

# 헤드각이 변화하는 Electrosurgical Knee Wand에 적용된 형상기억합금 스프링의 전기적 피로특성

안재욱\* · 김철웅<sup>†</sup> · 이호상\* · 왕준호\*\* · 오동준\*\*\*

## Electro-fatigue Characteristic of Shape Memory Alloy Applied to the Electrosurgical Knee Wand of Variation of Wand Head Angle in Electrosurgical Knee Surgeries

Jae Uk An, Cheol Woong Kim, Ho Sang Lee, Joon Ho Wang and Dong Joon Oh

**Key Words:** Shape Memory Alloy(형상기억합금, SMA) Steering Catheter(방향 조종 카테터),  
Peltier Thermoelectric Module(펄티어 열전소자 모듈), Response Velocity(반응속도)

### Abstract

The tip of these catheter with straight needles is not able to reach in the vicinity of the disc bulging, which are the cause of the low back pain and because the far indirect radio-frequency treatment results in the decompression, the nucleoplasty has the limit. Many incurable diseases has not been solved due to the unexistence of the advanced technique for the MIS human body catheter device. To increase the possibility of nucleoplasty, the needle tip should be located at the closest area of the lesion. For this reason, the best way to increase the success rate of the operation is that the needle tip should access 3-dimensionally to the operating field as soon as possible. To achieve this aim, our studies are restricted as follows: 1) the SMA catheter design to control the 3-dimensional direction, 2) the security of the immediate response by the positive control of the SMA element thermal distribution using Peltier thermoelectric elements, 3) the acquisition of the control data by monitoring the relationship between the temperature of SMA element and the displacement, and 4) the design of the controller to guarantee the accurate location.

### 1. 서 론

최근 차세대 액츄에이터로 각광받는 압전세라믹(PZT), 전기작동형 폴리머(electroactive polymer), 공기근육 액츄에이터(air muscle actuator), 형상기억합금(이하, SMA) 등은 기존 모터방식의 전기기계적 액츄에이터(electromechanical actuator)에 비해

높은 에너지 집적도, 경량화, 간단한 구조 등의 장점으로 인해 차세대 의료기기 시장을 크게 변화시킬 것으로 기대된다.<sup>(1)</sup> 특히 SMA를 이용한 액츄에이션 방식이 차세대 의료기기 시장을 선도할 중요한 기술이라 판단하는 이유는 인간의 손 동작과 같은 유연성과 부드러운 움직임을 구현할 수 있어서 시술자의 섬세한 최소침습 테크닉을 그대로 인체내 병변치료에 적용할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 그러나 현재까지도 SMA 액츄에이터가 상용화에 크게 성공을 거두지 못한 이유는 SMA 고유의 히스테리시스(hysteresis)와 같은 비선형적 동특성이 단점으로 해결되지 못하고 있기 때문이다. 이러한 SMA의 히스테리시스에 대한 한계성을 극복해줄 수 있는 방안으로 본 연

<sup>†</sup> 회원, 고려대 공학기술연구소 / Triple-C Medical Corp.

E-mail : woong25@korea.ac.kr

TEL : (02)944-6844 FAX : (02)944-6842

\* (주)트리플씨메디칼 (Triple-C Medical Corp.)

\*\* 고려대학교 의과대학 정형외과

\*\*\* 안동대학교 기계교육과

구자들은 펠티어 효과 (Peltier effect)를 이용한 열전소자를 SMA 카테터에 결합하는 구조를 고안하게 되었다. 1834년 Peltier에 의해 처음 소개된 본 기술은 Herring<sup>(2)</sup>에 의해 반도체 재료의 특성에 대한 기초연구와 반도체의 열기전력에 대한 연구로 급격히 발전하였고, Fig. 1과 같은 열전소자의 기본구조가 완성되었다. 이후 Mathiprakasam 등<sup>(3)</sup>은 열전 냉동기에 반도체 열전체를 이용한 냉난방 제어를 연구하였고, Shewen 등<sup>(4)</sup>은 펠티어 효과를 이용한 열플럭스 측정 시스템의 연구 등을 수행하였다. 국내에서 수행된 연구는 Park<sup>(5)</sup>의 열전 반도체를 이용한 소형 열펌프의 개념설계, Yoon 등<sup>(6)</sup>의 열전소자를 이용한 무수 컨테이너 개발, Woo 등<sup>(7)</sup>의 열전소자를 이용한 발전기 등이 있다. 열전소자 시스템은 소형 경량 구조가 가능하고 소음이 없으며 냉매를 필요치 않으므로 의료기기에 적용가능하다. 최근 본 연구자는 상기 열전소자 시스템을 SMA 컨트롤 기법과 결합하여 Table 1과 같은 2건의 SMA 카테터 특허를 출원하였다. SMA 액츄에이팅 기술을 이용하여 카테터를 제어하는 방식은 액츄에이터의 구동부에 해당하는 SMA와 펠티어 열전소자가 융합된 니들팁 파트의 무게당 힘발생 비율, 에너지 집적도, 제어기술 등에 의해 그 완성도가 결정된다. 따라서 본 연구에서는 첫 번째 기초연구로 자체 개발한 열전소자의 전기적 열적 특성을 평가하기 위해 1) 연속전류의 단계적 전류증가에 따른 온도변화, 2) 불연속 정전류 역전류에 따른 온도변화를 평가하고 고찰하였다.

## 2. 펠티어 열전소자의 재설계 및 실험방법

현재 상용화 되어 있는 열전소자는 열전재료인 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>에 소량의 불순물을 첨가하여 전자가 정상보다 많은 Negative type(이하, N형) 반도체와 전자가 정상보다 적은 Positive type(이하, P형) 반도체를 Fig. 1과 같이 배열한 것이다. 전압이 가해지면 에너지 레벨이 낮은 P형 반도체에서 에너지 레벨이 높은 N형 반도체로 전자가 이동하고, Fig. 1의 외측 세라믹 평판에 각각 흡열과 발열이 발생한다. 세라믹 평판에서 흡·발열되는 열은 펠티어 계수와 N형 P형 반도체 사이에 반도체에 흐르는 전류에 의해서 결정된다. 전류의 세기가 증가하면 펠티어 효과도 증가하여 세라믹 소자의

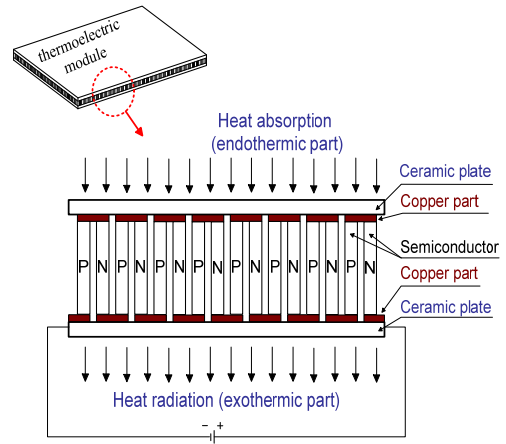


Fig. 1 Principle of thermoelectric module

Table 1 Patents of SMA catheter with thermoelectric module by authors

Patent application number	Description of the patent	Submission date	Inventor and applicant
10-2007-0031529	Guide for Inserting Surgical Appliances into Living Body	2007.03.30	Kim, C. W.
10-2007-0060491	Surgical Appliance for Insertion into in-Vivo	2007.06.20	Kim, C. W. and Kim, H. G.

$\Delta T$ 와 전도열이 증가한다. 전류값이 지속적으로 증가하여 주열열이 우세해지면 전류의 증가는 더 이상 흡열량을 증가시키지 못하여 냉방효과를 저하시키므로  $I_{max}$ 을 정확히 파악해야한다.<sup>(8)</sup> 본 연구에서는 이상의 고전적 열전소자의 구조를 Fig. 2와 같이 SMA 카테터에 적용 가능하도록 개발하였다. 상용화된 열전모듈의 패턴은 127쌍의 열전 P-N 반도체 쌍이 직렬로 연결되어 하나의 소자를 구성하므로 하나의 P-N 반도체 구성이 손상되면 전체모듈이 구동할 수 없다. 따라서 본 실험에서는 Fig. 2(a), (b), (c)에 제시한 열전소자 패턴을 실험에 용이하게 단순화하고, 흡열부와 발열부만을 지점에서 측정 가능하도록 재설계하여 T1과 T2를 각각 발열 흡열 접점으로 정의하였다. 사용된 실험장비로, Programmable DC power supply는 ODA사의 OPE-505S, Thermometer datalogger는 EXTECH Instrument사의 EasyView<sup>TM</sup>15, Oscilloscope는 Tektronix사의 TDS-2022B를 사용하였다. 온도변화는 전기에 비해 반응속도가 매우 느리므로 data sampling rate는 1/sec로 적용하였다.

### 3. 펠티어 열전소자의 냉각이론

열전소자 모듈의 냉각능력(흡열량,  $Q_c$ )은 카테터 니들팁 부위를 원하는 온도까지 급속하게 냉각시키는 능력을 결정짓는 요소로서 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Q_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T \quad (1)$$

식 (1)에서 우변 1항은 펠티어 효과에 의한 흡열량, 2항은 Joule 효과(전류흐름)에 의한 열량, 3항은 열전도계수( $K$ )와  $\Delta T$ 의 곱으로 고온부( $T_h$ )에서 저온부( $T_c$ )로 전도되는 열전달량, 즉 흡열부에서 발열부로 이동하는 열중 일부가 다시 흡열부로 전도되는 열을 의미한다. 열전소자 모듈을 작동 시키는데 필요한 인가전력( $P_{in}$ )은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} P_{in} &= (\alpha \Delta T + IR) I \\ &= \alpha I(T_h - T_c) + I^2 R = VI \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 우변 1항은 P-N 접합부의 온도차에 의해 발생된 기전력을 의미하는 제베크효과(Seebeck

effect)에 의한 전력소모량, 2항은 전기저항에 의한 전력소모량이다. 1항과 2항의 합이 총소요전력량( $VI$ )이다. 식 (1)과 (2)로부터 식 (3)과 같은 성능계수(COP)를 구할 수 있다.

$$COP = \frac{Q_c}{P_{in}} = \frac{\alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T}{\alpha I(T_h - T_c) + I^2 R} \quad (3)$$

한편, SMA 카테터 니들팁을 형상기억온도 이하로 급냉하여 SMA의 유연성을 부여하기 위해서는 식 (4)와 같이 흡열량을 정의한다.

$$Q_c = Q_{active} + Q_{passive} \quad (4)$$

식 (4)에서  $Q_{active}$ 는 냉각장치에 의해 발생하는 열로 전력 입력량( $VI$ )같고,  $Q_{passive}$ 는 식 (5)와 같이 3가지 발생열로 구성된다.

$$Q_{passive} = Q_{conduction} + Q_{convection} + Q_{radiation} \quad (5)$$

식 (5)에서  $Q_{conduction}$ 은 전선 등에 의해 냉각측에서 외부로 열이 방출되는 것이고,  $Q_{convection}$ 은 외부와

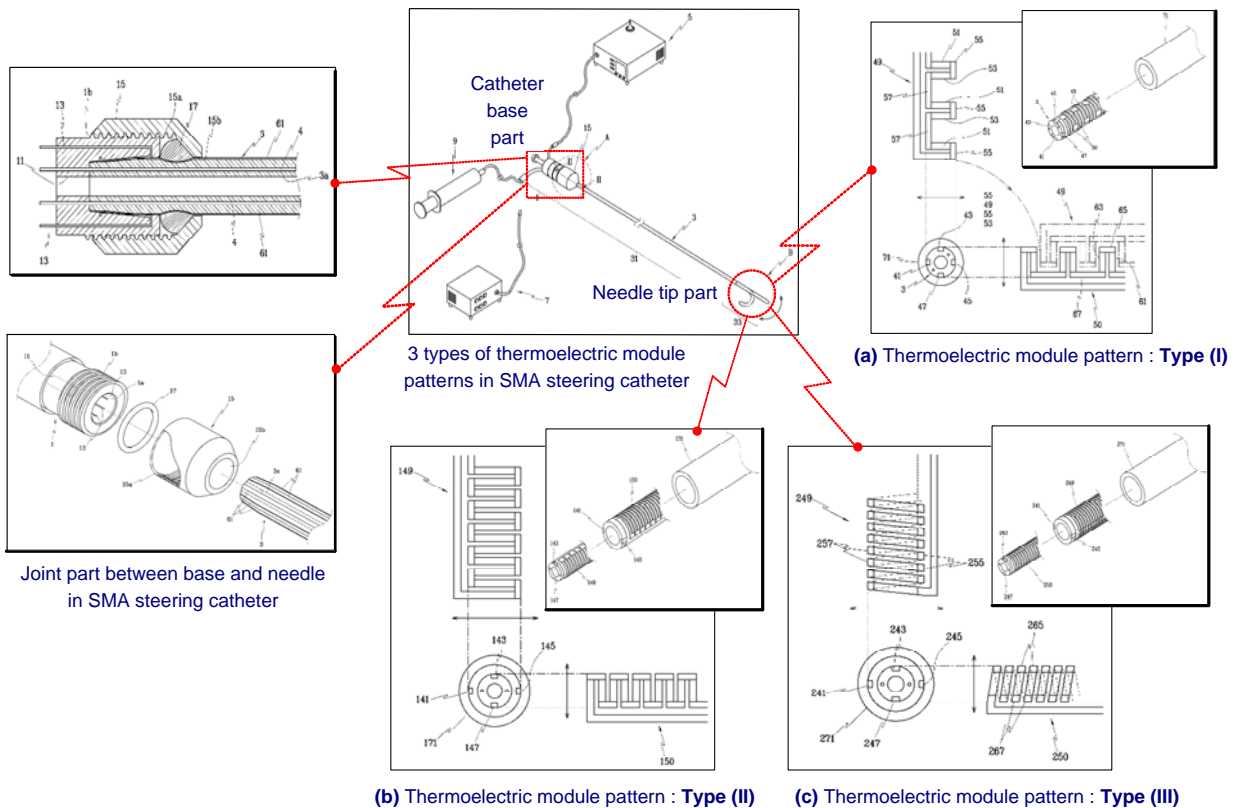


Fig. 2 Patent pictures of the steerable SMA catheter combined three different patterns of thermoelectric module

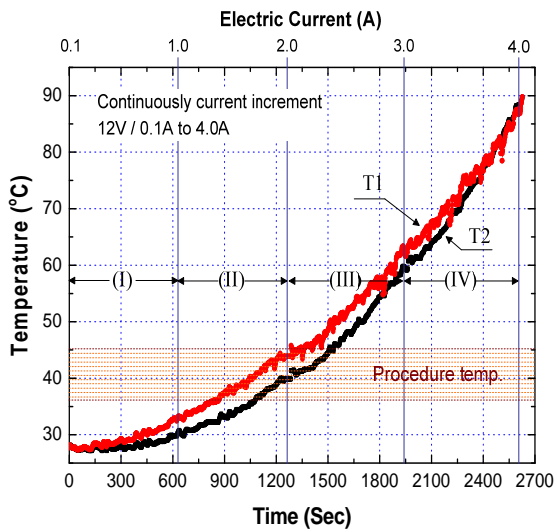


Fig. 3 Relationship between temperature and time on the consecutive current increment in the thermoelectric module

냉각측(흡열측) 사이에서 온도차에 의해 발생하는 열량이고,  $Q_{radiation}$ 은  $Q_{active}$ 가 작거나  $\Delta T$ 가 클 때 또는 진공상태에서 고려해야하는 인자이다. 이상은 각각 식 (6), (7), (8)과 같다.

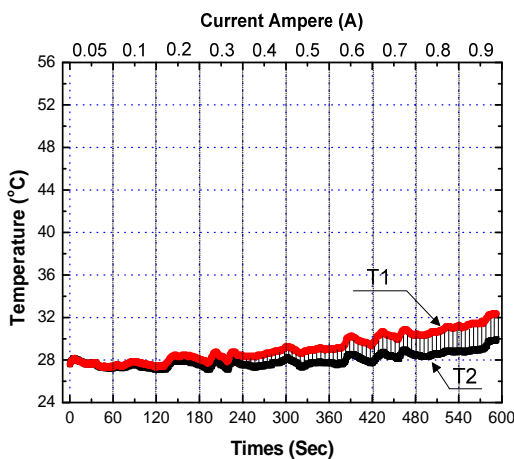
$$Q_{conduction} = KA \frac{DT}{X} \quad (6)$$

$$Q_{convection} = hA(T_{amb} - T_c) \quad (8)$$

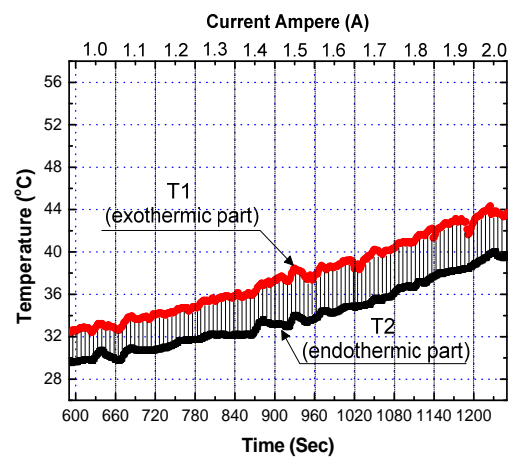
$$Q_{radiation} = \sigma A \epsilon (T_{amb}^4 - T_c^4) \quad (9)$$

#### 4. 펠티어 열전소자의 온도변화 특성

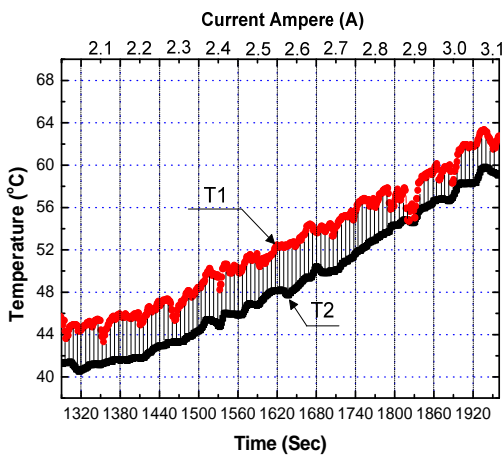
4.1 연속전류의 단계적 전류증가에 따른 온도변화  
본 절에서는 공급전압 DC=12V 조건에서 0.1A 부터 4.0A로 전류를 60초 단위로 0.1A씩 연속증가



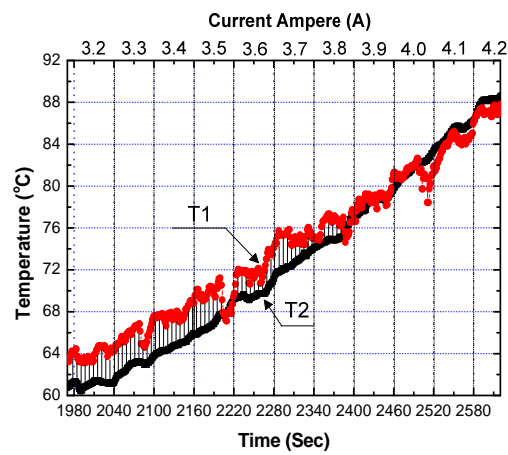
(a) Region (I) : 12V, 0.05A to 0.9A



(b) Region (II) : 12V, 1.0A to 2.0A



(c) Region (III) : 12V, 2.1A to 3.0A



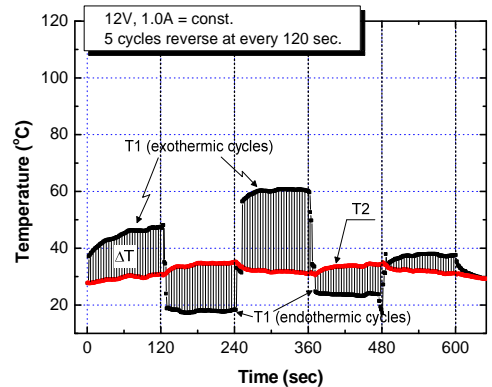
(d) Region (IV) : 12V, 3.2A to 4.2A

Fig. 4 Detail of four regions on the relationship between temperature and time in the case of DC=12V, consecutive current increment equal to 0.1A ~ 4.2A

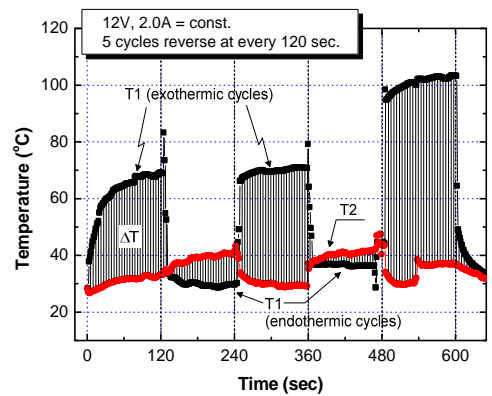
증가시킬 때 열전소자의 발열부(T1) 및 흡열부(T2)에서의 온도변화를 관찰하였다. Fig. 3에 제시한 바와 같이 전류가 증가할수록 서서히 온도가 증가하는 2차곡선을 나타내었다. 온도 범위는 실온 29°C부터 90°C까지 꾸준히 증가하였고, 1.0A 이상부터는 온도증가 속도가 빨라졌다. 60초단위로 일정 전류량을 유지하며 0.1A씩 증가시킬 경우 초기 예상되었던 계단식 증가곡선은 나타나지 않았다. Fig. 3을 Region 별로 자세히 살펴보면 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 Fig. 3의 Region(I)에 해당하는 구간으로 전류량 0.1A부터 1.0A까지를 자세히 도시한 그래프이고, Fig. 4(b),(c),(d)는 Fig. 3의 Region(II),(III),(IV)를 각각 나타낸 그래프이다. Region 간에 정확한 비교를 위해 Fig. 4의 모든 그래프의 x-y-축 스케일은 동일하게 적용하였다. Fig. 4를 자세히 살펴보면, 1) 동일 전류량 내에서 온도는 불규칙적인 패턴으로 꾸준히 변화하며 지속적인 상승을 나타내었고, A가 증가할수록 온도 상승 구배가 커졌다. 2) 0.4A 이상부터  $\Delta T$ 가 나타나기 시작해서 Region(II),(III)인 1.0A~3.0A에서  $\Delta T_{max}$ 가 나타났다. 그러나 Region(III)부터는 T1의 온도변화 구배가 매우 불규칙하여 2.1A 이상에서는 별도의 온도 컨트롤 장치가 필요함을 느꼈다. 3) SMA 카테터가 인체 내에서 실제 적용되는 온도대인 Region(II)에서는 비교적 안정한 곡선이 나타났으나, 인체에 적용하기 위해서는 더욱 정밀한 온도 컨트롤을 위한 장치가 필요하다. 4) Fig. 4(a)~(d)는 각각 다른 기울기의 1차곡선으로 표현이 가능하다. 즉, Region(I)에서 (IV)까지 구간별로 각각 다른 비례상수가 적용될 수 있다. 향후 Fig. 4의 결과를 이용하여 식 (1)부터 (9)까지 제시한 열전소자 이론과 접목하여 본 열전소자의 각종 상수들을 유도할 예정이다.

#### 4.2 불연속 정전류 역전류에 따른 온도변화

본 절에서는 SMA 카테터 시술시 실제 적용가능한 12V, 1.0A 조건과 12V, 2.0A 조건에서 120초 단위로 정전류와 역전류를 통할 경우, 열전소자 T1과 T2의 온도변화 거동을 관찰하였다. Fig. 5에 제시된 바와 같이 Fig. 3, Fig. 4의 연속전류의 단계적 증가에 따른 온도변화 거동과는 확연히 다른 온도변화 거동을 나타냈다. 그 내용을 자세히 살펴보면, 1) 12V, 1.0A에서  $\Delta T_{max}$ 는 대략 30°C 정도 나타났고, 12V, 2.0A 조건에서  $\Delta T_{max}$

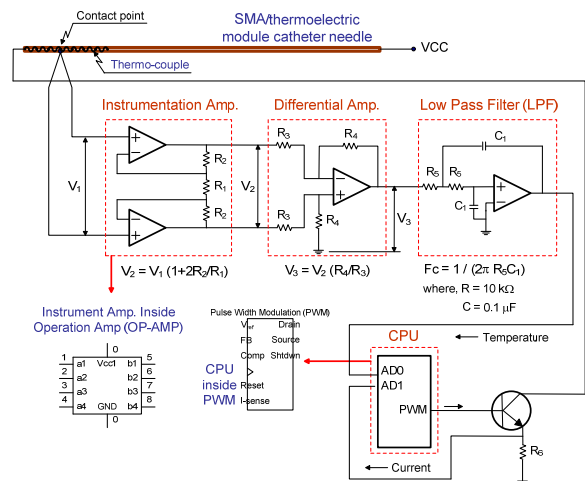


(a) 12V, 1.0A = const. / 5 cycles reverse at every 120 sec.



(b) 12V, 2.0A = const. / 5 cycles reverse at every 120 sec.

**Fig. 5** Relationship between temperature and time on the cyclic reverse current each 120 second



**Fig. 6** Circuit diagram for automatic temperature control to site of T1 and T2

는 무려 70°C 정도 나타났다. 2) 동일한 전압(V), 전류(A) 조건에서 120초씩 정전류와 역전류를 통할 경우, 각 구간별  $\Delta T$ 는 일정해야하나 구간마다  $\Delta T$ 는 다르게 나타났다. 특히, 2.0A 조건인 Fig. 5(b)에서는 정전류와 역전류의  $\Delta T$ 가 매우

크게 나타났다. 3) T1과 달리 T2는 1.0A(Fig. 5(a))에서는 온도변화가 거의 나타나지 않았고, 2.0A(Fig. 5(b))에서의 온도변화는 10°C 내외로 미약하게 나타났다. 4) Fig. 5(a)(b)에서 T1은 A가 일정한 동일구간 내에서도 불규칙한 변화를 나타냈다. 온도변화 폭 또한 1.0A보다 2.0A에서 더 크게 나타났다. 5) 2.0A(Fig. 5(b))에서 정전류와 역전류의 반복횟수가 증가할수록  $\Delta T$ 는 증가하는 것으로 나타났다. 이상의 내용을 종합해보면, 본 연구팀이 자체개발한 열전소자 단순모델의 성능개선을 위해서는 별도의 온도 컨트롤러가 필요함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구팀은 Fig. 6에 제시한 바와 같이 T1과 T2를 인위적으로 실시간 온도보상하여  $\Delta T$ 의 영역까지도 시술자가 마음대로 컨트롤할 수 있는 전자회로를 설계하고 제작 중에 있다. 향후에는 본 기술을 바탕으로 SMA 카테터 니들팁의 온도환경을 시술자가 마음대로 조절할 수 있는 열전소자를 개발하고 그 시험결과를 평가·고찰할 예정이다. 또한 상용화된 열전소자와의 비교를 통하여 본 기술의 우수성 및 개선점을 검토해 나갈 예정이다.

## 5. 결 론

1) 본 연구팀이 개발한 열전소자 모듈의 연속전류 단계적 상승 실험에서 12V 조건 경우, 0.4A 이상부터  $\Delta T$ 가 나타나기 시작해서 1.0A~3.0A 조건에서  $\Delta T_{max}$ 가 나타났다. 그러나 2.0A 이상부터는 T1의 온도변화 구배가 매우 불규칙하여 별도의 온도 컨트롤러가 필요함을 알 수 있었다.

2) 12V, 0.1A~4.0A 조건에서 0.1A 단위로 단계적 상승 실험결과, 구간별로 각각 다른 비례상수를 적용해야한다.

3) 12V, 1.0A 및 12V, 2.0A 조건에서 120초씩 정전류 역전류 반복시험을 수행한 결과, 각 구간별  $\Delta T$ 는 다르게 나타났다. 또한, 12V, 1.0A에서  $\Delta T_{max}$ 는 30°C 정도로 나타났고, 12V, 2.0A 조건에서  $\Delta T_{max}$ 는 무려 70°C 정도로 나타났다.

4) 12V, 1.0A 조건의 정전류 역전류 반복시험에서 T2의 온도변화는 거의 나타나지 않았고, 2.0A에서 T2는  $\Delta T=10^\circ\text{C}$  내외로 미약하게 나타났다. 또한, T1은 A가 일정한 동일구간 내에서도 불규칙한 변화를 나타냈고, T1의 온도변화 폭도 1.0A보다 2.0A에서 더 크게 나타났다.

이상의 내용을 종합한 결과, 본 연구팀이 자체 개발한 열전소자 단순모델은 성능개선을 위한 컨트롤러가 절실히 필요함을 파악할 수 있었다. 따라서 T1, T2를 실시간 온도보상하여  $\Delta T$ 를 시술자가 인위적으로 컨트롤할 수 있는 전자회로를 현재 설계·제작 중이다.

## 후 기

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-314-D00003)

## 참고문헌

- (1) Safak, K. K. and Adams, G. G., 2002, "Modeling and Simulation of an Artificial Muscle and its Application to Biomimetic Robot Posture Control," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 41, No. 3, pp. 225-243.
- (2) Herring, C., 1954, "Theory of the Thermoelectric Power of Semiconductors," *Phys. Rev.*, Vol. 96, No. 5, pp. 1163-1187.
- (3) Mathiprakasham, B and Sutikno, T., 1984, "Analytical Model for Predicting the Performance of Cross-Flow Thermoelectrical Liquid Coolers," *Proceeding of 5th Int. Conf. on Thermoelectric Energy Conversion*, The Univ. of Texas, pp. 75-79.
- (4) Shewen, E. C., Hollands, K. G. T. and Raith, G. D., 1989, "The Measurement of Surface Heat Flux Using the Peltier Effect," *Trans. ASME J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 798-803.
- (5) Park, Y. M., 1993, "Thermodynamic Performance Analysis of Heat Pump Using Thermoelectric Semiconductor," *Energy Eng. Journal*, Vol. 2, No. 1, pp. 95-103.
- (6) Yoon, T. B., Kim, N. J., Lee, J. Y. and Kim, C. B., 2000, "Development of a Waterless Container Utilizing Thermoelectric Modules for Live Fish Transportation," *International Journal of KSME*, Vol. 12, No. 5, pp. 519-524.
- (7) Woo, B. C., Lee, H. W. and Suh, C. M., 2002, "Characteristic of Electric Generation for the Water Flow Rate in Thermoelectric Generator Using Water," *Trans. of KSME(B)*, Vol. 26, No. 10, pp. 1333-1340.
- (8) Choi, H. S., Kim, Y. S., Jeon, C. H. and Yun, S. K., 2004, "Hot and Cool Temperature Control of the Car-Seat Utilizing the Thermoelectric Device," *Trans. of KSME(B)*, Vol. 28, No. 5, pp. 518-525.