

## 온수를 이용한 열전발전기에서 유량변화에 따른 발전 특성

우병철<sup>†</sup> · 이희웅<sup>\*</sup> · 서창민<sup>\*\*</sup>  
(2000년 6월 12일 접수, 2002년 8월 29일 심사완료)

### Characteristic of Electric Generation for the Water Flow Rate in Thermoelectric Generator Using Hot Water

Byung-chul Woo, Hee-woong Lee and Chang-min Suh

**Key Words** : Thermoelectric Generator(열전발전기), Thermal Stress(열응력), Peltier Effect(펠티어 효과), Seebeck Effect(제백 효과), Figure of Merit(열전능)

#### Abstract

The objective of this study is to develop a thermoelectric generation system which converts unused energy from close-at-hand sources such as garbage incineration heat and industrial exhaust etc. into electricity. This paper presents applicability of a commercially available thermoelectric generator for waster heat recovery. The test facility consists of water heater, pump, thermoelectric module and aluminium tubes and hot and cold water is used as heat source and sink fluids. It is shown that the three components of thermoelectric research exist in manufacturing a thermoelectric generator. The first component is fabrication of thermoelectric materials, the second is manufacturing of thermoelectric generator with 32 thermoelectric modules. The last one is characteristic measuring of thermoelectric generator with 32 thermoelectric modules of two types, cooling and power purpose. It was found that the rate of cold and hot water is 25 and 37 liter per minute and the maximum power of thermoelectric generator is 28Watts and its efficiency is 1.04%.

#### 1. 서론

최근, 지구의 환경문제가 계속 부각되고 있는 가운데 선진 각 국에서는 에너지의 소비에 따라서 탄소세를 물리자는 움직임이 일고 있으며 우리나라에도 가속화되고 있는 실정이다. 이러한 환경 문제 중에서 가장 문제시되고 있는 것이 대기문제이며 대기의 미립자에 의한 온도상승이 심각한 것으로 발표되고 있다.<sup>(1)</sup>

본 논문은 대기권으로 버려지는 폐 에너지를 이용하여 발전하는 열전발전방식에 대한 연구결

과를 담고 있다. 열전발전은 얻어진 에너지의 효율이 낮은 것이 단점이긴 하나 지구의 열적인 환경오염을 막을 수 있는 방편으로 사용가능할 것으로 생각된다.

열전기술은 양단간의 온도차에 의해서 기전력이 발생한다는 원리이며 물질에 전류를 흘리면 전기저항에 기인하는 주울열이 발생하지만 이것 이외에 캐리어(carrier)의 에너지수송에 의해 여러 종류의 열적 효과가 나타난다.<sup>(2)</sup> 역으로 물질에 온도차를 주면 온도 구배에 의해 확산 캐리어의 전하수송에 의한 기전력이 나타난다. 이와 같은 열과 전기와의 관계에 의해 생긴 효과를 열전 효과라 한다. Seebeck효과는 양단간의 온도차를 주면 열기전력이 생기는 것을 말하며 열전발전과 열전대 등에 기초원리로서 이용되고 있다. Peltier 효과는 열전재료에 일정온도로 유지하고 전류를 흘리면 접합부에서 주울열 이외의 열이 발생, 흡

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국전기연구원 신소재응용연구 그룹

E-mail : bcwoo@keri.re.kr

TEL : (055)280-1632 FAX : (055)280-1590

<sup>\*</sup> 한국전기연구원 신소재응용연구그룹

<sup>\*\*</sup> 회원, 경북대학교 공과대학 기계공학부

수하는 현상으로서 열전냉각에서 주로 이용되는 원리이다. 이의 열전재료의 양단간에 온도차가 발생하면 전류가 흐르는데 이 현상을 Thomson 효과라 한다.<sup>(3)</sup>

본 연구의 대상인 열전발전은 양단간의 온도차에 의해서 기전력이 발생하는 Seebeck 효과를 이용한 것으로 발전기는 열전소자부, 전극부, 단열부, 방열판으로 구성되어 있다. 열전재료는 사용되는 온도 범위에 따라 적당한 반도체의 n, p형 소자와의 조합으로 사용되고 소자의 연결에 따라 캐리어의 동작이 거꾸로 되기 때문에 Peltier 소자에서의 전류방향과 반대방향으로 전류가 흐르게 된다. 따라서 수십에서 수백 개의 반도체의 조합으로 열전모듈이 제작되며 이러한 모듈을 직, 병렬로 조합하여 열전발전기가 제조된다.<sup>(4)</sup>

열전발전기술은 방사선 동위원소의 반감기를 이용해 우주선의 전원으로 일찍부터 이용되었으며 군용발전기, 오지의 전원, 열전대 등의 민생용으로 이용되고 있으며 에너지의 고갈과 더불어 더욱 사용범위가 넓어지고 있다.<sup>(3~5,7,12)</sup>

본 연구에서는 고온수로 버려지는 열에너지를 이용할 목적으로 온수와 냉수사이의 온도차를 이용하여 DC전원을 얻을 수 있음을 확인하기 위하여 열전발전기를 제작하였으며 냉, 온수의 유량의 변화와 온도변화에 따른 각각의 특성에 관하여 연구, 분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 열전발전기의 제조

Bi-Te계 열전재료를 사용하여 제조된 열전모듈을 직, 병렬로 연결하는 방식을 택하여 전압을 높이고 양단의 온도차를 이용하여 발전하는 방식을 택하였다. 먼저 열전달 특성이 우수하고 가공성이 좋은 6061계 Al 합금을 사용하여 86x23x350(mm)의 크기로서 열전달 특성을 양호하게 하기 위해서 내부에 핀을 설치하여 냉간 압출법으로 제조하였다.<sup>(6~8)</sup>

이러한 관의 양쪽을 8000계 Al을 가공하여 용접하고 10mm의 관을 부착할 수 있게 가공하였다. 또한 열전발전기의 사용온도가 고온부는 약 90℃ 이상이고 저온부는 약 20℃이므로 이로 인하여 0.6mm의 열팽창이 발생하게 되므로 이를 감

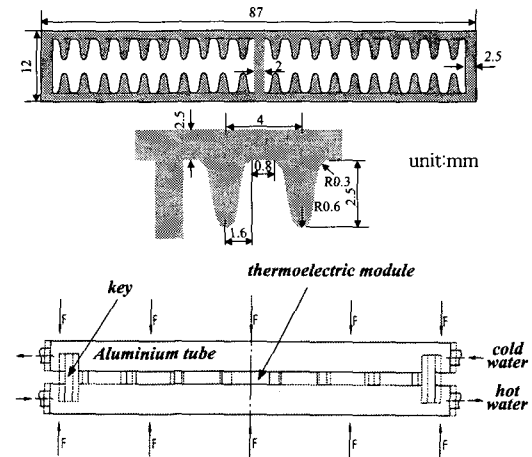


Fig. 1 Schematic diagram of thermoelectric generator

소시킬 수 있게 가공하여 사용하였다. Fig. 1과 같이 8000계 Al의 용접부에 2개의 키 구멍을 내고 열전모듈을 사용할 경우의 두께보다 조금 얇은 두께로 가공하여 열팽창으로 인해 저온부와 고온부의 Al관의 열팽창 차이를 없애려고 하였다.<sup>(6,10,11,13)</sup>

여기서 사용된 키 재료는 고온과 저온이 만나는 부위이므로 고강도 섬유보강 에폭시로서 금속보다 우수한 강도와 아주 낮은 열전달 특성을 가지고 있어 열팽창으로 인한 열응력에는 견디고 열전달은 잘 되지 않는 기능을 가지게 된다. 또한 제조된 열교환부 단면에는 40x40(mm)로 제작된 열전모듈을 양쪽으로 8개씩 배열하여 한 면당 16개를 조합하였으며 온수와 냉수에서 사이에서 발생하는 열응력으로 인해 굽힘응력을 받게되므로 두 층을 하나의 단위로 계산하여 2층과 8층의 열전발전기를 제작하여 실험하였다.

### 2.2 유량과 온도차에 따른 발전 특성 측정

양단간의 온도차를 이용한 열전발전기술은 외부부하에 의해서 열전모듈의 내부에서 저항, 열전도도, 온도 등이 변화하여 빠른 응답특성을 보이게 된다. 이러한 특성을 이용하여 열량과 관련된 센서와 온도측정과 관련된 민감한 센서로도 많이 이용되고 있다.

본 실험에서는 열전모듈의 양단간에 전달되는 온도특성이 고, 저온수의 유량변화에 따라서 어떤 특성을 나타내는지 알아보기 위해서 양단간의 온도변화와 양단에 흐르는 유량변화에 따라 발전

특성을 측정하였다. 먼저 일정한 온도를 유지하기 위해서 냉수는 직수를 사용하였으며 열전발전기를 거쳐 흘러나온 일부를 내보내는 방식을 택하여 일정한 온도를 유지하게 설계하였다. 또한 온수는 온수가열기를 이용하여 실험하였다.

온수가열기에서 발생하는 온수의 특성은 가열기의 운전과 정지에 따라 온도차가 크게 발생하므로 일정한 온도가 유지되는 온도특성을 파악한 후 시험에 이용하였다. 가열기의 특성상 온수는 주어진 온도로 올라간 후 일정시간 후 최고 정점에 도달하게 되며 최고점을 기준으로 약 2분간 실험을 계속하였다.

또한 유량의 조절은 입, 출구의 밸브를 사용하여 조절하였으며 온수는 5~35 l/min이고 냉수는 5~27 l/min으로 조절하였다. 온수와 냉수의 유량은 온수와 냉수를 흘리는 배관의 직경차이에서 발생되었으며 열전발전 측정에서 유량에 따른 특성을 측정하였다. 그리고 본 실험에서 사용된 측정시스템은 HP34970A를 사용하였으며 24~26 bit로 측정된 값을 읽을 수 있었으며 6 1/2 자리의 정확성을 가지는 것으로 알려져 있다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 열전발전기의 제작과 특성

본 연구에서 제작된 열전발전기는 Fig. 2와 같으며 열전모듈의 접촉저항을 줄이기 위한 방법으로 약 5kgf/cm<sup>2</sup>의 힘으로 열전모듈의 양단에 압력을 가하여 제작하였다.

스테인리스강으로 제작된 볼트를 이용하여 열전발전기를 가압하였고 토크메타(torque-meter)로 가압력을 조절하였으며 위쪽과 아래쪽에는 100mm의 FRP를 사용하여 열전달을 최소화하였

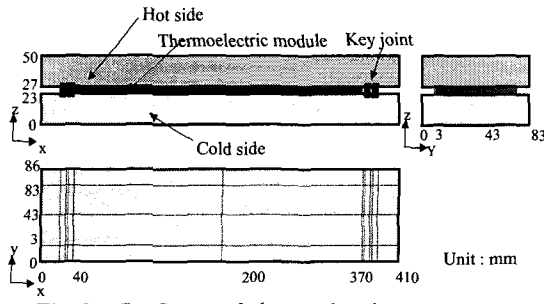


Fig. 2 Configure of thermoelectric generator

다. 열전모듈은 각 층에 양쪽으로 8개씩 16개이고 8층 구조로 총 128개의 모듈을 사용하였다.

그러나 발전된 전압을 가능한 균일하게 하기 위해서 열전모듈 32개를 단위 그룹으로 정하고 4그룹을 전기적으로 병렬로 연결하여 일정전압을 유지하게 설계하였다. 그러나 열전모듈의 내부저항의 차, 제작과정에서 발생한 기전력의 차이, 눌러진 압력, 열전달 특성의 차이 등으로 인해서 완전히 균일한 전압특성을 보이지는 않았으며 5%이내의 편차를 나타내었다.

#### 3.2 열전발전기의 무부하 특성

Fig. 3은 열전냉각모듈로 많이 사용되고 있는 국내 제작된 모듈을 직렬로 32개를 사용한 발전 특성으로서 온도차에 따라 거의 선형적인 특성을 나타내고 있다.

Fig. 4는 128개를 series로 조합한 경우 발전특성을 나타내었으며 발전량과 온도차간의 관계가 직선적임을 알 수 있다.

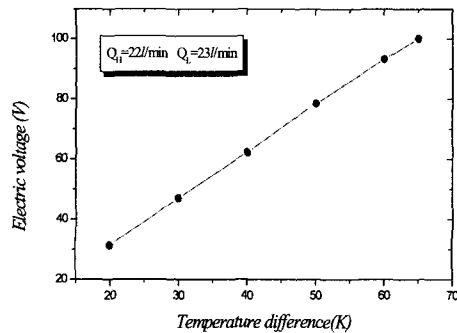


Fig. 3 The relation between voltage and temperature difference for serial connecting of 32modules

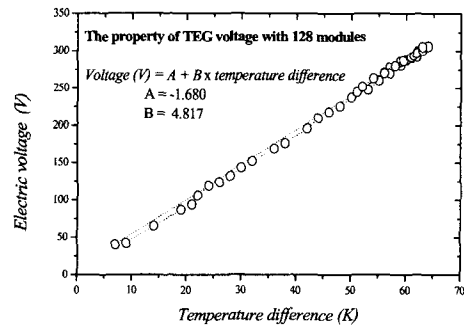


Fig. 4 The relation between electric voltage and temperatures difference for serial connecting of 128 modules

3.3 온도차에 따른 발전특성

Fig. 5는 온도차에 따른 열전발전특성을 알아보기 위해 온수와 냉수의 유량을 18, 18.5 l/min. 로 고정시킨 다음 양단 간의 온도차를 20, 30, 40, 50, 60℃로 유지시킨 상태에서 최대 전력을 얻을 수 있는 부하특성을 나타내었다.

본 그림에서 알 수 있듯이 열전발전기의 양단 간의 온도차에 따른 전류와 최대 전력사이의 관계는 선형적인 관계가 아니다.

3.4 열전발전과 유량과의 관계

본 연구에서 제작된 열전발전기의 전력특성은 저온과 고온의 온도를 일정하게 유지시킨 뒤 Fig. 1의 하단과 같은 열전판에서 온수와 냉수의 유량을 변화시키면서 그때 나타나는 발전특성을 알아보았다.

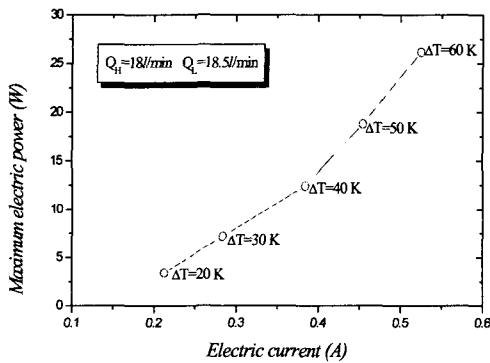


Fig. 5 The relation between maximum power and electric current

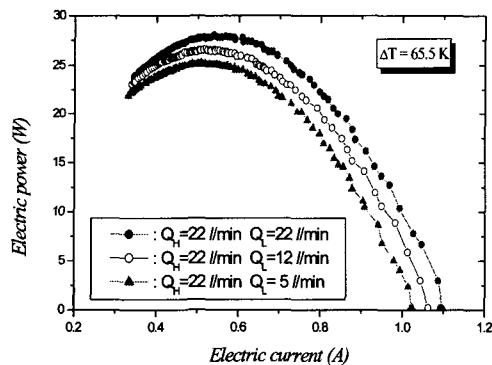


Fig. 6 The relation between electric power and electric current with varying cold water flow rate

Fig. 6은 고온수의 유량을 22 l/min으로 고정시킨 다음 저온수의 유량을 5~22 l/min로 변환시켰을 때 발전된 전력을 나타내고 있다. 본 그림에서 알 수 있듯이 부하의 증가에 따라 발전된 전력은 증가하다가 감소하고 있는데 이것은 주울열에 의해서 소모되는 특성으로 인해 발생한다. 이것은 열전소자의 내부저항에 의해서 발생한 열에 의해서 열전달되어 무부하시 적용된 양단 간의 온도차보다 더 떨어뜨리는 결과를 초래하게 되며 고온단은 온도가 떨어지고 저온단은 온도가 올라가게 된다.

또한 저온수의 유량이 증가해도 양단간의 온도차는 거의 같게 두었으며 무부하 상태에서 얻어지는 기전력의 크기는 큰 변화가 없지만 부하시험에서 얻어지는 결과는 다소 큰 차이를 나타내고 있다. Fig. 6에 부하의 증가에 따른 전류의 크기의 변화에 따라 열전발전에 의해서 얻어지는 전력의 크기는 전류의 크기가 약 0.5A까지는 점점 증가하지만 그 이상의 온도에서는 주울열에 의해서 감소하고 있다. 그러나 저온수의 유량이 증가되면 주울열에 의해서 발생된 에너지의 일부를 방열시킬 수 있는 능력이 증가되어 내부의 저항도 줄고 양단간의 온도차의 감소도 줄어들게 된다. 즉 유량의 증가에 따라 전력은 점점 증가하게 되고 최대전력을 얻을 수 있는 점도 더 큰 전류값에서 얻어지게 된다.

본 시험에서 얻어진 최대전력은 28W로서 32개의 모듈을 사용하여 65.5℃의 온도차를 이용한 열전발전 실험결과이다. 이는 하나의 module당 1℃의 온도차에 의해 약 0.01336W/(module·℃)가 얻어짐을 알 수 있다. 또한 하나의 모듈에 n, p형 열전반도체가 254개로 구성되어 있으므로 하나의 열전 cell당  $5.25 \times 10^{-5} \text{W}/(\text{cell} \cdot ^\circ\text{C})$ 의 출력을 얻을 수 있다.

앞의 내용과 반대로 냉수의 유량을 22 l/min로 고정시킨 다음 온수의 유량을 5~22 l/min로 변화시켰을 때 얻어지는 열전발전 특성을 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 6과 7에서 알 수 있듯이 온수와 냉수의 유량변화에 따른 발전특성 곡선을 살펴보면 최대 전력은 냉수의 유량변화에 더 민감한 특성을 보이고 있다. Fig. 8은 Fig. 6과 7에서 얻은 결과에서 온수와 냉수의 온도변화를 알아보기 위해서 key가 있는 위치에서 입, 출구에서 온도를 측정 한 결과이다. 온도의 저하는 주울열에 의해 발생

된 에너지의 방열문제로 야기된 결과이다. 효율의 최대점은 발전전력의 최대점보다 더 큰 전류값에서 나타났으며 이는 열전발전의 효율식에서 열전도에 의해서 발생하는 열량을 고려해야 되기 때문으로 알려져 있다.<sup>(4,6,11)</sup>

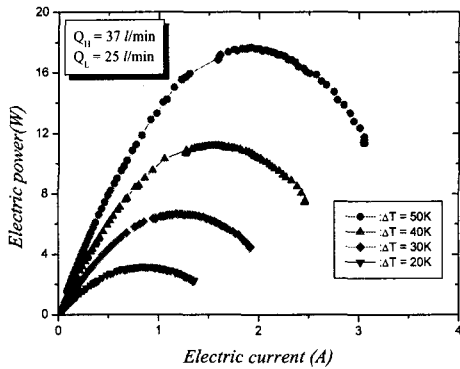


Fig. 7 The relation between electric power and electric current with varying hot water flow rate

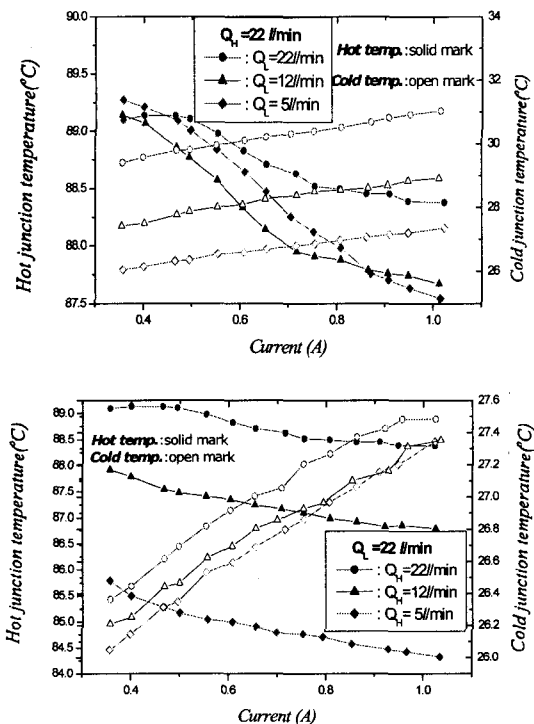


Fig. 8 The relation between temperature and electric current

Fig. 8에서 알 수 있듯이 온, 냉수관의 입, 출구에서의 온도변화를 조사한 후 부하가 있는 상태에서의 결과를 측정하였으며 온도변화를 이용하여 유량에 따른 에너지변화에 따른 전력으로서 열전발전의 효율을 계산하였다. 여기서 온도의 변화가 약 1~2.5℃ 정도로 그 변화가 작지만 초기의 안정화된 온도를 유지하기 위해서 약 10분간 안정화시킨 다음 부하에 따른 주열에 의해 발열되는 결과를 조사하였다.

3.5 Power module을 이용한 열전발전특성

앞 절까지의 내용은 열전냉각모듈로 많이 이용하고 있는 국내제품을 열전발전에 이용한 결과이고 본 절에서는 내부저항을 줄이기 위해 열전재료의 단면적을 넓히고 cell의 개수를 줄여 power module용으로 설계, 제작하여 그 특성을 측정하였다. 열전냉각용으로 제작된 모듈을 Peltier module이라고 말하듯이 power module은 열전발전용으로 사용하기 위해서 제작된 모듈을 의미하며 본 연구에서는 Altec 1011의 특성을 참고로 제작하였다. 발전용 열전모듈로 많이 사용되고 있는 형상을 기초로 설계, 제작한 power module의 특성을 Table 1에 나타내었다.

Fig. 9는 power module을 이용한 열전발전 특성으로 부하에 따른 전력의 특성을 보여주며 온수와 냉수의 유량을 고정하고 양단간의 온도차에 따른 발전특성을 측정된 결과로서 온도차에 따라 발전특성의 변화를 알 수 있다. Fig. 9와 같이 양단간의 온도차에 따라 얻어지는 전력은 증가하고 있으며 최대전력이 얻어지는 점의 전류치도 온도차에 따라 증가하고 있다. 이것은 열전재료의 저항이 온도차에 따라 증가되어 내부저항과 외부저항의 역률이 동일하게 되는 점에서 최대전력이 얻어지기 때문이다. 또한 최대전력은 양단간의 온도차에 따라 직선적인 증가특성을 나타내지 않고 있다.

Table 1 Properties of thermoelectric module

Property	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)	No. in module	Resistivity (Ω)
Peltier module	1.38	1.38	1.58	254	2.2
Power module	2.9	2.9	2.9	62	0.15

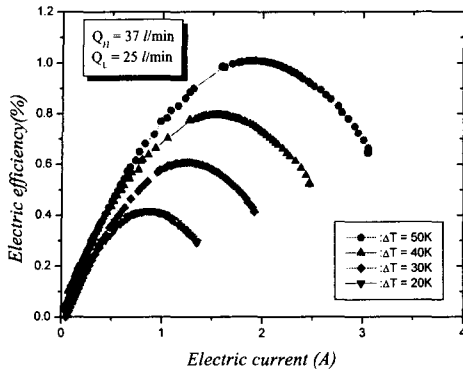


Fig. 9 The relation between power and electric current with varying  $\Delta T$

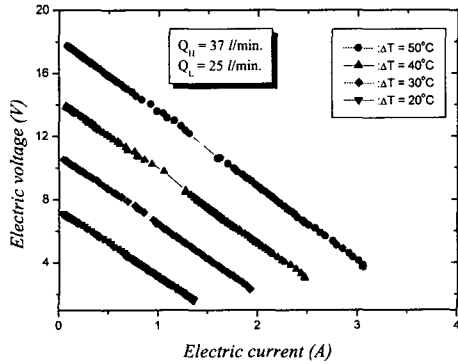


Fig. 10 The relation between numbers and temperature difference

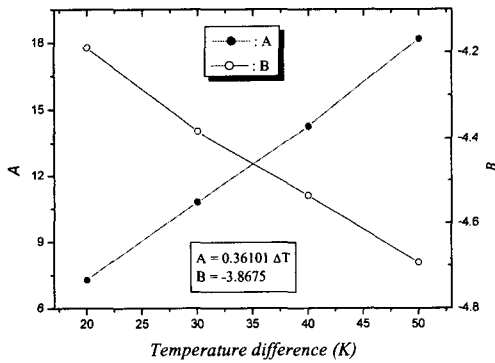


Fig. 11 The relation between numbers and temperature difference

여기서 사용된 A, B의 관계는 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Electric voltage} &= A + Bi \\ A &= 0.36101 \Delta T \\ B &= -3.8675 \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 11은 양단간의 온도차 변화에 따른 열전발전특성에서 최대전력이 얻어지는 점의 전류와 전압사이의 관계를 조사한 결과로서 그 계수가 온도의 함수임을 나타내고 있다.<sup>(4,11,14)</sup>

즉 온수와 냉수의 유량을 변화시키지 않고 온도차의 변화만 주었을 때 열전발전에서 얻어지는 최대 전력이 양단간의 온도차만의 함수로 표현할 수 있게 된다. 이것은 전력이 전압과 전류의 곱으로 얻어지므로 결국 양단간의 온도함수로서 최대전력을 나타낼 수 있게 된다.

열전발전 특성을 양단간의 온도차와 전류의 함수로 표현할 수 있으며 전류의 2차함수로 정리할 수 있다.

Fig. 12는 A, B의 수식을 이용하여 양단간의 온도차에 따른 열전발전특성을 유추하여 나타내었으며 Fig. 9에서 측정된 특성과 유사한 양상을 나타내고 있다.

Fig. 13은 Fig. 12에서 양단간의 온도차에 따른 최대 전력점에서 전류를 측정하여 양단간의 온도차에 따른 특성을 나타내었으며 주어진 양단간의 온도차에 따라 최대전력이 얻어지는 전류값은 온도의 함수로 나타낼 수 있다.

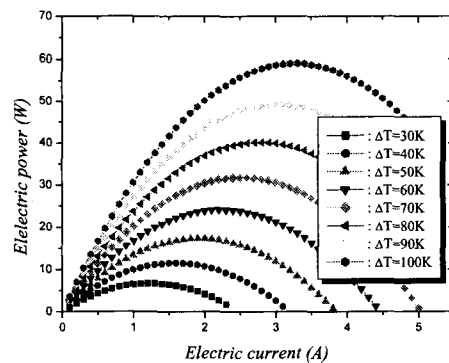


Fig. 12 Simulation result between electric power and current with varying  $\Delta T$

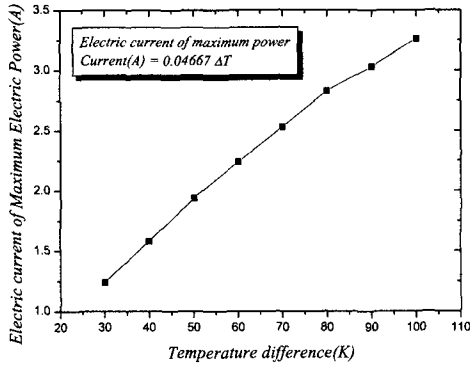


Fig. 13 Simulation result between electric current and temperature difference

그러므로 최대전력은 양단간의 온도차만의 함수로 정의할 수 있으며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{\max} &= B I^2 + A I \\
 &= B(0.4667\Delta T)^2 + A(0.4667\Delta T) \\
 &= 0.008375\Delta T^2 \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서  $A=0.36101\Delta T$ ,  $B=-3.8675$

$$P_{\max} = \text{Maximum power}(W), I_{\max} = \text{Current}(A)$$

식 (2)를 정리하면 온도의 2차방정식으로 정리될 수 있으며 주어진 온도차에 따라 각각의 상수는 정해진다. 이러한 특성은 재료의 전기저항이 온도에 따라 다소 증가하며 이로 인해 주열열이 증가되기 때문이다.

Fig. 14는 온수와 냉수의 유량을 고정한 후 양단간의 온도차를 20~50°C로 가한 경우 열전발전기의 효율특성으로서 온수와 냉수의 입출구에서 측정된 온도증감에 의한 에너지 변화와 열전발전량으로 계산하였다. 그림에서 알 수 있듯이 온도차가 크면 클수록 더 높은 효율특성을 보이고 있으며 최대 약 1.04%의 발전효율을 측정하였다. 또한 최대효율이 얻어지는 전류값은 온도차가 커짐에 따라 더 큰 전류에서 얻어지지만 최대전력이 얻어지는 전류값에 비해서 낮은 값에서 얻어진다. 이러한 특성은 열전소자의 저항으로 인한 손실의 증가로 인해서 발생된다.<sup>(10,15)</sup> 이 효율은 Altec사의 최대효율 4%보다는 낮지만 국내에서

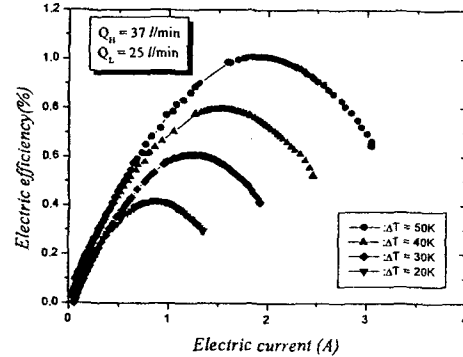


Fig. 14 Variation between efficiency & current with varying  $\Delta T$

설계, 제작된 열전발전기에서는 최대효율이다.<sup>(15)</sup>

#### 4. 결론

국내에서 제작된 열전모듈을 이용하여 열전발전기를 제작하였고 다음과 같은 결론은 얻었다.

(1) 32개의 열전냉각용 소자를 사용하여 28W의 출력을 얻을 수 있었으며 이 때 양단간의 온도차는 65.5K이었으며 0.01336W/(module · K)의 특성을 얻었다.

(2) 양단간의 온도를 일정하게 유지시킨 다음 온수와 냉수의 유량을 변화시킨 결과 최대전력은 냉수의 유량의 변화에 더 민감하였다.

(3) 열전발전용 power module을 사용한 열전발전기에서 열전발전특성을 분석한 결과 열전발전기의 최대출력은 온도차만의 함수로 나타낼 수 있으며 온도차의 2차 방정식으로 나타난다.

(4) power module을 사용하고 온, 냉수를 이용한 열전발전에서 1.04%의 발전효율을 확인하였으며 국내에서 최대 효율을 얻었다.

#### 참고문헌

- (1) OECD, 1994, World energy OECD Statistics.
- (2) Ioffe, A. F., 1957, Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling, Inforsearch Ltd, London.
- (3) Rowe, D. M., 1995, "Thermoelectrics," CRC Handbook, pp. 573 ~ 593.

- (4) Suh, C. M., Woo, B. C., 1999, "Simulation of Thermal Stress on Thermoelectric Generator Using Constrained Aluminium Tube as Key Joints," *International Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 26~34.
- (5) Lee, G. K. and Misafumi, M., 1999, "Thermoelectric Properties of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Sintered Body Fabricated by Mechanical Grinding Process," *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*, Vol. 37, No. 1, pp. 64~69.
- (6) Allen Danil T., 1997, "Thermoelectric Self-Powered Hydric Heating Demonstration," *International Conference on Thermoelectrics*, Germany, pp. 571~574.
- (7) Woo, B. C., Lee, H. W. Lee, D. Y., Hyun, D. B. Hwang, C. W. and Oh, T. S, 1999, "Development of 1kW Thermoelectric Generator System," *The Ministry of Science and Technology Report*, pp. 194~214
- (8) Woo, B. C., Lee, D. Y., Lee, H. W. and Kim, I. J., 2001, "Characteristic of Maximum Power with Temperature Difference for Thermoelectric Generator," *International Conference on Thermoelectrics*, pp. 431~434
- (9) Niino, M., Ohshima, T. and Matsubara, K., 1997, "Research Project on the Effective use of Untapped Thermal Energy from Garbage Incineration etc.," *International Conference on Thermoelectrics*, Germany, pp. 539~546
- (10) Anatyckuk L. I., Razinkov V. V., Rozver Yu. Yu. and Mikhailovsky V. Ya., 1997, "Thermoelectric Generator Modules and Blocks," *International Conference on Thermoelectrics*, pp. 592~594.
- (11) Rechard, J. B. and Paul, G. L., 1997, "Thermoelectric Power Generator Design and Selection from TE Cooling Module Specifications," *International Conference on Thermoelectrics*, pp. 551~554.
- (12) Kajikawa, T., Sugiyama, T. and Ohta, G., 2000, "Thermoelectric Power Generation Topping Co-Generation System for Maximum Energy Utilization of Fossil Fuel," *International Conference on Thermoelectrics*, pp. 30~40.
- (13) Suh, C. M., Lee, J. J., Kang, Y. G., Ahn, H. J. and Woo, B. C., 1992, "A Simulation of the Fatigue Crack Propagation in Type 304 Stainless Steel at 538°C," *Fatigue Frat. Engng Mater. Struct.* Vol. 15, No. 7, pp. 671~684.
- (14) Woo, B. C., Lee, D. Y., Lee, H. W., Suh, C. M., and Ha, J. H., 1999, "Manufacturing & Characteristics of Thermoelectric Generator with Pelter Module," *Proc. of Advanced Materials Development & Performance*, pp. 782~787.
- (15) Shim, J. D. and Hyun, D. B., 1989, "Developments of Thermoelectric Devices for Application to Direct Energy Conversion System," *The Ministry of Science and Technology Report*, pp. 101~133.