

지그재그 형태의 형상기억합금 스프링을 이용한 굽힘 액추에이터의 제작

論 文

48C-4-8

Fabrication of Bending Actuator using Zigzag-type Shape Memory Alloy Spring

林安秀* · 李承起**

(An-Su Lim · Seung-Ki Lee)

Abstract - A bending actuator using zigzag type shape memory alloy springs has been fabricated and characterized. The fabricated millimeter-sized actuator has outer diameter of 3.0mm and inner diameter of 2.0mm. The zigzag type spring is more suitable for thin wall type actuator because the zigzag type spring has a planar structure comparing with the coil type spring which has a three-dimensional structure. The measured characteristics of the fabricated bending actuator show the possibility of practical application to micro active bending catheters.

Key Words : Shape memory alloy, Zigzag type spring, Bending actuator

1. 서 론

형상기억합금은 큰 변형률과 복원력을 갖고 전기 저항에 의한 가열 방식으로 동작하므로 간단한 구조 및 소형의 액추에이터에 적합한 기능성 재료이다 [1]. 따라서 형상기억합금을 소형 액추에이터에 이용하는 연구가 1980년대 이후 꾸준히 계속되어 왔으며 최근에는 이를 의료용으로 응용하려는 연구가 진행되어 오고 있다 [2,3]. 현재 실용적으로 응용이 가능한 형상기억합금은 Ni-Ti 합금과 Cu계 합금이며[4], 특히 Ni-Ti 합금은 내구성, 반복성 등의 효과가 뛰어나며 무엇보다도 생체 적합성이 우수하여 의료용 기구에 응용이 매우 유리하다 [5,6]. 이러한 Ni-Ti 형상기억합금을 내시경에 응용하는 경우, 기능성 재료가 가지는 특성, 즉 간단한 구조이면서도 큰 힘을 얻을 수 있다는 장점 때문에 초소형 작동형 내시경을 제작 가능하게 하므로 이를 이용하는 집중적인 연구가 진행되고 있다 [7].

초소형 내시경용 굽힘 액추에이터를 제작할 때 가장 중요한 것은 액추에이터 내부에 있는 채널을 통하여 내시경용 광섬유, 초소형 주사기 등의 의료기구를 삽입하여 사용하기 때문에 가능한 한 큰 직경을 갖는 채널을 확보할 수 있어야 한다는 점이다. 그러나 큰 채널의 확보는 전체 내시경의 소형화와 함께 이루어져야 하므로 굽힘 동작을 일으키는 장치가 차지할 수 있는 공간이 극도로 좁아지게 된다. 이러한 이유로 지금까지 초소형 작동형 내시경용 액추에이터의 구동장치로 형상기억합금을 극소형 코일형태로 성형한 스프링을 사용하고 있다 [2].

코일형태의 스프링은 큰 발생력과 변형률 및 성형의 용이성 때문에 구동장치로서 매우 적합한 구조가 된다. 그러나 초소형 작동형 내시경용 액추에이터에 사용하기 위해서는 이 스프링이 매우 작은 스프링경을 갖는 형태이어야 하는데 이는 제작에 많은 어려움이 따르게 된다.

본 논문에서는 간단한 방법으로 제작이 가능하고 공간 활용의 측면에서 코일 형태의 스프링보다 유리한 지그재그(zigzag) 형태의 형상기억합금 스프링을 제작하고 이를 초소형 굽힘 액추에이터에 이용하고자 한다. 지그재그 형태의 스프링은 3차원 구조인 코일 형태의 스프링에 비해 공간 점유율을 줄일 수 있는 평면 구조로서, 발생력이나 변형률 등이 코일 형태의 스프링에 비해 거의 같은 수준이며 따라서 내부 채널을 크게 하고 전체 크기를 소형화하는 데 매우 유리한 장점을 지닌다. 이러한 지그재그 형태의 형상기억합금 스프링을 이용하여 굽힘 액추에이터를 제작하고 제작된 액추에이터의 내시경에의 응용 가능성을 알아보기 위하여 굽힘 액추에이터의 굽힘 각도, 발생력 그리고 반복 동작에 따른 특성의 변화 등을 측정한다.

2. 액추에이터의 구조 및 원리

전체 액추에이터의 구조를 그림 1에 나타내었다. 전체 구조는 3개의 지그재그 형태의 형상기억합금 스프링, 접지용 에나멜 선, 내부 튜브와 외부 튜브, 양 끝단에 1개씩의 링크, 접속용 연결 핀, 그리고 고정용 내부 링크 2개로 구성된다. 내부 튜브와 외부 튜브 사이의 공간에, 잡아 늘려 있는 상태인 지그재그 형태의 형상기억합금 스프링이 120도 간격으로 배치되고 양 끝단에 링크가 연결된다. 앞부분의 링크는 황동으로서 3개의 형상기억합금 스프링을 접지시키기 위한 것이고 뒷부분의 링크는 PBT(Poly-Butylene-Terephthalate)로서 전체 내시경에 연결하기 위한 것이며 접지선을 포함해 4개의 연결용 핀이 접속된다. 사용된 튜브는 액추에이터의 지지대 역할

* 準 會 員 : 檀國大 工大 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 檀國大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博

接受日字 : 1998年 10月 30日

最終完了 : 1999年 2月 25日

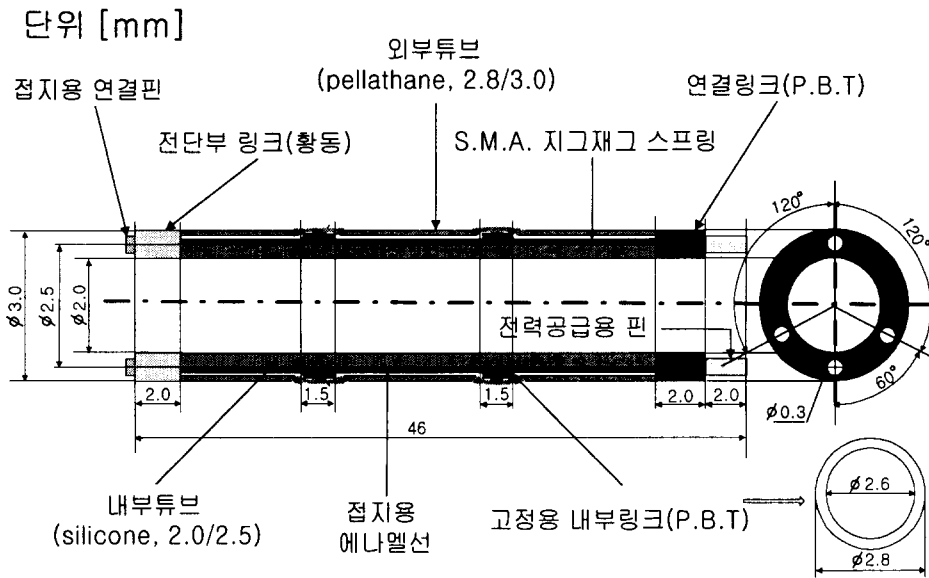


그림 1 굽힘 액추에이터의 구조도

Fig. 1 Structure of the bending actuator

을 함과 동시에 패키징용 재료로 사용되며 내경 2.0mm, 외경 2.5mm, 길이 40mm인 실리콘(silicone) 재질의 내부 튜브와 내경 2.8mm, 외경 3.0mm, 길이 40mm인 폴리우레탄 (polyurethane) 재질의 외부 튜브로 구성되어 있다.

그림 2는 액추에이터의 동작원리를 보이고 있다. 그림은 3개의 형상기억합금 스프링 중에서 어느 한 쪽에 전류를 인가할 때의 동작 모형이다. 먼저 그림 (a)는 잡아늘려진 상태의

형상기억합금 지그재그 스프링을 내부튜브 양 끝단에 연결된 링크에 고정시킨 모습이며, (b)는 이 스프링에 전류를 인가했을 때 발생하는 저항열로 인하여 스프링이 원래 형태로 수축하게 되고 이에 따라 튜브가 스프링이 있는 방향으로 구부러진 모습을 나타내고 있다. 이와 같은 원리를 이용하여 3개의 형상기억합금 스프링 중에서 어느 한쪽에 전류를 인가하면 전류에 의해 발생하는 저항 열로 인해 형상기억합금 스프링이 수축하게 되고 전체 액추에이터는 수축한 스프링 쪽으로 굽어지게 된다. 3개의 스프링에 독립적으로 전류를 인가하며 각각의 전류의 크기를 조절하면 임의의 방향으로의 굽힘 동작도 가능해진다.

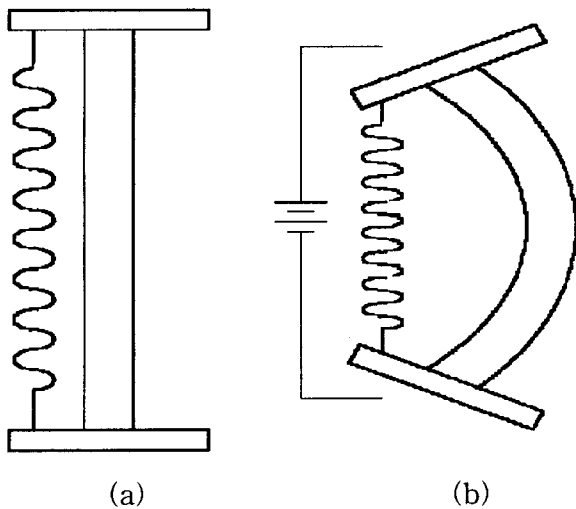


그림 2 굽힘 액추에이터의 동작원리 ; (a) 스프링에 전류를 인가하지 않았을 때, (b) 스프링에 전류를 인가 했을 때

Fig. 2 Operating principle of the bending actuator ; when (a) the current is not applied to the spring and (b) the current is applied to the spring

3. 액추에이터의 제작

3.1 지그재그 스프링의 제작

스프링 제작시 사용하는 형상기억합금은 소선의 굵기에 따라 변태온도에 도달하게 하는 전류량이 다르기 때문에 제한된 전류크기 내에서 적절한 동작을 할 수 있는 스프링 소선의 선정이 필요하게 된다. 본 논문에서는 확보 가능한 소선 중에서 소선경 0.1mm, 변태온도 80°C인 형상기억합금 소선을 사용하였다. 그림 3은 형상기억합금 소선을 이용한 지그재그 스프링의 제작방법을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 양끝으로 팽팽하게 잡아당겨진 두 개의 기둥을 따라서 가이드 선이 회전하고 동시에 기둥 사이로 형상기억합금 소선을 왕복시키면 지그재그 형태의 스프링 모양이 형성된다. 이렇게 하여 제작된 스프링을 550°C에서 10분간 열처리한 후 기둥으로 사용된 소선과 가이드 선을 제거하게 되면 비교적 간단한 방법으로 지그재그 형태의 스프링을 얻게 된다.

그림 4는 지그재그 형태의 스프링의 구조를 나타낸다. 지

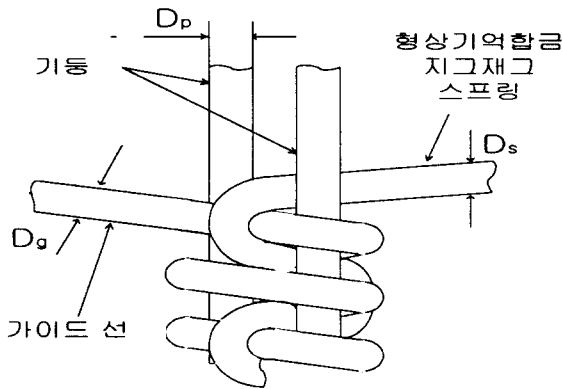
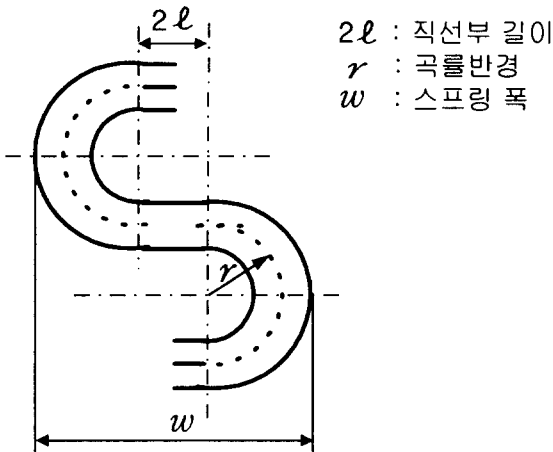


그림 3 지그재그 스프링의 제작 방법 ; D_p - 기둥의 선경, D_g - 가이드 선의 선경, D_s - 지그재그 스프링의 선경

Fig. 3 Fabrication method of zigzag type spring ; D_p - diameter of the post wire, D_g - diameter of the guide wire, D_s - diameter of the zigzag spring wire

그재그 스프링의 곡률 반경은 사용된 가이드 선의 굵기에 의해 결정되고 스프링 전체의 폭은 기둥과 가이드 선, 그리고 스프링으로 이용되는 형상기억합금 소선의 굵기에 의해 결정된다.



$2l$: 직선부 길이
 r : 곡률반경
 w : 스프링 폭

그림 4 지그재그 스프링의 형태 및 치수
 Fig. 4 Shape and dimension of zigzag type spring

식 (1)~(4)는 지그재그 스프링의 치수를 조절하기 위한 식이다.

$$w = 2(r + l) + D_s \tag{1}$$

$$= 2(D_s + D_g) + D_p \tag{2}$$

$$r = \frac{1}{2} (D_s + D_g) \tag{3}$$

$$l = \frac{1}{2} (D_g + D_p) \tag{4}$$

$$t = D_s$$

여기에서 r 은 지그재그 스프링의 곡률반경, w 는 스프링 폭, $2l$ 은 직선부의 길이를 나타내며, D_p 는 그림 3에 있는 기둥선의 선경, D_g 는 가이드 선의 선경, D_s 는 지그재그 스프링의 선경을 뜻한다. t 는 지그재그 스프링을 측면에서 보았을 때의 두께로서 지그재그 스프링이 평면적인 구조를 갖기 때문에 이 값은 지그재그 스프링의 선경과 동일한 값이 된다. 이러한 점 때문에 지그재그 스프링이 공간 활용 면에서 코일 형태의 스프링에 비해 유리한 점을 갖게 된다.

이 식을 이용하면 원하는 치수의 지그재그 스프링을 만들기 위한 각 선들의 선경을 알 수 있게 되며, 각 선들의 선경 조절에 의해 원하는 형상의 지그재그 스프링의 제작이 간단하게 가능하게 된다.

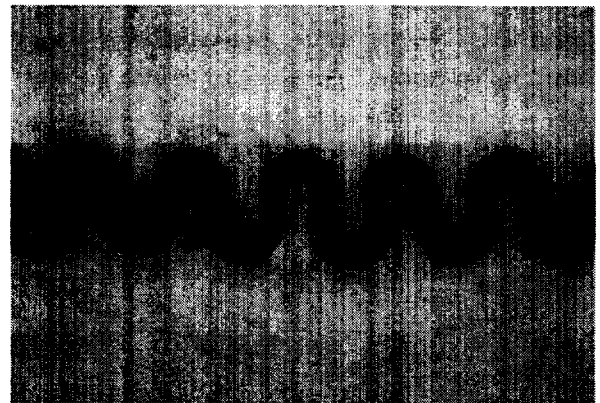


그림 5 제작된 지그재그 스프링의 현미경 사진 (50배)
 Fig. 5 Microscopic photograph of the fabricated zigzag type spring (magnification of 50)

그림 5는 이렇게 제작한 지그재그 형태의 형상기억합금 스프링의 사진이다. 사용한 기둥과 가이드 선의 직경은 모두 0.1mm이며 전체 폭은 0.5mm이다.

3.2 액추에이터의 조립

액추에이터의 성능은 동작시간 및 굽힘 각도에 의해서 결정된다. 빠른 굽힘 동작을 위해서는 스프링의 가열 시간이 빨라져야 하는데 이를 조절하기 위해서는 적절한 제어가 필요하다. 본 논문에서의 결과들이 이러한 제어를 제작하여 측정된 결과는 아니다. 액추에이터의 굽힘각도는 스프링의 초기 인장길이와 튜브의 영향을 가장 많이 받는다. 따라서 지그재그 스프링의 초기 인장길이의 설정에 있어서 충분한 실험 및 이론적인 검증이 있어야 한다. 본 논문에서는 열처리 직후 30mm인 지그재그 스프링을 40mm로 10mm 늘려서 사용하였으나 이는 최적화된 수치가 아니며 앞으로 이 부분의 보완이 필요하다. 튜브는 두꺼운 경우에 굽힘 각도가 줄어들고 방열이 어려워지며 반대로 얇은 경우는 좌굴이 발생하는 등의 문제점이 생기게 되는데, 이 때문에 제작된 액추에이터는 내부튜브를 두껍게 하여 좌굴을 방지하는 지지대로 사용하였으며 그 외벽에 지그재그 스프링을 120도 간격으로 올려놓은 후 스프링의 치우침을 방지하기 위하여 내경 2.7mm, 외경 2.9mm의 고정용 링크를 중간에 2개 삽입하였다. 그리고 그 위에 벽 두께가 0.1mm인 얇은 폴리우레탄 튜브를 씌워서 열의 방

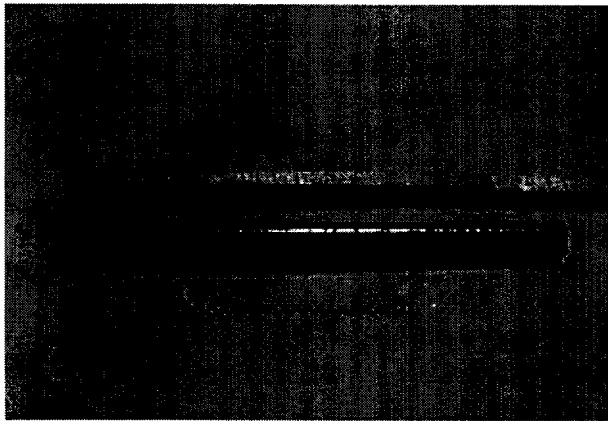


그림 6 제작된 굽힘 액추에이터의 외형 사진
Fig. 6 Photograph of the fabricated bending actuator



그림 7 제작된 굽힘 액추에이터의 동작 사진
Fig. 7 Photograph of the bending motion of the fabricated bending actuator

출을 쉽게 하였다. 폴리우레탄 튜브를 씌울 때는 마찰에 의한 스프링의 변형을 방지하기 위하여 튜브를 에탄올에 적신 후 사용하였다. 마지막으로 그림 1에 나타난 형상의 링크 두 개를 각각 양 끝단에 부착하여 스프링의 고정 및 전기적인 결선, 전체 내시경과의 연결이 가능하도록 하였다. 완성된 액추에이터의 각 스프링의 전기적 저항은 약 10Ω으로 측정되었다.

그림 6은 제작된 액추에이터의 외형사진이다. 그림의 좌측 부분에 있는 링크는 PBT 재질로서 링크 벽의 구멍에 꽂혀있는 핀을 이용해서 전력 공급 및 내시경과의 접속이 가능하게 하였다. 이렇게 제작한 액추에이터의 한 쪽 스프링에 240mA의 전류를 인가했을 때의 동작을 그림 7에 나타내었다.

4. 액추에이터의 성능평가

제작한 액추에이터의 성능을 평가하기 위해 그림 7과 같이 최대 굽힘이 일어날 때까지 전류를 인가한 후 자연 냉각에 의해 되돌아오는 모습을 디지털 변위계로 측정하여 각도로 환산하였다.

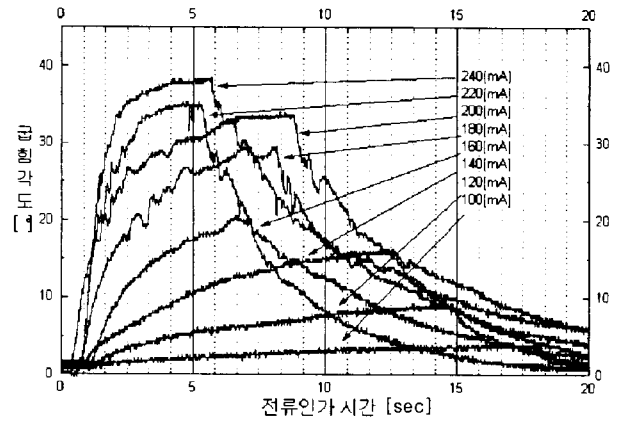


그림 8 인가전류 변화에 따른 굽힘 각도의 변화
Fig. 8 The change of the bending angle with variation of applying current

그림 8에는 이러한 결과로서 인가전류를 변화시키며 시간에 따른 굽힘 각도의 변화를 측정하여 그 결과를 나타내었다. 그림에서 굽힘 각도는 200mA 이상 인가시 35도 정도이며 이 때 상승 시간(rising time)은 3~4초이다. 그러나 튜브의 복원력에 의한 자연귀환에 소요되는 시간은 약 20초 정도로 아주 느린 반응을 보임을 알 수 있다. 이는 한쪽 스프링에 전류를 흘려주었다가 끊은 후 가열되었던 형상기억합금 스프링이 변태온도 이하로 내려가면서 발생력이 줄어드는 동안 튜브 자체의 복원력에 의해 원래의 위치로 되돌아오기 때문이며, 실제 사용에서는 전류를 흘려주지 않은 다른 두 개의 스프링에 전류를 인가하여 매우 빠른 속도로 원래의 위치로 되돌아오게 한다. 그림에서 전류의 공급은 육안으로 관찰하여 굽힘 동작이 더 이상 진행되지 않는 것으로 판단되는 시간까지로 하였으며 주변온도의 제어는 따로 고려하지 않았다. 따라서 160mA 이하의 전류값의 경우에는 충분한 굽힘 동작이 발생하지 않은 경우도 있고 각도 감소의 기울기가 불균일하게 나타나는 경우도 관찰되는 것으로 보인다.

그림 9는 액추에이터의 굽힘각을 0°로 유지한 상태에서의

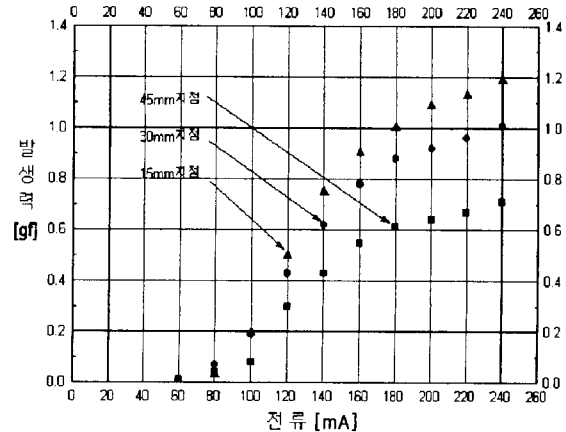


그림 9 액추에이터의 발생력 측정 결과
Fig. 9 Measured results of the force of the actuator

발생력을, 전류를 변화시켜 가면서 고정단으로부터 떨어진 거리에 따라 측정된 결과이다. 사용한 형상기억합금은 약 80℃에서부터 변태를 시작하는데 이 실험 결과에서 보면 100mA 이상 되는 지점에서 발생력이 증가하기 시작하는 것으로 보아 제작한 액추에이터의 경우 100mA 부근에서 변태온도에 도달하게 된다는 것을 알 수 있으며, 또한 최대 발생력은 인가 전류에 따라 다르나 1gf 이상의 힘이 나오고 있음을 알 수 있다.

그림 10과 그림 11은 각각 자연귀환시와 강제귀환시의 반복 특성을 나타내고 있다. 이 실험은 인가전류를 200mA로 하여, 동작이 멈추었다고 판단되는 시점을 기준으로 반복 동작을 시킨 실험으로 전류 주파수는 약 0.3Hz이다.

그림 10에 나타난 자연귀환의 경우는 한 개의 스프링에 전류를 흘려주어 굽힘 동작을 발생시킨 후 전류를 끊고 튜브의 복원력에 의해 원래의 위치로 되돌아가도록 한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 동작이 반복되어도 굽힘 각도는 약 23도 정도로 일정하게 유지되고 있으나 원래의 위치로 완전히 돌아가지 못하고 약 10도 정도의 굽힘 각도가 남아있게 됨을 알 수 있다. 이는 스프링에서 발생한 열이 충분히 외부로 빠져나가지 못하고 있기 때문이다.

그림 11은 한 개의 스프링에 전류를 흘려주어 굽힘 동작을 발생시킨 후 전류를 끊고, 다른 두 개의 스프링에 동시에 전류를 흘려줌으로써 원래의 위치로 돌아오는 동작을 강제로 시켜준 경우이다. 다른 두 개의 스프링에 전류를 흘려주면 원래의 위치를 지나쳐서 반대 방향으로의 굽힘 동작이 발생하게 되며 그림에서 음의 각도는 이러한 반대 방향을 의미한다. 음의 각도 방향으로 굽힘 동작이 발생하고 난 후 다시 다른 한쪽의 스프링에 전류를 흘려주면 반대쪽 두 개의 스프링이 충분히 냉각되지 않아 양의 방향으로의 굽힘 각도는 동작이 반복됨에 따라 점차 감소하게 된다. 이 때 굽힘각도가 양, 음인 경우가 비대칭으로 나타나게 되는데, 이는 세 개의 지그재그 스프링의 특성이 정확하게 동일하지 않기 때문인 것으로 보인다.

이상의 반복 특성으로부터 굽힘 액추에이터가 원활하게 동작하기 위해서는 형상기억합금 스프링의 방열이 매우 중요하다

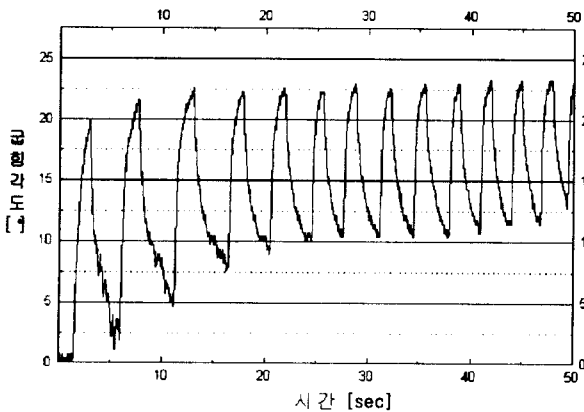


그림 10 자연귀환 방식에 따른 반복특성 (주파수 : 0.3Hz)
 Fig. 10 Repeated motion of the actuator with natural cooling (frequency of 0.3Hz)

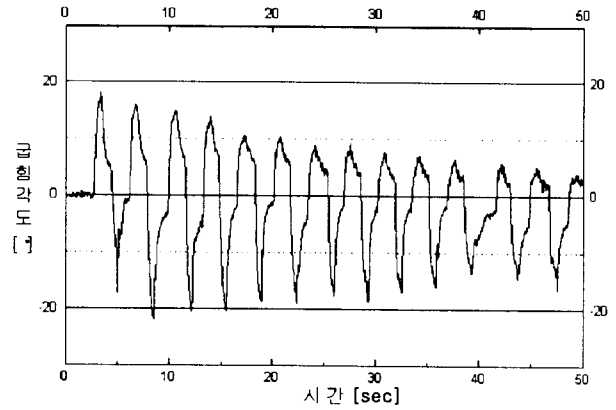


그림 11 강제귀환 방식에 따른 반복특성 (주파수 : 0.3Hz)
 Fig. 11 Repeated motion of the actuator with differential actuation (frequency of 0.3Hz)

고 특정 주파수 이상의 반복 동작에는 한계가 있음을 알 수 있다. 따라서 전체 액추에이터의 성능 향상을 위해 적절한 재질 및 두께의 외부 튜브 선정이 반드시 필요하며 외부 튜브의 영향을 정량적으로 분석해야 할 것이다. 그러나 실제 의료용으로서의 응용에서는 빠른 주파수에서의 지속적인 사용은 거의 없으므로 내시경용 자체로서는 별다른 문제점이 없을 것으로 판단된다.

현재 사용하고 있는 형상기억합금은 변태온도가 약 80℃인 것으로서 변태온도가 좀 더 낮은 형상기억합금을 이용한다면 입력 전력의 감소가 가능하므로 보다 인체에 안전한 액추에이터를 제작할 수 있을 것이다.

5. 결 론

지그재그 형태의 형상기억합금 스프링을 제작하고 이를 이용하여 초소형 내시경용 굽힘 액추에이터를 제작하였다. 지그재그 형태의 스프링은 코일 형태의 스프링에 비해 공간의 활용에 장점을 지니고 있으며 이를 이용하여 내경 2.0mm, 외경 3.0mm의 초소형 작동형 내시경의 제작이 가능하였다. 제작된 굽힘 액추에이터의 내시경으로서의 응용 가능성을 알아보기 위하여 전류에 따른 굽힘 각도의 변화, 발생력의 변화 및 반복 동작 특성 등을 측정하고 분석하였다. 제작한 굽힘 액추에이터는 3초 이내의 응답 속도 및 30도 이상의 굽힘 각도를 갖는 특성을 보이며 특히 2.0mm의 중공 확보에 의해 인체 투입용의 초소형 작동형 내시경으로 실제로 응용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 선도기술개발사업 (초소형 작동형 내시경 개발) 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] D. E. Hodgson, Using Shape Memory Alloys, Shape Memory Applications Inc., 1988.
- [2] G. Lim, K. Minami, M. Sugihara, M. Uchiyama and M. Esashi, "Active Catheter with Multilink Structure Based on Silicon Micromachining," *Proc. IEEE MEMS Workshop*, pp. 116-121, 1995.
- [3] 김명순, 이승기, 이상훈, "형상기억합금 스프링을 이용한 능동형 내시경용 굽힘 액츄에이터," 전기학회 논문지, 제47권, 제5호, pp. 704-709, 1998.
- [4] 石川昇治(編), 形状記憶合金應用 アイデア集, 工業調査會, pp. 27-33, 1987.
- [5] 丹久保 熙康(編), 形状記憶合金, 産業圖書, pp. 131, 1984.
- [6] 鈴木雄一, 實用形状記憶合金, 機電研究社, pp. 136-137, 1989.
- [7] Tom Waram, Actuator Design Using Shape Memory Alloy, Mondo · tronics inc., pp. 20-36, 1993.

저 자 소 개



임 안 수(林 安 秀)
 1972년 5월 12일 생. 1998년 단국대 전기공학과 졸업. 1998년~현재 동 전기공학과 석사과정

Tel : (02) 709-2580,
 E-mail : ansu@unitel.co.kr



이 승 기(李 承 起)
 1963년 5월 15일생. 1986년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1992년~1993년 일본 Tohoku University 특별연구원(JSPP

fellow). 현재 단국대 공대 전기공학과 조교수
 Tel (02) 709-2785
 E-mail : skilee@ns.dankook.ac.kr