

## 형상기억합금 응용 스마트 액추에이터-제어기 설계

김영식<sup>1\*</sup> · 장태수<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한밭대학교 기계공학과

<sup>2</sup>한밭대학교 생산융합기술연구소

## Smart Actuator-Control System Design Using Shape Memory Alloys

Youngshik Kim<sup>1\*</sup> · Tae-soo Jang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon, Korea

<sup>2</sup>Institute for Fusion Technology for Production, Hanbat National University, Daejeon, Korea

### [요약]

본 연구에서는 형상기억합금(SMA)을 응용한 스마트 액추에이터의 효율적 제어를 위한 통합 액추에이터-제어기 시스템 설계를 논의한다. 이를 위하여 두 개의 스마트 SMA 액추에이터 유닛과 함께 제어를 위한 싱글 칩 마이크로프로세서, 액추에이터 드라이버, 센서를 통합한 새로운 액추에이터-제어기 모듈을 설계하고 제작하였다. 제안된 시스템에서는 피드백 제어를 위해 모듈의 회전을 측정하는 6축 모션센서 칩과 SMA의 저항을 측정하는 회로를 포함한다. 실험을 통하여 액추에이터의 구동과 센서 신호와 통신을 확인하였고 이를 통하여 실제 액추에이터-제어기 시스템의 작동을 확인하였다.

### [Abstract]

In this research we discuss an integrated actuator-control system for advanced control of a smart Shape Memory Alloy (SMA) actuator. Toward this goal, we designed and fabricated an actuator-control module combining two SMA actuating units with a single-chip microprocessor, two different sensing elements, and an actuator driver. In our proposed system, sensing elements include a 6-axis single-chip motion sensor for orientation measurement and a circuit for resistance measurement of SMA wires. We experimentally verified our proposed actuator-control system using actuator driving, sensor data readings, and communication tests.

**색인어** : 제어기, 로봇, 형상기억합금, 센서, 스마트 액추에이터

**Key word** : Controller, Robot, Shape Memory Alloy, Sensor, Smart actuator

<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2017.18.7.1451>



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.

**Received** 21 September 2017; **Revised** 07 November 2017

**Accepted** 25 November 2017

**\*Corresponding Author; Youngshik Kim**

**Tel:** +82-42-821-1163

**E-mail:** youngshik@hanbat.ac.kr

## I. 서 론

최근 많은 연구자들이 형상기억합금(Shape Memory Alloy; SMA)을 이용한 스마트 액추에이터에 관심을 갖고 연구를 수행해오고 있다 [1-5]. 전이온도를 기준으로 형상기억합금의 가열과 냉각 및 변형 사이클을 적절하게 조절하면 형상기억합금은 기계적인 힘과 변위를 생성할 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 형상기억합금은 의료 및 로봇을 포함한 새로운 응용 분야에서 사용되고 있다.

이러한 SMA 시스템을 효율적으로 구동, 센싱 및 제어하기 위하여 본 연구에서는 새로이 SMA 액추에이터와 통합된 제어 시스템을 제안한다. 특히, 본 연구에서는 두 개의 단방향 SMA 액추에이터 유닛(unit) [1]을 적용한 모듈형 통합 액추에이터-제어 시스템을 연구한다. 제안된 단일 모듈의 액추에이터-제어 시스템을 연결하면 롤링(rolling) 로봇(Fig. 1)과 매니퓰레이터(manipulator) 로봇 등을 포함한 다양한 모듈형 시스템을 쉽게 구성할 수 있다.

기존에 가속도센서와 자이로 센서를 부착한 제어보드를 사용하여 hexapod bio-mimetic 로봇 [2]을 제어하였다. 그리고 모듈형 판형 SMA 액추에이터를 적용한 HexRoller 로봇[3]이 제안되었다. 하지만 본 연구에서 적용된 와이어 기반 굽힘 SMA 액추에이터는 기존 연구에서 적용된 SMA 액추에이터의 구조와 구동 방식은 큰 차별성을 갖는다[1]. 그리고 본 연구에서 제안된 통합 액추에이터-제어기는 또한 새로이 모듈형 시스템을 위한 균일한 하드웨어 플랫폼을 제공한다. 또한 각각의 액추에이터-제어 모듈에 마이크로프로세서를 장착하여 기존 로봇의 중앙 집중형 제어방식보다 효율적인 분산 제어가 가능하다.

이러한 목적을 위하여 스마트 SMA 액추에이터와 함께 제어를 위한 싱글 칩 마이크로프로세서, 액추에이터 드라이버, 센서를 통합한 새로운 통합 제어 시스템을 설계하고 제작하였다. 제안된 시스템에서는 피드백 제어를 위해 액추에이터 모듈의 회전을 측정하는 6축 모션 센서 칩과 SMA의 저항을 측정하는 회로를 포함한다. 최종적으로 실험을 통하여 액추에이터의 구동과 센서 신호와 통신을 확인하였고 이를 통하여 실제 제어 시스템의 작동을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 액추에이터-제어 시스템의 설계와 구성에 대하여 논의한다. 제3장에서는 실험결과를 보여주고, 제4장에서는 최종적으로 본 연구의 결론을 제공한다.



그림 1. 형상기억합금 액추에이터 응용: 롤링 로봇  
Fig. 1. Application of SMA actuators: rolling robot

## II. 스마트 액추에이터-제어기

### 2-1 구성 및 설계

단일 모듈 SMA 액추에이터-제어기(a single module of the integrated SMA actuator-controller)는 Fig. 2에서 보이는 것처럼 SMA 구동 유닛과 싱글 마이크로프로세서 칩, 액추에이터 드라이버, 모션 센서 칩, 저항 측정부로 구성된다. 그리고 다모듈 SMA 시스템을 제어하기 위하여 호스트 마이크로프로세서 또는 PC와 Fig. 2 처럼 병렬로 연결된다. 각 유닛들 사이의 신호는 화살표와 함께 레이블 a-h로 표시하였다. 각 신호는 다음과 같다; 먼저 (a)는 주제어기에서 각 모듈을 제어하는 분산 제어 명령 신호, (b)는 단일 모듈 액추에이터-제어기에서 액추에이터를 구동하기 위한 명령, (c)는 모션센서 칩을 사용하기 위한 명령, (d)는 SMA 구동 유닛을 제어하기 위한 전류 신호 입력, (e)는 SMA 구동 유닛의 출력 전압, (f)는 SMA 저항측정을 위한 회로의 출력 전압, (g)는 6축 모션센서 칩의 측정 데이터, 마지막으로 (h)는 각 SMA 액추에이터 모듈의 마이크로프로세서들 사이의 통신과 제어를 위한 신호이다.

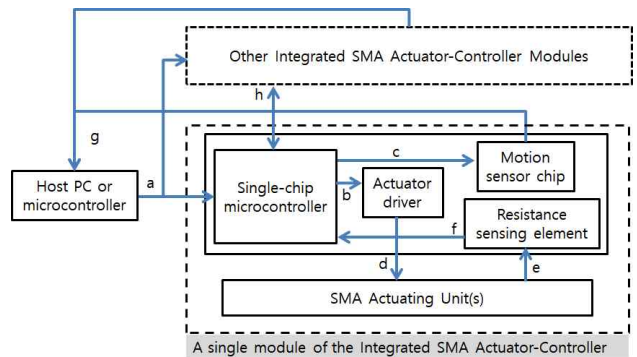
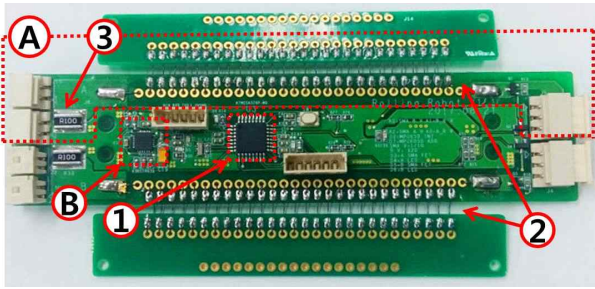


그림 2. 형상기억합금 액추에이터-제어 시스템과 제어 다이어그램. (a) 분산제어 명령, (b) 액추에이터 구동 명령, (c) 센서 제어 명령, (d) 형상기억합금 구동 전원 입력, (e) 형상기억합금 구동 전압 출력, (f) 형상기억합금 액추에이터의 전압 측정, (g) 모듈의 회전 측정, (h) 모듈 간 제어 및 통신 신호.

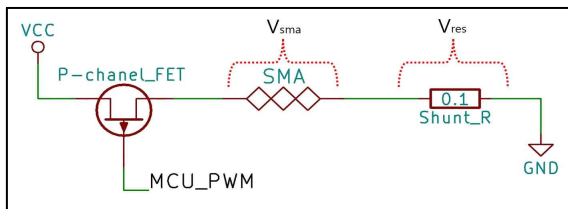
Fig. 2. Block diagram of a SMA actuator-controller system and its control scheme. (a) distributed control commands, (b) actuator driving commands, (c) sensor control command, (d) electric current input to the SMA actuating units, (e) voltage output of the SMA actuating units, (f) voltage measurements for SMA actuators, (g) orientation measurements of the module, and (h) control and communication signals between modules.

Fig. 3은 실제 제작된 SMA 액추에이터-제어기의 단일 모듈이다. 모듈의 중심에 8bit 마이크로프로세서 칩(1) (ATmega328P)을 설치하였고, 상단과 하단에 각각 단방향 SMA 액추에이터 유닛(2) 장착하였다. 그리고 SMA 액추에



**그림 3.** 제안된 형상기억합금 액추에이터-제어 모듈 제작; (1) 단일 마이크로프로세서 칩, (2) 형상기억합금 구동 유닛, (3) 저항 측정 부품, (A) 액추에이터 구동 회로, (B) 6축 모션 센서 칩.

**Fig. 3.** Fabrication of the proposed SMA actuator-controller module; (1) a single-chip microprocessor, (2) SMA actuating units, (3) resistance sensing element, (A) actuator driver circuit, (B) 6-axis motion sensor chip.



**그림 4.** 형상기억합금 액추에이터 구동 및 저항 측정 회로 구성도

**Fig. 4.** Schematics of a SMA actuator driver and resistance sensing circuit

이터 유닛을 구동하는 ON/OFF 제어하는 회로(A)와 액추에이터의 전류를 측정하는 전류측정저항(3)을 제작하였다. Fig. 4는 액추에이터 구동 드라이버와 SMA 저항 측정을 위한 회로의 다이어그램을 보여준다. 그리고 SMA 저항을 계산은 다음 식을 사용하였다.

$$R_{sma} = (V_{sma}/V_{res}) * 0.1; \text{ unit: } \Omega \quad (1)$$

또한 모듈의 회전 방향각을 측정하기 위해 6축 모션 센서(B) (MPU-6050) 칩을 내장하였다.

**2-2 다모듈 SMA 액추에이터-제어기 응용 시스템 제어 방법**

본 절에서는 Fig. 1의 롤링 로봇과 같은 단일 모듈을 확장한 다모듈 SMA 액추에이터-제어기 시스템의 제어 방법에 대해서 논의 한다. 예를 들어 롤링 로봇은 다모듈 액추에이터가 직렬로 연결된 체인의 형태의 메커니즘을 갖는 응용 시스템이다. 이 로봇에서 Fig. 1과 같이 바닥과 접촉되어 있는 액추에이터 중에 양끝단(A)에 위치한 특정한 위치의 액추에이터 모듈들을 선택적으로 구동 시켜 로봇의 무게중심을 변경시킬 수 있다. 이러한 역학의 원리를 이용하면 롤링 로봇의

전후 로링 모션을 쉽게 생성할 수 있다. 참고로 액추에이터 유닛의 제어를 위해 SMA의 저항을 측정하여 피드백으로 사용한다. 그리고 다모듈 시스템의 위치, 자세, 모션 정보를 추정하기 위하여 각 모듈의 모션센서 정보를 호스트 PC 또는 마이크로프로세서에서 통신을 통하여 읽어 들인다. 이러한 모션정보를 통합하여 다모듈 시스템의 이동 및 조작 제어를 통합적으로 수행한다.

제안된 SMA 액추에이터-제어기로 구성된 다모듈 시스템을 제어하기 위하여 각 모듈의 마이크로프로세서와 모션 센서는 호스트 PC/마이크로프로세서와 I2C 통신을 이용하여 연결된다. 이에 호스트 PC/마이크로프로세서는 I2C 통신을 통하여 각 모듈의 제어명령을 내보낸다. 그러면 각 모듈에서는 해당 명령에 따라 마이크로프로세서를 통해 액추에이터 구동/정지 제어 명령을 생성하여 액추에이터를 구동/정지시킨다. 마이크로프로세서는 P-channel FET(Fig. 4)로 SMA 액추에이터를 ON/OFF 제어(A)하며, Fig. 4의 회로와 같이 SMA 액추에이터 양단 전압( $V_{sma}$ )과 액추에이터와 직렬로 연결된 전류측정저항( $0.1 \Omega$ )의 양단 전압( $V_{res}$ )을 측정하여 식 (1)에와 같이 형상기억합금 와이어의 저항 ( $R_{sma}$ )을 계산하여 SMA 액추에이터가 동작이 완료되었는지 확인한다. 만약 SMA 액추에이터의 동작이 완료되었을 때는 마이크로프로세서는 전원을 차단하여 액추에이터가 과열되어 파손되지 않도록 제어한다. 또한 호스트로부터 정지 명령을 받으면 액추에이터를 정지 시킨다.

호스트 PC/마이크로컨트롤러는 I2C 통신을 사용하여 각 모듈에 장착된 모션 센서로부터 측정값을 읽어들이어 회전 방향각을 계산한다. 이를 통하여 각 모듈의 위치, 자세, 속도 등의 모션 상태를 추정할 수 있다. 즉 실시간으로 전체 모듈의 자세를 추정할 수 있다. 모든 모션 센서(MPU-6050)은 I2C 통신 주소가 0x68로 설정되어 있으며 I2C는 master(호스트)와 slave(모션 센서와 마이크로프로세서)간의 통신방식이 1:1 통신으로 한번에 한 개의 대상과만 통신을 할 수 있다. 그렇기 때문에 I2C 통신 주소가 중복될 경우 통신이 불가하다. 따라서 각각의 모션 센서와 개별적으로 통신하기 위해서는 본 연구에서는 해당 센서의 AD0 포트에 HIGH 전압을 인가하여 센서의 I2C 주소를 0x69로 변경하여 통신을 한다. 센서의 AD0 포트는 마이크로프로세서의 디지털 I/O 포트 7번 핀에 연결하였다.

이에 호스트 PC/마이크로프로세서가 센서 측정값을 읽는 알고리즘은 다음의 절차를 포함한다.

- (1) 측정하길 원하는 모듈의 마이크로프로세서의 디지털 7번 핀에 HIGH 출력 명령을 내보낸다.
- (2) 센서(I2C 통신주소 : 0x69)의 각도 값을 읽어 들인다.
- (3) 방향각을 측정한 모듈에서 해당 마이크로프로세서의 디지털 7번 핀에 LOW 출력 명령을 내보낸다.

여기서 모듈의 마이크로프로세서가 모션 센서의 값을 바로

수신하지 않는 이유는 8bit의 마이크로프로세서로 수식을 계산하는 것보다 호스트인 고성능 PC 또는 마이크로프로세서에서 연산을 처리하는 것이 더 효율적이기 때문이다. 또한 이를 통해 SMA 액추에이터를 제어하는데 있어 마이크로프로세서의 자원을 효율적으로 활용하기 위해서이다. 물론 필요하다면 다모듈 SMA 응용 시스템을 호스트 컴퓨터를 사용하지 않고 각각의 독립적인 SMA 액추에이터-제어기 모듈의 마이크로프로세서 사용하여 제어할 수 있다. 이를 위하여 I2C 통신을 기반으로 각 마이크로프로세서를 조화롭게 제어할 수 있다.

III. 실험

본 장에서는 실제 제작된 단일 모듈 SMA 액추에이터-제어기 시스템의 구동, 저항 측정, 방향각 측정하는 실험을 수행하였다. 이를 통하여 제안된 설계와 시제품의 작동을 확인하고자 한다. 먼저 단일 모듈의 마이크로컨트롤러에 테스트 프로그램을 업로드 하여 SMA 액추에이터의 구동 및 제어를 확인하였다.

마이크로프로세서에 3초 동안 액추에이터의 드라이버 회로에 HIGH 신호를 보내는 코드를 프로그래밍한 후 액추에이터의 구동을 확인하였다. SMA 액추에이터는 Fig5에서 화살표(파란색)로 표시하였듯이 오른쪽 SMA 구동 유닛은 반시계 방향으로 왼쪽 SMA 구동 유닛은 시계방향으로 회전하였다. 이 실험에서 액추에이터에 공급되는 전원은 전압 13.4 V, 전류 1.4 A이었다. 액추에이터는 구동을 시작한 후 0.95 초 후에 최대 허용 변위에 도달하여 구동을 완료하였다. 또한 Fig. 6에서 보는 바와 같이 SMA의 저항 변화를 살펴보면 액추에이터의 동작이 완료되는 대략 0.9초부터 정상상태 값에 수렴함을 알 수 있다. 이는 액추에이터의 구동과 SMA의 저항 값의 상관관계를 보여 준다. 초기 저항과 비교하여 액추에이터 구동 완료시 대략 8~11%의 저항 감소가 발생하여 본 연구에서 저항 측정일 잘 된 것으로 판단된다.

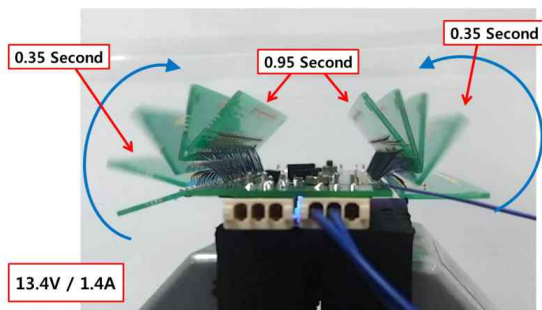


그림 5. 형상기억합금 액추에이터-제어 시스템 구동 실험  
Fig. 5. Actuation test of the SMA actuator-control system

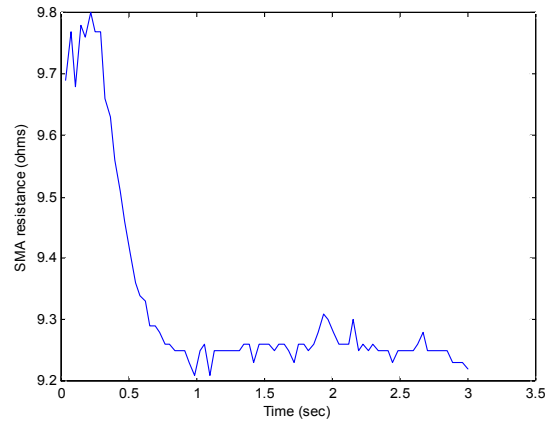


그림 6. 구동 실험 중 형상기억합금 와이어 전기 저항  
Fig. 6. Electric resistance of SMA wires during an actuation test

마지막으로 제어보드에 내장된 MPU-6050 모션 센서 측정값을 호스트 컴퓨터로 읽어 들여 센서의 x축의 회전각을 계산하였다. Fig. 7에서 보듯이 초기 위치로부터 액추에이터-제어기 모듈을 손으로 +90도 그리고 -90도 회전시켜서 실제 기술어진 모듈의 회전각에 상당하는 선서 값을 적절하게 계산할 수 있었고 통신이 안정적임을 확인하였다.

회전방향	사진
Initial position	
+ 90 degrees rotation about x-axis	
- 90 degrees rotation about x-axis	

그림 7. 6축 모션 센서를 통한 각도 측정 실험  
Fig. 7. Experimentally measured angles using the 6-axis motion sensor

## IV. 결 론

본 연구에서는 단일 모듈 또는 다모듈로 구성된 SMA 시스템의 효율적 구동과 제어를 위한 새로운 통합 SMA 액추에이터-제어기 시스템을 제안한다. 이를 위하여 두 개의 단방향 SMA 액추에이터 모듈과 함께 드라이버, 센서, 마이크로프로세서를 포함한 균일한 통합 구동 제어 플랫폼을 설계하고 제작하였다. 그리고 실험을 통하여 제안된 액추에이터-제어기 모듈을 활용한 액추에이터 구동과 피드백 센서로 사용될 SMA 저항 값을 측정하였다. 또한 내장된 모션 센서를 사용하여 측정된 회전방향과 실제 회전 방향이 일치함을 확인하였다. 제안된 액추에이터-제어기 모듈은 롤링 로봇이나 매니플레이터 로봇과 같은 다양한 SMA 응용 시스템에 쉽게 적용이 가능하다. 따라서 향후 제안된 모듈을 기반으로 확장된 다모듈 시스템을 개발하고 응용 연구를 수행할 계획이다. 현재 12개의 SMA 액추에이터 모듈로 구성된 롤링 로봇을 제작 중이다.

## 감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2017R1A2B4008056). 본 연구의 일부는 2016년도 한밭대학교 연구년 동안 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] Bu Hyun Shin, Taesoo Jang, Bong-Jo Ryu, and Youngshik Kim, "A Modular Torsional Actuator Using Shape Memory Alloy Wires," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 27, no. 12, pp. 1658-1665, July 2016.
- [2] S. H. Liu, Tse-Shih Huang and J. Y. Yen, "Sensor fusion in a SMA-based hexapod bio-mimetic robot," *IEEE Workshop on Advanced robotics and Its Social Impacts*, Taipei, pp. 1-6, 2008.
- [3] Gilpin K., Torres-Jara E., Rus D., Controlling Closed-Chain Robots with Compliant SMA Actuators: Algorithms and Experiments. In: Khatib O., Kumar V., Sukhatme G. (eds) *Experimental Robotics. Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol 79. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [4] Coral Cuellar, W., Rossi, C., Colorado Montañó, J., & Barrientos Cruz, A., SMA-based muscle-like actuation in biologically inspired robots: a state of the art review. *Intech*, 2012.

- [5] Deepak Trivedi, Christopher D. Rahn, William M. Kier, and Ian D. Walker, "Soft Robotics: Biological Inspiration, State of the Art, and Future Research," *Applied Bionics and Biomechanics*, vol. 5, no. 3, pp. 99-117, 2008.



**김영식(Youngshik Kim)**

2003년 : University of Utah 대학원 (공학석사)

2008년 : University of Utah 대학원 (공학박사-제어 및 로보틱스)

2008년~2009년: University of Utah

2009년~2009년: 방위사업청

2009년~2011년: DGIST

2011년~현 재: 한밭대학교 기계공학과 교수

※ 관심분야 : 스마트 액추에이터(smart actuator), 모션제어(motion control), 생체모방로봇(bio-inspired robot), 센서융합(sensor fusion) 등



**장태수(Tae-Soo Jang)**

2017년 : 한밭대학교 (학사)

2017년~현 재: 한밭대학교 생산융합기술연구소

※ 관심분야 : 스마트 액추에이터(smart actuator), 생체모방로봇(bio-inspired robot) 등