

## 論文

## 복합재료 스트립과 스프링을 갖는 형상기억합금 작동기의 거동

허석\*, 황도연<sup>+</sup>, 최재원<sup>\*\*</sup>, 박훈철<sup>\*\*\*</sup>, 구남서<sup>\*\*\*</sup>

## Behavior of a Shape Memory Alloy Actuator with Composite Strip and Spring

Seok Heo<sup>\*</sup>, Do-Yeon Hwang<sup>+</sup>, Jae-Won Choi<sup>\*\*</sup>, Hoon-Cheol Park<sup>\*\*\*</sup> and Nam-Seo Goo<sup>\*\*\*</sup>

## ABSTRACT

This paper presents an experimental approach to design a bending-type actuator by using a shape memory alloy wire (SMA), composite strip, and spring. The SMA wire is attached to two edges of the bent strip to apply pre-stress to the SMA wire. The spring is used to provide recovery force right after actuation of the SMA wire. To investigate thermo-mechanical characteristics of the SMA wire, a series of DSC tests have been conducted and tensile tests under various levels of pre-stress and input power have been performed. Based on the measured properties of the SMA wire, bending-type actuators are designed and tested for different combination of strip, number of springs, and input power. It has been found that a bending-type actuator with a proper combination shows fast actuation performance and low power consumption.

## 초 록

이 논문은 형상기억합금 선재를 이용한 굽힘 작동기의 실험적인 설계방법을 다루고 있다. 제안된 굽힘 작동기는 유리섬유 프리프레그를 이용하여 만든 스트립, 스프링 그리고 형상기억합금 선재로 구성된다. 굽힘 작동기에서 스트립은 초기에 형상기억합금 선재에 초기하중을 가하기 위하여 굽힘 형태로 고정되며, 스프링은 형상기억합금 선재가 작동 후 빠른 시간내에 초기 형상으로 돌아오기 위한 보조수단으로 사용된다. 먼저 형상기억합금 선재의 특성을 알아보기 위하여 시차주사열량계(DSC)를 이용한 실험, 여러 종류의 초기 하중을 가한 후 작동 성능 실험, 인장 시험, 온도 변화에 따른 기계적 거동을 조사하였다. 이를 바탕으로 스트립, 스프링, 인가 전압에 의한 영향을 관찰하고 소모전력을 분석하여 굽힘 작동기를 설계하였다. 특정 조건을 갖는 굽힘 작동기는 낮은 소모전력으로 빠른 응답성능을 나타내었다.

**Key Words** : 형상기억합금(shape memory alloy), 상변태(phase transformation), 굽힘 작동기(bending actuator)

## 1. 서 론

지능형 재료(smart materials)는 최근 수십 년 사이에 구조물의 능동 또는 수동제어에 대한 공학적 응용 부분에서 대단히 큰 기대를 불러왔으며 많은 연구들이 행하여졌다. 이러한 재료들에는 압전세라믹(piezoelectric material), 형상기억합금

(shape memory alloys), 전기유변유체(electrorheological fluid), 자기유변유체(magnetorheological fluid)등이 있다. 이들 중 형상기억합금은 기계적 거동에 있어서 매우 흥미로운 성질을 갖고 있는 지능재료이다. 형상기억합금의 열-기계적 특성은 재료(마르텐사이트, 오스테나이트의 상변화)와 관련되는데, 이것은 재료의 온도와 내부응력과 관계된다. 형상기억합금은 특정조

\* 건국대학교 인공근육연구센터

<sup>+</sup> 건국대학교 인공근육연구센터, 교신저자(E-mail:hikari1542@hanmail.net)<sup>\*\*</sup> 수원대학교 공학교육혁신센터<sup>\*\*\*</sup> 건국대학교 신기술융합학과교수

건하에서 나타나는 형상기억효과(shape memory effect)와 초탄성(superelasticity)거동을 가지고 있다. 대부분 형상기억합금의 응용은 형상기억효과를 이용한 것으로 형상기억합금의 특성을 이용한 작동기의 제작, 설계방법, 모델링을 위한 연구들이 진행되고 있다.

형상기억합금이 로봇 작동기로 사용된 연구로서 Ikuta[1]는 초소형 형상기억합금 서보 작동기를 위한 제어방법을 제안하였다. Reynaerts[2]등은 다수의 손가락이 있는 로봇 손의 작동기로 형상기억합금을 이용한 다수의 설계방법을 연구하였다. Huang[3]은 형상기억합금 즉, NiTi, CuZnAl, CuAlNi를 작동기로 선정하기 위한 일련의 실험결과를 이용하여 설명하였다. Fukuda[4]등은 얇은 판에 형상기억합금을 평행하게 나열하여 만든 작동기를 사용하고, 각각의 형상기억합금을 조작하여 인위적인 파형을 만들어서 물속에서 추진력을 얻기 위한 물고기 지느러미와 같은 움직임을 보였다.

또한, 형상기억합금의 모델링에 대한 연구가 활발히 이루어졌는데 대표적으로, Brinson과 Huang[5]은 형상기억합금의 모델에 관하여 Tanaka[6]의 일 차원 모델과 Liang과 Rogers[7]에 의해 수정된 모델 그리고 Brinson[8]에 수정된 모델사이의 관계를 소개하고 예를들어 검증하였다. Zak[9]등은 Tanaka, Liang과Rogers, Brinson의 모델을 다시 검증하고 발표하였다. Dutta[10]등은 스프링에 의해 초기응력이 부가된 형상기억합금에 전류량의 변화를 이용하여 작동시키는 수치 모델을 제안하였다. Shu[11]등은 형상기억합금이 포함된 유연 보의 거동을 예측하기 위한 열-기계 모델을 제안하였다. 이들은 보에 포함된 형상기억합금의 작동력을 형상기억합금내에서 열전도에 관한 식과 보의 구조식을 관한 연성문제를 풀어 평가하였다. 양승만[12]등은 복합재 구조물에 대한 형상기억합금 선을 이용한 능동형상제어에 관한 연구를 수행한 바 있다.

이러한 다양한 연구성과에도 불구하고, 형상기억합금이 로봇기구의 응용에 성공적이지 못한 것은 느린 반응 속도와 높은 전력 소모량 때문이다. 본 연구에서는 형상기억합금 선재를 유리섬유적층판(스트립) 및 스프링과 조합하여 작동속도가 빠르고 전력 소모를 낮출 수 있는 작동기를 설계 제작하고 작동 성능을 검토하였다. Fig. 1은 작동기의 개략도를 보여준다.

작동기의 설계를 위하여 우선 비 응력하에서 형상기억합금 선재의 상변이 온도를 시차주사열량계(DSC)를 이용하여 관찰하였고, 인장시험을 수행하여 형상기억효과와 초탄성거동을 예측하였으며, 주변 온도 변화에 따른 형상기억합금 선재의 변형률을 관찰하였다.

또한, 여러 종류의 하중을 형상기억합금 선재에 인가하여 줄 가열(Joule heating)에 의한 작동성능을 예측하였다. 이러한

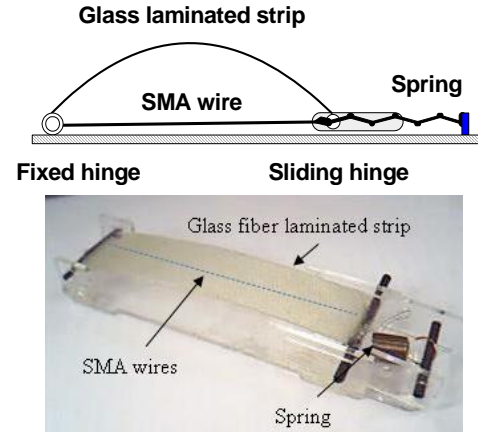


Fig. 1 Schematic diagram of bending actuator.

결과를 바탕으로 굽힘 작동기의 설계를 위한 유리섬유적층판의 두께, 형상기억합금의 길이, 스프링의 효과 등을 관찰하고 인가전력에 대한 작동성능을 비교하여 보다 효율적인 조합을 찾아 최종적인 굽힘 작동기를 설계하였다.

제안된 굽힘 작동기는 유리섬유적층판을 사용하여 끝부분에 형상기억합금 선재를 고정시키고, 보의 구조조건을 고정-자유로 만든 뒤 자유단에 스프링을 걸어서 형상기억합금 선재에 초기 응력 조건을 부가하였다. 따라서, heating/ cooling시에 유리섬유적층판의 중앙지점이 상하로 움직이는 거동을 보여지게 된다. 굽힘 작동기는 유리섬유적층판, 스프링, 형상기억합금 선재, 아크릴프레임으로 구성된다. 외부에 연결된 형상기억합금 선재의 거동은 유리섬유적층판의 내부에 위치하는 것보다 작동력이 우수하고, 자연적인 대류 작용에 의해 형상기억합금 선재의 cooling에도 도움이 된다. 이 연구에서는 초기에 잔류 응력을 유리섬유적층판과 스프링을 사용하여 일방향 형상기억합금 선재에 부가하여 굽힘 작동기를 설계하기 위한 몇 가지 실험적인 방법을 통하여 설계변수를 찾는 뒤 그 성능을 작동력과 소모전력을 통하여 비교평가 하였다. 개발된 굽힘 작동기는 물고기 로봇의 작동기로 사용할 예정이다.

## 2. 형상기억합금 선재의 열-기계적 특성

### 2.1 시차주사열량계(DSC)

비 응력하에서 형상기억합금 선재의 상변이 온도를 관찰하기 위하여 시차주사열량계(differential scanning calorimeter, 2010 DSC V4.4E, TA Instrument, USA)를 이용하였다. 실험에 사용된 형상기억합금의 중량은 4.44mg이며  $-20^{\circ}\text{C}$ 에서  $80^{\circ}\text{C}$ 의

Table 1 Transformation temperature by DSC

Phase	$M_s$	$M_f$	$A_s$	$A_f$
Temperature(°C)	27	13	35	55

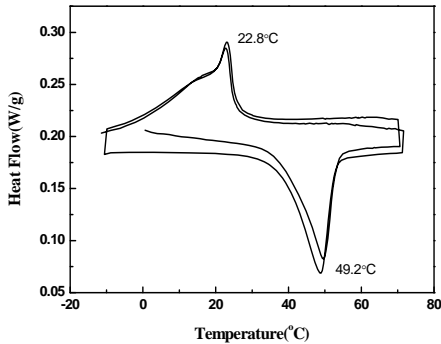


Fig. 2 Heat flow curves of SMA wire by DSC.

범위를 5°C/min의 온도변화율로 형상기억합금 선재에 가열과 냉각을 2회 수행하였다. 오스테나이트 시작온도( $A_s$ )와 오스테나이트 끝온도( $A_f$ )사이의 상변태 에너지는 10.6J/g이고, 마르텐사이트 시작온도( $M_s$ )와 마르텐사이트 끝온도( $M_f$ )사이의 상변태 에너지는 7.46J/g이었다.

Table 1과 Fig. 2는 측정된 형상기억합금선재의 상변태 온도와 열흐름 선도를 보여준다.

2.2 부가하중에 의한 형상기억합금의 거동

이 연구에서는 일방향 효과를 갖는 형상기억합금 선재를 사용하였다. 일방향 효과의 특성은 형상기억요소 가 열을 받을 때만 형상회복이 발생한다는 점이다. 이때 온도가 떨어져도 형상변형이 발생하지 않는다. 따라서, 차가워진 형상기억요소는 열이 가해질 때와 같은 형상 변형을 얻기 위해서는 외부에서 강제적인 힘이 가해져야만 한다[13].

먼저, 사용하고자 하는 형상기억합금 선재의 성능을 알아보기 위하여 다양한 하중과 인가전력을 이용하여 작동변위를 측정하였다. Fig. 3의 실험에 사용된 형상기억합금 선재의 지름과 길이는 0.1mm, 100mm이고, 각각의 하중이 인가된 상태로 반복적인 실험에 따른 온도 상승으로 인한 선재의 길이 변형이 발생하지 않는 상태에서 레이저센서를 이용하여 작동변위를 측정하였다.

형상기억합금 선재는 양단에 전압/전류를 가할 수 있는 단자에 고정시켜서, 한쪽 끝은 고정단 다른 끝은 50~300g의 추를 반사판과 연결하여 자유단으로 만들었다. 작동방법은 형상

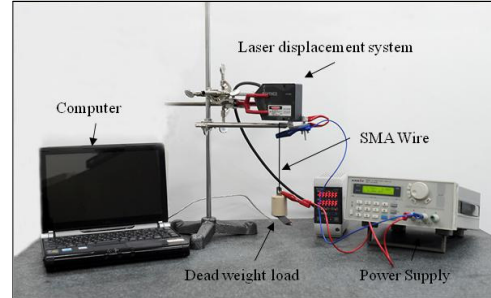


Fig. 3 Experimental setup for performance of a SMA wire with dead weight.

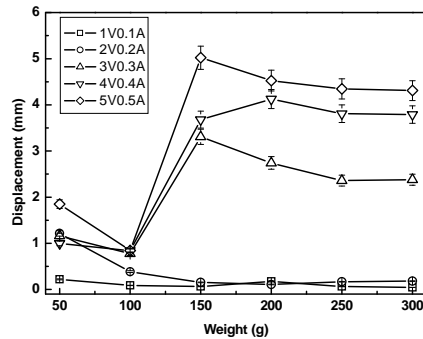


Fig. 4 The experimental results of a SMA wire for various dead weights and input powers.

기억합금 선재에 전기적인 저항으로 인한 줄 가열이 발생하는 동안 내부온도가 상승하여 추를 들어올리면서 길이가 수축하고, 냉각시에는 인가전력을 차단한 뒤에 주위온도에 의한 자연적인 온도감소와 추의 무게에 의한 초기위치 회복을 이루도록 하였다. 이 실험으로부터 부가된 추에 따른 초기 잔류 응력과 인가된 전력에 대한 형상기억합금 선재의 작동변위를 확인할 수 있다.

Fig. 4는 서로 다른 부가하중이 작용할 때 인가전력에 대한 형상기억합금 선재의 작동변위를 보여준다. 부가하중과 인가전력이 바뀔 때 마다 새로운 형상기억합금 선재를 사용하였다. 주목할 점은 부가하중이 100g인 경우 모든 인가전력에 따른 작동변위가 다른 부가하중들에 비하여 작다는 점이다. 그 이유를 알기 위해 밀폐된 heat chamber안에서 형상기억합금의 주변온도를 상승시켜 응력을 부가하는 방법을 이용하여 차후 실험을 통하여 주위환경 온도에 따른 형상기억합금 선재의 응력-변형률 관계를 알아볼 계획이다.

150g의 경우 인가전압과 전류가 3V, 0.3A이상일 때 작동변위의 경향이 유사한 결과를 보여준다. 특히, 3V, 0.3A의 경우와 4V, 0.4A인 경우는 150의 하중이 인가될 때 작동변위가 큰 차이를 보이지 않지만 5V, 0.5A인 경우 작동변위의 차이를 알 수 있다.

250g 이상일 때, 인가전력에 대하여 추의 무게와 관련 없이 일정한 작동변위를 보여준다. 인가전력이 클수록 작동변위가 크게 발생하지만 선재내부에 급격한 온도상승이 발생하고 부가하중에 따라 다른 특성을 보이는 것에 주목할 필요가 있다. 따라서, 작은 소모전력(<1W)으로 형상기억합금 선재에 초기위치로 돌아오게 하기 위한 부가하중을 150g을 사용하고, 인가전압과 전류는 3V, 0.3A를 사용하기로 한다.

### 3. 굽힘 작동기의 설계

#### 3.1 스트립과 축의 양단거리 선정

형상기억합금 선재의 응력 하 또는 비응력 하에서의 거동에 대한 대략적인 특성을 파악하였다. 이러한 결과들을 토대로, 이 절에서는 4층(4ply)과 6층(6ply)의 유리섬유가 적층된 적층판이 형상기억합금 선재와 연결되는 축의 초기 양단길이를 결정하기 위하여, 세 가지의 설정길이를 정하고 인가전력에 따른 작동변위를 관찰하여서 적절한 적층판 축의 초기 양단길이를 구하였다.

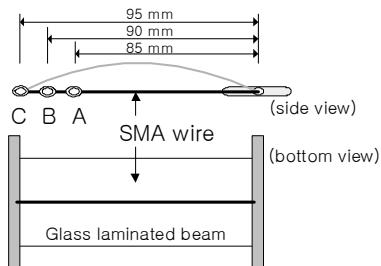


Fig. 5 Setup to determine the distance of two end hinges.

Fig. 5에서는 고정단의 위치를 A, B, C로 구분하여 스프링이 없는 상태 즉, 유리섬유적층판만이 형상기억합금 선재에 응력을 가할 때 필요한 축간 거리를 선정하기 위한 실험을 하였다. 또한 형상기억합금 선재에 초기 응력을 부여할 최적의 유리섬유적층판을 찾기 위함이다. 사용된 유리 프리-프레그는 SK chemical의 GEP108로서 두께 0.07mm이다. 제작된 스트립은 4층과 6층이며 크기는 10cm×2.5cm이다. Fig. 5의 두 축 사이의 길이는 A=85mm, B=90mm, C=95mm이다. 실험 방법은 형상기억합금 선재에 2.5, 3, 3.5, 4V의 서로 다른 전압을 1초 동안 인가하고 1초간 끄는 방법으로 25초 동안 반복 시험을 통하여 얻은 작동변위를 구하였다. 여기서, 작동변위는 반복적인 곡선을 보이는 위와 아래의 차이 값으로 정의한다.

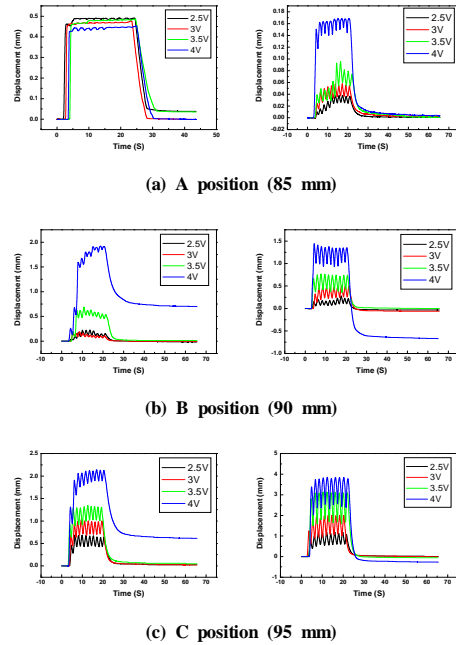


Fig. 6 Experimental results of bending actuator for the effect of distance of two hinges (Left and Right figures are for 4 and 6 layer strips, respectively).

Fig. 6에서 4층의 유리섬유적층판을 사용한 (a)와 (b)의 결과는 (c)의 결과와 비교할 때 사용된 판이 형상기억합금 선재에 과도한 초기 응력을 가해주어 반복작동변위가 매우 작은 것을 알 수 있다. (c)에서 4층(왼쪽)의 결과는 6층(오른쪽)의 결과에 비하여 충분한 작동변위를 보여주지 못하며, 각각의 인가 전압에 대하여 비교적 균일한 거동을 보이는 것은 6층을 사용한 경우이다.

#### 3.2 스트립이 형상기억합금 선재에 가하는 힘

이러한 결과로부터, 유리섬유적층판이 형상기억합금 선재에 가하는 힘을 확인할 필요가 있다. 로드셀을 이용하여 형상기억합금 선재가 부착되지 않은 순수 스트립이 발생시키는 반력 (reaction force)를 측정하였다. 축간거리는 95mm로 설정하였으며 스트립은 4층~8층을 사용하였다. Fig. 7은 개략적인 실험장치의 구성을 보여준다. Fig. 7(b)에서 5층의 유리섬유적층판을 사용할 때 약 150gr, 6층의 유리섬유적층판을 사용하는 경우 약 300gr의 반력을 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 4의 결과에서, 하중이 150g인 경우 작동변위가 가장 좋다는 것을 상기할 때, 5층의 유리적층판을 사용하는 것이 바람직하다.

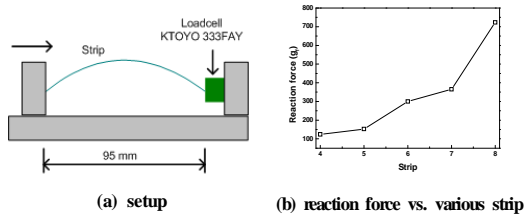


Fig. 7 Reaction force measurement for strips.

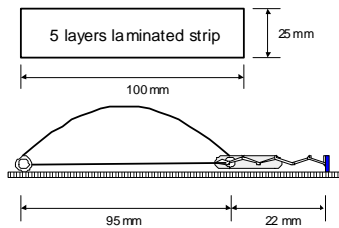


Fig. 8 Final configuration of the bending actuator with strip and spring.

3.3 스트립과 스프링을 갖는 굽힘작동기의 거동

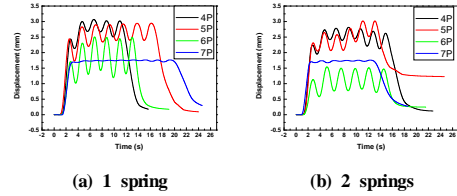
Fig. 8은 결정한 굽힘형 작동기의 초기 정보를 보여준다. Fig. 8에 사용된 스프링은 형상기억합금 선재가 수축된 후 초기위치로 돌아갈 때 스트립과 스프링의 회복력이 함께 작용하고, 스트립만을 사용할 때 보다 빠른 회복속도를 얻기 위함이다. 스프링상수  $k=30 \text{ gr/mm}$ 이고 인가된 전압과 전류는 3V, 0.27A이며 두께가 다른 스트립(4층(4ply)~7층(7ply))을 사용하여 스프링의 개수에 따른 반복작동변위를 계속하였다. 실험방법은 1초간 전력을 인가하고 1초간 끄는 방법으로 수행하였다.

1개의 스프링을 연결한 Fig. 9(a)의 경우, 7층을 사용할 때 반복작동변위가 거의 발생하지 않으며, 6층의 경우 가장 안정적인 반복작동변위를 보여준다. 2개의 스프링이 연결된 Fig. 9(b)에서도 6층의 경우가 가장 안정적인 반복작동변위를 보여주며, 3개의 스프링이 연결된 Fig. 9(c)에서는 4층을 사용한 경우가 좀더 안정적인 변위를 나타낸다.

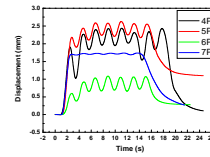
따라서, 반복작동변위가 안정적인 스프링 1개를 연결한 경우를 선택한다. Fig. 4의 결과로부터 형상기억합금 선재에 작용하는 하중의 크기는 150g일 경우 가장 좋은 작동변위를 보여준다. 따라서, Fig. 7의 결과로부터 5층의 유리섬유적층판을 사용할 때 발생하는 반력이 약150g이므로 형상기억합금 선재에 부착할 스트립은 5층의 유리섬유적층판을 사용해야 한다.

3.4 굽힘 작동기의 효율

Fig. 10은 4종류의 인가전력에 대하여 발생된 막힘 하중을 효율로 나타내어 비교한 결과를 보여준다. 여기서 효율이란

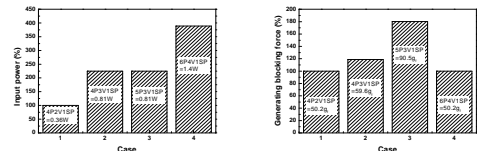


(a) 1 spring (b) 2 springs

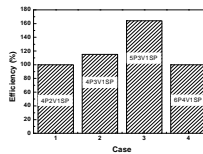


(c) 3 springs

Fig. 9 The effect of strip and spring.



(a) Input power (b) The generated blocking force



(c) The efficiency is (b) / (a)

Fig. 10 Comparison of efficiency.

단위 인가전력이 발생하는 막힘하중을 의미한다. 막대그래프 안에 나타난 정보는 예를 들어, Case 1(4P2V1SP)인 경우 4층 유리섬유적층판에 1개의 스프링을 연결하고 2V 인가전압을 가하였을 때 발생하는 (a)인가 전력, (b) 막힘 하중 그리고 (c)효율을 나타낸다. 여기서는 Fig. 9로부터 얻은 스프링 1개만이 연결된 경우를 고려하였다. Fig. 10으로부터 비교 기준이 되는 Case 1(4P2V1SP)의 경우, 0.36W를 인가했을 때 50.2g의 막힘 하중을 발생하는데, 이때의 효율이 100%라 정하였다. Case 3(5P3V1SP)의 경우, 인가전력과 막힘 하중은 0.81W와 90.5g로 Case 1과 비교하여 125%, 80% 증가하였고, 효율은 가장 높은 64%의 증가를 보였다. 인가전력과 효율면에서 Case1에 비하여Case 2(125%, 15% 증가)와 Case 4(288%, 0% 증가)를 비교하여 볼 때, Case3의 경우가 소모전력 대비 가장 효율적이라 할 수 있다.

#### 4. 결론

형상기억합금 선재와 유리섬유적층판 및 스프링을 이용한 굽힘 작동기의 설계, 제작, 작동성능 시험에 관한 연구를 통하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에 사용한 형상기억합금 선재는 DSC시험을 통하여  $A_s=35^\circ\text{C}$ ,  $A_f=55^\circ\text{C}$ ,  $M_s=27^\circ\text{C}$ ,  $M_f=13^\circ\text{C}$ 을 가짐을 확인하였고, 150g의 인가하중을 가할 때 최대 6mm의 작동 변위를 보였다.

(2) 6층의 유리섬유적층판을 95mm의 양단거리로하여 형상기억합금 선재를 연결할 때 2mm의 안정적인 반복 작동 변위가 발생한다.

(3) 5층의 유리섬유적층판을 양단거리가 95mm인 형상기억합금 선재에 연결하고 1개의 스프링을 사용하여 굽힘 작동기를 구성하였을 때, 인가전력이 0.81W(3V, 0.27A)인 경우 약 90g의 막힘 하중을 나타내었으며 64%의 증가된 효율을 나타냈다.

실험결과로부터, 형상기억합금 선재에 적용할 초기 응력의 중요성과 적절한 인가전력에 대한 영향을 알 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 학술진흥재단 중점연구소사업(KRF2006-005-J03301)가 지원하는 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 1) Ikuta K., "Micro/miniature shape memory alloy actuator," *Proceedings of Robotics and Automation*, Vol. 3, 1990, pp. 2156-2161.
- 2) Reynaerts D., and Van Brussel H., "Design aspects of shape memory actuators," *Mechatronics*, Vol. 8 No. 6, 1998, pp. 635-656.
- 3) Huang W., "On the selection of shape memory alloys for actuators," *Materials and Design*, Vol. 23, No. 1, 2002, pp. 11-19.
- 4) Fukuda T., Hosokai H., and Kikuchi I., "Distributed type of actuators by shape memory alloy and its application to underwater mobile robotic mechanism," *Proceedings of Robotics and Automation*, Vol. 2, 1990, pp. 1316-1321.
- 5) Brinson L.C., and Huang M.S., "Simplification and comparisons of shape memory alloy constitutive models," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 7, No. 1, 1996, pp. 108-114.
- 6) Tanaka K. A., "A thermomechanical sketch of shape memory effect: one dimensional tensile behavior," *Res Mech*, Vol. 18, 1986, pp. 251-263.
- 7) Liang C., and Rogers C. A., "One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 1, No. 2, 1990, pp. 207-234.
- 8) Brinson L. C., "One dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 4, No. 2, 1993, pp. 229-242.
- 9) Zak A.J., Cartmell M. P., Ostachowicz W. M., and Wiercigroch M., "One-dimensional shape memory alloy models for use with reinforced composite structures," *Smart Materials and Structures*, Vol. 12, 2003, pp. 338-346.
- 10) Dutta S., Ghorbel F., and Dabney J., "Modeling and control of a shape memory alloy actuator," *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2005, pp. 1007-1012.
- 11) Shu S.G., Lagoudas D.C., Hughes D., and Wen J.T., "Modeling of a flexible beam actuated by shape memory alloy wires," *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, 1997, pp. 265-277.
- 12) 양승만, 노진호, 한재홍, 이인, "형상기억합금 작동기를 이용한 복합재 보의 능동형상제어," 한국복합재료학회지, 제17권 제4호, 2004, pp. 18-24.
- 13) Janocha J., "Adaptronics and Smart Structures: basics, materials, design, and applications," *Springer*, Berlin, 1999, pp. 143-160.