

## 관절 경직 환자의 물리 치료를 위한 공압 구동형 하이브리드 로봇 개발

최현석\* · 최철우\*\* · 한창수\*\*\* · 한정수\*\*\*\*

\* 한양대학교 정밀기계공학과, \*\* LG전자, \*\*\* 한양대학교 기계정보경영학부, \*\*\*\* 한성대학교 기계시스템공학부  
(2002년 11월 9일 접수, 2003년 4월 11일 채택)

## Development of the Hybrid Type Robot Using a Pneumatic Actuator For Physical Therapy Of Ankylosis

Hyeun-seok Choi\*, Cheo-lu Choi\*\*, Changsoo Han\*\*\*, Jungsoo Han\*\*\*\*

\*Dept. of Precision Mechanical Eng., Hanyang Univ.,

\*\*LG Electronics., \*\*\*Dept. of Mechanical Eng., Hanyang Univ.,

\*\*\*\*Dept. of Mechanical system Eng. Hansung Univ

(Received November 9, 2002. Accepted April 11, 2003)

**요약** : 본 논문에서는 관절 경직 환자의 재활 치료를 위한 공압 실린더를 이용한 하이브리드형 로봇을 연구 개발 하였다. 공압 실린더는 우수한 컴플라이언스를 가지고 있고 부피나 중량에 비해 높은 구동력을 가지고 있다. 낮은 강성을 지닌 공압 구동기는 안정이 보장되어야 하는 물리 치료용 로봇의 구현에 적용하기 적당하다. 본 연구에서 제안한 로봇 시스템은 직렬형과 병렬형을 결합한 하이브리드 형으로 위치 결정부와 자세 결정부로 구분되며 하이브리드 구조를 통해 넓은 작업영역과 구동력을 얻을 수 있었다. 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 로봇 시스템의 공압 서보시스템의 추종성과 안정성을 얻을 수 있었으며 실험을 통하여서 개발된 시스템에 대한 검증을 하였다.

**Abstract** : In this paper, the pneumatic service robot with a hybrid type is developed. A pneumatic has the advantages of good compliance, high payload-to-weight and payload-to-volume ratios, high speed and force capabilities. Using pneumatic actuators, which have low stiffness, the service robot can guarantee safety. By suggesting a new serial-parallel hybrid type for the service robot which separates into positioning motion and orienting motion, we can achieve large workspace and high strength-to-moving-weight ratio at the same time. A sliding mode controller can be designed for tracking the desired output using the Lyapunov stability theory and structural properties of pneumatic servo systems. Through many experiments of circular trajectory, the pneumatic service robot is evaluated and verified.

**Key words** : Rehabilitation, Pneumatic robot, Hybrid type robot, Sliding mode control, Shoulder joint

### 서 론

골절상을 입은 환자는 경우에 따라 치료를 위해 깁스를 하여 골절상을 입은 뼈에 대해 고정을 함으로써 치료한다. 골절

이 논문은 2001년도 한양대학교 교내연구비 지원으로 연구되었음

통신저자 : 한창수, (425-791) 경기도 안산시 사1동  
한양대학교 기계정보경영학부

Tel. 031) 400-4062, Fax. 031) 400-5247

E-mail. cshan@hanyang.ac.kr

상태에 따라 깁스(plaster cast)의 기간은 1달에서 그 이상이 되며 깁스를 제거한 후 환자들에게서 근육이나 관절의 경직 현상(ankylosis)을 볼 수 있다. 이러한 관절의 경직을 치료하기 위해 운동을 통한 경직 관절의 물리 치료 요법(Physical therapy) 활용되고 있다. 물리 치료에서는 운동을 위한 여러 가지 기구들이 활용되고 있다. 본 논문에서는 견관절(Shoulder joint)의 운동 물리 치료를 위한 로봇 시스템을 개발하였다. 운동 치료에서 로봇 시스템은 환자의 경직된 관절의 운동을 도와주며 치료를 위한 관절의 운동 궤적을 만들어 주는 역할을 한다. 그림 1은 본 연구에서 목표로 한 견관절과 물리 치

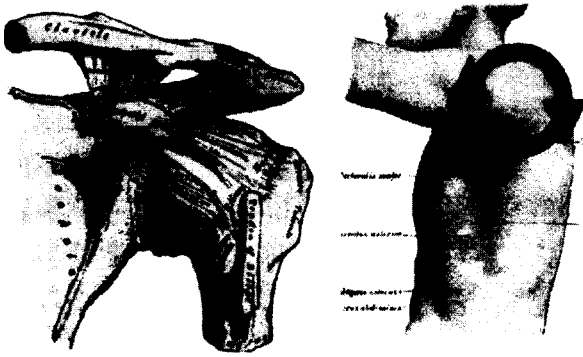


그림 1. 어깨 관절과 운동 치료 동작  
Fig. 1. Human Shoulder structure and therapy motion

료를 위한 운동 형태를 나타내고 있다. 물리 치료 및 재활 치료에 로봇 시스템을 이용함으로써 보다 다양한 운동 형태를 구현할 수 있고 정량화 된 치료 요법을 적용할 수 있다는 장점이 있다.

산업용 로봇에 대해 물리 치료용 로봇의 특징은 로봇이 인간과 직접적 접촉을 이룬 상태에서 치료 운동이 수행되므로 안전성이 보장되어야 한다는 것과 넓은 범위의 하중을 견딜 수 있고 비교적 높은 정밀도를 요구하지 않으며 넓은 동작 영역이 필요하다는 것이다.[1],[2]

물리 치료용 로봇의 요구 조건을 만족시키기 위해 기구적으로 직렬형과 병렬형 로봇을 결합한 하이브리드형 기구 메커니즘을 구성함으로써 넓은 동작영역과 높은 자유도를 확보하였으며 중복적인 안전장치를 적용하여 안전성을 확보하였다. 또한 구동기로서 공압 액츄에이터를 사용하여 시스템의 유연성을 높였다.

로봇 메커니즘에서 사용한 공압 액츄에이터(pneumatic actuator)의 경우 다른 액츄에이터에 비해 값이 저렴하고 파워/비용, 파워/무게의 비가 뛰어나며, 설치 및 보수와 사용상의 편리성, 장치가 간단하다는 장점이 있다[3]. 또한 공기의 압축성으로 생긴 강성의 저하는 고정도의 위치 제어에는 불리하지만 외부 외란이 발생했을 때 충격을 흡수하고 외부 힘을 억제하는데 유리하다[4]. 이러한 특성 때문에 공압 액츄에이터는 인간과 잦은 접촉이 예상되는 물리 치료용 로봇에서 뛰어난 성능을 발휘할 수 있다[5]. 로봇 메커니즘에서 높은 컴플라이언스(compliance)를 가진 공압 액츄에이터를 주요 구동부에 사용함으로써, 로봇과 사용자의 연결에서 유연성을 확보할 수 있다.

로봇에 공압 액츄에이터를 사용할 경우 공압 액츄에이터의 특성인 비선형성 때문에 제어기 설계에 어려움이 있다[3]. 이러한 제어의 문제점을 해결하기 위해서, 다양한 연구가 진행되고 있는데, 적응제어[6], 퍼지제어[7], 슬라이딩 모드 제어[8] 등 다양한 제어 기법들이 사용되고 있고 있지만, 주로 수평상태 하에서의 위치제어 실험이 위주였다. 실제로 메커니즘의 자중의 영향은 공압 액츄에이터의 위치제어에 심각한 영향을 미친다. 최근에는 공압 실린더가 중력의 힘 즉 메커니즘의 자중을 고려한 제어기 연구가 필요하다.[9][10]

직렬형 로봇의 경우(serial robot), 일반적으로 큰 작업공간

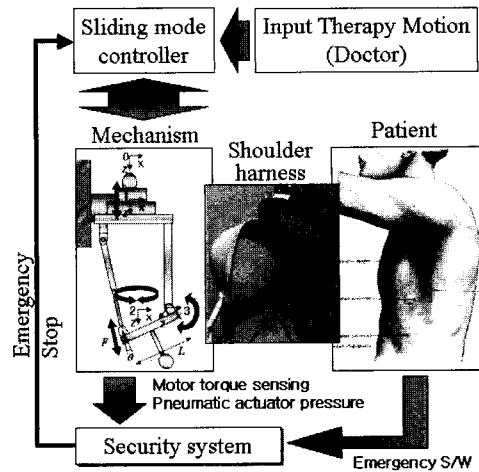


그림 2. 시스템 구성  
Fig. 2. System schematic

을 가질 뿐만 아니라 작은 공간에서도 효과적으로 동작할 수 있는 특성이 있다. 그러나, 직렬 구조는 긴 외팔보 형상으로 인해 강성이 높지 못하여 큰 하중이나 진동이 걸리는 동작에 취약하고, 각 링크의 오차가 로봇의 끝 단에 누적되어 나타나게 되는 단점이 있다. 반면 병렬 로봇(parallel robot)의 경우 하중이 각 구동기로 분산되어 직렬 로봇에 비해 높은 강성을 가질 뿐만 아니라 높은 정밀도와 낮은 관성을 가지며, 작은 공간에서 높은 자유도를 갖는 특징이 있다. 그러나, 각 액츄에이터 간의 간섭으로 인해 작은 작동 영역을 가지는 단점이 있다.

이러한 직렬과 병렬구조의 로봇의 장단점을 보완한 하이브리드형의 로봇(Hybrid type robot)[11],[12],[13]은 높은 하중과 넓은 동작 영역 그리고 높은 자유도가 필요한 물리 치료용 로봇에 적당하다.

### 시스템 구성 및 사양

본 연구에서 개발한 물리 치료용 로봇 시스템은 위험상황에 대한 안전장치와 직렬형/병렬형 로봇의 복합 형태인 하이브리드 로봇 메커니즘, 제어기 그리고 로봇과 환자를 연결하는 견관절고정기구(Shoulder harness)로 구성되어 있다. 시스템의 사양을 보면 최대 허용 하중은 25kgf이며 80×80×100cm<sup>2</sup>의 동작 영역을 가지고 있다. 시스템의 구성은 다음 그림 3과 같다.

### 기구부 제안 / 기구학 해석

#### 기구부 구성

높은 하중과 그리고 큰 작업공간이 필요한 작업환경에 사용하기 위해, 그림3과 같이 큰 작업공간을 가지는 PRRR 직렬구조와 높은 가반 하중을 견딜 수 있는 3RPS 병렬구조로 이루어진 하이브리드형 6자유도 로봇을 제안하였다.

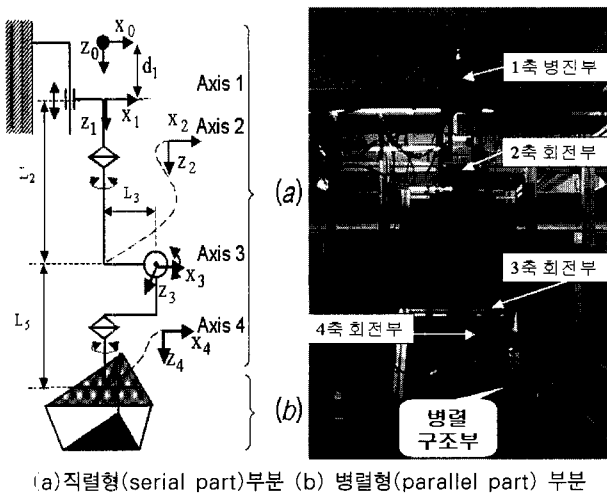


그림 3. 직렬형-병렬형 하이브리드 로봇 모델  
 Fig. 3. Serial-parallel hybrid type robot model

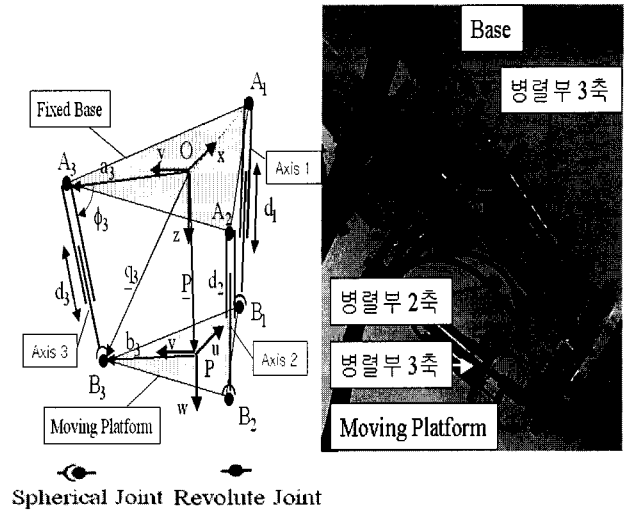


그림 4. 병렬부의 기구 모델  
 Fig. 4. Parallel part kinematic model

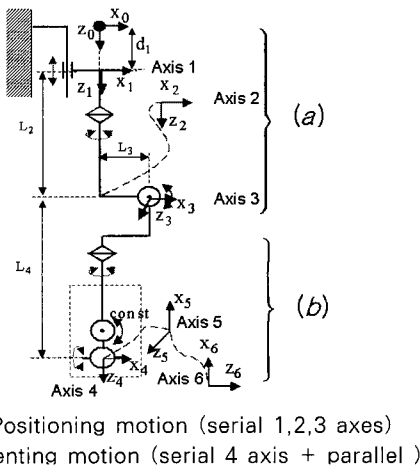


그림 5. 기구학 모델 해석  
 Fig. 5. Kinematic analysis

기구적으로는 7자유도를 가지고 있으나 본 시스템에서는 3 자유도의 병렬 구조부에 대해 제어 알고리즘에서 회전2자유도로 제한 함으로써 전체 시스템은 6자유도가 되었다. 구축된 병렬부의 직선이동의 1자유도는 환자와 로봇의 결합에서 편리성과 유연성을 위해 사용되며 환자와 로봇을 연결할 때 거리조정이 이루어져 고정된다.

로봇과 환자가 직접적 접촉을 하는 로봇 구조체의 직렬부축3과 병렬부는 공압 액츄에이터를 사용해, 충격을 흡수하고 외부 힘의 변화에 유연하게 대응하도록 하였다.

본 연구에서 적용한 그림 4와 같은 병렬 구조부는 Lee와 Shah[14]가 제안한 3RPS 병렬 매니퓰레이터로서 선형 액츄에이터의 베이스(fixed base) 부분에 회전 조인트, 플랫폼(moving platform) 부분에는 볼 조인트를 설치하여 2개의 회전과 1개의 병진 운동, 즉 3자유도를 가지는 구조이다.

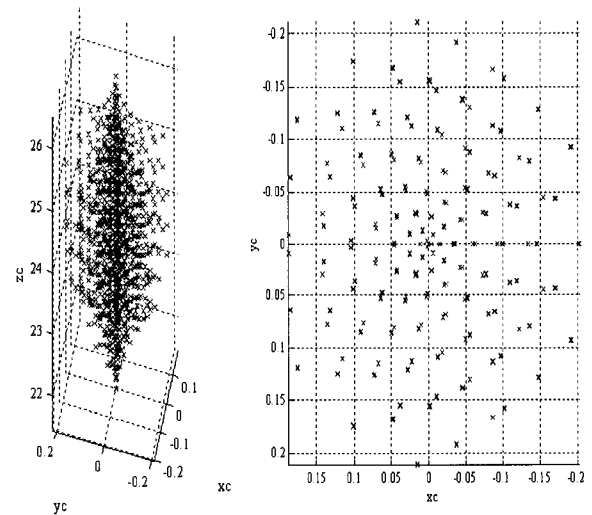


그림 6. 간섭현상에 의한 병렬부의 위치 오차  
 Fig. 6. Position error of parallel part (unit:cm)

기구학 해석  
 1. 정기구학

로봇의 기구모델은 Fig. 5와 같이 위치 결정부와 방향 결정부로 나누어 볼 수 있다. 위치 결정부(positioning motion)인 직렬부 축1,2,3에 의해 건관절 고정기구의 위치가 결정되며 방향 결정부(Orienting motion)인 직렬부 축4와 병렬부(축5, 6)에 의해 건관절 고정기구의 방향이 결정된다.

그림 5와 같이 병렬부의 병진운동을 구속하여 병렬부를 2자유도의 회전운동으로 해석함으로써, 전체적으로 6자유도의 로봇으로 기구학 해석이 단순화 되었다. D-H Parameters는 Table 1과 같다. 병렬부의 첨단부의 위치와 방향운동은 서로 간섭현상을 발생 일으킨다[14]. 본 논문에서는 이러한 병렬부

에 간섭현상을 무시하였다. 왜냐하면 병렬부. 침단부의 간섭에 의한 위치변화가 병렬부 전체 작동 영역에 비교해서 그림 6과 같이 미세한 수준이기 때문에, 아주 높은 정밀도가 필요하지 않은 경우의 물리 치료 로봇에서는 충분히 무시할 수 있다.

Table 1. Denavit-Hartenberg Parameters

	l	$\alpha_{i-1}$	$A_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
Positioning motion	1	0	0	$d_1$	0
	2	0	0	$L_2$	$\theta_2$
	3	$-90^\circ$	$L_3$	0	$\theta_3$
Orienting motion	4	$90^\circ$	$-L_3$	$L_4$	$\theta_4$
	5	$-90^\circ$	0	0	$\theta_5$
	6	$-90^\circ$	0	0	$\theta_6$

2. 역기구학

Table.1로부터 구해진 변환행렬을 이용하여, 주어진 위치 ( $p_x, p_y, p_z$ )로부터 축 1, 2, 3의 해  $d_1, \theta_2, \theta_3$ 를 다음과 같이 구하였다.

$${}^0T_1{}^1T_2{}^2T_3{}^3T_E P = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad {}^3P = \begin{bmatrix} -L_3 \\ -L_5 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\theta_2 = A \tan 2(p_y, p_x) \tag{2}$$

$$a = p_x c_2 + p_y s_2 - L_3 \tag{3}$$

$$\theta_3 = A \tan 2(-L_4, L_3) + A \tan 2(\sqrt{L_4^2 + L_3^2 + a^2}, -a) \tag{4}$$

$$d_1 = p_z - L_2 - L_4 c_3 - L_3 s_3 \tag{5}$$

식(2), (4), (5)에서 구해진  $\theta$ 에 의해  ${}^0_3R$ 를 구한 후, 주어진 방향  ${}^0_2R$ 을 이용해서 다음 식(6)과 같이  ${}^3_2R$ 를 구하였다.

$${}^3_2R = ({}^0_3R)^T {}^0_2R \tag{6}$$

또한 Table. 1로부터 다음을 구할 수 있다.

$${}^3_2R = {}^3_4R {}^4_5R {}^5_6R {}^6_2R \tag{7}$$

식(6)과 (7)은 서로 같으므로  $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ 를 구하면 아래와 같다.

$$\theta_5 = {}^3_2R(2,1) \tag{8}$$

$$\theta_6 = a \sin\left(-\frac{{}^3_2R(2,2)}{C_5}\right) \tag{9}$$

$$\theta_4 = a \tan 2({}^3_2R(3,1), {}^3_2R(1,1)) \tag{10}$$

구해진  $\theta_5, \theta_6$ 를 이용해 병렬부의 회전변환 행렬을 구한 후, 이 행렬을 가지고 최종적으로 병렬부의 링크 길이  $l_1, l_2, l_3$ 를 구하였다[14]. 간섭을 무시하고 구한 역기구학의 해를 간섭을 고려한 정기구학 식에 대입하였다[14]. 그림 7과 같이 직경 5cm인 원형 경로에 대한 시뮬레이션 결과 견관절 고정기구의 중심 궤적은 목표한 원의 궤적에 거의 일치하는 것을 알 수 있었으며, 이를 통하여 간섭현상에 의한 오차를 무시하는 것이 시스템의 기구학 해석에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

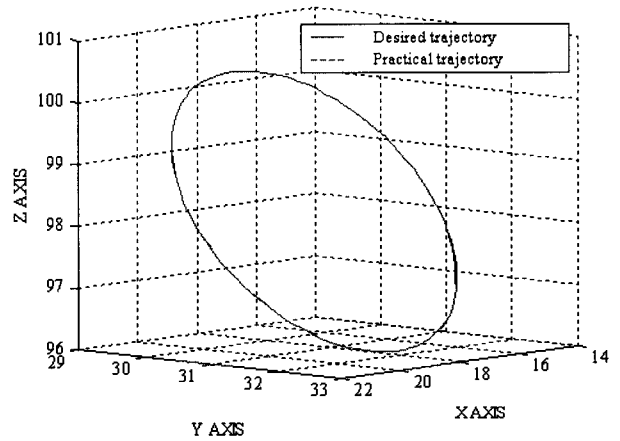


그림 7. 기구학 모델 해석 검증 (단위:cm)

Fig. 7. Kinematics verification simulation (unit:cm)

공압시스템의 동적모델링/제어

1. 공압 실린더 모델링

실린더의 피스톤의 끝단에 추가되는 외부 힘, 외란, 마찰력, 질량 등 공압실린더의 특성을 고려하여 식(11)과 같이 2차 시스템으로 모델링 하였다[8]. 직렬부 축3의 공압실린더와 마찬가지로 병렬부의 3개의 축도 같은 방법으로 그림 8과 같이 모델링하고 제어하였다.

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + F(y) + f(M, \dot{y}, y) + d(t) = U(t) \tag{11}$$

where,

$d(t)$  : Disturbance  $F(y)$  : Force by Gravity

$M$  : Mass  $f(M, \dot{y}, y)$  : Friction Force

$U(t)$  : Control Input  $y$  : Length of Piston

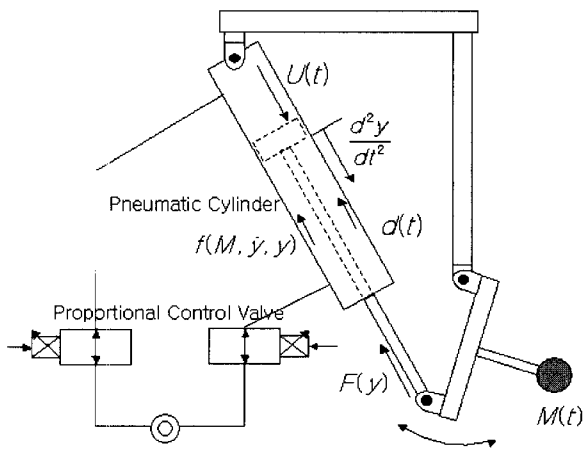


그림 8. 공압시스템 구성도  
 Fig. 8. Schematic of pneumatic system (serial axis 3)

2. 슬라이딩 모드 제어기

공압 동역학식(11)에서 측정하기 어려운 항들은 식(12)와 같이 범위를 가진다고 가정한다[8].

$$q_1 < Q < q_2 \quad Q = M^{-1} \tag{12a}$$

$$|f(M, \dot{y}, y)| \leq f_f |\dot{y}| + f_p |y| + f_s \tag{12b}$$

$$|d(t)| \leq \rho = \text{const} \tag{12c}$$

where,

$f_f$  : damping                       $f_p$  : stiffness  
 $f_s$  : friction coefficient       $q_1, q_2, \rho$  : 양의 개수

식(11)이 Lyapunov식을 만족하도록 슬라이딩 모드 제어입력을 구하면 식(13)와 같다[8].

$$U(t) = -\frac{1}{q_1 |s|} w(t) + F(y) \tag{13}$$

where,

$$w(t) = |a_{m1} y_m| + |a_{m2} \dot{y}_m| + |b_m r| + q_1 |\rho| + c_1 |\dot{\epsilon}| + q_2 (f_f |\dot{y}| + f_p |y| + f_s)$$

$a_{m1}, a_{m2}, b_m$  : reference model parameter

$r$  : reference input

$y_m$  : reference model state variable

$$\epsilon = y - y_m, \quad \dot{\epsilon} = \dot{y} - \dot{y}_m,$$

$s = c_1 \epsilon + \dot{\epsilon}$  : sliding surface

$c_1$  : positive constant

제안된 제어기에는 시스템의 추종 성능을 향상시키기 위해 동역학적인 영향인 하중의 변화, 마찰력, 외란을 고려하였다.

실험에서 동적 모델의 적용에 의한 시스템의 추종 성능 변화 실험을 하였다.

실험결과 및 분석

가장 큰 압력을 받는 3번 축의 공압 액추에이터에 대해 부하의 유무에 따른 추종 성능을 실험하였고 전체 시스템에서 환자와 로봇이 결합된 상태로 물리 치료 운동 궤적의 구현 실험을 하였다. 실험은 동적 모델을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우로 비교하여 동적 모델의 적용에 대한 타당성을 검증하였다.

하중이 부가된 경우, 피스톤의 위치가 최대값이 되었을 때 오차가 발생하였고 시간 지연도 발생하였으나, 그 값이 적으므로, 제어기의 성능은 충분하다고 볼 수 있다. 실험결과를 통하여 슬라이딩 모드제어기의 성능을 검증할 수 있었다.(그림 10)

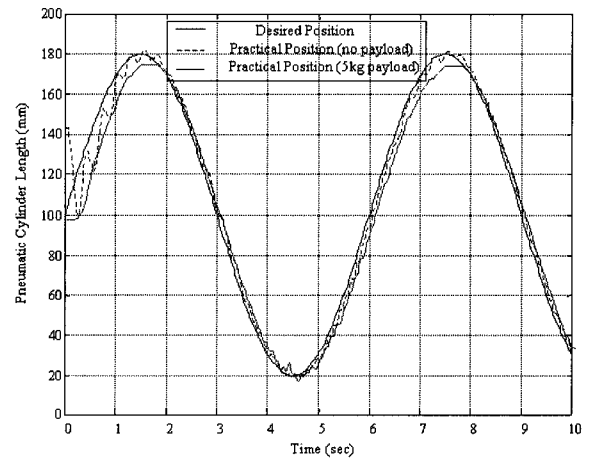


그림 9. 3번 축의 위치 추종 실험 결과(정현파)  
 Fig. 9. Output tracking of axis 3 (sine input)

환자의 견관절부가 약 5cm의 직경의 원운동을 5초에 1회하는 속도로 움직이도록 로봇에 운동 명령을 주었을 때 궤적 추종 성능을 실험하였다. 그림 10은 실험을 위해 로봇과 환자를 연결한 사진이다. 환자에게 장착된 고정기구는 수지로 제작되



그림 10. 환자와 로봇시스템의 연결기구  
 Fig. 10. Human and robot system link harness

있으며 불필요한 관절의 동작을 고정하고 로봇과 안정되게 고정되도록 설계 되었다.

실험결과, 서보 모터에서 발생하는 오차는 미소하였으며 시스템의 대부분의 오차는 공압부에서 발생하고 있다. 오차의 정도는 수mm단위였으며 실제 환자의 치료에 있어서 이러한 오차는 치료 운동에 큰 영향을 미치지 않았다.

제어기에서 동적 모델을 적용한 경우와 기구모델만을 적용한 경우를 비교 실험 하였으며 동적모델을 적용한 제어기에서 보다 좋은 추종성을 보여주었다.

환자의 어깨에 대한 회전운동에 적용한 결과 부드러운 운동 특성을 확인할 수 있었으며 원하는 운동 궤적을 얻을 수 있었다.

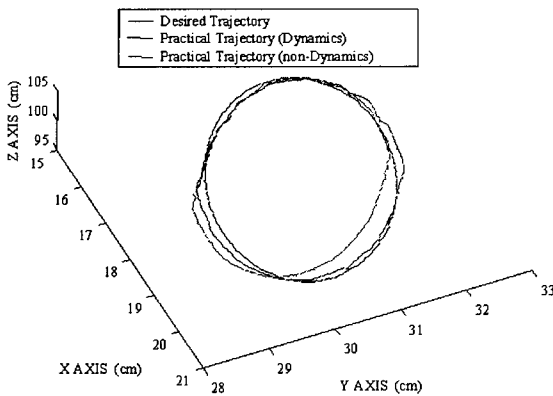


그림 11. 원운동 추종 실험결과(단위:cm)  
Fig. 11. Circular Trajectory (unit : cm)

### 결 론

본 연구에서는 견관절의 경직환자의 물리치료를 위한 공압 액추에이터와 하이브리드 형태를 응용한 물리 치료용 로봇을 개발하였다.

하이브리드형 공압 서비스 로봇은 넓은 동작 영역을 구현하고 높은 하중에 견디는 성능을 보여주었다. 슬라이딩 모드 제어기를 사용하여 공압 액추에이터의 비선형성을 극복하고 주어진 목표위치를 만족하도록 제어하였다. 개발된 시스템을 이용하여 실제 사람의 견관절부에 대한 동작 실험 결과 시스템의 안전성을 확인할 수 있었으며 치료 운동 동작의 구현 성능을 확인할 수 있었다. 앞으로 보다 다양한 관절부의 치료를 위한 인체와 로봇 사이의 결합기구와 운동에 대한 연구와 개발이 필요하다고 생각된다.

### 참 고 문 헌

1. 이희영, 송원경, 변증남, "복지용 서비스 로봇 시스템

"Journal of the Korean Society of Precision Engineering. Vol.17, No.9, 2000

2. S.P. Gaskill and S.R. G. Went, "Safety issues in modern applications of robots", Reliability Engineering and System Safety, 53:301-307, 1996

3. S.R. Pandian, et. Al, "Control Performance of an Air Motor", Proc. of the 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp.518-524, 1999

4. 박정규, 노리즈구 토시로, "공압 매니퓰레이터의 강인 힘 제어", 대한기계학회논문집 A, 제20권 제 2호, pp. 540~552, 1996

5. H. Janocha, "New Actuators from the Point of View of Mechatronics, Mechatronics", 6, pp.497-506,1996

6. B. McDollell and J. Bobrow, "Adaptive tracking control of an air powered robot actuator", J. Dyn. Syst., Measurement, Contr., vol.115, pp.427-433, 1993

7. 최서호, 홍예선, 이정오, "공기압 서보 시스템의 위치제어 및 시뮬레이션에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제13권, 제6호, pp.102-113, 1996

8. J.Song and Y. Ishida, "A Robust Sliding Mode Control for Pneumatic Servo Systems", International Journal. Engineering Science. Vol.35, No.8, pp.771-723, 1997

9. R. Richardson, Andrew R. Plummer, and Michael D. Brown, "Self-Tuning Control of a Low-Friction Pneumatic Actuator Under the Influence of Gravity", IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol.9, No.2, 2001

10. R. Pandian, Y. Hayakawa, Y. Kanazawa, Y. Kamoyama, and S. Kawamura, "Practical Design of a Sliding Mode Controller for Pneumatic Actuators", Trans. of ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. Vol.119, pp. 666-670, 1997

11. Choi and Lee, "Development of a hybrid robot arm for propeller grinding", SPIE, SPIE'S 1996 v.10, pp. 517-527, Conference Proceeding, 1996

12. 백영종, "복합 형상 가공기 개발", MTRC 세미나 발표 자료 pp. 41-68, 2000

13. 이민기, "기계가공작업을 위한 강성이 큰 2단 평행구조 로봇 암 설계, Design of a high stiffness machining robot arm with double parallel mechanism" 대한기계학회논문집 서울, 대한기계학회, v.19, n.1(통권 112호), pp.22-37 1225-5963, 1995

14. Lee and Shah, "Kinematic Analysis of a Three-Degrees-of-Freedom In-Parallel Actuated Manipulator", IEEE Journal Robotics and Automation, 1998