

PDMS로 충전된 신축열전모듈의 신축특성과 발전특성

한기선 · 오태성[†]

홍익대학교 공과대학 신소재공학과

Stretchable Characteristics and Power Generation Properties of a Stretchable Thermoelectric Module Filled with PDMS

Kee Sun Han and Tae Sung Oh[†]

Department of Materials Science and Engineering, Hongik University, 94 Wausan-ro, Mapo-gu, Seoul 04066, Korea
(Received December 13, 2019; Corrected December 26, 2019; Accepted December 27, 2019)

초 록: 5쌍의 Bi₂Te₃계 p-n 가압소결체 열전레그들로 구성되어 있으며 상하부 기판이 없고 내부는 polydimethylsiloxane (PDMS)로 충전되어 있는 신축열전모듈을 형성하고, 이의 신축특성과 발전특성을 분석하였다. 신축열전모듈에 변형률 0~0.1 범위의 신축변형 사이클을 10회 인가하여도 모듈의 integrity가 잘 유지되었으며, 인장변형률이 0.2로 증가시 Cu 전극과 열전레그 사이의 접합부 파단에 의해 모듈이 open 되었다. 신축열전모듈은 열전레그 양단간의 온도차가 2.2 K일 때 4.6 mV의 open circuit 전압을 나타내었으며, 변형률 0~0.1 범위의 인장변형에 의한 open circuit 전압의 변화는 5% 미만이었다. 신축열전모듈은 0.1의 변형률로 인장된 상태에서 레그 양단간 온도차 2.2 K에 의해 18.5 μW의 최대발전출력을 나타내었다.

Abstract: A stretchable thermoelectric module consisting of 5 pairs of Bi₂Te₃-based hot-pressed p-n thermoelectric legs was processed by filling the module inside with polydimethylsiloxane (PDMS) and removing the top and bottom substrates. Its stretchable characteristics and power generation properties were measured. The integrity of the module was kept well even after 10 strain cycles ranging from 0 to 0.1. With increasing the tensile strain to 0.2, the module circuitry became open because of joint failure between Cu electrodes and thermoelectric legs. The stretchable thermoelectric module exhibited an open circuit voltage of 4.6 mV with a temperature difference of 2.2K across both ends of thermoelectric legs, and changes in its open circuit voltage were below 5% for tensile strains of 0~0.1. Being elongated for a strain of 0.1, it exhibited the maximum output power of 18.5 μW with the temperature difference of 2.2K across its both ends.

Keywords: stretchable thermoelectrics, stretchable thermoelectric module, energy harvesting, PDMS, wearable device

1. 서 론

최근 지문, 안면이나 홍채와 같은 바이오 정보로 신원을 확인하는 바이오 인식센서, 저출력 모바일 기기, 위치감지 및 ID 인식장치, 헬스모니터링 시스템용 웨어러블 기기, 디스플레이 밴디지형 뮤직플레이어 등과 같은 웨어러블 전자기기의 전원으로서 인체열 에너지를 이용한 마이크로 에너지 하비스팅용 열전발전소자에 대한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다.¹⁻¹²⁾ 인체열 에너지 하비스팅용 웨어러블 열전발전소자는 인체와의 접촉면적을 증가시키며 타이트한 접촉이 가능할 수 있게 유연성과 더불어 신축성을 겸비하는 것이 이상적이다. 이와 같이 딱

딱한 소자에서 유연소자를 거쳐 신축 소자로의 기술 발전이 일반적인 추세로, 웨어러블 전자소자에서도 변형이 안 되는 제품에서 접거나 굽히는 것이 가능한 유연소자를 거쳐 최근에는 유연성과 더불어 잡아당겨 늘린 상태에서도 동작이 가능한 신축 소자로 기술이 발전하고 있다.¹³⁻¹⁵⁾

상부와 하부 세라믹 기판에 본딩한 Cu 전극들에 다수의 p형과 n형 열전레그(leg) 쌍들을 본딩하여 이루어지는 cross-plane 구조의 기존 열전모듈들은 딱딱한 세라믹 기판에 의한 제약 때문에 신축성뿐만 아니라 유연성도 갖지 못한다.¹²⁾ 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 폴리머 유연기판에 수 μm 두께의 열전박막을 형성한 in-

[†]Corresponding author
E-mail: ohts@hongik.ac.kr

© 2019, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

plane 구조의 유연열전모듈이 개발되었다.^{12,17,18)} In-plane 구조의 유연열전모듈은 열전레그의 길이가 길고 두께가 얇은 형상 특성상 내부저항이 크고^{7,12)} 또한 열전특성이 낮은 Bi₂Te₃계 열전박막이나 고분자 열전박막을 열전레그로 사용하기 때문에 열전모듈의 발전특성이 좋지 않은 문제점이 있다.^{7-10,12,19,20)} 폴리이미드 필름이 신축성이 없기 때문에 폴리이미드 필름을 기판으로 사용한 이들 in-plane형 유연열전모듈들도 신축성을 나타내지 못하게 된다.

유연열전모듈과 관련하여 상하부 세라믹 기판을 장착한 기존 cross-plane형 열전모듈의 문제점과 폴리이미드 기판을 기반으로 한 in-plane형 열전모듈의 단점을 해결하기 위해 최근 본 연구자들은 상하부 기판이 없고 내부는 polydimethylsiloxane(PDMS)로 충전되어 있어 유연성을 확보할 수 있으며, cross-plane 구조로 내부저항이 낮고 벌크 가압소결체 열전레그들로 구성되어 있어 높은 열전발전특성을 얻는 것이 가능한 유연열전모듈의 형성공정을 보고하였다.¹²⁾ 이와 같이 in-plane형과 cross-plane형 유연열전모듈에 대한 보고는 문헌상에 다수 이루어지고 있으나,^{12,17,18)} 유연열전모듈보다 기술이 더 발전되었다고 할 수 있는 신축열전모듈에 대한 보고는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 열전모듈에 유연성과 더불어 신축성을 부여하기 위해 상하부 기판이 없으며 내부는 PDMS로 충전되어 있고 상하부 Cu 전극들이 서로 엇비스듬하게 배열되어 있는 신축열전모듈을 형성하고 신축특성과 열전특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1에 신축열전모듈의 모식도를 나타내었다. 상하부 기판이 없으며 신축성 고분자 PDMS 내에 열전레그를 중심으로 상부와 하부 Cu 전극들이 서로 엇비스듬하게 배열된 구조이다. 인장응력을 인가하면 PDMS의 변형과 함께 열전레그를 축으로 Cu 전극의 회전이 발생하여 열전모듈이 인장변형되며, 응력이 제거되면 신축성 PDMS의 복원력에 의해 Cu 전극이 반대 방향으로 회전하며 열전모듈의 형상이 원래의 모습으로 되돌아오게 된다.^{12,21,22)} 이와 같은 신축열전모듈을 형성하기 위해 넓이 7 mm×30 mm의 유효면적에 총 5개의 p-n 레그 쌍을 배열할 수 있도록 길이 7 mm, 폭 2 mm의 전극들이 비스듬히 위치하

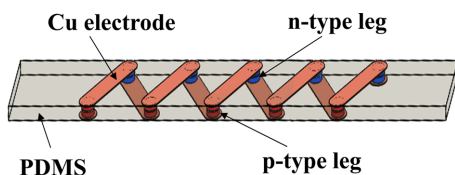


Fig. 1. Schematic illustration of a stretchable thermoelectric module formed by filling the inside with PDMS and removing the top and bottom substrates.

며, 전극 내에서 p형 레그 중심과 n형 레그 중심 사이의 간격은 5 mm로 설정하였다. 이와 같은 전극들에 1.4 mm×1.4 mm×1.6 mm 크기의 p형 (Bi,Sb)₂Te₃와 n형 Bi₂(Te,Se)₃ 가압소결체 레그들이 배열되어 있는 구조이다.

Fig. 2에 유연열전모듈의 제조공정 모식도를 나타내었다. Fig. 2(a)와 같이 상하부 더미(dummy) 기판으로 사용할 Si 웨이퍼에 0.1 μm 두께의 Ti와 2 μm 두께의 Cu를 연속적으로 스퍼터링하여 Ti/Cu를 형성한 후 Cu 전극도금용 포토레지스트 패터닝을 하였다. Ti/Cu metallization에서 Ti는 접착층이며 Cu는 열전모듈의 Cu 전극을 전기도금하기 위한 씨앗층이다. Fig. 2(b)와 같이 포토레지스트 패터닝된 Ti/Cu metallization에 500 nm 두께의 Au를 스퍼터링 후 Cu 도금액에 장입하여 20 μm 두께로 Cu 전극을 전기도금하고 그 위에 다시 500 nm 두께의 Au를 스퍼터링 하였다. 이와 같은 공정에서 첫 번째 Au 층은 Si 더미 기판에 열전모듈을 형성한 후 열전모듈을 Si 더미기판에서 분리하기 위한 분리층의 용도이며, 두 번째 Au 층은 솔더를 사용하여 열전레그를 본딩하기 위한 Cu 전극의 내산화층이다.¹²⁾ Fig. 2(c)와 같이 포토레지스트 패턴을 제거하고 Cu 전극 양단에 anisotropic adhesive(ACA)를 도포한 후 이에 Ni 전극처리된 p형과 n형 열전레그들을 배열하고 160°C에서 1분간 유지하여 열전레그들을 Cu 전극에 ACA 본딩하였다. 그런 다음 Fig. 2(d)와 같이 상부 Si 더미기판의 Cu 전극에 ACA를 도포하고 하부기판의 열전레그들에 배열한 후 160°C에서 1분간 유지하여 상하부 Si 더미기판 사이에 열전모듈을 형성하였다. 상하부 Si 더미기판에 본딩된 열전모듈을 패트리 디쉬에 놓고 Dow Corning Sylgard 184의 base와 curing agent를 10 : 1의 비율로 혼합한 액상 PDMS를 부은 다음 60°C에서 12시간 동안 경화시켜^{12,13,21)} Fig. 2(e)와 같이 열전모듈 내를 PDMS 탄성고분자로 충전하였다. 이와 같은 시편을 에탄올에 넣고 초음파 처리를 하여 상하부 Si 더미기판을 박리시킨 후 주변 PDMS를 잘라내어 Fig. 2(f)와 같은 신축열전모듈을 형성하였다. 인장시험용 신축열전모듈을 만들 때는 Fig. 2(f)에서 7 mm×30 mm로 다이싱한 신축열전모듈을 다시 패트리 디쉬 내에 양면테이프를 고정시키고 base와 curing agent를 10 : 1로 혼합한 Sylgard 184를 신축열전모듈 주위에 붓고 60°C에서 12시간 PDMS로 경화시킨 후 25 mm×90 mm 크기로 다이싱 하여 인장시험용 신축열전모듈을 형성하였다.

히팅코일이 내장된 Cu 블록과 수냉 Cu 히팅싱크 사이에 신축열전모듈을 넣고 히팅코일을 가열하여 모듈에 온도차 ΔT를 인가하며 출력전압-전류와 출력전력-전류 특성을 측정하였다.¹²⁾ 신축열전모듈의 인장변형에 따른 모듈 저항 및 열전특성을 측정하기 위해 길이 90 mm인 신축열전모듈의 각 끝단에서 10 mm 되는 부위를 미니 인장시험기에 장착하고 6 mm/min의 속도로 인장하였다. 신축변형 사이클에 따른 신축열전패키지의 신뢰성을 분석하기 위해 6 mm/min의 변형률 속도로 0~0.1의 변형률 범

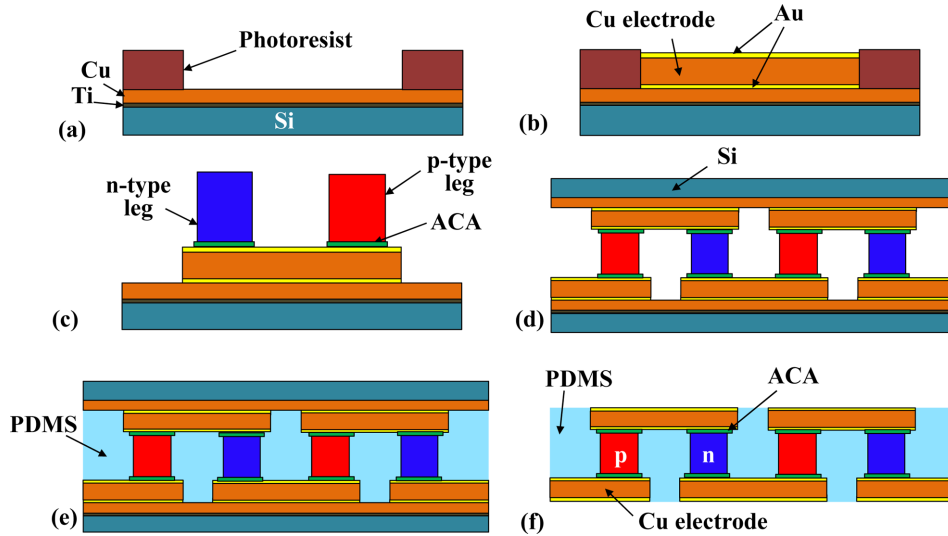


Fig. 2. Schematic illustration of the process flow for a flexible thermoelectric module; (a) sputter a Ti/Cu metallization and form a photoresist pattern, (b) sputter a Au layer, electrodeposit Cu electrodes, and sputter second Au layer, (c) bond thermoelectric legs on Cu electrodes using ACA, (d) bond the Cu electrodes of a top substrate to thermoelectric legs on a bottom substrate using ACA, (e) fill the inside of the module with elastic polymer Sylgard 184 and cure it to PDMS, (f) remove the top and bottom substrate to complete the module formation.

위로 신축변형 사이클을 10회 반복하며 신축열전모듈의 저항변화를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

신축열전모듈의 형성에 사용한 p형 $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ 가압소결체 레그와 n형 $\text{Bi}_2(\text{Te,Se})_3$ 가압소결체 레그의 양단간에 10°C 의 온도차를 인가하며 측정한 Seebeck 계수는 각각 $220 \mu\text{V/K}$ 와 $-200 \mu\text{V/K}$ 이었으며, p형과 n형 레그의 비저항은 각각 $0.78 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$ 과 $0.72 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$ 로 측정되었다.¹²⁾ P형 $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ 가압소결체에서는 $150\sim 270 \mu\text{V/K}$ 의 Seebeck 계수와 $0.6\sim 6 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$ 범위의 비저항이 보고되고 있으며, n형 $\text{Bi}_2(\text{Te,Se})_3$ 가압소결체는 $-110\sim -260 \mu\text{V/K}$ 의 Seebeck 계수와 $0.7\sim 10 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$ 의 비저항을 나타내는 것

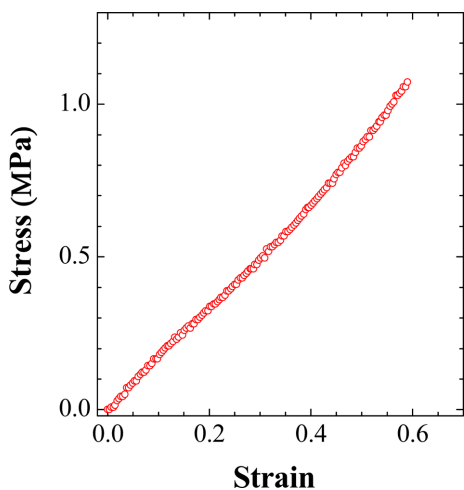


Fig. 3. Stress-strain curve of the PDMS.

으로 보고되고 있다.^{12,22-30)}

Fig. 3에 base와 curing agent를 10 : 1의 비율로 혼합한 Dow Corning Sylgard 184를 60°C 에서 12시간 유지하여 경화시킨 PDMS의 응력-변형률 곡선을 나타내었다. PDMS의 탄성계수는 응력-변형률 곡선이 비교적 직선적인 0.4 이하의 변형률 범위에서 구하기 적합하다고 보고되고 있는 바,³¹⁻³³⁾ Fig. 3의 응력-변형률 곡선을 사용하여 $0\sim 0.4$ 범위의 변형률에서 구한 PDMS의 탄성계수는 1.74 MPa 이었다. 문헌상에 보고된 PDMS의 탄성계수는 curing agent의 무게분율이 $9\sim 10 \text{ wt}\%$ 일 때 $1.5\sim 1.7 \text{ MPa}$ 로,^{31,34-36)} 본 실험의 결과와 잘 일치하였다.

Fig. 4에 신축열전모듈의 인장시험 사진들을 나타내었

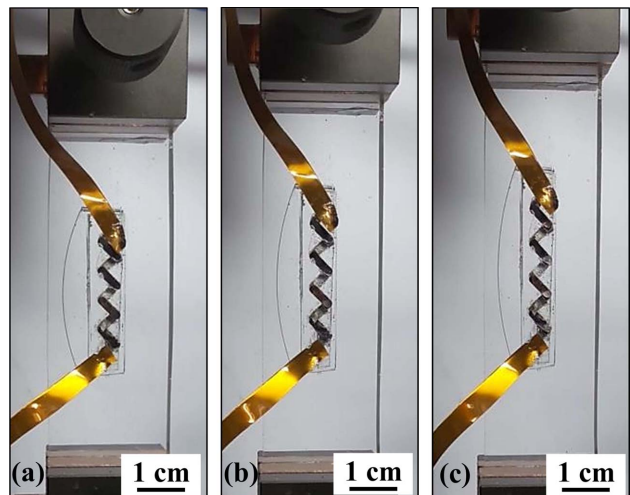


Fig. 4. Optical images of the stretchable thermoelectric module during tensile testing for a strain of (a) 0, (b) 0.1, and (c) 0.2.

다. 이들 사진에서 신축열전모듈의 맨 위와 아래 레그에 모듈저항 측정용 와이어 대응으로 폴리이미드 필름에 동박층이 적층된 FCCL(Flexible Cooper Clad Laminate)을 실버 에폭시로 접합하였다. Fig. 4에서 열전모듈 외부로 둘러싸고 있는 PDMS와 내부에 충전되어 있는 PDMS가 인장변형됨에 따라 열전모듈의 Cu 전극들이 본딩되어 있는 각 열전레그들을 축으로 점차 회전하게 되어 Cu 전극 사이의 각도가 더 벌어지게 된다. 신축열전모듈을 인장 변형시 Cu 전극의 길이 변화는 일어나지 않고 열전레그를 축으로 한 회전만 발생한다고 가정하면 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. Cu 전극의 길이를 d , 인장변형 전 Cu 전극을 수직으로 투영한 길이를 l , 인장변형 전에 Cu 전극을 수평으로 투영한 길이를 w 라고 하면, $w = \sqrt{d^2 - l^2}$ 이 된다. 따라서 인장변형 전 Cu 전극들 사이의 반각 θ 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\theta = \arctan\left(\frac{l}{w}\right) = \arctan\left(\frac{l}{\sqrt{d^2 - l^2}}\right) \quad (1)$$

신축열전모듈의 인장변형률이 ϵ 이면 Fig. 5(b)에서 $l' = (1 + \epsilon)l$ 이므로 인장변형 후 Cu 전극 사이의 반각 $\theta + d\theta$ 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\theta + d\theta = \arctan\left(\frac{l'}{w'}\right) = \arctan\left(\frac{(1 + \epsilon)l}{\sqrt{d^2 - (1 + \epsilon)^2 l^2}}\right) \quad (2)$$

식 (2)에서 l' 와 w' 은 인장변형시 Cu 전극을 각기 수직과 수평으로 투영한 길이이다. 인장변형률 ϵ 에 따른 Cu 전극 사이의 각도 변화 $2d\theta$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$2d\theta = \arctan\left(\frac{(1 + \epsilon)l}{\sqrt{d^2 - (1 + \epsilon)^2 l^2}}\right) - \arctan\left(\frac{l}{\sqrt{d^2 - l^2}}\right) \quad (3)$$

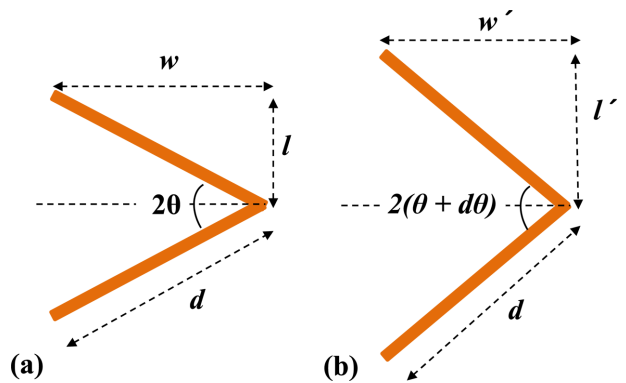


Fig. 5. Schematic illustrations of top and bottom Cu electrodes aligned askew to each other and the angle between them (a) before elongation and (b) after elongation.

Fig. 5의 모식도에서 구한 Cu 전극에서 열전레그 중심 사이의 거리 $d = 5$ mm, Cu 전극을 수직으로 투영한 거리 $l = 2.5$ mm, Cu 전극을 수평으로 투영한 거리 $w = 4.3$ cm를 식 (3)에 대입하면 Fig. 6와 같이 $\epsilon = 0 \sim 0.3$ 범위에서 ϵ 에 따라 $2d\theta$ 가 거의 직선적으로 변하게 된다. 신축열전모듈의 인장변형시 Cu 전극의 회전에 의해 Cu 전극과 열전레그 사이의 결합부에 비틀림 모멘트가 유발되며, 변형률이 0.2에 도달하여 Cu 전극 사이의 각도가 14° 정도 증가하였을 때 Fig. 7과 같이 결합부의 파단이 발생하였다. Fig. 8에 변형률에 따른 신축열전모듈의 저항을 나타내었는데, 변형률이 0.2가 되었을 때 모듈 저항이 급격히 증가하여 회로가 open 되었음을 알 수 있다.

신축열전모듈에 0~0.1 범위의 변형률 사이클을 10회 인가하며 측정한 모듈 저항을 Fig. 9에 나타내었다. 모듈 저항 자체가 낮아 저항 측정시 노이즈 레벨이 높게 나타나는 문제점을 제외하고는 10회까지의 변형률 사이클에 의해서도 모듈 저항이 증가하는 경향이 나타나지 않아 Cu 전극과 열전레그 사이의 접합부 파단이 발생하지 않았다고 판단할 수 있다. Fig. 6에서 변형률이 0.1일 때 Cu 전극 사이의 각도 증가는 6.7° 이었으므로, 이만큼의 각도 변화를 주면서 Cu 전극의 회전 사이클을 10회 반복하여도 Cu 전극과 열전레그 사이에서 ACA 본딩으로 형성된 접

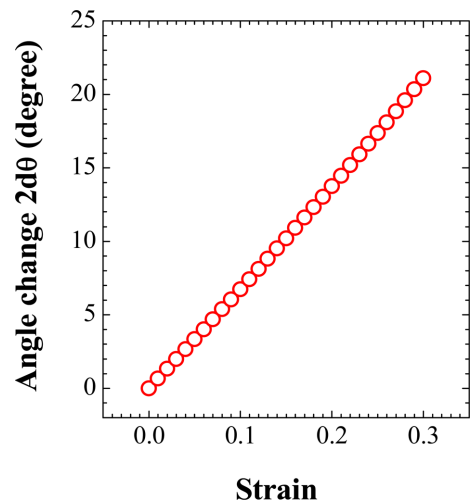


Fig. 6. The change in angle between the top and bottom Cu electrodes as a function of tensile strain applied to the stretchable thermoelectric module.



Fig. 7. Optical Image showing the joint failure between a Cu electrode and a thermoelectric leg at a strain of 0.2.

합부가 잘 유지되었다.

신축열전모듈을 인장변형시키지 않은 상태에서 측정

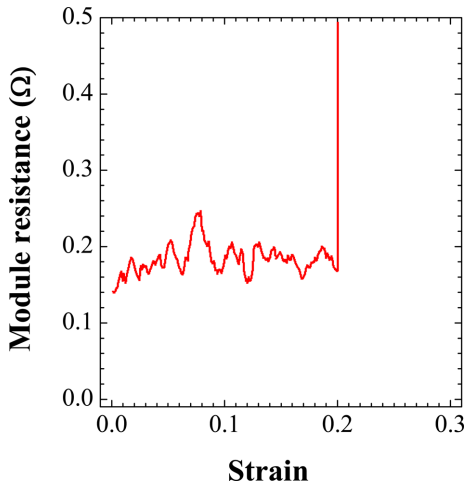


Fig. 8. Module resistance as a function of a strain applied to the module.

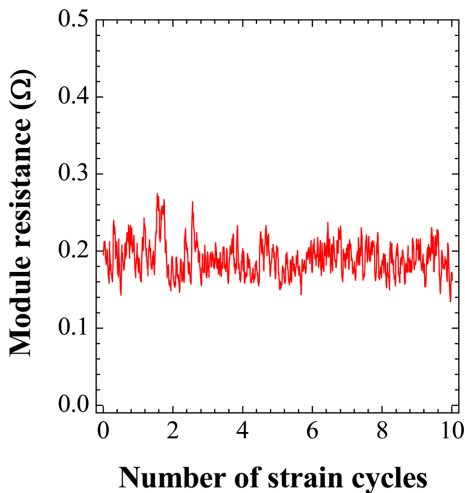


Fig. 9. Module resistance vs. strain cycles applied to the module within the strain range of 0~0.1.

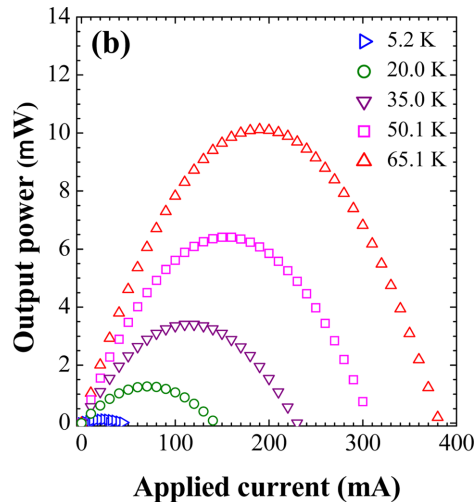
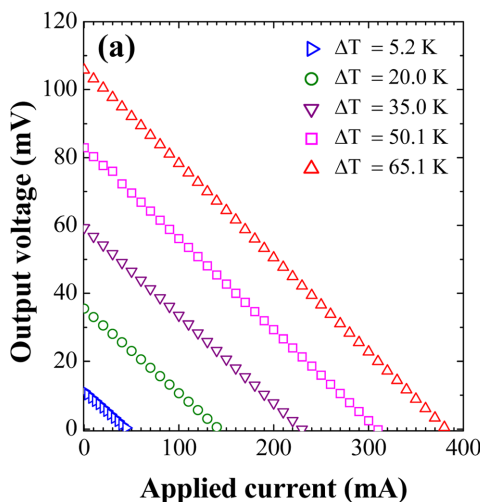


Fig. 10. (a) Output voltage-current curves and (b) output power-current curves of the stretchable thermoelectric module at various ΔT .

한 ΔT 에 따른 출력전압-전류 특성과 출력전력-전류 곡선을 각기 Fig. 10(a)와 (b)에 나타내었다. 모듈 양단간의 온도차 ΔT 가 5.2K일 때 11.2 mV의 open circuit 전압과 128 μ W의 최대출력전력을 나타내었으며, ΔT 가 5.2 K일 때는 115.8 mV의 open circuit 전압과 10.1 mW의 최대출력전력을 얻을 수 있었다. 열전모듈에서 open circuit 전압은 $V_{oc} = m\alpha_{p-n}\Delta T$ 관계식을 만족하는데, 이 식에서 V_{oc} 는 open circuit 전압, m 은 p형과 n형 열전레그 쌍의 개수, α_{p-n} 은 p형과 n형 한 쌍의 Seebeck 계수 합, ΔT 는 모듈 고온단과 저온단의 온도차이다.^{8-10,12} p형 레그의 Seebeck 계수 $\alpha_p = 220 \mu$ V/K, n형 레그의 Seebeck 계수 $\alpha_n = 200 \mu$ V/K과 $m = 5$ 을 대입하여 V_{oc} 와 ΔT 사이의 이론적 관계식을 구하면 $V_{oc} = 2.1\Delta T$ 로 표현할 수 있다. Fig. 11에 ΔT 에 따른 open circuit 전압의 측정값을 $V_{oc} = 2.1\Delta T$ 관계로부터 계산한 값을 비교하였다. 모듈 양단간의 온도차 ΔT 가 증가함에 따라 측정값과 계산값의 차이가 증가하였으나, 사용 ΔT 범위에서는 측정값이 계산값의 77% 이상으로 유지되었다. Si 웨이퍼를 상하부 기판으로 사용한 Bi_2Te_3 계

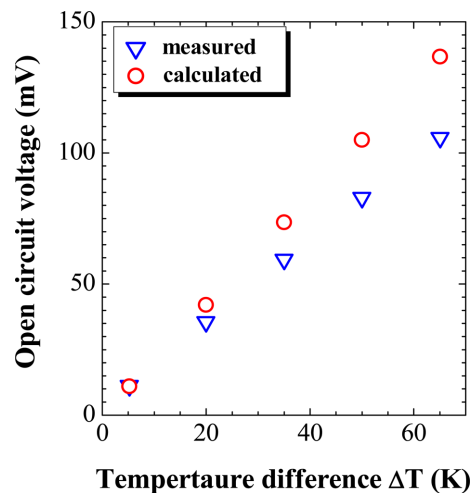


Fig. 11. Comparisons of the measured and calculated open circuit voltages as a function of ΔT .

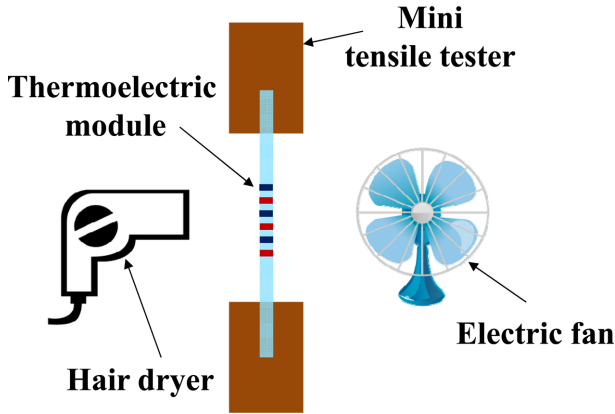


Fig. 12. Schematic illustration for the measurement set-up for power generation characteristics of the module during elongation.

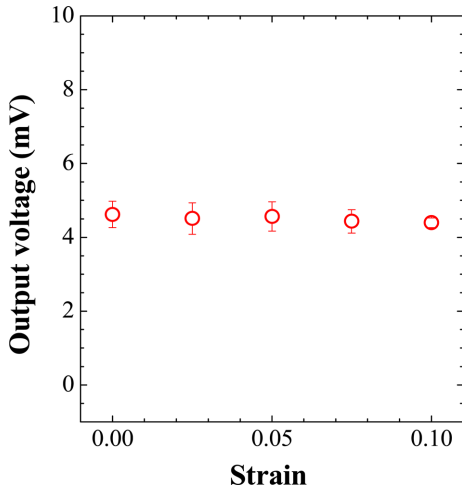


Fig. 13. Open circuit voltages of the module as a function of its elongation strain.

열전박막모듈의 open circuit 전압은 $V_{oc} = m\alpha_{p-n}\Delta T$ 관계식을 사용하여 구한 값의 1/12~1/18로 측정된다고 보고되고 있다.^{8-10,12)} 이에 비해 본 연구에서 계산값에 훨씬 근접하는 open circuit 전압을 얻을 수 있는 이유는 상하부 기판을 제거하여 이에 의한 열저항을 없애줌으로써 열전 레그에 인가되는 실제 온도차 ΔT_G 를 모듈 양단간에 인가되는 겉보기 온도차 ΔT 에 근접시키는 것이 가능하였기 때문이다.¹²⁾

Fig. 12에 신축열전모듈을 인장변형 시킨 상태에서 열전특성을 측정하기 위한 모식도를 나타내었다. 히팅코일이 내장된 Cu 블록과 수냉 Cu 히싱크 사이에 신축열전모듈을 넣고 인장할 수 없기 때문에, 신축열전모듈을 미니 인장기에 장착하고 앞면에서는 헤어드라이어로 열풍을 불어주고 뒷면에서는 선풍기로 찬바람을 불어주어 신축열전모듈의 양단에 온도차를 부여하고자 하였다. 이와 같은 실험 세팅에서 열전모듈 바로 앞면에서 드라이어의 열풍온도는 45.8°C, 그리고 바로 뒷면에서 선풍기의 바람온도는 33.4°C로 측정되었다. 0~0.1 범위의 변형률로

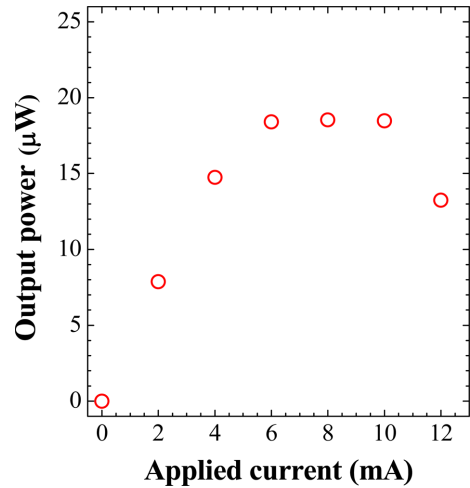


Fig. 14. Output power-current curve of the module measured at a tensile strain of 0.1.

신축열전모듈을 인장변형 후 각 변형률에서 측정된 open circuit 전압을 Fig. 13에 나타내었다. 0~0.1 범위의 변형률에서 4.1~4.62 mV의 open circuit 전압이 얻어졌으며 변형률에 따른 차이가 5% 미만으로 나타났다. 0~0.1 범위의 변형률에 따른 모듈 저항의 차이가 관찰되지 않은 Fig. 8 및 Fig. 9의 결과와 함께 Fig. 13의 결과에서부터 0~0.1 범위의 변형률에서는 열전특성이 저하되지 않는다고 판단할 수 있다. 신축열전모듈의 V_{oc} 와 ΔT 사이의 이론적 관계식 $V_{oc} = 2.1\Delta T$ 를 사용하여 헤어드라이어와 선풍기에 의해 신축열전모듈 레그에 작용하는 실제 온도차 ΔT_G 는 2.1~2.2°C로 예측되었다. 0.1의 변형률로 인장된 상태에서 측정된 신축열전모듈의 출력전력-전류 특성을 나타낸 Fig. 14에서와 같이, 신축열전모듈에서 18.5 μW의 최대 출력전력을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 유연성뿐만 아니라 신축성을 지닌 열전모듈을 개발하기 위해 상하부 기판이 없으며 내부는 PDMS로 충전되어 있고 상하부 Cu 전극들이 서로 엇비스듬하게 배열되어 있는 신축열전모듈을 형성하고 신축특성과 열전특성을 분석하였다. 인장응력을 인가시 PDMS 충전재가 탄성변형하며 동시에 열전레그를 중심축으로 Cu 전극들의 회전이 발생하여 열전모듈의 신축변형이 가능하였다. 인장변형률이 증가함에 따라 Cu 전극과 열전레그 사이의 접합부에 인가되는 비틀림 모멘트가 증가하며, 0.2의 변형률에서 접합부의 파단에 의해 모듈 회로의 open이 발생하였다. 변형률이 0.2에 도달할 때까지는 인장변형에 의한 모듈 저항의 증가가 없으며 또한 0~0.1 변형률 범위로 변형 사이클을 10회까지 반복하여 가하여 주어도 모듈 저항이 증가하지 않아 0.1 이하의 변형률에서는 신축열전모듈을 변형시키면서 사용하는 것이 가능할 것이다. 신축열전모듈이 0.2 이상의 변형률에

서도 안정적으로 작동하기 위해서는 Cu 전극과 열전레그 사이 접합부의 강도를 높여 파단을 방지하여야 한다. 그러나 변형률이 임계값 이상으로 높아지면 접합부 파괴가 발생하거나 접합부 강도가 높은 경우에는 접합부 대신 열전레그가 파괴될 수 있으므로 신축열전모듈에 인가할 수 있는 변형률의 임계값을 적정하게 설정하여야 한다. 신축열전모듈은 0~0.1 범위의 변형률에 대해서는 열전특성의 차이를 나타내지 않았으며, 0.1의 변형률로 인장시킨 상태에서 모듈 양단에 뜨거운 공기와 차가운 바람을 불어주어 18.5 μW 의 전력을 얻을 수 있었다. P-n 레그 쌍이 배열된 면적을 증가시키며 또한 단위면적당 배열된 레그 쌍의 개수를 증가시킬 수 있도록 모듈 레이어 수를 변경함으로써 신축열전모듈의 발전출력 특성을 향상시키는 것이 가능할 것이다.

References

1. J. H. Kim, W. J. Kim, and T. S. Oh, "Thermoelectric Thin Film Devices for Energy Harvesting with the Heat Dissipated from High-power Light-emitting Diodes", *J. Electron. Mater.*, 45(7), 3410 (2016).
2. R. J. M. Vullers, R. van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, and R. Mertens, "Micropower Energy Harvesting", *Solid-State Electron.*, 53, 684 (2009).
3. T. Huesgen, P. Woias, and N. Kockmann, "Design and Fabrication of MEMS Thermoelectric Generators with High Temperature Efficiency". *Sens. Actuators A*, 145-146, 423 (2008).
4. W. Wang, V. Cionca, N. Wang, M. Hayes, B. O'Flynn, and C. O'Mathuna, "Thermoelectric Energy Harvesting for Building Energy Management Wireless Sensor Networks", *Inter. J. Distrib. Sens. Netw.*, 2013, 232438 (2013).
5. W. Glatz, S. Muntwyler, and C. Hierold, "Optimization and Fabrication of Thick Flexible Polymer Based Micro Thermoelectric Generator", *Sens. Actuators A*, 132, 337 (2006).
6. A. Sharma, J. H. Lee, K. H. Kim, and J. P. Jung, "Recent Advances in Thermoelectric Power Generation Technology", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 24(1), 9 (2017).
7. T. S. Oh, "Fabrication Process and Power Generation Characteristics of Thermoelectric Thin Film Devices for Micro Energy Harvesting", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 25(3), 67 (2018).
8. W. J. Kim, and T. S. Oh, "Comparison of Thermal Energy Harvesting Characteristics of Thermoelectric Thin-Film Modules with Different Thin-Film Leg Diameters", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 25(4), 67 (2018).
9. K. J. Shin, and T. S. Oh, "Micro-Power Generation Characteristics of Thermoelectric Thin Film Devices Processed by Electrodeposition and Flip-Chip Bonding", *J. Electron. Mater.*, 44(6), 2026 (2015).
10. K. J. Shin, and T. S. Oh, "Thermoelectric Power-Generation Characteristics of a Thin-Film Device Processed by the Flip-Chip Bonding of Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 Thin-Film Legs Using an Anisotropic Conductive Adhesive", *Mater. Trans.*, 56(10), 1719 (2015).
11. V. Leonov, T. Torfs, P. Fiorini, and C. Van Hoof, "Thermoelectric Converters of Human Warmth for Self-Powered Wireless Sensor Nodes", *IEEE Sens. J.*, 7(5), 650 (2007).
12. K. S. Han, and T. S. Oh, "Power Generation Properties and Bending Characteristics of a Flexible Thermoelectric Module Fabricated using PDMS Filling Method", submitted to *J. Microelectron. Packag. Soc.* (2019).
13. D. Park and T. S. Oh, "Interfacial Adhesion Enhancement Process of Local Stiffness-Variant Stretchable Substrates for Stretchable Electronic Packages", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 25(4), 111 (2018).
14. D. Park, and T. S. Oh, "Flip Chip Process on the Local Stiffness-Variant Stretchable Substrate for Stretchable Electronic Packages", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 25(4), 155 (2018).
15. J. H. Ahn, and J. H. Je, "Stretchable Electronics: Materials, Architectures and Integrations", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 45, 102001 (2012).
16. D. H. Kim, and J. A. Rogers, "Stretchable Electronics: Materials Strategies and Devices", *Adv. Mater.*, 20, 4887 (2008).
17. S. H. Lee, H. Shen, and S. Han, "Flexible Thermoelectric Module Using Bi-Te and Sb-Te Thin Films for Temperature Sensors", *J. Electron. Mater.*, 48(9), (2019).
18. Y. Du, J. Xu, B. Paul, and P. Eklund, "Flexible Thermoelectric Materials and Devices", *Appl. Mater. Today*, 12, 366 (2018).
19. S. Zhang, Z. Fan, X. Wang, Z. Zhang, and J. Ouyang, "Enhancement of the Thermoelectric Properties of PEDOT:PSS via One-Step Treatment with Cosolvents or Their Solutions of Organic Salts", *J. Mater. Chem.*, A6, 7080 (2018).
20. R. Maeda, H. Kawakami, Y. Shinohara, I. Kanazawa, and M. Mitsuishi, "Thermoelectric Properties of PEDOT/PSS Films Prepared by a Gel-Film Formation Process", *Mater. Lett.*, 251, 169 (2019).
21. D. Park, and T. S. Oh, "Flip Chip Process on the Local Stiffness-Variant Stretchable Substrate for Stretchable Electronic Packages", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 25(4), 155 (2018).
22. T. S. Oh, D. B. Hyun, and N. V. Kolomoets, "Thermoelectric Properties of the Hot-Pressed $(\text{Bi,Sb})_2(\text{Tl,Se})_3$ Alloys", *Scripta Mater.*, 42, 849 (2000).
23. H. J. Kim, H. C. Kim, D. B. Hyun, and T. S. Oh, "Thermoelectric Properties of p-Type $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ Alloys Fabricated by the Hot Pressing Method", *Met. Mater.*, 4(1), 75 (1998).
24. B. Y. Jung, T. S. Oh, D. B. Hyun, and J. D. Shim, "Thermoelectric Properties of $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$ Prepared by Mechanical Alloying and Hot Pressing", *J. Korean Phys. Soc.*, 31(1), 219 (1997).
25. H. C. Kim, B. Y. Jung, D. B. Hyun, and T. S. Oh, "Mechanical Alloying Process and Thermoelectric Properties of p-Type $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ ", *J. Korean Inst. Met. Mater.*, 36(3), 416 (1998).
26. B. Y. Jung, T. S. Oh, S. E. Nam, D. B. Hyun, and J. D. Shim, "Thermoelectric Properties of p-Type $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$ Fabricated by Mechanical Alloying Process", *J. Korean Inst. Met. Mater.*, 35(1), 153 (1997).
27. D. B. Hyun, J. S. Hwang, J. D. Shim, and T. S. Oh, "Thermoelectric Properties of $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$ Alloys Fabricated by Hot-Pressing Method", *J. Mater. Sci.*, 36, 1285 (2001).
28. H. J. Kim, T. S. Oh, and D. B. Hyun, "Thermoelectric Properties of the Hot-Pressed $\text{Bi}_2(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)_3$ Alloys with the Bi_2Se_3 Content", *Korean J. Mater. Res.*, 8(5), 408 (1998).
29. H. J. Kim, J. S. Choi, D. B. Hyun, and T. S. Oh, "Powder Characteristics and Thermoelectric Properties of n-Type

- $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0.95}\text{Se}_{0.05})_3$ Fabricated by Mechanical Alloying Process”, *J. Korean Inst. Met. Mater.*, 35(2), 223 (1997).
30. H. J. Kim, J. S. Choi, D. B. Hyun, and T. S. Oh, “Microstructure and Thermoelectric Properties of n-Type $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0.95}\text{Se}_{0.05})_3$ Fabricated by Mechanical Alloying Process and Hot Pressing Methods”, *Korean J. Mater. Res.*, 7(1), 40 (1997).
 31. J. Y. Choi, D. W. Park, and T. S. Oh, “Variation of Elastic Stiffness of Polydimethylsiloxane (PDMS) Stretchable Substrates for Wearable Packaging Applications”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21(4), 125 (2014).
 32. I. D. Johnston, D. K. McCluskey, C. K. L. Tan, and M. C. Tracey, “Mechanical Characterization of Bulk Sylgard 184 for Microfluidics and Microengineering”, *J. Micromech. Microeng.*, 24, 035017 (2014).
 33. I. Wong, and C. M. Ho, “Surface Molecular Property Modifications for Poly(dimethylsilicone) (PDMS) Based Microfluidic Devices”, *Microfluid Nanofluid*, 7, 291 (2009).
 34. F. Schneider, T. Fellner, J. Wilde and U. Wallrabe, “Mechanical Properties of Silicones for MEMS”, *J. Micromech. Microeng.*, 18, 065008 (2008).
 35. K. Khanafer, A. Duprey, M. Schlicht, and R. Berguer, “Effects of Strain Rate, Mixing Ratio, and Stress-Strain Definition on the Mechanical Behavior of the Polydimethylsiloxane (PDMS) Materials as Related to Its Biological Applications”, *Biomed Microdevices*, 11, 503 (2009).
 36. J. H. Seo, K. Sakai, and N. Yui, “Adsorption State of Fibronectin on Poly(dimethylsiloxane) Surfaces with Varied Stiffness Can Dominate Adhesion Density of Fibroblasts”, *Acta Biomater.*, 9(3), 5493 (2013).