 않은

경우에 비해 약 64 %의 열전출력 손실이 발생하였으나, Polymer pad 1.0 mm의 경우 약 43.3 %의 출력감소가 나타났다. 즉, Polymer pad가 Rubber pad보다 약 20.3% 높게 나타났다.

(2) Polymer pad의 두께를 0.4, 0.6 그리고 1.0mm를 열전발전 single system에 장착하였을 경우 Polymer pad를 장착하지 않은 경우에 비해 19.1, 25.8 그리고 43.3 %의 열전출력손실을 나타내었다.

(3) 열전도 플라스틱을 적용 가능한 모델 5개를 선정하여 Polymer pad의 대체제로 수치해석을 실시한 결과 열전소자 양단의 온도차 및 출력은 D5104가 가장 높게 나타났으며, PN-9008이 가장 작게 나타났다.

#### 참고문헌

1. Fluent User's Guide
2. Fluent Advanced Training Note.
3. L. Helmerls, E. Muller, J. Schilz, W A. Kaysser., 1998, Graded and stacked thermoelectric generators - numerical description and maximisation of output power, Materials Science and Engineering, pp. 60-68.
4. Il Ho-Kim., 2000, (Bi, Sb)<sub>2</sub>(Te, Se)<sub>3</sub>-based thin film thermoelectric generators, Materials Letters, Vol. 43, pp. 221-224.
5. Lingen Chen, Fengrui Sun, Chih Wu., 2005, Thermoelectric-generator with linear phenomenological heat-transfer law. Vol. 81, pp. 358-364.
6. Lingen Chen, Jun Li, Fengrui Sun, Chih Wu., 2005, Performance of a two-stage semiconductor thermoelectric-generator. Applied Energy, Vol. 82, pp. 300-312.