

열전소자를 활용한 도로구조물에서의 에너지 하베스팅 기초 연구

Fundamental Study of Energy Harvesting using Thermoelectric Module on Road Facilities

이재준	Lee, Jae-Jun	정희원 · 전북대학교 토목공학과 조교수 (E-mail : lee2012@jbnu.ac.kr)
김대훈	Kim, Dae-Hoon	정희원 · 전북대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : kidsmini@hanmail.net)
이강휘	Lee, Kang-Hwi	정희원 · 전북대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : leekang01@naver.com)
임재규	Lim, Jae-kyu	한국건설기술연구원 도로포장연구실 전임연구원 · 교신저자 (E-mail : jklim@kict.re.kr)
이승태	Lee, Seung-Tae	정희원 · 군산대학교 토목공학과 부교수 (E-mail : stlee@kunsan.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : An conventional method for electric power generation is converting thermal energy into mechanical energy then to electrical energy. Due to environmental issues such as global warming related with CO₂ emission etc., were the limiting factor for the energy resources which resulting in extensive research and novel technologies are required to generate electric power. Thermal energy harvesting using thermoelectric generator is one of energy harvesting technologies due to diverse advantages for new green technology. This paper presents a possibility of application of the thermoelectric generator's application in the direct exchange of waste solar energy into electrical power in road space.

METHODS : To measure generated electric power of the thermoelectric generator, data logger was adopted as function of experimental factors such as using cooling sink, connection methods etc. Also, the thermoelectric generator's behavior at low ambient temperature was investigated as measurement of output voltage vs. elapsed times.

RESULTS : A few temperature difference between top an bottom of the thermoelectric generator is generated electric voltage. Components of an electrical circuit can be connected in various ways. The two simplest of these are called series and parallel and occur so open. Series shows slightly better performance in this study. An installation of cooling sink in the thermoelectric generator system was enhanced the output of power voltage.

CONCLUSIONS : In this paper, a basic concepts of thermoelectric power generation is presented and applications of the thermoelectric generator to waste solar energy in road is estimated for green energy harvesting technology. The possibility of usage of thermoelectric technology for road facilities was found under the ambient thermal gradient between two surfaces of the thermoelectric module. An experiment results provide a testimony of the feasibility of the proposed environmental energy harvesting technology on the road facilities.

Keywords

thermoelectric module, energy harvesting technology, thermoelectric generator

Corresponding Author : Lim, Jae-kyu, Research Specialist
Highway Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and
Building Technology, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-Si,
Gyeonggi-do, 411-712, Korea
Tel : +82.31.910.0572 Fax : +82.31.910.0161
E-mail : jklim@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)

Received Oct. 9, 2014 Revised Oct. 10, 2014 Accepted Oct. 21, 2014

1. 서론

도로는 국가의 대동맥으로 교통 및 물류수송을 전담하는 국가 기간시설물로 여겨지고 있다. 최근 석유에너지 사용에 따른 환경오염과 자원고갈 등 다양한 문제점들이 사회적 이슈가 되고 있으며, 이를 해결하기 위하여 신재생에너지 기술분야에 많은 관심이 집중되고 있다. 최근 도로는 단지 물류 수송을 위해 사용되어진다는 개념을 벗어나서 새로운 신재생에너지를 생산할 수 있는 인프라 시설물로서 관심을 가지게 되면서, 도로공간에 적용할 수 있는 신재생 에너지 생산기술에 연구가 활발히 진행되고 있으며, 도로공간은 친환경적으로 거대한 잠재력을 가지고 있다고 생각된다. 이스라엘의 이노와텍은 도로공간에 충격과 진동을 받았을 때 전기를 생산하는 압전소자를 설치하여 도로를 주행하는 차량을 이용하여 신재생에너지를 생산하는 기술개발 연구를 꾸준히 진행하고 있으며, 시범포장을 실시하고 있다.

최근 열에너지를 전기에너지로 변환 할 수 있는 열전(Thermoelectric Module)소자를 이용하는 신재생 에너지 기술도 많은 관심을 받고 있다. 열전소자는 열에너지를 전기에너지로 직접 변환하는데 사용되는 소자로 에너지 절감이라는 현재의 시대적 요구에 잘 부응하는 소재이며, 최근 신재생에너지 분야에서 관심을 받고 있는 재료이다. 최근 선진국에서는 광범위하게 사용되고 있는 열전소자 재료 개발에 따른 효율을 향상시키기 위한 연구를 꾸준히 진행하고 있다(Chun et al., 2014).

자동차 배기가스 온도는 400~600℃ 온도범위를 가지고 있어서, 최근 자동차 산업부분에서는 엔진의 실린더 부분이나 머플러 부분에 열전발전 시스템을 적용하여 자동차 총에너지의 3.3%를 회수하는 기술과 열전모듈개발을 진행하고 있으며, 고급차량에는 열전시스템 적용을 하고 있다(Kim, 2013).

Jo 외 3인은 아스팔트 도로포장의 경우, 한 여름철 아스팔트 포장 표면온도가 약 70℃까지 상승하는 아스팔트 표면의 열에너지를 청정에너지원으로 전환하기 위하여 열전현상을 이용한 열전소자를 적용하여 전기에너지로 변환 가능성 연구를 수행하였다. 열전소자의 열-전기 변환의 가능성에 대한 검증연구로 열전소자의 양단 온도차와 변환면적에 따라 발생하는 전류, 전압 및 전력량을 측정하였으며, 아스팔트 콘크리트 포장체에 열전소자를 적용할 수 있는 방안 검토 및 전기적 특성 분석을 통하여 열전소자의 양단의 온도차와 변환면적에 따른 발전특성 연구를 수행하였다(Jo et al., 2011).

Yildiz 외 1인(2014)는 열전소자를 이용하여 에어컨

에서 온도차이가 가장 크게 발생하는 콘덴서에 열전소자를 설치하여 저전력에너지 수확(Low power energy harvesting)에 대한 연구를 실시하였다. Fig. 1은 에어컨 콘덴서에 구리를 이용하여 열전소자를 설치한 전경을 나타내고 있다. Yildiz 연구에서는 열전소자의 에너지 생산효과와 에너지 생산가능성, 비용, 잠재적인 적용방법 등에 대하여 연구를 수행하였으며, 열전소자를 이용한 에너지 하베스팅 적용 범위를 확대할 수 있는 잠재성을 확인하였다.

Wu는 도로포장체에서 발생하는 열에너지를 이용하여 신재생에너지를 생산하는 연구를 수행하였으며, 실내 실험과 컴퓨터 해석을 통한 에너지 생산가능성에 대한 연구를 수행하였다(Wu et al, 2011, Wu, et al. 2012). 이와 같이 도로공간에서 열에너지를 이용한 에너지 하베스팅에 관한 기초연구들이 세계적으로 활발히 진행되고 있다.



Fig. 1 The TEG Module Clamped to the Pipes of the Compressor

2. Thermoelectric(TE) Generator

열전발전(Thermoelectric Generator)은 1822년 독일 제백(Seebeck)에 의해 발견된 이론으로 P형과 N형의 결합된 소자 양단, 재료 양쪽에 온도차이를 주면 기전력이 발생하는 현상을 제백효과라 하며, 이를 이용하는 것이 열전발전기(Thermoelectric Generator)이다. 열전모듈의 pn 접합을 가열하고 각 단자 전극을 저온으로 유지하여 온도차를 발생시키면, 제백효과에 의해 p형 전극에 (+), n형 전극에 (-) 전압이 발생하게 되며, 이 전극에 외부 부하(RL)를 연결하면 전류가 흐르게 되어 전력이 발생된다. 열전발전모듈은 태양열, 해수온도차, 폐열 등 저급에너지의 이용을 통한 발전과 이동(휴대용) 발전이 가능하다는 측면에서 기존의 가스나 화석

연료 등을 대체하여 군사용 전원으로 사용되었으며, 또한 가동부위가 없어 진동과 마모가 없으므로 신뢰성이 높고, 무중력 하에서도 작동이 가능하기 때문에 지금까지는 우주(탐사)선, 인공위성, 인체용 특수전원 등에 사용할 목적으로 방사성동위원소의 붕괴에너지를 이용한 발전(RTG: radioisotope thermoelectric generator) 등에 널리 사용되고 있다고 한다(Chun et al., 2014).

열전발전은 지금까지 회수가치가 없다고 생각되는 150℃ 이하의 열에서도 발전이 가능하고, 산업 배/폐열을 연료로 이용하는 열전발전 시스템으로, 유지비가 거의 필요없는 장점을 가지고 있으나, 현재로서는 태양열과 풍력과 같은 다른 신재생에너지와 비교하여 효율이 낮은 단점을 지니고 있어서 이를 해결하기 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있다(Kim, 2013).

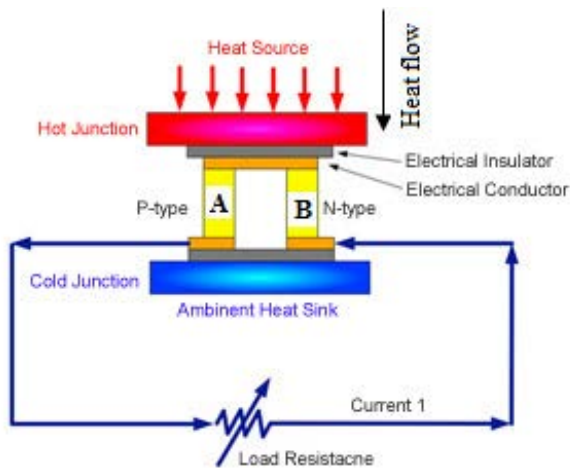


Fig. 2 Working Principle of a TE Control or Generator (Zadshakouyan et al., 2013)

3. 국내 열전소자 발전동향

국내에서도 열전소자 제작을 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. Fig. 3은 전기연구원에서 제백효과를 이용해

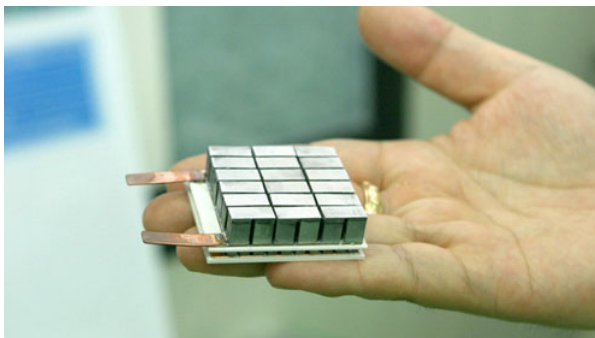
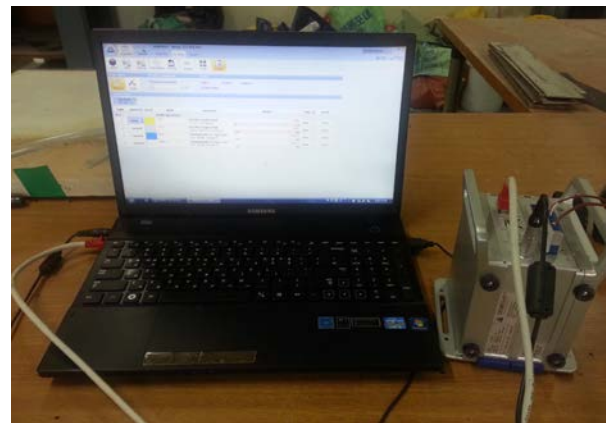


Fig. 3 Compositd Thermoelectric Generator (Chun et al., 2014)

열을 바로 전기로 바꾸는 열전 발전효율을 향상 시킨 열전소자를 보여주고 있다. 일반 열전소자와 달리 윗면에 환층을 더 설치한 것을 볼 수 있다(Chun, 2014). 이와 같이 새로운 효율을 개선하기 위한 열전소자개발이 꾸준히 진행됨에 따라 다른 신재생에너지와 비교하여 저효율의 단점을 빠른 시간내에 극복할 수 있을 것으로 예측된다.

4. Experimental Test Method

본 연구에서는 Fig. 4에서 설명하고 있는 실험장비를 이용하여 실내실험을 실시하였다. Fig. 4 (a)는 열전소자에서 발생하는 전력을 측정하기 위한 데이터로거를 보여주고 있다. 데이터로거는 데바트론 제품의 데바소프트웨어를 이용하여 실시간으로 측정을 하였다. Fig. 4 (b)는 본 연구를 수행하기 위한 장비셋트 전경을 보여주고 있다. 본 연구에서는 30×30×5cm 시멘트 모르타



(a) Data Logger



(b) Experimental Setup

Fig. 4 Experimental Setup and Data Logger

시편과 태양을 모사하기 위해 할로겐 램프를 사용하였으며, 시멘트 모르타 공시체 위에 열전소자를 넣고 할로겐 램프에서 발생하는 열을 이용하여 이때 발생하는 전압을 데이터 로거를 이용하여 측정을 하였다.

5. Test Results

5.1. 열전소자의 전압생성 특성

콘크리트 표면에 열전소자를 설치하고, 태양열에 의해 열전소자 윗면의 온도가 상승하며, 콘크리트와 접하고 있는 열전소자 하단의 온도차이에 의하여 발생하는 전압특성을 알아보기 위하여 Fig. 4의 실험장치를 활용하여 발생전력 특성을 분석하였다. Fig. 5에서는 열전소자 윗면과 아랫면의 온도와 열전소자의 윗면과 아랫면의 온도차로 발생하는 전압 값을 나타내고 있다.

본 연구에서는 총 13시간동안 실험이 진행되었으며, 6시간 이후에는 할로겐 램프를 소등 한 후 전압발생 특성을 조사하였다. Fig. 5의 검은 점선은 열전소자에서 발생된 전압이며, 빨간색 실선은 열전소자 윗면의 온도, 그리고 파란색 점선을 열전소자의 하단부분에서 측정된 온도값을 나타내고 있다.

Fig. 5에서와 같이 열전소자의 표면온도가 급격히 증가하면 할수록 발생하는 전압양도 증가함을 알 수 있었다. 하지만 열전소자의 하단부의 온도가 증가하면서 열전소자에서 발생하는 전압도 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 할로겐 램프가 꺼졌을 때 발생하는 전압도 급격하게 변화되는 것을 관측할 수 있었으며, 순간적으로 발생전압이 (+)에서 (-)로 변화되어 측정되었으며, 할로겐 램프 소등 이후 6~7시간에는 더 이상 전압이 측정되지 않았다. 이는 열전소자의 윗면과 아랫면의 온도 차이가 사라졌기 때문이라 판단된다. 열전소자를 현장에 적용할 경우, 낮과 밤에 발생하는 전압의 전극 변화 등을 고려한 시스템 개발도 필요하다고 판단된다.

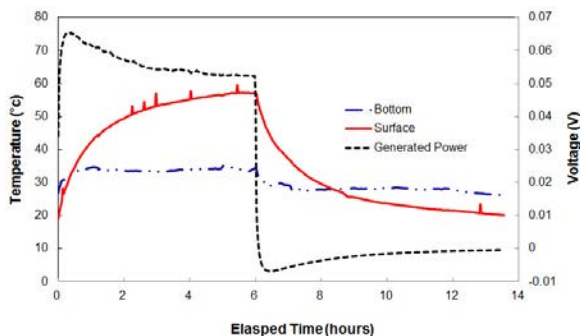
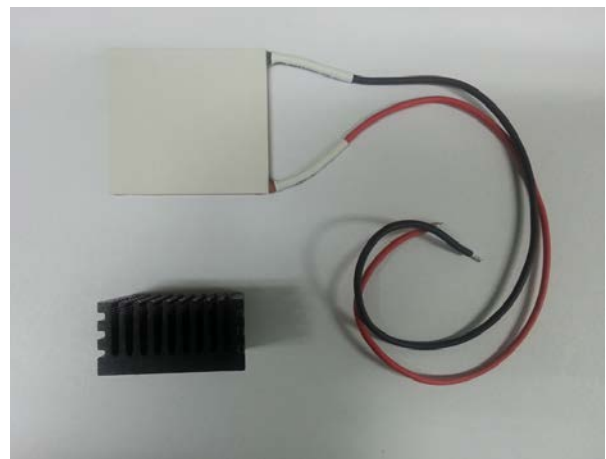


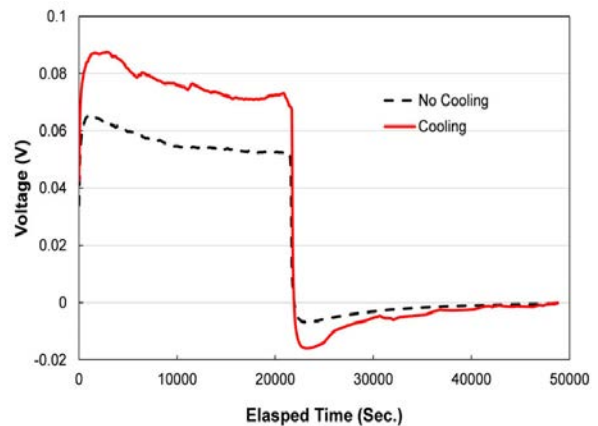
Fig. 5 Generated Power and Measured Temperature of TE Module

5.2. 방열판(Cooling sink) 사용 유무

열전소자의 윗면과 아랫면의 온도차이를 크게하기 위하여 열전소자 하부에 방열판 설치에 따른 발전 특성을 비교하고자 한다. Fig. 6(a)에서 설명하고 있는 방열판 (cooling sink)는 열을 분산시키는 효과가 있으며, 열이 발생하는 기계장치주변에 널리 사용되는 장비이다. 본 연구에서는 열전소자(TE module) 하단부에 방열판을 연결하는 시스템을 구축하였으며, 방열판은 모르타르 시편 내부에 매립을 하였다. 할로겐 램프와 열전소자 사이의 높이를 방열판 사용 유무에 따른 높이 변화에 따라 실험변수를 제거하기로 하였다. Fig. 6(b)는 방열판 사용 유무에 따른 발전량을 비교하여 정리한 그림이다. Fig. 6(b)에서 나타내고 있는것과 같이 방열판 사용에 따른 효과가 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 방열판으로 인하여 열전소자의 윗면과 아랫면의 온도차이가 크게 발생하였기 때문으로 판단된다.



(a) Thermoelectric module



(b) Generated voltage

Fig. 6 Power Generation as Function of using Cooling Sink

5.3. 연결방법 연구

본 연구에서는 열전소자 활용을 위한 기초연구를 실내 실험실에서 두 개의 열전소자(TE module)만을 이용하였으나, 향후 넓은 도로공간에 열전소자를 설치할 때 많은 열전소자들을 연결할 경우가 발생할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 다량의 열전소자를 설치할 때 열전소자들의 연결방식(직렬연결과 병렬연결)에 따른 발전특성을 알아보기 위하여 Fig. 7과 같이 가로 28cm, 세로 28cm, 높이 7cm 모르터 공시체에 두 개의 열전소자를 배열한 후 연결방식에 따른 발전특성을 조사하였다.

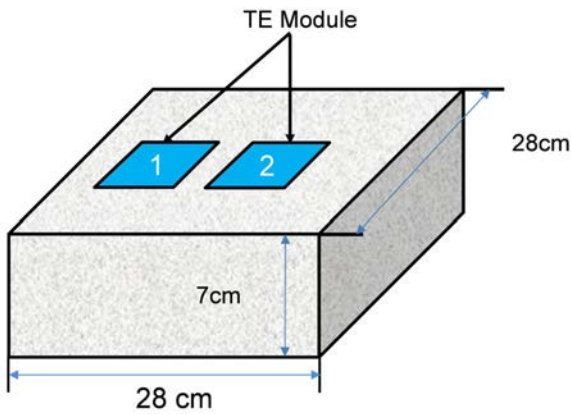
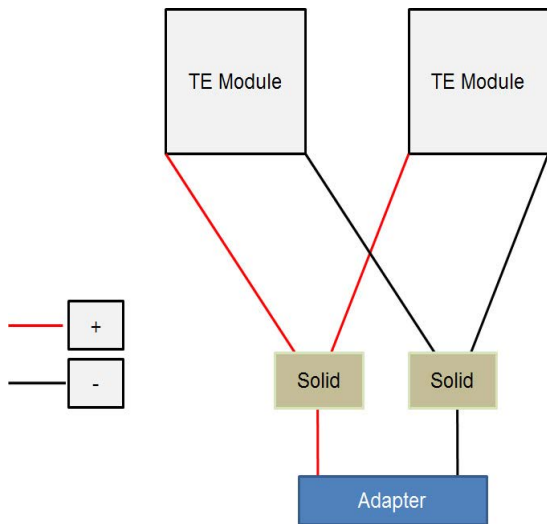
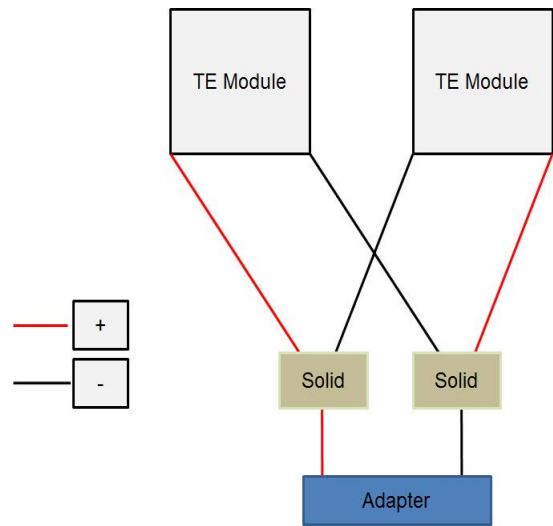


Fig. 7 Schematic Diagram of Test Setup

Fig. 8은 두 열전소자를 모르터르 시편위에 설치한 후 병렬과 직렬로 연결된 모식도를 나타내고 있다. 각각의 열전소자에서 나오는 (+)와 (-)를 납땜을 사용하여 연결한 후 데이터 logger에 연결하여 발생하는 전압을 측정하였다.



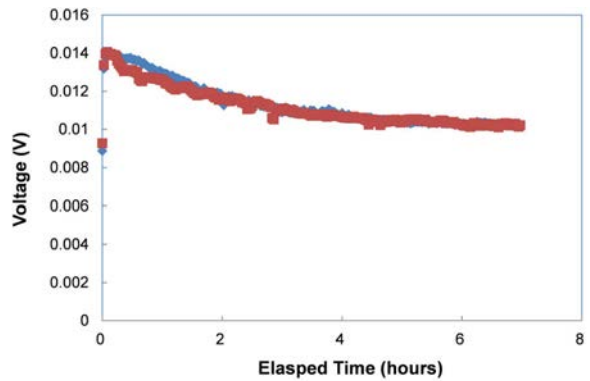
(a) Parallel circuit



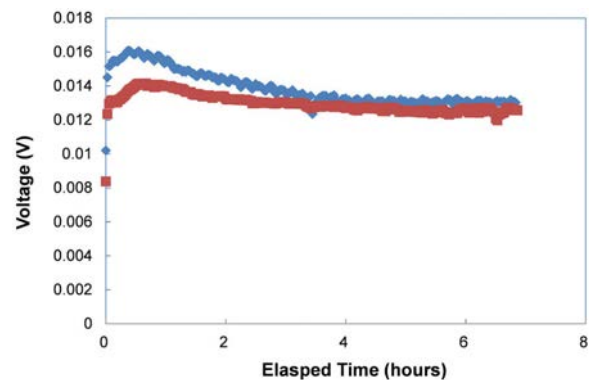
(b) Serial circuit

Fig. 8 Schematic Diagram of Different Circuits

Fig. 9는 연결방식에 따른 전력발생 특성을 설명해주고 있으며, 직렬과 병렬 연결방식에 따른 전력발생 특성이 다름을 쉽게 발견할 수 있었다. 병렬방식의 경우, 두 번의 테스트 결과에서 유사한 전압을 측정할 수 있었으며, 처음에 가장 높은 전압이 발생한 후 점점 발생량이



(a) Parallel circuit



(b) Serial circuit

Fig. 9 Generated Power as Changed Circuit Methods

감소함을 알 수 있었다. 직렬연결의 경우는 두 번의 측정치에서 다소 오차가 발생하였으나, 그 경향은 모두 일치하였다. 초기에는 전압발생량이 점차적으로 증가한 이후 최고치에 도달하고, 그 이후 전압발생량이 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 10은 전체 발생되는 전압량을 비교하기 위하여 발생전압을 모두 모아서 비교한 결과를 나타내고 있다. Fig. 10에서 설명하고 있는 것과 같이 직렬연결이 병렬연결보다 그 전압생성이 우수함을 알 수 있었다. 측정시간이 증가할수록 발생전압의 차이는 점차 벌어지는 경향을 관측할 수 있었다. 본 실험에서는 직렬연결이 병렬연결보다 더 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

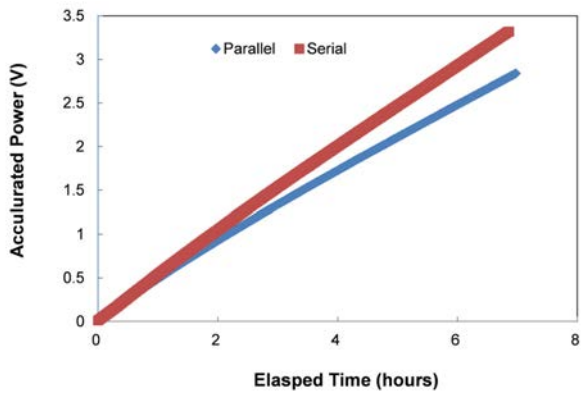


Fig. 10 Accumulated Power between Parallel and Serial

5.4. 겨울환경에서의 열전소자의 거동

우리나라는 사계절로 구분되어 있기 때문에 추운겨울철 환경에서의 열전소자의 발전거동을 조사하였다. 겨울철 온도환경을 모사하기 위하여 아이스박스에 공시체를 설치한 후, 드라이 아이스를 아이스박스 내부에 넣고 밀봉을 하여 공시체 주변의 온도를 낮추는 실험을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 11~Fig.13에 도식화하였다. Fig. 11은 공시체 표면온도와 아이스박스 내부의 공기온도를 설명해주고 있다. 드라이아이스 효과로 인하여 아이스박스 내부의 공기온도가 열전소자 표면온도보다 낮은 경향을 확인할 수 있었다. Fig. 12는 아이스박스 내부환경(추운겨울 환경조건)에서 발생된 열전소자의 발전거동을 나타내고 있다. Fig. 6과 Fig. 9에서 관측되었던 것과 같이 초기의 발전량이 크게 증가하였으며, 시간이 지나면서 발전량이 감소되는 경향을 나타내었다. 이는 열전소자의 윗면과 아랫면의 온도차이가 감소됨으로 인하여 발생된 것으로 판단된다. 또한, Fig. 6과 Fig. 9와 달리 Fig. 12의 발전전압이 (-)로 측정되었다. 이는

TE 열전소자의 윗면 온도가 TE 열전소자의 아랫면의 온도보다 크기 때문에 발전전압이 (-)로 측정되었다. Energy harvesting에서 발생된 전압의 (+) 와 (-)로 낮과 밤에 따라 다르게 측정되는 경우에 대해서는 전기 회로도 설계를 통하여 충분히 해결될 수 있다. 이처럼 대기온도가 차가운 경우에도 열전소자는 발전을 할 수 있기 때문에, 겨울철 또는 햇빛이 없는 경우에도 열전소자의 에너지 하베스팅이 가능할 것으로 판단된다. Fig. 13은 Fig. 12에서 발생된 전압을 누적한 결과를 나타내고 있다. 시간이 증가함에 따라서 발생되는 전압량이 크게 증가함을 알 수 있었으며, 할로겐 램프를 이용하여 열을 가하였을 때 발생된 전압보다 추운 환경하에서 발생된 전압이 더 큼을 알 수 있었다. 이는 추운환경 하에서의 열전소자의 발전효율이 개선됨을 설명하고 있다고 판단된다. 할로겐 램프를 이용하여 생산된 전력은 시간에 대하여 선형적인 거동을 나타내었으나, 차가운 대기 온도에서의 거동은 비선형 거동을 나타내고 있다. 이는 열전소자가 주변환경조건의 온도변화에 따라 발전전압 거동이 민감하게 변함을 알 수 있었다.

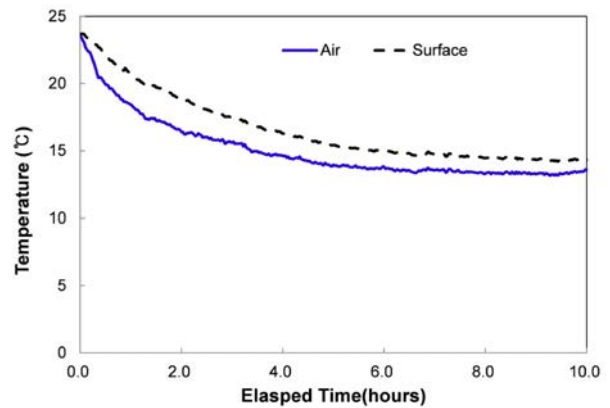


Fig. 11 Measured Temperature of Specimen Surface and Air Temperature

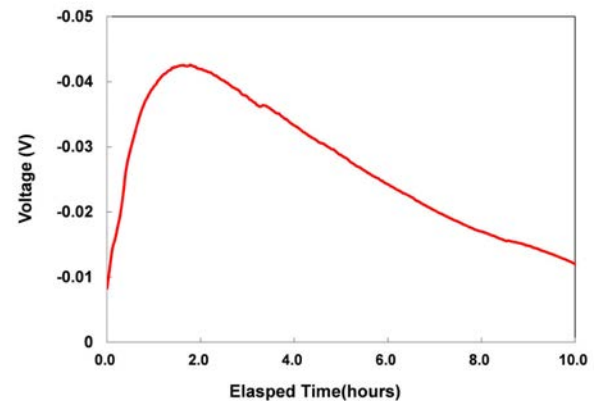


Fig. 12 Generated Voltage

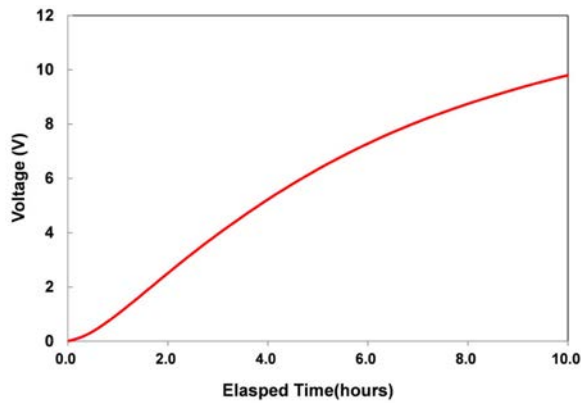


Fig. 13 Accumulated Generated Voltage

6. 결과

본 연구에서는 기존 도로의 개념을 물류이동수단이 아닌 신재생에너지 생산의 공간으로 활용하기 위한 방안을 제시하기 위하여 실험실 내에서 제한적으로 수행한 실험결과를 정리하였다.

본 연구에서는 도로구조물 중에서 콘크리트 구조물의 표면에 열전소자를 설치하였을 때 발전경향을 조사하였으며, 발전량은 적었으나 꾸준히 발생됨을 알 수 있었다. 이는 도로공간에서 열전소자를 설치하여 전력생산이 가능함을 증명해주는 결과라 판단된다.

1. 열전소자의 표면과 하부의 온도차이를 높이기 위하여 방열판을 사용한 경우 방열판을 사용하지 않은 경우보다 발전효과가 향상됨을 알 수 있었다.
2. 열전소자 여러 개를 연결할 경우 직렬과 병렬연결에 따른 전력생산을 비교한 결과 직렬연결의 경우 발전 효율이 다소 향상됨을 알 수 있었다.

3. 겨울철 도로공간에서 열전소자 설치에 따른 발전가능성 검증결과, 추운 환경에서도 열전소자의 발전이 가능함을 알 수 있었으며, 여름철 환경보다 겨울철 환경에서 전압생산이 높게 됨을 알 수 있었다. 이는 겨울철 환경에 열전소자를 적용하는 것이 더 효율적인 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이며,(No. 2014R1A1A1A1004577) 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Chun, H.W., and Jang, M.G., (2014) Market and Development Trend of Thermoelectric Materials, 2014 Electronics and Telecommunications Trends, pp.104-112
- Jo, Byungwan, Lee, Dukhee, Lee, Dongyoon, and Lee, Changsub, (2011) A study on the development of Green Road System for Heat Energy Harvesting, Journal of the Korean Society of Road Engineers, Vol. 13, pp. 87~96
- Wu, G & Yu, X., (2011). "Thermal Energy Harvesting Across Pavement Structure", Transportation Research Board (TRB), Annual Meeting, Washington, USA, January
- Wu, Guangxi and Yu, Xiong. (2012) Thermal Energy Harvesting System to Harvest Thermal Energy Across Pavement Structure, International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 5, No. 5
- Yildiz, F. and Coogler, K. L., (2014) Low power energy harvesting with Thermoelectric Generator through an Air Conditioning Condenser, 121st ASEE Annual Conference & Exposition, Indianapolis, IN, Paper ID. #10552
- Zadshakouyan, M., Shokrvash, H., and Qadamgahi, S.M., (2013) Temperature Control and Energy harvesting by a thermoelectric system, International Materials Physics Journal, Vol. 1 No. 2, pp.14-19