



## 형상기억합금 구동기를 이용한 로봇 손 개발

### Development of a Robotic Hand using Shape Memory Alloy Actuators

전창국\* · 유동상\*<sup>†</sup>

Chang Gook Jeon and Dong Sang Yoo<sup>†</sup>

\*한경대학교 전기전자제어공학과

\*Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University

#### 요 약

형상기억합금은 가열되거나 냉각될 때 모양과 강도가 변화하면서 큰 힘을 발생한다. 와이어 형태의 형상기억합금은 열을 가하면 길이가 축소되면서 상당히 큰 힘을 발휘하며, 소음없는 운동을 발생시킬 수 있으므로 모터를 대체할 수 있는 구동기로 활용가능하다. 이런 형상기억합금 구동기는 전기로 직접 가열할 수 있으며, 큰 범위의 운동을 만들어내는데 사용될 수 있다. 본 논문에서는 형상기억합금 구동기를 이용하여 3 개의 손가락을 가진 6 자유도의 로봇 손을 개발하고 제어하는 것에 대해 기술한다. 각 손가락은 2 개의 관절을 가지고 있으며, 각 관절은 길항(拮抗) 운동을 위해 서로 반대로 동작하는 두 개의 힘줄에 의해 구동된다. 부드러운 운동을 위한 충분한 힘을 만들어 내기 위해 각 힘줄은 2 개의 형상기억합금 구동기가 병렬로 구성된다. 형상기억합금 구동기를 가열하기 위한 전류를 제어하기 위해 PWM 드라이버를 채용하였으며, 실험을 통해 손가락의 길항 작용을 평가한다.

키워드 : 형상기억합금, 금속 와이어, 로봇 손, PWM 드라이버, 길항 운동

#### Abstract

Shape Memory Alloys (SMAs) undergo changes in shape and hardness when heated or cooled, and do so with great force. Since wire-type SMAs contract in length when heated and pull with a surprisingly large force and move silently, they can be used as actuators which replace motors. These SMA actuators can be heated directly with electricity and can be used to create a wide range of motions. This paper presents the mechanical design and control for a three fingered, six degree-of-freedom robotic hand actuated by SMA actuators. Each finger has two joints and each joint is actuated with two tendons in the antagonistic manner. In order to create the sufficient force to make the smooth motion, the tendon is composed of two SMA actuators in parallel. For controlling the current to heat the SMA actuators, PWM drivers are used. In experiments, the antagonistic interaction of fingers are evaluated.

Key Words : Shape Memory Alloy, Muscle Wire, Robotic Hand, PWM Driver, Antagonistic Motion

Received: Feb. 23, 2016

Revised : Apr. 15, 2016

Accepted: Apr. 17, 2016

<sup>†</sup>Corresponding authors

dsyoo@hknu.ac.kr

## 1. 서 론

형상기억합금 (shape memory alloy, SMA)는 Au-Cd 합금이 냉각되었을 때 소성 변형할 수 있으며, 가열되면 원래의 형태로 복귀하는 것을 확인한 스웨덴의 물리학자인 Olander에 의해 1932년에 처음으로 발견되었으며, 형상기억이란 용어는 Vemon에 의해 기술되었다. 1962년 소위 nitinol 이라 알려진 NiTi 합금에서 형상기억효과를 규명한 Buehler과 Wang에 의해 알려지기 시작하면서 형상기억재료의 중요성이 인식되기 시작했다[1].

SMA에는 고온에서 안정한 오스테나이트와 저온에서 안정한 마르텐사이트라는 두 가지 상태가 존재하며, SMA가 가열되면 마르텐사이트로부터 오스테나이트로 변환된다. 즉 SMA이 가열되어 변형 시작온도에 도달하면 원래의 형상으로 돌아가기 위한 오스테나이트 변형이 시작되고, 이런 변형과정에서 수축이 이루어지면서 일정수준의 장력이나 토크를 얻을 수 있다. 일정 온도에 도달하면 오스테나이트 상태가 완료되어 거의 변형이 일어나지 않으며, 반대로 오스테나이트 완료 상태에서 임계온도 이하로 내려가면 마르텐사이트로의 변형이 시작되고 마르텐사이트 완료 상태에서 외력으로 잡아당기면 원래의 길이로 되돌릴 수 있다. 이런 수축과 이완 특성을 활용하기 위해 다양한 공학 및 기술 응용분야에서 SMA에 대한 수요가 급증하고 있다[1].

와이어 형태로 제작된 SMA는 머리카락 정도의 굵기를 가지고 있으므로 마치 도선처럼 전류를

본 논문은 경기도의 경기도지역협력연구센터 (GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음. (GRRC한경2013-B02, 스마트물류기술연구센터)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

인가하여 SMA의 내부저항에 의해 가열되어 수축에 의한 장력이나 토크를 얻어 낼 수 있으므로 구동기로서 활용이 가능하다[2][3]. 이런 SMA 구동기의 장점은 중량대비 고강도의 특성과 초기 작동력이 크고 소형화가 용이하며 요구 동작전압이 낮고 직선운동을 직접 얻을 수 있는 특징이 있다.

최근에는 이런 SMA 구동기를 활용한 연구가 로봇공학 분야에서 폭넓게 진행되고 있으며, 특히 SMA를 이용한 로봇 손의 설계 및 제어에 대해서도 다양한 연구가 진행되고 있다. 현재 자연스런 손동작을 위한 연구[4][6]가 진행되고 있지만 SMA를 활용한 분야는 아니며, Kheirikhah 등이 다양한 로봇 구조에서의 SMA 활용에 대해 최근의 연구 및 개발 결과들을 간결하게 기술하였다[7]. Yang 과 Gu는 유연한 링크 이론을 기반으로 SMA 구동기를 사용한 능동 관절을 개발하였고, 이를 바탕으로 세 개의 손가락을 가진 로봇 손을 개발하였다[8]. De Laurentis와 Mavroidis는 SMA 구동기에 의해 구동되는 20 자유도를 가진 다섯 손가락을 전통적인 수단과 광조영기술을 이용하여 제작하였다[9]. Bundhoo 등은 의수와 웨어러블 로봇 손 응용을 위해 SMA를 이용한 생체모방 힘줄 구동 시스템을 제안하고 3개의 능동 자유도와 1개의 수동 자유도를 가진 하나의 손가락을 제작하여 길항운동을 검증하였다[10].

본 논문에서는 SMA 구동기를 이용하여 물체 파지를 위해 3개의 손가락을 가진 6 자유도의 로봇 손을 개발한다. 각 손가락은 2개의 관절을 가지고 있으며, 각 관절은 길항(拮抗) 운동을 위해 서로 반대로 동작하는 두 개의 힘줄에 의해 구동된다. 부드러운 운동을 위한 힘을 만들어 내기 위해 각 힘줄은 2개의 SMA 구동기가 병렬로 구성된다. SMA 구동기를 가열하기 위한 전류를 제어하기 위해 PWM 드라이버를 채용하며, 길항운동을 위해 두 힘줄에 인가되는 입력이 서로 반대되도록 제어회로를 구성한다. 또한 PWM 신호의 듀티 (duty) 비를 조정하여 관절의 각도를 제어할 수 있도록 하였으며, 실험을 통해 손가락의 길항 작용을 평가한다.

## 2. SMA 구동기를 이용한 로봇 손 설계

로봇 손의 구동부로는 그림 1과 같은 Images SI 사의 NM70을 이용하였다. NM70은 7개의 플레이트가 적층되어 있는 구조로

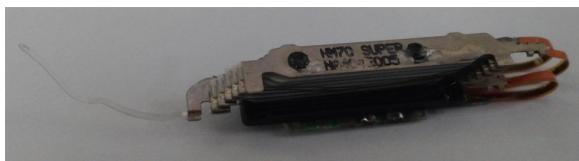


그림 1. NM70 SMA 구동기  
Fig. 1. NM70 SMA actuator

각각의 플레이트들은 와이어형의 SMA로 연결되어 있어 전류가 인가되면 수축되는 SMA에 의해 플레이트들이 당겨져 직선으로 장력을 발생시키는 구조로 되어 있다. NM70은 4.00mm의 변위량과 70g의 정격부하 능력을 가지며, 전류를 인가함으로써 변위량을 제어할 수 있다.

표 1은 NM70의 정격 명세를 보여주고 있다. 대부분의 SMA 구동기와 마찬가지로 NM70도 상대적으로 크기가 작고 무게가 가볍다는 이점을 가지고 있다.

표 1. NM70 규격  
Table 1. NM70 specifications[11]

Parameter	Value
High speed mode	4.0 [V] @ 470 [mA]
High efficiency mode	3.5 [V] @ 410 [mA]
Resistance	8.5 [ $\Omega$ ]
Stroke	4.0 [mm]
Rated load	70 [g]
Weight	1.1 [g]
Cycle life	1,000,000+
Optimal ambient Temp.	-70° C ~ +75° C

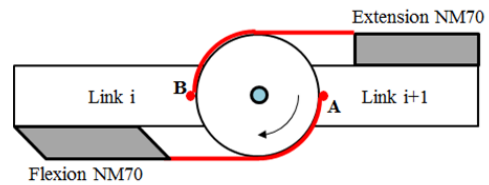


그림 2. 회전 관절 메커니즘  
Fig. 2. Revolute joint mechanism

관절 구조는 그림 2와 같이 SMA의 수축에 따라 원반의 한 점에 고정된 끈의 장력에 따라 발생하는 토크에 의해 관절이 회전하는 구조로 구성되었다. 그림 2와 같은 회전 관절 메커니즘에서 힘과 변위의 관계는 다음의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$r = \frac{180^\circ}{\pi \times \theta} \times \Delta L_{MW} \quad (1)$$

$$F = F_{MW} \times r/L$$

여기서  $r$ 은 원반의 반지름,  $\theta$ 는 원반의 회전각,  $\Delta L_{MW}$ 은 SMA의 변위량,  $L$ 은 링크의 길이,  $F_{MW}$ 은 SMA의 수축에 의한 장력, 그리고  $F$ 는 링크 끝단에서의 힘이다.

NM70 규격과 회전 관절 메커니즘에 따라 SMA가 4.00 mm 수축할 때 관절이 대략 90° 회전하도록 식 (1)에 의해 피니언의 반지름을 2.5mm가 되도록 설계하였다.

SMA는 단방향 축소만 가능하므로 관절의 길항운동을 위해서 이완 메커니즘이 필요하다. 본 논문에서는 그림 3과 같이 관절의 구부리기 동작 (수축)과 펴기 동작 (이완)을 위한 각각 구부리기용

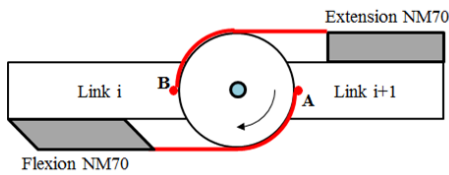


그림 3. 길항 메커니즘  
Fig. 3. Antagonistic mechanism

힘줄과 펴기용 힘줄을 쌍으로 부착하였다. 구부리기용 힘줄의 경우에는 Link i 하단에 부착된 NM70의 끈이 Link i+1의 시작단인 A점에 고정되고, 펴기용 힘줄의 경우에는 Link i+1 상단에 부착된 NM70의 끈이 Link i의 끝단인 B점에 고정되도록 설계되었다. 또한 부드러운 운동을 위한 힘을 만들어 내기 위해 각 힘줄은 2개의 NM70이 병렬로 구성되었으며, 구부리기용 NM70과 펴기용 NM70은 초기에는 각각 이완 상태와 수축 상태를 유지하도록 하여 관절이 퍼진 상태가 되도록 설계되었다. 구부리기용 NM70의 SMA가 신호를 받고 수축하면, 펴기용 NM70의 SMA는 이완되게 하고, 반대로도 동작하도록 설계되어 제어입력 신호에 따라 관절을 양방향으로 회전할 수 있다.

일반적으로 손 동작은 잡기와 다루기로 구분할 수 있다. 잡기 (grasping)는 손 자체에 대해 정적 위치에 있는 물체를 잡는데 필요한 절차와 작업에 관한 것으로 기술할 수 있으며, 다루기 (manipulation)는 손 안의 물체를 다루기 위해 손가락의 협력 작업이 요구된다[12].

한편 손가락의 수와 손가락 당 관절 수에 대한 기구학적 논의가 지난 수 년 동안 연구되어 왔으며, 기구학적 고려에 따르면, 파지를 위해서는 최소한 3개의 손가락을 가져야하며, 조작을 위해서는 4개의 손가락이 요구된다[12].

본 논문에서 제안된 로봇 손은 2개의 관절을 가지는 손가락 3개를 이용하여 검지, 중지, 엄지를 모사하도록 그림 4와 같이 설계되었다.

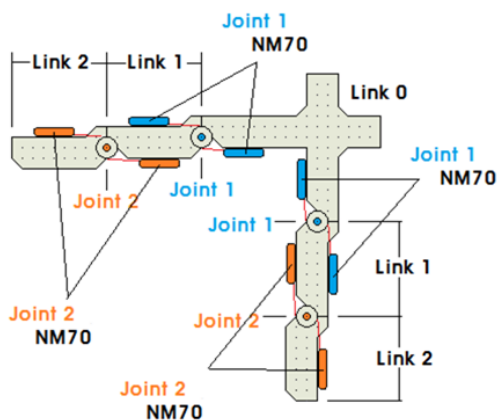


그림 4. 3 개의 손가락을 가진 로봇 손의 전체 구조  
Fig. 4. Overall structure of robot hand with 3 fingers

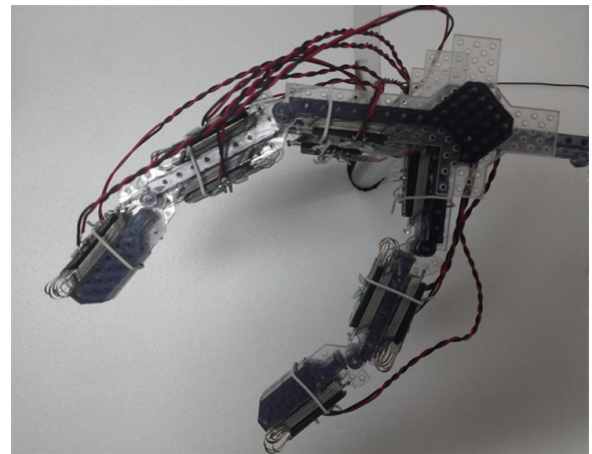


그림 5. 개발된 로봇 손  
Fig. 5. The developed robot hand

그림 4에서 보는 바와 같이 Link 0은 엄지와 검지, 중지를 연결하고 지탱하는 역할을 하며 ‘ㄱ’자 형태로 검지, 중지 그룹과 엄지사이의 거리를 벌려 동작 중에 간섭이 일어나지 않도록 하였다. 관절 1개의 움직임은 구부리기와 펴기 동작으로 이루어지는데, 구부리기 동작을 위한 구부리기용 NM70가 손아귀 안쪽에 설치되어 장력을 통해 관절이 안쪽으로 굽어지고 만들고, 손가락 등 쪽에 설치된 펴기용 NM70의 장력은 관절을 펴는 동작을 이루어지게 한다. NM70의 정격부하 능력이 70g으로 대단히 작으므로 로봇 손의 골격 설계에서는 이를 반영하여 아크릴을 이용하여 설계되었다. 또한 골격의 중량과 관절에서 발생하는 마찰력이 관절 움직임에 영향을 미치므로 손실을 최대한 줄이기 위해 아크릴 골격에 일정한 크기와 간격으로 구멍을 내어 골격의 중량을 줄였으며, 관절 부위는 접촉이 적어지도록 연결 부위를 미세하게 이격시켰다. 그림 5는 실제 제작된 로봇 손을 보여주고 있다.

### 3. 로봇 손 제어시스템 설계

SMA 구동기는 전류를 인가하면 내부저항에 의해 열이 발생하여 수축 상태인 오스테나이트로 전이되므로, 수축 정도를 조정할 수 있는 가변 전류 구동장치가 반드시 필요하다.

본 논문에서는 PWM 드라이버[13]를 이용하여 SMA 구동기의 내부저항에 걸리는 평균 전압을 조정함으로써 내부저항에 흐르는 전류를 제어하는 방식을 이용하였다. 그림 6은 하나의 관절을 위한 PWM 드라이버 회로를 보여주고 있다.

PWM 드라이버는 NM70에 충분한 양의 전류를 공급하기 위해 높은 전류이득을 취할 수 있도록 달링턴 회로들로 구성하였다. 또한 완전히 구부린 상태나 완전히 펴 상태를 유지하기 위해 총 12개의 NM70이 100% 활용되면 5A가 넘는 큰 전류가 흐르게 됨으로 회로

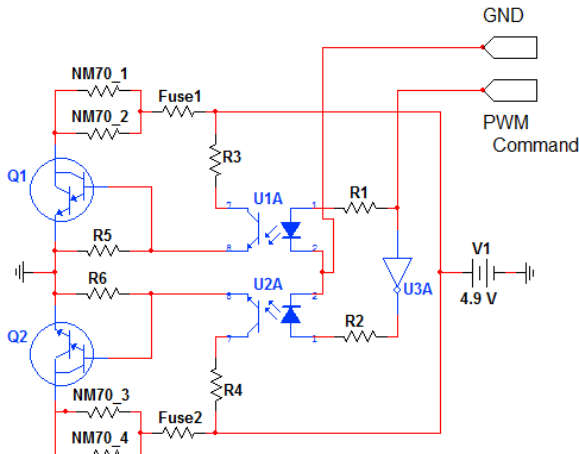


그림 6. 회전 관절용 PWM 드라이버 회로  
Fig. 6. PWM driver circuit for one revolute joint

보호를 위해 퓨즈를 사용하였으며, 포토커플러를 사용하여 PWM 드라이버와 다음에 기술할 로봇 손 제어시스템을 격리시켰다.

회로 동작은 다음과 같다. 로봇 손 제어시스템으로부터 High 신호가 전달되면 포토커플러 U1A가 tum on이 되고 연이어 트랜지스터 Q1이 tum on이 되어 구부리기용 NM70 #1과 #2의 MW에 전류가 흐른다. 한편 NOT 논리소자에 의한 반전된 신호에 의해 U2A가 tum off가 되고 연이어 트랜지스터 Q2도 tum off가 되어 펴기용 NM70 #3와 #4의 MW에는 전류가 차단된다. Low 신호가 전달되면 Q1과 Q2는 반대로 동작하게 된다. 따라서 PWM 신호의 듀티비를 적절하게 조절하면 각 NM70의 MW에 흐르는 전류량을 조절할 수 있게 되므로 관절의 구부리기 및 펴기 운동을 만들어 낼 수 있다. 그림 7은 실제 제작된 PWM Driver를 보여주고 있다.

로봇 손 제어시스템은 로봇 손의 다양한 움직임을 지령하는 그림 8과 같은 PC 기반의 SMA 구동기 제어 프로그램과 PWM 신호 발생기로 구성되었다. PWM 신호 발생기로는 PWM 출력이 가능한 Arduino mega ADK R3 보드를 사용하였다. Arduino 보드는

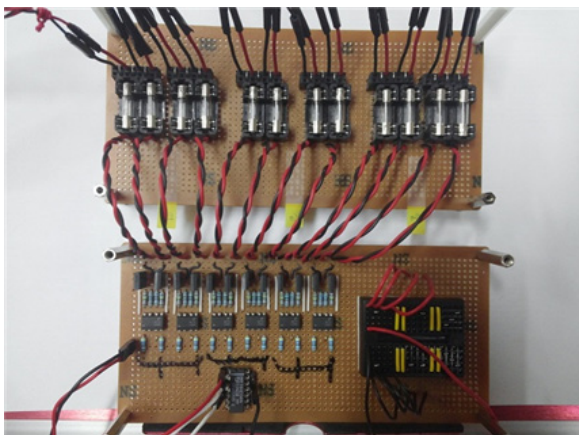


그림 7. 전체 시스템용 PWM 드라이버  
Fig. 7. PWM driver for the whole system



그림 8. 로봇 손 제어시스템  
Fig. 8. Control system for a robot hand

ATmega2560 기반의 마이크로컨트롤러로 다양한 입출력 모드를 제공하고 있어 하드웨어와의 인터페이스가 용이하고 USB 호스트 기능을 내장하고 있을 뿐만 아니라 최대 15개의 PWM 신호를 발생할 수 있는 오픈소스 하드웨어이다.

본 논문에서는 SMA 구동기 제어 프로그램에서 받은 운동명령에 따라 로봇 손의 각 관절 구동용 PWM 드라이버에 적절한 듀티비를 가지는 PWM 신호를 인가하도록 Arduino 보드를 프로그램하였다.

#### 4. 실험 결과

실험을 위해 제작된 로봇 손의 전체시스템은 그림 9과 같다. 실험은 PWM 듀티비 0%, 33%, 67% 및 100%에서 엄지손가락의 구부리기 및 펴기 동작부에서 전달되는 PWM 신호 및 달링턴의 컬렉터 전압 파형을 관찰하였고, 듀티비에 따른 관절의 움직임에서는 엄지손가락 전체의 동작을 관찰하였다.

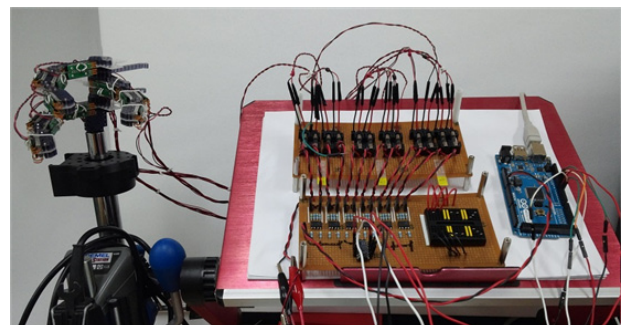


그림 9. 로봇 손 전체시스템  
Fig. 9. Overall system for a robot hand

그림 10은 엄지손가락의 첫 번째 관절에 인가되는 33% 듀티비의 PWM 신호와 구부리기 및 펴기용 PWM 드라이버의 달링턴 컬렉터 전압을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 구부리기용

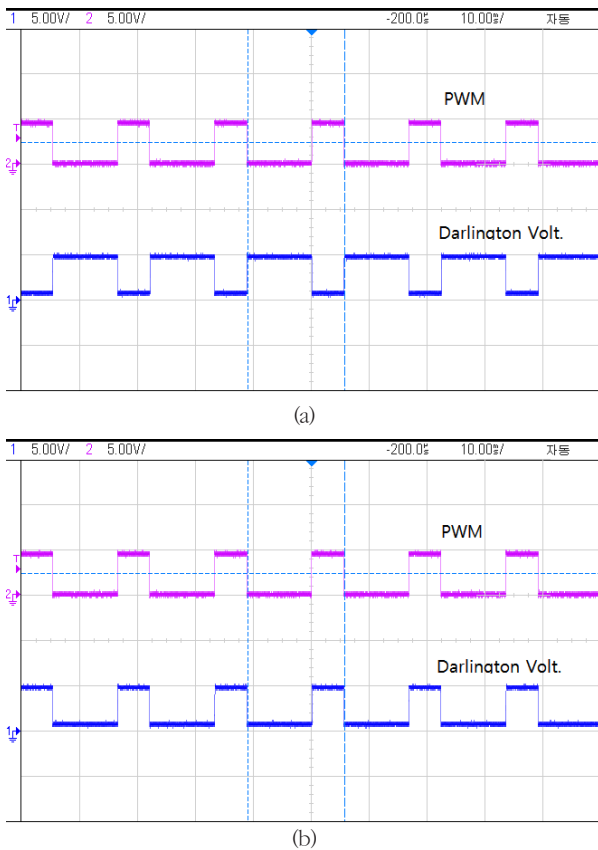


그림 10. 33% 듀티비 때의 입출력 (a) 구부리기용 힘줄 (b) 펴기용 힘줄  
 Fig. 10. Input-output for 33% duty rate (a) flexor tendon (b) extensor tendon

PWM 드라이버의 달링턴 전압이 67% 듀티비를 갖는 파형이므로 구부리기용 NM70의 내부저항에는 33% 듀티비를 갖는 전압 파형이 인가되고, 펴기용 NM70의 내부저항에는 67% 듀티비를 갖는 전압 파형이 인가된다. 따라서 펴기용 NM70이 구부리기용 NM70 보다 장력이 크게 작용한다는 것을 알 수 있다. 구부리기 및 펴기용

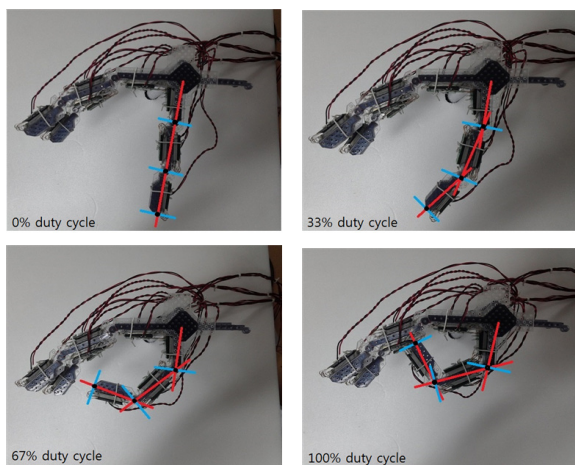


그림 11. 엄지손가락의 구부리기 동작  
 Fig. 11. Folding action of thumb finger

힘줄에 각각 2개의 NM70가 설치되어 있으므로 한 관절에는 항상 약 940mA의 전류가 요구되고, 전체 6개 관절 구동을 위해 총 5.6A의 전류가 필요하였다.

그림 11은 듀티비 변화에 따른 엄지손가락 전체의 실제 움직임을 보여주고 있다. 첫 번째 관절의 경우에는 더 큰 부하를 감당하는 관계로 듀티비에 따른 회전각이 두 번째 관절 보다 조금씩 차이가 커짐을 알 수 있다.

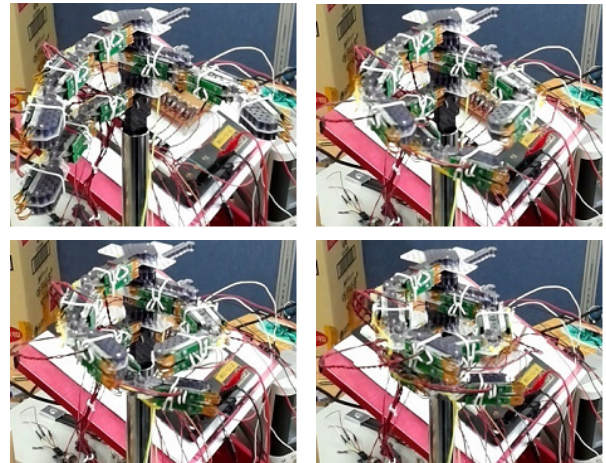


그림 12. 전체 손가락의 구부리기 동작  
 Fig. 12. Folding action of all fingers

그림 12는 로봇 손 전체의 구부리기 운동에 대한 연속 동작을 보여주고 있다.

## 5. 결론

형상기억합금은 열을 가하면 형상기억효과에 의해 원래의 형상으로 돌아가면서 상당히 큰 힘을 발휘하므로 기존의 모터를 대체할 수 있는 구동기로 활용가능하다. 본 논문에서는 Images SI사의 형상기억합금 구동기인 NM70 모듈을 이용하여 물체 잡기에 필요한 최소 조건을 만족하는 3 개의 손가락을 가진 6 자유도의 로봇 손을 제작하였다. 각 손가락은 2 개의 관절을 가지고 있으며, 각 관절은 서로 반대로 동작하는 두 개의 힘줄에 의해 길항(拮抗) 운동이 가능하며, 각 힘줄은 2 개의 NM70을 병렬로 구성되어 부드러운 운동이 가능하게 구성되었다.

SMA 구동기는 전류를 통해 내부저항에 의한 열 발생으로 인해 수축 상태가 발생되므로 PWM 드라이버를 설계하여 SMA 구동기의 내부저항에 걸리는 평균 전압을 조정함으로써 전류를 제어하는 방식을 이용하였다. 또한 각 관절의 구부리기 및 펴기 운동을 위한 PWM 입력이 서로 반전되도록 회로를 구성함으로써 PWM의 듀티비 조절을 통해 두 운동 방향의 비를 적절하게 조절함으로써

관절의 각도를 제어하도록 제작하였으며, 실험결과를 통해 SMA 구동기를 통한 로봇 손 제작 및 활용의 가능성을 확인하였다.

### References

[1] J. M. Jani, M. Leary, A. Subic, and M. A. Gibson, "A review of shape memory alloy research, applications and opportunities," *Materials and Design*, vol. 56, pp. 1078-1113, 2014

[2] N. Ma and G. Song, "Control of shape memory alloy actuator using pulse width modulation," *Smart Materials and Structures*, vol. 12, pp. 712-719, 2003

[3] D. Reynaerts and H. V. Brussel, "Design aspects of shape memory actuators," *Mechatronics*, vol. 7, pp. 524-545, 1998

[4] A-Ram Kim and Sang-Yong Rhee, "Recognition of Natural Hand Gesture by Using HMM," *Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 22, no. 5, pp. 639-645, 2012

[5] Dong-Eun Kim, Tae-Ju Lee, Seung-Min Park, Kwang-Eun Ko, and Kwee-Bo Sim, "EEG Analysis Following Change in Hand Grip Force Level for BCI Based Robot Arm Force Control," *Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 172-177, 2013

[6] A-Ram Kim and Sang-Yong Rhee, "Motion Control of a Mobile Robot Using Natural Hand Gesture," *Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 64-70, 2014

[7] M. M. Kheirikhah, S. Rabiee, and M. E. Edalat, "A review of shape memory alloy actuators in robotics," *Lecture Notes on Artificial Intelligence* 6556, pp. 206-217, 2011

[8] K. Yang and C. L. Gu, "A novel robot hand with embedded shape memory alloy actuators," *Proc. Instn. Mech. Engrs*, vol. 216 Part C: J. Mechanical Engineering Science, pp. 737-745, 2002

[9] K. J. De Laurentis and C. Mavroidis, "Mechanical design of a shape memory alloy actuated prosthetic hand," *Technology and Health Care*, vol. 10 pp. 91-106, 2002

[10] V. Bundhoo, E. Haslam, B. Birch, and E. J. Park, "A shape memory alloy-based tendon-driven actuation system for

biomimetic artificial fingers, part I: design and evaluation," *Robotica*, vol. 26, pp.1-16, 2008

[11] [www.imagesco.com/nitinol/files/NM70Super.pdf](http://www.imagesco.com/nitinol/files/NM70Super.pdf)

[12] J.L. Pons, R. Ceres and F. Pfeiffer, "Multifingered dextrous robotics hand design and control: a review," *Robotica*, vol. 17, pp. 661-674, 1999

[13] Young Hoon Joo, Yeon Woo Lee, Ho-Jae Lee, and Jin-Bae Park, "Development of Digital PWM Attitude Controller for Artificial Satellites Using Digital Redesign," *Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 397-402, 2003

### 저 자 소 개



#### 전창국(Chang Gook Jeon)

2012년 : 한경대학교 공과대학 전기공학과  
공학사

2014년 : 한경대학교 공과대학  
전기전자제어공학과 공학석사



#### 유동상(Dong Sang Yoo)

1985년 : 서울대학교 공과대학 전기공학과  
공학사

1987년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과  
공학석사

1992년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과  
공학박사

1992~2000년 : LG생산기술원 책임연구원

2000년~현재 : 한경대학교 전기전자제어공학과 교수

관심분야 : Robust Control, Robotics, Automation

Phone : +82-31-670-5322

E-mail : dsyoo@hknu.ac.kr