

녹색 사회기반시설의 열 에너지 하베스팅을 위한 기초실험 연구

A Basic Experimental Study on the Heat Energy Harvesting for Green SOC

조 병 완 Jo, Byungwan
이 덕 희 Lee, Dukhee
이 동 윤 Lee Dongyoon
김 윤 기 Kim, Yoonki

정회원 · 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (E-mail : joycon@hanmail.net)
비회원 · 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 석사과정 (E-mail : joygod1@nate.com)
비회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 석박사과정 (E-mail : idisi12@nate.com)
비회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 (E-mail : night1018@naver.com)

ABSTRACT

As the number of indispensable needs of clean energy increases due to the green new deal revolution, the possibility of heat energy harvesting from the surrounding infrastructures such as a railroad or highway was verified. In order to find more efficient usage of a heat source, the possibility of transforming heat into electricity were confirmed using Bi-Te type thermoelectric element, and electrical quality were tested with experiments of different heat source and environmental change in the surrounding infrastructures. After careful experiments, the possibility of collecting thermal energy and findings of the heat temperature change in infrastructue are verified with a result of obtaining almost 20.82W in 70 celcius (°C) temperature differences and 1m² surface area. Consequently, the ratio of heat temperature change and transforming surface area is the most crucial factor in the harvesting heat energy, and reducing thermal loss and improving thermal convection as well as transformation efficiency of thermoelectric element is required to get more efficient and durable generation.

KEYWORDS

green SOC, energy harvesting, thermoelectric effect, thermoelectric element

요지

최근 녹색뉴딜혁명으로 새로운 청정에너지원의 활용이 요구됨에 따라, 철로나 도로같은 생활주변의 사회기반시설에서 발생하는 열 에너지의 하베스팅 가능성을 검증하기 위해 도시 및 생활주변에서 느껴지는 뜨거운 열과 온도를 열전현상을 이용한 Bi-Te계열의 열전소자를 통해 열-전기변환 가능성을 확인하고, 도시산업 기반시설의 열원 및 주변환경변화를 고려한 실험을 통해 발생하는 전기적 특성을 확인하여, 도시에서 무의식적으로 폐기되고 있는 열에너지의 효율적인 활용방안에 대하여 모색하였다. 아스팔트 포장도로나 콘크리트 구조물등의 사회기반시설에서 발생 가능한 열원의 온도차를 열전소자 양단에 공급하고, 열전달 방법과 재료 공급시간 등을 변수로 하여 발생하는 전기적 특성을 측정한 실험결과 70℃의 온도차와 1m²의 면적에서 약 20.82W의 전력을 얻을 수 있음을 확인함으로써 열에너지 회수 가능성을 검증하였고, 산업기반시설에서 발생하는 열원의 온도변화율 및 변환면적이 열-전기변환에 있어서 가장 큰 영향을 미치고 있는 것을 확인하였다. 또한 효율적인 열전 발전을 위해서는 열전소자 자체의 변환효율성능의 향상과 더불어 열에너지원의 열손실 감소, 열보존율 향상 등의 활용방법을 통해 효율적이고 지속적인 열전 발전의 가능성이 있음을 확인하였다.

핵심용어

녹색사회기반시설, 에너지 하베스팅, 열전현상, 열전소자

1. 서론

현대사회는 산업화시대를 거치며 대량의 화석연료 소비로 인해 기상이변과 생태계 변화라는 지구온난화의 후유증을 심하게 겪으면서 지구환경파괴라는 문제를 인식하게 되었다. 이에 1997년 12월 선진국을 중심으로 기후변화협약에 따른 온실가스 감축목표에 관한 '교토 의정서'를 채택하고 이산화탄소 배출을 감축하여, 21세기 새로운 문명창출을 위한 녹색뉴딜을 통해 청정지구 환경을 보존하기 위한 많은 노력을 하고 있다.

이러한 세계적인 흐름을 선도하기 위하여 국내에서는 태양광, 풍력, 지열, 바이오, 폐기물, 수소연료전지 등 11개 분야의 『신에너지 및 재생에너지 이용·개발·보급 촉진법』 제정을 통하여 미래의 고부가가치로서 무한한 가능성을 가진 CO₂를 배출하는 화석연료를 대체하는 산업에 많은 노력을 기울이고 있다. 또한 우리 주변의 생활환경에서 발생하고 폐기되고 있는 에너지를 회수하기 위한 에너지 하베스팅이 새로운 분야로 각광을 받고 있으며, 그 중 열전현상을 이용한 열발전소자는 태양에너지뿐만 아니라, 도시환경 및 산업기반시설 주위의 열과 온도차가 발생하는 모든 분야에서 청정에너지를 생산할 수 있는 미래지향적인 특성을 가진 분야라 할 수 있다. 하지만 아직까지는 경제성과 열효율면에서 많은 개선이 요구되고 있고, 이러한 열에너지의 활용을 위한 인식이 부족하여 연구가 미비한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 한 여름철 건물의 내·외벽, 아스팔트 도로와 주차장 표면과 내부, 철도노면, 박스형태 구조물의 내·외부, 각종 공장 및 플랜트 배출구의 내·외부와 열·온도 위치 변화로 인한 에너지 차이등 사회기반시설에서 발생되고 사라지는 열·온도 에너지를 활용하기 위한 방안으로, 열전현상을 이용한 열전소자를 통해 열전기변환 가능성을 검증하고자 하였다. 현재 상온근방에서 가장 효율이 좋은 것으로 알려져 있는 Bi-Te계열의 열전소자를 이용하여 소자 양단의 온도차, 열전도체의 종류, 집열 및 변환면적, 열원의 공급과 제거등 열전 발전을 적용하는 주변환경에서 발생 가능한 변수에 따른 전기적 특성을 측정하고 분석하여, 최근 정부에서 추진하고 있는 녹색 사회기반시설을 위한 도시생활환경 및 사회기반 인프라 시설의 녹색에너지 하베스팅 가능성과 효율적인 활용방안을 검토하고자 하였다.

2. 열발전의 원리와 열전·발전소자

펄티에 효과(Peltier effect)란 다른 종류의 금속 두 개를 접합시켜 전류를 통할 때에 전류의 방향에 따라 그 접합부가 뜨거워지거나 또는 냉각하는 현상이며, 제베크 효과(Seebeck effect)란 두 개의 서로 다른 금속 접합부의 온도차에 의하여 기전력이 발생하는 현상으로(장문규 등, 2008), 열전현상(Thermoelectric effect)은 이와같이 열과 전기가 동시에 관계

하는 현상을 통틀어 이르는 말로 열과 전기사이의 에너지 변환을 의미하며, 변환소자의 양단에 온도차이가 있을 때 소자 내부의 carrier가 이동함으로 기전력이 발생하는 현상이다(유병철 등, 2000).

이종금속을 접합시킨 폐회로내에서 양단의 각각 온도를 T_a , T_b 라 할 때, 양단 간의 온도차 (ΔT)가 발생하면 ($\Delta T = \Delta T_a - T_b$), 고온 단에 있는 전자들은 저온 단에 있는 전자들보다 더 높은 운동에너지를 가지게 되어 고온 단의 전자들은 에너지를 낮추기 위해 저온 단으로 확산하게 되며 전자들이 저온 단으로 이동함에 따라 저온 단은 “-”로 대전되고 고온 부는 “+”로 대전되어 금속 막대의 양단간에 전위 차가 발생하게 되며, 이러한 현상을 ‘Seebeck 효과’라 한다. 또한 이와 같이 재료 양단 간의 온도차에 의해 발생하는 전압을 열기전력(thermoelectromotive force)이라 한다.

이러한 현상을 이용하기 위하여 개발된 소자를 열전소자 또는 발전소자라 하며 열전소자는 서로 다른 금속에 전류를 통하면 소자 양단에 온도차가 생기는 펄티에 효과를 이용한 것으로, 소형화, 저냉, 휴대화가 가능하며 간단한 조작으로 온도 조절 및 냉난방 전환이 가능하여 주로 소형 냉장기 및 반도체 설비등에 사용되고 있다(<http://acetec-korea.com>).

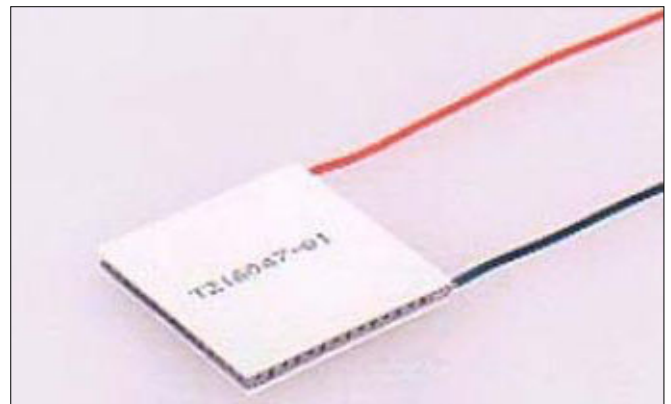


그림 1(a). 열전소자

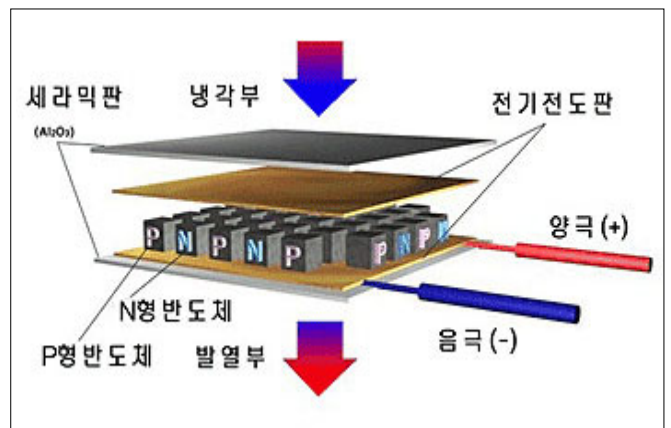


그림 1(b). 열전소자의 구성

참조 : <http://acetec-korea.com>

이와 반대로 발전소자는 소자양단에서의 온도차에 의해 고온 단 부위에서 저온단 부위로 열 이동시 n형, p형 발전소자에서 전자가 고온에서 저온으로 이동함으로써 발전이 가능하게 된다. 발전모듈용 소자는 열 입력을 크게 하기 위하여 일반적으로 얇게 가공하기 때문에 발전재료의 강도가 요구되나 기계적으로 취약하여 수율 저하가 문제점으로 되고 있다(한은주 등, 1998). 과거 발전재료에 관한 기술은 주로 미국과 러시아에서 군사적인 용도로 이용되어 왔으나, 최근 미국, 일본등에서 기계적 합금화 공정을 이용하여 제조단가를 낮추는 발판을 마련하였고(http://acetec-korea.com), 현재 폐열등을 전기로 변환하는데 있어서 발전소자의 효율을 높이기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

이러한 열전현상은 1821년 Thomas Seebeck에 의하여 발견되었으며, 1900년도 초에 구소련의 Ioffe가 약 4%의 변환효율을 얻었고, 그 이후로 연구가 꾸준히 진행되어 현재는 변환효율이 약 10% 이상까지 가능하게 되었다. 1993년 미국 MIT대학의 Dresselhaus가 열전성능의 향상에 관한 이론을 제시한 이후로 열전소재의 개발에 관한 많은 연구는 나노 기술과 관련된 내용이 주류를 이루고 있다. 2008년 들어서는 CVD로 성장한 단결정 실리콘 나노선의 열전특성에 대한 연구가 네이처(Nature)지에 보고됨에 따라 새로운 열전소자의 물질에 대한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다(우병철 등, 2000, 장문규 등, 2008).

변환소자의 연구개발은 2001년 미국의 Venkatasubramanian 그룹에서 실온에서 열전지수를 2.6까지 향상시킨 열구결과를 발표하면서 많은 연구가 시작되었고, 결과는 그림 3과 같이 Bi_2Te_3 및 Sb_2Te_3 을 초격자 구조로 형성하는 경우가 가장 높은 열효율 값을 달성할 수 있는 것으로 발표하고 있다(Rama venkatasubramanian ect, 2001). 이처럼 변환소자 자체의 성능향상에 관한 연구는 많이 진행되고 있으나, 이러한 열원을 효율적으로 활용하기 위한 연구는 아직 미비한 상태이다.

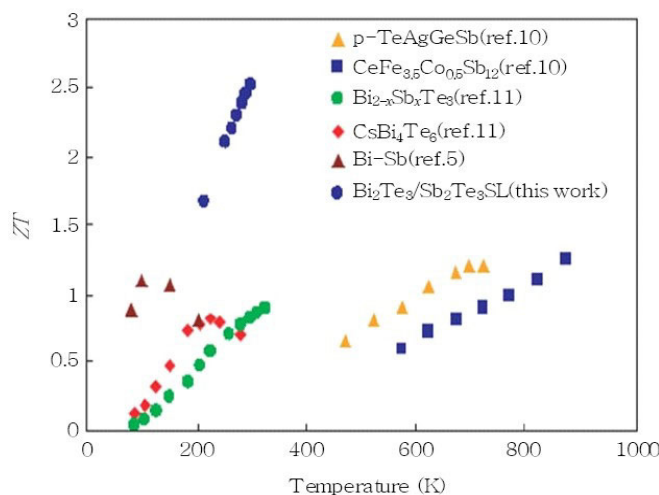


그림 2. 다양한 초격자 구조에 따른 ZT

(장문규 외, 고효율 열전소자 기술, 전자통신동향분석 제23권 제 6호 2008.12)

3. 사회기반시설의 열에너지 활용성 분석

사회기반시설 및 생활 주변에서 발생하는 열 에너지는 시설 물이나 그 장소에 따라 발생하는 열의 온도 및 시간이 다르며 또한 열에너지를 활용함으로써 전기에너지의 생산뿐만 아니라 많은 장점들을 부수적으로 얻을 수가 있다. 다음의 표 1은 적용 대상에 따른 열원의 온도 및 열에너지 활용시의 장점들을 나타내고 있다.

아스팔트 포장도로의 경우 태양열과 자동차와의 마찰 및 배기 가스로 인해 한 여름철 표면온도는 최대 70℃까지 상승하기도 한다. 또한 아스팔트 포장도로의 어두운 색은 태양열을 흡수하기 좋은 특징을 가지고 있다. 이로 인해 아스팔트 포장도로의 열 에너지는 도시열섬효과의 주된 원인이기도 하다. 이러한 아스팔트 포장도로의 열에너지를 활용하기 위한 열전소자를 적용하기 위해서는 도로 자체에 열전소자를 매입할 수도 있으나 내구적인 문제로 인하여 도로 밑의 설비를 통해 열을 회수하여 열전 발전을 하는 방법이 효율적인 것으로 판단되어진다. 설비를 통해 열을 회수하는 방법은 열에 취약한 아스팔트 포장의 표면 온도를 낮춰줌으로써 아스팔트 포장도로의 내구성능을 연장시키고, 유지 관리비를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 열회수를 통한 열에너지 활용법은 아스팔트 포장도로뿐만 아니라 콘크리트 구조물 및 철도등에서 태양열 등을 통해 문제를 발생시키고 있는 온도수축으로 인한 크랙발생등의 원인을 해결하는 동시에 도시 열섬효과를 줄이는 데 기여할 수 있을 것으로 보인다.

표 1. 열에너지 하베스팅 적용 대상물의 열원온도 및 활용시 장점

	발생열원온도	주 열원 기간	열발생원	열에너지 활용시 장점
아스팔트 포장	60℃~70℃	여름철 주간	태양열 배기열/마찰열	• 내구성능 증가 • 열섬효과절감
콘크리트 표면	50℃~60℃	여름철 주간	태양열	• 온도수축 크랙 방지
철 도	60℃~70℃	여름철 주간	태양열	• 철도레일의 팽창 수축 감소
플랜트 배출구	300℃~2500℃	플랜트 가동시	연료소비	• 높은 폐열온도 활용
자동차	100℃~1100℃	자동차 가동시	연료소비	• 에너지 효율성 증대
온천수	±100℃	상시	지중열	• 연중 가동 가능
지 열	지표면 10℃~20℃	상시	지열 태양열	• 연중 가동 가능
	지중 40℃~150℃			
해수 온도차	해면 20℃ 이상	상시	태양열 (해면)	• 연중 가동 가능
	심해 4℃			

화석연료를 소비함으로써 엔진을 가동하여 이동하는 자동차의 경우 열효율은 일반적으로 투입에너지의 30%만 활용되며 나머지 에너지는 열의 형태로 라디에이터, 엔진본체, 배기가스

로부터 30%, 10%, 30% 정도 외부로 방출되고 있다(이영재 등, 2002). 또한 엔진에서 얻어지는 기계에너지는 기계마찰이나 오일펌프, 알터네이터 등 보기류의 구동에 소비되어 실제로 주행에 사용되는 에너지는 20%에 불과하다. 자동차의 엔진 본체와 라디에이터에서 발생하는 열원은 100℃ 정도이며 배기열은 수백도의 높은 온도까지 올라가지만 활용되지 못하고 버려지고 있다(이영재 등, 2002). 열전소자는 무소음, 무진동, 소형화가 가능하기 때문에 이러한 폐열 에너지를 활용하기에 적합할 것으로 보이며, 현재 국내외에서도 이러한 자동차의 폐열을 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다.

또한 온천수의 경우 100℃의 가까운 열원을 가지고 있으며, 해양 표면의 온도와 연중 온도변화가 거의 없는 수심깊은 곳의 온도차나 지열의 경우도 열원의 온도차가 크진 않지만 연중 내내 발전할 수 있는 장점을 가지고 있다.

4. 환경요소에 따른 열전소자의 발전특성

4.1. 실험 방법

사회기반시설 및 생활 주변에서 쉽게 느껴지는 뜨거운 열과 온도차를 활용하여 전기로 변환하는 과정은 그림 3처럼 3단계로 구분할 수 있다. 이 과정에 있어서 가장 큰 관건은 효율성이며, 효율성에 영향을 주는 요소는 크게 열발생원의 열온도와 온도차 및 열발생 시간, 열 전달 체계 그리고 열발전소자 자체의 변환효율성으로 나눌 수 있다.

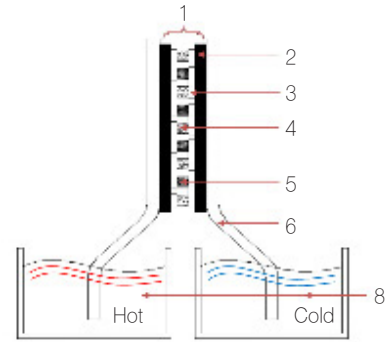
과정	열 발생원	열 전달	열-전기변환
대상	사회기반시설, 생활주변(도로, 철도, 플랜트, 댐, 자동차, 소각장...)	열 전달체계(매체) 기체(공기), 액체(물), 고체(금속)	열 발전 소자
영향 요소	열원의 온도변화 및 열 발생 시간	열전도율, 열손실율, 열보존율, 열용량 등	열 발전 소자 자체 변환효율성

그림 3. 열-전기 발전 과정 및 영향요소

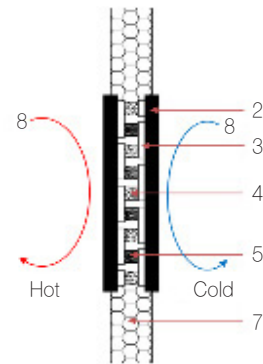
따라서 본 실험에서는 현재까지 상온근방에서 가장 효율이 좋은 것으로 알려진 Bi-Te계 화합물 반도체로 만들어진 40×40×3.9mm크기의 열전소자를 사용하였으며, 열발생원의 온도차에 따른 전기값과 열을 효율적으로 이용하기 위한 열전달 체계의 환경요소에 따른 전기특성값에 중점을 두고 실험을 수행하였다.

그림 4에서 1은 Bi-Te계열의 열전소자모듈로써 4-(N형 반도체), 5-(P형 반도체)가 격자 구조로 배열되어 있는 3-(금속전극판)에 연결되어 있고, 양단에는 2-(절연기판)이 부착되어 있으며, 이 절연기판에 열을 공급함으로써 전기가 발생하게 된다. 그림 4(a)의 실험의 경우 비교적 열전도율이 높으

면서도 저가로서 활용가능성이 높은 구리와 알루미늄판을 절연기판의 양단과 열원에 접촉시켜 열원이 금속판(Al, Cu)을 통해 열이 전달될 수 있도록 하였으며, 열원은 온도조절이 비교적 용이한 물은 활용하였다. 그림 4(b)의 경우 온냉열원의 열교환 방지를 위해 7-(단열판)을 부착하고 공기나 액체등의 열원이 변환소자 양단면에 직접 접촉할 수 있게 하였으며, 변환소자의 양단면에 공급한 온도의 경우는 일반적으로 도로·철도·건설물 외피 등의 사회기반시설 및 주변환경에 발생하는 열 온도를 고려하여, 10℃에서 70℃까지의 온도차를 공급하였다.



(a) Cu 및 Al 열원전달판 실험

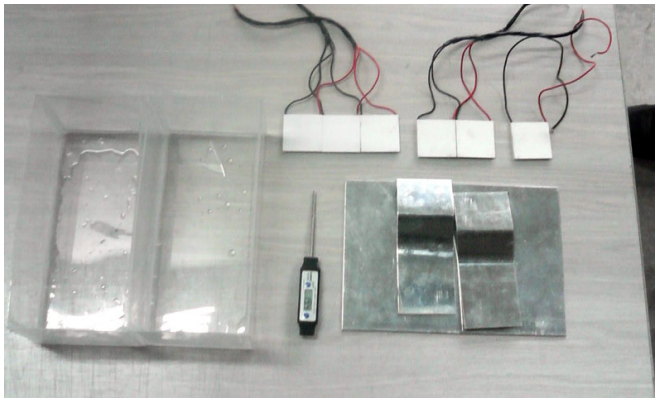


(b) 공기열원실험

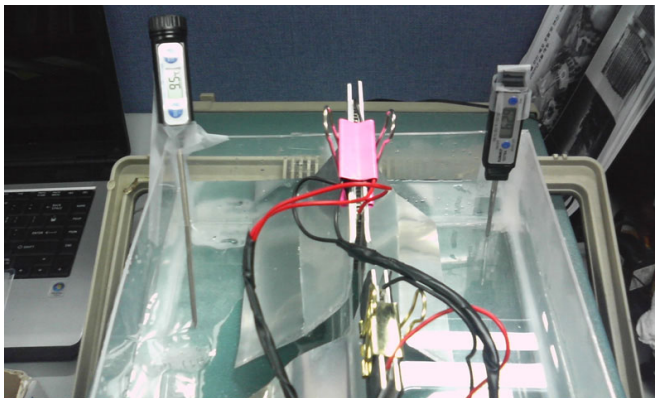
1-열전발전모듈(열전소자), 2-절연기판, 3-금속전극, 4-N형 반도체, 5-P형 반도체, 6-열원전달판(Cu,Al), 7-단열재, 8-온냉열원공급

그림 4. 열-전기발전 실험 모식도

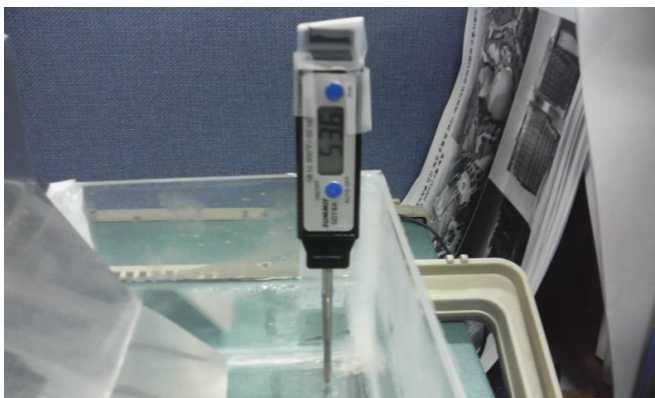
실험은 다음 사진 1(b)처럼 열발전소자의 회로를 구성하여 오실로스코프(LeCroy, LT262 DSO)에 연결한 후, 냉온의 물이나 공기등을 변환소자 양단면에 공급하고 Digital Thermometer(SUMMIT STD8A)를 사용하여 사진 1(c)와 같이 온도를 측정하였다. 이후 각각의 온도차, 열전달 매체, 시간의 변화 등에 따라 오실로스코프에 나타나는 전기적 특성을 확인하였다.



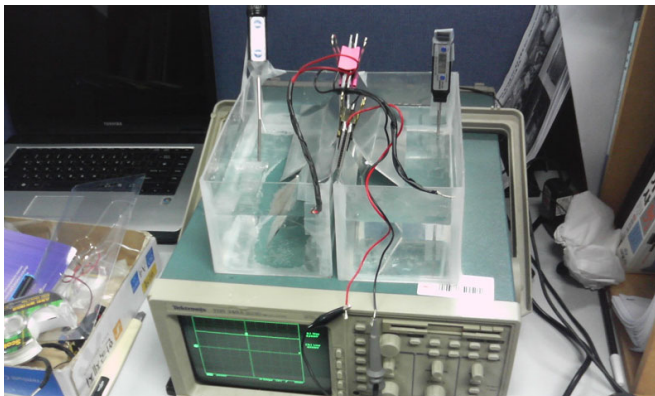
(a) 실험재료 준비



(b) 열전소자 회로구성



(c) 열원 온도측정



(d) 전기값 측정

사진 1. 열-전기발전 실험 사진

4.2. 실험 결과 및 분석

4.2.1. 열원의 온도차 및 변환소자의 면적에 따른 해석

아스팔트 도로의 경우 한 여름철 표면온도는 65℃~70℃까지 급상승하기도 한다. 이러한 사회기반시설에서 발생하는 열의 온도를 고려하여, 실험에서는 변환소자 양단면의 온도차를 10℃부터 70℃까지 5℃ 차의 간격으로 공급하면서 전기값의 변화를 측정하였으며, 각 온도차마다 변환소자의 수량(면적)에 따른 전압 및 전류값을 측정하였다.

Seebeck이론에서 열발전소자를 구성하는 두 도체 a와 b에 온도차 ΔT 가 존재할 때 열기전력 V_{ab} 는

$$V_{ab} = \alpha_{ab} \cdot \Delta T \quad (1)$$

가 되며 여기서 α_{ab} 를 seebeck 계수라 한다.

AI 열원전도판을 이용한 실험결과 양단의 온도차가 70℃일 경우 약 560mV의 전압이 발생하였고, 실험의 최소온도차인 10℃에서는 약 80mV의 전압이 발생하였다. 그러나 변환소자 양단의 온도차가 같을 때 소자의 면적이나 수량과는 관계없이 표 2 처럼 거의 일정한 전압값을 나타내었다. 이는 α_{ab} 는 변환소자를 구성하는 도체 자체의 물성치에 따른 값으로서 면적에 관

표 2. 온도차-면적에 따른 전압 측정값

(ΔT : 온도차) (단위: mV)

ΔT	Area	1-(16cm ²)	2-(32cm ²)	3-(48cm ²)
10		88	80	80
15		128	120	120
20		160	152	146
25		200	192	192
30		232	224	216
35		272	272	264
40		328	312	312
45		352	344	344
50		392	392	392
55		432	432	432
60		472	472	464
65		516	508	508
70		560	552	552

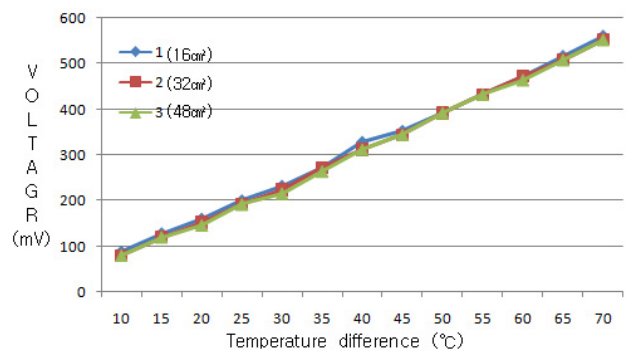


그림 5. 온도차-면적에 따른 전압 그래프

계없이 일정하므로, 열기전력 V_{ab} 의 영향을 주는 중요한 환경적인 요소는 변환소자 양단간의 온도차(ΔT)임을 확인할 수 있다.

본 실험에서 사용된 Bi-Te계열의 변환소자의 경우 표 2의 데이터를 식(1)에 대입함으로써 다음과 같은 α_{ab} 값을 얻을 수 있다.

$$\alpha_{ab} = \frac{V_{ab}}{\Delta T} \doteq 0.008 \rightarrow V_{ab} = 0.008 \cdot \Delta T \quad (2)$$

전류측정은 Digital Multimeter(True-RMS Multimeters, FLUKE 사)를 사용하여 측정하는 동시에 오실로스코프에 100M Ω 과 200M Ω 을 각각 회로에 연결하여 $V(\text{voltage})=I(\text{intensity}) \times R(\text{resistance})$ 의 식을 이용하여 도출하였는데, 두 비교의 결과 값은 거의 일치하였으며 표 3의 결과를 살펴보면 전류의 경우 온도차의 증가에 따라 선형적인 증가율을 보이며 면적에 따른 증가량도 보이고 있었다.

실험결과를 보면 70 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도차와 16 cm^2 의 면적에서는 약 1.5mA의 전류가 발생하고 있음을 확인하였고, 데이터 결과값을 바탕으로 그림 6의 그래프로 나타내었으며 양단의 온도차와 변환면적에 따른 전류에 대한 다음과 같은 식을 도출하였다.

$$I = (\alpha / 6.4 + 0.53A) \cdot \Delta T \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

표 3. 온도차-면적에 따른 전류 측정값

(ΔT : 온도차) (단위: mA)

ΔT	Area	1-(16 cm^2)	2-(32 cm^2)	3-(48 cm^2)
10		17	39	57
15		29	53	76
20		41	65	95
25		48	75	114
30		57	88	130
35		66	100	150
40		74	113	172
45		83	127	183
50		100	155	205
55		109	165	221
60		118	187	246
65		134	199	267
70		150	212	286

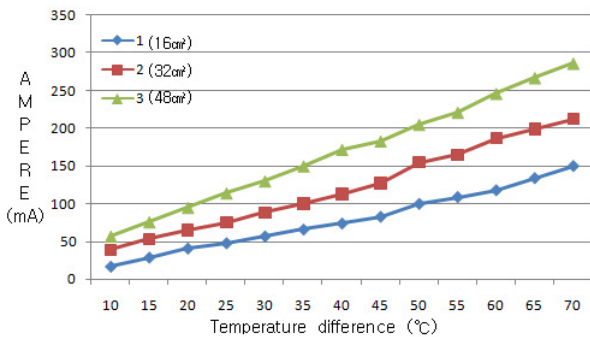


그림 6. 온도차-면적에 따른 전류 그래프

즉, seebeck계수인 α_{ab} 는 변환소자 자체의 성능을 나타내는 것으로 변환소자 자체의 내부 결함이나 변수를 고려하지 않는다면 변하지 않는 값으로서, 높은 V_{ab} 값을 얻기 위해서는 변환소자 양단의 온도차(ΔT)가, 높은 I 값을 얻기 위해서는 변환소자의 변환면적(A)이 주변환경에 따른 변수로서 매우 중요한 요소이다.

$$V(\text{전압}) \propto \Delta T(\text{온도차}) \text{ and } (전류) \propto A(\text{변환면적}) \quad (4)$$

표 4. 온도차-면적에 따른 전력 값

(ΔT : 온도차) (단위: W)

ΔT	Area	1-(16 cm^2)	2-(32 cm^2)	3-(48 cm^2)
10		0.00150	0.00312	0.00456
15		0.00371	0.00636	0.00912
20		0.00656	0.00988	0.01387
25		0.00960	0.01440	0.02189
30		0.01322	0.01971	0.02808
35		0.01795	0.02720	0.03960
40		0.02427	0.03526	0.05366
45		0.02922	0.04369	0.06295
50		0.03920	0.06076	0.08036
55		0.04709	0.07128	0.09547
60		0.05570	0.08826	0.11414
65		0.06914	0.10109	0.13564
70		0.08400	0.11702	0.15787

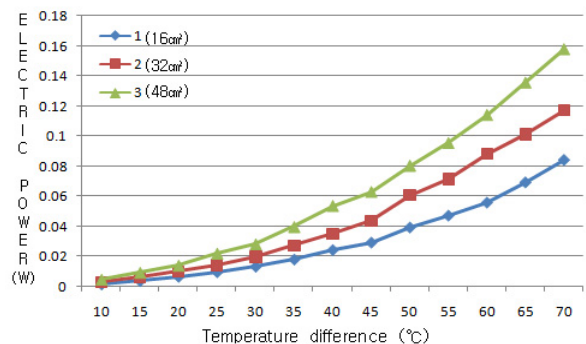


그림 7. 온도차-면적에 따른 전력 그래프

전력의 경우 단위는 흔히 와트(W)또는 킬로와트(kW)를 사용하며, 1W는 1A(암페어)의 전류가 1V(볼트)의 전압이 걸린 곳을 흐를 때 소비되는 전력의 크기로서 전력(P)과 전압(V), 전류(I)의 관계는 $P = V \cdot I$ 를 만족한다. 따라서 전력 P(W)는 앞에서 측정된 전압과 전류값을 대입하여 확인하였고, 그 결과 그림 8의 그래프처럼 나타났으며 양단의 온도차 70 $^{\circ}\text{C}$ 와 변환면적 48 cm^2 에서 약 0.15W의 전기에너지로 변환한 것을 확인하였다. 이는 온도차 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 약 1 m^2 변환면적의 경우, 20.82W정도의 전력을 만들 수 있다는 것을 알 수 있다. 본 실험에서 사용된 Bi-Te계열의 열전소자의 온도차와 변환면적에

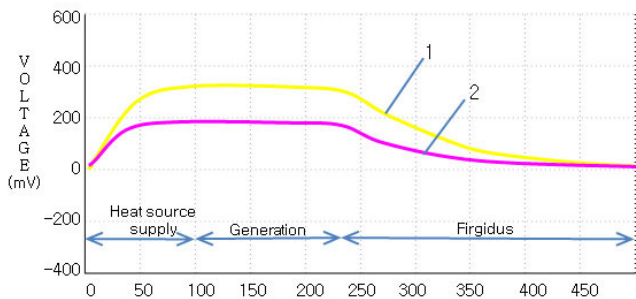
따른 전력은 식(1)과 식(3)을 $P = V \cdot I$ 에 대입하여 다음과 같은 식으로 표현 할 수 있다.

$$P(W) = \alpha \cdot (\alpha / 6.4 + 0.53A) \cdot (\Delta T)^2 \quad (5)$$

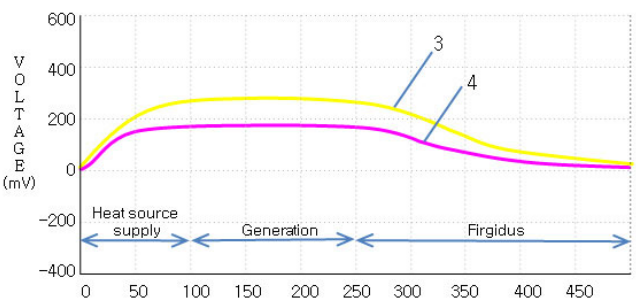
- A : 변환면적(m²)
- α : Seebeck 계수
- I : 전류
- P : 전력(W)
- ΔT : 양단 온도차(°C)
- V : 전압

4.2.2. 열원집열면적 및 열원공급냉각에 따른 해석

아스팔트나 콘크리트 구조물등의 열원을 효율적으로 활용하는데 있어서 중요한 또 하나의 변수는 집열면적이라고 볼 수 있다. 본 실험에서는 소자 양단면의 온도차를 30°C로 일정하게 유지한 상태에서 열원 전달체의 집열면적을 달리하였고, 초기 열원을 공급하고 다시 제거하며 시간에 따른 전기적 특성 변화를 측정하였다. 실험 결과를 살펴보면 변환소자 양단면의 온도차가 일정하고 열원 전도체의 열전도율이 같더라도, 열원의 집열면적에 따라 초기 열원 전달부터 평형상태가 될 때까지의 변화는 그림 8과 같은 차이를 보였다. 그림 8(a)와 (b)의 실험모두 50×150cm²의 열



(a)



(b)

1-Al(10cm×15cm×1T), 2-Al(5cm×15cm×1T), 3-Cu(10cm×15cm×1T), 4-Cu(5cm×15cm×1T)

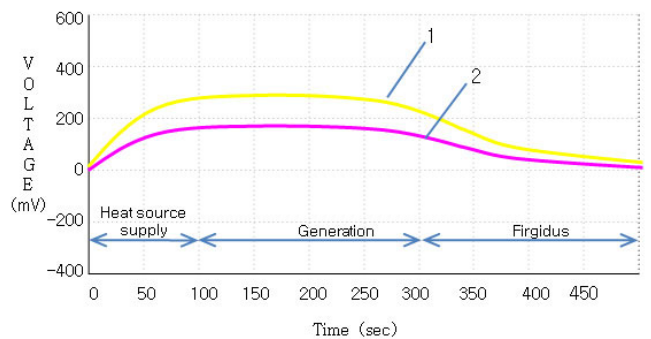
그림 8. 집열면적에 따른 전압값 비교

원전도체를 사용한 2, 4번의 그래프보다 넓은 집열면적의 열원 전도체(100×150cm²)를 사용한 1, 3번 그래프가 확연히 높은 전기변환효율을 보였는데, 이는 넓은 면적일수록 열원을 더 효율적으로 변환소자로 전달하고 있음을 보여주는 것이다.

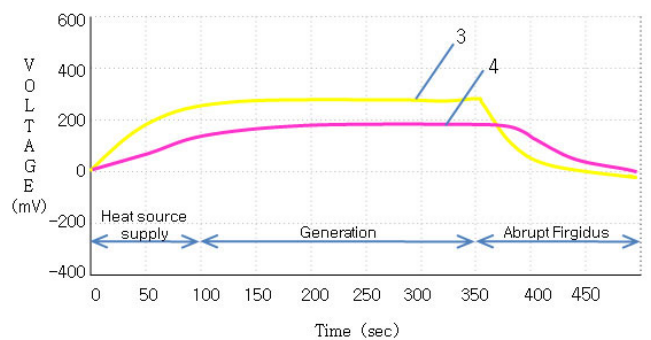
또한 그림 9(a)는 열원을 공급한 후 공기중의 상온에서 그림 9(b)는 10°C의 냉수에 열전달체를 냉각시켜 양단의 온도차가 평행에 이르러 전기적 특성이 거의 사라질 때까지의 실험 결과 그래프이다.

냉각에 이를 때까지의 전기적 변화를 살펴보면 넓은 면적의 열원전도체의 경우, 열원공급부터 냉각까지 더 높은 전기변환 효율을 보이지만, 그림 9(b)처럼 양단의 온도차가 빠르게 평행 상태에 이를 경우 열전도가 높을수록 전기적 특성은 빠르게 감소되었다.

결국 공급된 열 온도 및 변환소자 양단의 온도차를 가능한 오래도록 지속시키는 것이 또 하나의 환경적인 요소임을 알 수 있으며, 단열 등을 통해 열원의 보존율을 최대화하여 열원의 공급이 끝난 후에도 변환소자의 열전현상을 가능한 지속시키는 것이 필요하다.



(a)



(b)

1-Al(10cm×15cm×1T), 2-Al(5cm×15cm×1T), 3-Cu(10cm×15cm×1T), 4-Cu(5cm×15cm×1T)

그림 9. 열원공급 및 냉각 변화 그래프

4.2.3. 열원전달 매체에 따른 전기값

이번 실험은 변환소자 양단면에 열을 전달하는 매체에 따른

전기적 특성을 알아보기 위한 것으로써, 우리 생활주변에서 가장 흔히 적용가능한 대기중의 공기와 물, 그리고 고체금속 중에서도 열전도율이 높은 알루미늄을 사용하여 실험을 수행하였다.

그림 10의 실험결과를 살펴보면 대기중의 물이나 공기를 사용한 1, 2번의 그래프의 경우는 거의 비슷한 전기값을 나타내었지만, 알루미늄금속을 사용한 3번 그래프의 경우는 1, 2번의 그래프보다 약 65mV정도의 전압값이 적게 나와 변환효율이 떨어지고 있음을 보이고 있었다. 이는 물과 공기는 직접 소자 양단에 접촉함으로써 열에너지를 직접 변환소자에 전달하지만 알루미늄 열전달판을 사용한 경우 열원을 변환소자로 운반하는 과정에서 열손실이 발생하기 때문으로 생각된다. 본 실험에서 사용된 열전소자의 경우 그림 5에서 얻었던 식(2)의 수식에 1번의 그래프보다 적게나온 3번 그래프의 전압 데이터 값을 대입함으로써 그 온도차가 확인이 가능하다.

대입결과 V_1 과 V_3 에서 발생한 전압차 65mV는 약 8°C 정도의 온도차로 환산이 가능하며, 알루미늄 금속의 열 전달과정에서 8°C 정도의 열손실이 발생한 것임을 알 수 있다.

따라서 열원을 활용하는 과정에서 열원자체의 온도가 높더라도 변환소자 차체에 전달되어진 온도에 열손실등의 변화가 생긴다면 그 변화만큼의 변환효율도 떨어지게 된다. 이는 seebeck이론에서의 변환소자 양단면의 온도차는 전압(V_{ab})으로 변환되는 에너지로써 a 와 b 의 열원자체에서의 온도차가 아니라 변환소자 양단면에 전달되어진 온도차(ΔT)로 봐야 한다. 결국, 열에너지 및 온도차가 발생하는 열원을 효율적으로 활용하기 위해서는 변환소자로 에너지를 전달하는 과정에서의 열 손실율을 최대한 감소시키는 것이 중요하다.

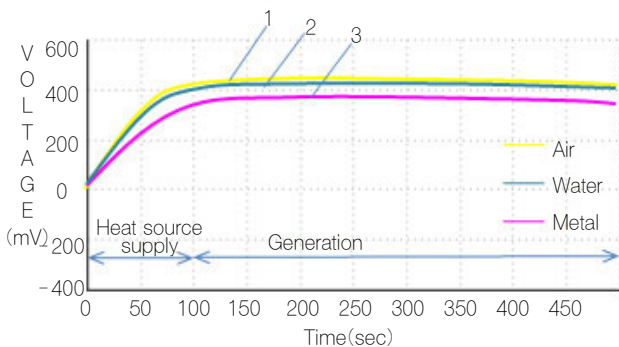


그림 10. 열 전달 매체에 따른 비교 그래프

5. 결론

전세계적으로 녹색 뉴딜정책에 따른 신·재생 에너지 개발이 화두로 떠오르면서, 저탄소 녹색개념의 녹색사회기반시설(SOC)의 중요성이 부각되고 있다.

본 논문에서는 사회기반시설에 필요한 전기에너지를 위해 주

변의 온도와 열로부터 에너지를 회수(Energy Harvesting)하는 녹색사회기반시설 구축을 위한 열전기초실험을 통해 열-전기변환의 적용 가능성을 검증하고 효율적인 열원의 활용방안을 모색하고자 하였다.

열전효과란 열에너지를 전기에너지로 또는 그 반대로 가열적 변환이 일어나는 현상이다. 이러한 열전특성을 통해 주변 환경의 여건 및 변화에 따른 전기적 특성을 확인하기 위하여 현재 상온근처에서 가장 많이 활용되는 Bi-Te계 물질로 제작한 열전소자를 이용하여 실험을 수행하였다. 소자 양단에는 아스팔트 포장도로나 콘크리트등의 구조물에서 발생 가능한 열원의 온도를 공급하였고, 공급된 열원의 온도차와 집열면적, 열전도체의 종류, 변환면적, 열원의 공급 및 제거등의 변수에 따른 전기값을 측정하였다.

실험 결과 70°C의 온도차와 16cm²의 면적에서 약 560mV의 전압이 발생하였고 약 1.55mA의 전류를 회수함으로써 열이 전기로 변환되는 과정 및 그 가능성을 확인하였다. 결국 1m²의 변환면적에서는 약 20.82W의 전력을 생산할 수 있음을 확인하였다. 또한 변환소자가 노출조건에 따라 공기, 물, 금속체 등의 열전도율에 따른 초기 열전도의 시간차이는 있으나, 이후 선형적인 변화가 이루어지는 결과를 통해 절대적인 온도변화율(양단간 온도차)만이 전압에 영향을 미치고 있으며, 변환면적의 증가에 따라 전류값도 비례적으로 증가하고 있음을 확인하였다. 따라서 열전소자에 가장 큰 영향을 주는 외부환경의 요소는 변환소자의 변환면적과 양단간의 온도차($\Delta T = \Delta T_a - T_b$)이며, 이때 온도차(ΔT)는 변환소자에 도달하는 온도로서 열원자체의 열 에너지가 아무리 높더라도 열을 전달하는 과정에서 열 손실이 크다면 효율성이 낮아지게 된다.

따라서 열-전기발전이 적용가능한 주변환경 및 산업시설등의 온도변화와 변환면적이 높은 발전을 위해서 중요한 한계가 있는 환경에서는 열손실율을 최소화 하는 동시에 주변 조건을 이루는 물질의 열 용량 및 열전달율과 열보존율 등을 높이는 것이 열전기변환의 효율성과 지속성을 높이고 지속가능하게 할 수 있는 중요한 외부 환경 요소로 볼 수 있다.

이러한 열전기 변환은 지속성과 무소음, 무진동, 소형화가 가능하며, 보수가 필요없고 탄소를 배출하지 않는 청정에너지원이라는 장점이 있지만 현재까지 경제성과 효율성면에서 많은 개선이 요구되고 있다. 이러한 열-전기발전 시스템을 도입하기 위해서는 무엇보다도 변환소자 자체의 성능향상과 경제성의 확보가 중요하며, 열원의 효율적인 활용방법과 사회기반시설 및 기타 산업시설에서의 적용성에 대하여 앞으로도 많은 연구가 필요하다.

참고 문헌

권성도, 주병권, 윤석진, 김진상 (2008.11) "Growth of Bi-Te

- Based Materials by MOCVD and Fabrication of Thermoelectric Thin Film Devices”, *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, Vol. 21, No. 12, p1135.
- 우병철, 이희웅, 이동윤 (2000) “Characteristics of electric power for thermoelectric cooling&generating module”, *한국전기전자재료학회 2000년도 하계학술대회 논문집*, p.448-451
- 이영재, 표영덕, 김강출 (2002) “열전발전 적용을 위한 가솔린차량의 전력 및 배기열 에너지 분석 연구”, *한국자동차공학회 논문집*, 제 10권 제1호, pp.99-105
- 장문규, 전명심, 노태문, 김종대 (2008.12) “Thermoelectric Power Generation with High Efficiency”, *한국통신동향분석*, 제 23권 제6호 p.12-21
- 한은주, 김근목 (1998) “The Characteristics of Bi-Te Thermoelectrics System”, *The Journal of Natural Sciences*, The university of Suwon Vol. 1
- Rama venkatasubramanian, Edward Siivola, Thomas Colpitts, and Brooks O’Quinn (2001) “Thin-film Thermoelectric Devices with High Room-temperature Figures of merit”, *Nature*, Vol.413, 2001, p.597
<http://acetec-korea.com>

접 수 일 : 2010. 6. 1
심 사 일 : 2010. 6. 10
심사완료일 : 2010. 8. 11