

논문 98-7-6-09

## Bias 스프링을 이용한 형상기억합금 액츄에이터의 설계 방법

이승기\*, 나승우\*\*

## Design Method for Shape Memory Alloy Actuator with Bias Spring

Seung-Ki Lee and Seung-Woo Na

## 요 약

Bias 스프링을 이용한 형상기억합금 액츄에이터는 양방향 동작기구로서 이용이 가능하다. 이러한 bias식 형상기억합금 액츄에이터를 설계하기 위해서는 발생력이나 작동변위 등의 설계 사양이 만족되도록 형상기억합금 스프링 및 bias 스프링의 구조를 결정하여야 한다. 본 논문에서는 bias식 형상기억합금 액츄에이터의 설계방법으로서, 경험적 가정에 의존하는 기존의 방법과는 달리 주어진 설계 사양만으로부터 직접 설계가 가능한 새로운 방법을 제시하고 이를 실험결과와 비교하였다. 실험값도 설계값과 비교적 잘 일치하여 제시된 설계방법의 타당성 및 유용성을 검증하였다.

## Abstract

The actuator using shape memory alloy spring with bias spring can act as a bidirectional actuator due to the restoring force of the bias spring. In the design of shape memory actuator with bias spring, the required design specifications are the generated force and the necessary stroke. To fulfill these requirements, shape memory alloy spring and bias spring should be designed carefully considering the specified application. In this paper, the novel design method for shape memory alloy actuator with bias spring, which does not require any assumptions from experience, has been proposed and verified by the test of fabricated shape memory alloy actuator. The experimental results show good agreements with calculated values, which guarantees the practical validity of our proposed design method.

## 1. 서론

형상기억합금은 열에 의한 상변태에 의해 동작하는 기능성 재료로서 저전압 구동 등의 특성에 의해 소형 액츄에이터의 재료로서 주목을 받고 있다. 특히 감지와 동작을 동시에 할 수 있다는 점에서 초소형 액츄에이터로서 가능성을 인정받고 있다.<sup>1) 3)</sup>

형상기억합금은 일반적으로 선의 형태보다는 큰 변

위를 얻을 수 있는 스프링 형태로 가공하여 사용한다.

형상기억합금의 동작 특성은 크게 free recovery, constrained recovery, actuator function으로 나눌 수 있다.<sup>3)</sup> 이들 중 free recovery, constrained recovery는 반복 동작을 하지 않으며 actuator function은 반복 동작을 하는 것이 특징이다. Free recovery는 형상기억합금 스프링을 늘렸다가 하중을 가하지 않는 조건에서 가열하면 본래의 형상으로 복원되는 동작으로 이러한 방법을 이용하는 응용 예는 거의 없다. Constrained recovery는 저온시에 변형을 한 후 가열하여 본래의 형상으로 돌아오려 할 때 완전한 회복이 되지 않도록 하는 방법으로 파이프 이음, 컨넥터 등이 응용의 예이다.

\* 단국대학교 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Dankook University)

\*\* (주)유유 신소재연구소 (Research Institute of Advanced Materials, Yuyu)

<접수일자 : 1998년 10월 20일>

로봇 등에 사용되는 액츄에이터는 모두 actuator function 즉, 저온시와 고온시에 반복 동작을 하도록 하는 것이다.

형상기억합금은 저온시에 변형력을 인가해 어떤 형상으로 변형한 후 가열하면 기억된 형상으로 돌아가지만 다시 냉각하여도 변형된 형상으로 돌아가지 않는 일방향 동작 특성(one way property)을 가진다. 저온과 고온시의 2가지 형상을 기억하여 양방향 동작 특성을 얻은 보고가 있으나<sup>[4,5]</sup> 형상 회복이 불완전하여 실제 적용에는 적합하지 않다. 일방향 동작 특성을 가지는 형상기억합금을 반복 동작을 하는 액츄에이터로 이용하기 위해서는 저온시에 변형을 일으키기 위하여 하중을 가하는 것이 필요하다. 반복 동작을 시키는 방법으로는 추를 매다는 방법 등에 의해 형상기억합금에 일정한 하중을 가하는 방식과, bias 스프링이나 2개 이상의 형상기억합금을 함께 연결하여 가변 하중을 가하는 방식이 있다. 추를 이용하는 방법은 동작에 제한이 있어 사용하지 않고 변형력으로써 bias 스프링을 이용하는 bias식 또는 형상기억합금을 이용하는 이른바 차동식이 주로 사용되고 있다.<sup>[1,6]</sup> Bias식은 형상기억합금에 무리한 힘이 가해지지 않으며 제작 및 작동이 간단한 이점이 있다. 차동식은 bias식보다 응답 속도가 빠르나 형상기억합금에 큰 힘이 가해지게 되어 반복 수명을 단축시키는 단점이 있다. 그림 1에 일방향 동작 특성을 가지는 형상기억합금을 양방향 동작을 하도록 하는 방법을 나타내었다.

형상기억합금을 액츄에이터로 사용하기 위해서는 액츄에이터가 동작하는 힘, 변위, 속도 등을 결정하는 설계 과정이 필요하다. 이러한 설계의 한 예로서 자벌레의 원리를 응용한 관내 주행기구를 들 수 있다.<sup>[7]</sup> 관내 주행기구의 지지부는 주행할 때는 관에서 이격되고 멈출 때는 일정한 힘으로 관을 지지하여야 하므로, 관을 밀고 있는 힘 및 주행기구가 관내의 이물질 등에 방해받지 않고 진행할 수 있도록 이격되는 변위 등이 함께 고려되어 설계되어야 한다.

형상기억합금이 발견된 이후 재료 자체에 대한 연구는 매우 활발하였으나 액츄에이터로 사용하기 위한 설계 방법에 대한 연구는 부족한 실정이다. Bias 스프링을 이용하는 설계에 대한 일부 문헌이 있으나<sup>[6]</sup> 설계하는데 있어서 많은 반복 실험을 통한 경험적 가정이 포함되어 있으므로, 다양한 설계 변경 등을 통해 원하는 목표 사양을 만족시키고자 하는 액츄에이터의 설계

에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 반복 동작의 한 방법으로써 bias 스프링을 이용한 bias식 액츄에이터를, 사용 목적에 적합한 힘과 변위 만으로부터 직접 설계할 수 있는 설계 방법에 대하여 연구하였다. 형상기억합금 액츄에이터의 힘과 변위를 결정하는 과정은 형상기억합금 스프링과 바이어스 스프링의 구조를 적절히 조합하여 사용 목적에 맞는 동작을 하도록 하는 과정이다. 구조를 적절히 조합한다는 것은 형상기억합금 및 바이어스 스프링의 소선경, 스프링경, 턴수, 스프링의 길이 등을 결정하는 것을 말한다.

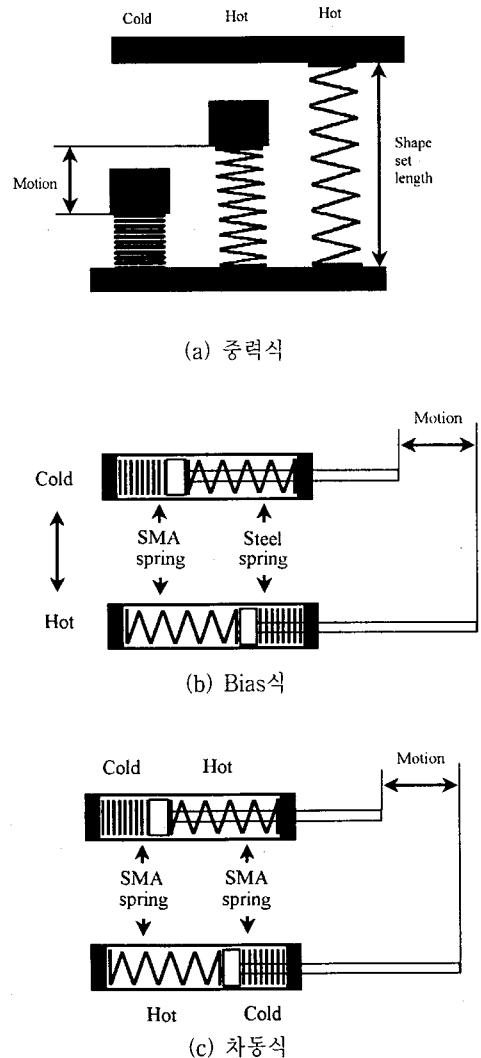


그림 1. 양방향 동작 기구

Fig. 1. Bidirectional moving mechanism

## 2. 형상기억합금과 바이어스 스프링을 조합한 액추에이터의 동작 해석

형상기억합금과 bias 스프링을 이용한 액추에이터의 동작 해석은 일반적으로 그림 2와 같은 방법을 사용하여 힘, 변위 등의 관계를 해석한다. 그림 2는 bias 스프링 및 형상기억합금의 고온과 저온시의 힘-변위 관계를 함께 나타낸 것이다. 형상기억합금의 힘-변위 관계는 그림 3과 같이 실제로 비선형의 관계를 가지나 계산의 편의를 위하여 선형으로 가정하는 것이 일반적이다 [1,6].

형상기억합금과 bias 스프링을 조합하면 저온일 때는  $(X_L, F_L)$ 의 점에서 평형을 이루고 고온일 때는  $(X_H, F_H)$ 의 점에서 평형을 이루게 된다. 따라서 액추에이터의 변위는 free recovery 동작을 할 경우

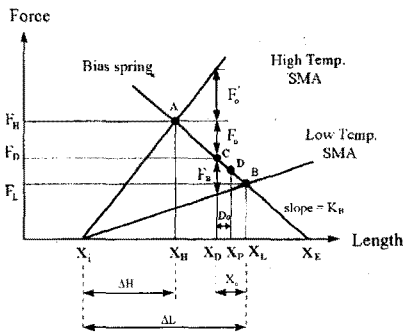


그림 2. Bias식 형상기억합금 액추에이터 해석을 위한 그림  
Fig. 2. Force-length plot for analysis of SMA actuator

$D_0$  : 동작 stroke, 공차

$X_0$  : 가상 동작 stroke, stopper가 없을 때의 동작 stroke ( $X_0 = 2D_0$ )

$X_i$  : 형상기억합금 스프링의 기억되어 있는 형상의 길이

$X_H$  : 형상기억합금 스프링의 고온시의 길이

$X_L$  : 형상기억합금 스프링의 저온시의 길이

$X_D$  : 관을 지지할때의 형상기억합금의 길이

$F_H$  : 고온시 bias 스프링과 평형이 되는 형상기억합금 스프링의 힘

$F_L$  : 저온시 bias 스프링과 평형이 되는 형상기억합금 스프링의 힘

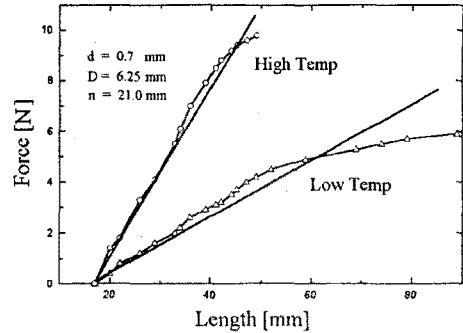


그림 3. 형상기억합금의 힘-변위 관계선  
Fig. 3. Force-length diagram of SMA

$X_L - X_H$ 가 되나 실제로 고온시의 힘을 외부에서 이용하고자 한다면 고온시에 기억된 형상으로 완전히 회복하지 못하도록 하거나, 또는 저온시의 힘을 사용하고자 한다면 저온시에 완전히 평형점으로 가지 못하도록 하므로 실제 변위는 제한되게 된다. 그림 4의 주행기구의 지지부를 예를 들면 관이 없는 경우 고온시 형상기억합금은  $X_H$ 까지 줄어들 수 있으며 (a), stopper가 없으면 저온시에는  $X_L$ 까지 늘어날 수 있다 (b). 그러나 관과 stopper 때문에 형상기억합금의 동작 변위는  $X_P, X_D$ 로 제한되게 된다 (c, d). 그림 4의 (a), (b), (c), (d)는 그림 2의 A, B, C, D점의 상태에 해당한다. 동작 변위  $D_0$ 는 stopper에 의해 식 (1)과 같이 결정된다. 이때 지지부가 그림 4 (d)와 같이 평형이 되기 위해서  $X_P$ 는  $X_D$ 와  $X_L$ 의 중점이 되어야 한다.

그림 4의 지지부분은 bias식으로 관을 지지할 때 형상기억합금의 고온시의 힘을 사용하며  $X_D, X_P$ 가 동작점이므로 실제 동작범위  $D_0$ 와 외부로 나타나는 힘 중 일부인  $F_0$ 는 식 (1), (2)와 같이 된다.

$$D_0 = X_P - X_D \tag{1}$$

$$F_0 = F_H - F_D \tag{2}$$

실제 외부로 나타나는 전체 힘을  $F$ 라고 하면  $F$ 와  $F_0$ 의 관계는 식 (3)과 같으며 따라서  $F$ 의 최소값을  $2F_0$ 라 할 수 있다 [부록 1 참조].

$$F \geq 2F_0 \tag{3}$$

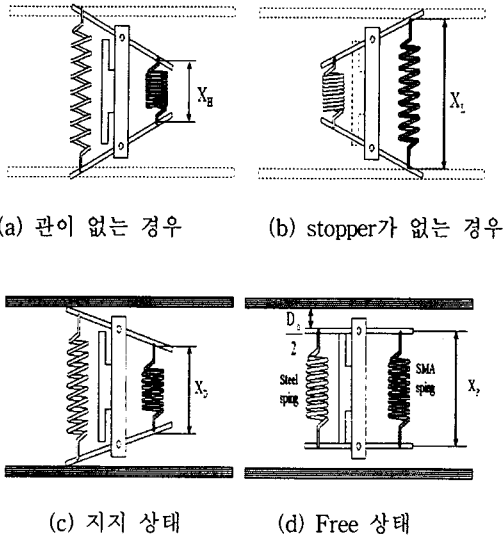


그림 4. 관내주행기구의 지지부분  
Fig. 4. Supporting part of in-pipe mechanism

그림 4 (c)의 상태는 고온시에 지지부가 관벽을 밀고 있는 상태로 이때 지지부는 큰 힘으로 관벽을 밀어야 한다. 또한 형상기억합금의 가열이 종료되면 짧은 시간 내에 그림 4 (d)의 상태로 되기 위해 bias 스프링이 큰 힘으로 당겨야한다. 관벽을 미는 힘 F와 bias 스프링의 복원력 F<sub>B</sub>가 모두 커야 하므로 두 힘의 곱이 가장 큰 X<sub>P</sub>와 X<sub>L</sub>의 중점을 고온시의 동작점으로 한다 [부록 2 참조]. 고온시의 동작점 X<sub>D</sub>는 X<sub>L</sub>과 X<sub>H</sub>의 중점이므로 X<sub>O</sub>, F<sub>O</sub>, F<sub>H</sub>는 다음과 같이 된다.

$$X_O = \frac{X_L - X_H}{2} \quad (4)$$

$$F_O = K_B \cdot X_O \quad (5)$$

$$F_H = F_L + 2F_O \quad (6)$$

형상기억합금의 고온시의 스프링상수를 K<sub>H</sub>, 저온시의 스프링상수를 K<sub>L</sub>이라고 하면 횡탄성계수의 비와 스프링상수의 비는 비례하므로 식 (7)과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{G_H}{G_L} = \frac{K_H}{K_L} = \frac{F_H/\Delta H}{F_L/\Delta L} \quad (7)$$

G<sub>H</sub>/G<sub>L</sub> = R 이라 하면 식 (7)은 다음과 같이 된다.

$$R = \frac{F_H}{F_L} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta H} = \frac{F_L + 2F_O}{F_L} \cdot \frac{X_L - X_i}{X_L - X_i - 2X_O} \quad (8)$$

식 (8)을 F<sub>L</sub>에 대하여 정리하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_L = \frac{2F_O}{R(1 - \frac{2X_O}{X_D + X_O - X_i}) - 1} \quad (9)$$

식 (9)는 bias 스프링과 형상기억합금 스프링을 조합한 액추에이터 설계에 필요한 힘, 변위 등의 관계를 나타내는 식이다. F<sub>O</sub>, X<sub>O</sub>, X<sub>D</sub>는 설계시 사양으로 주어지는 값이고 R은 횡탄성계수의 측정에 의해 알고 있는 값이므로 식 (9)는 저온시 형상기억합금의 힘 F<sub>L</sub>과 형상기억합금 스프링의 기억되어 있는 길이 X<sub>i</sub>에 관한 식이 된다. 관내 주행 기구를 예로 들면 F<sub>O</sub>는 관을 지지하는 힘의 일부, X<sub>O</sub>는 관내 주행 기구가 진행하는 데 있어서 방해되지 않도록 하는 지지부와 관벽과의 이격거리인 D<sub>0</sub>, X<sub>D</sub>는 관의 직경과 D<sub>0</sub>로부터 구해진다.

F<sub>L</sub>을 구하기 위해 식 (9)에서 X<sub>i</sub>와 F<sub>L</sub>의 관계를 F<sub>O</sub>를 변화시키며 그래프로 도시하면 그림 5와 같이 된다

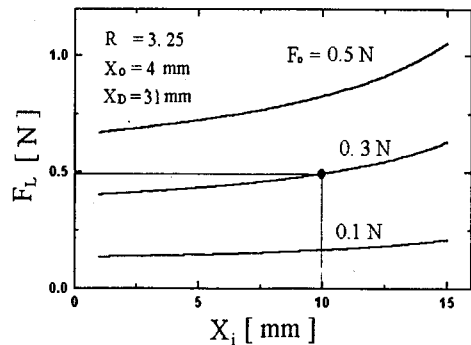


그림 5. 저온시의 힘과 초기 길이 결정을 위한 그림  
Fig. 5. Plot for selection of force at low temperature and initial length

(7) 그림 5에서 액추에이터의 크기를 고려하여 형상기억합

금 스프링의 길이  $X_i$ 를 정해주면 저온시의 힘  $F_L$ 이 결정된다. 따라서, 결정된  $X_i$  및  $F_L$ 을 이용하여  $F_H$ ,  $K_B$ ,  $X_L$ ,  $X_H$  등의 형상기억합금 스프링 및 bias 스프링 설계에 필요한 파라미터들을 모두 구할 수 있게 된다.

### 3. 형상기억합금 스프링의 설계

형상기억합금의 횡탄성계수는 그림 3에 도시한 바와 같이 비선형이지만 선형으로 가정하여 보통의 스프링의 설계방법과 같은 방식으로 한다. 코일 형태의 스프링은 코일이 붙어 있는 원통 스프링과 코일이 떨어져 있는 원통 스프링이 있다. 본 연구에서 제작하고자 하는 형상기억합금 스프링은 코일이 붙어 있는 closed helical 스프링이며 형상기억합금 스프링 설계에 쓰이는 기본 식을 정리하면 다음과 같다 [1,8].

$$\tau' = \frac{8PD}{\pi d^3} \quad (10)$$

$$\delta' = \frac{8PD^3n}{Gd^4} \quad (11)$$

식 (10)은 소선경  $d$ , 스프링경  $D$ 의 구조인 스프링에 하중  $P$ 를 가할 때 스프링이 받게 되는 전단응력  $\tau'$ 를 표현하는 식으로 이 스프링이  $n$  턴의 구조를 가진다면 그 때의 스프링 변위  $\delta'$ 는 식 (11)로 나타나게 된다. 여기서  $G$ 는 형상기억합금 스프링의 횡탄성계수를 뜻한다. 그러나 형상기억합금을 스프링 형태로 가공할 경우 횡탄성계수를 선형으로 가정할 때 발생하는 오차를 수정하기 위하여 응력수정계수  $\beta$ 를 응력에 곱해주어야 한다. 즉,  $\tau = \tau'\beta$ 로 사용하며, 식 (11)의  $\delta'$ 는 식 (10)에서 유도된 식이므로  $\delta = \delta'\beta$ 로 사용한다. 식 (12)로 표현되는 형상기억합금 스프링의 스프링상수  $K$ 는 고온시의 스프링상수  $K_H$ 와 저온시의 스프링상수  $K_L$ 로 나누어 쓸 수 있으며 식 (12)의 관계로부터 식 (13)과 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{P}{\delta} \quad (12)$$

$$K_H = \frac{G_H d^4}{8D^3 n \beta} \quad , \quad K_L = \frac{G_L d^4}{8D^3 n \beta} \quad (13)$$

본 연구에서 사용하는 스프링은 코일이 붙어 있으므로  $X_i = n \cdot d$ 로 표현되며 스프링 지수  $C = D/d$ 로 정

의되므로 식 (13)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_H = \frac{G_H d^2}{8X_i C^3 \beta} \quad , \quad K_L = \frac{G_L d^2}{8X_i C^3 \beta} \quad (14)$$

식 (14)는 스프링의 구조로부터 스프링상수를 알 수 있는 식이며 그림 2에서 고온시와 저온시 형상기억합금 스프링의 스프링상수는 식 (15)와 같이 계산할 수 있다.

$$K_H = \frac{F_H}{\Delta H} \quad , \quad K_L = \frac{F_L}{\Delta L} \quad (15)$$

식 (14)에서 횡탄성계수는 측정을 통하여 알 수 있는 값으로 구조가 달라져도 변하지 않는 재료의 고유한 값이다. 따라서 식 (14)에서 소선경  $d$ 가 결정되면 식 (15)의 결과를 이용하여  $C^3\beta$ 를 식 (16)과 같이 구할 수 있다.

$$C^3\beta = \frac{G_H d^2}{8X_i K_H} = \frac{G_L d^2}{8X_i K_L} \quad (16)$$

소선경  $d$ 는 사용 목적에 맞는 적절한 값을 대입하는데 이는 일반적으로 상품화되어 있는 형상기억합금 선을 열처리하여 사용하게 되므로 선경에 대한 선택의 여지가 많지 않기 때문이다. 수정계수  $\beta$ 를 일반적으로 널리 쓰이는 Wahl의 식<sup>[1]</sup>

$$\beta = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \quad (17)$$

을 적용하면  $C^3\beta$ 를 구할 수 있다.

$$C^3\beta = C^3 \left( \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \right) \quad (18)$$

식 (18)은  $C$ 에 대한 4차 방정식으로 이 방정식으로부터, 스프링 지수를 경험적으로 가정하는 기존의 방법과는 달리 해석적으로 직접 구할 수 있다. 소선경  $d$ 의 값은 이미 정해져 있으므로 위에서 구한  $C$ 를 이용하여 스프링경  $D$ 를 구할 수 있다. 형상기억합금 스프링의 턴수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$n = \frac{X_i}{d} \quad (19)$$

이상의 결과로부터 형상기억합금 스프링 설계에 필요한 소선경, 스프링경, 턴수 등의 파라미터를 모두 구할 수 있다.

#### 4. Bias 스프링의 설계

일반적인 강철 스프링의 스프링 상수는 식 (20)과 같이 표현된다.

$$K_B = \frac{G_B d_B^4}{8 D_B^3 n_B} \quad (20)$$

식 (20)에서의 횡탄성계수  $G_B$ 는 스프링의 인장시범으로부터 구하며 형상기억합금 스프링에서처럼 구조가 바뀌어도 변하지 않는 값이다. 2절과 3절에서의 과정으로 그림 2의 B점과 C점의 좌표를 알고 있으므로 bias 스프링상수  $K_B$ 를 알 수 있다. 그림 2의 x축은 형상기억합금 스프링의 길이이다. Bias 스프링의 초기 길이를  $X_B$ 라 할 때, 형상기억합금 스프링의 길이가  $X_E$ 일때 bias 스프링의 길이는  $X_B$ 가 된다. 따라서 그림 4 (d)의 상태에서 bias 스프링의 늘어난 길이는  $X_E - X_P$ 가 되고 식 (21)과 같은 관계가 성립한다. 식 (21)을  $X_P$ 에 관하여 정리하면 식 (22)와 같이 bias 스프링의 초기 길이를 구할 수 있다.

$$X_B + (X_E - X_P) = X_P \quad (21)$$

$$X_B = 2X_P - X_E \quad (22)$$

Bias 스프링의 턴수 및 스프링경은 식 (23), (24)를 사용하여 구할 수 있게 된다.

$$n_B = \frac{X_B}{d_B} \quad (23)$$

$$D_B = 3 \sqrt{\frac{G_B d_B^4}{8 K_B n_B}} \quad (24)$$

형상기억합금을 액츄에이터로 사용하기 위해서는 동작 횟수, 변위, 힘을 고려하여 설계하여야 한다. 위의 사항에 대한 자료는 거의 없어 설계자의 경험에 의해 정해져야 하는 어려움이 있다. 동작 횟수는 식 (25)로 표현되는 저온시의 전단변형률  $\gamma_L$ 에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 안정적인 반복동작을 위하여  $\gamma_L = 1.5\%$ 로 한다.<sup>[11]</sup>

$$\gamma_L = \frac{d \cdot \text{stroke}}{\pi n D^2} \quad (25)$$

또한 안정된 동작을 보장할 수 있는 힘은 식 (26)에 의해, 사용 변위는 식 (27)에 의해 결정된다고 알려져 있다.<sup>[9]</sup>

$$F = 5500 \frac{d^3}{D} \quad (26)$$

$$L = 0.2Ad \left(\frac{D}{d}\right)^2 n \quad (27)$$

#### 5. 형상기억합금과 바이어스 스프링을 조합한 액츄에이터의 제작 및 동작 실험

지지부는 주행부가 동작할 때 밀리지 않도록 관벽을 지지할 수 있는 힘을 발생하도록 하여야 하므로 지지부에 요구되는 힘은 지지부와 관과의 마찰계수를 고려하여 결정한다. 마찰계수를  $\mu$ , 주행부의 발생력을  $F_d$ 라 하면 지지부의 발생력은 식 (28)과 같이 정해진다. 마찰 계수가 0.6으로 측정되었고 주행부의 발생력은 주행기구의 총 중량을 40 g 정도라고 가정할 때 0.4 N 이상이므로 식 (28)과 (3)의 관계에서  $F_0$ 는 0.33 N 이상의 값을 가져야 함을 알 수 있다.

$$F = \frac{F_d}{\mu} \quad (28)$$

제시된 bias 스프링의 설계 방법은 주어진 힘과 변위를 이용하여 bias식 액츄에이터를 제작하는 것이므로 동작 변위 또한 주어져야 한다. 본 논문에서는 동작 변위를 2 mm로 하였다. 지지부의 설계 사양을 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 지지부의 설계 사양

Table 1. Design specification for supporting part

지지부	힘	0.67 N
	변위	2 mm
주행부	힘	0.4 N 이상

3절과 4절의 과정을 이용하여 설계·제작한 형상기억합금 스프링과 bias 스프링의 값을 표 2에 나타내었다.

표 2의 구조를 가지는 형상기억합금 스프링과 bias

스프링을 제작하고 조합하여 그림 4와 같은 지지부를 제작한 후 발생력 측정을 위해 그림 6과 같은 측정을 하였다. 측정 결과 발생력 및 발생변위 등의 설계값이 측정값과 비교적 잘 일치하는 결과를 보였다. 발생 변위에서는 약간의 오차가 발생하였는데, 이러한 오차는 bias 스프링 및 형상기억합금의 제조 공정상의 오차와 지지부의 마찰력, 그리고 형상기억합금 스프링의 반복 동작에 의한 특성의 변화 때문이라고 생각된다. 설계값과 측정 결과를 그림 7에 나타내었다.

표 2. 형상기억합금 스프링 및 bias 스프링의 설계값 및 제작값

Table 2. Designed and fabricated values of SMA spring and bias spring

	스프링의 구조	설계값	제작값
형상기억합금 스프링	소선경	254 $\mu\text{m}$	254 $\mu\text{m}$
	스프링경	1.15 mm	1.2 mm
	턴수	39 turn	39 turn
Bias 스프링	소선경	0.5 mm	0.5 mm
	스프링경	5.6 mm	6 mm
	턴수	44 turn	44 turn

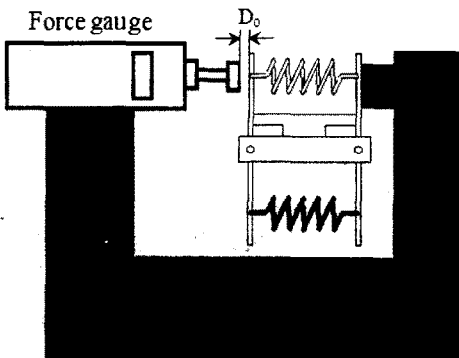


그림 6. 지지부 발생력 측정 장치

Fig. 6. Experimental setup for generated force measurement of supporting part

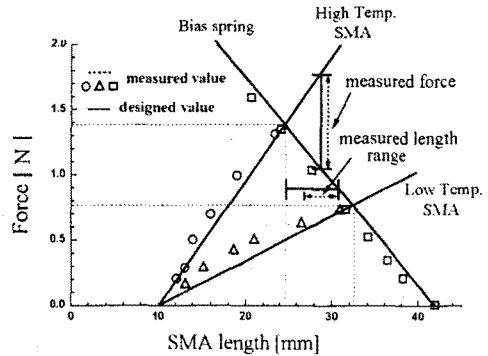


그림 7. Bias식 지지부의 발생력과 변위의 측정 결과

Fig. 7. Measured results of force and displacement of bias-type supporting part

## 6. 결론

본 논문에서는 바이어스식 형상기억합금 액추에이터에서, 사용 목적에 맞는 힘과 변위를 가질 수 있도록 설계하는 방법을 제시하였다. 제시된 설계 방법은 경험적 가정에 의존하는 기존의 방법과는 달리 설계 사양만으로부터 직접 액추에이터의 구조를 설계하는 방법이다. 제시된 설계 방법에 의해 실제로 형상기억합금 스프링 및 바이어스 스프링을 설계하고 제작하였으며 두 스프링을 조합하여 동작시킴으로써 제안된 설계 방법의 타당성을 검증하였다. 제작에 의한 측정값은 설계값과 잘 일치하여 제안된 설계 방법에 의해 액추에이터의 다양한 목표 사양에 대한 정확한 설계가 가능함을 알 수 있었다. 이러한 설계 방법은 바이어스 스프링을 이용하는 형상기억합금 액추에이터의 구조 설계에 유용하게 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구는 단국대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음.

## 7. 참고문헌

- [1] 舟久保 熙康(編), 形状記憶合金, 産業圖書, 1984.
- [2] 石川 昇治(編), 形状記憶合金應用アイデア集, 工業調

査會, 1987.

- [3] J. Cederström and J. Van Humbeeck, "Relationship between Shape Memory Material Properties and Applications", *Journal of de Physique IV*, vol. 5, pp. 335-339, 1995.
- [4] J. M. Guilemany and J. Fernández, "Mechanism of Two Way Memory Effect Obtained by Stabilised Stress Induced Martensite", *Journal of de Physique III*, vol. 5, pp 355-359, 1995.
- [5] H. Bordét and B.G. Mellor, "Two-Way Shape Memory Springs with Improved Repeatability on Thermal Cycling", *Journal of de Physique III*, vol. 5, pp 367-371, 1995.
- [6] T. Waram, *Actuator Design Using Shape Memory Alloys*, Mondo tronics, 1993.
- [7] 나승우, 이승기, "형상기억합금 스프링을 이용한 관내주행기구의 설계 및 제작", *전기학회논문지*, 제 47권, 제7호, pp. 1062-1068, 1998.
- [8] 車京玉, *材料力學演習*, 源和, pp. 218-223, 1993.
- [9] D. E Hodeson, *Using Shape Memory Alloys*, Shape Memory Applications Inc. 1988.

**부록 1. Bias식 구조에서 외부로 나타나는 힘의 크기에 대한 범위**

그림 A1은 힘  $F_0'$  과  $F_0$  와의 관계를 알아보기 위하여 그림 2를 간략하게 나타낸 것이다. 고온시 형상기억합금 스프링의 직선을  $y_1$ , bias 스프링의 직선을  $y_2$  라 하고 각각의 기울기를  $m_1, -m_2$ 라 하면 형상기억합금과 bias 스프링의 직선의 기울기는 다음과 같다.

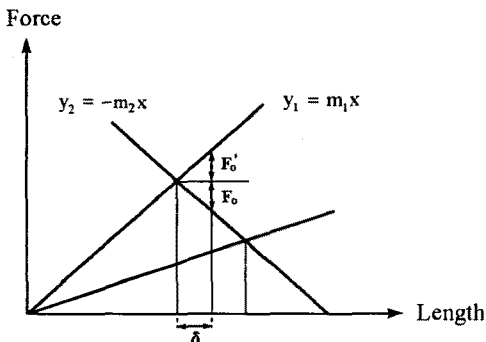


그림 A1. Bias식 구조의 동작 해석을 위한 그림  
Fig. A1. Plot for the analysis of bias-type actuator

$$m_1 = \frac{F_0'}{\delta}, \quad -m_2 = -\frac{F_0}{\delta} \tag{A1}$$

따라서  $m_1$ 과  $m_2$ 의 비는 식 (A2)와 같이 된다.

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{F_0'}{F_0} \tag{A2}$$

bias 스프링의 기울기는 고온시와 저온시 형상기억합금 스프링의 기울기의 사이의 값을 가지고, 고온시 형상기억합금 스프링의 기울기는 저온시 형상기억합금 스프링의 기울기보다  $R(=G_H/G_L)$ 배 만큼 크기 때문에  $F_0'$  과  $F_0$  의 관계는 식 (A3)와 같으며 고온시의 형상기억합금 스프링의 발생력  $F$ 는 식 (A4)와 같다.

$$F_0 \leq F_0' \leq R F_0 \tag{A3}$$

$$2 F_0 \leq F \leq (1+R) F_0 \tag{A4}$$

**부록 2. 지지부 동작점의 선정**

그림 B1에서  $F_b$ 와  $F$ 의 곱이 최대가 되는 동작점을 찾기 위해 고온시와 저온시의 형상기억합금 스프링의 직선의 기울기를 각각  $m_1, m_2$ 라 하고 편의상 이들 직선은 원점을 지나는 것으로 가정하면 이들 직선과 bias 스프링의 직선은 두점  $(X_H, m_1 X_H), (X_L, m_2 X_L)$ 을 지나게 된다.

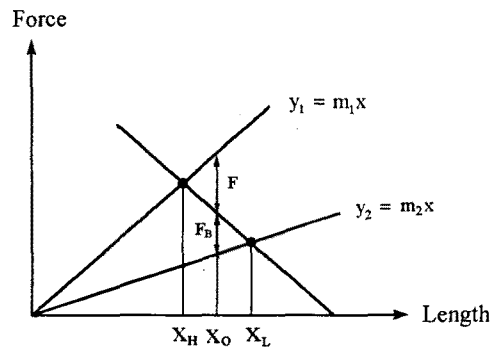


그림 B1. 지지부 동작점(D0) 결정을 위한 그림  
Fig. B1. Plot for decision of operating point of supporting part

따라서 bias 스프링의 직선은 식 (B1)과 같이 나타



낼 수 있으며 관벽을 미는 힘  $F$ 와 bias 스프링의 복원력  $F_B$ 는 식 (B2), (B3)으로 나타낼 수 있다.

$$y = \frac{m_1 X_H - m_2 X_L}{X_H - X_L} (x - X_L) + m_2 X_L \quad (B1)$$

$$F = m_1 X_O - \frac{m_1 X_H - m_2 X_L}{X_H - X_L} (X_O - X_L) - m_2 X_L \quad (B2)$$

$$F_B = \frac{m_1 X_H - m_2 X_L}{X_H - X_L} (X_O - X_L) + m_2 X_L - m_2 X_O \quad (B3)$$

$F$ 와  $F_B$ 의 곱은 식 (B4)와 같으므로  $F \cdot F_B$ 가 최대가 되는  $X_O$ 는 식 (B5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F \cdot F_B = - \left( \frac{m_1 - m_2}{X_H - X_L} \right)^2 X_L X_H \cdot X_O^2 + \left( \frac{m_1 - m_2}{X_H - X_L} \right)^2 X_L X_H (X_L + X_H) \cdot X_O - \left( m_2 X_L - \frac{m_1 X_H - m_2 X_L}{X_H - X_L} X_L \right)^2 \quad (B4)$$

따라서

$$X_O = \frac{X_H + X_L}{2} \quad (B5)$$

著 者 紹 介



이 승 기 (李 承 起)

1963년 5월 15일 생

1986년 서울대학교 전기공학과 졸업 (공학사)

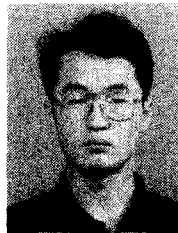
1988년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사)

1992년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사)

1992-1993년 일본 동북(東北)대학교 기계전자공학과 특별연구원 (JSPS fellow)

1994-1996년 단국대학교 전기공학과 전임강사

1996-현재 단국대학교 전기공학과 조교수



나 승 우 (羅 承 佑)

1970년 7월 8일 생

1996년 단국대학교 전기공학과 졸업 (공학사)

1998년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사)

현재 (주)유유 신소재 연구소 주임