

고효율 열전소재 2%Na-PbTe 의 소자화에 관한 연구

Study on Metalizing 2% Na-PbTe for Thermoelectric Device

김훈*, 강찬영*, 황준필*, 김우철†

Hoon Kim, Chanyoung Kang, Junphil Hwang and Woorchul Kim

(2014년 9월 14일 접수; 2014년 9월 19일 심사완료; 2014년 9월 23일 게재확정)

Abstract

Heat emission from the laser diode used in the optical disc drive and the defects from the increased temperature at the system have attracted attentions from the field of the information storage device. Thermoelectric refrigerator is one of the fine solutions to solve these thermal problems. The refrigeration performance of thermoelectric device is dependent on the thermoelectric material's figure-of-merit. Meanwhile, high electrical contact resistivity between metal electrode and p- and n-type thermoelectric materials in the device would lead increased total electrical resistance resulting in the degeneracy in performance. This paper represents the manufacturing process of the PbTe-based material which has one of the highest figure-of-merit at medium-high-temperature, ~ 600K to 900 K, and the nickel contact layer for reduced electrical contact resistance at once, and the results showing the decent contact structure and figure-of-merit even after the long-term operation environment.

Key Words : Thermoelectric Material(열전소재), Electrical Contact Resistivity(전기적 접촉 저항), Metal Contact Layer(금속 접합층).

기호설명

S : 제백 상수 [$\mu\text{V/K}$]
 σ : 전기 전도도 [S/m]
 k : 열 전도도 [W/m-K]
 T : 절대온도 [K]
 zT : 열전소재의 열전성능지수
 ZT : 열전소자의 유효 열전성능지수
 R_c : 전기적 접촉 저항 [Ω]
 A : 열전소재의 단면적 [m^2]
 D : 확산 계수 [cm^2/sec]

1. 서론

1.1 광 디스크 드라이브의 냉각 기술

정보 저장 기기 중의 하나인 광 디스크 드라이브(ODD)의 경우 기록 용량과 재생 속도의 향상을 위해서 회전 속도를 증가시키려는 연구가 지속되고 있는데, 이는 드라이브 내부의 주요 부품들의 발열 문제를 일으키고 있다. 또한 마이크로 사이즈로 미세 신호의 고속 리딩이 가능하고 고효율로 유기막을 변색시켜 신호를 입력할 수 있는 Laser Diode(LD)가 ODD 에 많이 쓰이고 있는데, 이 또한 발열이 문제가 되고 있다. LD 의 발열은 일정한 출력을 전달할 수 없게 하여 ODD 의 기록 및 리딩을 저해하는 요소가 된다. 이에 LD 에 방열판을 부착하는 방식[1]이나, ODD 내부 설계 제어[2] 및 유동해석[3-5]을 통해 LD 의 온도를 낮추는 방식이 연구되고 있다. 또한 보다 능동적인 방식으로 냉각 열전소자를 이용하여 온도를 제어하려는 연구가 시도되고 있다.[6] 본 연구에서는 히

† School of Mechanical Engineering, Yonsei University
 E-mail : woorchul@yonsei.ac.kr
 TEL : (02)2123-5816

* School of Mechanical Engineering, Yonsei University

트 싱크와 같은 수동적인 방열 시스템을 벗어나 능동적으로 LD의 발열 및 방열을 제어할 수 있는 냉각 열전소자를 개발함에 있어서 가장 중요한 열전소재-금속 전극 접합 부분의 설계 및 제작에 대해 다루고 있다. 열전소자를 제작함에 있어 가장 중요한 두 가지 요소는 첫째는 높은 열전성능 지수를 갖는 소재이고 둘째로 전기접촉저항을 최소화 하는 것이다. 현재 고효율의 열전소재에 대한 연구는 활발히 진행되었다. 그러나 그 물성을 유지하면서 저저항의 금속접합층을 제작하기 위해서는 소재의 합성조건과 금속접합층 합성조건이 일치해야 하는데 기존의 연구에서는 이를 이루기가 쉽지 않아 실제 고효율의 열전소재를 소자화시키는 것에 어려움이 많았다. 따라서 본 연구에서는 최근 연구된 높은 에너지 변환성을 지닌 Na-PbTe[7]의 열전변환효율을 유지하면서 접합층 형성이 가능한 금속 전극 및 접합층의 소재와 합성방법에 대해 소개하고자 한다.

1.2 열전소자와 전기적 접촉 저항

열전현상(Thermoelectric Phenomena)이란 고체 내에서 열을 전기로, 혹은 전기를 열로 직접 변환할 수 있는 것으로, 이를 이용하여 만든 열전소자가 차세대 에너지 변환 장치 중의 하나로 각광받고 있다[8]. 열전소자를 열이 발생하는 표면에 설치하였을 때 열전소재의 양단에 걸리는 온도 차이가 제백 효과(Seebeck Effect)를 생성해 전력 생산에 필요한 기전력을 발생시키는 열전 발전장치를 구성할 수 있다. 또한 열전소자에 전류를 흘려 펠티어 효과(Peltier Effect)를 유도하여 필요한 부분을 능동적으로 냉각시킬 수 있는 열전 냉각장치도 구성이 가능하다. 이러한 열전소자의 발전 혹은 냉각 성능은 열전소자를 이루는 열전소재의 열전 물성치에 크게 좌우하게 되는데, 대표적으로 열전성능지수(Thermoelectric Figure-of-Merit, zT)(식(1))를 사용하여 열전소재의 우수성을 판단한다.

$$zT = \frac{S^2 \sigma}{k} T \quad (1)$$

이 때 S, σ, k 그리고 T는 각각 열전소재의 제백 상수, 전기 전도도, 열 전도도, 그리고 소재의 절대온도를 의미한다. 일반적으로 열전소자는 제백 상수가 양수인 p형 열전소재와 음수인 n형 열전소재를 사용하여 구성이 되는데, 사용되는 모든 p

형 및 n형 열전소재의 발전 시 기전력, 또는 냉각 시 펠티어 열 흐름을 원하는 방향으로 모으기 위해 열적으로는 병렬로, 전기적으로는 직렬로 p형 및 n형 열전소재를 연결한다.

열전소재를 전기적으로 직렬 연결을 하기 위해서는 열전소재 이외에 금속 전극을 사용하여 p형 및 n형 열전소재를 연결하게 된다. 이 때 열전소재의 반도체 특성 및 물리적인 접합 문제로 인해 열전소재와 금속 전극 사이에 전기적 접촉 저항이 형성된다[9]. 이로 인해 열전소자가 높은 성능을 내기 위해서는 열전소자 전체의 전기 저항이 낮아야 함에도, 식(2)에서 보듯이 열전소재와 금속 전극 사이의 전기적 접촉 저항 R_c에 의해 열전소자의 유효 열전성능지수(zT)는 열전소재의 열전성능지수(zT)의 조합에 비해 낮아지게 된다[10, 11].

$$zT = \frac{(S_p - S_n)^2 T}{(k_p A_p + k_n A_n) \left(\frac{1}{\sigma_p A_p} + \frac{1}{\sigma_n A_n} + R_c \right)} \quad (2)$$

따라서 열전소재를 이용하여 최종적으로 열전소자를 구성하게 될 경우 열전소재와 금속 전극과의 전기적 접촉 저항을 최대한 줄여야 열전소재의 원래의 열전성능지수에 해당하는 열전소자 성능을 얻을 수 있다.

열전소자에서 열전소재와 금속 전극의 전기적 접촉 저항을 감소시키기 위한 방법 중의 하나로 열전소재의 양단에 금속 접합층을 생성할 수 있다. 하지만 최대의 열전성능지수를 낼 수 있는 열전소재를 합성하는 방법과 금속 접합층을 우수한 물질로 제작할 때 공정 시 온도 및 압력 등이 다르다면, 특정 열전소재가 가질 수 있는 최대의 열전성능지수를 가지지 못하는 문제가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위해서 최적의 효율을 내는 열전소재를 합성하는 조건으로 금속층과 열전소재를 동시에 합성하는 방법 (one step synthesis method)에 대해서 연구를 한 결과와 같이 제시하고자 한다 (Fig. 1).

1.3 PbTe 계열 열전소재와 금속 접합층

열전소재는 종류에 따라 최대의 성능, 즉 최대의 열전성능지수를 지니는 온도 범위가 존재한다. PbTe 계열의 열전소재[12, 13]는 약 700 K의 중온 영역에서 높은 열전성능지수를 보이는 물질로서, 우주 산업이나 자동차 산업에서 발전용 열전소자의

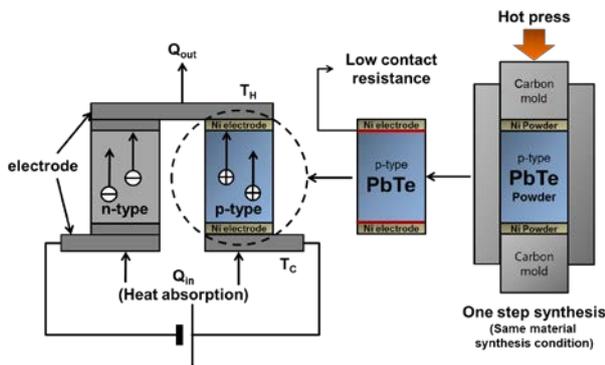


Fig. 1 Schematic of thermoelectric device (left side) and one step thermoelectric material-electrode synthesis method (right side).

물질로 주로 사용되고 있다[14, 15]. PbTe 의 높은 열전성능지수를 최대한 활용하기 위해서는 열전소자를 구성할 때 금속 전극과의 접합층의 물질 선택이 매우 중요하다. 접합층이 열전소자로 사용할 수 있을 만큼 구조적으로 안정적이어야 하며 전기적 접촉 저항이 낮고 또한 접합층의 물질이 열전소재로 침투하여 열전소재의 열전 성능을 저하시키지 않아야 한다[16]. PbTe 와 금속 전극과의 접합층은 일반적으로 Spark Plasma Sintering 공정을 통한 Fe/PbTe 소결체를 사용해왔는데 두 물질의 열팽창계수의 차이가 커 접합층의 구조가 안정적이지 않아 스피링-피스톤 시스템[17] 등의 이를 해결할 수 있는 방법이 계속해서 제시되어 왔다.

Singh 등[18]은 PbTe 와 Fe 을 Hot-Press 공정을 통해 동시에 소결하였는데 PbTe 와 Fe 분말 사이에 PbTe 와 Fe 를 약 50:50 으로 섞은 분말 층을 첨가하여 열전소재를 제작한 바가 있다. 이를 통해 PbTe 와 Fe 을 결합하는데 성공하였고 8 개월의 열전소자 작동 이후에도 열전성능의 저하가 없음이 확인되었다. Long 등[19]은 PbTe 와 Fe 을 동시에 소결했을 때 열팽창계수의 차이에 따른 크랙 발생 현상을 방지하기 위해 PbTe 와 Fe 사이에 Buffer Layer 역할을 하는 Ni 을 첨가하여 열전소재를 구성하였다. Ni 은 또한 PbTe 소자의 Diffusion Barrier 로도 작용을 하는데, PbTe 소자가 작동하는 고온의 환경에서 Fe 이 PbTe 로 침투하여 PbTe 의 열전 성능을 저하시키는 것을 막는 역할을 한다. Xia 등 은 PbTe 소자에서의 Diffusion Barrier 역할을 하는 Ni 금속 접합층의 접합 현상을 정밀하게 분석하기 위해 Ni Foil 을 사용하여 Hot-Press 공정을 통해 PbTe 와 접합층을 구성하였다. 또한 Ni 과 PbTe 사

이의 접합층에서 $Ni_5Pb_2Te_3$ 등의 이차상(Second Phase)이 확인되어 Ni/PbTe 접합층의 반응 특성을 평가하였다.

본 연구는 PbTe 로 열전소자를 구성할 때 접촉 저항이 낮다고 판단되었던 Fe 금속 접합층을 사용하지 않고 Ni 만으로 금속 접합층을 동시에 제작하였다. 열전소재를 합성하는 방법과 별개로 금속 접합층을 제작하기 위해서는 온도와 압력 등에 있어서 다른 공정 조건이 필요할 수 있다. 하지만 열전소재를 합성하는 기존의 합성 방법을 유지한 채로 금속 접합층을 제작하기 위해 (Fig. 1) 본 연구에서는 본 연구팀의 Wang 등[7]의 773 K 에서 열전성능지수 2.0 을 기록하는 2%Na-PbTe 열전소재와 금속 접합층의 재료인 Ni 과의 접합을 목표로 선택하였고 자세한 공정은 아래에 기술하였다. PbTe 계열의 열전소재가 700 K 정도의 중고온 영역에서 작동하는 열전소재라는 것을 감안하여, 만들어진 Ni/PbTe 소재를 500 °C에서 10 시간 동안 열처리를 진행한 후 금속 접합층의 전기적 접촉 저항의 변화와 Ni 금속층의 침투 현상 등을 확인하였다. 또한 기존 PbTe 열전소재의 제작 방법을 그대로 유지하였기 때문에 아래 실험에 따라 생성된 Ni/PbTe/Ni 의 열전성능지수가 거의 변하지 않는다는 것도 확인하였다.

2. 실험 방법

PbTe 와 Ni 을 함께 소결하기 위해 필요한 2%Na-PbTe 분말은 Wang 등의 실험 과정으로 제작하였다. 이 열전소재는 773 K 에서 약 2.0 의 우수한 열전성능지수를 가진다. 해당 열전소재를 고체상반응(Solid-State Reaction)으로 제작하였는데, Pb, Te, 그리고 Na 을 석영 튜브에 넣어 이를 진공상태로 만들고 전기로에서 해당 물질들을 녹인 후 차가운 물에서의 급랭으로 잉곳을 얻었다. 이를 분쇄하여 2%Na-PbTe 의 분말을 제작하였다. Wang 등의 논문에서 이 분말을 Hot-Press 에서 소결할 때 최적의 열전성능지수가 나오는 공정 조건을 그대로 따르며 Ni/PbTe 열전소재를 합성하였다 (one step synthesis).

열전소자를 구성하기 위해 PbTe 의 양단에 Ni/PbTe/Ni 형태의 열전소자를 제작하였다. 1 cm*1 cm 의 정사각형 형태의 Hot-Press 다이에 Ni 분말

(Sigma Aldrich, <150 μm, 99.995 %)을 1 g 을 첨가하고 그 위에 차례대로 2%Na-PbTe 분말과 Ni 분말을 각각 4 g 과 1 g 씩 첨가하였다. 이를 773K 에서 1 시간 동안 Hot-Pressing 하여 Ni 금속 접합층이 존재하는 Ni/PbTe 열전소재를 완성하였다. 이 후 추가적인 열처리 과정에 따라 열전소재의 특성이 어떻게 변화하는지 관찰하기 위해 500 °C에서 10 시간 동안 열처리를 진행하였다 (Fig. 2).

PbTe 와 Ni 금속 접합층의 전기적 접촉 저항은 Transmission Line Method 방식을 이용하였다 (Fig. 2). Micro-manipulator 와 광학 현미경의 보조로 금 전극 프로브의 위치를 이동하면서 약 10 mA 의 전류가 흐르는 환경에서 각 위치에 따른 전위 차이를 소스미터(Agilent 34410A)를 이용하여 측정하였다. 해당 측정 방식의 정확도를 위해 소재의 단면적을 약 4.3*4.3 mm² 정도로 가지게 한 후 측정을 진행하였다. 또한 Ni 접합층이 PbTe 로 침투하는 정도를 확인하기 위해 Filed Emission Scanning Electron Microscope(FE-SEM, JEOL-6701F)을 이용하여 SEM 이미지와 Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) 분석 정보를 검사하였다. Ni 접합층을 포함하여 2%Na-PbTe 를 제작하였을 때 해당 열전소재가 원래의 열전성능지수를 가지는지 검증하기 위해 아르키메데스 방법으로 밀도를 측정하고 전기 전도도, 제백 상수와 열 전도도는 각각 상용 장비인 ULVAC ZEM-3 와 Laser Flash Apparatus (Netzsch LFA 457)을 사용하여 측정하였다. 열 전도도 측정을 위해 필요한 비열 정보는 Blachnik 등의 이론적 예측값을 사용하였다. Ni/PbTe/Ni 의 열전성능은 PbTe 열전소재의 열전성능지수와 금속 접합층 사이의 전기적 접촉 저항의 조합으로 볼 수 있다. Ni 은 전기 비저항과 열 전도도가 700 K 환경에서 각각 34 μΩ-cm 와 66.8 W/m-K 로 2%Na-PbTe 의 물성치에 비해 무시할 수 있는 작은 값이기 때문에, Ni/PbTe/Ni 의 열전 성능 저하는 오직 금속 접합층의 전기적 접촉 저항에 의해서만 일어난다고 가정하고 만들어진 열전소재에서 Ni 을 제거한 후 열전성능지수를 측정하였다.

3. 분석 결과 및 고찰

Ni 접합층을 기준으로 프로브의 위치를 0.5 mm 씩 이동시키며 Ni 접합층과의 전위 차이를 측정하고

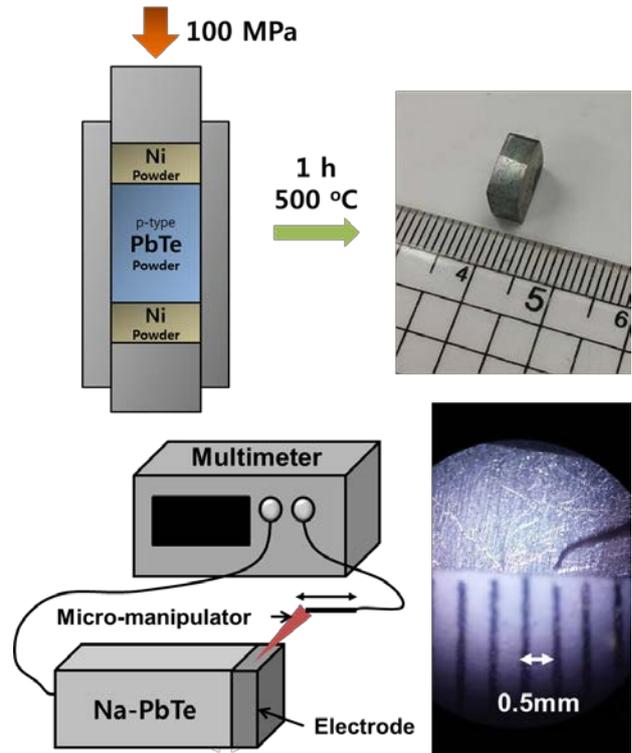


Fig. 2 Schematic of Material synthesis method and contact resistance measurement.

이를 열전소재에 흘린 전류(97.7 mA)로 나누어 저항을 계산하고 이를 토대로 전기적 접촉 저항을 측정한 것을 Fig. 3 에 나타내었다.

773 K 에서 1 시간 동안 Hot-Press 공정을 거친 Ni/PbTe/Ni (pristine 샘플)과 이 후 773 K 에서 10 시간 동안 열처리를 거친 Ni/PbTe/Ni (annealed 샘플)의 전기적 접촉 저항을 비교하였다. 측정된 전기적 접촉 저항은 pristine 샘플의 경우 10.23 μΩ-cm², 열처리한 annealed 샘플의 경우 9.18 μΩ-cm² 으로, 마찬가지로 Ni 을 Diffusion Barrier 로 사용하여 Hot-Press 공정으로 만든 Long [20]등의 Ni/PbTe 접합층에서의 전기적 접촉 저항인 약 13.7 μΩ-cm² 과

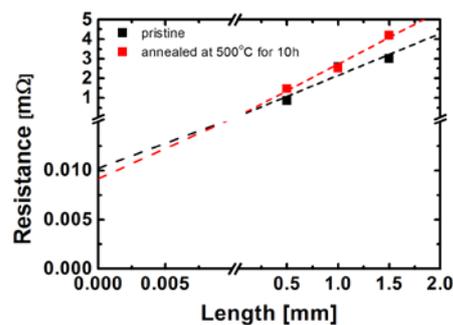


Fig. 3 Measurements on Contact Resistances by Transmission Line Method.

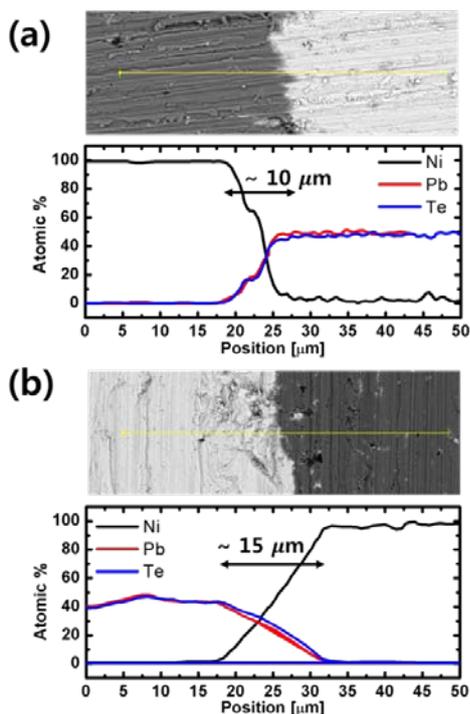


Fig. 4 EDS Results for Ni/PbTe Contact Layer for (a) pristine and (b) annealed (500 °C for 10 h) Samples

비교해보았을 때 우수한 접촉층이며 열전소재 작동 환경 수준의 열처리를 거처도 전기적 접촉 저항의 변화가 측정 정밀도 내에서 거의 없음을 알 수 있다.

Ni 접합층이 PbTe 로 확산되는 현상을 관찰하기 위해 EDS 분석을 진행하였다(Fig. 4). Hot-Press 공정만을 거친 pristine 샘플의 경우 Ni 의 침투 거리가 약 10 μm, 열처리 공정을 거친 샘플의 경우 약 15 μm 를 나타내었다. George[21] 등의 연구 결과를 이용하여 Fig. 5 에서는 열처리 시간에 따른 nickel 의 농도의 %를 거리에 따라 나타내었다. 계산결과에 따르면 500 °C에서 10 시간 동안 열처리를 진행하였을 때 예상되는 Ni 침투 거리는 약 150 μm 이다. ($D = 2.9 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{sec}$). 하지만 Long [20]등의 실험에서 500 °C에서 200 시간 동안 열처리를 진행하였을 때 Ni 의 침투 거리가 약 20 μm 에서 더 이상 증가하지 않는다는 SEM 이미지 관찰 결과가 보고된 바 있다. 이를 미루어 보았을 때 해당 실험의 열처리 이후 Ni 의 침투 결과는 기존의 PbTe 내부에서의 Ni 의 거동과 이론적으로는 차이를 보이지만 실험적인 결과로 미루어 보았을 때 안정한 선에 존재한다고 할 수 있다. George 등의 계산 결과는 단결정 PbTe 내부에서 비

교적 낮은 불순물 농도에서 실험되었기 때문에 다 결정이고 작은 결정립을 가지고 있으며 높은 불순물 농도를 갖는 본 실험의 샘플과는 조건이 다르다. 따라서 확산거리가 계산보다 짧은 것을 설명할 수 있다.

Ni 금속 접합층을 함께 합성하였을 때 열전소재의 열전성능지수가 변화하는 지를 확인하였고 이의 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. Hot-Press 공정으로 합성된 Ni/PbTe/Ni 의 PbTe 의 열전성능지수(pristine)와 열처리 공정(annealed)을 거친 소재의 열전성능지수가 해당 합성 방법[7]으로 만든 열전소재의 열전성능지수 ($zT \sim 2.0 @ 773 \text{ K}$)와 거의 유사함을 확인할 수 있다. 또한 Ni/PbTe/Ni 을 그대로 열전소자로 사용한다고 가정할 경우 열처리 이후 변화한 Ni 접합층의 전기적 접촉 저항을 포함하여 열전성능지수를 계산하였을 때 낮은 접촉 저항으로 인해 유효한 열전성능지수가 본래 열전소재의 열전성능지수와 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 열전소자를 구성하는 열전소재와 전기적 접촉을 향상시키기 위한 금속 접합층을 동시에 제작하기 위해 2.0 의 높은 열전성능지수를 지니는 2%Na-PbTe 와 Ni 을 접합 재료로 선택하였고, 해당 열전소재의 최적의 합성 조건을 그대로 유지한 채로 Ni 접합층을 성공적으로 제작하였다. 해당 공정으로 만들어진 Ni/PbTe/Ni 에 있어서 열전소자와 직접적으로 관련된 특성인 전기적 접촉 저항과 Ni 접합층의 침투 정도, 그리고 열전성능지수를 조사하였으며, 열전소재의 작동 온도를 고려하여 오랜 시간의 열처리 이후에도 해당 특성이

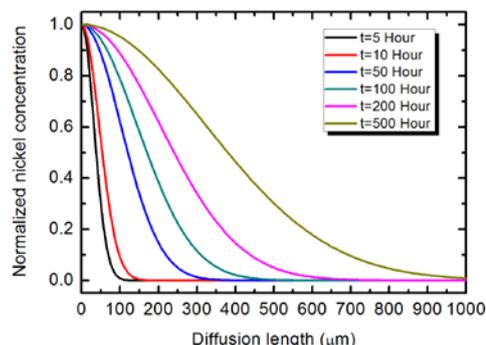


Fig. 5 Normalized Nickel concentration versus diffusion length with various annealing time.

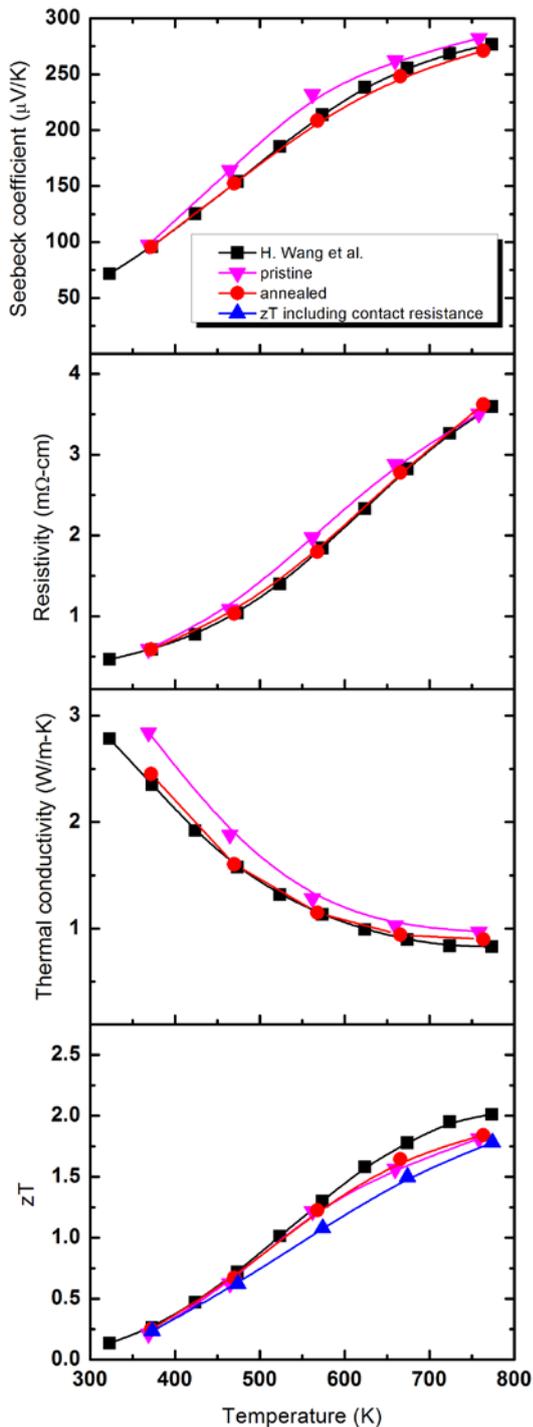


Fig. 6 Thermoelectric properties for 2%Na-PbTe from Ni/PbTe/Ni Layers including the Reference Data (Wang *et al.*[7])

어떻게 변화하는지를 살펴보았다. 전기적 접촉 저항은 pristine 샘플과 annealed 샘플 모두 접촉 저항이 약 $10 \mu\Omega\text{-cm}^2$ 정도의 낮은 값을 보였으며

열처리 이후에도 측정 정밀도의 오차 이내에서 거의 변화가 없음이 확인되었다. 또한 Ni의 침투 정도를 조사하기 위한 EDS 측정 데이터를 통해 Ni 침투 수준이 기존의 연구 결과와 잘 맞는다는 것을 검증하였다. 또한 열전소재의 열전성능지수 측정을 통해 Ni을 포함하여 2%Na-PbTe를 같은 방법으로 제작하였을 때 열전성능지수의 변화가 크지 않음을 확인하였으며 측정된 전기적 접촉 저항을 고려하여도 소자의 열전성능지수의 저하가 매우 적음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] Lee, K.S., et al., 2011. "Thermal Dissipation Properties of the Single-chip LED Package Attached with Directly Heat Dissipated Heat Sinks", Vol.6, No.2. pp. 1163-1164.
- [2] Seo-Young, O. and H. Jung-Ho, 2003. "Control of Particle Contamination and Heat Build-Up for Noble Design of an Optical Disk Drive", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, Vol.27, No.1. pp. 25-31.
- [3] Erian, F.F. and Erian, 1971. "Turbulent Flow Due to a Rotating Disk", The Physics of fluids, Vol.14, No.12. pp. 2588-2591.
- [4] Kobayashi, R., 1994. "Review: Laminar-to-Turbulent Transition of Three-Dimensional Boundary Layers on Rotating Bodies", Journal of Fluids Engineering, Vol.116, No.2. pp. 200-211.
- [5] Macey, J.P. and Macey, 1969. "Instability Phenomenon Associated with an Enclosed Rotating Disk", The Physics of fluids, Vol.12, No.3. pp. 720-721.
- [6] Han, S.H., et al., 2011. "Control of Heat Temperature in Light Emitting Diodes with Thermoelectric Device", The Korean Vacuum Society, Vol.20, No.4. pp. 280-287.
- [7] Wang, H., et al., 2014. "Right sizes of nano- and microstructures for high-performance and rigid bulk

- thermoelectrics", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol.111, No.30. pp. 10949-10954.
- [8] Bell, L.E., 2008. "Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems", Science, Vol.321, No.5895. pp. 1457-1461.
- [9] Rowe, D.M., 1996, "CRC Handbook in Thermoelectrics".
- [10] Ebling, D., K. Bartholome, M. Bartel, and M. Jagle, 2010. "Module Geometry and Contact Resistance of Thermoelectric Generators Analyzed by Multiphysics Simulation", Journal of Electronic Materials, Vol.39, No.9. pp. 1376-1380.
- [11] Ebling, D., M. Jaegle, M. Bartel, A. Jacquot, and H. Bottner, 2009. "Multiphysics Simulation of Thermoelectric Systems for Comparison with Experimental Device Performance", Journal of Electronic Materials, Vol.38, No.7. pp. 1456-1461.
- [12] Biswas, K., et al., 2011. "Strained endotaxial nanostructures with high thermoelectric figure of merit", Nature Chemistry, Vol.3, No.2. pp. 160-166.
- [13] Lo, S.H., J.Q. He, K. Biswas, M.G. Kanatzidis, and V.P. Dravid, 2012. "Phonon Scattering and Thermal Conductivity in p-Type Nanostructured PbTe-BaTe Bulk Thermoelectric Materials", Advanced Functional Materials, Vol.22, No.24. pp. 5175-5184.
- [14] Snyder, G.J. and E.S. Toberer, 2008. "Complex thermoelectric materials", Nature Materials, Vol.7, No.2. pp. 105-114.
- [15] Yang, J.H. and T. Caillat, 2006. "Thermoelectric materials for space and automotive power generation", Mrs Bulletin, Vol.31, No.3. pp. 224-229.
- [16] Xia, H.Y., F. Drymiotis, C.L. Chen, A.P. Wu, and G.J. Snyder, 2014. "Bonding and interfacial reaction between Ni foil and n-type PbTe thermoelectric materials for thermoelectric module applications", Journal of Materials Science, Vol.49, No.4. pp. 1716-1723.
- [17] Pei, Y.Z., A. LaLonde, S. Iwanaga, and G.J. Snyder, 2011. "High thermoelectric figure of merit in heavy hole dominated PbTe", Energy & Environmental Science, Vol.4, No.6. pp. 2085-2089.
- [18] Singh, A., et al., 2009. "Development of low resistance electrical contacts for thermoelectric devices based on n-type PbTe and p-type TAGS-85 ((AgSbTe₂)_{0.15}(GeTe)_{0.85})", Journal of Physics D-Applied Physics, Vol.42, No.1. pp. 015502-1-015502-6.
- [19] Long, C., Y. Yan, J. Zhang, B. Ren, and Z. Wang, 2006, New Integration Technology for PbTe Element, International Conference on Thermoelectrics 25th, pp. 386.
- [20] Long, C., Y. Yan, J. Zhang, B. Ren, and Z. Wang, 2006. "New Integration Technology for PbTe Element", International Conference on Thermoelectrics 25th, Vol.No. pp. 386.
- [21] George, T.D. and J.B. Wagner Jr, 1969. "Diffusion of nickel into lead telluride between 200° and 400°C", Journal of Physics and Chemistry of Solids, Vol.30, No.10. pp. 2459-2465.