

작동형 내시경의 성능 해석 및 제어에 관한 연구

정종필* · 김종현** · 이장무***

A Study on Performance-Analysis and Control of the Active Catheter

J.P. Cheong, J.H Kim and J.M. Lee

Key Words : Catheter, Bending actuator, SMA (shape memory alloy), PWM (pulse width modulation).

Abstract

This paper deals with the control of an active bending actuator for a catheter. The bending actuator with 40 mm in length utilizes three zigzag SMA (shape memory alloy) springs which are equally located in the circumference between inner ($\phi 2.5$ mm) and outer ($\phi 3.0$ mm) tube. It is purposed on realization of desired bending angle (90°) and direction (360°). It is also installed in front of the catheter and used to guide a path at extremely bent or branched blood vessel. The performance-analysis of the bending actuator are investigated for the purpose of optimizing the control of the bending actuator. The analog joy stick is used to command a bending angle and direction for the fast and accurate response. According to the commands of the joy stick, tensile force of each SMA spring is computed and obtained by controlling the temperature of each SMA spring using PWM (pulse width modulation) of supplied electric power.

기호설명

- $\vec{a}, \vec{b} \& \vec{c}$: Position vector of Zigzag SMA spring
- $X \& Y$: Rectangular coordinates of Joy-Stick
- θ_r : Angle of bending rotation(rad)
- θ_b : Bending angle(rad)
- M_b : Bending moment
- r : Radial distance of Zigzag SMA spring location from the center of the tube
- $a, b \& c$: Location of Zigzag SMA spring
- $\ell_a, \ell_b \& \ell_c$: Distance between spring & neutral surface
- L_i : Inner length of bending actuator at right angle
- L_o : Outer length of bending actuator at right angle
- d_{min} : Deflection of main role's Zigzag SMA spring
- d_{sub} : Deflection of sub role's Zigzag SMA spring
- $d_a, d_b \& d_c$: Deflection of Zigzag SMA spring at θ_b
- k_b : Zigzag SMA spring constant at heating
- k_b : Bending stiffness of bending actuator

1. 서론

초소형 작동형 내시경은 초소형 기계기술과 마이크로머시닝(MEMS)기술을 활용하여 기존의 진단, 치료기기가 행할 수 없는 진단, 검체획득, 치료를 수행할 수 있도록 개발하는 것을 최종 목표로 한다. 본 연구에서는 뇌혈관 수술, 관상동맥 진단 및 수술, 복강내 미세수술 등의 적용할 수 있도록 관상동맥, 뇌혈관의 접근 가능 최대 크기인 외경 3 mm, 대퇴동맥에서의 자유로운 접근 가능케 하는 총길이 1,000 mm의 초소형 굽힘 작동형 내시경에 대해 연구한다.(Fig. 1 (a) 참조)

초소형 굽힘 작동형 내시경은 위의 효과적인 기능을 발휘하기 위해서 길이 40mm, 외경 3mm, 중공(약물 전달용 line 이나 영상 전달용 optical glass fiber 등 보조 시스템 삽입 가능) 2mm의 굽힘 작동부를 갖는데 이를 통하여 원하는 목적 부위 혈관으로 이동할 수 있다.(Fig. 1 (b) 참조)

굽힘 작동기는 내부 튜브와 외부 튜브, 3개의 형상기억합금 스프링으로 구성된다. 내부 튜브와

*서울대학교 기계항공공학부

**서울대학교 정밀기계설계공동연구소

***서울대학교 기계항공공학부

외부 튜브 사이에 3 개의 지그재그 형상기억합금 스프링이 120° 간격으로 배치되고 양 끝단 링크에 연결된다. 내부 튜브는 굽힘 작동기의 지지대 역할을 함과 동시에 패키징용으로 사용되며 내경 2.0mm, 외경 2.5mm, 길이 40mm 인 실리콘(Silicone)을 사용하고 있으며, 외부 튜브는 내경 2.8mm, 외경 3.0mm, 길이 40mm 인 폴리우레탄(Polyurethane)으로 구성되어 있다.

굽힘 작동기는 굽힘 기능을 구현하기 위하여 변형을 주면, 다시 가열되어 원래의 기억된 형상으로 복원하기 전까지 그 변형된 형상을 유지할 수 있고, 작고 간단한 구조이면서 큰 힘을 얻을 수 있어 현재 마이크로 머신에 적용되고 있는 기능성 재료인 형상기억합금(Shape Memory Alloy: SMA)을 스프링으로 사용한다. 기존의 스프링 형태는 코일형 등 삼차원 구조를 가지고 있어 원하는 초소형 크기와 큰 중공의 확보를 위해서는 부적합하므로 같은 복원력과 공간 점유율을 낮출 수 있는 평면 구조인 지그재그형 스프링을 사용한다.

본 연구에서는 사용자가 원하는 굽힘 방향(360° 회전)과 굽힘 각도(최대 90°)를 정확하고 신속하게 응답할 수 아날로그 조이스틱을 이용한 제어기를 제작하고 최적의 제어를 위해 굽힘 작동기의 성능 해석을 기본 골격으로 하고 있다.

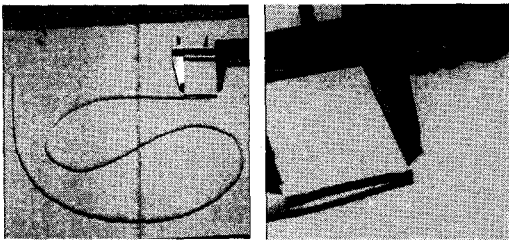


Fig. 1 Photo of prototype of active bending catheter (a) Full view, (b) Detailed view of Bending actuator

2. 굽힘 작동기의 성능 해석

2.1 굽힘 작동기의 역학적 해석

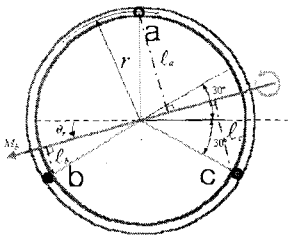


Fig. 2 Bending moment of Bending Actuator at arbitrary θ_r

Fig. 2 는 굽힘 작동기의 임의의 각 θ_r 에서 굽힘이 일어날 때의 기하적인 관계를 보여준다.

$$l_a = r \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_r\right)$$

$$l_b = r \sin\left(\frac{\pi}{6} - \theta_r\right) \quad (1)$$

$$l_c = r \sin\left(\theta_r + \frac{\pi}{6}\right)$$

식(1)은 모멘트의 주축으로부터 각각 인장력이 발생하는 스프링까지의 거리이다. 이 순간 θ_b 의 굽힘각이 발생할 때의 각각 스프링의 변형량(+압축)은 식(2)와 같다.

$$d_a = \theta_b r \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_r\right)$$

$$d_b = -\theta_b r \sin\left(\frac{\pi}{6} - \theta_r\right) \quad (2)$$

$$d_c = -\theta_b r \sin\left(\theta_r + \frac{\pi}{6}\right)$$

형상기억합금 스프링에 전류가 가해질 때의 스프링의 상수를 k_h 라 하면 각각의 스프링에 걸리는 힘은 다음과 같다.

$$F_a = k_h r \theta_b \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_r\right)$$

$$F_b = -k_h r \theta_b \sin\left(\frac{\pi}{6} - \theta_r\right) \quad (3)$$

$$F_c = -k_h r \theta_b \sin\left(\theta_r + \frac{\pi}{6}\right)$$

위 식(3)에서 구한 복원력에서 $k_h r \theta_b$ 로 무차원화한 임의의 각 θ_r 에 대한 복원력들의 값을 그래프로 나타내면 Fig. 3로 표현된다.

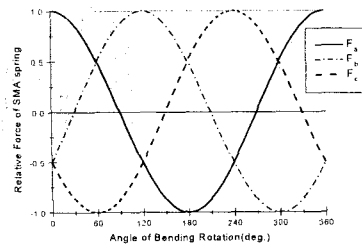


Fig. 3 Force of each SMA spring w.r.t. arbitrary θ_r

Fig. 3 과 Table. 1 은 임의의 각 θ_r 에서 굽힘이 일어날 때 각각의 스프링에서 발생하는 복원력의 상대적 크기를 알 수 있고, 굽힘 작동기의 원활한 굽힘 동작은 2 개의 스프링의 상호 조화에 의해서 이루어지고, 이 2 개의 스프링은 가장 큰 힘을 갖는 주 스프링과 보조 역할을 하는 스프링으로 나뉘어진다는 것을 보여주고 있다.

Table. 1 The role of zigzag SMA spring at θ_r

| θ_r | SPRING OF MAIN FORCE | SPRING OF SUBSIDIARY FORCE |
|----------------------|----------------------|----------------------------|
| $0 \sim \pi/3$ | a | b |
| $\pi/3 \sim 2\pi/3$ | b | a |
| $2\pi/3 \sim \pi$ | b | c |
| $\pi \sim 4\pi/3$ | c | b |
| $4\pi/3 \sim 5\pi/3$ | c | a |
| $5\pi/3 \sim 2\pi$ | a | c |

각각의 θ_r 에서 굽힘이 일어날 때 주 스프링의 변형량을 d_{main} , 보조 스프링의 변형량을 d_{sub} 라 하자. 우선 주 스프링에서 d_{main} 만큼 변형량 감소가 생기면 보조 스프링은 작동 안 한다고 가정할 때 Fig. 2 처럼 기하학적인 형태에 의해 $d_{main}/2$ 만큼 증가하게 된다. 이렇게 되면 θ_r 이 0도 일 때의 경우가 발생하게 된다. 임의의 각 θ_r 을 주축으로 하는 모멘트가 발생하기 위해서는 θ_r 에서 보조 스프링의 변형량은 d_{sub} 가 되어야 하므로 보조 스프링은 $(d_{main}/2 + d_{sub})$ 의 감소량이 생기도록 복원력이 발생되어야 한다. 따라서 굽힘 작동기의 모멘트식은 식(4)로 정의 되어진다.

$$k_h d_{main} \ell_{main} - k_h \left(\frac{d_{main}}{2} + d_{sub} \right) \ell_{sub} = M_b \quad (4)$$

ℓ_{main} 과 ℓ_{sub} 는 식(1)의 값이고 d_{main} 과 d_{sub} 는 식(2)의 값이다.

2.2 굽힘 작동기의 실험적 해석

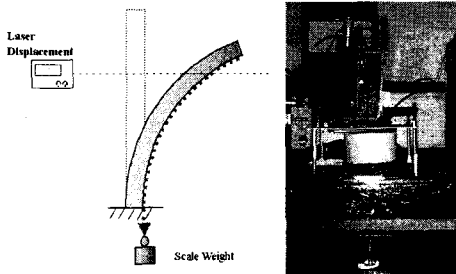


Fig. 4 Measurements of Bending angle by External force

Fig. 4 는 굽힘 작동기의 굽힘 강성을 측정하기 위한 실험 방법과 결과를 보여 주고 있다. Fig. 4 에서 실제의 형상기억합금 스프링의 인장력과 유사하게 발생하도록 외력이 작용하게 설치했다. 식(4)에서 $M_b = k_h \theta_r$ 이므로 θ_r 이 0°일 때의 경우에서 위의 실험 결과를 간단히 표현하면

$$F_{main} \ell_{main} = k_h \theta_r \quad (5)$$

식(5)에서 $\ell_{main} = 1.5E-3(m)$ 를 대입해 그래프를 그리면 다음과 같다.

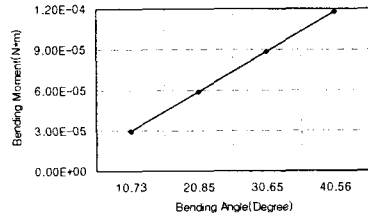


Fig. 5 Bending Moment-Angle from Experiments

Fig. 5 에서 기울기는 굽힘 작동기의 굽힘 강성인데 크기가 일정함을 알 수 있다. 굽힘 강성 (k_h)을 계산하면 $1.7E-4 \text{ Nm/rad}$ 의 일정한 값을 갖는다.

2.3 성능해석 결과

2.2 절에서 구한 굽힘 강성(k_h)을 식(13)에 대입해 각각의 굽힘 각도(θ_b)에 대해 형상기억합금 스프링에 필요한 인장력을 계산하면 다음 Table. 2 와 같다.

Table. 2 Results of Performance Analysis

| θ_b (deg) | Restitutive force(N) | Amp. (mA) | Power(W) | Duty(%) |
|------------------|----------------------|-----------|----------|---------|
| 0 | 0 E-2 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 2.37 E-2 | 80 | 6.4 E-2 | 3.72 |
| 20 | 4.74 E-2 | 105 | 11.0 E-2 | 5.73 |
| 30 | 7.12 E-2 | 120 | 14.4 E-2 | 7.53 |
| 40 | 9.49 E-2 | 128 | 16.4 E-2 | 8.86 |
| 50 | 11.86 E-2 | 135 | 18.2 E-2 | 9.85 |
| 60 | 14.23 E-2 | 142 | 20.2 E-2 | 10.90 |
| 70 | 16.6 E-2 | 149 | 22.2 E-2 | 12.00 |
| 80 | 18.98 E-2 | 150 | 25.3 E-2 | 13.67 |
| 90 | 21.35 E-2 | 200 | 40 E-2 | 21.63 |

여기서 임의의 각에 해당하는 인장력을 이용하면 식(4)의 k_h 를 구할 수 있다.

$$F_a = k_h r \theta_b \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_r\right) \quad (6)$$

$$0.1068 = k_h * 1.25E-3 * \frac{\pi}{4}$$

식(6)는 $\frac{\pi}{2}$ (rad) 굽힘각이 이루어질 경우에 해당하는 식이고, 그 결과 k_h 는 108.8 N/m 이다. 따라서 원하는 굽힘 방향과 굽힘각에 대한 각각의 형상기억합금 스프링에 필요한 복원력을 알 수 있다.

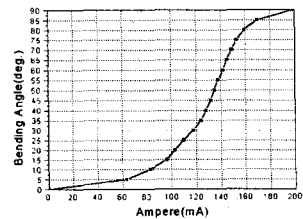


Fig. 6 θ_b of Bending Actuator with Ampere

Fig. 6 는 굽힘 작동기가 자연스러운 굽힘이 이루어지도록 하나의 형상기억합금 스프링에 전류를

천천히 인가하면서 굽힘 작동기의 굽힘각을 측정
한 결과이다. 최대 90°의 굽힘각이 발생하기 위해
서는 인가되는 전류의 최대값이 200 mA 가 되어
야 하고 100mA 와 160mA 사이에 급격한 굽힘이
발생하므로 이 구간에서는 세심한 제어가 필요함
을 알 수 있다. 측정 결과 자료는 Table. 2 에 있다.

3. 형상기억합금 굽힘 작동기의 제어

3.1 벡터 방정식

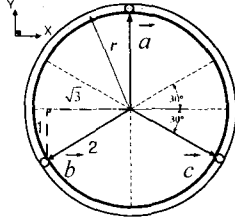


Fig. 7 Ground plan of Bending Actuator

Fig. 7 은 임의의 방향으로 굽힘 기능을 갖는
형상기억합금 스프링을 이용한 굽힘 작동기의 평
면도이다. 작동기의 굽힘 방향은 120° 간격으로
이루어진 3 개의 형상기억합금 스프링 a, b, c 에
작용하는 인장력들의 조합에 의해 결정되며 내부와
외부의 튜브에 의한 복원력으로 인하여 원래의 모
습으로 돌아오는 구조이다. X 와 Y 축은 조이스틱
(Joy stick)의 좌표를 나타낸 것으로서 사용자가 조
이스틱을 작동시 굽힘 작동기의 방향과 크기가 조
이스틱과 일치하도록 제어하는 것이 목적이다.

$$\frac{\sqrt{3}c}{2} - \frac{\sqrt{3}b}{2} = x \quad (7)$$

$$\vec{a} - \frac{\vec{b}}{2} - \frac{\vec{c}}{2} = \vec{y} \quad (8)$$

$$\vec{a} \geq 0, \vec{b} \geq 0, \vec{c} \geq 0 \quad (9)$$

식(7), (8), (9)은 벡터방정식으로 형상기억합금
스프링 a, b, c 3 축으로 움직이는 굽힘 작동기의
힘의 배합을 X 축, Y 축 두 개의 좌표축으로 표현
한 식이다. 이는 본 연구에 있어서 가장 중요한
부분으로서 제어기 구성의 가장 중요한 역할을 담
당하고 있다.

굽힘 작동기의 굽힘이 앞에서 살펴본 것처럼 2
개의 형상기억합금 스프링에 의해 동작되므로 식
(7)과 (8)를 통해 각각의 조건에 따른 지그재그 형
상기억합금 스프링의 위치 벡터를 구할 수 있다.

$$\text{a) } \vec{a}=0 \text{ 일 때 } \vec{b} = -\vec{y} - \frac{\sqrt{3}x}{3} \quad (10)$$

$$\vec{c} = -\vec{y} + \frac{\sqrt{3}x}{3} \quad (11)$$

$$\text{b) } \vec{b}=0 \text{ 일 때 } \vec{c} = \frac{2\sqrt{3}x}{3} \quad (12)$$

$$\vec{a} = \vec{y} + \frac{\sqrt{3}x}{3} \quad (13)$$

$$\text{c) } \vec{c}=0 \text{ 일 때 } \vec{a} = \vec{y} - \frac{\sqrt{3}x}{3} \quad (14)$$

$$\vec{b} = -\frac{2\sqrt{3}x}{3} \quad (15)$$

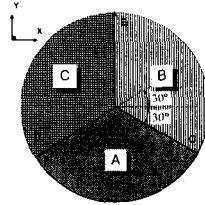


Fig. 8 Motion domain of bending actuator

Fig. 8 은 앞에서 언급한 벡터방정식이 굽힘 작
동기를 원하는 모든 동작 방향으로 구현할 수 있
는 올바른 표현식임을 알려 주고 있다. 식(10)과
(11)로 A 영역, 식(12)과(13)로 B 영역, 식(14)과(15)
로 C 영역을 나타낼 수 있다. 따라서 식(10)~(15)
로 360° 모든 영역을 나타낼 수 있음을 알 수 있
어 위의 식(7), (8), (9)의 벡터방정식이 정확한 식
임을 보여주고 있다. 이러한 특성을 잘 구현하기
위하여 아날로그 조이스틱(Analog Joy stick)을 사용
하였다. 아날로그 조이스틱의 가장 큰 특징은 위
에서 언급한 벡터방정식을 최대한 효과적으로 표
현해 줄 수 있는 입력 장치이다. 사용자의 원하는
방향(360° 회전)과 원하는 굽힘 각도(최대 90°)를
신속하고 정확하게 만족시켜 줄 수 있는 기능을
가지고 있다.

3.2 제어 알고리즘

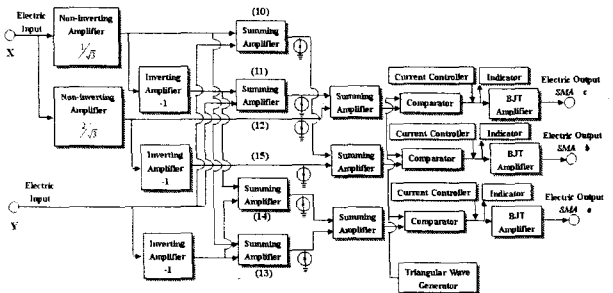


Fig. 9 Block Diagram of Bending Actuator's Controller

Fig. 9의 제어알고리즘은 3.1절에서 언급한 벡터방정식을 기본 골격으로 하여 제어 알고리즘으로 구현한 것이다.

우선 식(7), (8), (9)을 구현하기 위하여 2개의 반전 증폭기와 3개의 반전 증폭기 그리고 Fig. 9의 중간에 있는 (10)~(15)식을 만족시켜주는 4개의 가산기((12)과(15)는 가산기가 불필요)를 구성했다. 이것의 결과는 각각 형상기억합금 스프링 a, b, c의 2개의 값이 나온다. 그러므로 우선 양의 값만을 얻기 위하여 가산기 다음에 다이오드를 설치하여 음의 값이 나오면 무시하게 만들었다. 형상기억합금 스프링 a, b, c의 2개의 값을 각각 하나로 통합하기 위해서 3개의 가산기를 덧붙였다.

PWM (Pulse Width Modulation)방식을 선택하기 위하여 삼각파 발생기를 구현하고 비교기를 통하여 3개의 값과 비교하게 만들었다. 이에 대한 자세한 설명은 3.3절에서 자세히 설명되어 있다.

비교기에서 나온 값을 형상기억합금 스프링에 과전류로 인한 인화와 성능 상실을 방지하기 위해 최대의 전류값(조이스틱을 최대한 작동시켰을 때의 전류값)을 200 mA(대기중), 340 mA(수중) 이상 전류가 흐르지 못하도록 조절하기 위해 BJT Amplifier 앞에 Current Controller를 설치하였다. 그리고 조이스틱의 작동이 형상기억합금 스프링 a, b, c에 전류가 인가되는지 알기 위해 발광 다이오드를 이용한 3개의 Indicator를 설치했다. BJT Amplifier는 비교기에서 나온 전류값이 형상기억합금 스프링을 작동시키기 위해서는 워낙 작은 값이라 이를 증폭하기 구성하였다.

3.3 PWM 방식에 의한 인장력 제어

본 제어기의 회로에서 형상기억합금 스프링의 인장력은 전압의 형태로 기억되어진다. 이와 같이 전압 형태로 기억된 인장력을 구현하기 위하여 PWM (Pulse Width Modulation) 방식을 이용한다. 본 연구에서 사용되는 형상기억합금은 온도가 상승하면 수축하게 되어 인장력이 발생하게 되어 있다. 또한 형상기억합금 스프링의 온도는 스프링에 가해지는 전기적 에너지와 주위로 발산되는 열에너지를 평형에 의해 결정되며 전기적 일률(Power)이 클수록 형상기억합금의 온도는 상승하여 보다 큰 인장력이 발생한다. 따라서, Fig. 10과 같이 기준이 되는 삼각파형과 발생하는 형상기억합금 스프링의 인장력 전압을 비교하여 전기적 에너지의 on-off 시간비(Duty ratio)를 제어함으로써 각 형상기억합금의 인장력을 제어한다.

Fig. 10(a)에서 인장력 전압 즉 $|V_{out}|$ 이 높을수록(여기서는 V_{out} 이 음수임) Duty ratio가 커져서

한 주기 당 전기적 에너지가 공급되는 시간이 많아짐으로써 인장력이 증가하게 됨을 알 수 있다.

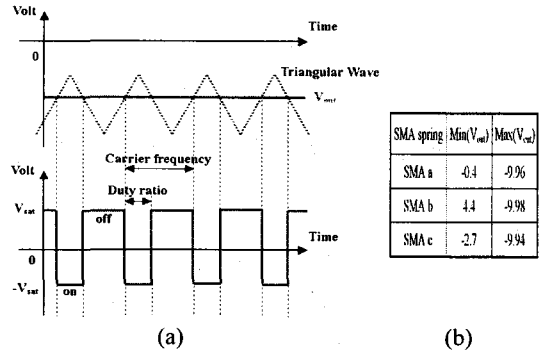


Fig. 10 Control SMA spring's V_{out} using PWM

(a) Definition of PWM

(b) SMA's V_{out} before passing the Comparator

Fig. 10(b)에서 세 개의 형상기억합금 스프링의 출력값의 공통된 부분이 -2.7~-9.94V 이므로 비교되는 삼각파 발생기의 최소, 최대 전압을 -2.7~-9.94V를 포함할 수 있도록 각각 맞추었고, 급힘 작동기가 흔들림 없이 원만한 급힘 동작이 이루어지도록 하기 위해 Carrier Frequency를 최대한 크게 했다.

3.4 제어기 제작

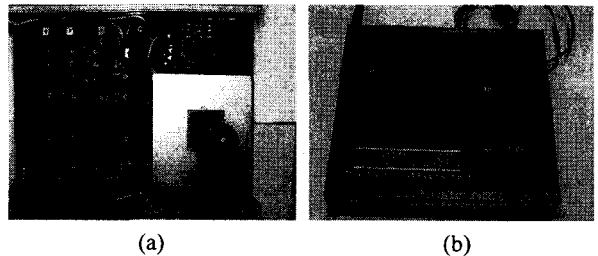


Fig. 11 Analog joy-stick controller using PWM

(a) Photo of inner Controller

(b) Photo of Analog Joy stick Controller

Fig. 11는 제작된 제어기의 내,외부 실제 모습을 보여주고 있다. 제작된 제어기는 가로 300mm, 세로 250mm, 높이 56mm의 크기를 갖고 케이스의 재질은 steel 이고 외부 구성 요소로서 POWER는 제어기의 전원을 쉽게 공급 및 차단하기 쉽게 하기 위해서 설치하였고 INDICATOR는 3개의 형상기억합금 스프링에 전류가 잘 인가되는 것을 확인하기 위해 발광 다이오드를 장착하였고, REGULATOR에는 Joy stick의 원활한 작동을 위해서 슬라이콘을 부착하였다.

3.5 제어성능 평가

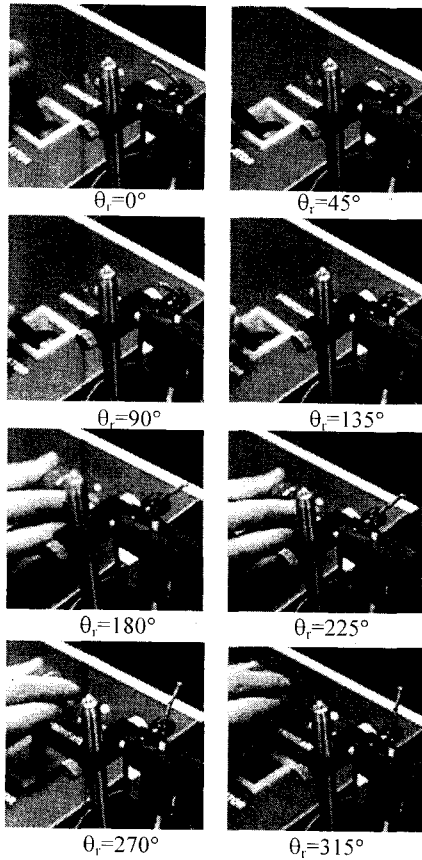


Fig. 12 Photo of Bending test at arbitrary θ_r

Fig. 12 가 보여 주듯이 제작된 제어기의 조이스틱을 이용하여 굽힘 작동기의 90° 굽힘이 1 초안에 이루어지고 360° 회전이 10 초안에 이루어짐을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 형상기억합금 스프링을 사용한 초소형 작동형 내시경의 굽힘 작동기의 성능 해석과 제어를 위한 전용 제어기의 개발을 목표로 한다. 이를 위하여 다음과 같은 연구가 진행되었다.

제작된 형상기억합금 스프링은 55° C 의 이후부터 복원력이 급격히 증가하는데 이러한 온도는 사용되는 주변 온도를 고려하면 0.08 A 의 전류를 가함으로써 얻을 수 있다. 또, 굽힘 작동기의 효과적인 제어를 위해 굽힘 작동기의 역학적 해석, 굽힘 강성, 전류 입력에 따른 굽힘 특성 등 성능 해석을 수행하였다.

개발된 제어기는 사용자의 아날로그 방식의 조이스틱 입력에 대응하여, 신속하고 정확하게 굽힘 방향(360° 회전 가능)과 굽힘각(최대 90°)에 대한 제어 기능을 구현한다. 각각의 형상기억합금 스프링에 대한 제어가 올바르게 이루어지고 있는지를 확인하기 위해 Indicator 를 장착했다. 초소형 내시경의 공간 제약으로 인해 제어 인자의 되먹임 없이 제어가 이루어지며, 조이스틱 동작에 따른 각 형상기억합금 스프링의 인장력 변화에 대응하여, PWM 방식으로 기대되는 전력을 제어함으로써 지그재그 형상기억합금 스프링의 온도를 제어한다.

제작된 제어기를 사용하여 내시경용 굽힘 작동기의 제어 성능을 평가하였다. 제어 성능 평가 실험에 있어서 내시경 굽힘 작동기의 굽힘각을 최대 90° 까지 얻고 굽힘 후 360° 회전이 가능하고 외란에 대해서도 이 굽힘각을 유지함으로써 강인성을 갖는 제어 성능을 확인할 수 있었다.

후 기

본 논문은 산업자원부 및 과학기술부에서 시행한 선도기술개발사업의 결과를 기본으로 함

참고문헌

- (1) Rizzoni, *PRINCIPLES and APPLICATIONS of ELECTRICAL ENGINEERING*, IRWIN, 1993
- (2) R.A.Gayankawd, *Op-Amps and Linear Integrated Circuits*, 3rd Ed, Prentice-Hall International, 1993.
- (3) G. Lim K. Minammi, M. Minami, M. Sugihara, M. Uchiyama and M. Esahi, "Active Catheter with Multi-link Structure Based Silicon Micromachining", Proc. IEEE MEMS Workshop, pp. 116-121, 1995
- (4) S. Aramaki, S. Kaneko, K. Arai, Y. Takahashi, H. Adachi and K. Yanagisawa, "Tube Type Micro Manipulator Using Shape Memory Alloy (SMA)", Proc. of 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp. 115-120, 1995
- (5) L.C.Brinson, M.S.Huang, "Simplification & Comparisons of SMA Constitute Models", J. of Intelligent Material System & Structures, Vol.7 pp 108-114, 1996
- (6) S.Maeka, K.Abe, K.Yamamoto, O.Tohyama, H.Ito, "Active Endoscope with SMA Coil Springs", Proc. IEEE MEMS Workshop, 1996
- (7) D. E. Hodgson, *Using Shape Memory Alloy*, Shape Memory Applications Inc., 1998
- (8) Y.Haga, et al., "Small Diameter Active Catheter Using Shape Memory Alloy", IEEE MEMS '98, pp. 419-424
- (9) M. Tanimoto, et al., "Micro Force Sensor for Intravascular Neurosurgery and in vivo Experiment", IEEE MEMS '98, pp. 504-509