

열전소자 내부 층간 결함과 열성능 관계에 관한 연구

최철준*, 고가진**, 김재열***,#, 정윤수**

* 조선대학교 일반대학원 첨단부품소재공학과, ** 조선대학교 일반대학원 기계시스템공학과,
*** 조선대학교 기계시스템공학과

Research on the Relationship between Thermoelectric Module with Defects and Thermal Performances

Choul-Jun Choi*, Jia-Chen Gao**, Jae-Yeol Kim***,#, Yoon-Soo Jung**

* Dept. of Advanced Parts and Materials Engineering, Graduate School of Chosun UNIV.

** Dept. of Mechanical System Engineering, Graduate School of Chosun UNIV.

*** Dept. of Mechanical System Engineering, Chosun UNIV.

(Received 22 June 2016; received in revised form 27 July 2016; accepted 2 August 2016)

ABSTRACT

From the first application of a thermoelectric module to nowtoday, it has been more than half a century. The application of a thermoelectric module is becoming more and more widely accepted since, people's requirement rely more and more on the efficiency of thermoelectric modules and their reliability become higher and higher. So people pay more and more attention to the thermoelectric module. In Around the world, the more research for into improving the efficiency of thermoelectric modules is focused on the current materials. at present. However, the research of into available materials had has some limitations, and the research of materials had reached a bottleneckthere are limits to current applications. On the other hand, from the production process, if we assembled by materials withoutmodules without any damages and achieve the ideal state of a joint, we can make the a product to maximize performance and have a longer service life. SoTherefore, in this study we will prove the relationship between the any defects inside and the efficiency of a thermoelectric module to improve the quality management and performance of modern thermoelectric modules at present.

Key Words : Thermoelectric Module(열전소자), Defect(결함), Thermal Performances(열성능), Heat Sink(방열)

1. 서 론

현재 지구의 기후 변화는 화석연료의 급격한 사용과 산업화에 따른 에너지 수요 급증이 주원인이 되고 있으며 세계적으로 대체 에너지의 개발과 폐

에너지의 유효이용 등 향후 에너지 고갈에 대한 적극적인 대안이 요구되고 있다.

또한 최근에 에너지자원 고갈과 유가 급등, 다양한 에너지 수요증가에 따른 새로운 에너지자원의 확보를 위하여 폐열 에너지의 재활용과 기존 발전 시스템과의 복합화가 요구되고 있으며 산업 고도화에 따른 정밀 온도제어 및 친환경 냉각 기술의 수요가 급증하고 있다⁽¹⁾.

Corresponding Author : jykim@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7035, Fax: +82-62-230-7035

이러한 폐에너지의 재활용 및 냉각 기술에 부응할 수 있는 유력한 기술 중의 하나가 열전(Thermoelectric)변환 기술이다. 열전현상은 온도구배가 전위차를 형성하는 Seebeck현상과 전위차로 온도 구배를 야기하는 Peltier현상으로 구분한다. 즉, 열에너지를 전기에너지로, 전기에너지를 열에너지로 직접 변환하는 것이다⁽²⁾.

열전현상을 이용한 에너지 변화기술은 냉각/발전 방식에 비해서 환경/에너지 분야에 긍정적인 영향을 이끌어 낼 수 있는 중요한 기술로 큰 주목을 받고 있다.

열전변환의 성능은 열전성능 지수(Figure of Merit, ZT)로 나타내고, $ZT = \alpha^2 \sigma T / \kappa$ 로 표현된다. 일반적으로 열전성능지수는 제벡계수가 클수록, 전기전도도가 우수할수록, 열전도도가 낮을수록 높게 되어 에너지 변환 효율이 향상된다. 그러나 일반적으로 열전도도와 전기전도도는 동일한 거동을 나타내므로 열전도도와 전기전도도의 특성을 동시에 제어하는 것이 불가능해 열전특성의 향상에 한계가 있다. 즉 기존의 마이크로한 결정립을 갖는 소재로는 나노미터 파장을 갖는 전하의 이동과 포논(Phonon)의 이동을 동시에 제어해 원하는 열/전기적 특성을 확보하는데 어려움이 있다. 나노구조 열전 재료의 개발로 이 한계를 돌파하지만 현재 열전 나노분말의 불순물 첨가문제, 극미세 나노분말 제조의 어려움 등으로 대량생산이 쉽지 않는 현실이다⁽³⁾.

상용화 된 열전소자는 여러 개의 p형, n형 열전소재 펠릿들을 전기적으로는 직렬로, 열적으로는 병렬로 조립한다. 이러한 열전소자는 제조방법이 용이하고 안정적인 열전성능 및 높은 구동 신뢰성 등의 이점을 가지고 있다⁽⁴⁾. 단, 제작과정 중 열전소자 내부 p형, n형 열전소재와 전도체 등의 접합시 결함이 발생할 수 있다. 내부 결함은 열전소자의 성능, 수명 등에 큰 영향을 미친다.

한편, 열전소자의 성능향상을 위한 기술개발 부분에 다양한 노력이 이루어지고 있는데 주로 높은 열전효과를 얻기 위한 소재 개발에 집중되고 있다. 하지만 열전재료의 불순물 첨가문제, 극미세 나노

분말 제조의 어려움, 열전재료의 가격문제 등으로 성능향상이 어려운 실정이다. 같은 열전재료로 같은 공정으로 제작하여도 성능이 분명히 동일하지 않으며, 열전소자 내부간 각 부분의 접합상태가 일정하지 않다.

본 연구에서는 위와 같은 문제점을 검증하기 위해 정밀한 열전소자의 제조 품질관리 및 성능 향상을 위한 냉각용 열전소자의 내부 층간 결합과 열성능의 관계 분석을 수행하였다.

2. 이론배경

2.1 열전소자의 열성능 기초 이론

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 p형과 n형 반도체를 조합한 소자에 전류를 흘리면, Peltier 효과를 이용한 열전냉각장치는 전기에너지를 직접 냉각에 이용하는 방식으로 n형과 p형 두 반도체를 접합하여 제작된 열전소자에 전위차를 주게 되면 냉각대상에 접한 접점 (저온접점, 냉각면)의 온도는 감소하고 반대편 접점 (고온접점, 열방출면)의 온도는 증가한다⁽⁵⁾.

저온 접합부에서 제거되는 열의 양 Q_{cool} 는 Peltier 효과에 의한 것에 Joule 열에 의하여 발생하는 열의 반의 저온부로 흘러들어오는 것과 고온부와 저온부의 온도차에 의한 열전도성 열전달량을 감하고 Thomson효과를 무시한다면 저온부의 흡열량 Q_{cool} 는 식(1)과 같다.

$$Q_{cool} = \alpha T_{cool} I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T \quad (1)$$

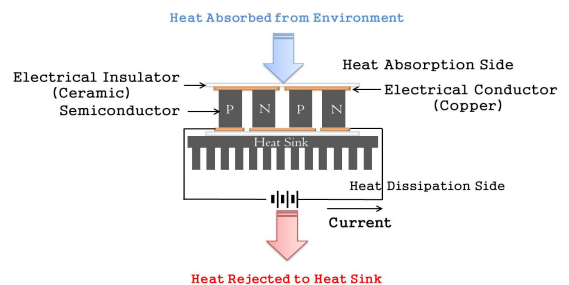


Fig. 1 Schematic diagram of thermoelectric cooling

여기서, α : Seebeck계수

R : 열전소자의 내부 저항

I : 열전소자로 흐르는 전류의 세기

K : 열전도도

T_{cool} : 저온부 온도

$$COP_{max} = \frac{T_c}{\Delta T} \left[\frac{\sqrt{(1+ZT_{ave})} - \frac{T_{hot}}{T_{cool}}}{\sqrt{(1+ZT_{ave})} + 1} \right] \quad (6)$$

$$= \frac{T_{ave}}{\Delta T} \left[\frac{\sqrt{(1+ZT_{ave})} - 1}{\sqrt{(1+ZT_{ave})} + 1} \right] - \frac{1}{2}$$

그러므로 고온부의 발열량 Q_{hot} 는 식(2)과 같다.

$$Q_{hot} = \alpha T_{hot} I + \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T \quad (2)$$

또한 열전소자에 적용되는 전압 V 는 저항에 의한 것과 Seebeck 효과로 인한 것의 합으로 나타나면 식(3)으로 표현 된다.

$$V = IR + \alpha \Delta T \quad (3)$$

이때 열전소자에 실제 입력은 아래식과 같다.

$$P = IV = I^2 R + \alpha I \Delta T \quad (4)$$

열전소자의 성적계수($C.O.P$)를 열전소자에 입력 P 에 대한 저온부에서의 열흡수율 Q_{cool} 로 정의하면 아래 식과 같다.

$$COP = \frac{\text{cooling power}}{\text{input power}} = \frac{Q_{cool}}{P} \quad (5)$$

$$= \frac{\alpha T_{cool} I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T}{\alpha I \Delta T + I^2 R}$$

전류의 양이 증가함에 따라 Joule 열의 효과가 증가하기 때문에 성적계수가 증가하다가 감소한다. 따라서 최대의 성능계수가 존재하며 이를 구하면 식(6)과 같다.

여기서 $T_{ave} : \frac{1}{2}(T_{hot} + T_{cool})$

Z : 성능 지수

식(1)로 통해 $dQ_{cool}/dI=0$ 시 계산하면 최대 냉각량 Q_{cmax} 와 I_{max} 을 아래와 같이 구한다.

$$I_{max} = \frac{\alpha T_c}{R} \quad (7)$$

$$Q_{cmax} = \frac{(\alpha T_c)^2}{2R} - K \Delta T \quad (8)$$

식(8)에서 보이듯이 $Q_{cmax}=0$ 일 때 온도차가 최대로 도달 할 수 있으며 이때의 온도차 ΔT_{max} 는 아래 식과 같이 표현될 수 있다⁽⁷⁻¹²⁾.

$$\Delta T_{max} = \frac{\alpha^2 T_c^2}{2RK} = \frac{1}{2} Z T_c^2 \quad (9)$$

3. 실험장치 및 방법

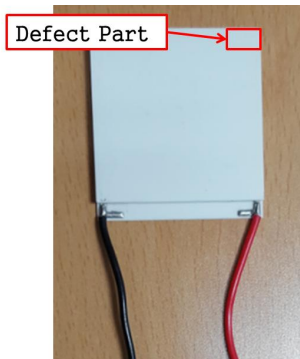
3.1 시험편 준비

본 연구에 적용한 열전소자는 구조를 쉽게 파악할 수 있는 일본 Z사 제조된 애플시 실링이 없는 냉각용 열전소자 199모델이며, 구조는 일반 열전냉각소자와 같다. 열전소자의 기본 제원은 Table 1과 같다.

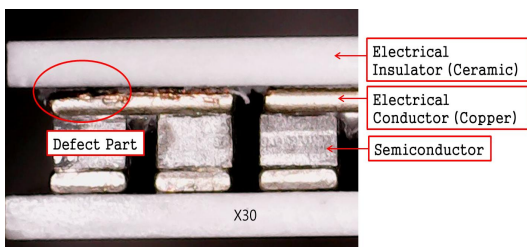
시험편은 양품 시편A, B 인공결함 있는 시편 C 로 구분한다. 양품 A, B는 출하 검사 합격으로 판정된 199모델 제품이다. 단, 시편C는 같은 시험편에 인공결함을 만들고 전후의 온도 데이터를 비교하기 위해 시험편A의 온도측정 완료 후 시험편A를 이용

Table 1 Performance specifications of thermoelectric module

Specifications	Value
Size	40 × 40 × 3.2 [mm]
I_{max}	11.5 [A]
V_{max}	24.6 [V]
ΔT_{max}	70 [°C]



(a) Photograph of specimen C



(b) Photograph of defect part by digital microscope

Fig. 2 Thermoelectric module specimen C and defect part

하여 내부 전도체와 세라믹의 접합부분에 들뜸 결함을 인공적으로 만들었다. 결함의 위치는 전자 현미경로 관찰 하며 Fig. 2와 같이 보여 주고 있다.

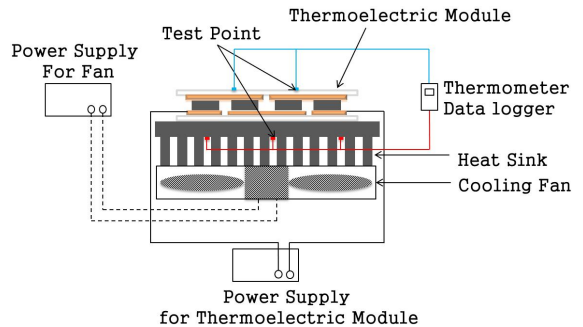


Fig. 3 Schematic diagram

3.2 실험 구성 및 실험 방법

열전소자 작동 시 ΔT 을 측정하기 위해 열전소자와 Heat Sink등을 조립하였고 Fig. 3과 같이 구성하여 실험을 수행하였다. 열전소자 냉각 표면 온도와 Heat Sink부의 온도를 Thermometer Data Logger로 수집하고 ΔT 을 구한다. 이를 통해 ΔT 을 비교하였으며 열전소자 내부의 결함은 열전냉각성능에 영향을 미치는 정도를 확인 할 수 있다.

Fig. 3은 냉각성능실험 구성을 보여주는 것으로, 열전소자(Thermoelectric module), 방열판(Heat Sink)과 냉각팬(Cooling Fan), 전원 공급 장치, 온도 측정 장치로 구성 되어있다.

열전소자 발열부에서 발생하는 열을 제어하지 못하면 열이 열전소자 내부로 전도되어 소자가 파괴 될 문제가 있어 열전소자 발열부의 온도제어는 매우 중요하며 이를 위해 방열판(Heat sink)과 냉각팬(Cooling fan)을 사용하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이, 방열판의 기본 제원은 Table 2에 정리하여 나타내었다. 방열판(Heat Sink)은 열전소자의 발열부에서 발생하는 열을 방열판 전체로 분산시켜 발열부의 냉각이 더 쉽게 이루어지도록 하기 위하여 열전소자와 Heat Sink 사이에 Grease를 도포하고 방열판에 장착하였다.

냉각팬은 열전소자 발열부의 냉각을 향상시키고 발열부의 온도를 일정하게 유지하기 위해 부착하였으며, 이러한 발열부 제어를 통해 열전소자 냉각부의 온도를 일정하게 유지시켜 측정부위에 냉각영역을 형성할 수 있도록 하였다. Fig. 4와 같이 Heat

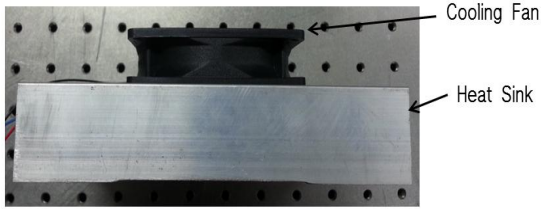


Fig. 4 Photograph of cooling fan and heat sink Assy

Table 2 Performance specifications of Heat Sink

Specifications	Value
Size	170×170×35[mm]
Material	Al-alloy
Type	Fin

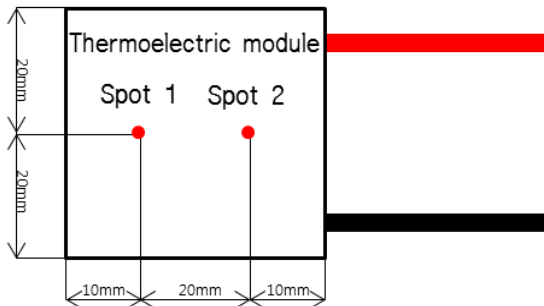


Fig. 5 Schematic diagram of temperature measurement points (Cold Side)

Sink과 Cooling fan(12 V, 0.25 A)의 실제 조립 형상을 보여주고 있다.

열전소자에 공급되는 전압은 열전소자의 최대허용전압 보다 낮은 12 V로 설정하였다. 이는 열전소자 방열부에서 급속하게 발생하는 열이 열전소자에 미치는 영향을 최소화하고, 또한 일정하게 최저 온도를 유지하기 위하여 직류 전원 공급 장치를 통해 12 V정전압을 열전소자에 공급하였다.

온도 측정 및 수집 장치는 YOKOGAWA사 XL100모델 Thermometer Data logger를 사용하였으며, 냉각면과 방열면의 온도를 정확하게 측정하기

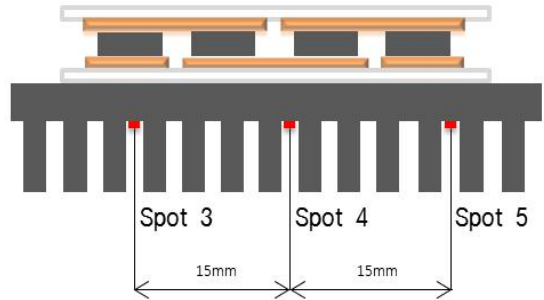


Fig. 6 Schematic diagram of temperature measurement points (Hot Side)

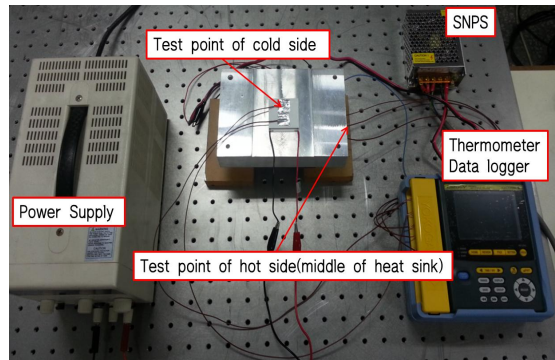


Fig. 7 Photograph of experiment apparatus

위해 측정 Point를 여러 위치로 선정 하였으며 열전소자 냉각면의 온도를 측정하기 위해 Fig. 5와 같이 두 Point로 선정하였고 열전소자 방열면의 온도를 측정하기 위해 Fig. 6과 같이 방열판에 셋 Point로 선정하였다. 온도 측정 부위에 온도센서를 붙여 넣었으며 Fig. 7은 실험의 실제 구성을 보여주고 있다.

실험 시 열전소자 방열부의 열을 빠른 시간에 방출시키기 위해 Cooling Fan을 먼저 작동시키고 10 초 후에 열전소자에 전압을 인가하고 작동 시켰으며 Thermometer Data logger로 온도 측정 및 초당 단위로 데이터를 수집하였다. Thermometer Data logger를 통해 냉각면과 방열면 온도를 일정한 수준으로 유지 할 때 까지 온도를 기록하였으며 시험편 A, B는 같은 측정 방법으로 측정하고 데이터를 수집하였다. 시험편 A, B 측정 완료 후 시험편 A를

이용하여 인공결합을 주었고 인공결합 시험편C를 제작 하였다. 시험편C는 위와 같은 측정 방법으로 측정하고 데이터를 수집하였다.

4. 실험결과

4.1 온도 측정 실험 결과

열전소자에 전압을 공급하면 열전현상(Peltier effect)에 의해 한쪽 면에서는 발열이 다른 한쪽 면에서는 냉각이 일어나게 된다. 열전소자의 발열이 일어나는 발열부에서 급속하게 발생하는 고온의 열원을 제어하기 위해 방열판과 냉각팬을 사용하였으며, 이러한 방열판과 냉각팬에 의해 발열부에서 발생하는 열원을 일정하게 유지시켜 줌으로써, 열전소자의 다른 한쪽 면에 냉각면이 형성됨과 동시에 일정한 냉각영역을 이루는 열전달 프로세스가 형성된다.

온도 측정 데이터는 실험 시작부터 일정한 온도 유지 할 때 까지 약 300초 동안 수집 하였다. Fig. 8은 시편 A, B, C에 12V의 정전압을 공급하고 냉각팬에 12V의 전압을 공급하였을 경우 냉각면에 있는 측정 포인트 Spot1, Spot2, 그리고 방열면에 부착한 측정 포인트 Spot3, Spot4, Spot5 일정한 온도 유지될 때 까지 약 300초 동안의 온도 측정결과를 나타나고 있다.

Fig. 8에 시편 A, B, C의 온도 측정 결과에서 보는 바와 같이, 열전소자를 작동 시킨 후 단시간에 냉각면 온도가 급격하게 낮아졌으며 방열면 온도가 상승 하였다. 약 100초 이후부터는 냉각면과 방열면의 온도가 일정하게 유지되었다.

열전소자의 발열부에서 발생하는 고온의 열원을 제어하기 위해 사용한 방열판과 냉각팬에 의해 발열부가 일정한 온도로 유지되며, 열전소자의 발열부에서 발생한 열원의 일부가 열전소자 내부를 구성하는 반도체와 열전소자의 표면재료인 세라믹을 통해 열전소자의 냉각부로 전도 되면서 발열부와 냉각부 사이의 열교환에 의한 열적평형 상태가 구성되어 열전달 프로세스가 형성되며, 이로 인해 열전소자의 방열면과 냉각면에서 급격하게 온도가 변동하다가 일정시간 이후 온도가 일정하게 유지되는

것이다.

또한 같은 시험편의 방열면과 냉각면에서 측정위치에 따라 온도변화가 같지 않는 것을 알 수 있었다. Fig. 8(a)은 보는 바와 같이 시험편 A를 일정한 온도로 유지한 후에 방열면과 냉각면에 있는 측정 포인트 온도를 비교해보면 약 1°C의 온도차를 확인할 수 있었다. 시험편 B의 냉각면에 약 4°C의 온도차를 확인할 수 있었다. 시험편 C의 냉각면에 약 2°C의 온도차를 확인할 수 있었으며 ΔT 비교 분석 시 오차를 최소화시키기 위해 방열면과 냉각면의 온도는 지정된 측정 포인트에 측정된 온도의 평균값으로 계산하고 비교 하였다.

수집한 데이터는 평균값으로 계산하여 냉각면과 방열면의 추산온도 값을 얻을 수 있다. Fig. 9는 열전소자 시험편 A, B에 12V의 정전압을 공급하고 냉각팬에 12V의 전압을 공급하였을 경우, 냉각면에서 발생하는 평균 온도값 및 방열면에서 발생하는 평균온도값을 정리한 결과이다.

Fig. 9를 통해 시험편A 작동시킨 후 냉각면에 약 20초 동안 급격하게 온도가 낮아졌으며 최저온도는 약 -11°C에 도달되고 이때 방열면의 최고온도는 31.1°C에 도달하였으며 약 200초 이후 -5.8°C에 유지 하였고 이때 방열면의 최고 온도는 37.4°C에 도달 하였다. 시험편B의 냉각면에 약 20초 동안 급격하게 온도가 낮아졌으며 최저온도는 약 -10.4°C에 도달되고 이때 방열면의 최고온도는 30.3°C에 도달 되었다. 약 200초 이후 -4.4°C에 유지 되었고 이때 방열면의 최고 온도는 38.1°C에 도달 되었다.

시험편 A, B는 같은 양품으로써 동일 실험 조건에서 냉각면의 최저온도는 약 0.6°C 차이가 있고 이때의 방열면의 최고 온도는 약 0.8°C차이가 있는 것을 확인 하였다. 이를 통해 같은 재료로 같은 공정에서 제작된 열전소자를 작동 시 온도변화 차이가 있는 것을 추측 할 수 있다.

Fig. 10은 열전소자 시험편 A, C에 12V의 정전압을 공급하고 냉각팬에 12V의 전압을 공급했을 경우, 냉각면에서 발생하는 온도 평균값 및 방열면에서 발생하는 온도평균값을 정리한 결과이다.

Fig. 10을 통해 시험편C를 작동시킨 후 냉각면에 약 20초 동안 급격하게 온도가 낮아졌으며 최저온도는 약 -10.3°C에 도달되고 이때 방열면의 최고온

도는 30.1°C에 도달 되었으며 약 200초 이후 -4.1°C에 유지 하였고 이때 방열면의 최고 온도는 37.2°C에 도달 되었다.

인공결합을 만든 전/후 즉 시험편A, C의 온도 변화를 비교 해보면 시험편A보다 시험편C의 냉각면 최저온도는 0.7°C 떨어지는 것을 확인 할 수 있다.

4.2 온도차 비교분석 결과

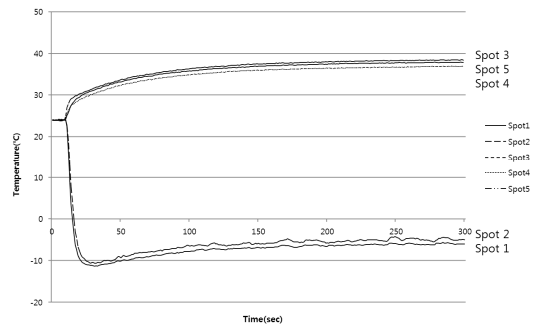
수집된 온도변화 데이터를 이용하여 온도차 계산 공식 $\Delta T = |T_h| + |T_c|$ 로 계산 정리하고 Fig.11은 시험편A, B의 온도차 ΔT 변화 결과를 나타낸다.

Fig. 11을 통해 시험편A, B를 작동 시킨 후 약 15초 동안 급격하게 온도차가 낮아진 후에 다시 증가하였다. 이는 열전소자 냉각면의 온도가 떨어지는 것에 따라서 ΔT 가 감소하는 것이다. 시험편A의 경우 약 50초 후에 ΔT 는 42.8°C까지 도달하였고 계속 42.8°C를 유지 하였다. 시험편B의 경우 약 80초 후에 ΔT 는 42.3°C까지 도달하였고 계속 유지 하였다.

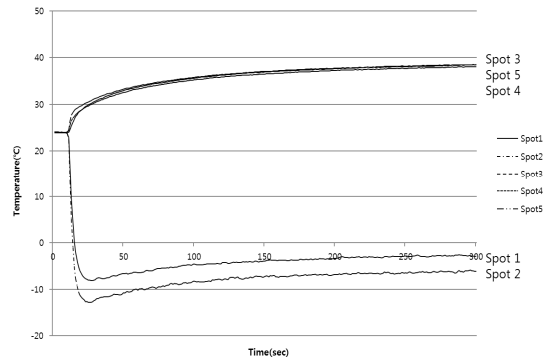
이를 통해 같은 재료로 제작된 열전소자의 ΔT 가 약 0.5°C의 차이가 있는 것을 확인 되었으며, 이는 열전효율에 성능이 차이가 있다고 볼 수 있다. ΔT 차이의 근본원인은 식(9)을 통해 재료의 성능지수에 관련이 있기 때문이다.

Fig. 12는 시험편 A와 시험편 C의 온도차변화 결과를 나타낸다. Fig. 12를 통해 시험편C를 작동 시킨 후 시험편 A와 같이 약 15초 동안 급격하게 온도차가 낮아진 후에 다시 증가하였다. 약 50초 후에 ΔT 는 41°C까지 도달하였고 41°C를 계속 유지 하였다.

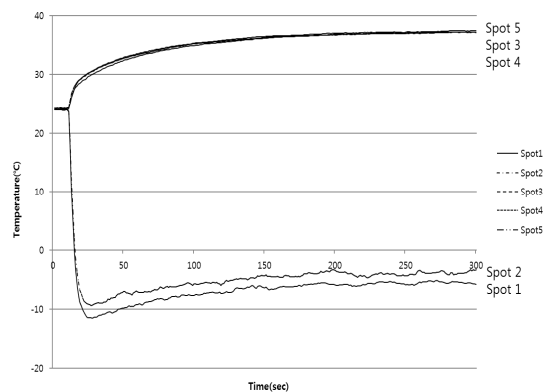
인공결합을 만들기 전에 시험편 A의 ΔT 을 비교 해보면 약 1.8°C, 4%정도 떨어진다는 것을 확인 할 수 있다. 이는 열전소자 내부의 결합이 열전소자의 성능에 영향을 미친다고 판단된다.



(a) Temperature distribution of specimen A



(b) Temperature distribution of specimen B



(c) Temperature distribution of specimen C

Fig. 8 Temperature distribution of specimen A, B, C

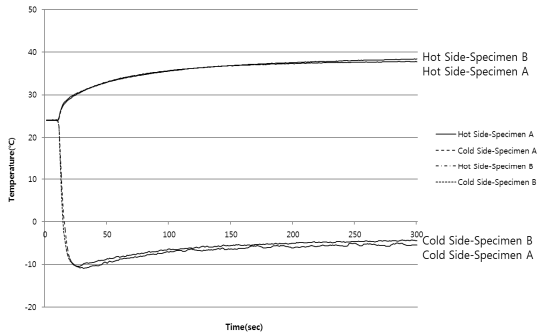


Fig. 9 Temperature distribution of specimen A, B

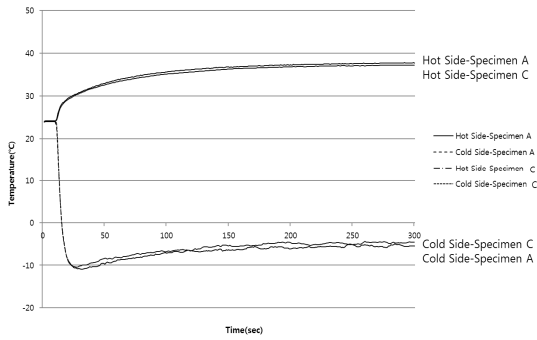


Fig. 10 Temperature distribution of specimen A, C

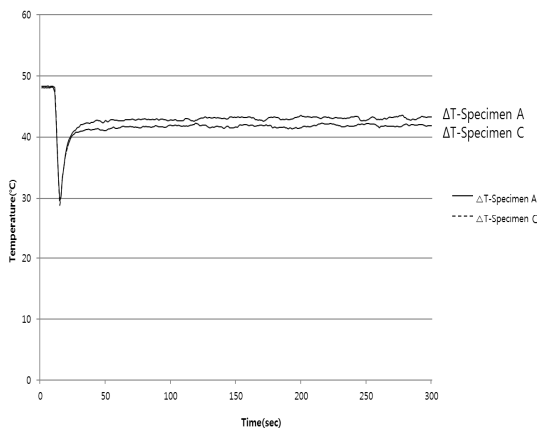


Fig. 11 Temperature differential distribution of specimen A, B

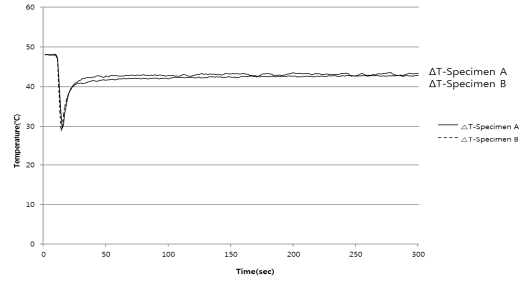


Fig. 12 Temperature differential distribution of specimen A, C

5. 결론

본 연구에서는 열전소자의 성능과 내부 접합상태의 관계를 검증 하였다. 열전소자의 성능분석을 위한 서머커플을 이용한 표면온도 분석을 수행 하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같이 내릴 수 있었다.

1. 같은 재료로 같은 공정에서 제작된 열전소자의 성능 실험 수행 시 냉각부 최저온도는 약 0.6°C 정도 차이가 있고 온도차 ΔT 값은 약 0.5°C 차이가 있다는 것을 확인 하였다.
2. 인공결함을 만들기 전후의 성능 비교 실험에 따라 결함이 없는 열전소자와 결함이 있는 소자는 같은 실험 조건에서 가동하고 온도를 측정 하면 인공결함이 있는 열전소자보다 인공결함이 없는 열전소자의 냉각부 최저온도는 약 0.7°C 정도 낮고 온도차 ΔT 값은 약 0.8°C 높다. 따라서 열전소자 내부 접합 결함은 열전소자의 성능에 영향을 미친다는 것을 확인 하였다.
3. 열전소자의 성능에 영향이 있는 내부 결함을 최소화 시키고 열전소자의 성능, 품질, 신뢰성에 대한 도움 될 수 있으며 폐에너지 활용, 환경문제에 크게 기여 할 수 있고, 산업발전의 고도화에 요구를 부흥하며 열전소자 분야의 발전에 도움 될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역 혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (2014H1C1A1066959).

REFERENCES

1. Ioffe, A. F., "Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling" Inforsearch Ltd. London, 1957.
2. Majumdar, A., "Thermoelectricity in semiconductor nano structures", Science, Vol. 303, No. 5659, pp. 777-778, 2004.
3. Hicks, L. D. and Dresselhaus, M. S., "Thermoelectric figure of merit of a one-dimensional conductor", Physical Review B, Vol. 47, No. 24, pp. 16631-16634, 1993.
4. Ro, S. T. and Seo, J. S., "Principles of Thermoelectric Refrigeration and System Design", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 135-145, 1990.
5. Lee, J. K., "Study on Optimization for Heating System of Sequential Feed-Type Mobile Smart Device Cover Glass Molding Machine", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 5, pp. 75-80, 2015.
6. Nolas, G. S., Sharp, J. and Goldsmid, H. J., Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments, Springer, 2001.
7. Kwon, H. H., "Development of Hybrid Composite Die for the Production of the Supercapacitor", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 1, pp. 105-110, 2015.
8. Kim, S. T., Lee, S. J. and Choi, Y. H., "Thermal Characteristics Analysis of a High Speed Spindle System by Using FSI Method", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 3, pp. 83-88, 2014.
9. Cho, Y. T., Lee, Ch. H., "Performance Evaluation of Heat Radiant for 50W LED by the CNT Thermal Interface Material", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13 No. 6, pp. 23~29, 2014.
10. Yun, S. U., Kim, J. Y., Choi, S. H. and Kim, H. W., "Inspection System of Coating Layers by Thermal Behavior Effect", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13 No. 6, pp. 1~7, 2014.