

구간분할 바이너리 제어기반 SMA 구동에 의한 로봇핸드의 운동 메커니즘에 관한 연구

정상화*, 김광호⁺, 박준호⁺⁺, 차경래⁺⁺⁺, 류신호⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2006. 1. 24, 심사완료일 2006. 7. 25)

A Study on Driving Mechanism of Robot Hand Driven by SMA based on Segmented Binary Control

Sang Hwa Jeong*, Gwang Ho Kim⁺, Jun Ho Park⁺⁺, Kyoung Rae Cha⁺⁺⁺, Shin Ho Ryu⁺⁺⁺⁺

Abstract

In recent year, as the robot technology is developed, the researches on the artificial muscle actuator that enables robot to move dexterously like biological organ become active. Actuators are key technologies underpinning robotics. Breakthroughs in actuator technology, particular in terms of power-to-weight ratio, or energy-density, will have significant impacts upon the design and control of robotic system. In this paper, a new approach to design and control of shape memory alloy(SMA) actuator is presented to drive the robot hand. SMA wire is divided into many segments and their thermal states of the SMA are controlled individually in a binary manner. This control manner will reduce the hysteresis that the SMA material has and it becomes the fundamental technology to develop the anthropomorphic robot hand. In this paper, the mechanism in the digital step motor of the shape memory alloy that is driven by the segmented binary control, which is a new control technique, is studied. This SMA digital step actuator applies for the robot hand and the driving mechanism of the robot hand is investigated.

Key Words : Robot Hand(로봇 핸드), Shape Memory Alloy(형상기억합금), Segmented Binary Control(구간분할 바이너리 제어), SMA Digital Step Motor(형상기억합금 디지털 스텝 모터), Thermo Electric Module(열전소자)

* 조선대학교 기계공학과
+ 교신저자, 조선대 기계공학과(mudol78@paran.com)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지
++ 조선대 기계공학과
+++ Dept. of MAE(Mechanical Aerospace Eng.), NCSU.
++++ (주)신유

1. 서론

로봇산업은 기계 및 전자 산업의 첨단기술이 결합된 시스템 산업이며, 21세기 메카트로닉스 산업 부문 중 가장 유망산업으로 부각되고 있다. 최근 휴머노이드 로봇의 상용화를 목적으로 한 투자가 국가적 사업으로 이루어지고 있다. 우리나라 로봇산업은 거의 대부분 산업용 로봇 생산이라고 할 수 있으며, 일부 대학과 연구소 등에서 서비스 로봇의 개발을 착수하고 있는 상황이다. 또한 우리나라의 로봇산업은 로봇생산에 필요한 핵심기술 부품에 대한 수입의 의존도가 높고 기술수준이 선진국에 비해 열위에 있어 관련 산업의 경쟁력 확보를 위한 전반적인 기술수준의 향상이 요구되고 있다. 로봇의 주요기술은 구동메커니즘, 구조설계, 정밀가공 그리고 제어 및 전자기술을 들 수 있는데, 로봇을 움직이게 하는 액츄에이터 기술은 로봇산업에 필요한 다른 기술들의 방향을 결정하는 가장 중요한 핵심기술이다. 특히 로봇을 설계하고 제어하는 방식은 액츄에이터의 기술 수준 정도, 무게 당 힘 발생 비율이나 에너지집적도 등에 의해 결정된다. 최근 들어 개인 로봇이 발전함에 따라 로봇이 생명체와 같이 유연한 운동을 가능하게 하는 인공근육(Artificial Muscle) 액츄에이터에 대한 연구가 진행 중이다. 인공근육 관련 기술은 21세기 고도 기술 복지사회에서 핵심적 역할을 하게 될 바이오산업 및 인간 친화형 로봇의 근간이 되는 핵심기술이다. 생체 모방 인공근육형 작동기의 구현을 위해서는 생체 모방을 위한 새로운 소재의 개발 및 이를 이용한 고성능 작동기의 제작이 필요하다. 현재 생체의 근육 특성을 가장 근접하게 성취시킬 수 있는 소재는 압전 세라믹(PZT) 재료, 전기작동형 폴리머(Electroactive Polymer), 공기 근육 액츄에이터(Air Muscle Actuator), 형상기억합금(SMA) 등이 있다^(1,2). 이러한 액츄에이터들은 모터와 같은 전기기계적(Electromechanical) 액츄에이터들에 비해 높은 에너지 집적도를 가지고 있으며 가볍고 구조가 단순하여 의료용 기구나 초소형 로봇의 개발에 크게 기여 할 것으로 보인다^(3,4). 그러나 이러한 재료들은 로봇 액츄에이터로 사용하기에는 많은 어려운 점이 있다. 형상기억합금의 경우 비선형적 동특성이 문제되며 전기작동 폴리머는 시간이 지날수록 반복성능과 내구성이 현저하게 저하된다는 단점을 가지고 있다. 또한 공기 근육 액츄에이터(Air Muscle Actuator)는 소형화하기 어렵다는 것이다. 그러므로 로봇의 유연하고 부드러운 움직임과 높은 에너지 집적도를 보장하는 인공근육 액츄에이터를 사용하기 위해서는 재료가 가지고 있는 단점을 보완하고 개발하는 연구가 필요하다⁽⁵⁾.

본 연구에서는 형상기억합금 액츄에이터가 갖는 높은 에너지 집적도의 장점을 활용하고 비선형적 동특성의 단점을 극복할 수 있는 구간분할 바이너리 제어기법으로 구동되는 형상기억합금(SMA) 디지털 스텝모터에 대하여 연구하였다. 그리고 다축 형상기억합금(SMA) 디지털 스텝모터로 구동되는 로봇핸드를 개발하기 위해 ADAMS를 이용하여 로봇핸드의 여러가지 형태를 시뮬레이션하여 로봇핸드의 운동 형태에 필요한 액츄에이터의 입력조건과 변위와의 관계를 파악하였다. 또한 구간분할 바이너리 제어기법으로 형상기억합금 와이어에서 발생하는 구간별 힘과 변위를 측정하여 형상기억합금 와이어가 로봇핸드의 액츄에이터로의 사용 가능함을 보였으며 개발된 형상기억합금 디지털 스텝모터로 구동되는 모형 로봇핸드의 운동 특성을 연구하였다^(6,7).

2. 구간분할 바이너리 제어

기존의 형상기억합금 액츄에이터의 제어방식은 형상기억합금 와이어 전 구간에 열 또는 전기를 입력하고 변위 신호를 피드백 받아 제어하는 형태를 취하였다. 그러나 구간분할 바이너리 제어 기법은 형상기억합금 전체에 신호를 입력하는 기존의 제어기법과 달리 긴 형상기억합금 와이어를 여러 짧은 구간으로 나누고 각각의 구간을 독립적인 바이너리(ON/OFF) 방식으로 제어하는 기법이다⁽⁸⁾. Fig. 1은 구간분할 바이너리 제어기법을 나타낸 것이다.

3. 형상기억합금 디지털 스텝모터

구간분할 바이너리 제어에서는 바이너리 신호 즉, ON/OFF 입력신호가 여러 작은 구간으로 구분된 형상기억합금 와이어의 각 구간에 입력되고 그 때 발생하는 구간별 변위가 제

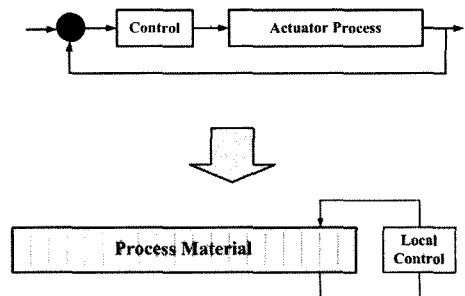


Fig. 1 Segmented Binary Control Scheme

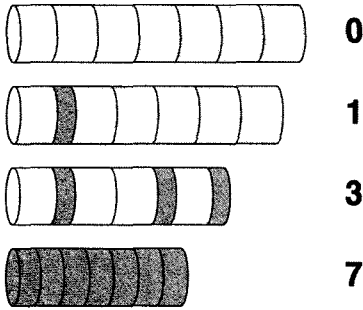


Fig. 2 Mechanism of SMA Digital Step Motor

어 대상이 된다. 이 때 변위가 발생 될 때의 상태를 1(ON) 변위 발생이 없는 상태를 0(OFF)으로 한다. 그러므로 형상 기억합금 액추에이터는 각각의 구간의 상태에 따라 변위가 결정되는 디지털 방식의 제어가 가능하며 형상기억합금 디지털 스텝모터가 된다. 구간별 입력 신호에 따른 변위를 패턴화 하면 Fig. 2로 나타낼 수 있다. 모든 구간의 신호가 0이었을 때는 0상태이고 제 2구간의 신호가 1이면 변위 1의 상태, 제 2, 5, 7구간의 신호가 1이었을 때는 변위 3상태, 그리고 모든 구간의 신호가 1이었을 때는 변위 7의 상태가 된다.

4. 로봇핸드 모델링

사람의 손동작과 유사한 로봇핸드를 개발하고 로봇핸드의 여러 가지 운동 형태에 따른 각 관절의 각변위에 요구되는 직선변위 입력 데이터를 얻고자 ADAMS를 이용하여 로봇핸드를 설계하였으며 여러 가지 동작을 시뮬레이션 하였다. 로봇핸드는 구간분할 바이너리 제어 기법에 의해 발생된 형상기억합금 와이어의 직선 변위 입력으로 구동된다. 입력된 직선 변위는 커플링(Coupling)과 풀리(Pulley)를 통해 손가락 각 관절의 각변위로 변환된다. 손가락 각 관절의 움직임은 실제 손의 모델과 유사한 운동범위와 자유도를 갖도록 설계되었다. Fig. 3은 로봇핸드를 모델링 한 것으로 손가락은 링크로 연결 되었고 각 관절은 회전 조인트로 연결되었으며 형상기억합금의 입력부분은 커넥터의 직선변위로 모델링 하였다. 직선변위를 각 변위로 변환시키기 위해 풀리와 커플링을 사용하였으며 풀리의 입력이 각 손가락 관절의 출력으로 전달되는 부분은 체인 커플링으로 모델링 하였다. Table 1은 모델링 조건을 나타낸 것이다.

Table 1 Conditions of Robot Hand Modeling

Operation Time		1sec
Input Displacement		Translation
Finger		Link + Revolute Joint
SMA Displacement		Link + Translational Joint
Coupling	Pulley : Joint	1 : 1
	SMA : Pulley	0.087 : 1

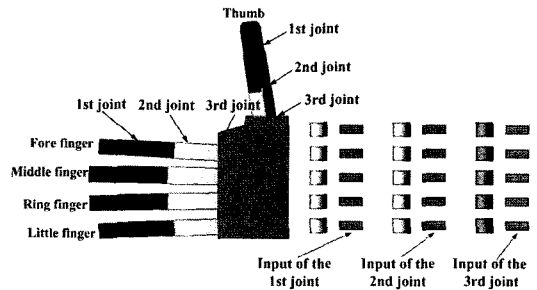


Fig. 3 ADAMS Modeling of Robot Hand

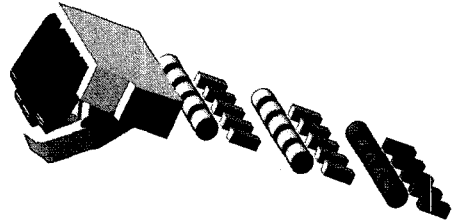


Fig. 4 Grip

4.1 로봇핸드 형태별 시뮬레이션

Fig. 3을 초기 상태로 했을 때 로봇핸드의 최대변위는 주먹을 쥐고 있을 때의 형태로 설정하였다. Fig. 4는 최대 변위를 요구하는 Grip의 손 모양을 나타낸 것이다. 이때의 손가락 각 관절의 각변위와 직선 입력 변위를 시뮬레이션을 통하여 얻을 수 있었다. 손가락 각 관절의 각변위와 그에 대한 입력 변위는 Table 2에 나타내었다. 이 외에도 볼을 잡는 형태인 Ball Grip, 사물을 가리키거나 지시하는 형태인 Point, 손가락 형태에 따라 물건을 잡는 형태인 Pinch 등 로봇핸드의 다양한 손 모양을 시뮬레이션하여 각 관절의 입력 변위와 각변위 데이터를 얻을 수 있었다.

Table 2 Input and Output of Grip

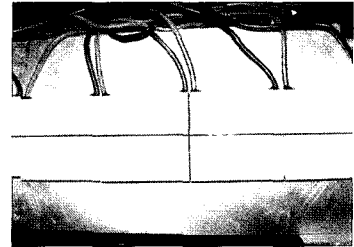
Grip	Output of the 1st Joint(deg/sec)	Output of the 2nd Joint(deg/sec)	Output of the 3rd Joint(deg/sec)
	Input of the 1st Joint(mm)	Input of the 2nd Joint(mm)	Input of the 3rd Joint(mm)
Thumb	60.0	30.0	70.0
	5.236	2.618	6.1087
Fore Finger	110.0	100.0	80.0
	9.5993	8.7266	6.9813
Middle Finger	110.0	100.0	80.0
	9.5993	8.7266	6.9813
Ring Finger	110.0	100.0	80.0
	9.5993	8.7266	6.9813
Little Finger	110.0	100.0	80.0
	9.5993	8.7266	6.9813

5. 구간분할 바이너리 제어특성

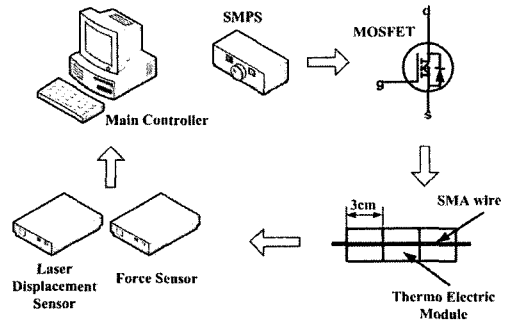
열전소자(Thermo Electric Module)를 이용하여 형상기억합금 와이어를 여러 짧은 구간으로 나누고 각각의 구간에 입력 신호를 주어 각 구간에서 발생하는 힘과 변위를 측정하였다. Fig. 5는 실험장치의 구성도를 나타낸 것이다. 형상기억합금 와이어는 70°C에서 변위가 발생됨을 감안하여 6V-6A SMPS를 선정 하였으며 균일한 전압과 전류를 공급하기 위해 MOSFET회로를 사용하였다. 열전소자의 온도가 형상기억합금 와이어의 변태온도에 다다르면, 기억된 변위만큼 반응하게 된다. 각 구간별 변위가 합성되어 와이어의 끝단에서 최종변위가 발생하게 된다. 이 때의 변위와 힘을 각각 측정하였다.

5.1 형상기억합금 와이어의 구간별 힘 측정

선경 375 μ m, 길이 30cm 인 형상기억합금 와이어를 사용하여 측정하였다. 3cm \times 3cm의 열전소자에 의해 10개 구간으로 나누고 각각의 구간에서 발생된 힘을 측정하였다. Fig. 6 (a)는 1구간에서 발생된 힘을 나타낸 그래프이며 Fig. 6 (b)는 5구간에서 발생된 힘을 그래프로 나타낸 것이다. Table 3은 1구간부터 5구간까지 발생된 힘을 나타낸 것이다. 이 때 1구간에서는 6.794N의 힘이 발생했으며 5구간에서는 17.497N의 힘이 발생했다.

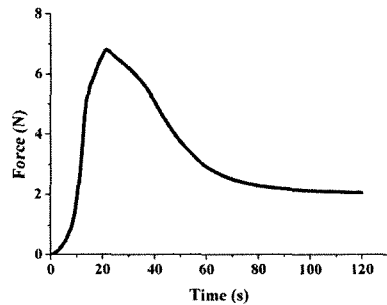


(a) Picture of SMA Wire Divided by TEM

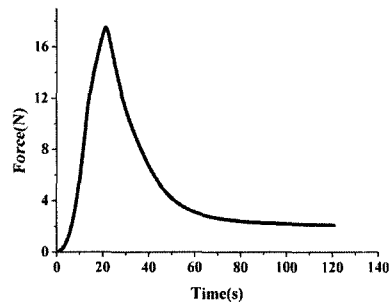


(b) Schematic Diagram

Fig. 5 Schematic Diagram of Experimental Apparatus



(a) 1-Segment



(b) 5-Segment

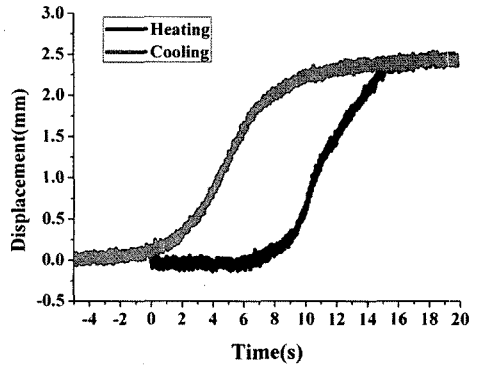
Fig. 6 Force Characteristics of Segmented SMA wire

Table 3 Maximum Force of Segmented SMA wire

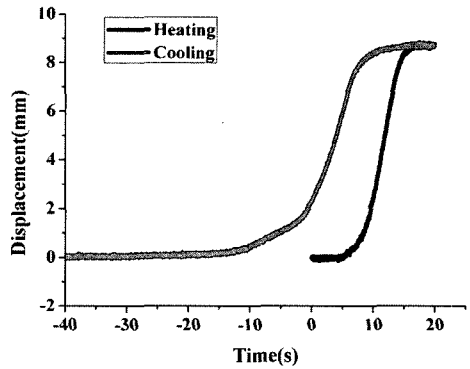
Segment No.	Max. Force(N)
1	6.794
2	13.784
3	16.281
4	17.036
5	17.497

Table 4 Maximum Displacement of Segmented SMA wire

Segment No.	Max. Displacement(mm)
1	1.33
2	2.50
3	3.80
4	5.08
5	6.23
6	7.69
7	8.79
8	10.07
9	11.22
10	12.64



(a) 2-Segment



(b) 7-Segment

Fig. 7 Displacement of Segmented SMA wire

5.2 형상기억합금 와이어의 구간별 변위 측정

형상기억합금 와이어 선경 375 μ m에서 구간별 입력 신호에 따라 발생된 변위를 측정하였다. Table 4는 1구간부터 10구간까지 발생된 변위를 나타낸 것이며 1.33mm부터 12.64mm까지 입력신호가 증가함에 따라 변위도 증가하였다. Fig. 7 (a)는 2구간에서 발생된 변위를 나타낸 그래프이며 2.5mm의 최대 변위가 발생하였다. 또한 Fig. 7 (b)는 7구간에서 발생된 변위를 그래프로 나타낸 것으로서 최대 8.79mm의 변위가 발생하였다.

5.3 형상기억합금 디지털 스텝모터

형상기억합금 와이어에 구간별 입력 신호를 주어 각 구간에서 발생된 최대 변위를 측정하였다. Fig. 8은 각 구간에서 발생된 최대 변위를 그래프로 나타낸 것이다. 이 때 구간별 입력신호가 증가함에 따라 발생된 변위는 1구간부터 10구간까지 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 구간분할 바이너리 제어를 이용한 형상기억합금 와이어는 원하는 변위

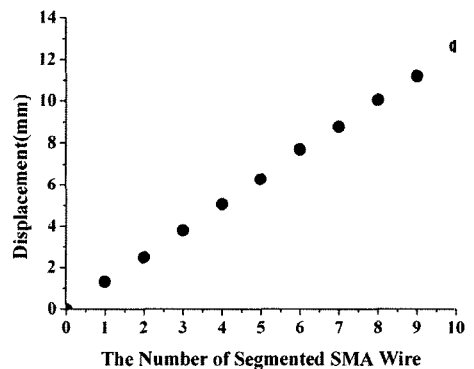
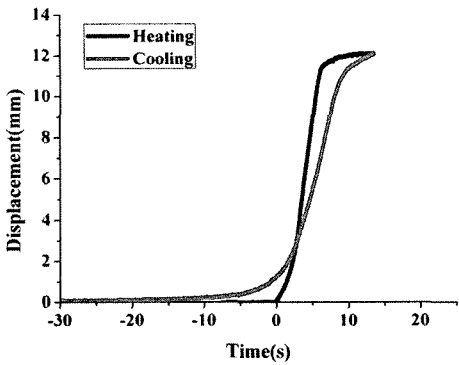
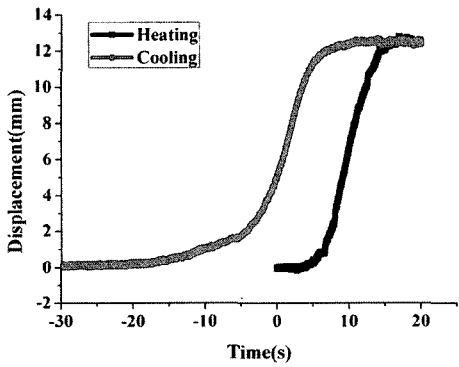


Fig. 8 Change of Displacement for the Number of Segmented SMA wire

만큼의 제어가 가능한 형상기억합금 디지털 스텝모터의 역할이 가능함을 규명하였다.



(a) Normal Control



(b) Segmented Binary Control

Fig. 9 Hysteresis Characteristics of Normal Control and Segmented Binary Control

기존의 제어 방식인 형상기억합금 와이어 전체에 열 또는 전기를 입력하여 제어하는 방식과 구간분할 바이너리 제어 방식의 히스테리시스 특성을 파악하기 위하여 형상기억합금 와이어의 동일한 길이에 대하여 시간에 따른 변위변화량을 측정하였다. Fig. 9 (a)는 기존의 제어방식인 양 끝단에 전류를 인가한 방식의 변위의 변화를 나타낸 그래프이고 Fig. 9 (b)는 구간분할 바이너리 제어 방식의 변위 변화를 나타낸 그래프이다. 두 그래프의 기울기 차이를 비교 해보면 구간분할 바이너리 제어기법 그래프의 히스테리시스가 기존의 제어방법에 비해 작음을 알 수 있다.

6. 구간분할 바이너리 제어 구동 로봇핸드의 운동 특성

구간분할 바이너리 제어에 의한 로봇핸드의 운동 특성을

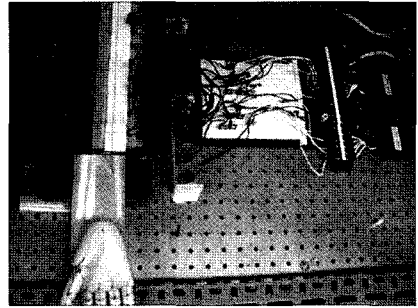
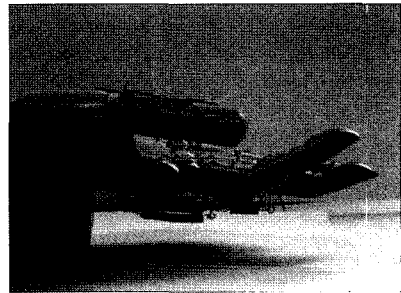
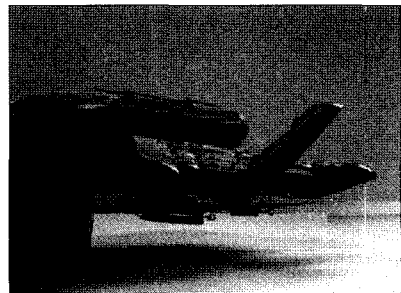


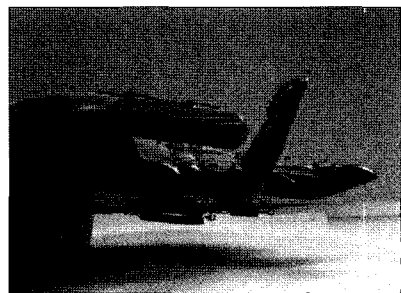
Fig. 10 Experimental Apparatus



(a) 5-Segment



(b) 10-Segment



(c) 15-Segment

Fig. 11 Shape of 2nd Joint for the Number of Input Signal

알아보기 위해 실제 손 모양과 같은 모형 로봇핸드를 제작하였다. 형상기억합금 와이어를 3cm×3cm의 열전소자를 사용하여 15개의 구간으로 분할하였다. Fig. 10은 모형 로봇핸드를 구간분할된 형상기억합금 와이어를 이용하여 구동하기 위한 실험장치의 모습을 나타내었다. 사람의 손과 유사한 운동 범위를 가지고 있으며 각 관절은 형상기억합금 와이어의 복원력을 주기위해 바이어스 스프링(Bias Spring)으로 연결되어 있다.

모형 로봇핸드의 검지(Fore Finger)에 형상기억합금 와이어를 연결하고 1구간부터 15구간까지 순차적으로 신호를 입력하였다. 그 결과 구간별 입력신호가 증가함에 따라 검지의 각 변위가 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 구간분할 바이너리 제어기반 형상기억합금 스텝모터를 이용한 로봇핸드의 운동은 각 구간의 입력신호에 따라 관절의 움직임이 사람의 손과 같이 유연한 운동이 가능함을 알 수 있었다. Fig. 11은 검지의 두 번째 관절에 15개 구간으로 분할된 형상기억합금 와이어를 연결하고, 5개 구간, 10개 구간, 15개 구간에 신호를 입력하였을 때 관절의 운동 형태를 보여준다.

7. 결론

본 논문에서는 최근 로봇산업의 큰 패러다임이 된 지능형 로봇의 사람의 손과 같이 유연하고 유사한 운동특성을 갖는 로봇핸드를 개발하기 위하여 구간분할 바이너리 제어 기반 으로 구동되는 형상기억합금 디지털 스텝모터의 메커니즘을 연구하였다. 그리고 ADAMS를 이용하여 로봇핸드를 설계 하였고 동특성을 파악하기 위하여 다양한 형태를 시뮬레이션 하였다. 그 결과 로봇핸드의 여러 가지 운동 형태에 필요한 액츄에이터의 입력조건과 변위와의 관계를 파악하였다. 또한 형상기억합금 와이어를 구간분할 바이너리 제어 한 결과 형상기억합금 재료가 가지고 있는 히스테리시스를 감소시키고 구간별 입력신호에 따라 변위가 결정되는 디지털 스텝모터를 개발하였다. 그리고 형상기억합금 디지털 스텝 모터를 액츄에이터로 적용한 모형 로봇핸드는 생체와 같이 자연스러운 운동 특성을 보여주었다.

후 기

본 연구는 광주지역 첨단부품·소재산업육성사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Grant, D., 1999, "Accurate and Rapid Control of Shape Memory Alloy Actuator," *Thesis of degree of Ph.D.*, McGill University, Canada.
- (2) Yoseph, B. C., 2001, "Electroactive Polymer Actuators as Artificial Muscles:Realit, Potential, and Challenges," *SPIE*, Press Monograph.
- (3) Ikuta, K., Tsukamoto, M. and Hirose, S., 1998, "Shape Memory Alloy Servo Actuator System with Electric Resistancefeedback and Application for Active Endoscope," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 427~430.
- (4) Safak, K. K. and Adams, G. G., 2002, "Modeling and Simulation of an Artificial Muscle and its Application to Biomimetic Robot Posture Control," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 41, No. 3, pp. 225~243.
- (5) Carrozza, M. C., Massa, B., Micera, S., Lazzarini, R. Zecca, M. and Dario, P., 2002, "The Development of a Novel Prosthetic Hand-Ongoing Research and Preliminary Result," *IEEE/ASME, Transactions on Mechatronics*, Vol. 7, No. 2, pp. 108~114.
- (6) Jeong, S. H., Park, J. H., Kim, G. H. and Choi, S. B., 2005, "A Study on Mechanism of Segmented Control Driven Robot Hand," *Proceedings of the Korean Society of Machine Tool Engineers Autumn Conference*, pp. 154~159.
- (7) Jeong, S. H., Cha, K. R., Kim, H. U., Choi, S. B., Kim, G. H. and Park, J. H., 2005, "A Study on Dynamic Characteristics of the Robot Hand Using the Segmented Binary Control," *Proceedings of the Korean Society of Machine Tool Engineers Spring Conference*, pp. 144~149.
- (8) Selden, B., Cho, K. J. and Asada, H. H., 2004, "Segmented binary control of shape memory alloy actuator systems using the peltier effect," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4931~4936.