형상기억합금을 이용한 액츄에이터 개발

Development of an Actuator using Shape Memory Alloys

이 장 호*, 한 상 용**, 조 태 신***, 김 영 철****
(Jang Ho Lee, Sang Yong Han, Tae Shin Cho, Young Chol Kim)

* 충북대학교 제어및모형화 연구실(전화:(043)261-2475, 팩스:(043)272-2745, E-mail : jhlee@cbcon.chungbuk.ac.kr)
** 충북대학교 제어및모형화 연구실(전화:(043)261-2475, 팩스:(043)272-2745, E-mail : yckim@cbcon.chungbuk.ac.kr)
*** 충북대학교 제어및모형화 연구실(전화:(043)261-2475, 팩스:(043)272-2745, E-mail : tscho@cbcon.chungbuk.ac.kr)
****충북대학교 제어및모형화 연구실(전화:(043)261-2475, 팩스:(043)272-2745, E-mail :syhan@cbcon.chungbuk.ac.kr)

Abstract : There are many practical application that require motorless actuation. The purpose of the paper is to develop an actuator using the shape memory alloys(SMA) that operates is linear motion. We consider several design specifications as driving force of above 5kgf, driving stroke length 15mm, supply voltage DC 9-12V and operating time less than 0.5sec etc. Design procedure and experimental results of a mock-up model are presented. It has been also applied to the door locking system.

Keywords : Actuator, SMA

Ⅰ. 서 론

SMA(Shape Memory Alloy) product의 개발은 1960년대부터 활발히 이루어져 왔다. 와이어 형상의 SMA인 일명 MW(Muscle Wire)는 중량대비 고강도의 특성과 초기 작동력이 크고 소형화가 용이하며 요구 동작전압이 낮고 직선운동을 직접 얻을 수 있는 특징이 있다. 이 소재는 특히 motor나 solenoid로 구현하기 어려운 devices를 제작하는데 유리하다. 인공위성의 안테나를 펴고 확장하는 구동기[7], 온실내부의 온도를 컨트롤 하기위해 온실의 창을 구동하는 구동기[7], 의료 분야에 있어 내시경과 같은 진찰기구의 구동기[4] 등 여러 분야에서 MW를 이용한 구동기 연구가 활발히 진행 중이다. 본 논문에서는 구동력 5kgf, 동작길이 15mm의 왕복 동작형 구동기를 설계하고 그 특성을 분석하고자 한다. SMA wire의 기본성질을 조사하고 구동기를 설계하여 성능을 평가하고, 문 잠금 장치용으로 실제 제작한 구동기의 protype과 동작성능을 보인다.

Ⅱ. SMA Wire의 기본성질

SMA는 온도에 따라서 물질의 원자 구조가 변화한다. 저온 또는 동작 온도 점 아래에서는 twinning이라고 불리는 원자 구조를 가지며, 여기에 stress를 가해 변형을 하게 되면 원자구조가 평행이 된다. 이 상태의 SMA에 열을 가하게 되면 입방체 구조의 원자구조가 되어 길이가 줄어들게 된다. 그리고 다시 SMA를 저온 처리하게 되면 원자구조가 twinning 구조로 변하게 된다[6]. 그림 1-1은 이러한 과정을 보여주고 있다. SMA는 온도에 따라 변화하는 원자 구조에 의해 작동력과 길이 변화가 생기게 되며[6], 그림 1-2는 SMA의 온도와 길이 변화의 관계를 나타내는 히스테리시스 곡선을 보여주고 있다.

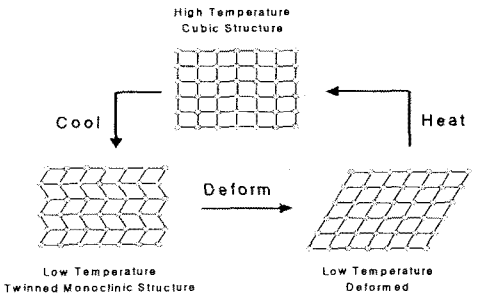


그림 1-1 일반적인 SMA의 온도에 따른 변화

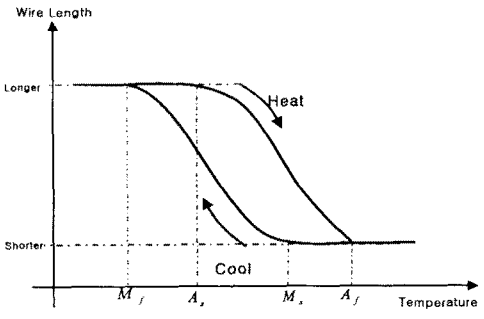


그림 1-2. Temperature Hysterisis

A_f (Austenite Finish Temp) : 수축을 끝낼 때의 온도
A_s (Austenite Start Temp) : 수축을 시작하게 되는 온도
M_f (Martensite Finish Temp) : 이완을 끝낼 때의 온도
M_s (Martensite Start Temp) : 이완을 시작하게 되는 온도

Ⅲ. SMA를 이용한 구동기 설계

본 절에서는 MW를 이용한 구동기 설계를 다룬다. 먼저 목표로 하는 설계 사양을 고려한 뒤 성능을 만족시키기 위한 MW의 굵기, 길이, 선수 등의 결정방법을 기술한다. 그리고 동작길이를 갖게 하기 위한 기구 설계와 구동제어 회로 설계 제작한 구동기 모델의 실험 결과를 제시한다.

3.1 설계조건

설계조건	
사용전압범위	DC 9 ~ 12V
Lock Current	5A 이하
작동온도범위	-30 ~ 80℃
Lifting weight	5Kgf
Contraction stroke	15mm
Operating time	0.5sec

표 3-1. 구동기 설계조건

3.2 구동기 설계

가. MW의 결정

ⅰ) 적절한 MW의 소재 선택

본 연구에서는 구동기의 동작 온도가 -30~80℃를 보장해 주기 위해서 SMA의 선택은 적어도 80℃이상에서 동작하는 SMA이어야 하고 Mondo-Tronics사의 Flexinol HT를 선정하였다.

ⅱ) 구동기의 방식 선택과 MW의 굵기 및 길이의 결정

SMA를 이용한 구동기의 대표적인 구조는 스프링 형태와 직선형이 있다. 두 구동기 방식의 적용 평가를 위해 설계조건을 가지고 계산해 본다. 표3-2는 결과를 나타낸다.

A) 스프링 디자인[6]

1) Diameter (d) 계산 :

$$d = \sqrt{\frac{8WpC}{\pi T_c}} \tag{1}$$

여기서

p= force exerted by spring

C= spring index

T_c= maximum shear stress, corrected for coil curvature

W = Wahl correction factor, given by :

$$W = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C}$$

2) 권수 (N) 계산 :

$$n = \frac{d \times S}{\pi D^2 \triangle \gamma} \tag{2}$$

여기서

S= required stroke for the spring

$\triangle\gamma = \gamma_h - \gamma_l$= difference between the low and high temperature shear strain

식 (2)에서 계산되어진 권수에 MW의 양쪽 종단 처리를 위해 2를 더하면 전체 권수 식(3)이 된다.

$$N = n + 2 \tag{3}$$

3) Length (L_f) 계산 :

$$L_f = L_h + \delta_h = (d(n+3) + S) + \frac{p}{K_h} \tag{4}$$

여기서, $K_h = \frac{G_h d^4}{8nD^3}$

B) Wire 디자인[6]

1) Diameter (d) 계산 :

$$d = \sqrt{\frac{4F}{\pi\sigma}} \tag{5}$$

여기서 $F = 49N,\ \sigma = 225MPa$

2) Length (L) 계산 :

$$L = \frac{stroke}{\epsilon_h - \epsilon_l} \tag{6}$$

여기서, $\epsilon_l = \frac{\sigma_l}{E_l}$, $\epsilon_h =$ *Assume strain of 3%*

E_l = Young's modulus at low temperature

	스프링 형태의 구조	직선형의 구조		
Wire Diameter (mm)	2.0415	0.527		
Wire Length (mm)	44.31	500 *		
기타 관련 사항	권수 = 5	Bundle 구성**		
		50μm	100μm	150μm
		111	28	13
* 3% deformation ratio 가정				
** Bundle 구성 시에 각 wire의 구성 수 (Stress 225 MPa 가정)				

표 3-2. 스프링/직선형 구동기의 소요 MW의 굵기와 길이

표 3-2에서 나온 설계 결과를 바탕으로 스프링 형태의 구조와 직선형의 구조 중 본 과제에서 적절한 구조를 평가하기 위해서 요구 전류와 동작 주기를 비교하겠다. 그러나 Flexinol MW의 요구 전류 및 동작 주기는 wire의 diameter가 25μm에서 375μm까지 밖에 알 수가 없다. 따라서 그 이상의 diameter가 되는 wire의 요구 전류 및 동작 주기를 알기 위해 외삽법(extrapolation)을 이용하기로 한다. 다음 식(7)은 그림3-3에서 나와 있는 diameter 데이터와 요구 전류(recommended current)를 이용하여 2차 다항식으로 추정된 요구 전류 함수, I_r.이다.

$$I_r = 0.02395d^2 - 1.885d + 86.13 \tag{7}$$

여기서, d는 MW의 diameter이다.

그림3-1는 주어진 데이터를 통한 그래프와 2차 다항식으로 추정된 요구 전류 함수의 그래프이다.

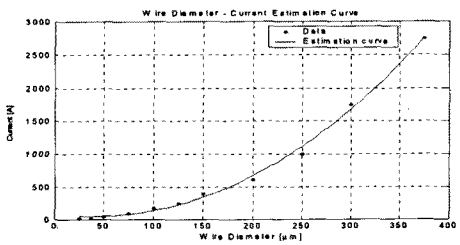


그림 3-1. MW diameter에 대한 전류의 추정 그래프

식(7)을 통해서 설계 조건을 만족하는 스프링 형태와 직선형의 구조에서의 요구되는 전류는 표3-3과 같다.

	스프링 형태의 구조	직선형의 구조			
Diameter [μm]	2041.5	50	100	150	527
Quantity	1	132	28	13	1
Current [A]	96	6.9	3.9	4.5	5.8

표 3-3. 스프링과 직선형 설계에서 diameter에 대한 전류

또한 MW의 diameter에 대한 동작 주기에 관한 외삽법을 하기 위해서 25μm에서 375μm까지 주어진 데이터를 통해서 동작 주기 함수, T_{cycle}를 4차 다항식으로 추정하게 되면 식(8)처럼 나온다.

$$T_{cycle} = -1.9\times10^{-8}d^4 + 1.553\times10^{-5}d^3 - 0.003731d^2 + 0.07564d + 57.87 \quad (8)$$

여기서, d는 MW의 diameter이다.

다음 그림3-2는 주어진 데이터를 통한 그래프와 4차로 추정된 동작 주기 함수의 그래프이다.

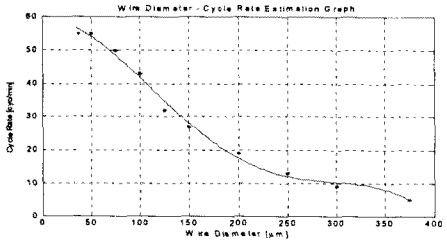


그림 3-2. MW diameter와 cycle rate와의 추정 그래프

추정된 식3-2를 통해서 스프링 방식과 직선형에서의 각각의 diameter에 대해서 분당 동작 사이클을 계산하게 되면 다음과 같다.

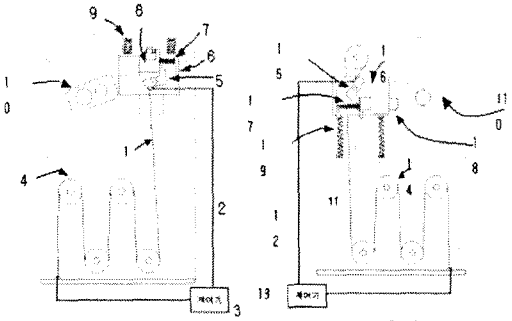
	스프링 형태의 구조	직선형의 구조			
Diameter [μm]	2041.5	50	100	150	527
Cycle Rate[cyc/min]	NA	54	42	28	NA

표 3-4. Wire diameter에 대한 cycle rate

여기서 직선형 구조의 527μm와 스프링 구조의 결과는 분당 한번도 동작할 수 없다. 전류와 분당 사이클 비율의 결과에서 볼 수 있듯이 구동기의 구조를 스프링 형태로 선택하게 될 경우 해당 힘을 얻기 위해서는 상당히 큰 전류를 공급해주어야 하며, 동작시간이 오래 걸린다는 단점을 가지게 된다. 따라서 적정 전류와 동작주기를 고려할 때 구동기의 구조를 직선형으로 선택할 수 밖에 없으며, 또한 전류를 5A이상 되지 않도록 하기 위해서 MW의 diameter를 100μm와 150μm로 선택하였다.

나. 기구설계

구동력을 얻기 위해 필요한 wire의 길이로 가급적 소형의 구동기를 설계하고자 minimum bend radius를 참고로 하여 풀리를 설치하고 복원력을 주기위해 steel spring을 사용하였다. 구동기의 형상은 ON/OFF 동작용 구동부가 별개의 MW로 구성되도록 설계하였으며, 가운데 벽을 중심으로 앞면은 ON동작, 후면은 OFF동작을 하도록 고안하였다. 다음 그림 3.3은 이 형상을 나타낸다.



(a)전면 (b)후면

그림 3.3 Mock-up 모델의 전면(a)과 후면(b)

그림 3.3(a)는 MW(1)이 풀리(4)를 통하여 링크(5)에 연결되어 있다. MW(1)에 전류가 흐르면 MW(1)가 수축되면서 링크(5)를 반시계 방향으로 회전시켜서 부재(8)을 왼쪽으로 밀게 되면 회전 링크 (10)을 걸게 되며 MW(1)이 더욱 수축이 되면 상하이동부(6)이 아래쪽으로 당겨지며, 부재(8)에 걸려있는 회전링크 (10)을 시계방향으로 회전시킨다. MW(1)에 흐르는 전류를 차단하면 원래길이대로 늘어나며, 이때 스프링(7)에 의하여 부재(8)은 우측으로 돌아오게 되며, 상하이동부(6)은 스프링(9)에 의하여 위쪽으로 이동한다. 그림 3.3(b)는 (a)와 동일한 동작을 하며 MW가 작용하는 힘의 방향이 반대이다.

다. Electronic Drive & Controller 설계

Micom(8051)의 신호로 구동이 가능하게 하기 위해 Cmplementary Switch 회로를 사용하였고 고속 스위칭을 가능하게 하고 최대 5A의 전류가 흐를 경우의 발열문제를 고려하여 MOSFET을 선정하였다. 그리고 Bundle Wire의 저항 값에 최소한의 영향을 주기위해 MOSFET의 channel을 최대로 개방하여 turn on 저항을 최소로 하고 일정한 값을 갖도록 하였다. Potentiometer를 사용하여 Bundle Wire의 수축 길이 변화를 측정하고 7-Segment를 이용하여 위치변화와 동작시간을 측정하고 Data를 표시하였다. 그림 3.4는 Drive & Controller 회로를 나타낸다.

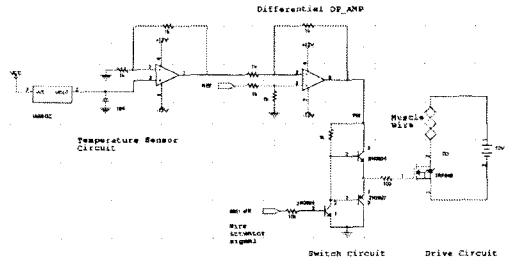


그림 3.4 구동기 Drive의 diagram

라. Mock-up 모델의 성능 평가

i) 실험을 위해 제작한 Bundle Wire 규격표

	지름 (μm)	길이 (cm)	개수	저항 (Ω)	측정저항 (Ω)	Recommend Current (mA) *
1	100	50.0	36	2.080	1.8	180
2	100	50.0	24	3.125	2.7	180
3	150	51.7	9	2.870	3.2	400
	* Wire의 Data Sheet 상에서 0.5sec 동작을 위한 전류 (in still air at 20℃)					

표 3-5. 100μm와 150μm의 Bundle 구조의 실험 데이터

ii) Bundle Wire 실험 결과

표 3-1는 표 3-2 각각의 Bundle Wire에 대하여 동작시간이 0.5sec 일 때 해당Wire의 변형이 발생하지 않고 최대의 수축 길이를 얻을 수 있는 전압과 전류를 나타낸다. 백분율은 표 3-1에서 표기한 Recommend Current 대비 전류 배율이다.

	지름 (μm)	시간 (sec)	수축길이 (cm)	전압 (V)	전류 (mA/wire)*	백분율 (%) **
1	100	0.5	1.75	18	253	140.6
2	100	0.5	1.70	18	260	144.4
3	150	0.5	2.06	18	592	148.0
	* MOSFET 저항 0.18Ω 고려하여 얻어진 Wire 하나에 대한 전류					
	** Recommend Current 대비 배율					

표 3-6. 100μm와 150μm의 전류, 전압, 변화길이 데이터

iii) 동작 사이클 실험 결과

표 3-7은 mock-up에서 100, 150μm의 Bundle Wire의 수축 길이와 시간, 이완 시간에 관한 실험 데이터이다.

	지름 (μm)	수축길이 (cm)	수축시간 (sec)	이완시간 (sec)*	전체 이완시간 (sec)**
1	100	1.393	0.5	9.786	32.272
2	150	1.930	0.5	5.107	18.984
	* 수축 길이 30% 이완시간 (10회 평균 데이터)				
	** 수축 길이 100% 이완시간 (10회 평균 데이터)				

표 3-7. Bundle Wire 동작 사이클 실험 데이터

Ⅳ. 적용 예

다음 사진 1은 설계한 구동기를 문 잠금 장치에 적용한 사진이다. 표 3.1의 설계 조건에서 Duty Cycle (Push-Reset-Pull-Reset=0.5-9.5-0.5-9.5)에 대한 고려를 추가하여 실험하였고 결과는 표 3.7과 같다.

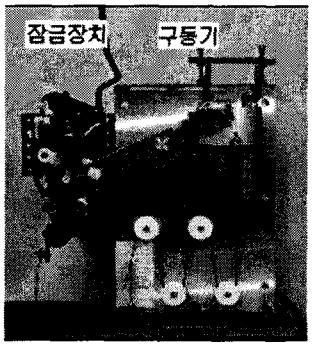


사진 1. 자동차용 Door 잠금장치 적용 예

Ⅴ. 결 론

본 논문에서 SMA를 이용하여 5kgf의 구동력, 15mm의 수축 길이, 0.5sec의 동작시간을 만족하는 구동기를 설계할 수 있었고 실제 문 잠금장치로의 적용 예에 있어서 수축하는 전체 길이의 30~40% 정도에서 반복동작이 일어나도록 설계하면 원하는 duty cycle을 만족하는 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 실제 SMA를 이용하여 구동기를 설계할 경우 MW의 정확한 히스테리시스 특성을 파악하기 어렵고 주위 온도에 따라 MW의 냉각 시간에 차이가 생기게 된다. 그리고 전류와 수축 속도 사이의 명확한 관계가 알려져 있지 않아 요구되는 동작시간에 따라 적절한 전류를 실험적으로 찾아야 하므로 기본연구가 보다 철저히 연구되어야 한다. 여러 가닥의 Wire를 Bundle로 제작하여 실험을 한 경우와 단일 Wire로 실험한 결과 사이에 다소 차이를 보였고 필요한 구동력을 얻기 위해 수 십 가닥의 Wire를 Bundle로 제작하여 사용 시 Wire의 접촉으로 인한 여러 가지 영향이 나타나기 때문에 Bundle로 제작 시 이에 대한 보다 깊은 연구가 필요하다. 또한 Bundle 제작 시 각 Wire의 길이에 차이가 발생할 경우 이로 인해 일부 Wire에 과도한 Stress의 집중으로 피로도가 누적되어 Wire의 수명을 짧게 할 수 있고 구동력에도 영향을 주게 되므로 주의해야 한다. 그리고 Wire의 개수가 증가할수록 저항성분이 작아지게 되므로 Wire와 관련된 주변회로의 접속저항을 줄여야만 한다.

참고문헌

[1] M. Hashimoto, M. Takeda, H. Sagawa, I. Chiba, K. Sato, "Application of Shape Memory Alloy to Robotic Actuators", *J. Robotic Systems*, 2(1), 3-25, 1985

[2] K. Kuribayashi, "A New Actuator of a Joint Mechanism using TiNi Alloy Wire," *Int. J. Robotics*, 4(4), 47-58, 1986

[3] K. Ikuta, "Micro/Miniature Shape Memory Alloy Actuator," *IEEE Robotics and Automation*, 3, 2151-2161, 1990

[4] K. Ikuta, M. Tsukamoto, S. Hirose, "Shape Memory Alloy Servo Actuator with Electrical Resistance Feedback and Application for Active Endoscope," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Information*, 427-430, 1988

[5] D. Grant, V. Hayward, "'Variable Control Structure of Shape Memory Alloy Actuators," *IEEE Control Systems*, 17(3), 80-88, 1997

[6] T. Waram, *Actuator Design Using Shape Memory Alloys*, 1993, ISBN 0-9699428-0-X

[7] Roger G. Gilbertson, *Muscle Wires Project Book*, 1994, ISBN 1-879896-13-3