

형상기억합금을 이용한 초소형 액츄에이터

김 병 옥*, 김 광 수*, 조 동 일**

Shape Memory Alloy Microactuators

Byung-Wook Kim*, Kwang-Soo Kim*, and Dong-Il Cho**

ABSTRACT

Because of its high energy density, the use of shape memory alloys(SMA) in designing microactuators is gaining much attention in recent years. Shape memory alloys can undergo a shape change at a low temperature with a small applied deformation force, and retain this deformation until they are heated, at which point they return to the original shape. This is called the shape memory effect(SME), and a plethora of alloys show this effect. Among them, TiNi-based alloys have relatively high electrical resistivity, which allow the convenient Ohmic heating for actuation. In this paper, 250 μ m-diameter TiNi SMA wires are used to develop helical-shape memory springs. These springs are used to develop fast protagonist/antagonist configuration actuators. The developed actuator has an actuation speed of 1 mm per 15~20 ms and a minimum operating period of 2 sec.

Key Words: Shape Memory Alloy(SMA, 형상기억합금), Microactuators(초소형 액츄에이터), SMA Dynamical Characteristics(형상기억합금의 동적 특성), Fast Actuation(빠른 구동), Protagonist/Antagonist Configuration(정/반 구조)

1. 서 론

최근 전 세계적으로 초소형 정밀 기계 기술에 관한 연구 및 개발이 활발하게 이루어지면서 형상기억합금(Shape Memory Alloy : SMA)을 이용한 초소형 액츄에이터(micro actuator)에 관한 관심이 증대되고 있다. 그 이유 중 하나는 형상기억합금을 이용한 구동 방식은 다른 구동 방식보다 높은 에너지(혹은 파워) 대 부피 비

율을 가지기 때문이다⁽¹⁻²⁾. 형상기억합금은 온도의 변화에 따라 그 형상이 변하고 힘을 발생하며, 이 원리를 소형 로봇(robot)의 액츄에이터⁽²⁻⁶⁾, 초소형 유체 밸브(fluidic valve)⁽⁷⁻⁸⁾ 및 내시경(endoscope)의 액츄에이터⁽⁹⁻¹⁰⁾ 등에 응용하는 연구가 선진 외국에서 활발히 진행 중이다. 특히 최근에는 형상기억합금으로 얇은 박막(thin film)을 만들어 이를 액츄에이터에 적용하거나 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)에 응용

* 서울대학교 전기공학부 대학원
 ** 서울대학교 전기공학부

하기 위한 연구가 많이 이루어지고 있다^(1,10-13). 우리나라에서도 최근 내시경에 형상기억합금 액추에이터를 이용하는 기술에 관심을 보이고 있다.

앞으로 형상기억합금을 액추에이터에 응용하기 위해서는 동적특성의 분석이 필수적이지만, 기존 참고 문헌들에는 형상기억합금의 물질 및 재료적 특성은 많이 보고되고 있으나 동적특성에 대한 자료는 매우 부족한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 비저항(resistivity)이 큰 TiNi 합금 와이어(wire)를 이용하여 나선형 스프링(helical spring) 모양을 제작하고, 디지털 힘 측정기(digital force gauge)와 홀 센서(Hall sensor)로 이 TiNi 스프링의 힘의 크기와 반응 속도를 측정하여 형상기억합금의 동적특성을 분석하였다. 또한, 바람직한 형상기억합금 액추에이터로 Protagonist/Antagonist pair(이하 P/A 쌍) 액추에이터 모델(model)을 제시하고 그 성능을 실험하였다.

2. 형상기억합금의 특성

형상기억효과(SME : Shape Memory Effect)는 1951년에 AuCu 합금과 InTi 합금에서 처음으로 발견되었다⁽¹⁴⁾. 이 형상기억효과는 저온에서 형상기억합금에 변형을 주면, 다시 가열되어 원래의 기억된 모양으로 되돌아가기 전까지 그 변형된 모양을 유지하는 현상을 의미한다. 이러한 성질은 형상기억합금의 원자 결정 구조의 변화 때문에 생기는 것이다. 예를 들어 TiNi 합금의 경우 Figure 1에서와 같이 고온에서는 austenite라 불리는 정방형의 결정구조를 가지지만, 저온에서는 martensite라고 하는 단사정의 격자구조를 가진다. 또한, 형상기억합금이 많은 원자들을 포함하고 있을 때는, 원자들이 한 방향으로 기울어지지 않고 양방향으로 변갈아 가며 기울어지는 구조를 이루게 된다. 이러한 현상을 원자 배열의 대칭성에 근거하여 "twinning"이라 부른다^(2,14-15).

형상기억합금은 외력이 가해지면 변형되며(strain accumulation) Fig. 1의 우측 하단 구조 모형처럼 새롭게 방향이 배열되어 모두 같은 방향을 향하게 되는데, 이를 "detwinning"이라고 한다. 이 때 형상기억합금이 가열되면 변형된 martensite구조는 austenite구조로 되돌아가며 원래의 형상을 되찾게 된다. 이러한 현상은 austenite 상태에서는 원래의 기억된 원자의 배열 상태가 유지되기 때문에 생긴다. 형상기억효과의 구조 변환 과정이 Fig. 1에 도시되었다⁽¹⁴⁻¹⁵⁾.

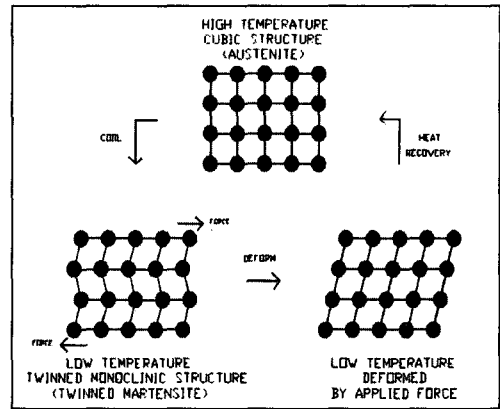


Fig. 1 Transformation between high and low temperature structures. (adapted from⁽¹⁴⁾)

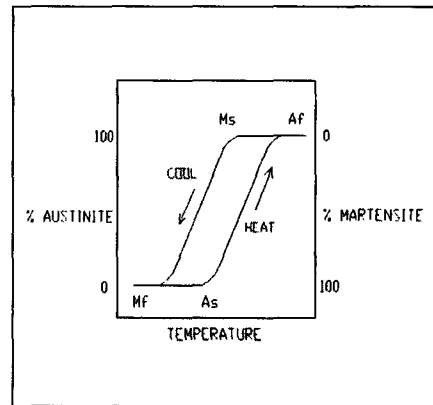


Fig. 2 Temperature hysteresis. (adapted from⁽¹⁴⁾)

구조 변환 과정은 원자의 수준에서 일어나는데, 이 과정에서 온도에 대한 히스테리시스 현상이 일어난다. 다시 말해서 austenite구조에서 martensite구조로의 변환(정반응)은 martensite구조에서 austenite구조로의 변환(역반응)보다 낮은 온도 범위에서 일어난다. Fig. 2를 참조하면 Mf온도 이하에서 형상기억합금은 100% martensite구조이며 As온도 이상으로 가열될 때 austenite구조가 형성되기 시작한다. 계속 가열하여 온도가 Af이상이면 100% austenite구조로 변하며, 이때는 Ms온도 이하로 냉각된 후에야 비로소 martensite구조가 생성된다⁽¹⁴⁻¹⁵⁾.

형상기억합금은 초기에는 합금 성분이 가격이 비싸고 회귀 금속이며, 인체에 유해하기 때문에 각광을 받지 못했지만, 1963년 우연하게 TiNi 합금이 뛰어난 형상기억

효과를 보인다는 것이 발견된 후로 학계와 산업계의 관심을 끌었다⁽¹⁴⁾. 그리고 현재 그 외에도 AgCd, AuCd, CuAlNi, CuSn, CuZn, CuZnAl, NiAl, FePt, MnCu, FeMnSi 등과 같은 합금들이 형상기억효과를 나타내는 것으로 알려지고 있다.

이 많은 형상기억합금 중에서 Nickel과 Titanium을 주성분으로 하는 합금 류가 제일 많이 사용되는데 그 이유는 가격이 비교적 저렴하고, Ni와 Ti의 배합 비율을 바꿈으로써 상 변환 온도를 쉽게 조절할 수 있으며, 높은 비저항을 가지고 있어(니크롬(nichrome)선과 비슷한 수준인 $80\sim 89\mu\Omega\text{-cm}$, Table 1 참조) 저항 가열(Ohmic heating)이 용이하기 때문이다. 이러한 저항 가열의 용이성 덕분에 전기적으로 구동되는 액추에이터에 응용에 유리하며, 몇 가지 방법을 통해 솔레노이드(solenoid)와 같은 기존의 액추에이터를 대신하여 사용될 수 있다. 보통 솔레노이드는 형상기억합금에 비해 단위 비용당 내는 힘의 크기가 비교적 크지만, 부피가 크고 소음이 많으며 관성력이 큰 단점이 있다. 반면에 형상기억합금은 솔레노이드에 비해 작고 조용하며 관성 동작이 작고 전자기장의 영향을 적게 받는 장점이 있다. 따라서, 0.1 N 정도 크기의 힘이 필요하고 작고 조용하며 관성 동작이 작아야 하는 경우에는 형상기억합금이 솔레노이드의 적절한 대체 방법이라고 생각된다. 또한, 형상기억합금은 제작되는 모양에 따라 선형적인 운동뿐만 아니라 비틀림과 휨이 필요한 운동의 구현도 가능하며, 설계를 단순화하여 신뢰도를 높이고 부품 값을 줄이는 효과를 얻을 수도 있다.

그밖에 TiNi합금의 장점으로는 높은 에너지 밀도($10.4 \times 10^6 \text{ J/m}^3$)를 가진다는 점과 전성과 연성이 좋고, 회복 운동 능력이 좋으며, 부식에 대한 저항력이 뛰어나고, 변형 온도가 안정적인 것 등이 있다. TiNi와 상용화가 많이 되고 있는 몇 가지 Cu계열 형상기억합금의 성질이 위의 Table 1에 정리되어 있다⁽¹⁴⁻¹⁵⁾.

그러나 형상기억합금을 액추에이터에 응용하는 데에는 몇 가지 어려움이 있다. 앞서 설명한 온도의 히스테리시스 현상뿐만 아니라 솔레노이드보다 반응 속도가 느리고, 동작 폭이 제한되는 단점이 있기 때문에 모든 경우에 적용될 수 있는 것은 아니다. 이처럼 형상기억합금의 반응 속도가 느린 원인으로는 높은 열용량($837 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$, TiNi)과 비교적 작은 열전도성($18 \text{ J/m}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$, TiNi)을 들 수 있다. 일반적으로 Cu계열의 합금들은 TiNi보다 열용량이 작고, 열전도도가 커서 반응 속도가 빠른 편이지만, 비저항이 매우 작아서 전기적인 구동이 어렵다. 열용량이 크고 열전도도가 작은 TiNi의 성질은 반응 속도뿐만 아니라 형상기억합금의 온도를 식히는데 필요한 시간이 그만큼 길어지게 되는 효과가 생겨서 형상기억합금을 응용하는 데에 하나의 걸림돌로 작용하고 있다.

형상기억합금의 또 다른 단점으로는 접합의 어려움이 있다. 이는 형상기억효과가 형상기억합금에 온도를 가해 주어 물리적인 수축과 팽창을 일으키는 현상이라는 사실에 기인한다. 따라서, 접합 부위의 온도가 높아지고 모양이 변형될 경우 그 접합을 유지할 수 없게되며 일반 용접 방법이나 납땜으로는 형상기억합금을 접합할 수 없다. 지금까지 보고된 바로는 크림핑(crimping) 방법이 형상기억합금의 접합에 가장 적절하며, 저항 용접과 접착제에 의한 접합도 부분적으로 가능하다. 그러나, 본 실험실에서 저항 용접을 시행하여 현미경으로 분석한 결과 그 용접 부위가 균일하지 못하며, 작은 힘이 가해져도 용접 부분이 쉽게 파손되었다. 또한, 접착제에 의한 접착 실험의 경우, 접착제가 중합합성수지(polymer resin)로 만들어지기 때문에 150°C 이상을 견딜 수 있는 접착제를 구할 수가 없으며, 지속적인 발열시 쉽게 접착 부분이 파손되어 내구성에 큰 문제가 되었다. 따라서 본 연구는 크림핑 및 그와 유사한 기계적 접착 방법을 사용하였다.

마지막으로 무시할 수 없는 형상기억합금의 단점으로 제한된 사용 시간을 들 수 있다. 이는 고전적인 구조의 피로에 의한 것과 연속적인 열 변환으로 인한 운동 손실 두 가지 이유로 설명할 수 있다. 아직 형상기억합금의 주기적인 구조 변화에 관한 참조할 만한 자료가 부족한 실정

Table 1. Material properties of TiNi and Cu-based alloys. (adapted from⁽¹⁴⁾)

Property	TiNi	CuZnAl	CuAlNi
Maximum As temperature (°C)	100	120	200
Maximum one-way strain (%)	8	6	5
Hysteresis (°C)	12 - 50	10 - 25	15 - 20
High temperature yield strength (MPa)	415	350	400
Low temperature yield strength (MPa)	70	80	130
Ultimate tensile strength (MPa)	700	600	500 - 800
Density (g/c.c.)	6.5	7.6 - 8.0	7.2
Resistivity ($\mu\Omega\text{-cm}$)	80 - 89	8.5 - 9.7	11-13
Heat capacity (J/kg-K)	837	400	373 - 574
Thermal conductivity (J/m-sec-K)	18	120	30 - 43

이며 이러한 현상은 주로 형상기억합금에 가해지는 힘의 크기(또는, strain)와 깊은 관계가 있다.

지금까지는 한 쪽 방향으로의 형상기억효과에 대해서만 논의하였다. 즉, austenite구조의 형상은 열을 가하면 자동적으로 회복되지만, 저온의 martensite구조 상태에서는 변형을 주기 위해서 힘을 가해주어야만 한다는 것을 의미한다. 그러나, 형상기억합금은 가열할 때와 마찬가지로 형상기억합금 소자를 냉각시킬 때도 저온에서의 형상으로 되돌아가도록 하는 양방향 효과를 얻을 수 있다. 이러한 현상을 보통 “양방향 형상기억효과(two-way shape memory effect)” 혹은 “가역 형상기억효과(reversible shape memory effect)”라고 하는데, Fig. 3에 나선형 스프링의 예를 도시하였다. 그런데, 양방향 효과에서도 진술한 단방향 효과와 마찬가지로 열을 가할 때만이 일을 발생시킬 수 있다는 사실에 주목해야 한다. 양방향 효과에서 냉각시에는 단순히 저온 형상으로 되돌아갈 뿐이지 외부에 큰 기계적인 힘을 제공할 수는 없다. TiNi합금으로 양방향 효과를 얻으려면 martensite구조 상태에서 커다란 변형을 주는 기술이 사용될 수 있는데, 보통은 냉각시 부분적인 변형 회복만이 얻어질 수 있다고 보고되고 있다. 또한, Raychem사의 NiTiCu합금의 경우 열 변환 과정을 반복함에 따라 양방향 효과가 점차 증가되는 것이 발견되었다⁽¹⁴⁾. 이처럼 TiNi합금의 경우 양방향 효과가 비교적 작으며 열처리 조건과 반복적인 열 변환 과정에 따라 조금씩 변화하는 특성을 가질 뿐만 아니라 온도의 히스테리시스 현상 때문에 그 신뢰도가 떨어진다. 따라서, 양방향 효과를 이용한 액추에이터의 구현은 어려운 실정이며, 이러한 이유로 뒤에서 제시할 P/A 쌍 액추에이터가 바람직하다고 할 수 있다.

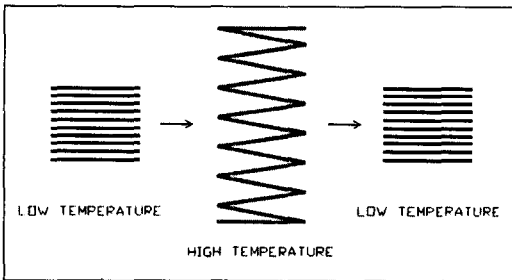


Fig. 3 Two-way Shape Memory Effect.

3. 형상기억합금 스프링의 성능 측정

실험에 사용된 형상기억합금은 TiNi합금으로 지름 250 μm의 원형 단면을 갖는 와이어이다. 그런데, TiNi 형상기억합금의 경우, 8% 이내로 원상태로 회복 가능한 변형 길이가 제한되어 있으며, 형상 회복 과정에 큰 외력이 가해지면 허용 변형 범위는 더욱 줄어들게 된다. 따라서, 주어진 와이어를 그대로 사용할 경우 2%의 최대 허용 변형을 가정할 때, 매우 작은 크기의 동작밖에 얻을 수 없다. 그런데, 형상기억합금을 나선형 스프링의 형태로 만들어 사용하면 작은 변형으로도 큰 동작을 얻을 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 지름 3 mm, 피치(pitch) 3 mm의 스프링을 제작하여 실험에 사용하였다. 열처리 조건은 양방향 효과를 최대한 억제시키는 조건을 구하여, 30분간 425°C로 가열한 뒤, 상온에서 냉각하여 형상기억합금에 스프링 형상을 기억시키는 방법을 사용하였다.

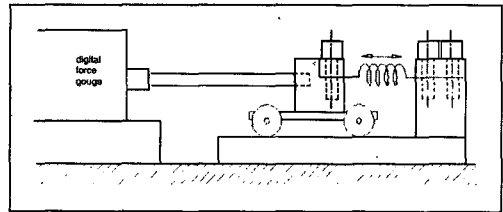


Fig. 4 Measurement of force.

액추에이터에 쓰이게 될 형상기억합금 스프링의 출력 힘의 크기 측정을 위하여, 본 연구에서는 Chatillon사의 DFIS 2 디지털 힘 측정기를 사용하였다. 이 힘 측정기는 시리얼 포트(serial port)로 아날로그(analog) 출력 데이터를 받아서 PC와 접속할 수 있도록 되어있다. 위의 Fig. 4에는 힘 측정 실험의 모형이 나와있다. 스프링이 연결된 작은 물체를 디지털 힘 측정기에 고정시키고, 형상기억합금 스프링을 적당하게 늘여놓은 뒤에 전류를 인가하여 그 때 나오는 힘의 크기를 측정하였다. 측정기의 아날로그 출력단으로부터 나오는 전압을 받아서 증폭시키고 노이즈(noise)를 줄이기 위하여 로우 패스 필터(low pass filter)를 통과시킨 다음 I/O 카드인 PCL-812PG의 아날로그 입력 단자로 받아들인 뒤, PC에서 데이터를 처리하는 방법으로 실험하였다.

Table 2와 Fig. 5에는 3-turn 스프링을 2 mm 늘여 놓고 전류를 인가하여 그 때의 힘의 크기를 측정된 결과

Table 2. high temperature force of 2 mm-lengthened 3-turn spring.

Current(10 A) conduction time (ms)	Preload (10 ⁻³ kgf)	Force (10 ⁻³ kgf)
5	16.142	47.925
10	16.312	56.821
15	14.723	67.496
20	16.703	70.343

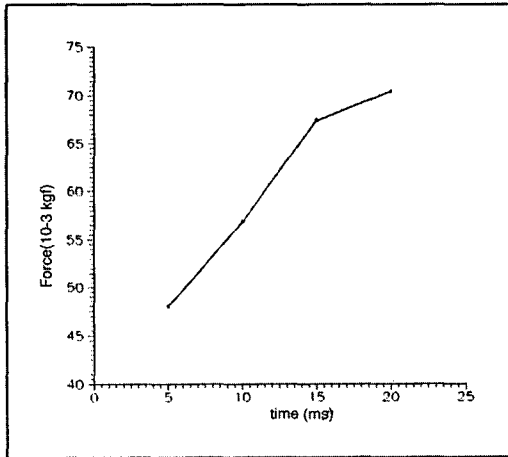


Fig. 5 High temperature force of 2 mm-lengthened 3-turn spring.

가 나와있다. Preload란 스프링을 2 mm 늘인 상태에서의 초기 힘을 말한다. 아래의 Table 3과 Fig. 6에는 3-turn 스프링을 5 mm 늘여놓고 전류를 인가하여 그 때의 힘의 크기를 측정 한 결과가 나와있다. 2 mm의 경우와 비교하면 전류의 인가 시간이 길수록 힘의 크기에 큰 차이를 나타냈으며, 역시 어느 정도까지는 시간에 비례하여 힘의 크기가 증가하다가 기울기가 완만해지는 경향을 보였다. 이는 형상기억합금이 낼 수 있는 힘의 크기에 한계가 있음을 보여주는 결과이다.

앞의 3-turn 스프링을 이용한 두 실험으로는 만족할 만큼 큰 힘을 얻어낼 수 없었으며 더 큰 힘을 얻기 위해 스프링 1 turn을 2 mm 만큼 곧게 편 후 전류를 인가하여 그 때의 힘의 크기를 측정하였다. 스프링이 과열되는

Table 3. High temperature force of 5 mm-lengthened 3-turn spring.

Current(10 A) conduction time (ms)	Preload (10 ⁻³ kgf)	Force (10 ⁻³ kgf)
5	24.029	59.312
10	21.878	76.392
15	19.403	94.896
20	19.821	98.810

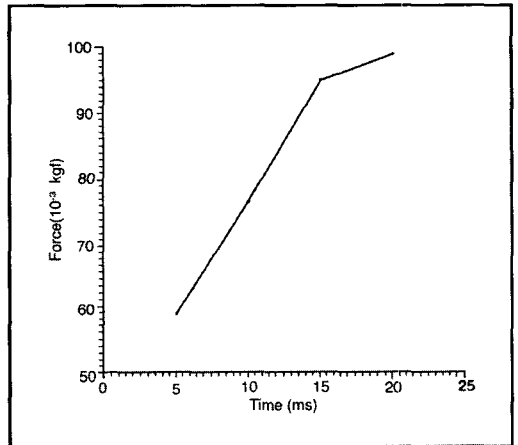


Fig. 6 High temperature force of 5 mm-lengthened 3-turn spring.

Table 4. High temperature force of 1-turn stretched spring (2 mm-lengthened).

Current(10 A) conduction time (ms)	Preload (10 ⁻³ kgf)	Force (10 ⁻³ kgf)
1	48.721	111.976
2	44.311	160.014
3	48.643	208.052
4	51.010	243.636
5	51.134	250.753
6	53.099	263.207
7	49.633	264.986
8	51.443	268.545
9	48.102	277.441
10	50.949	280.288

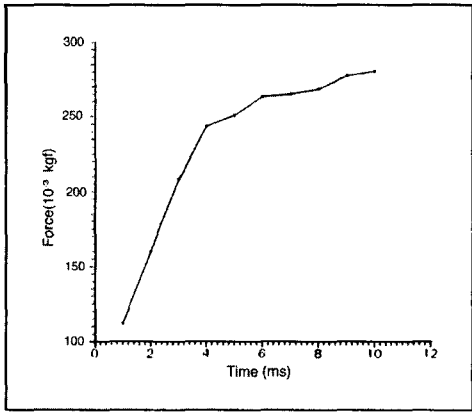


Fig. 7 High temperature force of 1-turn stretched spring (2 mm-lengthened).

것을 방지하기 위해 전류 인가 시간을 10 ms로 제한하여 실험하였으며, Table 4와 Fig. 7에 그 결과가 나와있다. 3-turn 스프링에 비해 약 5배 가량의 큰 힘이 나오는 것을 확인할 수 있다.

4. 형상기억합금 P/A쌍 액츄에이터의 설계

앞의 3장의 힘의 크기 측정 실험 과정에서 힘 측정기 출력 전압 곡선의 기울기를 통해 스프링의 냉각 속도가 느린 것을 간접적으로 확인할 수 있었다. 이는 전류가 인가 될 때는 가파른 경사도로 힘의 크기가 증가되지만, 전류가 흐르지 않을 때에는 완만한 기울기로 힘의 크기가 작아져서 5초 이상의 시간이 지난 뒤에야 처음의 힘으로

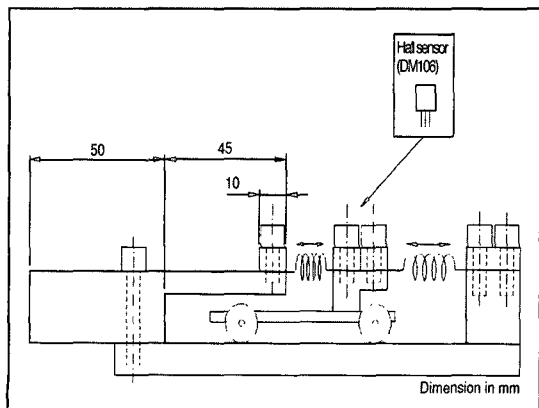


Fig. 8 Experiment model of P/A pair actuator.

되돌아오는 것으로부터 알 수 있었다. 이는 2장에서 설명했던 온도의 히스테리시스 현상과 형상기억합금 스프링이 식는데 걸리는 시간, 두 가지의 원인 때문이다. 따라서, 단순히 강철로 된 바이어싱(biasing) 스프링만을 가지는 기존의 형상기억합금 액츄에이터로는 원활하게 동작을 제어할 수 있는 시스템(system)을 구현하기가 어렵다. 이러한 문제점의 해결을 위하여 P/A쌍 액츄에이터 모델을 도입하게 되었다.

위의 Fig. 8에는 P/A쌍 액츄에이터 모델로 모의 밸브의 개폐 운동을 실험한 jig와 실험 모형이 나와있다. 양쪽의 형상기억합금 스프링에 번갈아 가면서 전류를 흘릴 경우에 모의 밸브가 반복적으로 왕복 운동을 하게됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 홀 센서(Hall sensor, DM106)를 사용하여 모의 밸브의 변위를 측정하였다. 모의 밸브에 자석을 부착시키고, 1 ms마다 홀 센서의 출력 전압을 샘플링(sampling)하여 그 결과로 나온 전압을 그래프로 나타내었다. 홀 센서의 출력 전압의 선형 영역에서 실험하였으므로, 전압 크기와 거리가 선형적으로 비례하는 관계를 가지며, 센서의 출력 전압의 변화가 밸브의 변위를 나타낸다.

Fig. 9부터 13까지에는 양쪽의 스프링에 10 A를 5 ms동안 일정한 주기를 가지고 번갈아 가며 반복적으로 흘려준 경우의 실험 결과들을 보여주고 있다. Fig. 9~11과 같이 주기가 작을 때는 스프링 자체의 진동과 전류에 의한 운동이 서로 간섭하고, 또 형상기억합금이 채 냉각되지 못한 상태이므로 정상적인 반복 운동이 일어나지 못한다. 그렇지만, 제어 입력 신호의 주파수가 형상기억합금 스프링의 기본 진동 주파수보다 충분히 커서 서로의 간섭을 막을 수 있고, 형상기억합금이 충분히 식을 수 있을 만큼 큰 주기를 가지는 경우에는 정상적인 반복 운동을 얻을 수 있다 (Fig. 12~13). 각 그림의 위쪽 그래프는 홀 센서의 출력 전압을 나타내며, 아래에 있는 그래프는 제어 전압의 스텝 입력 파형을 나타낸다. 제어 전압 파형에서 5 V로 표시되는 것은 첫번째 형상기억합금 스프링에, 2.5 V로 표시되는 것은 두번째 형상기억합금 스프링에 각각 10 A의 전류가 인가되는 것을 나타낸다. 이렇게 제어 입력의 크기를 다르게 표시한 것은 구분을 위해 편의상 한 것이며, 실제 전류를 제어하는데 사용된 제어 전압은 모두 5 V였다.

실험 결과를 보면, 각 그래프의 홀 센서 출력 전압 곡선의 기울기로부터 형상기억합금의 반응 속도가 매우 빠름을 알 수 있다. 연구 과정에서 실험한 결과로는 10 A의

전류를 사용한 경우에 전류 인가 시간을 5~10 ms로 변화시키면서 측정 한 결과, 2 mm 동작시의 반응 속도는 1 mm 당 15~20 ms의 매우 빠른 값을 가졌다.

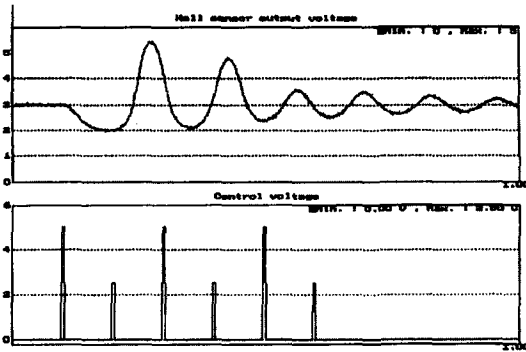


Fig. 9 Experiment of P/A pair actuator.
(3-turn spring, current conducting time : 5 ms, period : 100 ms)

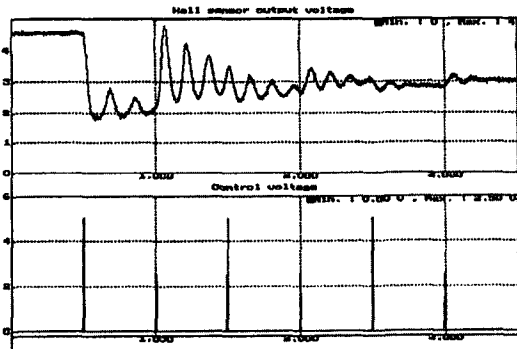


Fig. 10 Experiment of P/A pair actuator.
(3-turn spring, current conducting time : 5 ms, period : 500 ms)

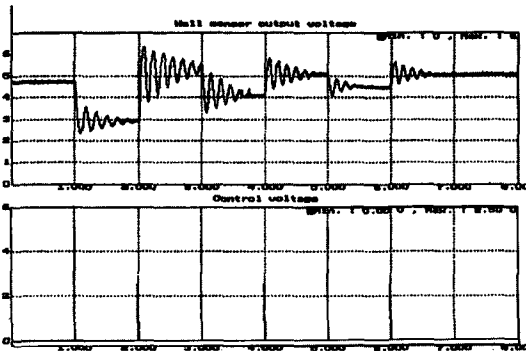


Fig. 11 Experiment of P/A pair actuator.
(3-turn spring, current conducting time : 5 ms, period : 1 sec.)

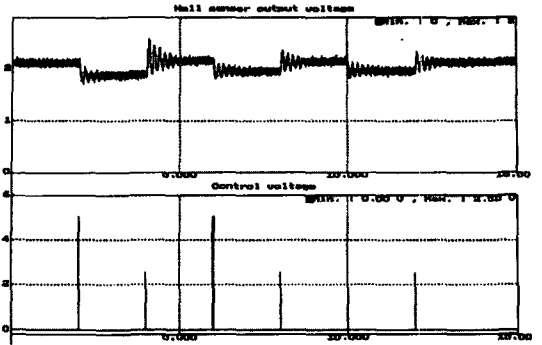


Fig. 12 Experiment of P/A pair actuator.
(3-turn spring, current conducting time : 5 ms, period : 2 sec.)

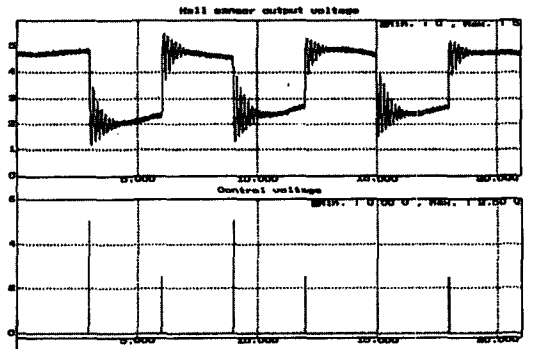


Fig. 13 Experiment of P/A pair actuator.
(3-turn spring, current conducting time : 5 ms, period : 3 sec.)

5. 결 론

2장에서 설명한 바와 같이 형상기억합금이 솔레노이드에 비한 단점은 속도가 느리다는 것으로 알려져 있다. 그러나, 4장에 언급한 바와 같이, 본 논문의 실험 결과에서 사용된 직경 250 μm TiNi 와이어의 경우 1 mm를 동작시키는 데에 15~20 ms 정도의 응답 속도를 가지는 것으로 나타났는데, 이는 기존의 기계적인 액츄에이터에 비해 우수한 응답 속도 특성이다. 이렇게 빠른 응답 속도 특성으로부터 형상기억합금은 솔레노이드를 비롯한 다른 액츄에이터를 대체할 수 있는 충분한 가능성을 가진다고 할 수 있다. 그런데, 여기서 반응 속도라는 개념을 초기 응답 속도에 국한하지 않고, 다시 처음의 형태로 되돌아가는 시간을 포함하는 넓은 의미로 생각한다면, 솔레노이드에 비해 상당히 느린 반응 속도를 가진다. 따라서, 바이어싱 스프링을 강철 스프링으로 사용한 기존의 밸브 모델

은 동적인 제어가 어려워 실현성이 없을 것으로 생각된다. 그러나, 기존의 액츄에이터보다 현격하게 빠른 초기 응답 속도의 구현이 가능하며, 긴 동작 주기가 허용되는 분야에의 응용 가능성이 높다. 또한, P/A쌍 액츄에이터 모델은 선형적으로 동작을 제어할 수 있는 장점을 가지고 있으므로, 여러 방면으로의 응용이 가능하다.

참 고 문 헌

1. R. H. Wolf and A. H. Heuer, "TiNi (Shape Memory) films on silicon for MEMS applications," *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, 1995, Vol. 4, No. 4, pp. 206~212, Dec. 1995.
2. P. Dario, M. Bergamasco, L. Bernardi, and A. Bicchi, "A Shape memory alloy actuating module for fine manipulation," *Proc. IEEE Micro Robots and Teleoperator Workshop*, Hyannis, MA, Nov. 1987.
3. J. A. Walker, "A small rotary actuator based on torsionally strained SMA," *Proc. IEEE Micro Robots and Teleoperator Workshop*, Hyannis, MA, Nov. 1987.
4. M. Bergamasco, P. Dario, and F. Salsedo, "Shape memory alloy microactuators," *Sensors and Actuators*, vol. A21~A23, pp. 253~257, 1990.
5. K. Kuribayashi, M. Yoshitake, and S. Ogawa, "Reversible SMA actuator for micron sized robot," *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, Napa Valley, CA, pp. 217~221, Feb. 1990.
6. I. W. Hunter, S. Lafontaine, J. M. Hollerbach, and P. J. Hunter, "Fast reversible NiTi fibers for use in microrobotics," *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, Nara, Japan, pp. 166~170, Feb. 1991.
7. J. D. Busch and A. D. Johnson, "Prototype micro-valve actuator," *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, pp. 40~41, Feb. 1990.
8. H. Jerman, "Electrically-activated, normally-closed diaphragm valves," *Tech. Dig. 6th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators*, San Francisco, CA, pp. 1045~1048, June 1991.
9. K. Kuribayashi, "Millimeter size joint actuator using shape memory alloy," *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, Salt Lake City, UT, pp. 139~144, Feb. 1989.
10. K. Ikuda, H. Fujita, M. Ikeda, and S. Yamashita, "Crystallographic analysis of TiNi shape memory alloy thin film for microactuator," *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, pp. 38~39, Feb. 1990.
11. K. Kuribayashi, S. Shimizu, M. Yoshitake, and S. Ogawa, "A study of heat process by using direct electric current heating for reversible SMA thin film actuators," *Proc. of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, pp. 103~110, Oct. 1995.
12. S. Miyazaki, T. Hashinaga, K. Nomura, and K. Yumikura, "Actuator characteristics of sputter-deposited Ti-Ni-base Shape Memory Alloy thin films," *Proc. of the International Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots*, Sendai, Japan, pp. 235~238, Sept. 1995.
13. S. Aramaki, S. Kaneko, K. Arai, Y. Takahashi, h. Adachi, and K. Yanagisawa, "Tube type micro manipulator using Shape Memory Alloy (SMA)," *Proc. of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, pp. 115~120, Oct. 1995.
14. T. C. Waram, "Actuator design using Shape Memory Alloys," Canada, 1992
15. K. Otsuka, "Fundamentals of Shape Memory Alloys -in view of intelligent materials-," *Proc. of the International Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots*, Sendai, Japan, pp. 225~230, Sept. 1995.
16. K. Matsudera, E. Matsumoto, and T. Shibata, "Large Deformation of SMA Coil Spring," *Proc. of the International Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots*, Sendai, Japan, pp. 323~326, Sept. 1995.