

형상기억합금 선재를 이용한 굽힘 작동기 설계

허석[†] · 황도연* · 박훈철**

Design of Bending Actuator using Shape Memory Alloy Wire

Seok Heo, Do Yeon Hwang and Hoon Cheol Park

Key Words : Shape Memory Alloy(형상기억합금), Phase Transformation(상변태), Joule heating(줄열 가열), Shape recovery force(형상 회복력)

Abstract

This paper presents an experimental study on a bending actuator with a shape memory alloy wire. In this study, we introduced design process and experimental result of the bending actuator. The bending actuator consists of a SMA wire, springs, and a glass/epoxy strip. In the bending actuator, springs were used to restore the SMA wire to its initial shape right after actuation. To obtain properties of the SMA wire, DSC test was performed and the behavior of the SMA wire under different loadings was observed. Finally, the proposed bending actuator shows reasonable actuation behavior with relatively lower power consumption, fast response and effective efficiency.

1. 서 론

지능형 재료(smart materials)는 최근 십 년 사이 설계 특히, 구조물의 능동 또는 수동제어에 대한 공학적 응용 부분에서 대단히 큰 기대를 불러왔으며 많은 연구들이 행하여졌다. 이러한 재료들에는 압전 세라믹(piezoelectric material), 형상기억합금(shape memory alloys), 전기유변 유체(electrorheological fluid), 자기유변 유체(magnetorheological fluid) 등이 있다. 이들 중 형상기억합금은 기계적 거동에 있어서 매우 흥미로운 성질을 갖고 있는 지능재료이다. 형상기억합금의 열-기계적 특성은 재료(마르텐사이트, 오스테나이트)의 상변화와 관련되는데, 이것은 재료의 온도와 내부 응력과 관계된다. 여기에 특정조건하에서 나타나는 두 가지 현상 즉, 형상기억효과(shape memory effect)와 초탄성(superelasticity) 거동을 가지고 있다. 형상기억 효과란 온도의 범위가 오스테나이트 끝온도(A_f)와

마르텐사이트 시작온도(M_s)사이의 임의의 온도환경에서 최초 오스테나이트상에 놓여 있을 때 응력을 증가시켜 기울어진(detwined) 마르텐사이트상으로 상변이 하면서 큰 잔류응력을 얻을 수 있다. 이를 전방향 상변이(forward transformation)과정이라 하며 이때 온도를 A_f 이상으로 올려주면 재료가 오스테나이트상으로 변하면서 전방향 상변이 과정에서 발생한 잔류변형률이 소멸되어 원래의 형상으로 되돌아가게 된다. 이를 후방향 상변이(reverse transformation)과정이라고 하고, 이때 회복하는 변형률을 이용하여 큰 힘(Ni-Ti:500~900MPa)을 얻을 수 있다. 초탄성 거동은 형상기억효과의 온도범위가 아닌 A_f 보다 높은 온도환경에서 최초의 오스테나이트상에서 응력을 증가시키면 기울어진 마르텐사이트상으로 상변이하게 되고 현재환경이 고온이므로 응력을 제거시키는 과정에서 후방향 상변이가 발생하여 원래의 상으로 되돌아가는 현상을 말한다. 대부분 SMA의 응용은 형상기억효과를 이용한 것으로서 SMA의 특성을 이용한 작동기의 제작, 설계방법, 모델링을 위한 연구들이 진행되었다.

SMA가 로봇 작동기로 사용된 연구들로, Ikuda는 초소형 형상기억합금 서보 작동기를 위한 제어방

** 회원, 건국대학교 신기술융합학과

E-mail : hcpark@konkuk.ac.kr

TEL : (02)450-3531 FAX : (02)444-7091

[†], * 회원, 건국대학교 인공근육연구센터

법을 제안하였다⁽¹⁾. Reynaerts 등은 다수의 손가락이 있는 로봇 손의 작동기로 형상기억합금을 이용한 다수의 설계법칙을 연구하였다⁽²⁾. Huang은 형상기억합금 즉, NiTi, CuZnAl, CuAlNi의 작동기로 선정하기 위한 일련의 실험결과를 이용하여 설명하였다⁽³⁾. Fukuda등은 얇은 판에 형상기억합금을 평행하게 나열하여 만든 작동기를 사용하고, 각각의 형상기억합금을 조작하여 인위적인 곡형을 만들어서 물속에서 추진력을 얻기 위한 물고기 지느러미와 같은 움직임을 보였다⁽⁴⁾. 또한, SMA의 모델링에 관한 연구가 활발히 이루어졌는데 대표적으로, Brinson과Huang은 형상기억합금의 모델에 관하여 단순화하였다⁽⁵⁾. Tanaka⁽⁶⁾의 일 차원 모델은 Liang과Rogers⁽⁷⁾에 의해 수정되고, Brinson⁽⁸⁾에 의해 단순화 되었다. Zak등은 Tanaka, Liang과 Rogers, Brinson의 모델을 다시 검증하고 발표하였다⁽⁹⁾. Dutta등은 스프링에 의해 초기 응력이 부가된 형상기억합금에 전류량의 변화를 이용하여 작동시키는 수치 모델을 제안하였다⁽¹⁰⁾. Shu등은 형상기억합금이 포함된 유연 보의 거동을 예측하기 위한 열-기계 모델을 제안하였다⁽¹¹⁾. 이들은 보에 포함된 형상기억합금의 작동력을 형상기억합금내에서 열전도에 관한 열역학 식과 보의 구조식에 관한 연성문제를 풀어서 평가하였다.

여러 연구들로부터 SMA의 복잡한 비선형적인 거동을 이용하여 공학적인 응용을 하기 위해서는 재료의 해석과 설계가 필요한 것을 알 수 있다. 이러한 이유로, 이 연구에서는 실험적인 방법으로 외부에 SMA작동기가 연결된 단순한 유리 적층판을 이용하여 굽힘 작용을 할 수 있는 작동기를 설계하였다. Fig. 1은 작동기의 개략도를 보여준다.

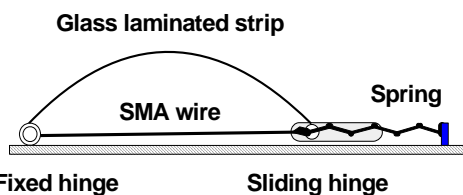


Fig. 1 Schematic diagram of a bending actuator

제안된 굽힘형 작동기는 유리 적층판을 사용하여 끝부분에 SMA선재를 고정시키고, 보의 구속조건을 고정-자유로 만든 뒤 자유단에 스프링을 걸어서 SMA선재에 초기 응력 조건을 부가하였다. 따라서, heating/cooling시에 유리 적층판의 중앙지점이 상하로 움직이는 거동을 보여주게 된다. 굽힘 작동기는 유리 적층판, 스프링, SMA선재, 아크릴프레임으로 구성된다. 외부에 연결된 SMA선재의 거동은 유리 적층판의 내부에 위치하는 것보

다 작동력이 우수하고, 자연적인 대류 작용에 의해 SMA선재의 cooling에도 도움이 된다. 이 연구에서는 초기에 잔류 응력을 유리 적층판과 스프링을 사용하여 일방향 형상기억합금에 부가하여 굽힘형 작동기를 설계하기 위한 몇 가지 실험적인 방법을 통하여 설계변수를 찾은 뒤 그 성능을 작동력과 소모전력을 통하여 비교평가 하였다.

2. SMA wire의 열-기계적 특성

이 연구에서는 일방향 효과를 갖는 형상기억합금 선재를 사용하였다. 일방향 효과의 의미는 다음과 같다. 예를 들어, 형상기억합금 스프링이 열을 받아 오스테나이트 시작온도(A_s) 온도를 지나면 형상기억재료는 오스테나이트 변태를 시작하고 코일스프링은 수축하게 된다. A_f 에 도달하게 되면, 변태는 끝나게 된다. 일방향 효과의 특성은 형상기억요소가 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. 이러한 일방향 효과를 이용하기 위해서는 조이거나 고정시키는 장치가 사용되어야 한다⁽¹²⁾.

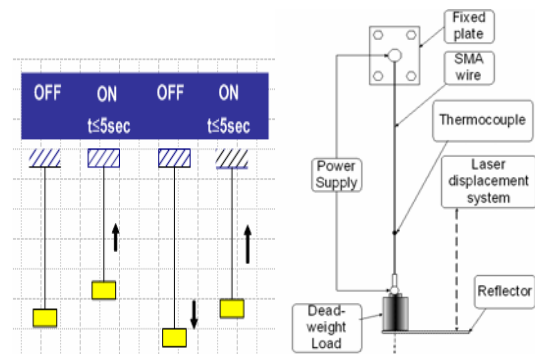


Fig. 2 Experimental setup for performance test of the SMA wire on the effect of dead weight

먼저, 사용하고자 하는 형상기억합금 선재의 성능을 알아보기 위하여 다양한 하중과 인가전력을 이용하여 작동변위를 계측하였다. Fig. 2의 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 계측하였다. 형상기억합금 선재는 양단에 전압/전류를 가할 수 있는 단자에 고정시켜서, 한쪽 끝은 고정단 다른 끝은 50~300g의 추를 반사판과 연결하여 자유단으로

만들었다. 작동방법은 형상기억합금 선재에 전기적인 저항으로 인한 줄열 가열(joule heating)이 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 잔류응력과 인가된 전력에 대한 형상기억합금 선재의 작동변위를 확인할 수 있다.

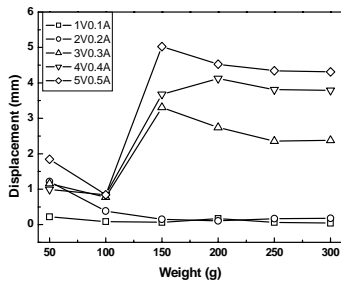


Fig. 3 The behavior of SMA wire for various loading weights and input powers

Fig. 3은 서로 다른 부가하중이 작용할 때 인가전력에 대한 SMA선재의 작동변위를 보여준다. 특징은 부가하중이 100g인 경우 모든 인가전력에 따른 작동변위가 다른 부가하중들에 비하여 작다는 점이다. 그 이유를 알기 위해서는 재료에 관한 특성실험을 수행할 필요가 있다. 150g의 경우 인가전압과 전류가 3V, 0.3A 이상일 때 작동변위의 경향이 유사한 결과를 보여준다. 특히, 3V, 0.3A의 경우와 4V, 0.4A인 경우는 150g의 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 초기 위치로 돌아오게 하기 위한 부가하중을 150g을 사용하고, 인가전압과 전류는 3V, 0.3를 사용하기로 한다.

먼저, 비응력 하에서의 형상기억합금 선재의 대략적인 상변이 온도를 관찰하기 위하여, 시차주사열량계(Differential Scanning Calorimeter, 2010 DSC V4.4E, TA Instrument, USA)를 이용하였다. 그 결과는 Fig. 4에 나타내었다. -20°C 에서 80°C 의 범위를 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 온도변화율로 SMA선재에 가열과 냉각을 2회 수행하였다. A_s 와 A_f 사이의 상변태 에너지는 10.6J/g 이고, M_s 와 마르텐사이트 끝온도(M_f)사이

의 상변태 에너지는 7.46J/g 이었다.

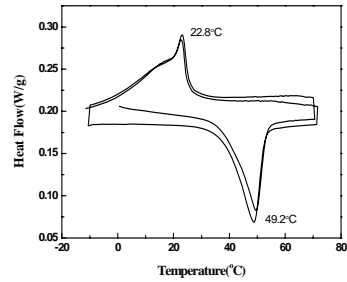


Fig. 4 Heat flow curves of SMA wire using DSC

Fig. 5는 초기 재료에 대하여 상온(25°C)에서 재료에 일정한 변형률 속도(0.16mm/s)로 인장 시험을 수행하였으며 반복적인 하중에 의한 형상기억합금 거동이 동일성을 갖는지를 확인하였다. 상변이 변형률은 약 2%로 나타났다. 탄성영역에서는 탄성한도가 400MPa 이고 변형률은 약 4%를 나타내었다.

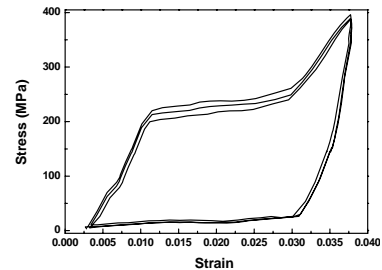


Fig. 5 The shape memory effect at 25°C ($T < A_f$)

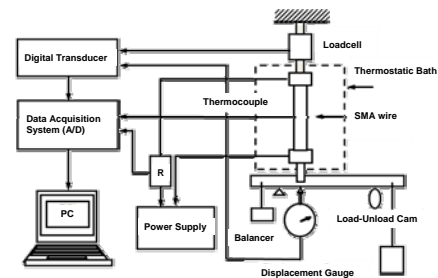


Fig. 6 Experimental setup for strain-temperature test

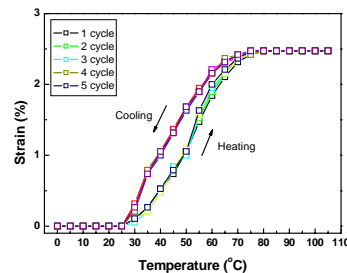


Fig. 7 Strain vs. temperature curve

Fig. 6은 변형률-온도시험을 위한 실험장치의

구성을 보여준다. 온도변화율은 5°C/min으로 상온 (25°C)에서 시작하여 100°C까지 heating/cooling의 과정을 5회 반복 수행하였다. Cooling시에는 자연 냉각상태를 유지시켰다. Fig. 7은 변형률-온도 시험의 실험 결과로서 일정한 이력곡선을 보여주며 약 2.5%의 변형률을 보인다.

3. 굽힘 작동기의 설계

앞 절의 연구내용으로부터, SMA선재의 응력 하 또는 비응력 하에서의 거동에 대한 대략적인 특성을 파악하였다. 이러한 결과들을 토대로, Fig. 8에서는 4장과 6장의 유리 적층판의 굽힘에 따른 축의 초기 양단길이를 결정하기 위하여, 세 가지의 설정길이를 이용하여 인가전력에 따른 작동변위를 관찰하여서 적절한 유리 적층판과 축의 초기 양단길이를 구하였다.

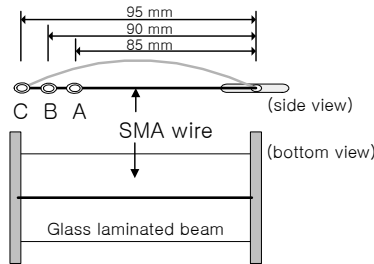
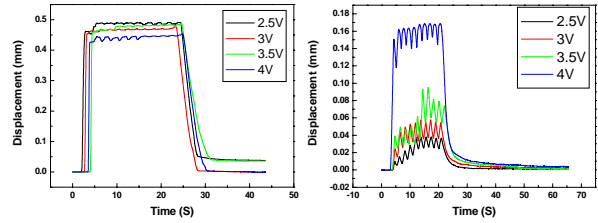


Fig. 8 Setup to determine the distance of two hinges

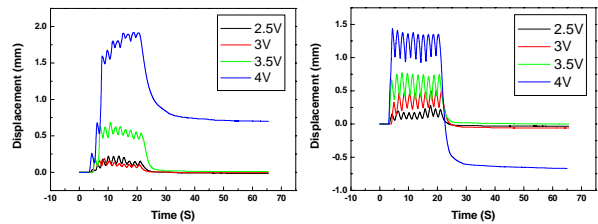
Fig. 8에서는 고정단의 위치를 A, B, C로 구분하여 스프링이 없는 상태 즉, 유리 적층판만이 SMA 선재에 응력을 가할 때 필요한 축간 거리를 선정하기 위한 실험을 하였다. 또한 SMA선재에 초기 응력을 부여할 유리 적층판의 종류를 찾기 위함이다. 사용된 유리 프리-프레그는 SK chemical의 GEP108로서 두께 0.07mm, E=72.4MPa이다. 제작된 유리 적층판은 4장과 6장이며 크기는 10cm×2.5cm이다. 각 지점의 고정-자유단 사이의 길이는 A=85mm, B=90mm, C=95mm이다. 실험 방법은 SMA선재에 2.5, 3, 3.5, 4V의 서로 다른 전압을 1초 동안 인가하고 1초간 끊는 방법으로 25초 동안 반복 시험을 통하여 얻은 작동변위를 구하였다. 여기서, 작동변위는 반복적인 곡선을 보이는 위와 아래의 차이 값으로 정의한다.

Fig. 9에서 4장의 유리 적층판을 사용한 (a)와 (b)의 결과는 (c)의 결과와 비교할 때 사용된 판이 SMA선재에 과도한 초기 응력을 가해주어 반복 작동변위가 매우 작은 것을 알 수 있다. (c)에서 4장(왼쪽)의 결과는 6장(오른쪽)의 결과에 비하여 충분한 작동변위를 보여주지 못하며, 각각의 인가

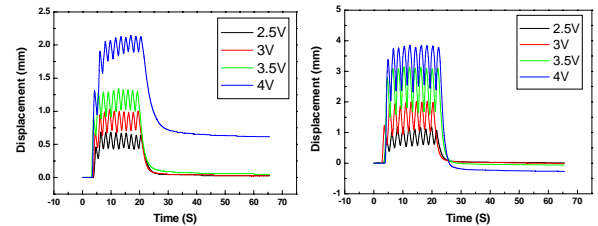
전압에 대하여 비교적 균일한 거동을 보이는 것은 6장을 사용한 경우이다.



(a) A position (85 mm).



(b) B position (90 mm).



(c) C position (95 mm).

Fig. 9 Behavior of bending actuator for the effect of distance for 4 layer(left) and 6 layer(right) laminates

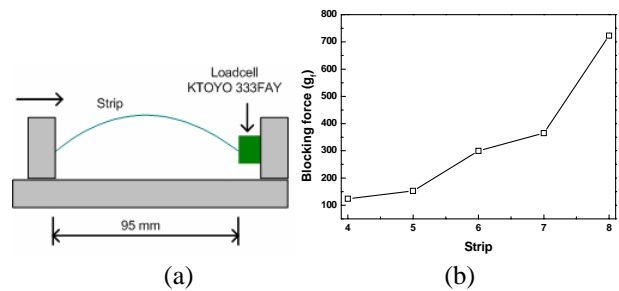


Fig. 10 (a)Setup (b) Blocking force vs. various strips

이러한 결과로부터, 유리 적층판이 SMA선재에 가하는 힘을 확인할 필요가 있다. 로드셀을 이용하여 SMA선재가 부착되지 않은 순수 유리 적층판이 발생시키는 blocking force를 측정하였다. 축간거리는 95mm로 설정하였으며 유리 적층판은 4-8장을 사용하였다. Fig. 10은 개략적인 실험장치의 구성을 보여준다. Fig. 10(b)에서 5장의 유리 적층판을 사용할 때 약 150gr, 6장의 유리 적층판을 사용하는 경우 약 300gr의 blocking force를 발생하

는 것을 알 수 있다. Fig. 3의 결과에서, 하중이 150g인 경우 작동변위가 가장 좋다는 것을 상기할 때, 5장의 유리적층판을 사용하는 것이 바람직하다.

Fig. 11은 결정된 굽힘형 작동기의 초기 정보를 보여준다.

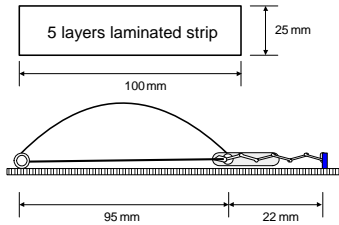
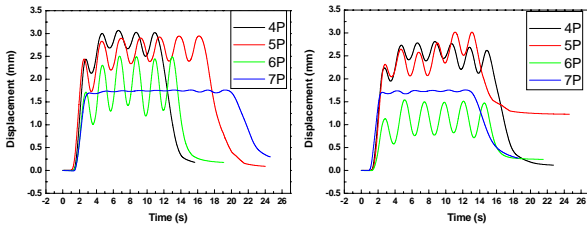


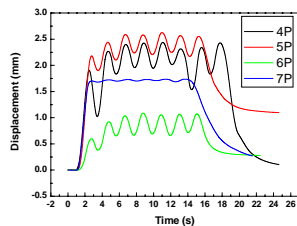
Fig. 11 Design of bending actuator

Fig. 11에 사용된 스프링은 SMA가 수축된 후 초기위치로 돌아갈 때 유리 적층판과 스프링의 회복력이 함께 작용하고, 유리 적층판만을 사용할 때보다 빠른 회복속도를 얻기 위함이다. 스프링상수 $k=30 \text{ g}_f/\text{mm}$ 이고 인가된 전압과 전류는 3V, 0.27A이며 두께가 다른 유리 적층판(4,5,6,7장)를 사용하여 스프링의 개수에 따른 반복작동변위를 계측하였다. 실험방법은 1초간 전력을 인가하고 1초간 끄는 방법으로 수행하였다.



(a) 1 spring.

(b) 2 springs.

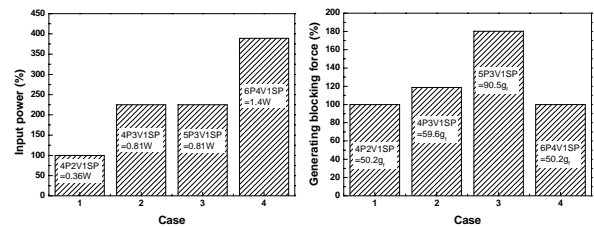


(c) 3 springs.

Fig. 12 Bending actuator for relation of between the thickness of strip and the number of spring.

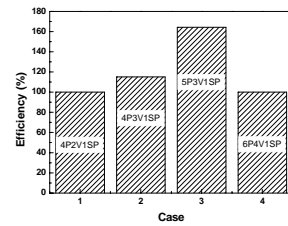
1개의 스프링을 연결한 Fig. 12(a)의 경우, 7장을 사용할 때 반복작동변위가 거의 발생하지 않으며, 6장의 경우 가장 좋은 반복작동변위를 보여준다. 2개의 스프링이 연결된 Fig. 12(b)에서도 6장의 경우가 가장 좋은 반복작동변위를 보여주며, 3개의 스프링이 연결된 Fig. 12(c)에서는 4장을 사용한 경우

가 좀더 좋은 변위를 나타낸다. 따라서, 반복작동 변위가 좋은 스프링 1개를 연결한 경우를 고려한다. Fig. 3과 10의 결과로부터, SMA선재에 작용하는 초기 응력은 5장의 유리 적층판을 사용할 때 적절하지만, 스프링이 연결되면 SMA에 일정한 인가전력을 가하여 작동할 때 보와 스프링의 조합형태에 따라서 SMA선재에 복합적인 응력을 가하기 때문에 굽힘 작동기에 사용한 판의 종류에 따라서 다양한 거동을 나타내게 된다. 이러한 이유로 적절한 보와 스프링의 조합에 따른 반복작동변위의 계측과 굽힘 작동기의 보 중앙에서 외부작용 하중에 따라 발생시킬 수 있는 blocking force를 계측하여 소모전력에 따른 효율을 확인할 필요가 있다.



(a) Input power.

(b) The generated blocking force.



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

Fig. 13 The efficiency of the bending actuator

Fig. 13은 4종류의 인가전력에 대하여 발생된 blocking force를 효율로 나타내어 비교한 결과를 보여준다. 막대그래프 안에 나타낸 정보는 예를 들어, 4P2V1SP인 경우 4장 유리 적층판에 1개의 스프링을 연결하고 2V 인가전압을 가하였을 때 발생하는 (a)인가 전력, (b)blocking force 그리고 (c) 효율을 나타낸다. 여기서는 Fig. 12로부터 얻은 스프링 1개의 효과를 고려하였다. Fig. 13으로부터 비교 기준이 되는 Case 1(4P2V1SP)의 경우, 0.36W를 인가했을 때 50.2g의 blocking force를 발생하며 효율이 100%라 정하였다. Case 3(5P3V1SP)의 경우, 인가전력과 blocking force는 0.81W와 90.5g로 Case 1과 비교하여 125%, 80%증가하였고, 효율은 가장 높은 64%의 증가를 보였다. 인가전력과 효율면에서 Case1에 비하여 Case 2(125%, 15% 증가)와 Case 4(288%, 0% 증가)를 비교하여 볼 때, Case3의 경우가 소모전력 대비 가장 효율적이라 할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 SMA선재를 이용한 곱힘 작동기의 실험적인 방법에 의한 설계에 관하여 다루었다. 먼저, SMA의 열-기계적인 특성을 알기 위하여 다양한 무게의 추를 이용한 초기 응력을 부가하였을 때 인가전력에 따른 성능을 파악하였으며, 부가응력이 없을 때 DSC를 이용한 대략적인 상변이 온도를 파악하였다. 또한, 변형률-온도 사이의 관계를 알기 위하여 형상기억효과 곡선을 찾아내고, 특정 하중 하에서의 SMA선재의 이력곡선을 구하였다. 이러한 결과를 토대로 곱힘 작동기의 설계를 위한 대략적인 초기 값들을 설정하였다. 초기 응력을 부가하기 위하여 다양한 두께의 유리 적층판을 SMA선재에 연결하고, 세 종류의 양단 거리를 설정하여 성능 실험을 한 결과, 6장의 유리 적층판을 95mm의 양단거리로 사용할 때 반복작동 변위가 가장 좋았다. 여기에 반복적인 움직임이 필요하기 때문에 SMA선재가 작동 후 cooling시에 초기 위치로 돌아오는 시간을 줄여주기 위하여 스프링을 연결하였다. 다양한 유리 적층판에 SMA선재를 연결한 양단의 거리는 95mm이지만, 연결된 스프링의 개수와 유리 적층판에 따라 곱힘 작동기의 작동 성능이 다르다는 것을 실험을 통하여 알 수 있었다. 이러한 결과를 토대로, 곱힘 작동기에 부가하중이 작용할 때 적절한 인가전력이 얼마나 필요한가를 알아보았다. 그 결과, 5장의 유리 적층판을 양단거리가 95mm인 SMA선재에 연결하고 1개의 스프링을 사용하여 곱힘 작동기를 구성하였을 때, 인가전력이 0.81W(3V, 0.27A)인 경우 약 90g의 blocking force를 나타내었으며 64%의 증가된 효율을 나타냈다. 실험결과로부터, SMA선재에 적용할 초기 응력의 중요성과 적절한 인가전력에 대한 영향을 알 수 있었다. 추후에 열-기계적 특성결과를 이론모델과 비교할 예정이다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단 중점연구소사업(KRF2006-005-J03301)의 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드린다.

참고문헌

(1) Ikuta K., 1990, "Micro/miniature shape memory alloy actuator," *Proc. Robotic Automa*, Vol. 3, pp.2156~2161.

(2) Reynaerts D., Van Brussel H., 1998, "Design aspects of shape memory actuators," *Mechatronics*, Vol. 8 No. 6, pp.635~656.

(3) Huang W., 2002, "On the selection of shape memory alloys for actuators," *Mater Design*, Vol. 23, No. 1, pp.11~19.

(4) Fukuda T., Hosokai H., Kikuchi I., 1990, "Distributed type of actuators by shape memory alloy and its application to underwater mobile robotic mechanism," *Proc. Robotic Automa*, Vol. 2, pp.1316~1321.

(5) Brinson L.C., Huang M.S., 1996, "Simplification and comparisons of shape memory alloy constitutive models," *J. Intell Mater Syst Struc*, Vol. 7, No. 1, pp.108~114.

(6) Tanaka K. A., 1986, "A thermomechanical sketch of shape memory effect: one dimensional tensile behavior," *Res Mech*, Vol. 18, pp.251~263.

(7) Liang C., Rogers C. A., 1990, "One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials," *J. Intell Mater Syst Struc*, Vol. 1, No. 2, pp.207~234.

(8) Brinson L. C., 1993, "One dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions," *J. Intell Mater Syst Struc*, Vol. 4, No. 2, pp.229~242.

(9) Zak A.J., Cartmell M. P., Ostachowicz W. M., et al. 2003, "One-dimensional shape memory alloy models for use with reinforced composite structures," *Smart Mater Struct*, Vol. 12, pp.338~346.

(10) Dutta S., Ghorbel F., Dabney J., 2005, "Modeling and control of a shape memory alloy actuator," *Proc 2005 IEEE Int Sym Intell Cont*, pp.1007~1012.

(11) Shu S.G., Lagoudas D.C., Hughes D., et al., 1997, "Modeling of a flexible beam actuated by shape memory alloy wires," *Smart Mater Struct*, Vol. 6, pp.265~277.

(12) Janocha H., 1999, "Adaptronics and Smart Structures: basics, materials, design, and applications," *Springer*, Berlin.