



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2006 년 2 월

석사학위논문

구간분할 바이너리 제어기반  
로봇핸드의 메커니즘에 관한 연구

조 선 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

박 준 호

구간분할 바이너리 제어기반  
로봇핸드의 메커니즘에 관한 연구

*A Study on Mechanism of the Robot Hand based  
on Segmented Binary Control*

2006 년 2 월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

박 준 호

구간분할 바이너리 제어기반  
로봇핸드의 메커니즘에 관한 연구

지도교수    정 상 화

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함.

2005 년 10 월    일

조 선 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

박    준    호

# 박준호의 석사학위논문을 인준함

위원장    조선대학교    교수    이 규 태 印

위    원    여수대학교    교수    김        훈 印

위    원    조선대학교    교수    정 상 화 印

2005 년 11 월        일

조선대학교 대학원

# 목 차

LIST OF TABLE .....	IV
LIST OF FIGURES .....	V
ABSTRACT .....	IX
<b>제 1 장 서 론 .....</b>	<b>1</b>
제 1 절 연구배경 .....	1
제 2 절 연구 동향 .....	3
1. 인공근육 액츄에이터 .....	3
2. 형상기억합금 액츄에이터 제어에 관여한 연구 .....	5
<b>제 2 장 액츄에이터로의 응용을 위한 형상기억합금의 이론적 배경 .....</b>	<b>6</b>
제 1 절 형상기억효과 .....	6
제 2 절 Ni-Ti 형상기억합금의 특성 .....	11
<b>제 3 장 구간분할 바이너리 제어 .....</b>	<b>13</b>
제 1 절 구간분할 바이너리 제어의 개요 .....	13
1. 구간분할 바이너리 제어 .....	13
2. 열전소자 .....	16
3. 열전소자의 그룹화 .....	17
제 2 절 구간분할 디지털 제어 .....	18
1. 디지털 제어의 개요 .....	18
2. 형상기억합금 디지털 스텝모터 .....	20
3. 형상기억합금 다축 디지털 스텝모터 .....	21
<b>제 4 장 로봇핸드 모델링 .....</b>	<b>22</b>
제 1 절 로봇핸드의 자세별 입력관계 .....	24

1. First Grip .....	24
2. Ball Grip 1 .....	28
3. Ball Grip 2 .....	32
4. Pinch 1 .....	36
5. Pinch 2 .....	40
6. Pinch 3 .....	44
7. Point .....	48
8. Envelope .....	52
<b>제 5 장 구간분할 바이너리 제어 특성 .....</b>	<b>56</b>
제 1 절 실험장치 구성 및 실험방법 .....	56
제 2 절 형상기억합금 와이어의 구간별 힘 측정 .....	58
1. 형상기억합금 와이어 선경 100 $\mu$ m의 구간별 힘 측정 .....	59
2. 형상기억합금 와이어 선경 150 $\mu$ m의 구간별 힘 측정 .....	63
3. 형상기억합금 와이어 선경 375 $\mu$ m의 구간별 힘 측정 .....	67
제 3 절 형상기억합금 와이어의 구간별 변위 측정 .....	71
1. 형상기억합금 와이어 선경 375 $\mu$ m의 구간별 변위 측정 .....	71
2. 형상기억합금 디지털 스텝모터 .....	78
제 4 절 히스테리시스 특성 .....	79
제 5 절 구간분할 바이너리 제어 구동 로봇핸드 .....	81
1. 로봇핸드 제작 .....	81
2. 구간분할 바이너리 제어 구동 로봇핸드의 운동특성 .....	82
<b>제 6 장 결    론 .....</b>	<b>86</b>
<b>참 고 문 헌 .....</b>	<b>88</b>

# LIST OF TABLES

Table 2-1 Material Properties of Ni-Ti and Cu-Al based Alloys ..	12
Table 4-1 Conditions of Robot Hand Modeling .....	23
Table 4-2 Input and Output of First Grip .....	25
Table 4-3 Input and Output of Ball Grip 1 .....	29
Table 4-4 Input and Output of Ball Grip 2 .....	33
Table 4-5 Input and Output of Pinch 1 .....	37
Table 4-6 Input and Output of Pinch 2 .....	41
Table 4-7 Input and Output of Pinch 3 .....	45
Table 4-8 Input and Output of Point .....	49
Table 4-9 Input and Output of Envelope .....	53
Table 5-1 Maximum Force of Segmented Diameter $100\mu\text{m}$ SMA wire	59
Table 5-2 Maximum Force of Segmented Diameter $150\mu\text{m}$ SMA wire	63
Table 5-3 Maximum Force of Segmented Diameter $375\mu\text{m}$ SMA wire	67
Table 5-4 Maximum Displacement of Segmented Diameter $375\mu\text{m}$ SMA wire .....	71



# LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Kinds of Artificial Muscle .....	4
Fig. 2-1 Stress - Strain Diagram of SMA and Common Metal .....	6
Fig. 2-2 Transformation between High and Low Temperature Structures of SMA .....	8
Fig. 2-3 Temperature Hysteresis of SMA .....	9
Fig. 2-4 Pseudo-Elastic Behavior of Shape Memory Alloy .....	10
Fig. 3-1 Segmented Binary Control Scheme .....	13
Fig. 3-2 Displacement of Segmented SMA wire .....	14
Fig. 3-3 Block Diagram of Segmented Binary Control .....	15
Fig. 3-4 Construction of Thermo Electric Module .....	16
Fig. 3-5 Ungrouped Segment Control of Single Axis .....	17
Fig. 3-6 Grouped Segment Control of Single Axis .....	17
Fig. 3-7 Analogue Control Method .....	18
Fig. 3-8 Digital Control Method .....	19
Fig. 3-9 SMA Digital Step Motor .....	20
Fig. 3-10 Grouped of Thermo Electric Module .....	21
Fig. 4-1 Modeling of Robot Hand .....	23
Fig. 4-2 First Grip .....	25
Fig. 4-3 Translational Input and Angular Displacement of First Grip Thumb .....	26
Fig. 4-4 Translational Input and Angular Displacement of First Grip Middle Finger .....	27

Fig. 4-5 Ball Grip 1 .....	28
Fig. 4-6 Translational Input and Angular Displacement of Ball Grip 1 Middle Finger .....	30
Fig. 4-7 Translational Input and Angular Displacement of Ball Grip 2 little Finger .....	31
Fig. 4-8 Ball Grip 2 .....	32
Fig. 4-9 Translational Input and Angular Displacement of Ball Grip 2 Thumb .....	34
Fig. 4-10 Translational Input and Angular Displacement of Ball Grip 2 Ring Finger .....	35
Fig. 4-11 Pinch 1 .....	36
Fig. 4-12 Translational Input and Angular Displacement of Pinch 1 Fore Finger .....	38
Fig. 4-13 Translational Input and Angular Displacement of Pinch 1 Middle Finger .....	39
Fig. 4-14 Pinch 2 .....	40
Fig. 4-15 Translational Input and Angular Displacement of Pinch 2 Thumb .....	42
Fig. 4-16 Translational Input and Angular Displacement of Pinch 2 Fore Finger .....	43
Fig. 4-17 Pinch 3 .....	44
Fig. 4-18 Translational Input and Angular Displacement of Pinch 3 Middle Finger .....	46

Fig. 4-19 Translational Input and Angular Displacement of Pinch 3 Ring Finger .....	47
Fig. 4-20 Point .....	48
Fig. 4-21 Translational Input and Angular Displacement of Point Thumb .....	50
Fig. 4-22 Translational Input and Angular Displacement of Point Fore Finger .....	51
Fig. 4-23 Envelope .....	52
Fig. 4-24 Translational Input and Angular Displacement of Envelope Ring Finger .....	54
Fig. 4-24 Translational Input and Angular Displacement of Envelope Little Finger .....	55
Fig. 5-1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus .....	57
Fig. 5-2 Photo of Force Measurement Experiment .....	58
Fig. 5-3 Force Characteristics of Segmented Diameter 100 $\mu\text{m}$ SMA wire .....	62
Fig. 5-4 Force Characteristics of Segmented Diameter 150 $\mu\text{m}$ SMA wire .....	66
Fig. 5-5 Force Characteristics of Segmented Diameter 375 $\mu\text{m}$ SMA wire .....	70
Fig. 5-6 Displacement Characteristics of Segmented Diameter 375 $\mu\text{m}$ SMA wire (1~5) .....	74
Fig. 5-7 Displacement Characteristics of Segmented Diameter 375 $\mu\text{m}$	

SMA wire (6~10) .....	77
Fig. 5-8 Change of Displacement for the Number of Segmented Diameter 375 $\mu$ m SMA wire .....	78
Fig. 5-9 Hysteresis Characteristics of Segmented Binary Control and Normal Control .....	80
Fig. 5-10 Photo of Robotic Hand .....	81
Fig. 5-11 Experiment on Dynamic Characteristic of Robotic Hand .....	82
Fig. 5-12 Shape of 1st Joint for the Number for Segmented SMA wire .....	83
Fig. 5-13 Shape of 2nd Joint for the Number for Segmented SMA wire .....	84
Fig. 5-14 Shape of 3rd Joint for the Number for Segmented SMA wire .....	85

# *ABSTRACT*

## *A Study on Mechanism of the Robot Hand based on Segmented Binary Control*

Park Jun Ho

Advisor : Prof. Jeong, Sang-Hwa, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

Actuators are the key technologies underpinning robotics. Breakthroughs in actuator technology, particularly in terms of power-to-weight ratio, or energy-density, will have significant impacts upon the way we design and control robotic systems.

In recent years, as the robot technology is developed, the researches on the artificial muscle actuator that enables robot to move dexterously like biological organ become active. Non electro-mechanical actuators, such as Shape Memory Alloys(SMA) and Electro-active Polymer(EAP) actuators, convert the source energy to mechanical energy based on inherent material properties that exhibit actuator functionality. Although these actuator materials have an order of magnitude higher energy-density compared to electro-mechanical actuators, numerous difficulties persist in using them reliably and suitably as robot actuators. SMA has the hysterically dynamic characteristics.

In this thesis, A new approach to design and control of shape memory

alloy(SMA) actuators is presented. SMA wire are divided into many segments and their thermal states are controlled individually in a binary manner. Thermo-electric module(TEM) is used for heating and cooling individual segments of the SMA. Unlike the traditional way of controlling the wire length by driving a current to the entire SMA wire, the new method controls the binary state(hot and cold) of each segment. The total displacement is then proportional to the number of the segments having the heated state with the austenite phase.

This control manner will drastically reduce the hysteresis that the SMA material has and it becomes the fundamental technology to develop the anthropomorphic robotic hand. Accordingly, in this research, 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. By using ADAMS, the robotic hand is designed. In order to find out the dynamical characteristics, the simulation is made in respect of the various forms of the robotic hand. By manufacturing the actual robotic hand, the experiment on the dynamical characteristics of the robotic hand is accomplished in the method of segmented binary control.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경

로봇산업은 기계 및 전자 산업의 첨단기술이 결합된 시스템 산업이며, 21세기 메카트로닉스 산업 부문 중 가장 유망산업으로 부각되고 있다. 최근 휴머노이드(Humanoid) 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<sup>[1]</sup>. 또한 우리나라의 로봇산업은 로봇 생산에 필요한 핵심기술 부품에 대한 수입의존도가 높고 기술수준이 선진국에 비해 열위에 있어 관련 산업의 경쟁력 확보를 위한 전반적인 기술수준의 향상이 요구되고 있다. 로봇의 주요기술은 구동메카니즘, 구조설계, 정밀가공 그리고 제어 및 전자기술을 들 수 있는데, 로봇을 움직이게 하는 액츄에이터기술은 로봇산업에 필요한 다른 기술들의 방향을 결정하는 가장 중요한 핵심기술이다. 특히 로봇을 설계하고 제어하는 방식은 액츄에이터의 기술 수준정도, 무게당 힘발생 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<sup>[2]</sup>. 이러한 액츄에이터들은 모터와 같은 전기기계적(Electromechanical) 액츄에이터들에 비해 높은 에너지집적도를 가지고 있으며 유연하고 가벼우며 구조가 단순하여 의료용 기구나 초소형 로봇의 개발에 크게 기여 할 것으로 보인다. 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<sup>[3][4]</sup>. 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<sup>[5]</sup>.

본 연구에서는 형상기억합금 액추에이터가 갖는 높은 에너지 집적도의 장점을 활용하고 비선형적 동특성의 단점을 극복할 수 있는 구간분할 바이너리 제어기법과 디지털 형상기억합금(SMA) 액추에이터에 대하여 연구하였다. 또한 다축 디지털 형상기억합금(SMA) 액추에이터를 이용하여 사람의 손동작과 유사한 운동능력을 갖는 로봇핸드의 개발을 위해 ADAMS를 이용하여 로봇핸드의 여러가지 형태를 시뮬레이션 하였으며 그 결과를 바탕으로 로봇핸드의 운동 형태에 필요한 액추에이터의 입력조건과 변위와의 관계를 파악하였다. 또한 구간분할 된 형상기억합금(SMA)의 입력신호에 따른 구간별 발생하는 힘과 변위와의 관계를 측정하여 로봇핸드의 액추에이터로의 사용 가능성을 보였으며 제작된 로봇핸드에 구간분할 바이너리 제어기법을 적용해 운동 특성을 규명하였다.



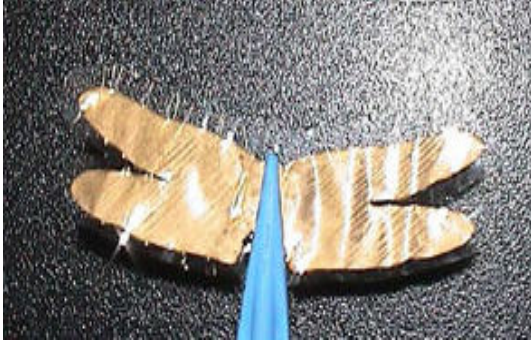
## 제 2 절 연구 동향

### 1. 인공근육 액츄에이터

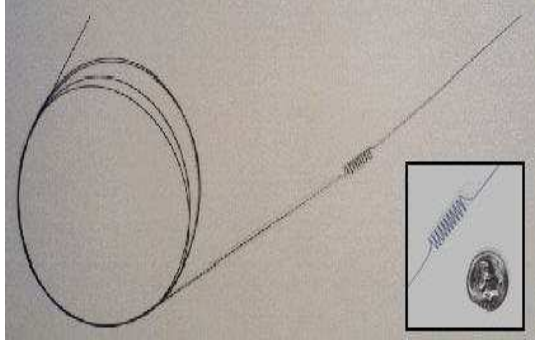
인공근육 액츄에이터는 높은 에너지 집적도 및 큰 힘을 얻을 수 있는 높은 에너지 효율을 가지고 있어 미래 로봇 설계를 획기적으로 변화시킬 것으로 기대된다. 일반적인 전기기계적 액츄에이터들은 목적물의 부하와 액츄에이터간의 불균형을 해결하기 위하여 기어박스와 같은 장치들이 필요하고 낮은 에너지 효율 때문에 각각의 링크에 서보기구를 장착해야 한다. 이 때문에 실제 생물과 비교하였을 때 유연성이 매우 부족하고 자유도가 제한되는 단점을 가지고 있다. 형태학적 관점에서 볼 때 골격과 근육조직은 기본적으로 현재의 액츄에이터와 많은 차이점이 있다. 근육은 근섬유가 종과 횡으로 배열되어 이루어진 구조체이다. 대부분의 긴 근육조직은 짧은 근섬유가 종으로 연결되어 이루어지고 이 근섬유들은 각각 신경을 전달한다. 즉 생태학적 액츄에이터는 구역화된 구조를 취하고 있다. 그러므로 하중이 부가되면 종과 횡으로 연결된 근섬유들이 적절하게 조화되어 반응하게 된다.

지금까지 인공근육을 만들기 위해 여러 가지 재료들이 개발되었고 적용되었다. 형상기억 합금은 액츄에이터 재료로서 에너지 집적도가 매우 높은 장점을 갖고 있다<sup>[6][7]</sup>. 최근에는 전기작동 폴리머 액츄에이터(Electro Active Polymer Actuator)와 공기 근육 액츄에이터(Air Muscle Actuator)가 발전함에 따라 인공근육으로 응용되고 있다. 전기작동 폴리머 액츄에이터는 대부분 폴리피롤(Poly-Pyrrole)과 폴리아닐린(Poly-Aniline) 소재로 되어있는데 에너지 집적도 및 효율이 좋으며 낮은 전압에서도 작동되는 장점이 있다<sup>[8]</sup>. 그러나 성능이 빨리 저하되고 작동시키려면 많은 전기 용량이 필요하기 때문에 액츄에이터로서의 신뢰성이 떨어지고 적용범위가 좁은 단점이 있다<sup>[9][10]</sup>. 따라서 최근에는 이러한 문제점을 보완할 수 있는 새로운 지능 재료인 전기작동 생체모방종이(Electro Active Paper)액츄에이터가 국내 연구진에 의해 개발 되었다. 이것은 셀룰로오스함량이 높은 종이에 전기를 흘려주면 팽림이 발생하는 원리를 이용한 것이다. Fig. 1-1은 현재 이용되거나 개발 중인 지능재료이다.

Fig. 1-1 Kinds of Artificial Muscle



(c) Electrochromic Paper



(b) Electrochromic Polymer

## 2. 형상기억합금 액츄에이터 제어에 관한 연구

형상기억합금은 실제 거동을 모델링하기 매우 어렵기 때문에 제어성능이 만족스럽지 못하였다. 형상기억합금의 온도와 변위에 대한 이력곡선의 모델링은 시스템의 조건에 따라 여러 가지가 수행되었는데, 그 중 하나가 유한요소 모델링이다. 이는 Galerkin<sup>[11]</sup>법과 Preishach<sup>[12]</sup> 접근법에 의하여 모델링 되었고 열동력과 열전도 방정식에 기초를 두고 있다<sup>[13]</sup>. 1990년대에는 형상기억합금 액츄에이터를 제어하기 위해 PID 제어가 주로 사용되었다. Hashimoto에 의해 이족보행로봇에 형상기억합금이 사용되었으며 온도 피드백에 관한 연구가 Kuribayashi에 의해서 수행되었다. 1990년대 이후에는 형상기억합금 재료 자체가 가지고 있는 열역학적 비선형성을 보정하기 위한 여러 가지 비선형 제어기법이 연구되었다. 이러한 연구는 액츄에이터의 위치제어에 관한 연구로 형상기억합금에 전류를 입력하고 저항열을 이용하여 가열하고 강제 대류를 이용하여 냉각시키는 방식을 취하고 있다. 사용된 제어 이론들은 강건제어(Robust Control)에 기반을 둔 슬라이딩모드(Sliding Mode)<sup>[14]</sup>, 뉴럴 퍼지(Neural Fuzzy)<sup>[15]</sup>, 에너지소산법(Dissipativity)<sup>[16]</sup>, 변수 체계제어(Variable Structure Control)<sup>[17]</sup> 등이다. 이러한 다양한 접근들에도 불구하고 형상기억합금 액츄에이터의 제어는 만족스럽지 않은 수준이다.

## 제 2 장 액츄에이터로의 응용을 위한 형상기억합금의 이론적 배경

## 제 1 절 형상기억효과

형상기억합금의 형상기억효과(Shape Memory Effect, SME)란, 어떤 형상의 시료를 임계온도보다 고온에서 급랭해서 저온(마르텐사이트)상을 형성시켜 이것을 변형한 다음 또 다시 가열할 때 그 임계온도를 넘으면 역변태가 일어나고 동시에 형상도 회복하는 현상을 말한다. 보통의 금속재료는 변형이 탄성한계를 넘으면 Fig. 2-1 (a)에서와 같이 소성변형에 의한 영구 변형이 발생하지만 Fig. 2-1 (b)에서 보는바와 같이 형상기억합금은 가열하면 본래의 형상으로 돌아온다. Fig. 2-1은 형상기억합금과 일반 금속 응력과 변형의 특성 차이를 나타낸 것이다.

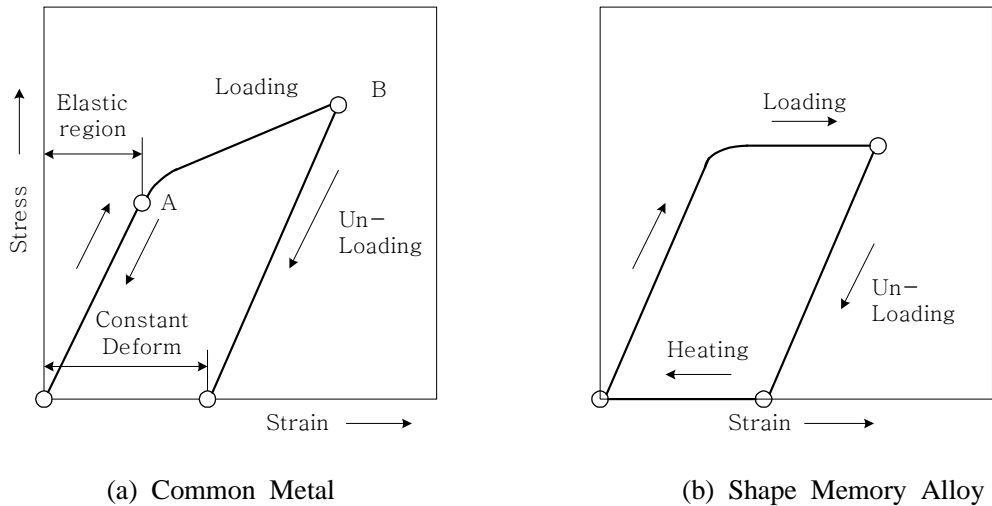


Fig. 2-1 Stress - Strain Diagram of SMA and Common Metal

이러한 형상기억효과 발견된 것은 1932년 Au-Cu 합금으로 부터였다. 그 후 1938년에는 Cu-Zn 합금에서 가역적 상 변태를 관찰하였으나 가열에 의하여 합금이 자기의 변형을 처음의 형상으로 회복하는 형상기억효과는 1951년에 Au-Cd 합금과 In-Ti 합금에서 처음으로 발견되었다. 1964년에 미국의 해군병기연구소(Naval Ordnance Laboratory)에서 Ni-Ti 합금의 극히 양호한 형상기억효과를 발표한 이후 형상기억합금이 다양한 분야에서 상용화되기 시작하였다. 그 원소명과 연구소의 두 문자를 연결하여 니티놀(Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory, NITINOL)이라고 명명하였다.

형상기억효과는 형상기억합금의 원자 결정 구조의 변화인 마르텐사이트 상변태(Martensitic Phase Transformation)로 인해 발생되는데 일반적인 탄소강(Carbon Steel)에서의 마르텐사이트 상변태와 유사하다. Fig. 2-2에서와 같이 고온에서는 정방형 결정구조를 가지는 오스테나이트상(Austenite Phase) 상태의 형상기억합금을  $M_f$  온도(Martensite Finish Temperature) 이하로 냉각시키면 단사정의 격자구조를 가지는 마르텐사이트상(Martensite Phase)으로 변태하게 된다. 이때 자기 적응 특성(Self-Accommodating Manner)에 의해 최대 24 방향의 쌍정 구조(Twinned Martensite)를 갖게 된다. 이러한 현상을 원자 배열의 대칭성에 근거하여 "Twinning"이라 부른다. 쌍정구조의 마르텐사이트상(Twinned Martensite Phase) 상태의 형상기억합금에 외력이 가해지면 서로 다른 방향을 갖고 있던 쌍정들이 일정한 방향을 갖게 되고 이로 인해 힘이 가해진 방향으로 형태가 변하게 되는데 이를 "Detwinning"이라 부른다. 형태가 변화된 형상기억합금을  $A_f$ (Austenite Finish Temperature) 온도 이상으로 가열하게 되면 형상기억합금은 오스테나이트상으로 돌아가고 변형전의 초기 형태로 돌아간다. 이러한 거동을 형상기억효과라고 하는데 Fig. 2-2에 나타내었다.

구조변환의 과정은 원자의 수준에서 일어나는데 이 과정에서 온도에 대한 히스테리시스(Hysteresis) 현상이 나타난다. 이러한 히스테리시스 현상은 Fig. 2-3에 나타난 바와 같이 형상기억합금 가열과 냉각의 과정에서 상변태 온도(Phase Transformation Temperature)가 서로 같지 않다는 점에서도 알 수 있다.

형상기억합금의 마르텐사이트 상변태 온도는 크게 네 가지로 나뉘는데  $M_s$ (Martensite Start Temperature),  $M_f$ (Martensite Finish Temperature),  $A_s$ (Austenite Start Temperature),  $A_f$ (Austenite Finish Temperature)이다. 이러한 상변태 온도는 DSC(Differential Scanning Calorimeter)등을 이용하거나 비저항 변화 또는 부피변화를 측정하여 알 수 있다.

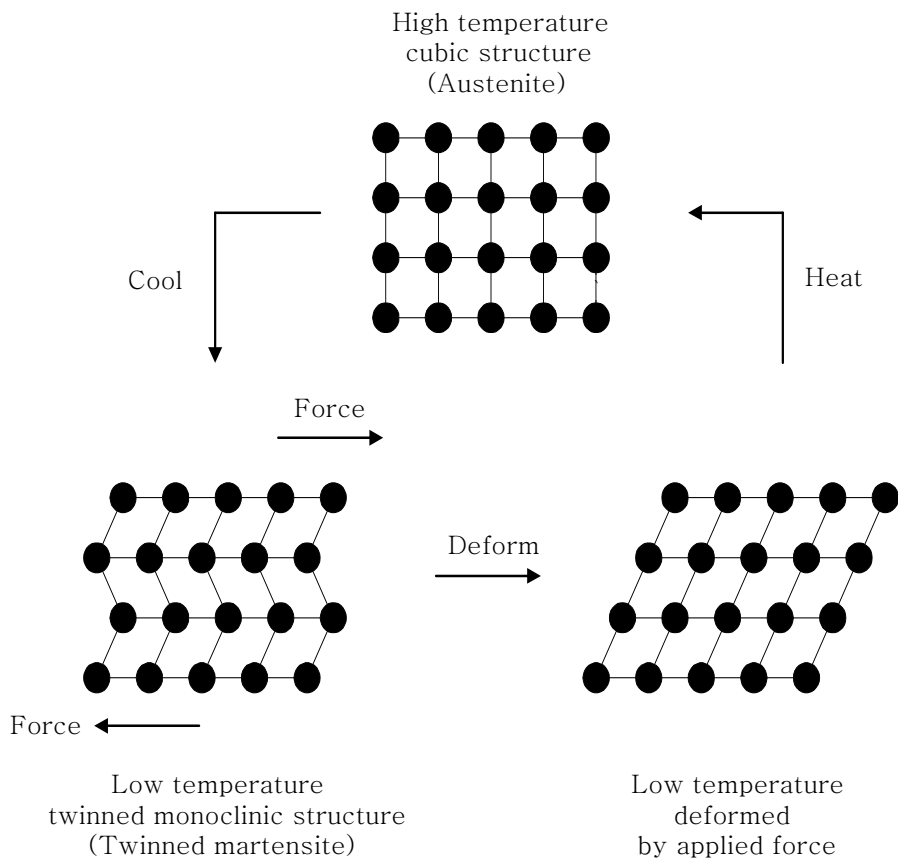


Fig. 2-2 Transformation between High and Low Temperature Structures of SMA

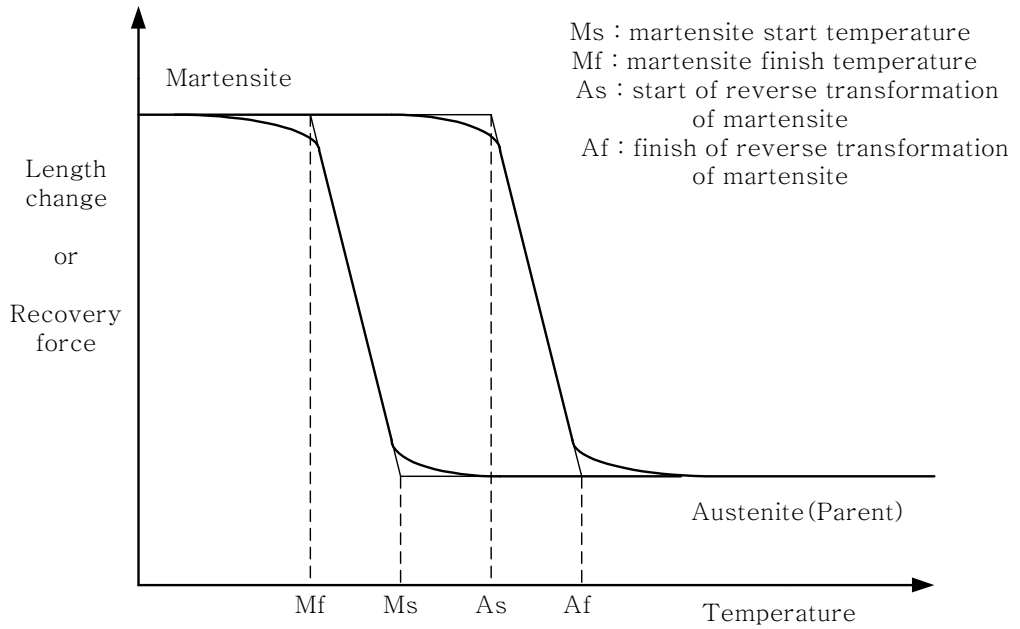


Fig. 2-3 Temperature Hysteresis of SMA

지금까지 설명한 형상기억효과와 같은 경우는 고온의 모상의 형태만을 기억하게 된다. 그러나 양방향성 형상기억효과(Two Way Shape Memory Effect, TWSME)를 이용할 경우 고온의 모상의 형태뿐만 아니라 저온에서의 변형된 형태를 모두 기억시킬 수 있으나 저온으로 돌아 갈 때는 발생력이 거의 없다. 이러한 양방향 형상기억효과는 과도한 변형이나 반복적인 변형이 형상기억합금에 가해지게 되면 형상기억합금 내에 전위밀도(Dislocation Density)가 높아지고 이로 인해 잔류응력 장(Residual Stress Field)이 형성되게 된다. 이로 인해 마르텐사이트상에서의 구조가 안정화되고 마르텐사이트상에서의 형태가 기억되게 된다. 양방향성 형상기억효과를 갖게 하는 방법은 마르텐사이트상 상태의 형상기억합금에 과도한 변형을 시킬 때 나타난다. 또한 반복적인 형상기억과정(Shape Memory Cycling)이나 의사 탄성 과정(Pseudo-Elastic Cycling), 구속 가열 과정(Constrained Temperature Cycling)에 의해서도 얻을 수 있다. 그 외에 구속 시효(Constrained Aging)에 의한 방법도 알려져 있다.

형상기억합금은 형상기억효과 이외에 초탄성이라고 하는 독특한 성질을 갖는다. 초탄성

현상도 형상기억효과와 똑같이 마르텐사이트 변태와 깊은 관계가 있으며  $A_f$ 점 이상에서 형상기억합금에 힘을 가하면 마르텐사이트 상변태가 일어나는데 이때 힘을 제거하면 다시 상변태가 일어나 본래의 형상으로 돌아가는데 이러한 현상을 의탄성(Pseudo-Elasticity) 또는 초탄성(Super-Elasticity)이라고 한다. Fig 2-4에 초탄성 효과의 응력과 변형률의 관계를 나타내었다.

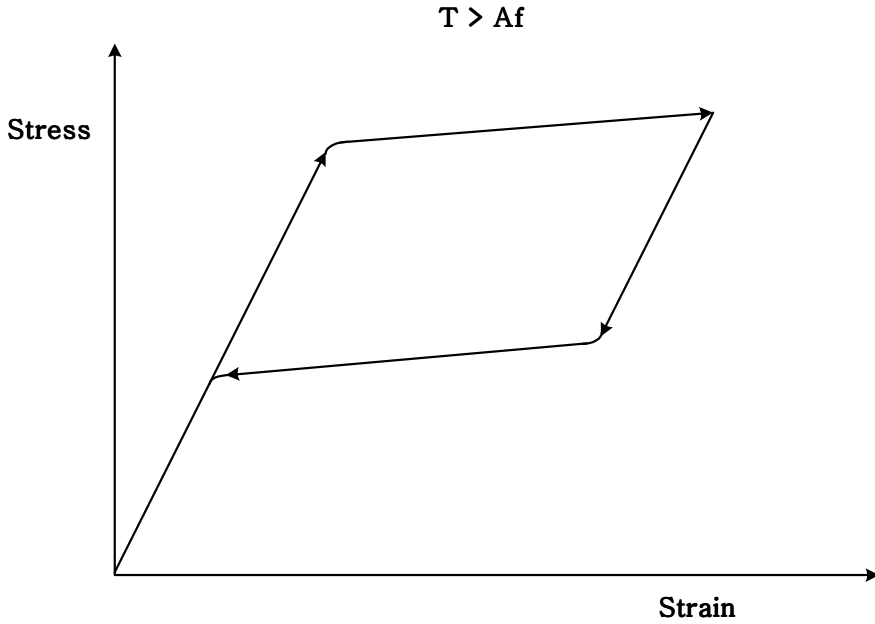


Fig. 2-4 Pseudo-Elastic Behavior of Shape Memory Alloy



## 제 2 절 Ni-Ti 형상기억합금의 특성

Ni-Ti 형상기억합금이 형상기억효과를 가지는 여러 가지 합금 중에서 기계적으로 많이 사용되는 이유는 다음과 같은 장점이 있기 때문이다.

첫째, 대부분의 형상기억합금이 단결정에서만 형상기억효과를 나타내는데 Ni-Ti 형상기억합금은 다결정으로 우수한 형상기억효과를 시현하며 제조과정이 별로 어렵지 않고 코일스프링과 같이 복잡한 형상의 소자를 만들 수 있다.

둘째, 가격이 비교적 저렴하고 니켈과 티타늄의 배합비율을 바꿈으로써 상변환 온도를 쉽게 조절할 수 있다.

셋째, 저항가열을 가능하게 하는 높은 비저항을 가지고 있다. 저항가열의 용이성 때문에 전기적으로 구동하는 여러 가지 액추에이터로의 응용에 유리하다.

넷째, 단위 부피당 높은 에너지를 가지며 조용하고 부드러운 동작을 하며 인체적합성이 좋기 때문에 의료용으로 많이 사용되고 있다.

다섯째, 제작되는 형상에 따라 선형적인 운동뿐만이 아니라 비틀림과 휨이 필요한 운동의 구현도 가능하며 설계를 단순화 하여 신뢰도를 높이고 부품 값을 줄이는 효과가 있다.

여섯째, 100만 번의 반복동작을 한 후에도 형상을 회복하는 능력이 거의 변하지 않고 응력이  $50\text{kgf}/\text{mm}^2$  이상의 형상회복을 발생하며 로봇이나 액추에이터와 같이 많은 반복동작을 하는 경우에도  $10\text{kgf}/\text{mm}^2$  정도의 회복력을 이용할 수 있다.

또한, 높은 에너지 밀도를 가진다는 점과 전성과 연성이 좋고 회복운동능력이 좋으며 부식과 마모에 대한 저항이 뛰어나고 변형온도가 안정적인 것 등이 있다.

그러나 Ni-Ti 형상기억합금의 여러 가지 장점에도 불구하고 액추에이터에 응용하는 데에 제한적으로 사용되는 이유는 다음과 같은 단점이 있기 때문이다.

첫째, 반응속도가 느리고 동작 폭이 제한된다는 것이다. Ni-Ti 형상기억합금의 반응속도가 느린 원인은 높은 열용량과 비교적 작은 열전도성을 들 수 있다. 이러한 Ni-Ti 합금의 성질은 반응속도뿐만 아니라 형상기억합금의 온도를 냉각하는데 필요한 시간이 길어지는 문제가 생긴다.

둘째, 접합의 어려움이 있다. 이는 형상기억효과가 형상기억합금에 온도를 가해주어 물리

적인 수축과 팽창을 일으키는 현상이기 때문에 접합부위의 온도가 높아지고 모양이 변형될 경우 일반 용접이나 납땀으로는 형상기억합금을 접합할 수 없다. 지금까지의 연구에서는 크립핑 방법이 가장 많이 사용되고 있으며 저항용접과 접착제에 의한 방법도 부분적으로 가능하다고 알려져 있다.

마지막으로 제한된 사용시간을 들 수 있다. 이는 고전적인 구조의 피로에 의한 것과 연속적인 열 변환으로 인한 운동손실에 의한 것으로 두 가지 이유로 설명할 수 있다. 아직 형상기억합금의 주기적인 구조 변화에 관한 참조할 만한 자료가 부족한 실정이며 이러한 현상은 주로 형상기억합금에 가해지는 힘의 크기와 깊은 관계가 있다.

최근 가장 많이 사용되고 있는 Ni-Ti 합금과 Cu-Al계열 형상기억합금의 성질을 Table 2-1에 나타내었다.

Table 2-1 Material Properties of Ni-Ti and Cu-Al based Alloys

Property	NiTi	CuZn Al	CuAl Ni
Maximum as temperature (°C)	100	120	200
Maximum one-way strain (%)	8	6	3
Hysteresis (°C)	12 ~ 50	10 ~ 25	15 ~ 20
High temperature yield strength (MPa)	415	350	400
Low temperature yield strength (MPa)	70	80	130
Ultimate tensile strength (MPa)	700	600	500 ~ 800
Density (g/cc)	6.5	7.6 ~ 8.0	7.2
Resistivity (μΩ-cm)	80 ~ 89	8.5 ~ 9.7	11 ~ 13
Heat capacity (J/kg-K)	837	400	373 ~ 574
Thermal conductivity (J/m-sec-K)	18	120	30 ~ 43
Melting point (°C)	1240~ 1310	960 ~ 990	1110
Specific heat (cal/g-°C)	0.12	0.1	0.14

### 제 3 장 구간분할 바이너리 제어

#### 제 1 절 구간분할 바이너리 제어의 개요

## 1. 구간분할 바이너리 제어

기존의 형상기억합금 액추에이터의 제어방식은 형상기억합금 와이어 전 구간에 열 또는 전기를 입력하고 변위 신호를 피드백 받아 제어하는 형태를 취하였다. 이러한 제어방식은 형상기억합금 재료가 갖는 비선형성 때문에 제어특성이 우수하지 못하였다. 따라서 이 제어 기법은 형상기억 합금 전체에 입력신호를 가하는 기존의 제어기법과 달리 긴 형상기억 합금 와이어를 여러 짧은 구간으로 나누고 각각의 구간을 독립적인 바이너리(ON/OFF) 방식으로 제어하는 기법이다. Fig. 3-1은 구간분할 바이너리 제어기법을 나타낸 것이다.

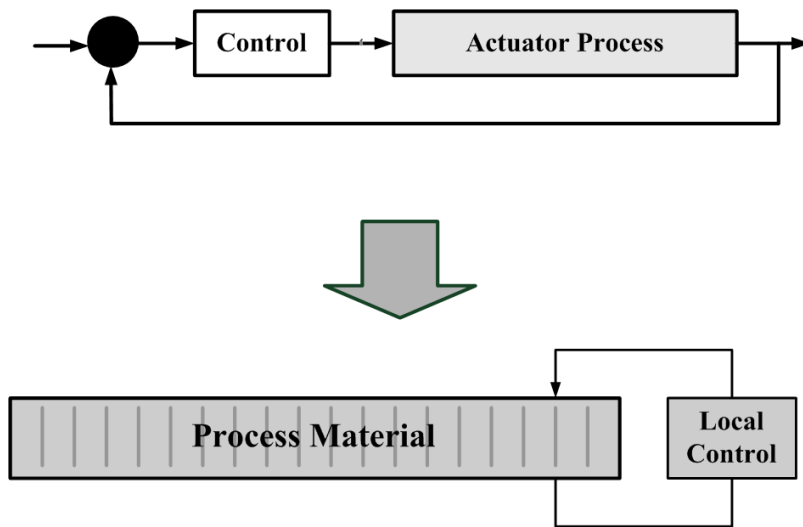
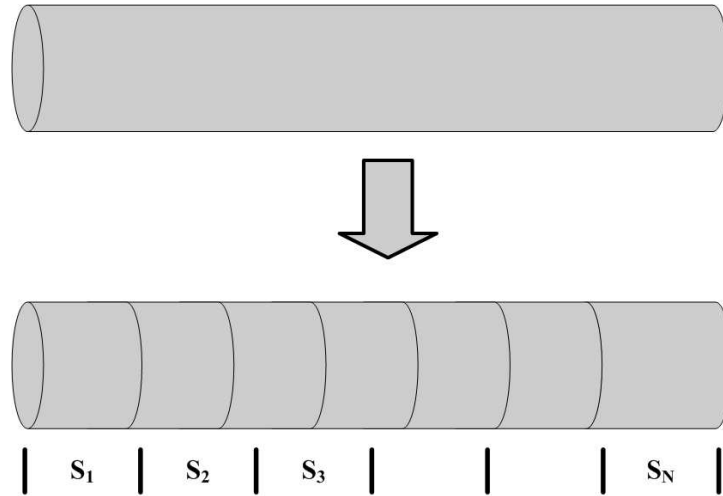


Fig.3-1 Segmented Binary Control Scheme

형상기억합금은 온도가 증가하면 변위가 발생하므로 각각의 구간에 온도를 인가하면 독립적으로 구간별 변위를 제어할 수 있다. Fig. 3-2는 형상기억합금 와이어를 여러 짧은 구간으로 나누고 각각의 구간에서 변위가 발생하는 방법을 나타낸 것이다. 각각의 구간에서 독립적으로 발생된 변위는 합산되어 형상기억합금 전체의 변위를 발생시킨다.



$$\epsilon_{\text{Total}} = \sum \epsilon_i$$

Fig. 3-2 Displacement of Segmented SMA wire

Fig. 3-3은 형상기억합금 액추에이터의 구간분할 바이너리 제어 방법의 블록선도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것처럼 제어신호를 입력하면 제어입력은 구간신호 조정기에 의해 각각의 구간 제어기로 배분되어 각 구간별로 변위를 발생시킨다. 각 구간의 온도 상태는 구간신호 조정기로 피드백되고 이 신호를 참조로 하여 냉각이 완료된 구간에 다음 신호를 입력한다. 그러므로 형상기억합금 액추에이터를 구간분할 바이너리 제어함으로써 와이어 전체가 작동되었을 때 발생하는 히스테리시스를 감소시킬 수 있으며 신호가 바뀔 때마다 발생하는 지연시간을 줄여 우수한 위치 추종 성능을 가질 수 있다.

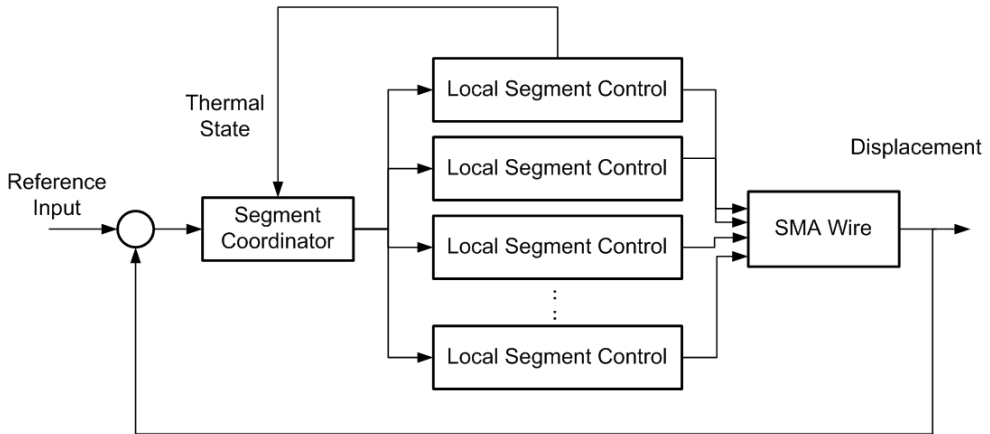


Fig. 3-3 Block Diagram of Segmented Binary Control

## 2. 열전소자

구간별 온도 제어를 하기 위하여 열전소자(Thermoelectric Module)를 사용하여 제어한다. 열전소자는 Fig. 3-4에서와 같이 P형과 N형 반도체를 조합하여 접합시켜 놓은 것으로서 재료양단의 온도차에 의하여 전압이 발생하는 지베크(Seebeck) 효과와 재료 양단간에 전류를 통하면 한 면이 발열하고 반대 면은 흡열하는 펠티어(Peltier) 효과의 열전 특

성을 갖는 재료로서 냉각이나 가열을 동시에 수행하여야 하는 경우 그리고 열원을 이용한 발전이 필요한 경우에 어디든지 사용할 수 있는 열과 전기의 교환시스템이다. 현재 이러한 펠티어(Peltier) 효과를 이용하여 가습기, CPU냉각, 냉정수기, 자동차용 소형 냉장고 및 화장품 냉장고 등의 실용화에 많이 사용되고 있으며 구조가 간단하고 부피에 비해 에너지 효율이 좋아 그 사용이 점차 확대되고 있다. 최근에는 지베크(Seebeck) 효과를 이용하여 핵잠수함의 발전, 해수 온도차 발전, 태양열 이용 발전 등에서는 수 MW급 발전 계획도 진행 중이다.

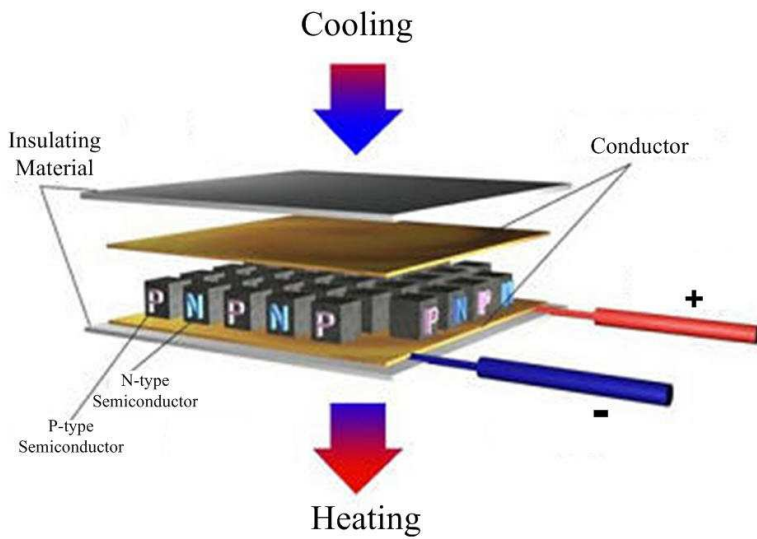


Fig. 3-4 Construction of Thermo Electric Module

### 3. 열전소자의 그룹화

유연한 동작을 할 수 있는 로봇핸드를 개발하기 위해서는 형상기억합금 와이어의 구간분할 수를 증가시키면 되지만 제어 부담이 커지게 된다. 이를 해결하기 위하여 운동 형태별로 구간을 그룹화하고 열전소자를 병렬로 연결하여 제어하면 제어 부담을 줄일 수 있는 장점이 있다. Fig. 3-5는 제어하고자 하는 열전소자를 그룹화하지 않고 열전소자 한 조에 하나의 컨트롤러를 장치한 형태를 나타낸 것이다. Fig. 3-6은 Fig. 3-5와 같은 시스템에서 발생하는 제어 부담을 줄이고자 운동 형태를 고려하여 열전소자를 그룹화 하여 제어하는 방식을 나타낸 것이다.

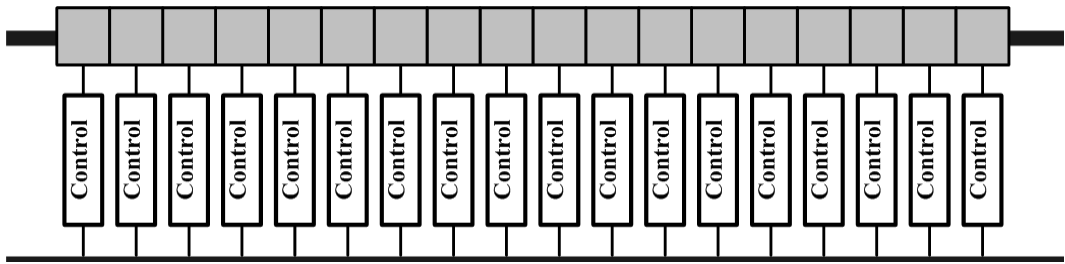


Fig. 3-5 Ungrouped Segment Control of Single Axis

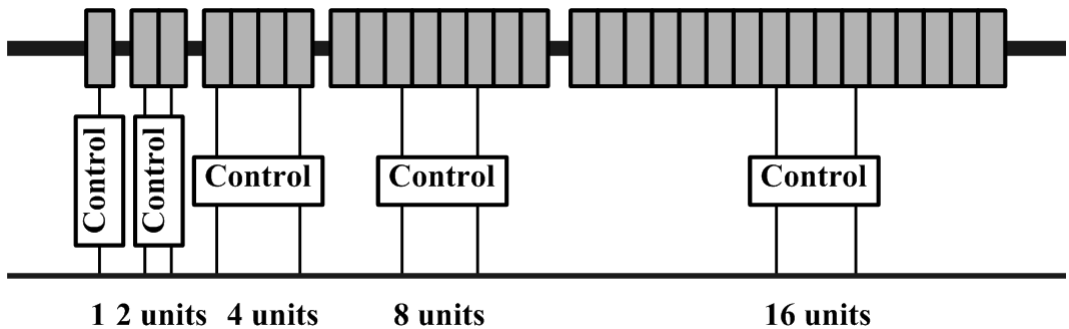


Fig. 3-6 Grouped Segment Control of Single Axis

## 제 2 절 구간분할 디지털 제어



## 1. 디지털 제어의 개요

기존의 형상기억합금 액추에이터의 제어방식은 와이어 전체에 신호를 입력하여 그때의 와이어에서 발생하는 전체 변위가 제어 대상이 되었다. 그러나 바이너리 제어에서는 바이너리 신호 즉 ON/OFF 입력신호가 여러 작은 구간으로 구분된 형상기억합금 와이어의 각 구간에 입력되고 그 때 발생하는 구간별 변위가 제어 대상이 된다. 이 때 변위가 발생할 때의 상태를 1(ON) 변위 발생이 없는 상태를 0(OFF) 으로 한다. 그러므로 형상기억합금 액추에이터는 각각의 구간의 상태에 따라 변위가 결정되는 디지털 방식의 제어가 가능하게 된다.

Fig. 3-7은 형상기억합금 액추에이터를 기존의 아날로그 방식으로 제어하는 것을 나타낸 것이고 Fig. 3-8은 구간분할 바이너리 제어를 이용하여 디지털화 시킨 제어 형태를 나타낸 것이다.

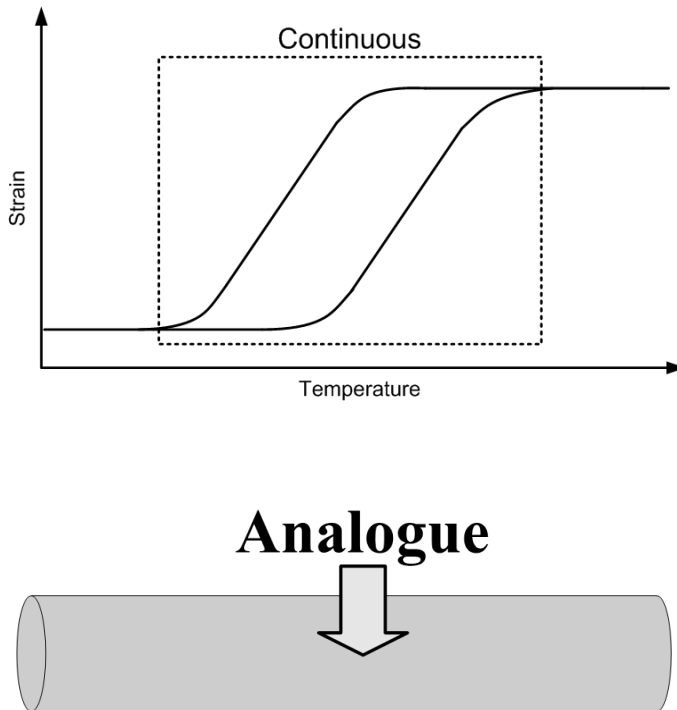


Fig. 3-7 Analogue Control Method

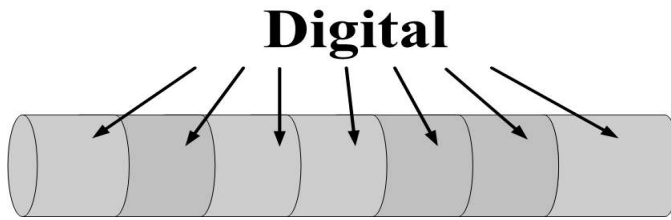
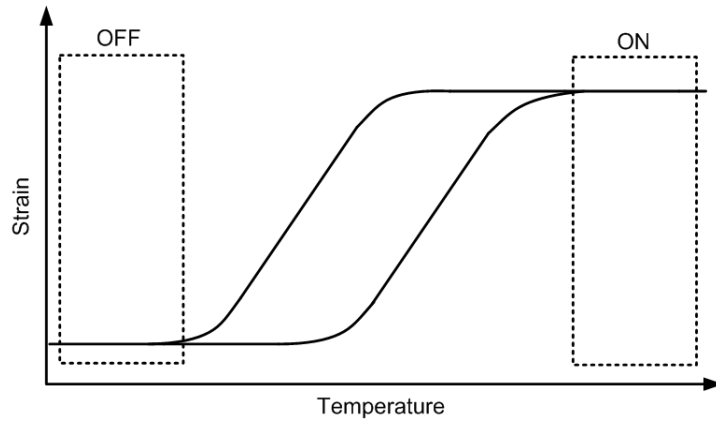


Fig. 3-8 Digital Control Method

## 2. 형상기억합금 디지털 스텝모터

열전소자에 의해 구간분할 된 형상기억합금 와이어는 각각의 구간별 신호에 따라 변위가 발생된다. 따라서 원하는 변위에 따라 구간별 입력신호를 패턴화하면 Fig. 3-9와 같이 형상기억합금 액추에이터는 디지털 스텝모터와 같은 역할을 하게 된다. 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.

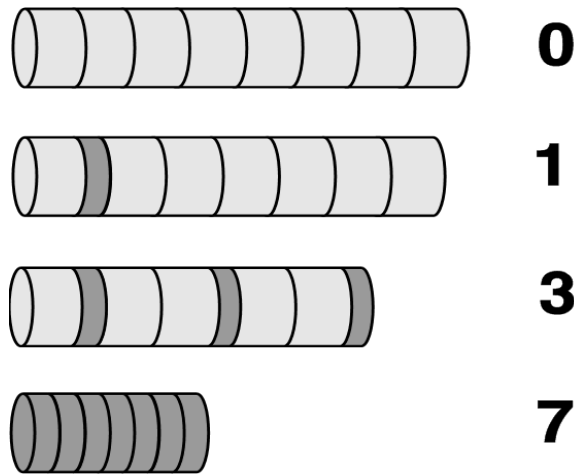


Fig. 3-9 SMA Digital Step Motor

### 3. 형상기억합금 다축 디지털 스텝모터

Fig. 3-10은 로봇핸드의 구동을 위한 다축 형상기억합금 액추에이터를 제어하기 위한 열전소자의 그룹화 모델을 나타낸 것이다. 이 그룹화 모델은 로봇핸드의 운동 형태를 고려하여 독립구간과 커플구간으로 나누었다. 손가락 마디별 작은 운동을 할 때는 독립된 구간의 작은 열전소자에 신호를 입력하고 손가락이 동시에 움직이고 큰 운동을 할 때는 커플된 구간의 큰 열전소자에 신호를 입력한다.

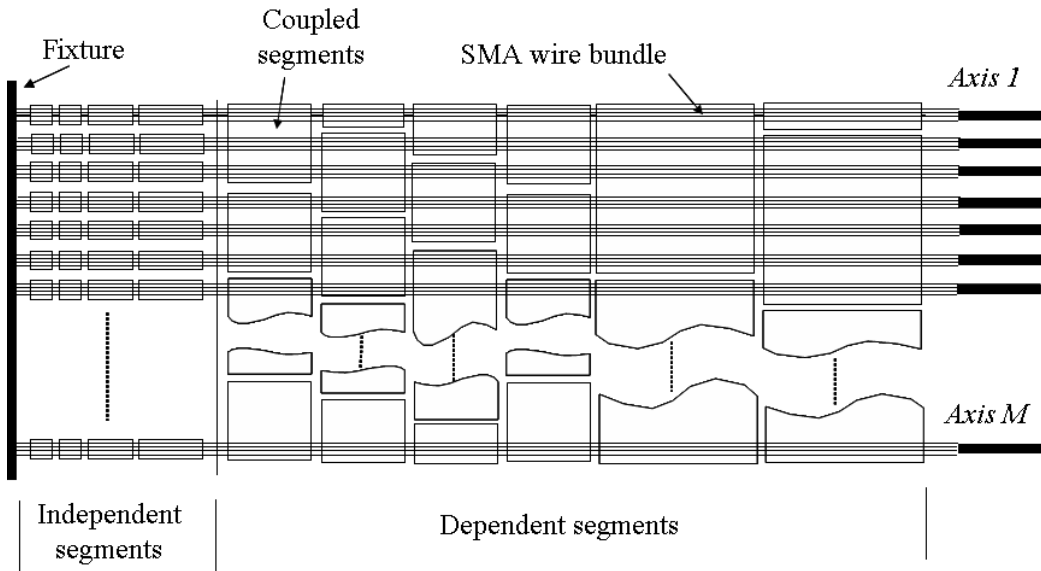


Fig. 3-10 Grouped of Thermo Electric Module

## 제 4 장 로봇핸드 모델링

본 장에서는 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 구간 분할 바이너리 제어 기법에 의해 발생 된 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. 4-1은 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 4-1은 모델링 조건을 나타낸 것이다.

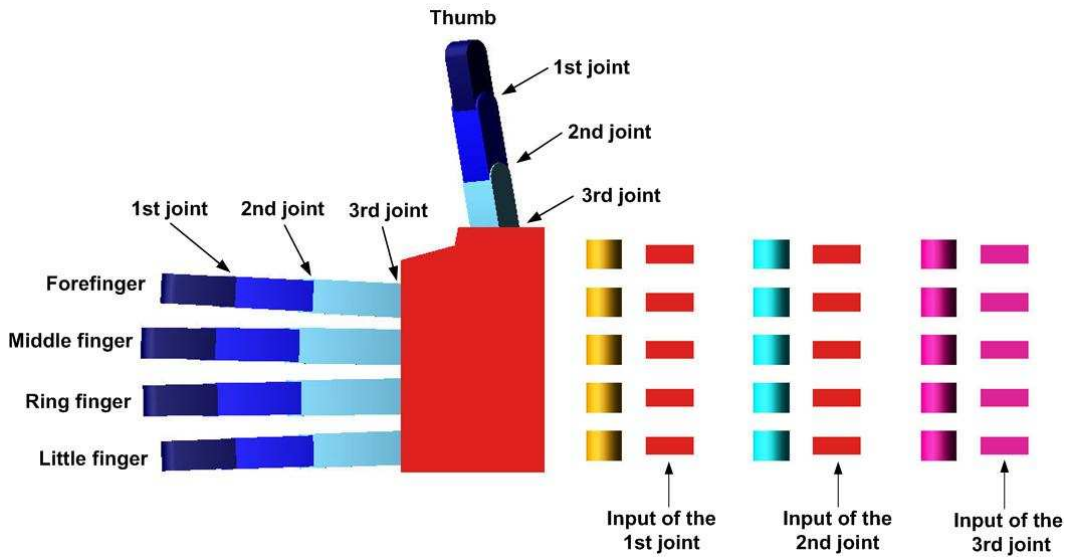


Fig. 4-1 Modeling of Robot Hand

Table 4-1 Conditions of Robot Hand Modeling

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

## 제 1 절 로봇핸드의 자세별 입력관계

재활 의수족 및 정밀기계 등 파손되기 쉬운 재료나 제품을 다루는 지능형 그리퍼 또는 유연하고 복잡한 운동 형태가 필요한 다 관절 주행기구 등 사람의 손동작과 유사한 유연성, 자연스러운 동작특성 및 적응 능력을 갖는 로봇핸드를 개발하고 손동작에 따른 각 관절의 운동특성을 파악하기 위하여 다양한 형태의 손동작을 시뮬레이션 하였다.

### 1. First Grip

Fig. 4-1을 초기 상태로 했을 때 로봇핸드의 최대변위는 주먹을 쥐고 있을 때의 형태로 설정하였다. Fig. 4-2는 최대 변위를 요구하는 First Grip의 손 모양을 나타낸 것이다. 이때의 손가락 각 관절의 각변위와 직선 입력 변위를 시뮬레이션을 통하여 얻을 수 있었다. 각 관절의 각변위와 그에 대한 입력 변위는 Table 4-2에 나타내었고 손가락의 직선 입력 변위와 각변위를 그래프로 나타내었다. Fig. 4-3은 엄지(Thumb)의 입력 변위와 관절의 각변위를 그래프로 나타낸 것이다. 첫 번째 관절에서 직선 변위입력은 5.236mm 이며 60°의 각변위가 출력 되었다. 두 번째 관절과 세 번째 관절에서는 2.618mm, 6.1087mm의 직선 변위가 입력되었고 풀리와 커플링을 통해 각각 30°, 60°의 각변위가 발생되었다. Fig. 4-4는 중지(Middle Finger) 각 관절의 입력 변위와 각변위를 나타낸 것으로써 첫 번째 관절에서 9.5993mm, 두 번째 관절에서 8.7266mm, 세 번째 관절에서는 6.9813mm의 직선 변위가 입력되었으며 이때 각 관절에서는 110°, 100°, 80°의 각변위가 출력되었다.

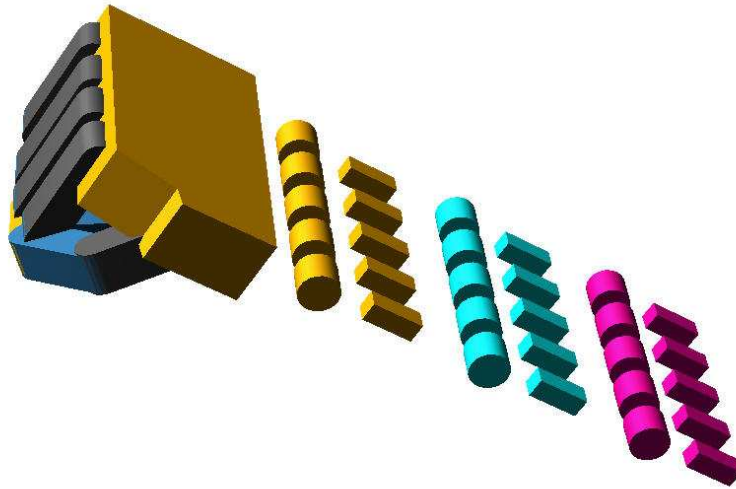
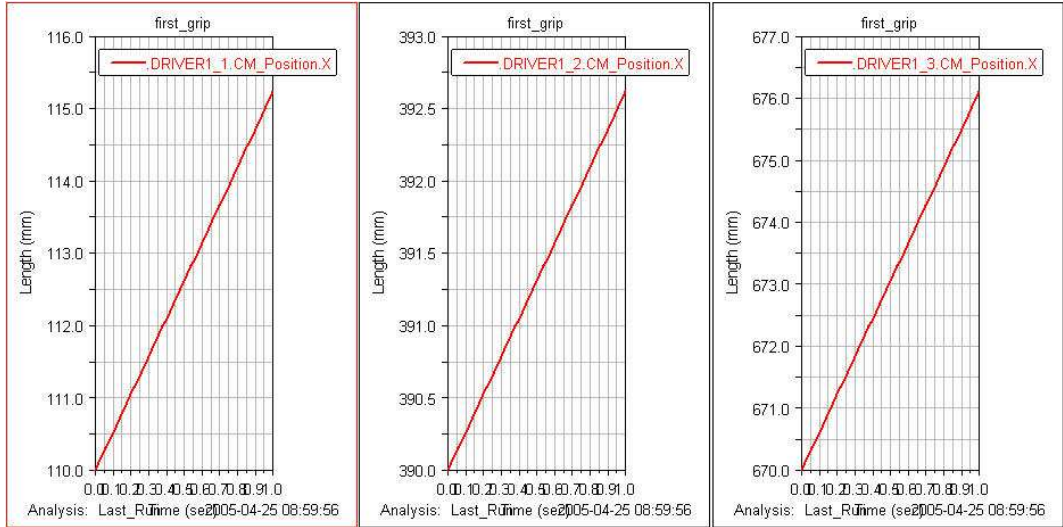


Fig. 4-2 First Grip

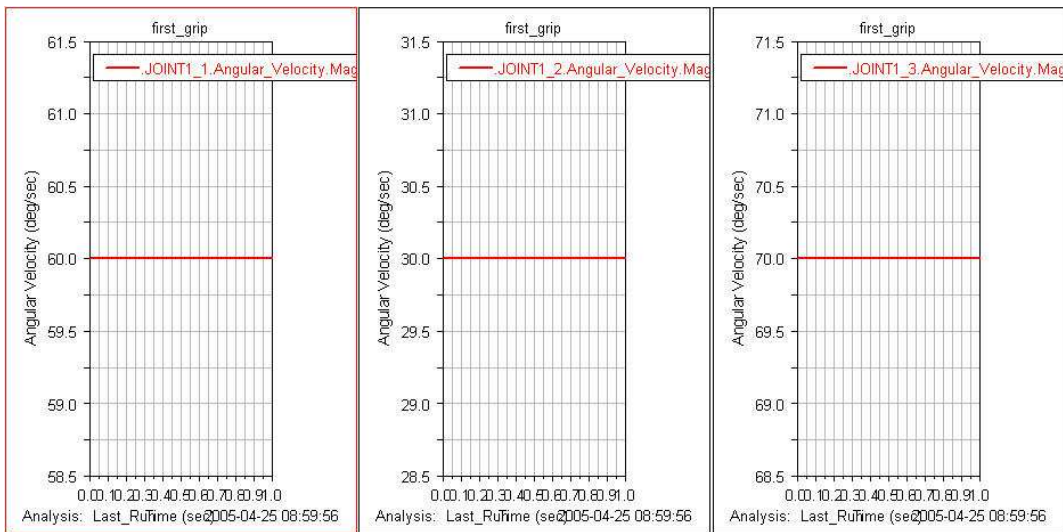
Table 4-2 Input and Output of First Grip

First 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



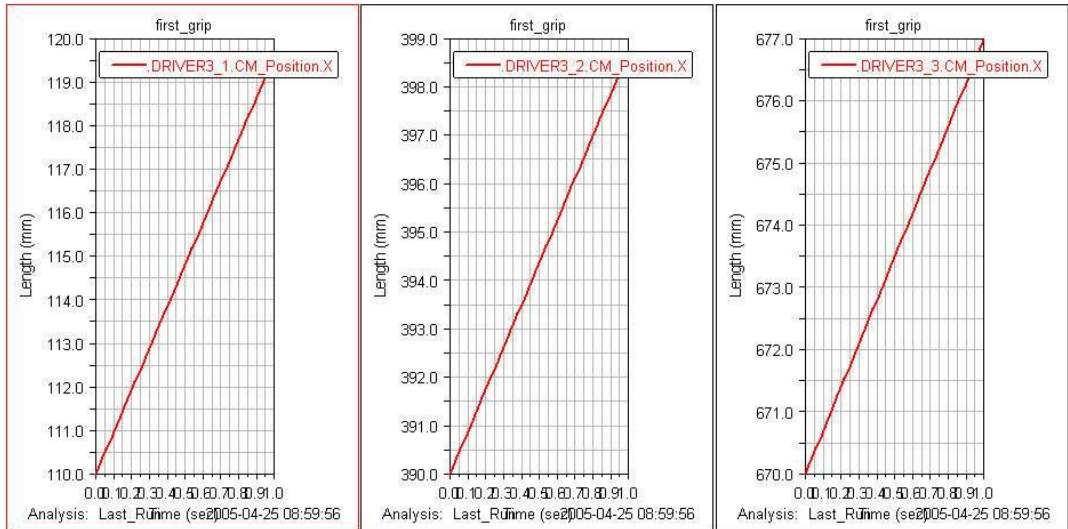


(a) Translational Input of Thumb

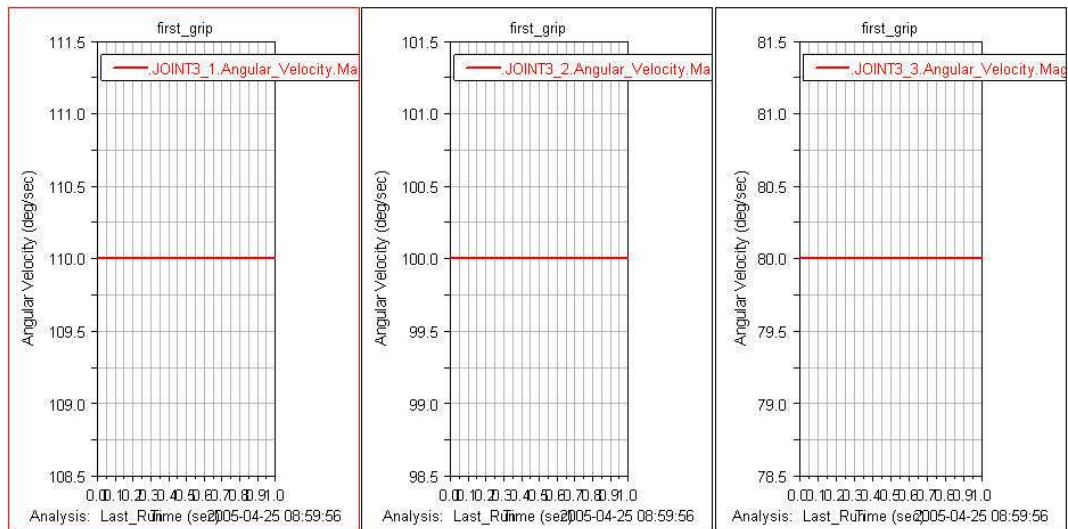


(b) Angular Displacement of Thumb

Fig. 4-3 Translational Input and Angular Displacement of First Grip Thumb



(a) Translational Input of Middle Finger



(b) Angular Displacement of Middle Finger

Fig. 4-4 Translational Input and Angular Displacement of First Grip Middle Finger

## 2. Ball Grip 1

Fig. 4-5는 로봇핸드가 큰 물건을 잡는 모양으로써 이때의 손가락 각 관절의 각변위와 입력 변위를 시뮬레이션을 통하여 구하였다. Ball Grip 1에 대한 손가락 각 관절의 각변위와 그에 대한 입력 변위는 Table 4-3에 나타내었다. Fig. 4-6은 중지(Middle Finger)에 대한 직선 입력 변위와 각 관절에서 발생된 각변위를 나타낸 그래프로써 첫 번째 관절에서 2.618mm, 두 번째 관절 3.927mm 그리고 세 번째 관절에서 1.309mm의 직선 변위가 입력되었으며 각각 30°, 45°, 15°의 각변위가 발생하였다. Fig. 4-7은 소지(Little Finger)의 직선 입력 변위와 출력된 각 변위를 나타낸 그래프이다.

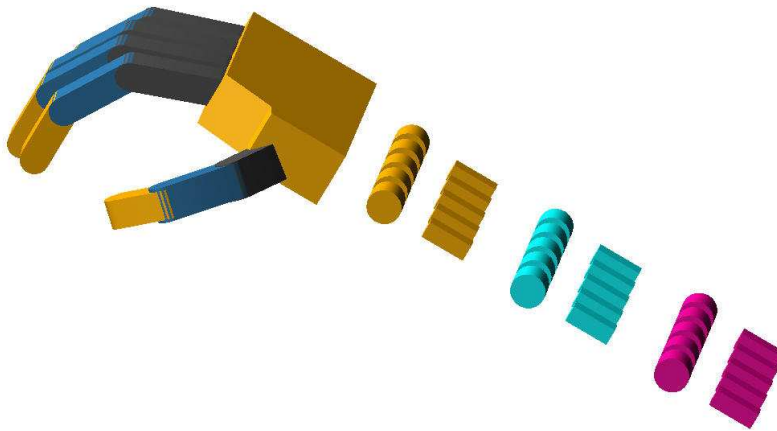
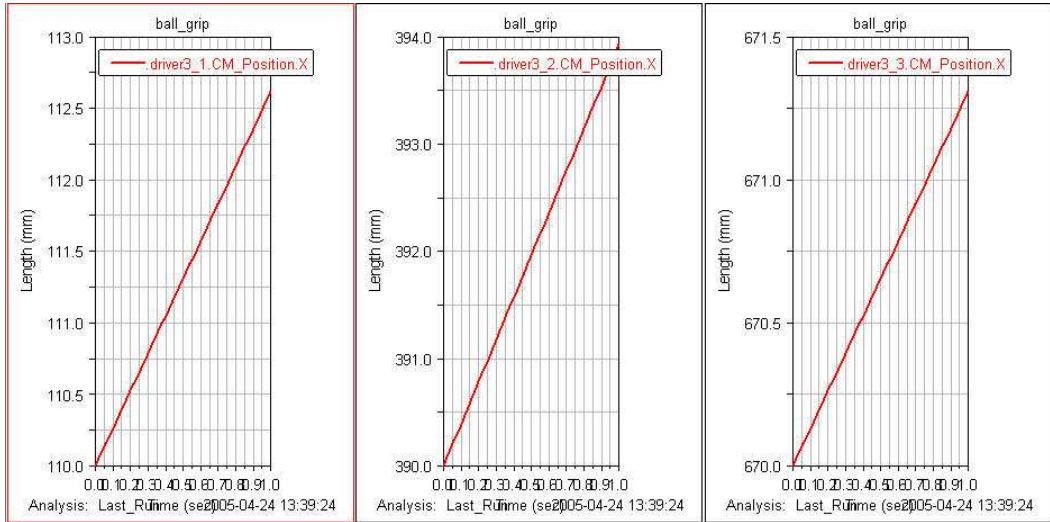


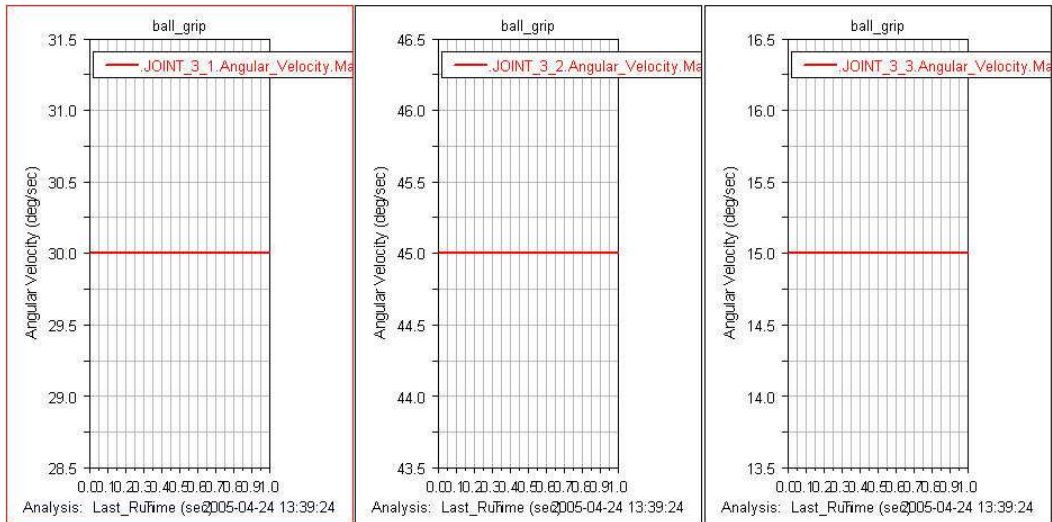
Fig. 4-5 Ball Grip 1

Table 4-3 Input and Output of Ball Grip 1

Ball grip 1	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	50.0	15.0	20.0
	4.3633	1.309	1.7453
Fore Finger	30.0	45.0	15.0
	2.618	3.927	1.309
Middle Finger	30.0	45.0	15.0
	2.618	3.927	1.309
Ring Finger	30.0	45.0	15.0
	2.618	3.927	1.309
Little Finger	30.0	45.0	15.0
	2.618	3.927	1.309

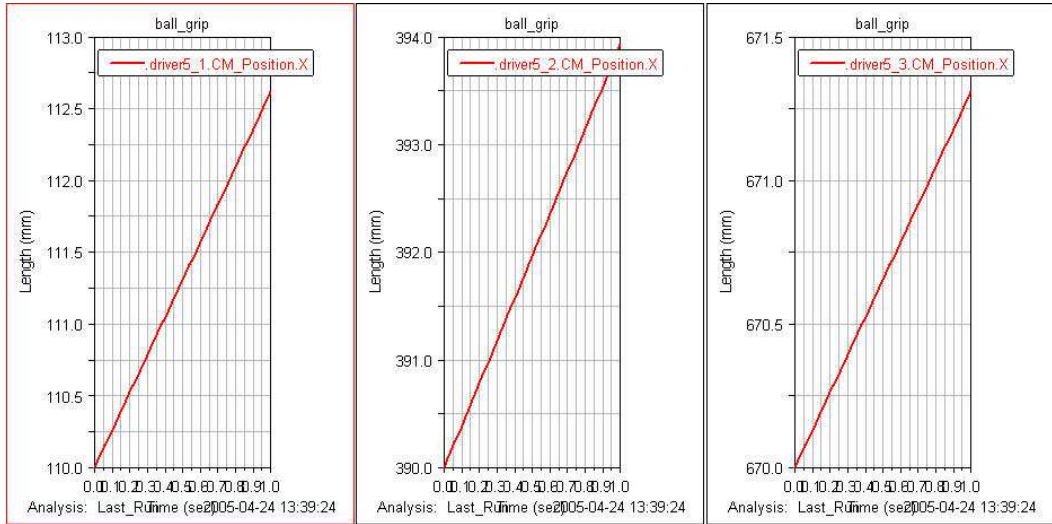


(a) Translational Input of Middle Finger

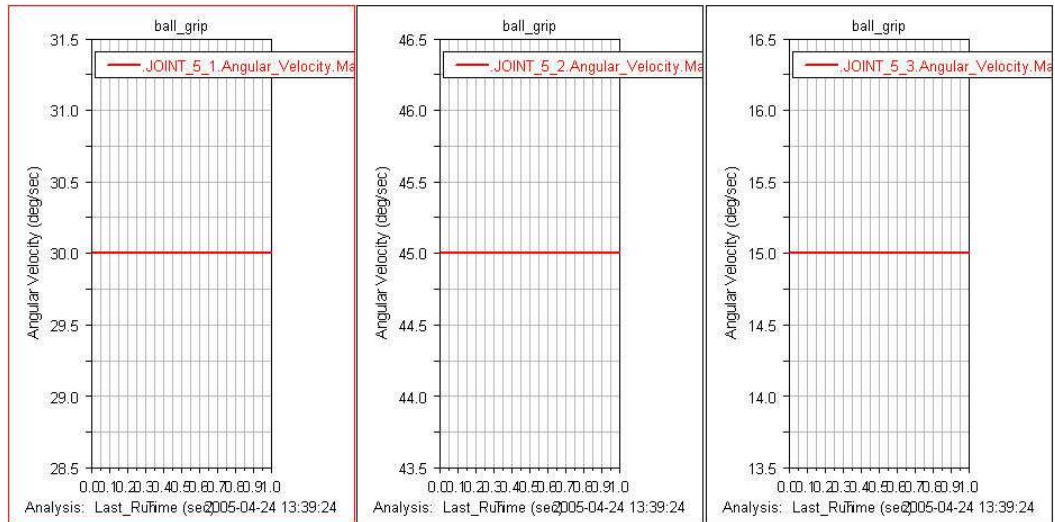


(b) Angular Displacement of Middle Finger

Fig. 4-6 Translational Input and Angular Displacement of Ball Grip 1 Middle Finger



(a) Translational Input of Little Finger



(b) Angular Displacement of Little Finger

Fig. 4-7 Translational Input and Angular Displacement of Ball Grip 1 Little Finger

### 3. Ball Grip 2

Fig. 4-8은 로봇핸드가 작은 물건을 집을 때의 형상을 보여준다. Ball Grip 1에 비해 각 변위가 많이 발생하므로 직선 변위 입력이 증가 되었다. Table 4-4는 로봇핸드의 Ball Grip 2에 대한 손가락 각 관절의 입력 변위와 각변위를 보여준다. 엄지(Thumb)에서의 각변위는 각각 60°, 30°, 50°로 발생하였고 5.236mm, 2.618mm, 4.3633mm의 직선 변위가 입력되었으며 Fig. 4-9에 그래프로 나타내었다. 또한 약지(Ring Finger)에 대한 입·출력의 그래프를 Fig. 4-10에 나타내었다.

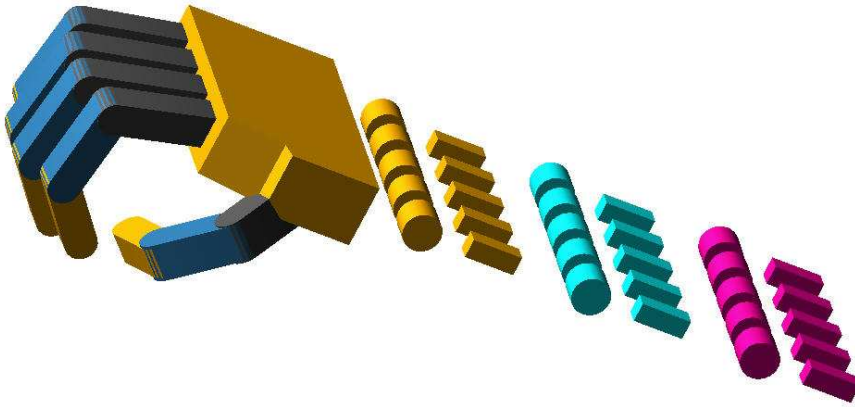
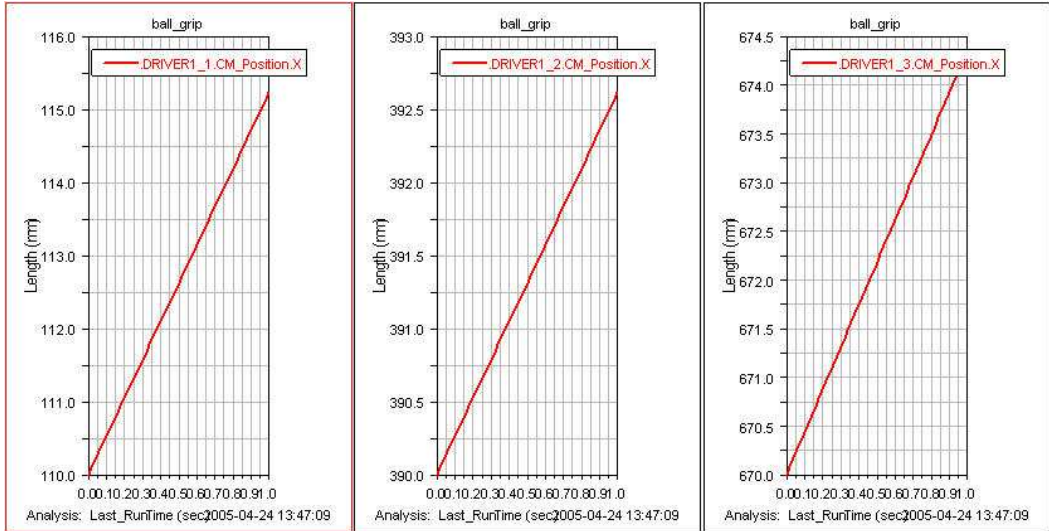


Fig. 4-8 Ball Grip 2

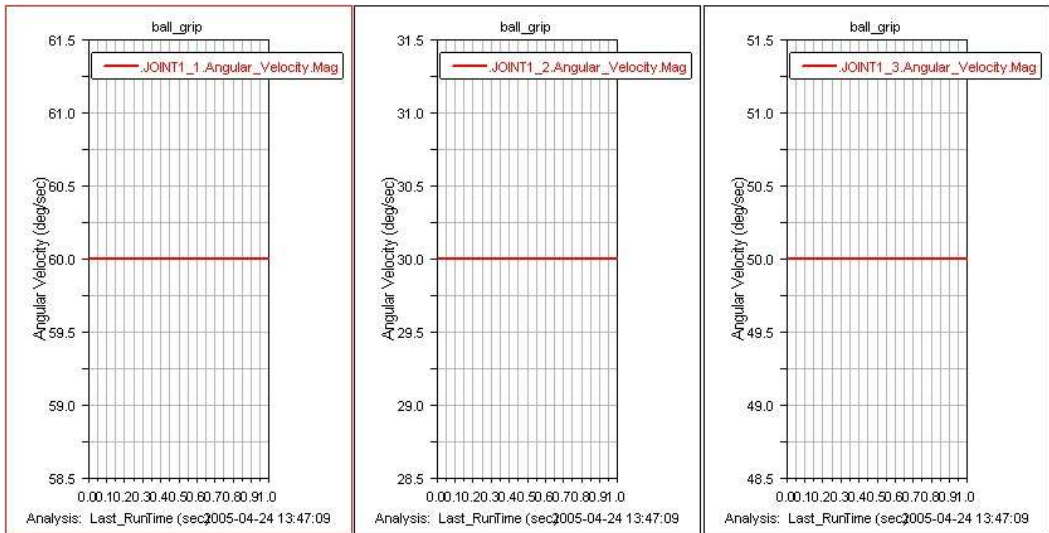
Table 4-4 Input and Output of Ball Grip 2

Ball grip 2	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	50.0
	5.236	2.618	4.3633
Fore Finger	35.0	80.0	9.0
	3.0543	6.9813	0.7854
Middle Finger	35.0	80.0	9.0
	3.0543	6.9813	0.7854
Ring Finger	35.0	80.0	9.0
	3.0543	6.9813	0.7854
Little Finger	35.0	80.0	9.0
	3.0543	6.9813	0.7854



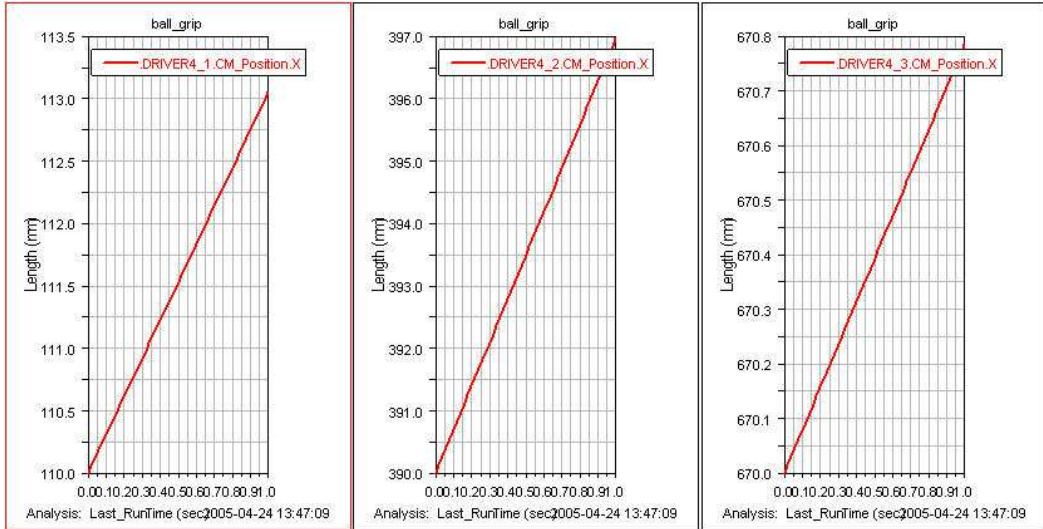


(a) Translational Input of Thumb

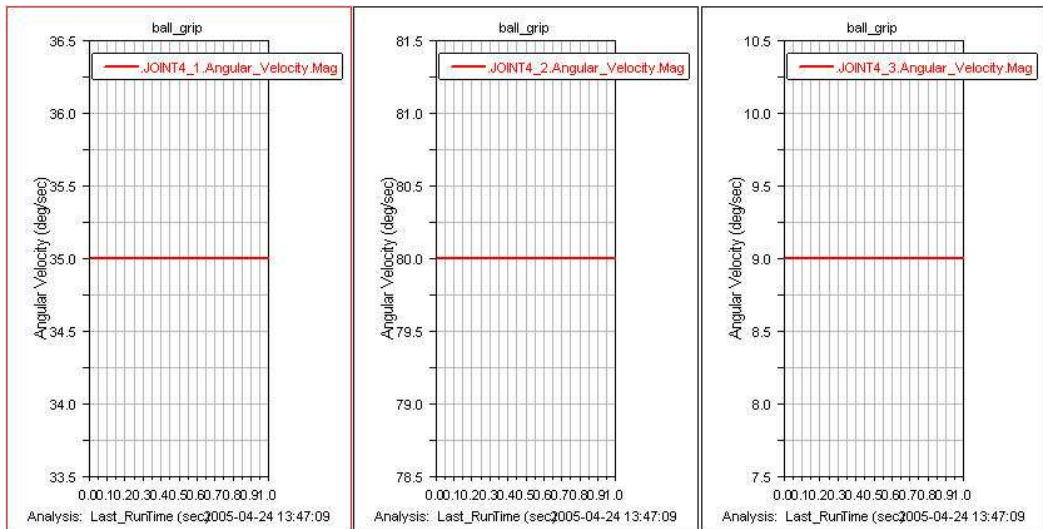


(b) Angular Displacement of Thumb

Fig. 4-9 Translational Input and Angular Displacement of Ball Grip 2 Thumb



(a) Translational Input of Ring Finger



(b) Angular Displacement of Ring Finger

Fig. 4-10 Translational Input and Angular Displacement of Ball Grip 2 Ring Finger

#### 4. Pinch 1

Fig. 4-11은 로봇핸드가 엄지(Thumb)와 검지(Fore Finger) 두 손가락을 이용하여 작은 물체를 집는 Pinch 1을 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과 검지(Fore Finger)의 첫 번째 관절에서 최대 변위가 일어났으며 약지(Ring Finger)와 소지(Little Finger)에서는 약간의 각변위가 발생하였다. Table 4-5는 Pinch 1에 대한 각 관절의 직선 입력 변위와 각변위를 나타낸 것이며 Fig. 4-12는 검지(Fore Finger)의 직선 입력 변위와 출력단의 각변위를 그래프로 나타낸 것이다. 첫 번째 관절에서 70°의 각변위가 일어났으며 이 때 6.1087mm의 직선 변위가 입력되었다. 또한 두 번째 관절과 세 번째 관절에서 각각 50°, 30°의 각변위가 발생했으며 입력된 직선 변위는 각각 4.3633mm, 2.618mm로 나타났다. 중지(Middle Finger)에서는 각각 0.8727mm, 2.1817mm, 1.7453mm의 직선 변위가 입력되었을 때 10°, 25°, 20°의 각변위가 발생했으며 Fig. 4-13에 그래프로 나타내었다.

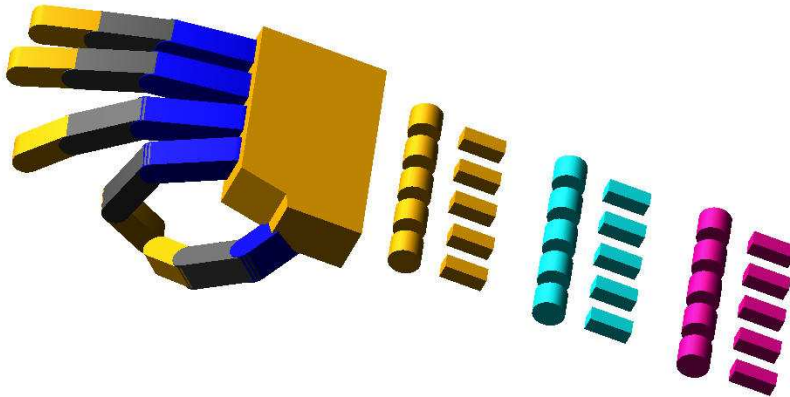
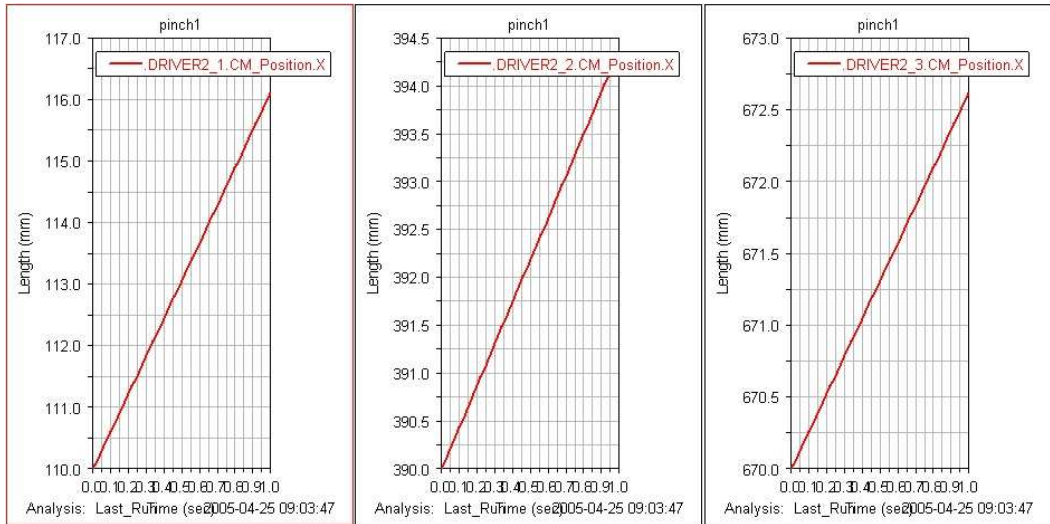


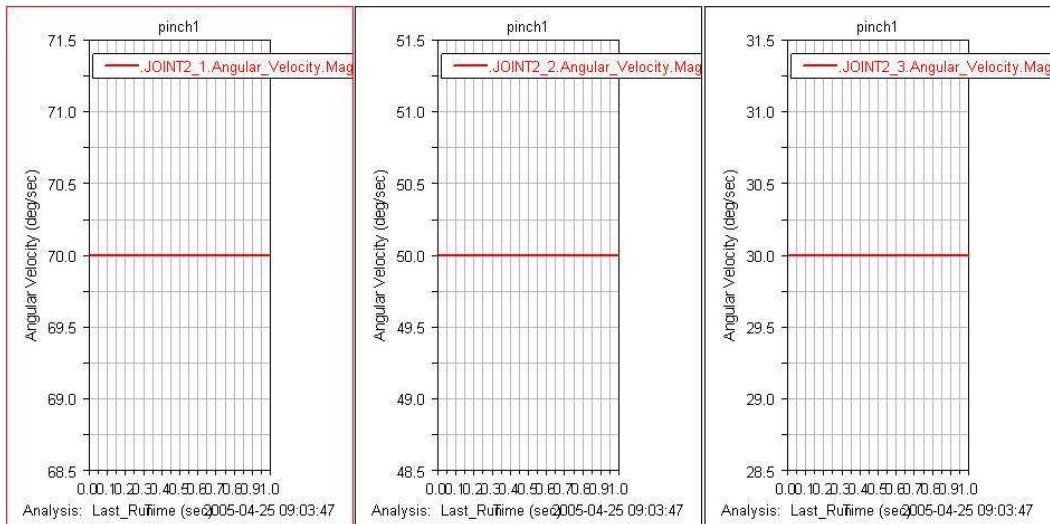
Fig. 4-11 Pinch 1

Table 4-5 Input and Output of Pinch 1

Pinch 1	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	30.0	45.0	45.0
	2.618	3.927	3.927
Fore finger	70.0	50.0	30.0
	6.1087	4.3633	2.618
Middle finger	10.0	25.0	20.0
	0.8727	2.1817	1.7453
Ring finger	1.0	15.0	10.0
	0.0873	1.309	0.8727
Little finger	1.0	10.0	10.0
	0.0873	0.8727	0.8727

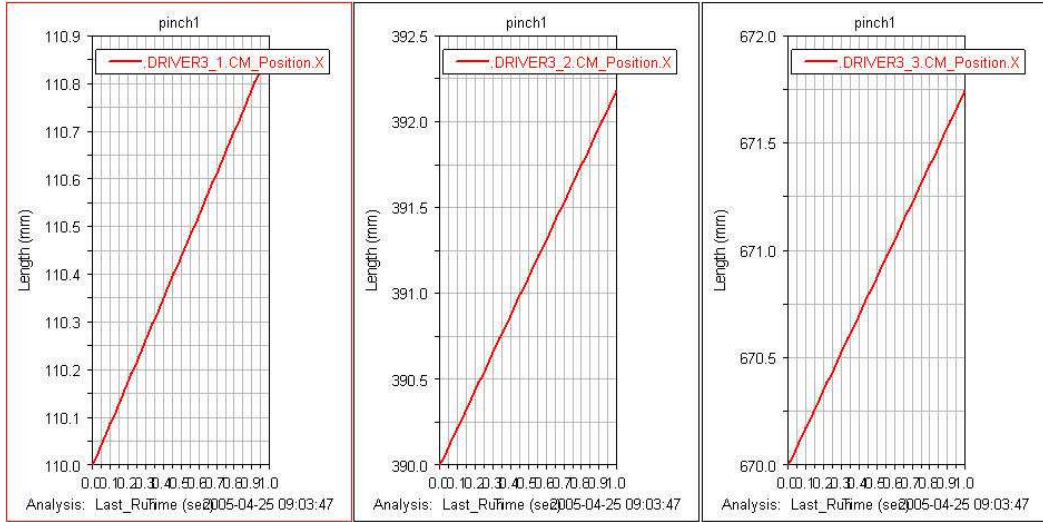


(a) Translational Input of Fore Finger

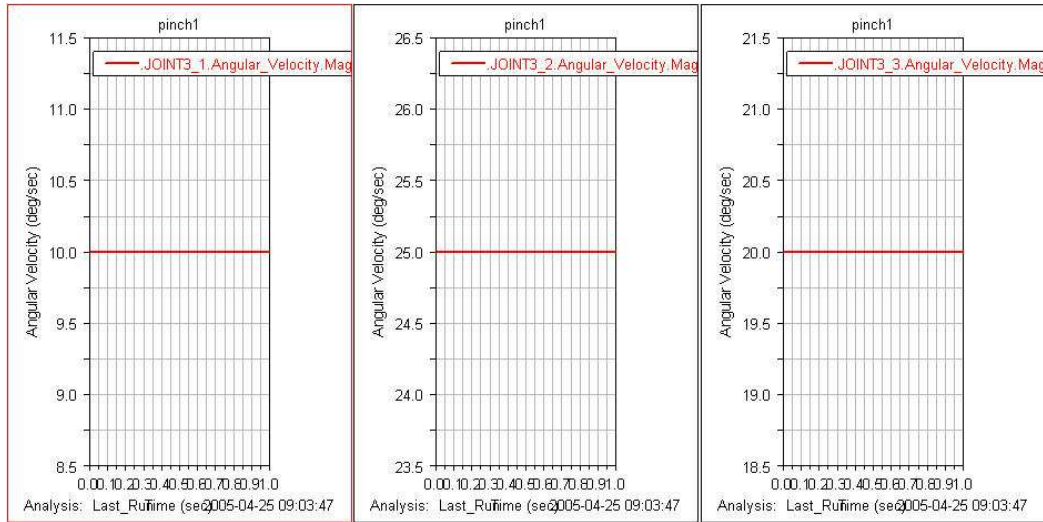


(b) Translational Input of Fore Finger

Fig. 4-12 Translational Input and Angular Displacement of Pinch 1 Fore finger



(a) Translational Input of Middle Finger



(b) Translational Input of Middle Finger

Fig. 4-13 Translational Input and Angular Displacement of Pinch 1 Middle finger

## 5. Pinch 2

Pinch 2는 Pinch 1과 같이 엄지(Thumb)와 검지(Fore Finger) 두 개의 손가락을 사용하여 물건을 잡는 형태는 같으나 그 외의 나머지 손가락이 모두 굽혀진 형태를 취하고 있다. Fig. 4-14는 Pinch 2의 형태를 나타낸 것이고 시뮬레이션 한 결과 입력된 직선 변위와 이때 발생한 각변위의 데이터를 Table 4-6에 나타내었다. Fig. 4-15는 엄지(Thumb)의 입·출력의 그래프를 나타낸 것으로써 첫 번째 관절에서 1.7453mm의 직선 변위가 입력되었으며 20°의 각변위가 발생했다. Fig. 4-16은 검지(Fore Finger)의 직선 변위 및 각변위를 나타낸 그래프로써 첫 번째와 두 번째 관절에서 각각 50°의 각변위가 발생했으며 입력된 직선변위는 각각 4.3633mm로 나타났다. 또한 세 번째 관절에서는 0.8727mm의 직선변위가 입력되어 10°의 각변위가 발생하였다.

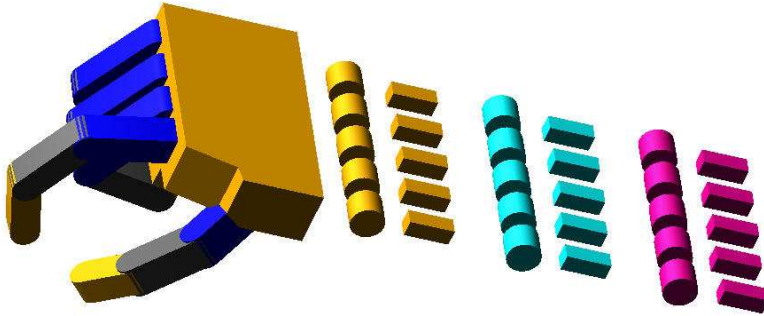
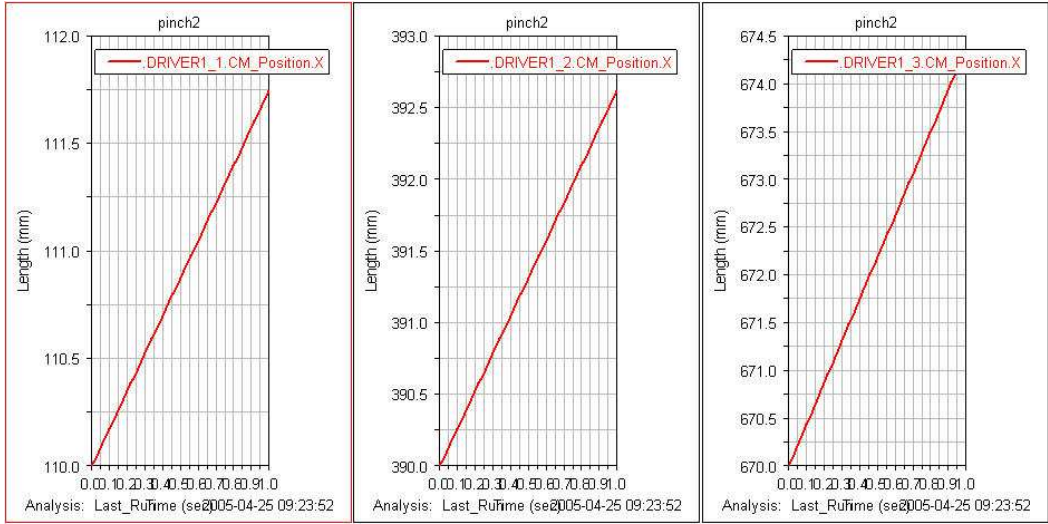


Fig. 4-14 Pinch 2

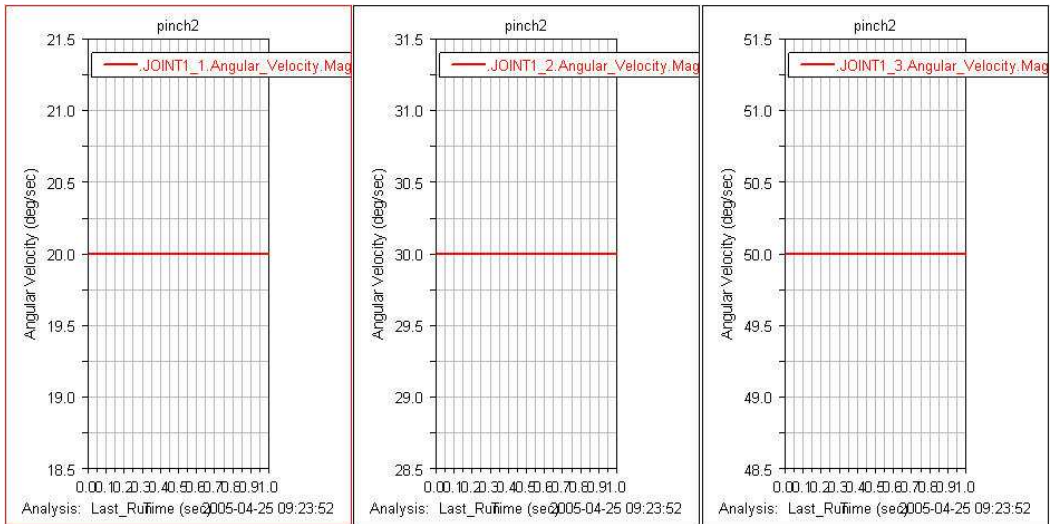
Table 4-6 Input and Output of Pinch 2

Pinch 2	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	20.0	30.0	50.0
	1.7453	2.618	4.3633
Fore finger	50.0	50.0	10.0
	4.3633	4.3633	0.8727
Middle finger	100.0	110.0	60.0
	8.7266	9.5993	5.236
Ring finger	100.0	110.0	60.0
	8.7266	9.5993	5.236
Little finger	100.0	110.0	60.0
	8.7266	9.5993	5.236



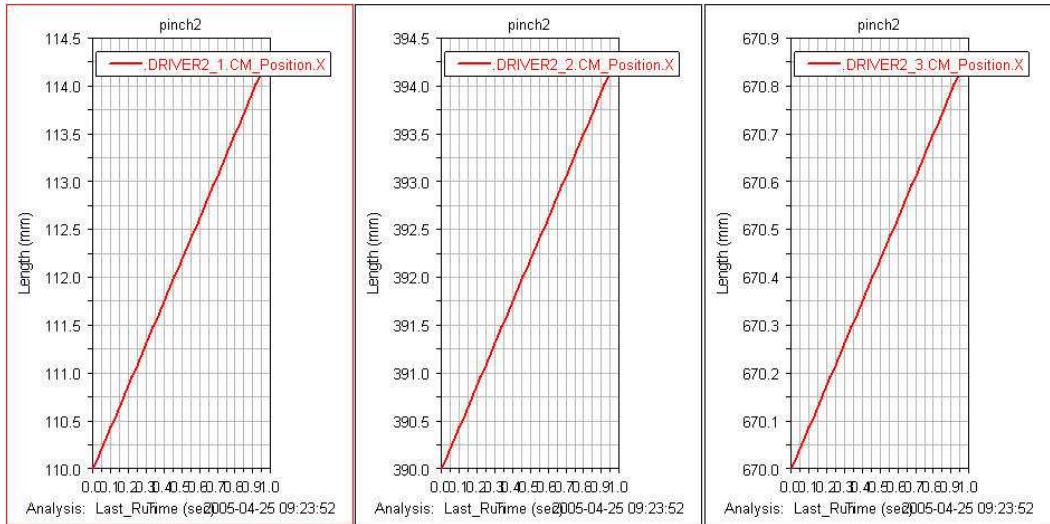


(a) Translational Input of Thumb

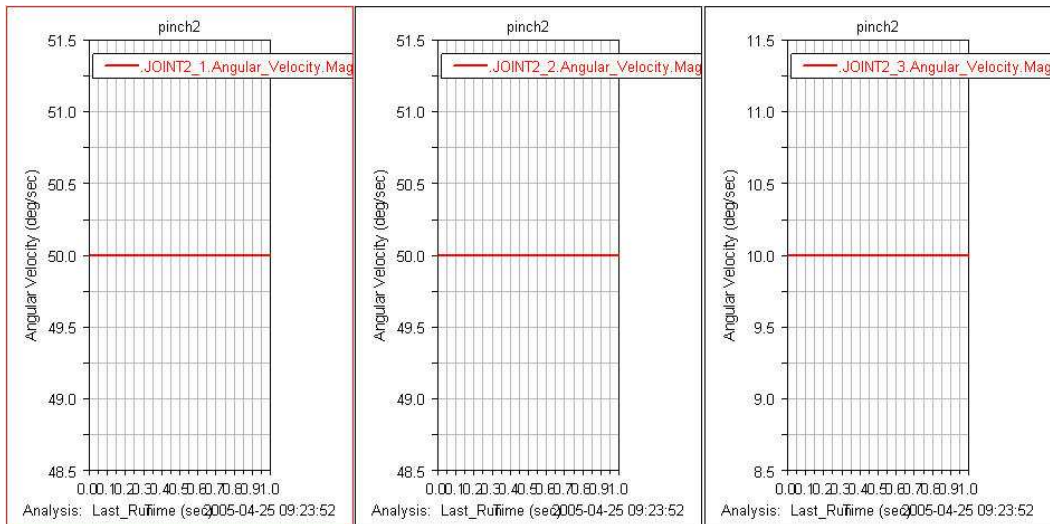


(b) Translational Input of Thumb

Fig. 4-15 Translational Input and Angular Displacement of Pinch 2 Thumb



(a) Translational Input of Fore Finger



(b) Translational Input of Fore Finger

Fig. 4-16 Translational Input and Angular Displacement of Pinch 2 Fore Finger

## 6. Pinch 3

로봇핸드가 세 손가락을 이용하여 물건을 집는 형태를 Fig. 4-17에 나타내었다. 이 때의 손가락 각 관절에 입력된 직선 변위와 출력된 각 변위를 Table 4-7에 나타내었고 중지(Middle Finger)의 입·출력에 대한 그래프를 Fig. 4-18에 나타내었다. Fig. 4-19는 약지(Ring Finger)의 직선 변위와 각변위를 나타낸 것으로써 첫 번째 관절에서 8.7266mm의 직선 변위가 일어났을 때 100°의 각변위가 발생하였다. 또한 두 번째와 세 번째 관절에서 각각 9.5993mm, 5.236mm의 직선 변위가 입력되었을 때 110°와 60°의 출력 변위가 발생했음을 알 수 있다.

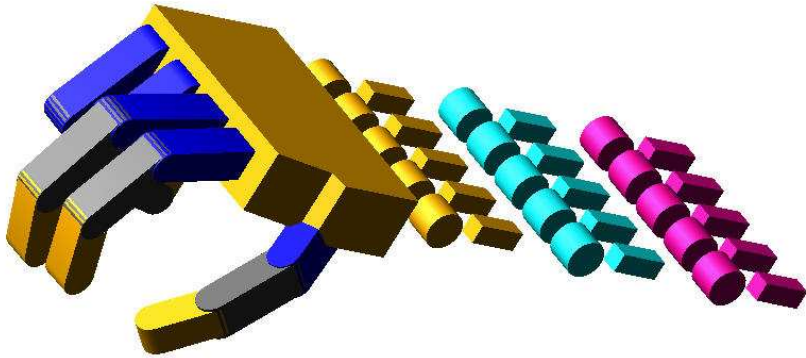
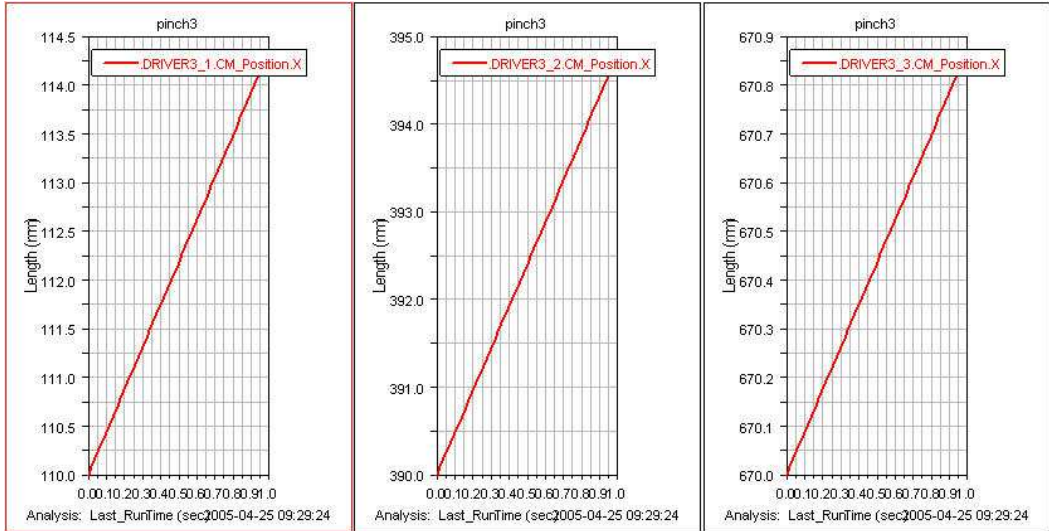


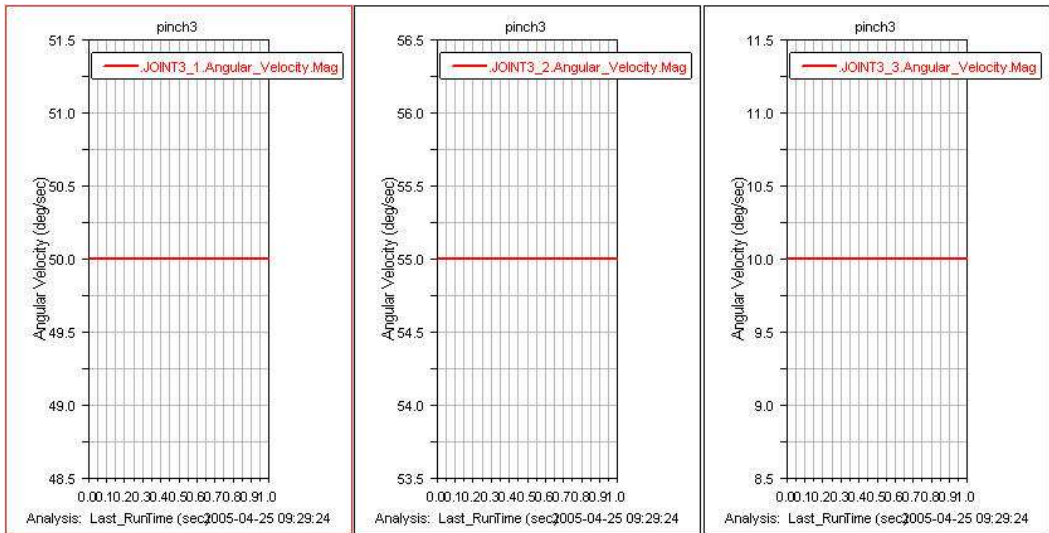
Fig. 4-17 Pinch 3

Table 4-7 Input and Output of Pinch 3

Pinch 3	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	20.0	30.0	50.0
	1.7453	2.618	4.3633
Fore finger	50.0	50.0	10.0
	4.3633	4.3633	0.8727
Middle finger	50.0	55.0	10.0
	4.3633	4.7997	0.8727
Ring finger	100.0	110.0	60.0
	8.7266	9.5993	5.236
Little finger	100.0	110.0	60.0
	8.7266	9.5993	5.236

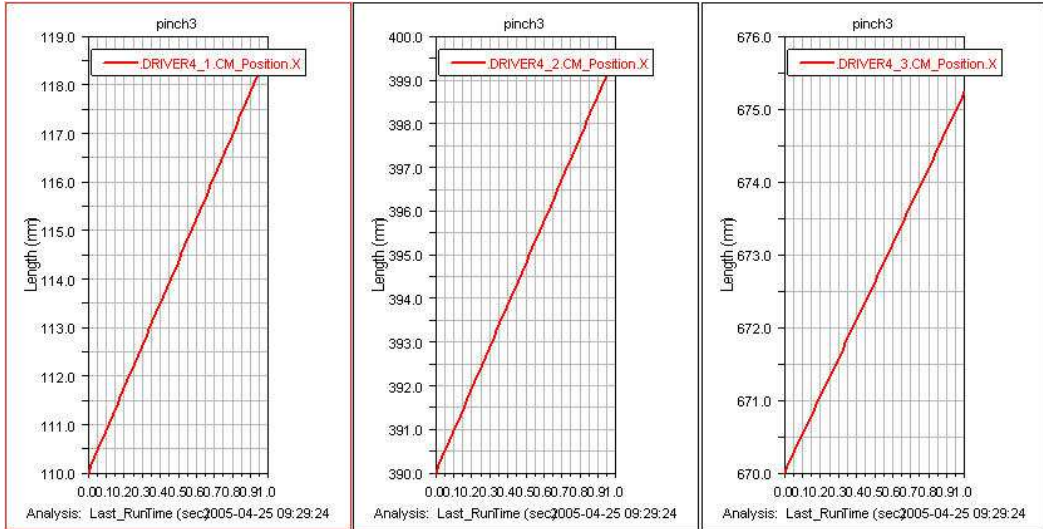


(a) Translational Input of Middle Finger

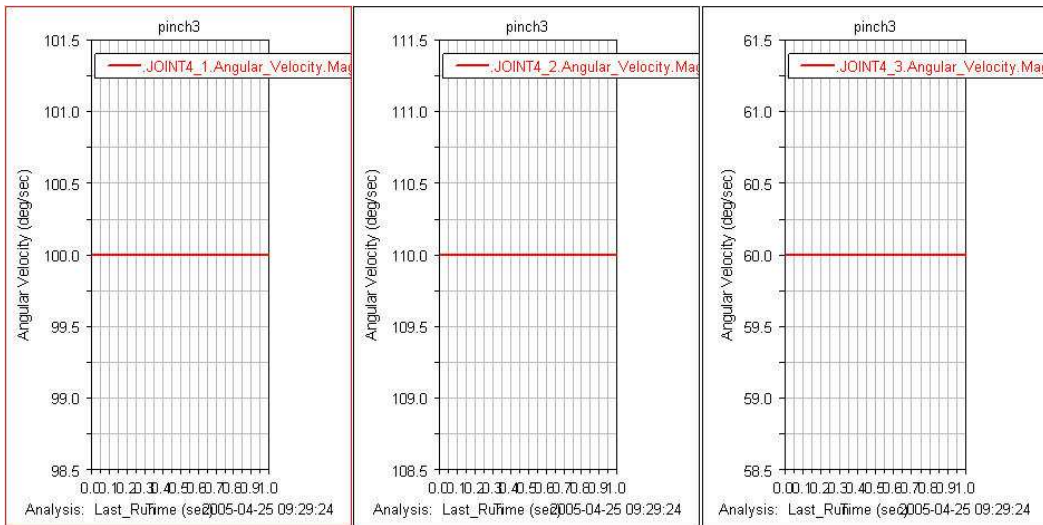


(b) Translational Input of Middle Finger

Fig. 4-18 Translational Input and Angular Displacement of Pinch 3 Middle finger



(a) Translational Input of Ring Finger



(b) Translational Input of Ring Finger

Fig. 4-19 Translational Input and Angular Displacement of Pinch 3 Ring finger

## 7. Point

로봇핸드가 사물을 가리키거나 지시하는 형태를 시뮬레이션 하여 Fig. 4-20에 나타내었다. 엄지(Thumb)와 검지(Fore Finger)는 약간의 각 변위가 일어났으며 그 외의 나머지 손가락에서는 큰 각변위가 발생하였다. 이때 발생한 입·출력의 데이터 값을 Table 4-8에 나타내었다. Fig. 4-21은 엄지(Thumb)에 대한 직선 변위 입력과 각변위를 그래프로 나타낸 것으로써 첫 번째, 두 번째 관절에서  $10^\circ$  그리고 세 번째 관절에서는  $50^\circ$ 의 각변위가 발생하였으며 이때 직선 변위는 각각 0.8727mm 와 4.3633mm 가 입력되었다. 또한 검지(Fore Finger)의 첫 번째, 두 번째 관절에서는 입력 변위와 출력 변위가 발생하지 않았고 세 번째 관절에서만  $10^\circ$ 의 각변위가 발생하였다. Fig. 4-22는 검지(Fore Finger)에 대한 입력 변위와 출력 변위를 나타낸 그래프이다.

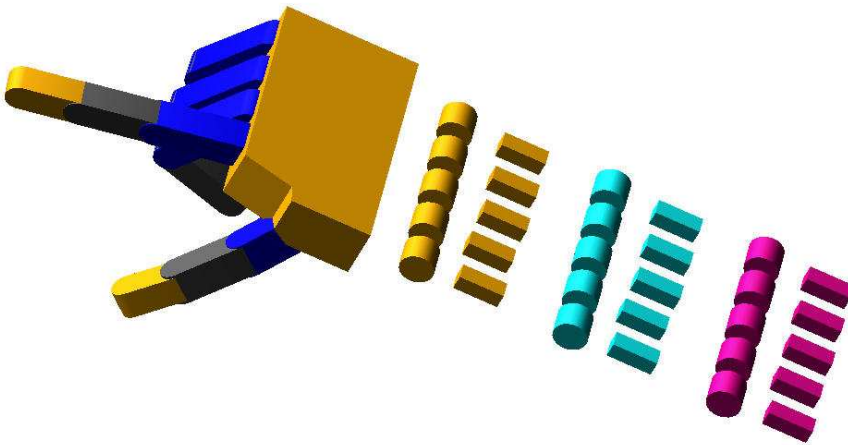
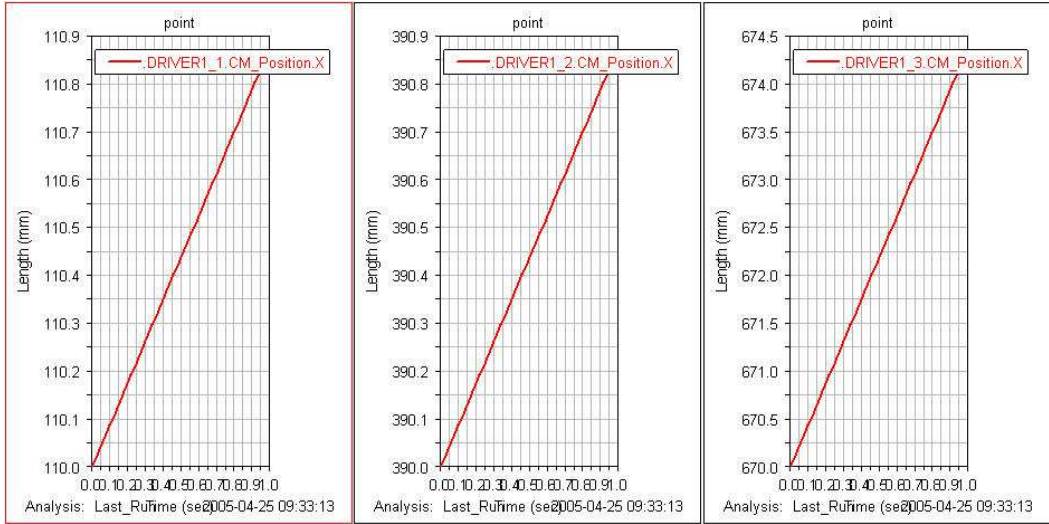


Fig. 4-20 Point

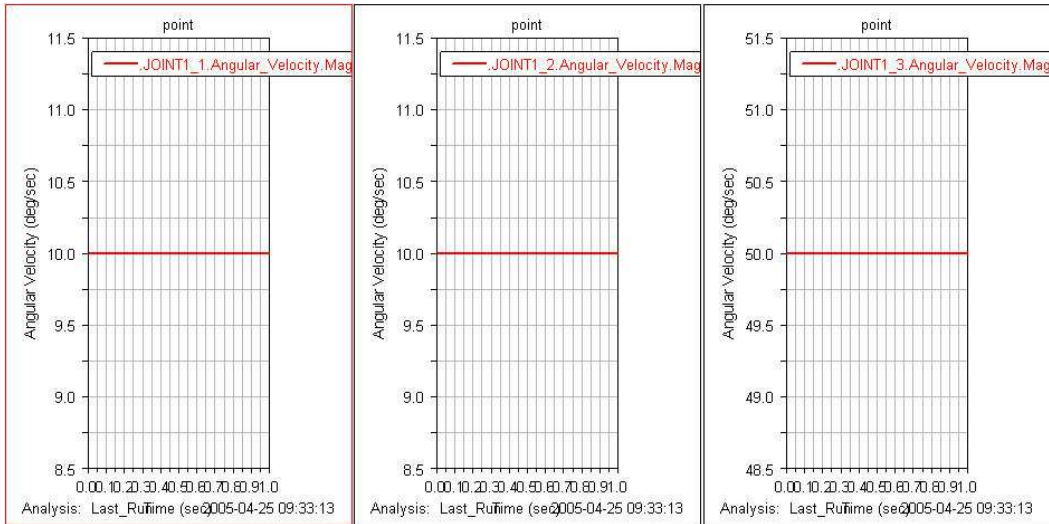
Table 4-8 Input and Output of Point

Point	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	10.0	10.0	50.0
	0.8727	0.8727	4.3633
Fore finger	0	0	10.0
	0	0	0.8727
Middle finger	100.0	100.0	60.0
	8.7266	8.7266	5.236
Ring finger	100.0	110.0	60.0
	8.7266	9.5993	5.236
Little finger	100.0	110.0	60.0
	8.7266	9.5993	5.236



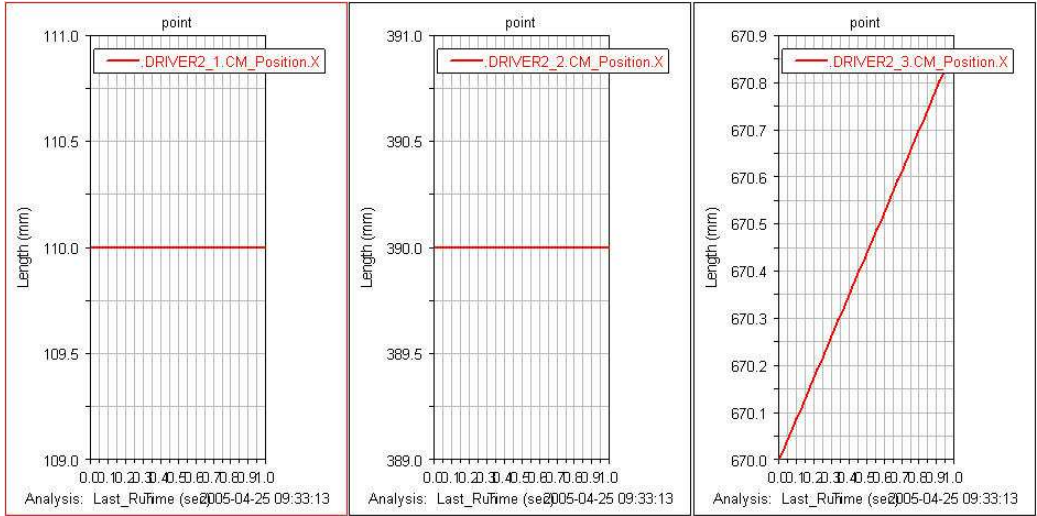


(a) Translational Input of Thumb

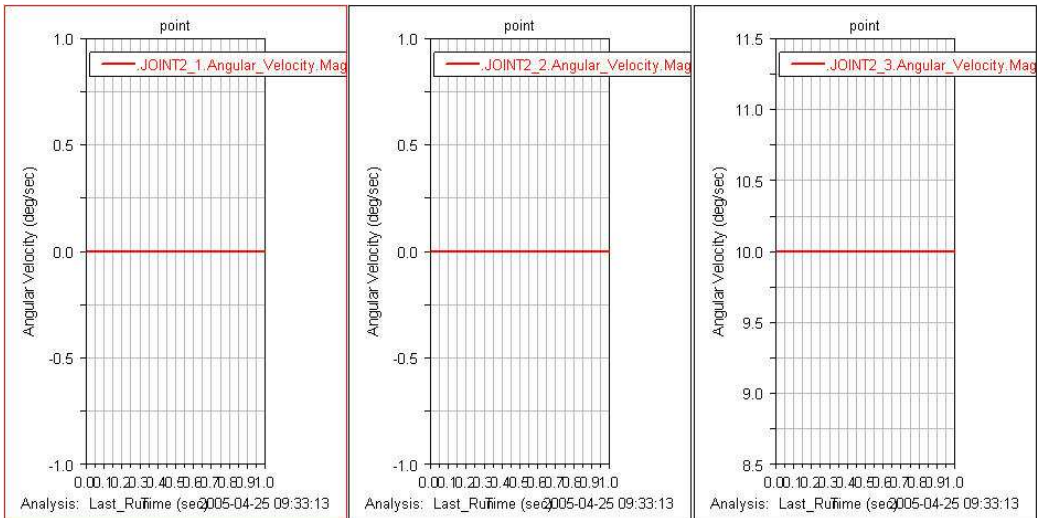


(b) Translational Input of Thumb

Fig. 4-21 Translational Input and Angular Displacement of Point Thumb



(a) Translational Input of Fore Finger



(b) Translational Input of Fore Finger

Fig. 4-22 Translational Input and Angular Displacement of Point Fore Finger

## 8. Envelope

Fig. 4-23은 로봇핸드가 어떤 물체를 가볍게 감싸는 동작의 모습을 보여준다. 이 형태에서는 손가락 각 관절에서 비슷한 크기의 각변위가 발생하였다. Table 4-9는 Envelope의 손가락 형태에 따른 각변위와 이때 입력된 직선 변위를 나타낸 것이고 Fig. 4-24는 약지(Ring Finger)의 입·출력 관계를 나타낸 그래프로써 첫 번째 관절에서 10°, 두 번째와 세 번째 관절에서 각각 30°의 각변위가 발생하였으며 입력된 직선 변위는 각각 0.8727mm와 2.618mm로 나타났다. Fig. 4-25는 소지(Little Finger)에 대한 입력 변위와 출력 변위의 그래프를 나타낸 것이다.

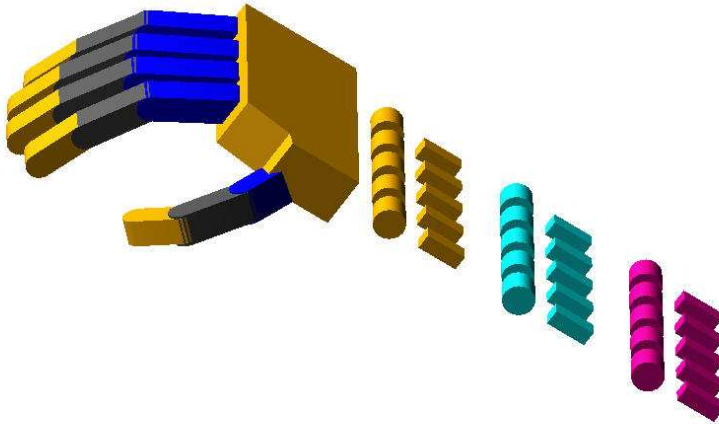
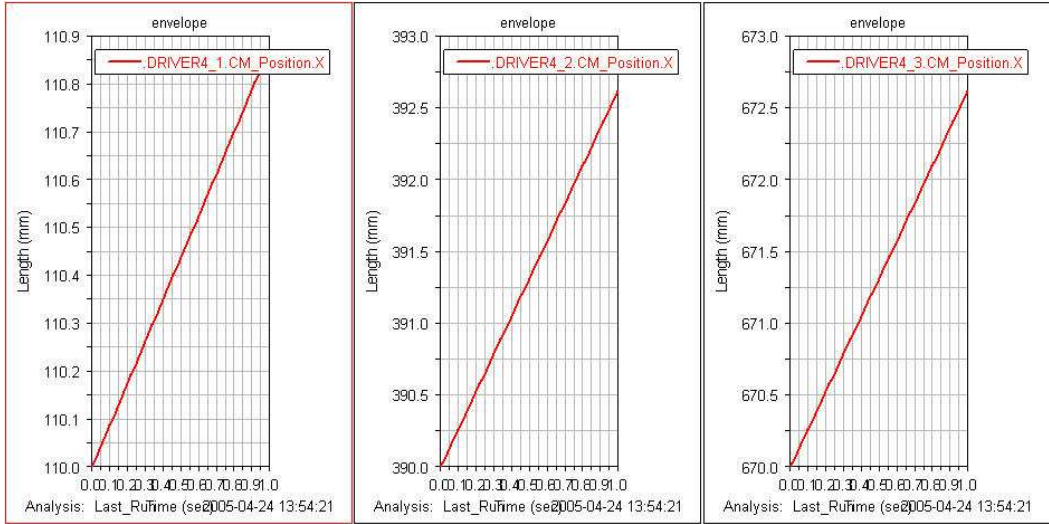


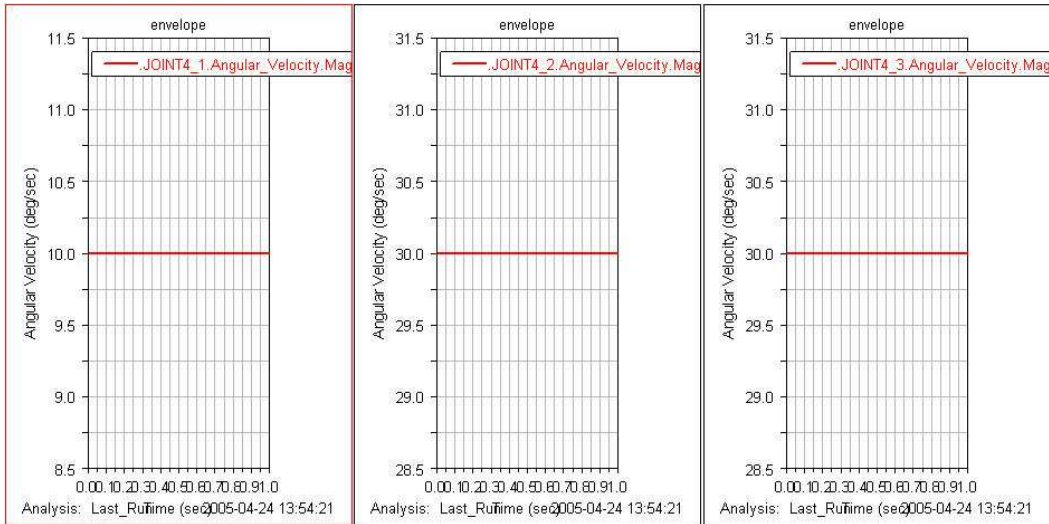
Fig. 4-23 Envelope

Table 4-9 Input and Output of Envelope

Envelope	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	40.0	20.0	40.0
	3.4907	1.7453	3.4907
Fore finger	10.0	30.0	30.0
	0.8727	2.618	2.618
Middle finger	10.0	30.0	30.0
	0.8727	2.618	2.618
Ring finger	10.0	30.0	30.0
	0.8727	2.618	2.618
Little finger	10.0	30.0	30.0
	0.8727	2.618	2.618

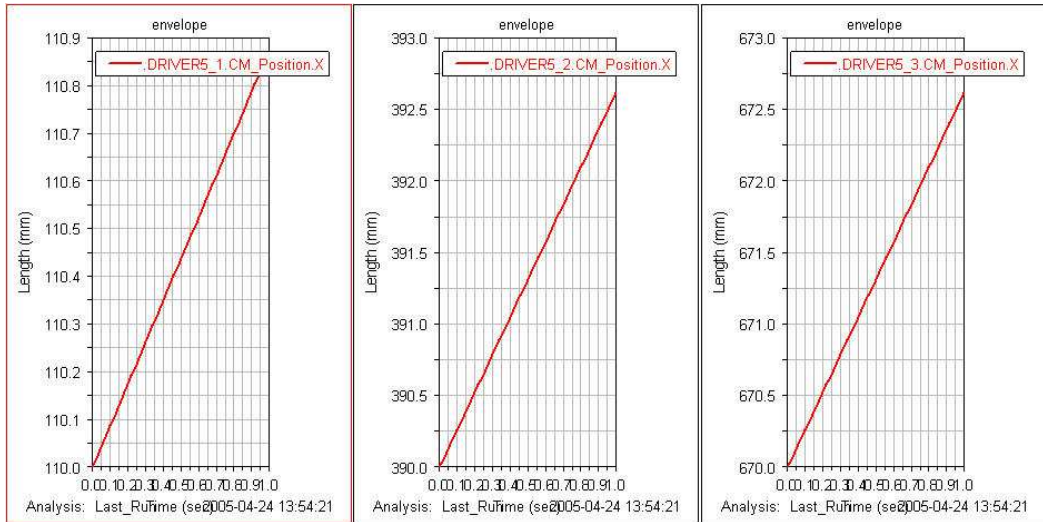


(a) Translational Input of Ring Finger

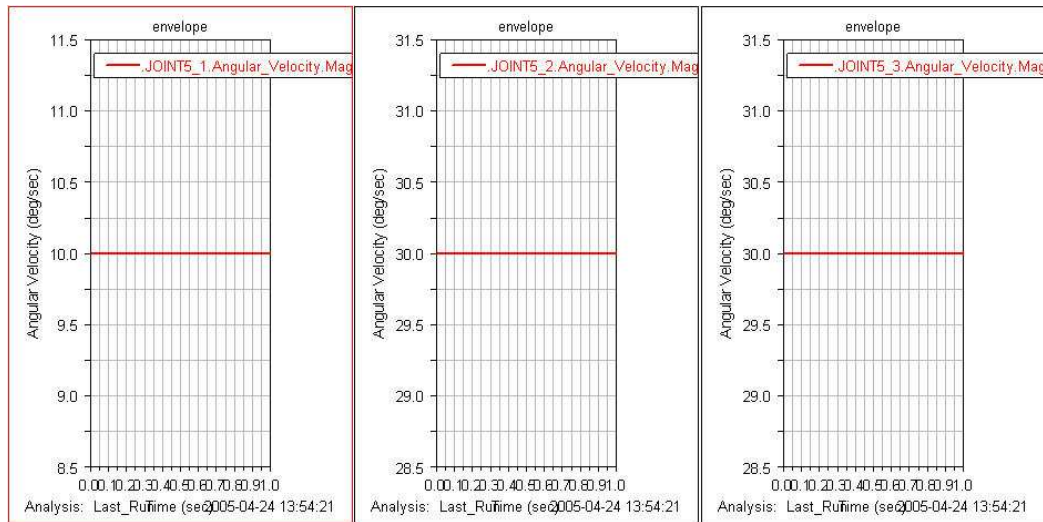


(b) Translational Input of Ring Finger

Fig. 4-24 Translational Input and Angular Displacement of Envelope Ring finger



(a) Translational Input of Little Finger



(b) Translational Input of Little Finger

Fig. 4-25 Translational Input and Angular Displacement of Envelope Little finger

## 제 5 장 구간분할 바이너리 제어 특성

### 제 1 절 실험장치 구성 및 실험방법

로봇핸드가 사람의 손동작과 유사한 자연스러운 움직임을 하기 위해서는 구간분할 된 형상기억합금 와이어에서 직선변위가 구간별로 발생되어야 한다. 형상기억합금 와이어를 구간분할 할 열전소자를 선택함에 있어 형상기억합금의 변태온도 및 반응시간과 열전소자의 발열량 및 전원공급 장치와의 관계를 고려하여 선택하였다. 열전소자는 크기가 30mm×30mm×3.80mm이고 발열량은 33.2W 그리고 최대전압이 15.3V, 최대전류가 3.5A인 제품을 선택하였다. 선택된 열전소자의 전원 공급 장치로는 스위칭 모드 파워 서플라이(Switching Mode Power Supply, SMPS)를 사용하였으며 SMPS의 사양을 결정하기 위해 열전소자가 형상기억합금의 변태온도인 70°C에 도달하는 시간과 이 때 전류와 전압의 관계를 알아보기 위해 적외선 온도 센서를 사용하여 실험하였다. 그 결과 6V-1A 일 때 전압과 전류가 가장 적절하였으며 이 때 형상기억합금의 변태온도인 70°C에 도달 하는데 걸린 시간은 약 18초 후였다. 또한 제어 부담을 줄이기 위해 열전소자를 병렬로 연결하고 6V-6A의 SMPS에 5개의 열전소자를 연결하였으며 일정한 전류와 전압을 공급하기 위하여 금속 산화막 반도체 전계효과 트랜지스터(Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET)소자를 사용하였다.

Fig. 5-1은 구간분할 바이너리 제어 특성을 알아보기 위하여 구성된 실험기구도이다. SMPS에서 출력된 전원은 MOSFET소자를 통하여 열전소자로 공급된다. 형상기억합금 와이어의 각 구간에서 발생하는 힘의 크기와 변위량을 측정하기 위하여 디지털 힘 센서(Digital Force Sensor)와 레이저 변위 센서(Laser Displacement Sensor)를 사용하였다. 디지털 힘 센서는 RS232 시리얼 포트를 이용하여 아날로그 출력 데이터를 직접 PC에 연결하여 디지털 신호로 변환하였다. 그리고 레이저 변위 센서는 아날로그 출력단 으로부터 나오는 전압을 오실로 스코프에서 측정하여 디지털 신호로 변환하여 구간별 발생하는 변위를 측정하였다.

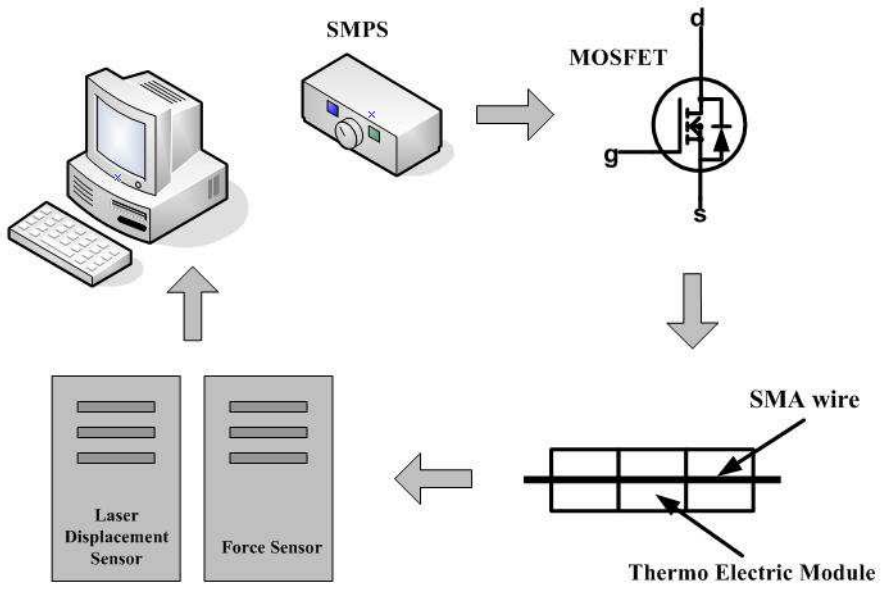


Fig. 5-1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus



## 제 2 절 형상기억합금 와이어의 구간별 힘 측정

로봇핸드의 액추에이터로 사용 될 형상기억합금 와이어의 각 구간별에서 발생하는 힘을 측정하였다. 로봇핸드의 손가락 각 관절의 힘은 곧 구간분할 된 형상기억합금 와이어에서 발생된 힘과 같다. 따라서 로봇핸드가 물건을 집을 때나 여러 가지 형태를 취할 때의 힘의 세기는 형상기억합금 와이어에서 발생된 힘과 같기 때문에 액추에이터의 사양을 결정하기 위하여 선경  $100\mu\text{m}$ 와  $150\mu\text{m}$ , 그리고  $375\mu\text{m}$ 의 형상기억합금 와이어에서 발생하는 힘을 구간별로 측정하였다. 측정 구간은 각각 1구간부터 5구간까지 측정하였다. 측정 시간은 형상기억합금 와이어의 변태온도  $70^{\circ}\text{C}$  에 도달하는 시간인 18초임을 고려하여 20초까지 열전소자에 전류를 인가하였으며 이후 전류를 차단하여 자연 냉각방식으로 냉각하여 힘의 변화량을 측정하였다. Fig. 5-1은 형상기억합금 와이어의 각 구간에서 발생하는 힘을 측정하기 위하여 5개의 열전소자를 나열하고 그 위에 형상기억합금 와이어의 한 쪽 끝을 고정하고 다른 한 쪽은 디지털 힘 센서(Digital Force Sensor)에 고정시켜 올려놓았다.

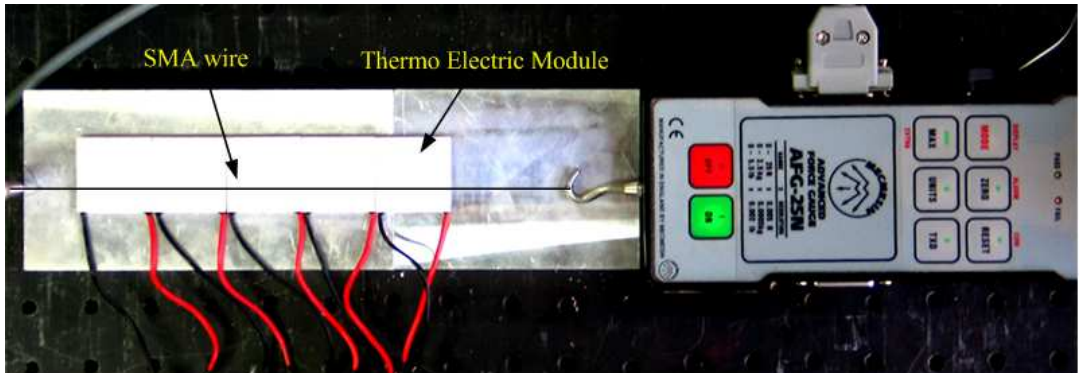


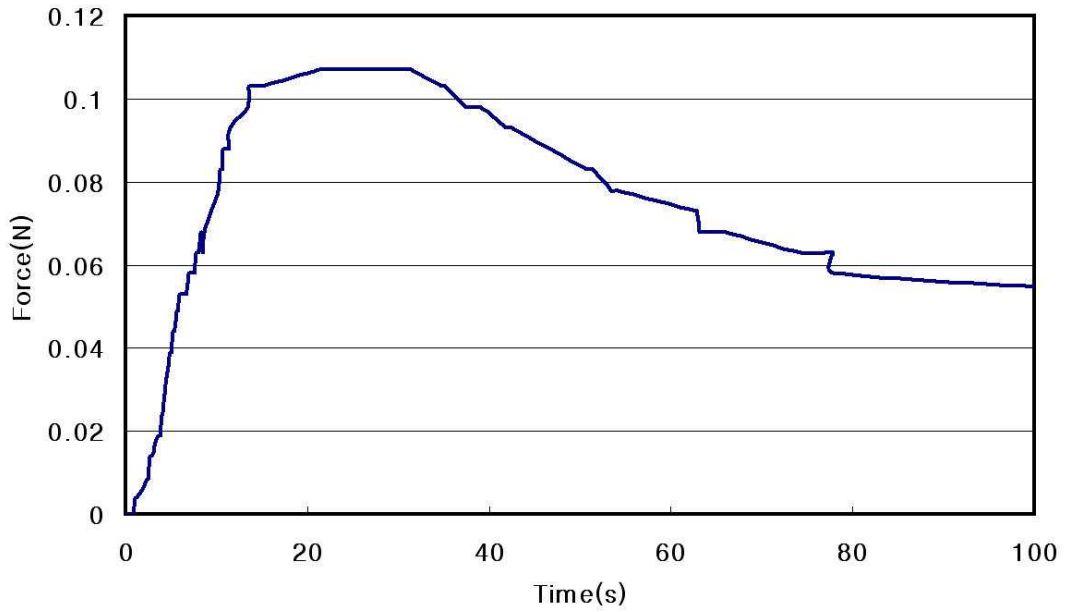
Fig. 5-2 Photo of Force Measurement Experiment

### 1. 형상기억합금 와이어 선경 $100\mu\text{m}$ 의 구간별 힘 측정

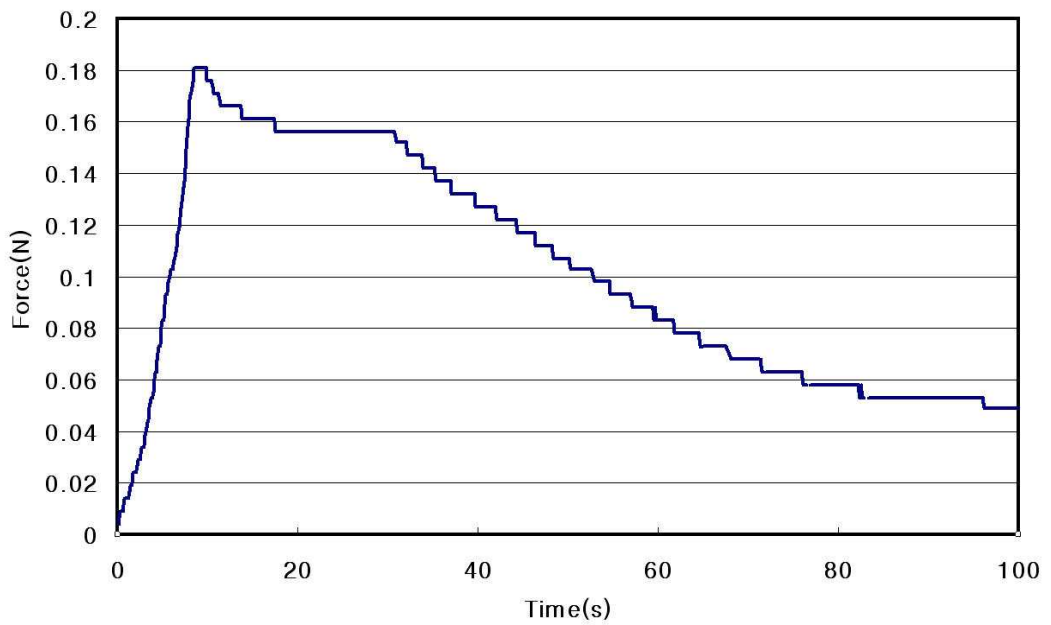
Fig. 5-3은 형상기억합금 와이어 선경 100 $\mu\text{m}$ 의 1구간부터 5구간까지 발생된 힘을 그래프로 나타낸 것이고 각 구간에서 발생된 최대 힘을 Table 5-1에 나타내었다. 5개 구간에서 발생된 최대 힘은 0.853N이며 이 때 발생된 힘의 특성을 보면 형상기억합금의 변태 온도인 70 $^{\circ}\text{C}$ 에 오르는 시간인 약 18초 까지 급격한 상승을 보이다가 전원을 차단하고 열전소자가 공기 중에 냉각되면서 완만한 기울기를 보이다가 형상기억합금 와이어가 원래의 길이로 회복하면서 힘이 줄어드는 것을 알 수 있다.

Table 5-1 Maximum Force of Segmented Diameter 100 $\mu\text{m}$  SAM wire

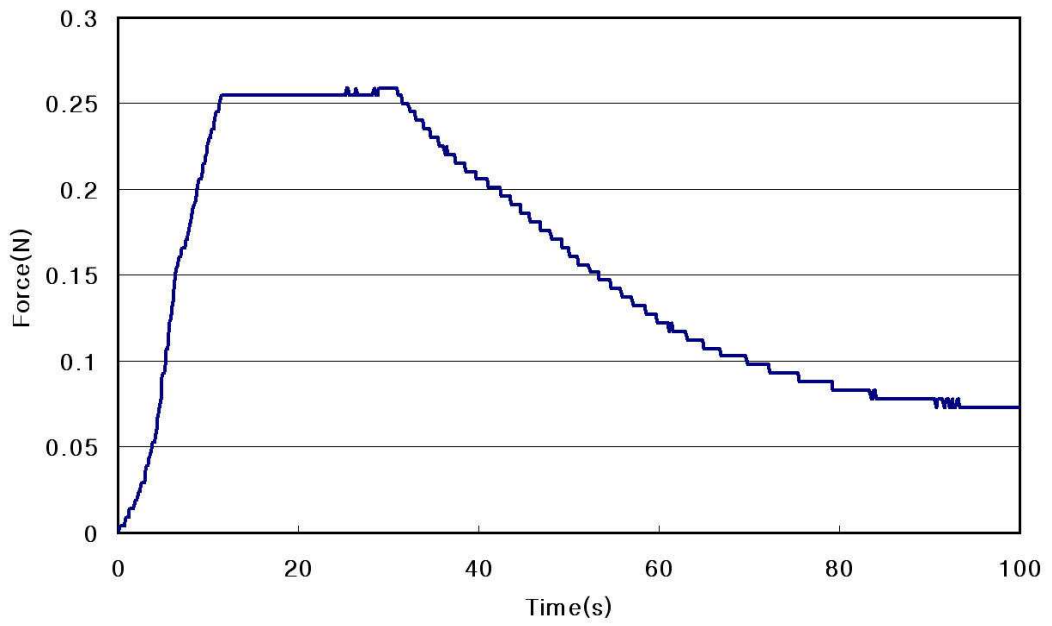
Segment No.	Max. Force(N)
1	0.107
2	0.181
3	0.235
4	0.5
5	0.853



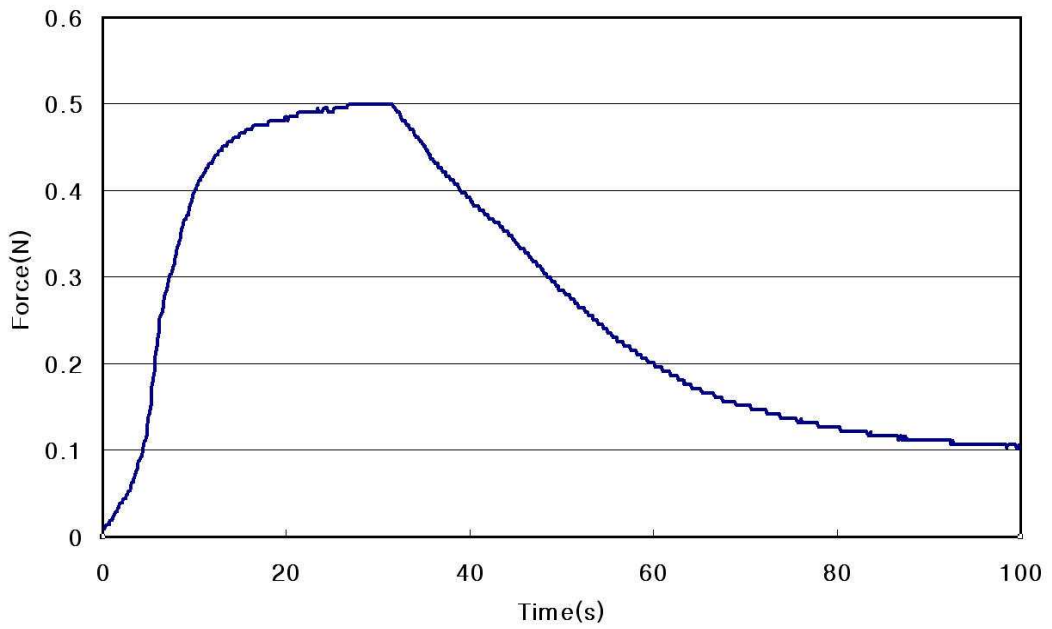
(a) 1-Segmented SMA wire



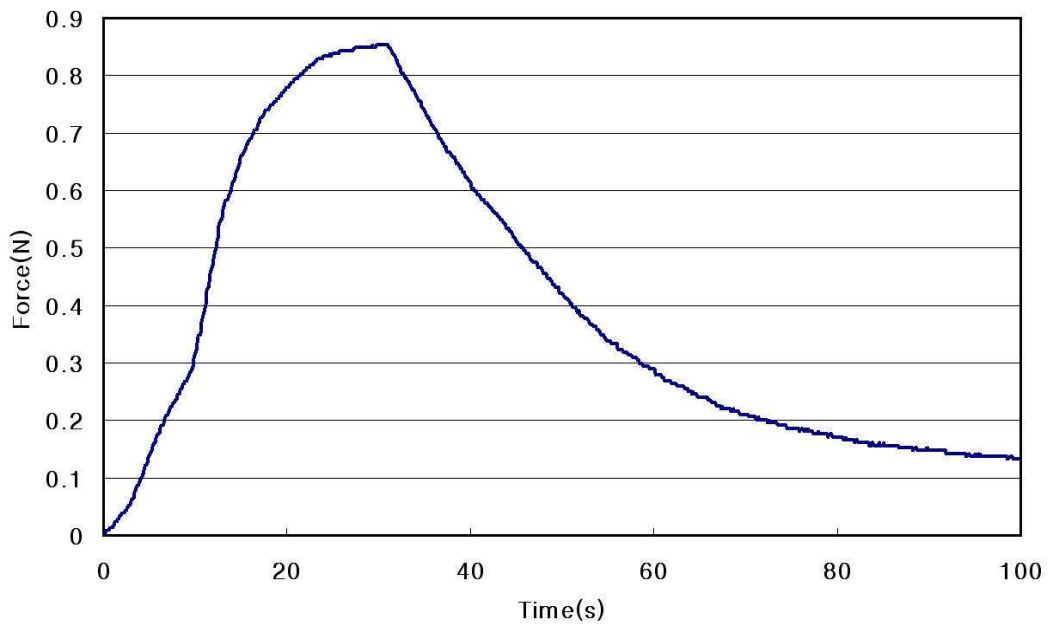
(b) 2-Segmented SMA wire



(c) 3-Segmented SMA wire



(d) 4-Segmented SMA wire



(e) 5-Segmented SMA wire

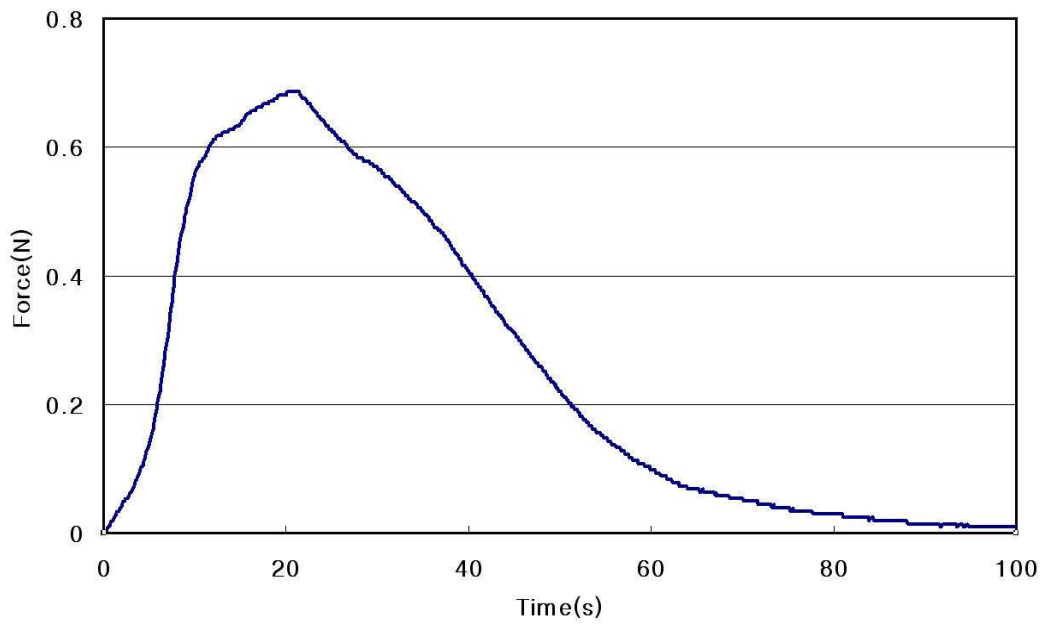
Fig. 5-3 Force Characteristics of Segmented Diameter 100 $\mu$ m SMA wire

## 2. 형상기억합금 와이어 선경 150 $\mu$ m의 구간별 힘 측정

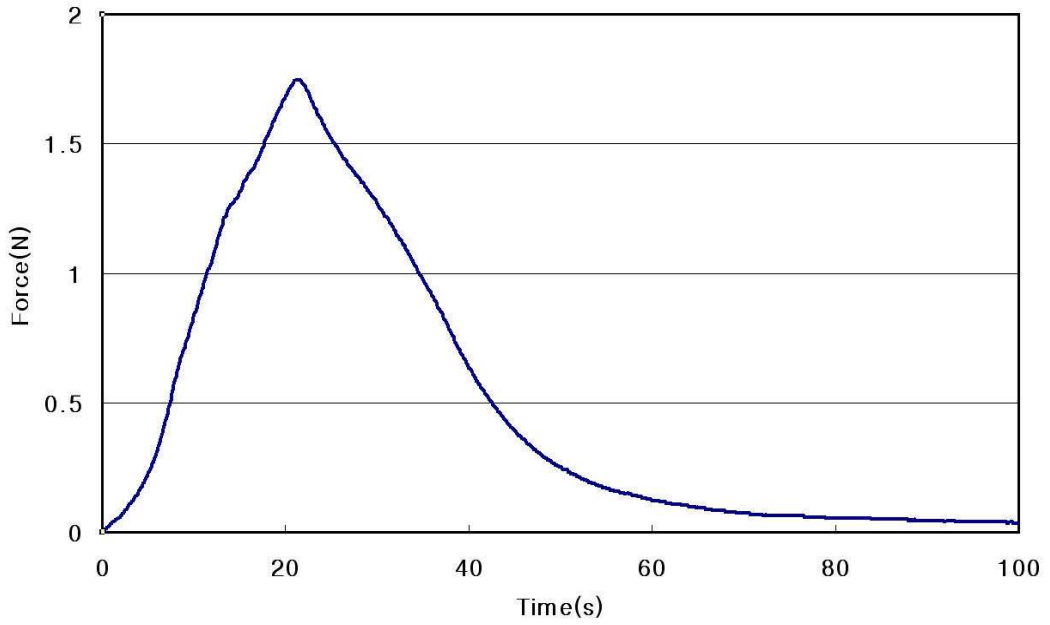
형상기억합금 와이어 선경 150 $\mu$ m의 1구간에서는 0.686N의 힘이 발생되었고 2구간에서는 1.746N, 그리고 3구간, 4구간, 5구간에서는 각각 2.011N, 2.138N, 2.156N의 힘이 발생하였다. Table 5-2에 1구간부터 5구간까지 발생된 힘을 나타내었고 Fig. 5-4는 형상기억합금 와이어 150 $\mu$ m에서 구간별로 발생된 힘을 그래프로 나타낸 것이다.

Table 5-2 Maximum Force of Segmented Diameter 150 $\mu$ m SAM wire

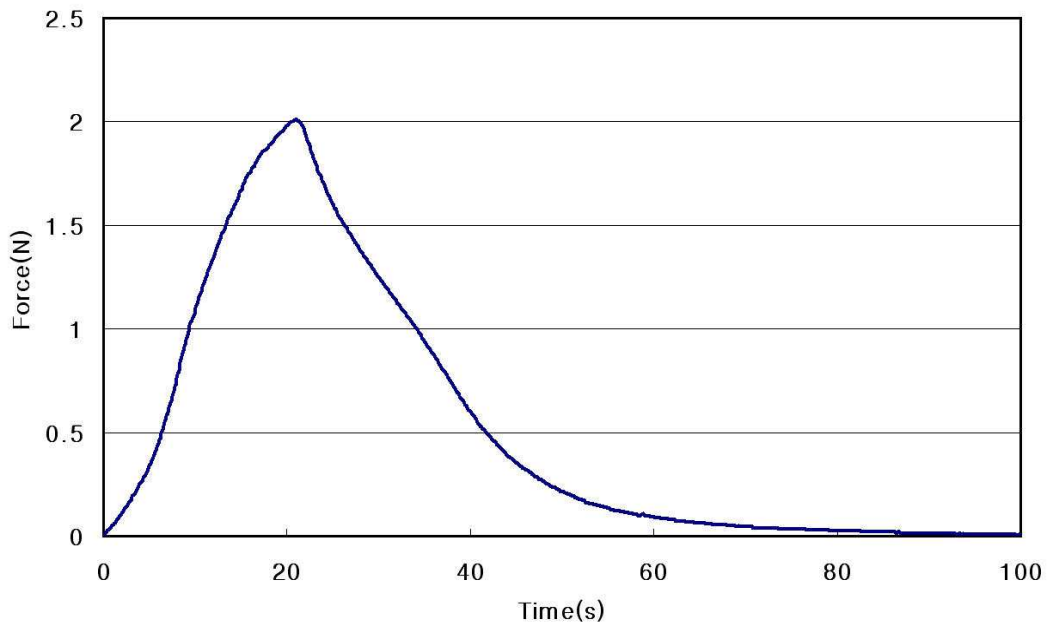
Segment No.	Max. Force(N)
1	0.686
2	1.746
3	2.011
4	2.138
5	2.156



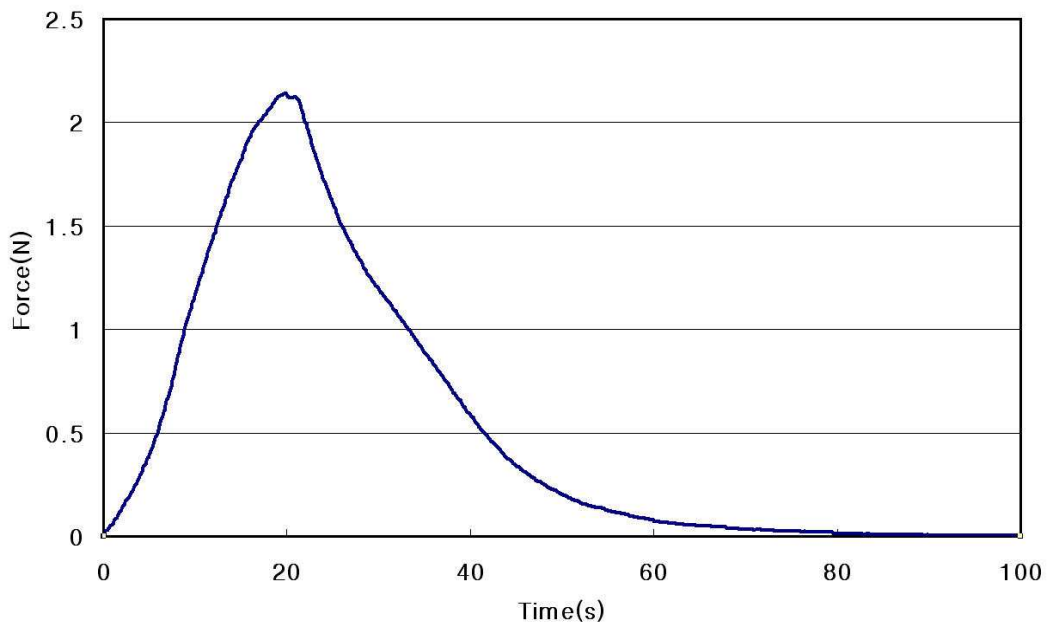
(a) 1-Segmented SMA wire



(b) 2-Segmented SMA wire

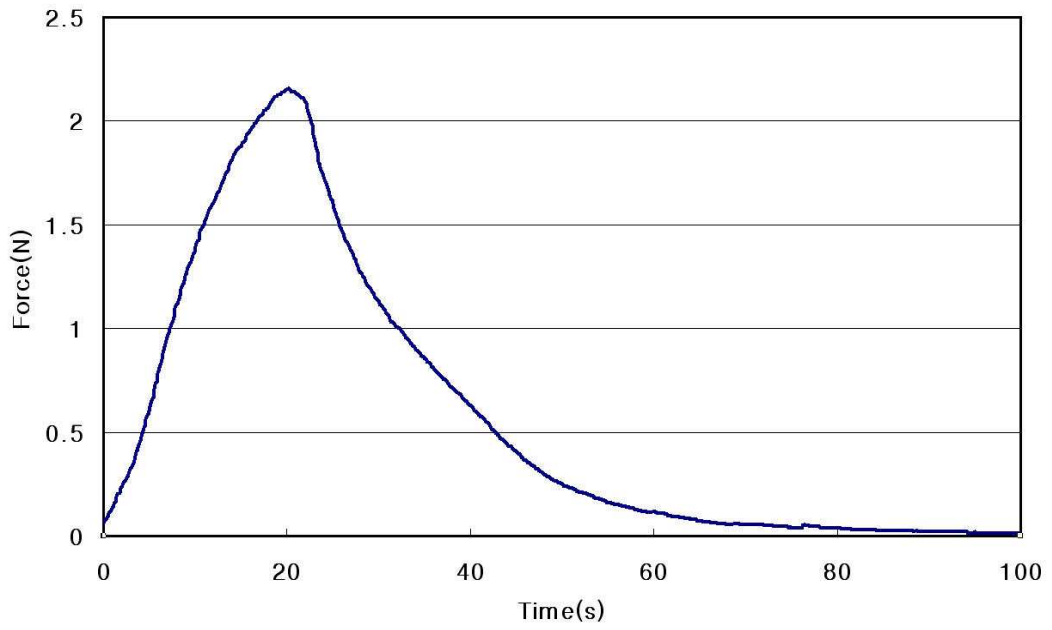


(c) 3-Segmented SMA wire



(d) 4-Segmented SMA wire





(e) 5-Segmented SMA wire

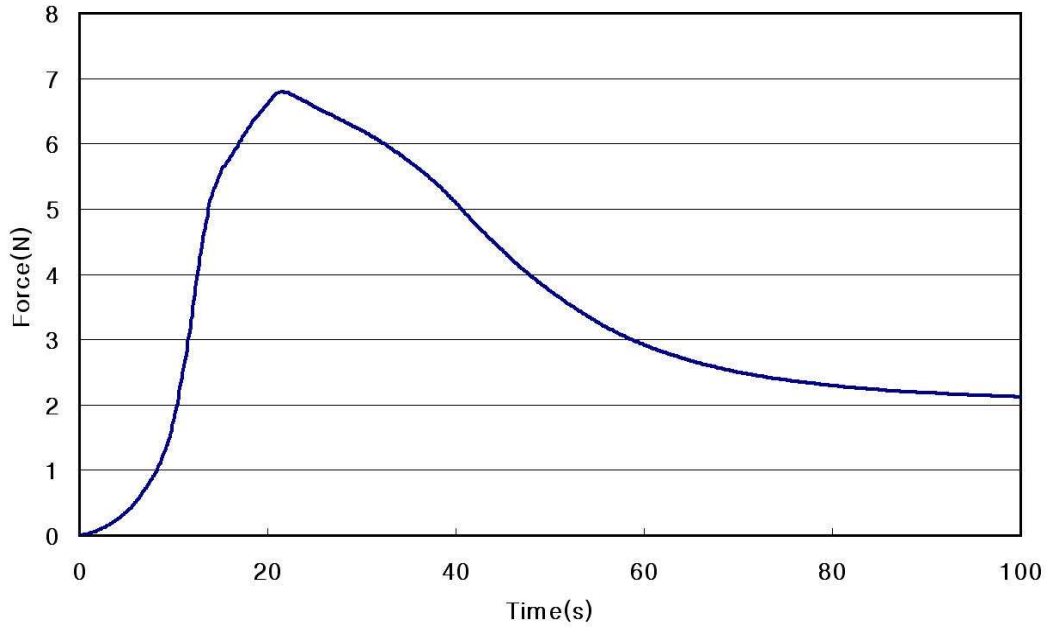
Fig. 5-4 Force Characteristics of Segmented Diameter 150 $\mu$ m SMA wire

### 3. 형상기억합금 와이어 선경 375 $\mu\text{m}$ 의 구간별 힘 측정

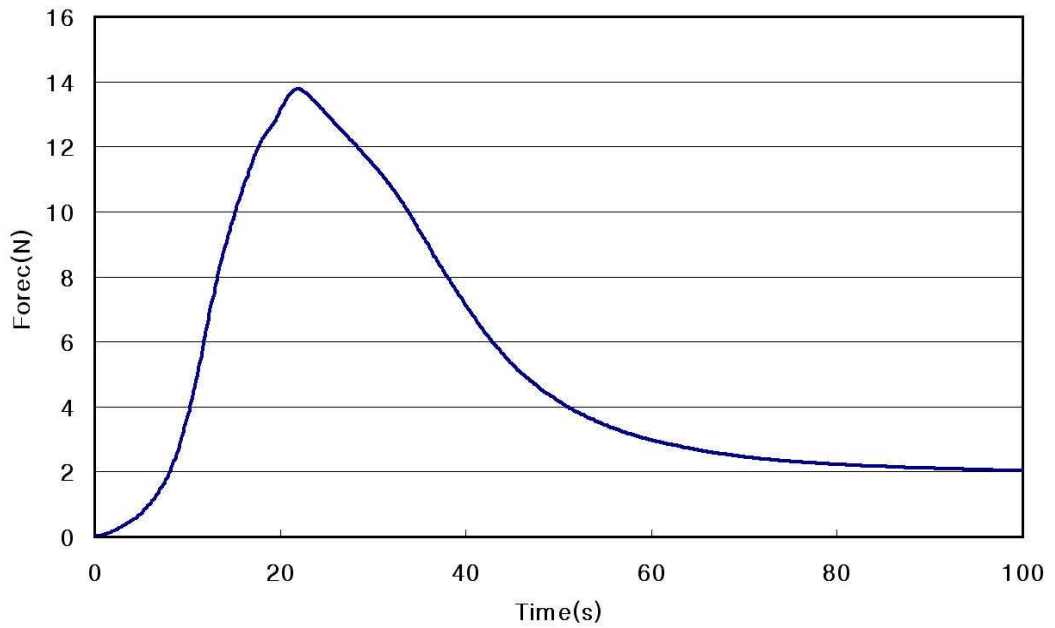
형상기억합금 와이어의 375 $\mu\text{m}$ 에서는 1구간에서 최대 6.794N의 힘이 발생되었으며 5구간에서 17.497N의 큰 힘이 발생되었다. Table 5-3은 1구간부터 5구간까지 발생한 힘을 나타내었으며 각 구간에서 발생된 힘의 그래프를 Fig. 5-5에 나타내었다.

Table 5-3 Maximum Force of Segmented Diameter 375 $\mu\text{m}$  SMA wire

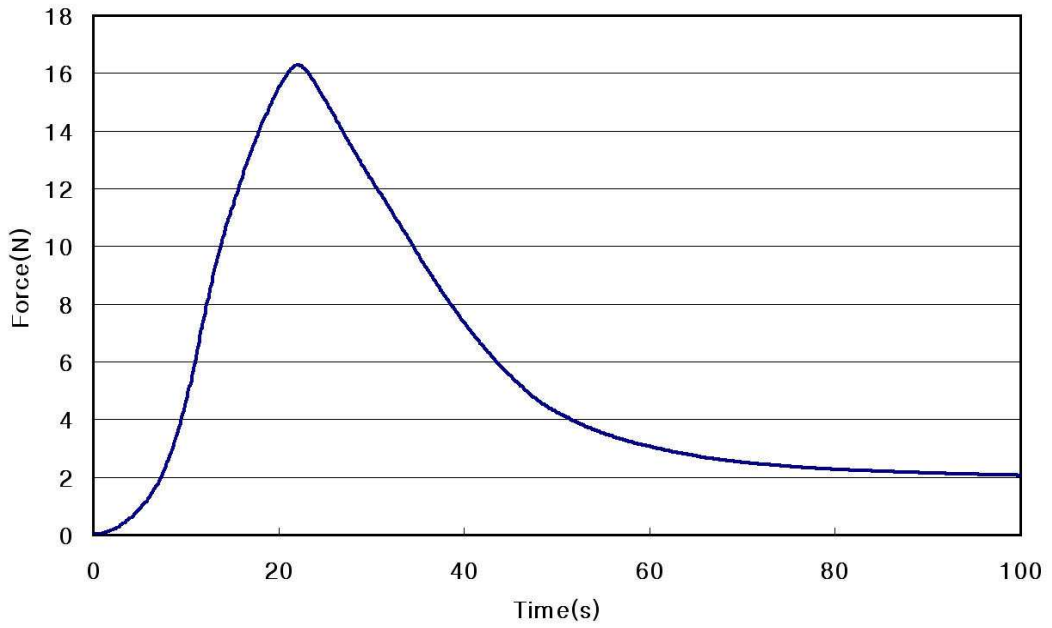
Segment No.	Max. Force(N)
1	6.794
2	13.784
3	16.281
4	17.036
5	17.497



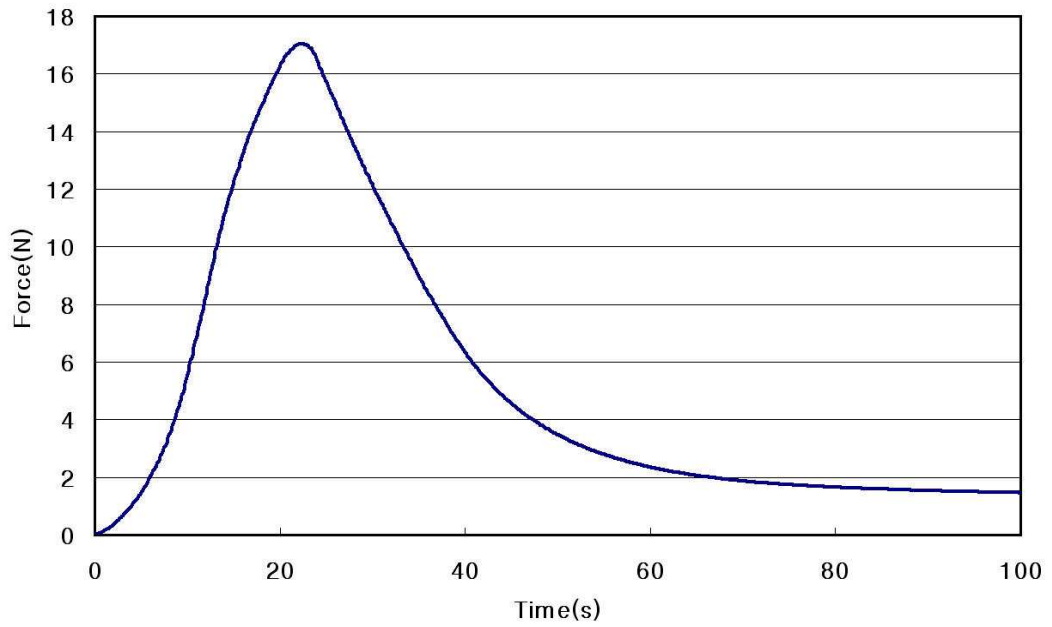
(a) 1-Segmented SMA wire



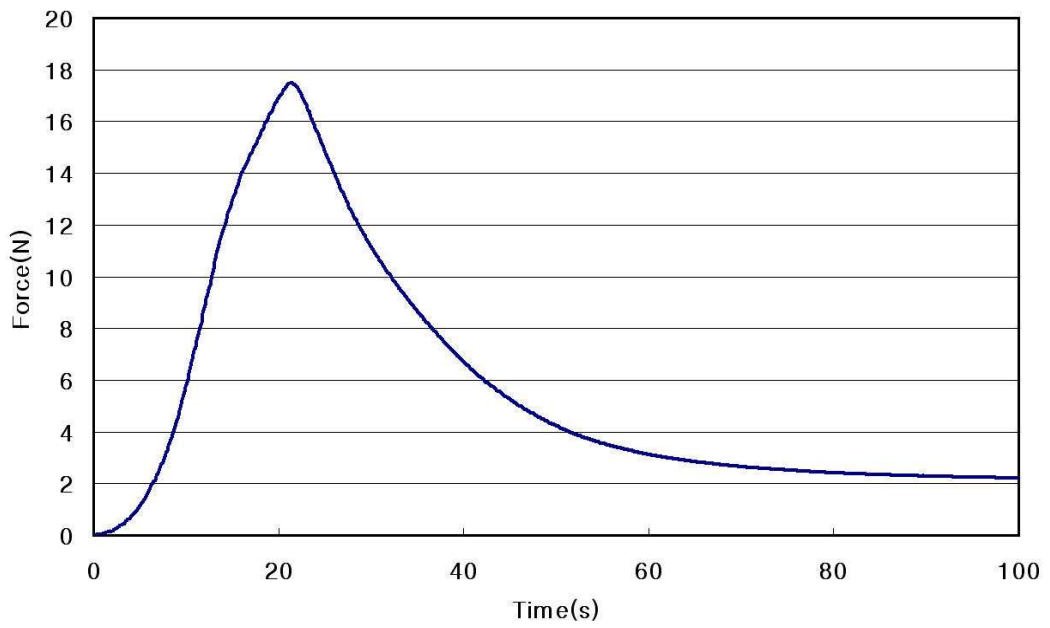
(b) 2-Segmented SMA wire



(c) 3-Segmented SMA wire



(d) 4-Segmented SMA wire



(e) 5-Segmented SMA wire

Fig. 5-5 Force Characteristics of Segmented Diameter  $375\mu\text{m}$  SMA wire

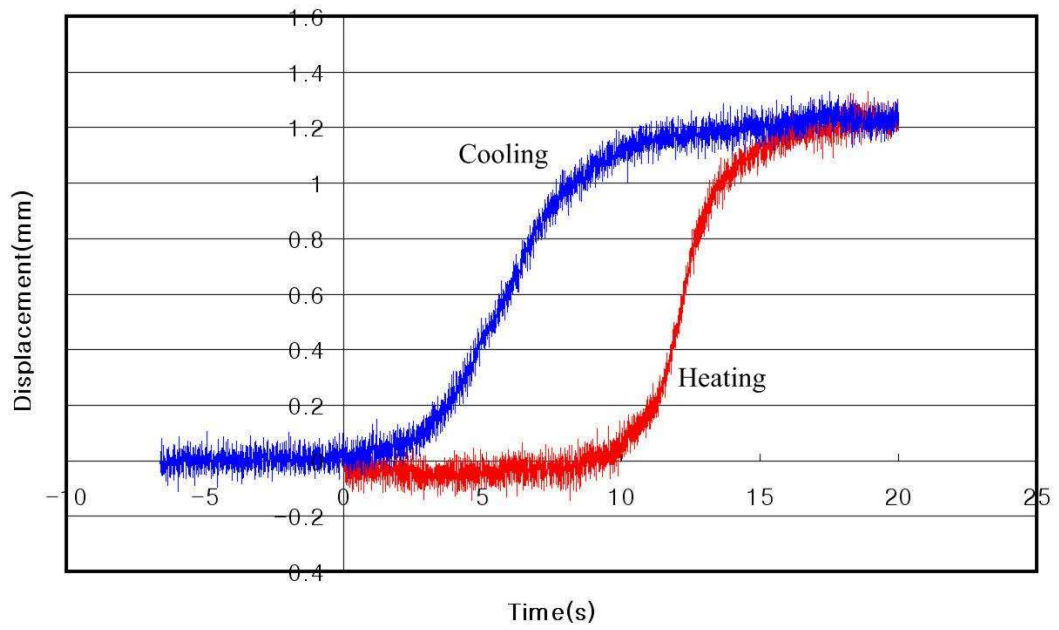
### 제 3 절 형상기억합금 와이어의 구간별 변위 측정

#### 1. 형상기억합금 와이어 선경 375 $\mu\text{m}$ 의 구간별 변위 측정

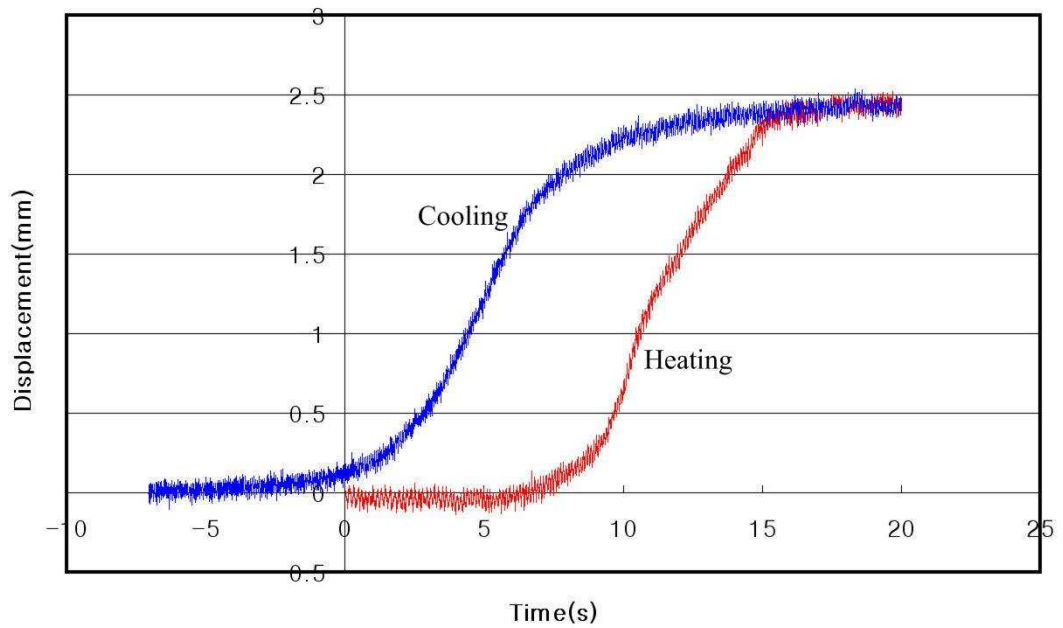
형상기억합금 와이어에서 발생된 변위는 풀리를 통해 손가락 각 관절의 회전축에 연결되어 로봇핸드의 각변위로 변환된다. 손가락 관절의 회전축과 연결된 형상기억합금 액츄에이터가 축에서 얼마만큼의 지점에 연결 되어 있느냐에 따라 형상기억합금 와이어의 힘과 입력될 변위의 관계가 달라진다. 형상기억합금 와이어에서 발생된 힘이 작을 경우 관절을 구동시키기 위해서는 축으로부터 수직거리가 길어져야 하기 때문에 형상기억합금 와이어의 제어부담이 커지기 마련이다. 따라서 본 절에서는 단위 길이 당 힘이 가장 큰 선경 375  $\mu\text{m}$ 의 형상기억합금 와이어의 변위를 1구간부터 10구간까지 측정하였다. Table 5-4는 각 구간에서 발생한 최대 변위를 나타낸 것이고 Fig. 5-6은 1구간부터 5구간까지, 그리고 Fig. 5-7은 6구간부터 10구간까지 시간에 따른 변위변화량을 나타낸 것이다.

Table 5-4 Maximum Displacement of Segmented Diameter 375 $\mu\text{m}$  SMA wire

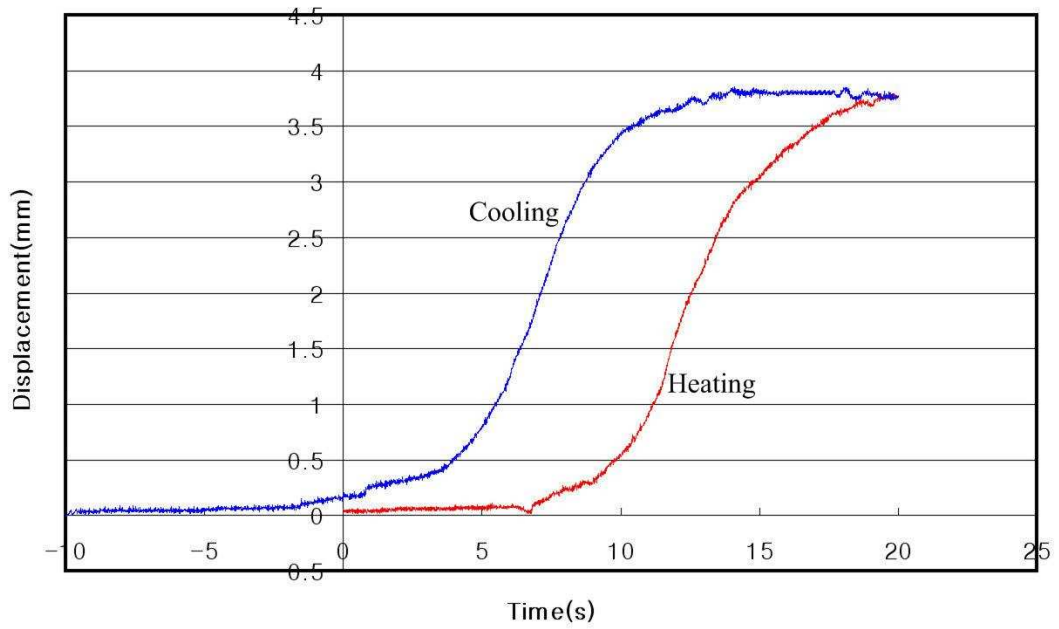
Segment No.	Max. Displacement(mm)
1	1.33
2	2.50
3	3.80
4	5.08
5	6.23
6	7.69
7	8.79
8	10.07
9	11.22
10	12.64



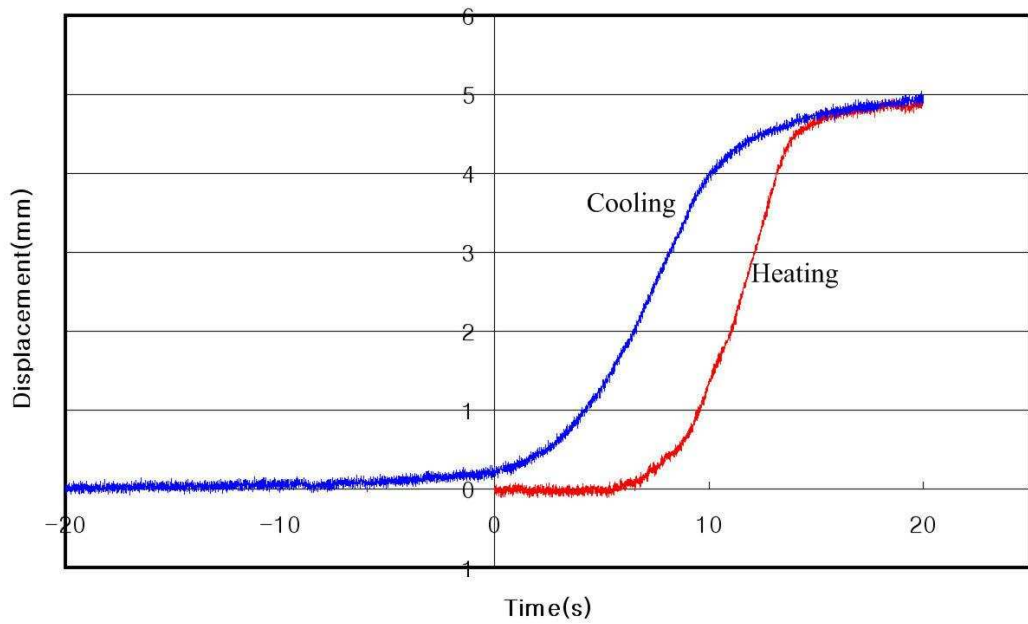
(a) 1-Segmented SMA wire



(b) 2-Segmented SMA wire

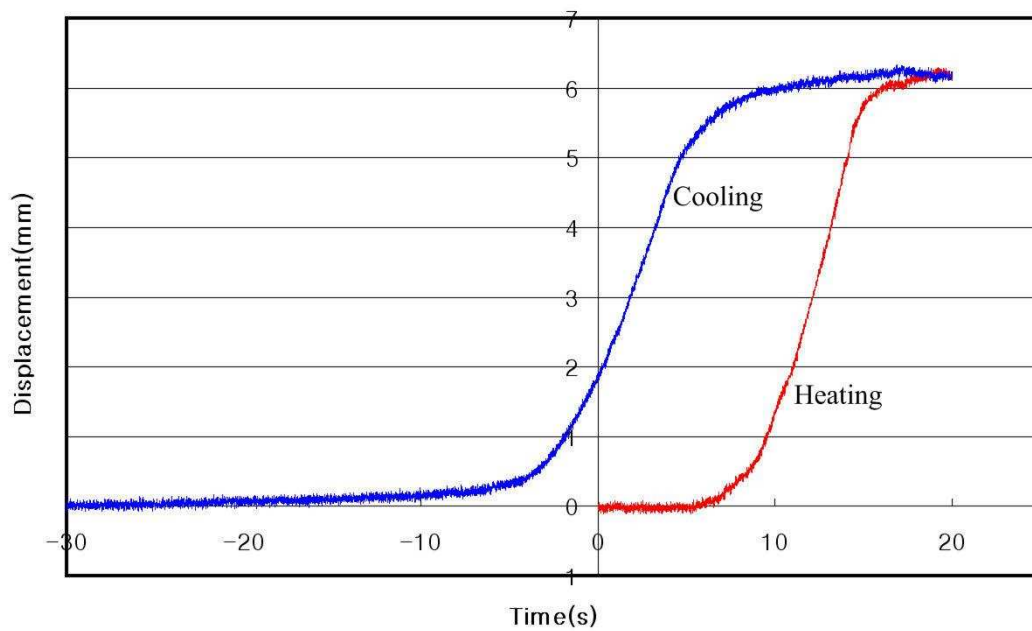


(c) 3-Segmented SMA wire



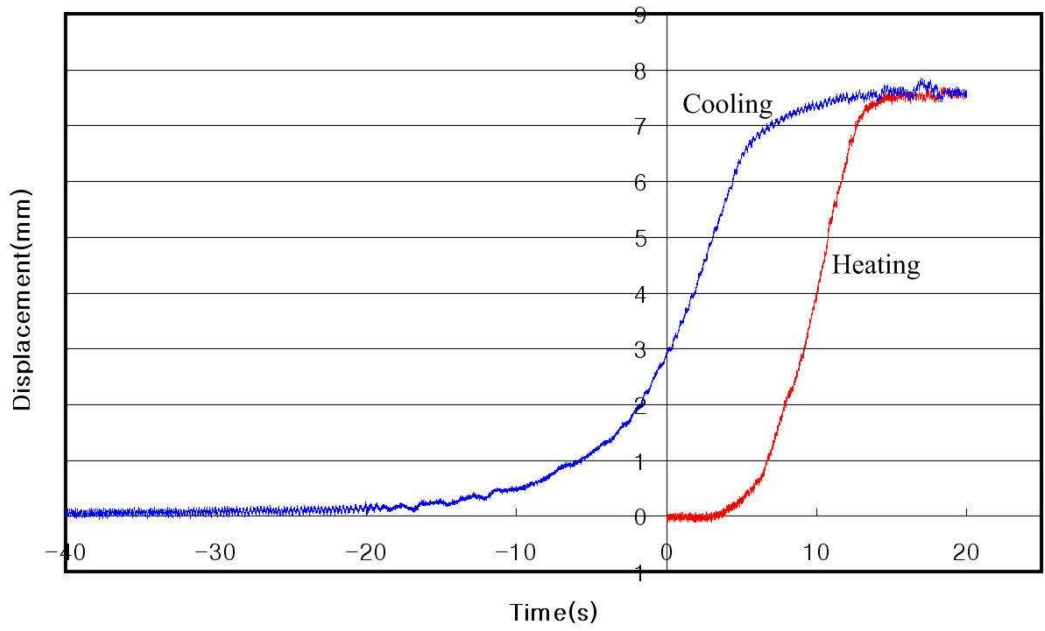
(d) 4-Segmented SMA wire



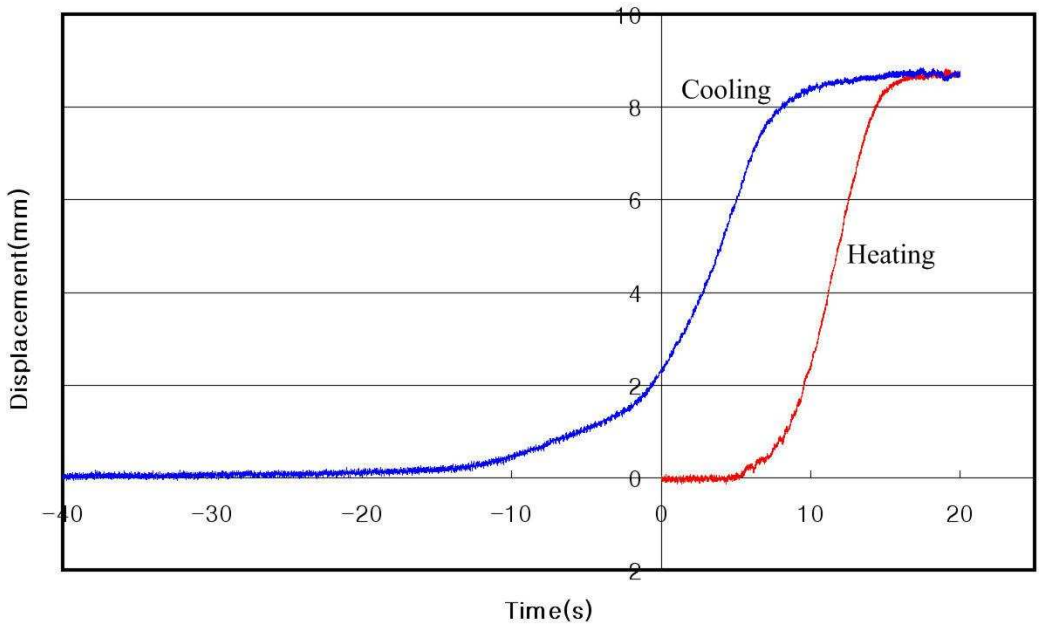


(e) 5-Segmented SMA wire

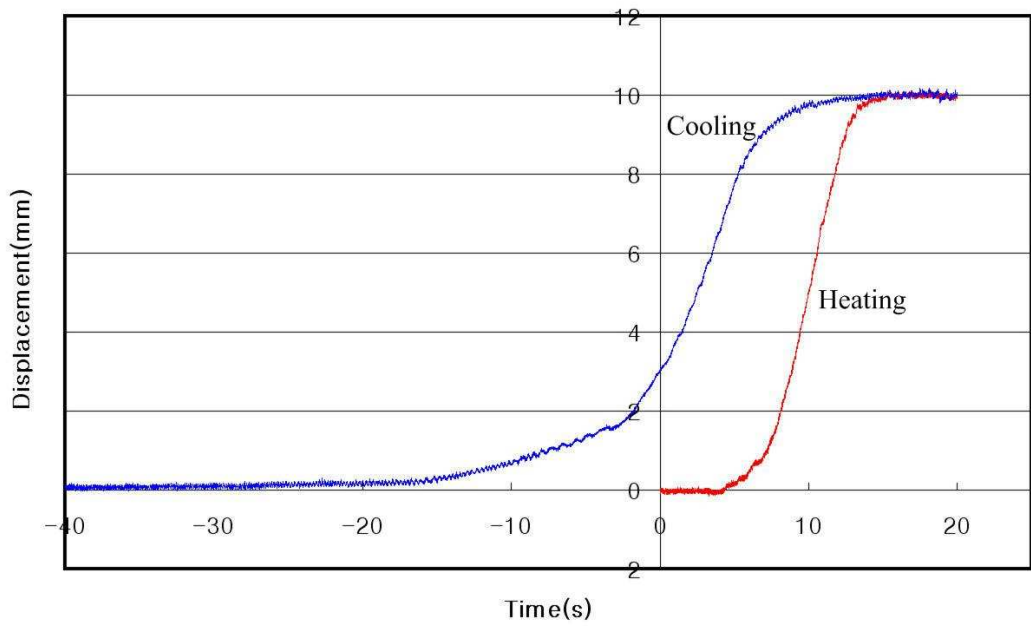
Fig. 5-6 Displacement Characteristics of Segmented Diameter  $375\mu\text{m}$  SMA wire (1~5)



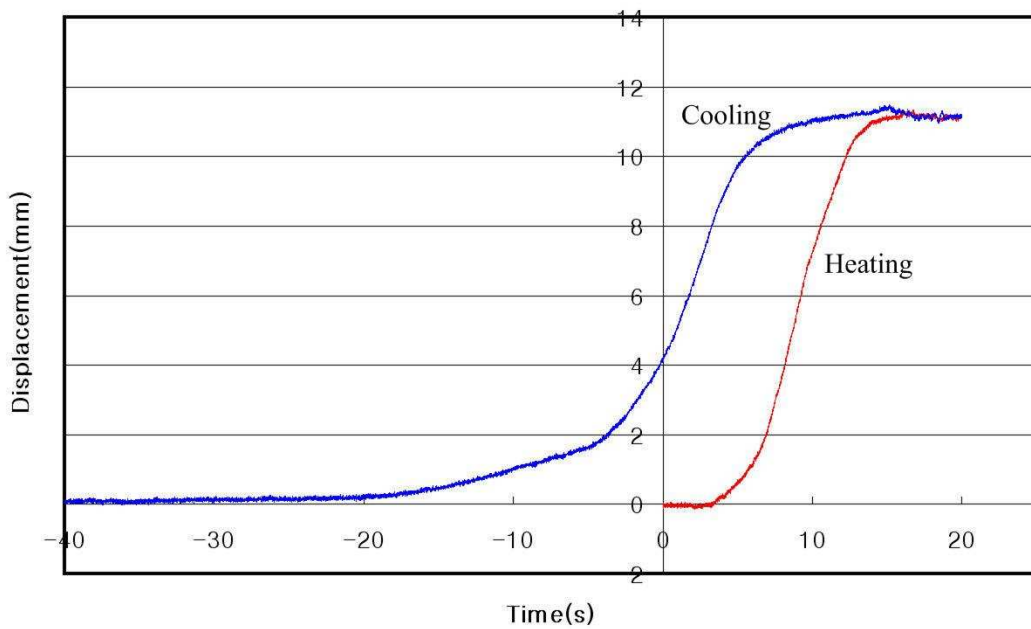
(a) 6-Segmented SMA wire



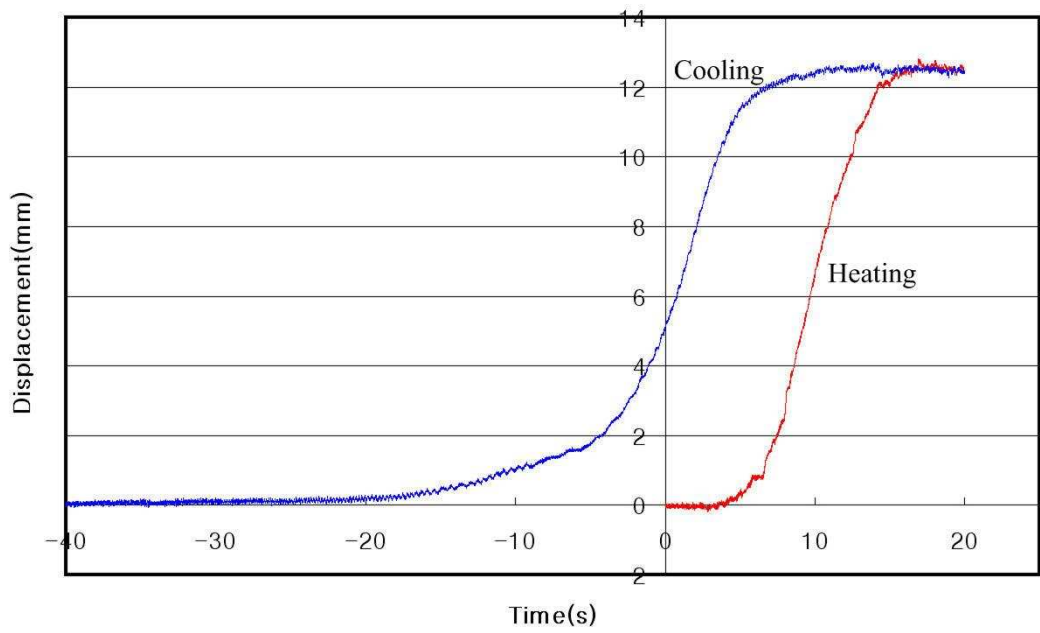
(b) 7-Segmented SMA wire



(c) 8-Segmented SMA wire



(d) 9-Segmented SMA wire



(e) 10-Segmented SMA wire

Fig. 5-7 Displacement Characteristics of Segmented Diameter 375 $\mu$ m SMA wire (6~10)

## 2. 형상기억합금 디지털 스텝모터

앞에서 형상기억합금 와이어에 구간별 입력 신호를 주어 각 구간에서 발생된 최대 변위를 측정하였다. Fig. 5-8은 각 구간에서 발생된 최대 변위를 그래프로 나타낸 것이다. 이 때 발생한 변위는 1구간부터 10구간까지 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 구간분할 바이너리 제어를 이용한 형상기억합금 와이어는 원하는 변위만큼의 제어가 가능한 디지털 형상기억합금 스텝모터의 역할이 가능함을 알 수 있다.

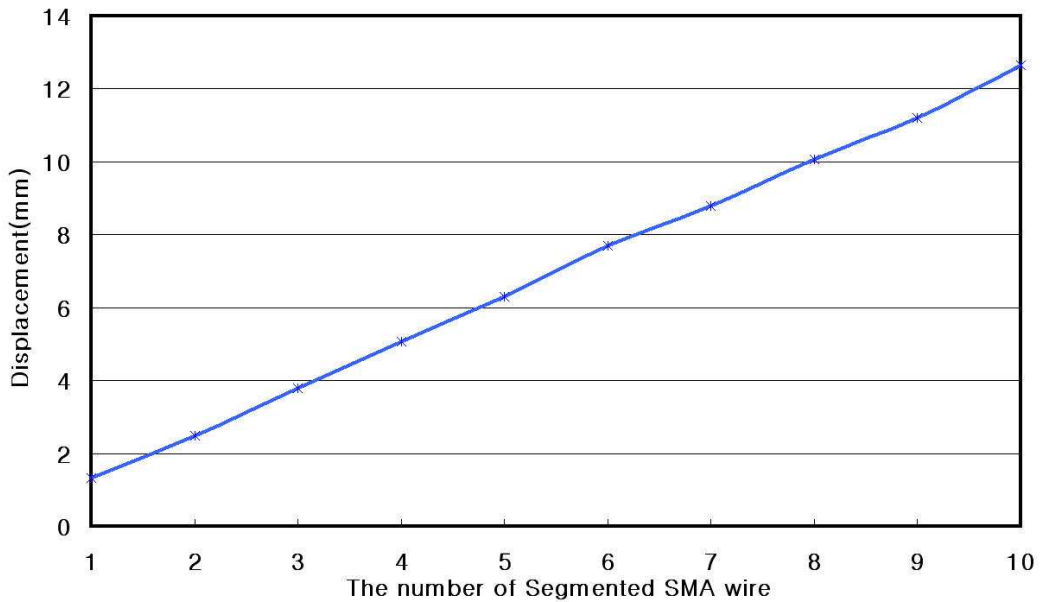
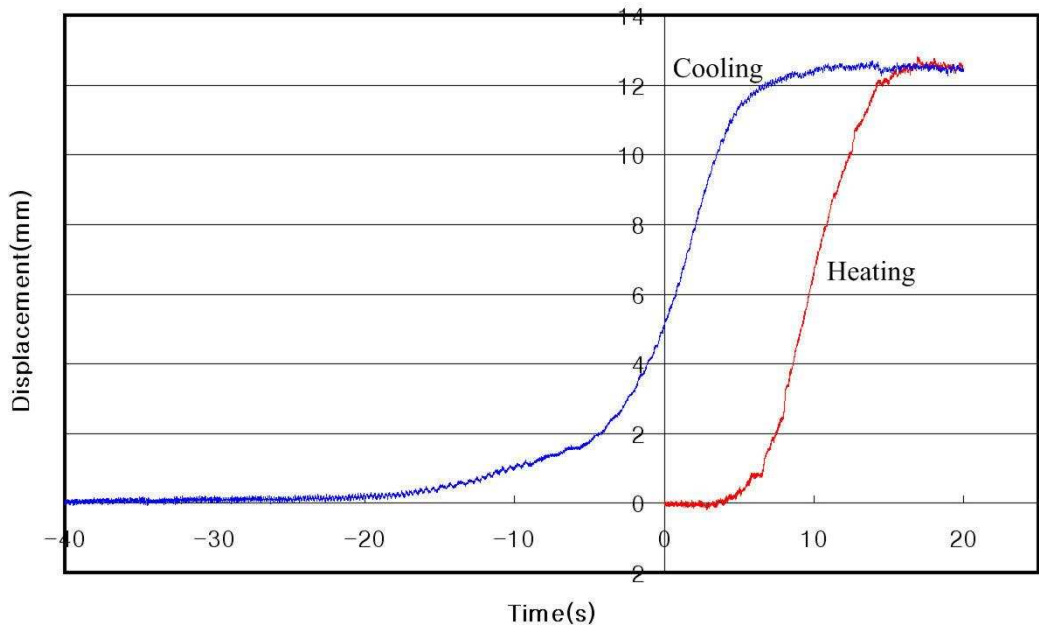


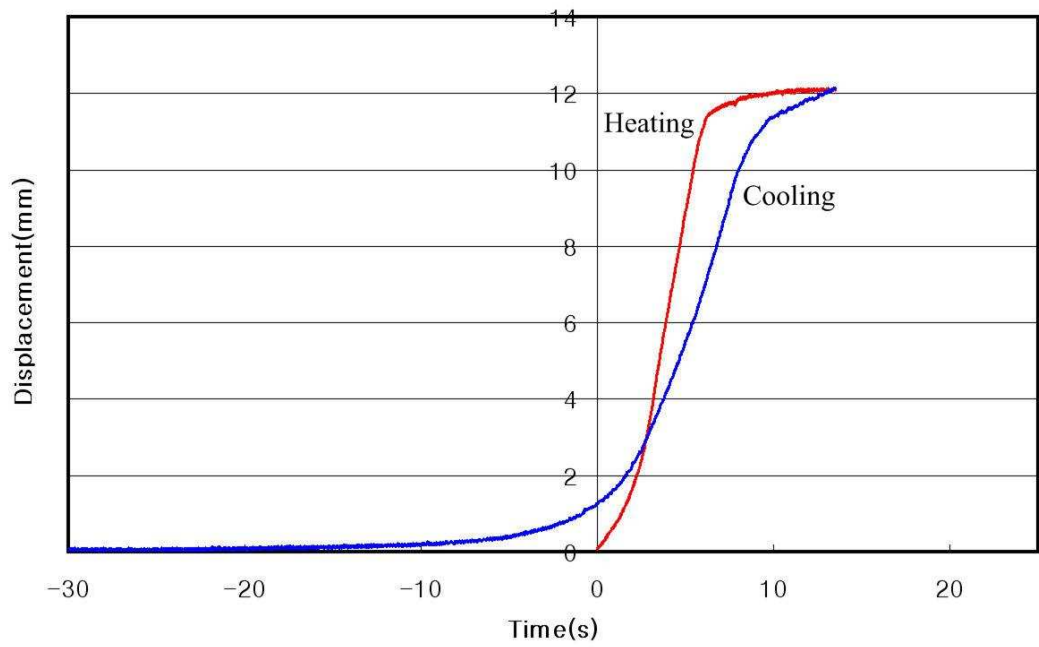
Fig. 5-8 Change of Displacement for the number of Segmented Diameter  $375\mu\text{m}$  SMA wire

## 제 4 절 히스테리시스 특성

기존의 제어 방식인 형상기억합금 와이어 전체에 열 또는 전기를 입력하여 제어하는 방식과 구간분할 바이너리 제어방식의 히스테리시스 특성을 파악하기 위하여 형상기억합금 와이어의 동일한 길이에 대하여 시간에 따른 변위변화의 실험을 하였다. 실험은 10개 구간의 길이에 해당하는 30cm 형상기억합금 와이어의 양 끝에 전류를 인가하는 방법으로 하였다. 전류량은 형상기억합금 와이어의 변태가 일어나는 요구 전류인 2.785A를 인가하였으며 최대 변위를 일으킨 시점에서 전류를 차단하여 형상기억합금 와이어가 원래 길이로 회복 될 때까지 레이저 변위센서를 이용하여 측정하였다. Fig. 5-9 (a)는 구간분할 바이너리 제어기법에서 10개 구간에 대한 형상기억합금 와이어의 변위 변화를 나타낸 그래프이고 Fig. 5-9 (b)는 기존의 제어방식인 양 끝단에 전류를 인가한 방식의 변위의 변화를 나타낸 그래프이다. 구간분할 바이너리 제어방식의 변위 변화는 열전소자가 가열되기 시작하면서 서서히 증가하다가 15초까지 급격한 상승곡선을 그린다. 이후 열전소자의 전원을 차단하면 남아 있는 열에 의해 변위곡선은 완만해 지다가 열전소자가 냉각 되면서 다시 급격히 감소하는 형태를 나타낸다. 그러나 Fig. 5-9 (b)에서 보는 것과 같이 형상기억합금 와이어 전체에 전류를 인가한 방법의 변위 변화 그래프를 보면 전류를 인가한 시점부터 변위곡선은 급격히 상승하다가 전류를 차단함과 동시에 급격히 감소함을 알 수 있다. 따라서 구간분할 바이너리 제어기법은 기존의 방식에 비해 히스테리시스를 현저히 감소시킬 수 있는 제어 기법임을 알 수 있다.



(a) Segmented Binary Control



(b) Normal Control

Fig. 5-9 Hysteresis Characteristics of Segmented Binary Control and Normal Control

## 제 5 절 구간분할 바이너리 제어 구동 로봇핸드

### 1. 로봇핸드 제작

구간 분할 바이너리 제어에 의한 로봇핸드의 구동 특성을 알아보기 위해 실제 손 모양과 똑같은 모형 로봇핸드를 제작하였다. Fig. 5-10은 제작된 로봇핸드의 모습이며 그림에서 보는 것과 같이 손가락 각 관절은 회전 조인트에 의해 연결되어 있다. 또한 사람의 손과 유사한 운동 범위를 갖고 있으며 각 관절은 형상기억합금 와이어의 복원력을 주기위해 바이어스 스프링(Bias Spring)으로 연결되어 있다.

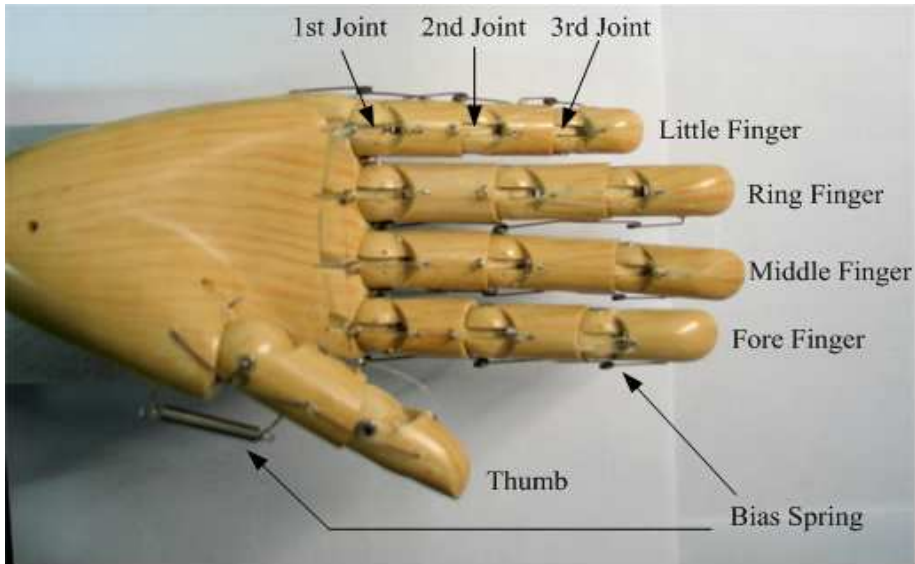


Fig. 5-10 Photo of Robotic Hand



## 2. 구간분할 바이너리 제어 구동 로봇핸드의 운동특성

형상기억합금 와이어의 구간분할 바이너리 제어로 움직이는 로봇핸드의 실제 구동 여부를 확인하기 위하여 검지(Fore Finger)의 각 관절별로 구간별 입력 신호를 주어 움직임을 관찰하였다. Fig. 5-11과 같이 15개의 열전소자를 나열하고 그 위에 형상기억합금 와이어를 올려놓고 검지(Fore Finger)의 첫 번째 관절에 연결하였다. Fig. 5-12는 검지(Fore Finger)의 첫 번째 관절에 연결된 형상기억합금 와이어에 5개구간, 10개구간, 15개구간별로 신호를 입력하였을 때 관절의 운동범위를 보여준다. 각 구간별 입력 신호가 증가함에 따라 검지(Fore Finger) 관절의 각변위가 증가함을 알 수 있었다. 구간별 입력 신호 상태에 따라 다른 관절의 각 변위가 어떻게 일어나는지 알아보기 위해 두 번째 관절과 세 번째 관절에 형상기억합금 와이어를 연결하고 5개구간, 10개구간, 15개구간에 입력 신호를 주었을 때의 운동특성을 알아보았다. 두 번째 관절의 움직임을 Fig. 5-13에 나타내었다고 세 번째 관절의 움직임을 Fig. 5-14에 나타내었다. 실험 결과 구간별 입력 신호가 증가하면 관절의 각변위도 증가하기 때문에 로봇 핸드는 자연스런 움직임이 가능함을 알 수 있었다.

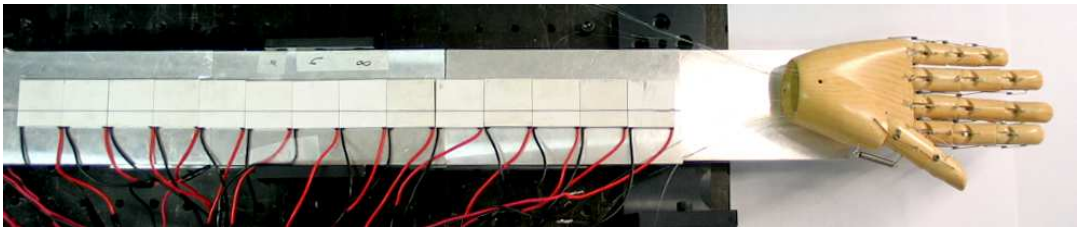


Fig. 5-11 Experiment on Dynamic Characteristics of the Robotic Hand



(a) 5-Segmented SMA wire



(b) 10-Segmented SMA wire



(c) 15-Segmented SMA wire

Fig. 5-12 Shape of 1st Joint for the Number of Segmented SMA wire



(a) 5-Segmented SMA wire

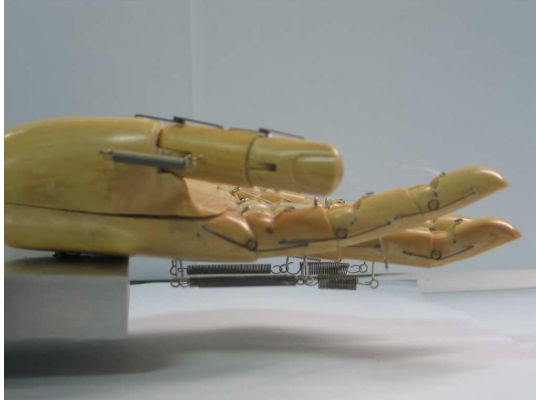


(b) 10-Segmented SMA wire

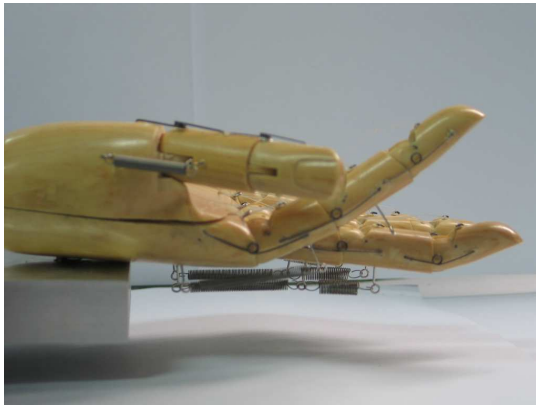


(c) 15-Segmented SMA wire

Fig. 5-13 Shape of 2nd Joint for the Number of Segmented SMA wire



(a) 5-Segmented SMA wire



(b) 10-Segmented SMA wire



Fig. 5-14 Shape of 3rd Joint for the Number of Segmented SMA wire

## 제 6 장 결 론

본 논문에서는 최근 로봇산업의 큰 패러다임이 된 지능로봇의 사람의 손과 같이 유연하고 유사한 운동특성을 갖는 로봇핸드를 개발하기 위하여 구간분할 바이너리 제어 기반으로 구동되는 형상기억합금 디지털 스텝모터의 메커니즘을 연구하였다. 또한 ADAMS를 이용하여 로봇핸드(Robot Hand)를 설계하였고 동특성을 파악하기 위하여 로봇핸드의 다양한 형태를 시뮬레이션 하였으며 실제 모형 로봇핸드를 제작하여 구간분할 바이너리 제어 방식으로 구동되는 로봇핸드의 동특성을 파악하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

### 1. 구간분할 바이너리 제어

형상기억합금 전체가 제어 대상이었던 기존의 제어 방법과 달리 본 논문에서는 새로운 제어 기법인 구간분할 바이너리 제어를 제시하였다. 구간분할 바이너리 제어는 긴 형상기억합금 와이어 전체를 여러 짧은 구간으로 나누고 각각의 구간을 독립적으로 ON/OFF 제어 하는 제어기법이다. 따라서 각각의 구간별 입력신호에 따라 변위가 결정되는 디지털 제어가 가능하게 되고 각 구간에서 발생된 변위의 합이 전체 변위로 환산된다. 또한 원하는 변위만큼의 제어가 가능하기 때문에 형상기억합금 디지털 스텝모터에 대해 고찰하였다.

### 2. 로봇핸드 시뮬레이션

사람의 손동작과 유사한 로봇핸드를 개발하고 로봇핸드의 여러 가지 운동 형태에 따른 각 관절의 각변위에 요구되는 직선변위 입력데이터를 얻고자 ADAMS를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 로봇핸드의 최대 변위를 요구하는 First Grip 및 사물을 가리키거나 지시하는 동작인 Point 등 8개 동작을 시뮬레이션 한 결과 요구되는 직선 입력변위 데이터를 얻을 수 있었고 이를 바탕으로 액츄에이터의 사양을 결정하였고 로봇핸드의 구동 메커니즘을 알 수 있었다.

### 3. 구간분할 된 형상기억합금 액츄에이터의 특성

선경  $100\mu\text{m}$ ,  $150\mu\text{m}$ ,  $375\mu\text{m}$  형상기억합금 와이어를 열전소자에 의해 구간분할 하여 구간별 발생력 및 변위를 측정하였다. 선경  $100\mu\text{m}$ 와  $150\mu\text{m}$ 의 5개 구간에서 각각 최대  $0.853\text{N}$ 과  $2.156\text{N}$ 의 힘이 발생하였다. 선경  $375\mu\text{m}$ 의 5개 구간에서는 최대  $17.497\text{N}$ 의 힘과

6.23mm의 직선변위가 발생함에 따라 형상기억합금 와이어가 로봇핸드의 액츄에이터로 사용 가능함을 규명하였다. 하지만 열전소자가 가열되는 시간과 냉각되는 시간 때문에 응답속도가 현저히 떨어지는 것을 알 수 있었다. 형상기억합금 와이어의 변위가 발생하여 원래의 길이로 회복하는 데는 약 1분 내외의 시간이 소요되었으며 이것은 제어 길이가 늘어날수록 증가하는 현상을 보였다. 이를 보완하기 위해서는 온도 컨트롤러를 추가하여 열전소자에 높은 전압과 전류를 공급해 주면 되고, 냉각속도를 빠르게 하기 위해서는 자연 냉각이 아닌 강제 냉각이 필요하다. 강제 냉각의 방식으로는 열전소자의 펠티어(Peltier) 효과를 이용하여 샌드위치 형식으로 구성하면 된다.

#### **4. 히스테리시스 특성**

형상기억합금 재료가 가지고 있는 히스테리시스를 알아보기 위하여 선경  $375\mu\text{m}$ 의 동일한 길이에 대하여 와이어 전체에 전기를 입력하는 기존의 제어방법과 구간분할 바이너리 제어방식으로 히스테리시스 곡선을 비교하였다. 그 결과 구간분할 바이너리 제어방식이 형상기억합금 와이어의 히스테리시스를 현저히 감소시키는 제어방법임을 확인하였다.

#### **5. 형상기억합금 디지털 스텝모터**

구간분할 된 형상기억합금 와이어  $375\mu\text{m}$ 의 1구간부터 10구간까지 변위를 측정된 결과 변위곡선이 선형적으로 증가하는 것으로 보아 형상기억합금 와이어는 구간별 입력신호에 따라 디지털 스텝모터의 역할이 가능함을 규명하였다.

## 참 고 문 헌

1. 삼성경제 연구소, 6, 2003, “산업판도를 바꿀 10대 미래기술”,
2. Ph.D. Grant, MacGil Univ., 1999, “Accurate and Rapid Control of Shape Memory Alloy Actuator”
3. 1999, Presented Smart Structures and Materials, “Seletal Muscle is a Biological Example of a Linear Electroactive Actuator”
4. 2002, Robotics and Automation, “Modeling and Simulation of an Artificial Muscle and its Application to Biomimetic Robotic Posture Control”, Vol. 41, pp. 225-243
5. Proc. IEEE ICRA, 1994, “A Binary Paradigm for Robotic Manipulators”
6. Ikuta. k, Tsukamoto. M, and Hirose. S, 1998, International Conference on Robotics and Automation, “Shape Memory Alloy Servo Actuator System with Electric Resistance Feedback and Application for Active Endoscope”, Vol. 1, pp.427-430
7. B. H. Park, M. Shantz, and F. Prinz, 8, 2001 Presented at Smart Structures and Materials 2001-Smart Structures and Integrated System, “Scalable Rotary Actuators with Embedded Shape Memory Alloys”
8. J. D. Madden, P. G. I. W. Hunter, March 2002, proc. of SPIE Conference on Electroactive Polymer Actuators and Devices, “Conducting Polymer Actuators as Engineering Materials”, pp. 176-190
9. J. Fraysse, 2002, Journal of Carbon, “Carbon Nanotubes Acting like Actuators”, Vol. 40, pp. 1735-1739
10. R. H. Baughman, May 1999, Science, “Carbon Nanotube Actuators”, Vol. 284, pp. 1340-1344
11. Amalraj, 2000, “Finite-element Modeling of Phase Transformation in Shape Memory Alloy Wires with Variable Material Properties,” Smart Mater. Struct. 9,

pp. 622-631

12. Khan, Proceedings of SPIE, 2002, "Modeling of Shape Memory Alloy Pseudo elastic Spring Elements Using Preisach Model for Passive Vibration Isolation," Vol. 4693, pp336-347

13. Benzaoui, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 8, July 1997 "Experimental Study and Modeling of a TiNi Shape Memory Alloy Actuator", pp. 619-629

14. Song, Smart mater. Structures 12, 2003, "Precision Tracking Control of Shape Memory Alloy Actuators Using Neural Networks and a Sliding-Mode based Robust Controller", pp. 223-231

15. Kumagai, 9, 2000, "Neural-Fuzzy Model based Feedback Controller for Shape Memory Alloy Actuators", Proceedings of SPIE, Vol 3984, pp. 291-299

16. Gorbet, July 1998, IEEE Transactions of Control Systems Technology, Vol. 6, n 4, "Dissipativity Approach to Stability of a Shape memory Alloy Position Control System", pp. 554-562

17. 11. Grant, June 1997, "Variable Structure Control of Shape Memory Alloy Actuators", IEEE Control Systems Magazine, v17, n3, pp.80-88

18. 4. 이상렬, 2004년 12월, 나노기술 열전소자의 발전, 기계저널 제 44권 12호, pp 26-27