特輯 한국정밀공학회지 제10권 제2호 1993.6
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 10. No.2 Jun. 1993.

대중량물 취급용 로봇을 위한 전기-공압구동기를 사용한 복합구동 방식의 개발

박 상 덕*, 정 규 원*, 정 완 균**, 염 영 일**

Development of a Control Method using both Electric and Pneumatic Actuators for a Heavy Load Handing Robot

S. D. Park*, K. W. Jeong*, W. K. Chung**, Y. Youm**

ABSTRACT

Pneumatic actuators have greater power to weight ratio than electric ones, but they have been rarely used as robotic actuators because of poor accuracy resulted from nonlinearity of air. On the other hand, electric servo motors have good controllability, but they have poor power to weight ratio. For the heavy load handling robot a combined actuating method was developed for vertical and horizontal axes of RISTBOT-Ⅱ which handles up to 250kgf load. In this paper, the control method is implemented and analyzed for the manufactured heavy load handling robot.

Key Words : Arm Ratio, Balancing, Double Prarallelogram Mechanism, Pneumatic

1. 서 론

공기압 구동기들은 전동기에 비해 큰 단위무게당 출력을 가지고, 분진과 고온 등에도 비교적 덜 민감하며 과부하에 대한 안전성이 우수하다. 그러나, 공압 실린더를 이용한 부하의 위치제어 시스템은 공기압이 이용되기 시작한 역사에 비해 전기모터나 유압을 이용한 그것들 보다 사용이 미미한 실정이다. 그 이유는 작동유체인 압축공기가 갖는 압축성과 점성등의 비선형성이 크고 실린더 벽면과 피스톤 사이의 마찰력이 크다는 점과 출력강성(output stiffness)이 낮고 응답속도가 늦으며 입력신호에 비례하는 선형적인 유량제어가 어렵다는 점 등 때문이다.

반면에 전동기, 특히 전기 서보모터는 우수한 위치제어 정밀도가 보장되므로 대부분의 산업용 로봇 및 기타 정밀 위치제어를 요구하는 작동체의 구동기로 사용되고 있다. 그러나 전기모터는 공압 혹은 유압 구동기에 비해 단위무게당 출력이 작으므로 전기모터를 구동기로 사용하는 산업용 로봇들은 로봇 자체 무게에 대한 가반중량비가 약 30~50 : 1 정도로 낮아서 150kg 이상의 중량물을 다루기 위해서는 로봇 자체의 무게가 1ton을 넘게되며 가격 또한 고가이다.

본 연구에서는 제철소와 같은 중량물을 다루는 작업장에서 사용할 이중 평행사변형(double paralellogram) 구조를 가지고 가반중량이 4 : 1 정도로 큰 로봇을 설계하고, 그것의 위치제어를 위해 공압실린더가 발생하는 큰 힘과 AC서보모터의 제어의 정밀성의 장점을 동시에 사용하는 공압-전기모터의 복합 구동형 메카니즘

* 산업과학기술연구소 기계연구분야 로보틱스 연구그룹
** 포항공과대학 기계공학과

을 다룬다. 아울러 작업대상물의 무게 및 로봇 팔의 물성치에 대한 적절한 발란싱(balancing) 조건을 도출하고 로봇 말단효과부의 위치제어를 위한 공압-전기모터 복합구동 방법을 개발하고자 한다.

2. 매니퓰레이터 설계

2.1 로봇 매니퓰레이터의 구조

본 연구를 통해 개발된 로봇 매니퓰레이터는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 이중 평행사변형(double parallelogram) 구조로서 매니퓰레이터 몸체는 회전, 수직 및 수평구동의 3자유도를 가지며 팔비(Arm ratio) [1]는 7 : 1이다.

로봇의 말단효과부(end effector)는 1715(mm) × 1520(mm) × 270°의 작업영역을 가지며 수평, 수직만의 2차원 운동시 말단효과부의 미소변위는 구동축의 미소변위에 대해 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\begin{bmatrix}\delta u\\ \delta v\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-k & 0\\ 0 & k+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta x\\ \delta y\end{bmatrix} \qquad (1)$$

여기서 $[\delta_u,\ \delta_v]^T$는 말단효과부의 수평, 수직 미소변위, $[\delta_x,\ \delta_y]^T$는 수평, 수직 구동축의 미소변위이며, k는 팔비(arm ratio) 상수이다.

따라서 몸체구동부의 수평·수직 구동축의 위치를 제어함으로서 말단효과부의 수평·수직위치를 제어할 수 있다. 즉, 수평축 구동은 Fig. 1에서의 수평축 구동모터(motor #3)의 회전운동을 볼스크류를 이용하여 직선운동으로 바꾸어서 축을 좌우로 구동하는 방식이며, 이때 수평축 발란싱 실린더는 수평축의 구동력을 로봇팔의 형상(configuration)에 무관하게 항상 일정하게 유지시켜 준다. 수직축 구동은 수직축 발란싱 실린더를 이용하여 말단효과부의 부하와 로봇팔의 자체 무게를 지지할 수 있는 힘을 발생시키고 수직축 구동모터(motor #2)와 볼스크류를 이용하여 정밀하게 상하 위치를 제어하는 방식을 사용했다. 몸체 회전부는 몸체 구동용 AC서보모터(motor #1)와 출력을 RV-감속기를 통해 감속 시키고 토오크를 증폭시켜서 몸체 회전축을 구동한다.

2.2 발란싱(balancing) 조건의 도출

매니퓰레이터 팔의 형상에 무관한 수직축 발란싱 실

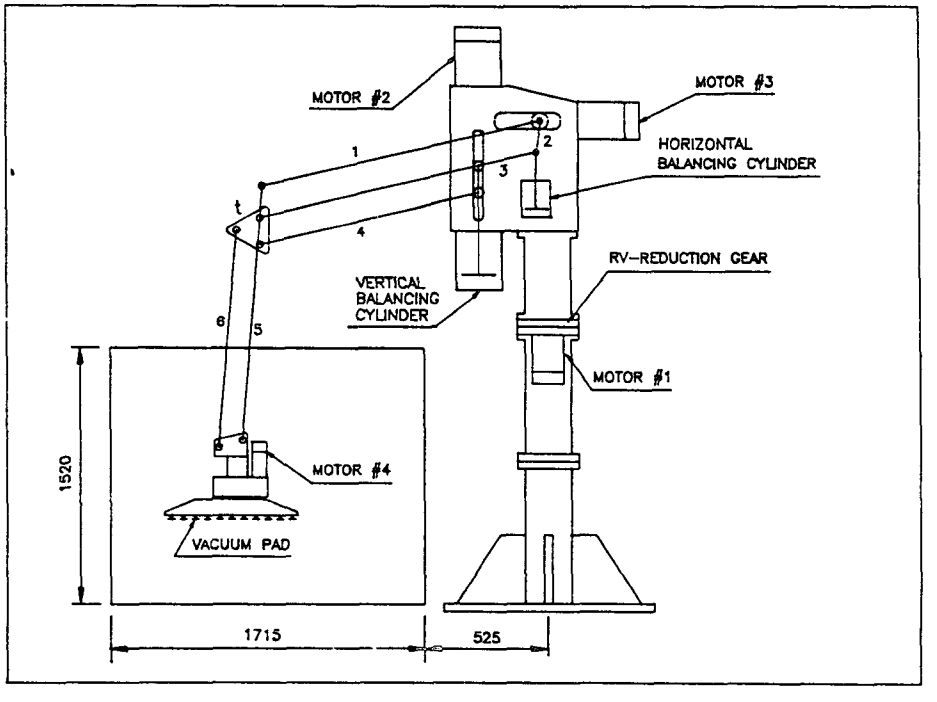

Fig. 1 설계된 매니퓰레이터의 구조 및 작업영역(Work space)

린더의 출력과 수평축 발란싱 실린더의 출력 즉, 발란싱 조건을 계산하기 위해 Fig. 2와 같은 팔의 자유물체도(Free Body Diagram)에서 힘과 모멘트의 평형방정식을 사용한다.

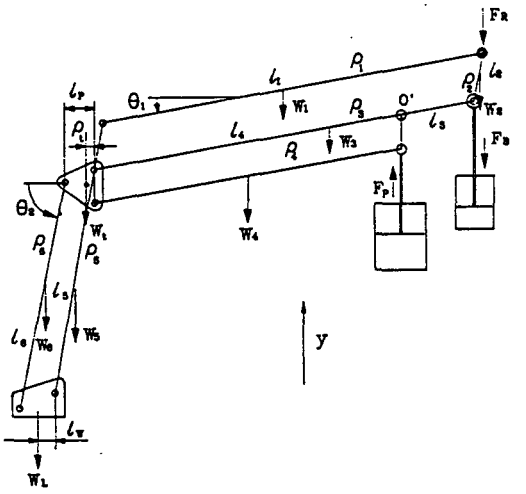

Fig. 2 매니퓰레이터 팔의 자유물체도(Free body diagram)

Fig. 2에서 y방향의 힘의 합 $\sum F_y=0$, O'에서의 모멘트의 합 $\sum M_{z)O'}=0$으로 두고 정리하면 수직축 발란싱 실린더의 출력 F_p는 다음과 같다.

$$F_p = \frac{(l_4+l_3)\cos\theta_1+(l_2+l_5)\cos\theta_2}{l_3\cos\theta_1+l_2\cos\theta_2}W_L + \frac{A\cos\theta_1+B\cos\theta_2+C}{l_3\cos\theta_1+l_2\cos\theta_2} \quad (2)$$

$$A = W_1\rho_1+W_3(l_3+\rho_3)+W_4(l_4+\rho_4) + (W_5+W_6+W_t)(l_3+l_4)$$

$$B = l_2(W_2+W_3+W_4+W_5+W_6+W_t) - W_2\rho_2+W_5\rho_5+F_Bl_2+W_6\rho_6$$

$$C = W_6\rho_6+W_t\rho_t+W_Ll_w$$

F_p가 팔의 형상(configuration) 즉, θ_1, θ_2에 무관하게 일정하기 위해서는 다음의 조건이 만족되어야 한다.

$$\frac{l_3+l_4}{l_3}=\frac{l_2+l_5}{l_2} \quad (3)$$

$$\frac{A}{l_3}=\frac{B}{l_2} \quad (4)$$

C는 무시할 수 있을 것 (5)

그러므로 식 (3), 식 (4) 및 식 (5)이 만족되면 식 (2)에서 F_p는 다음과 같이 부하의 무게에 비례하는 간단한 근사식으로 표현된다.

$$F_p = (1+k)W_L + m \quad (6)$$

여기서, k는 팔비(Arm ratio)상수로서 $(l_3+l_4)/l_3=1+k$를 만족하며, m은 팔의 무게와 길이 및 무게 중심에 따라 결정되는 상수로서 $A/l_2=B/l_3=m$이다. 그리고 식 (4)에서 $l_2A=l_3B$이므로 정리하면 수평축 발란싱 실린더의 출력 F_B는 다음과 같이 팔의 무게와 길이 및 무게중심의 거리를 포함하는 일정한 값으로 표현된다[2].

$$F_B = [W_1\rho_1l_2 - W_2(l_2-\rho_2)l_3 + W_3\rho_3l_2 + W_4\rho_4l_2 + W_5(l_2l_4-l_3\rho_5) + W_6(l_2l_4-l_3\rho_6) + W_tl_2l_4]/l_2l_3 \quad (7)$$

Table. 1 설계된 매니퓰레이터 각 팔의 물성치

Arm	l(cm)	ρ_i	W_i(kgf)
1	176	88	15.6
2	18	9	2.8
3	22	60	35.6
4	154	77	8.4
5	126	40	23.8
6	126	63	6.8
t		5	4.7

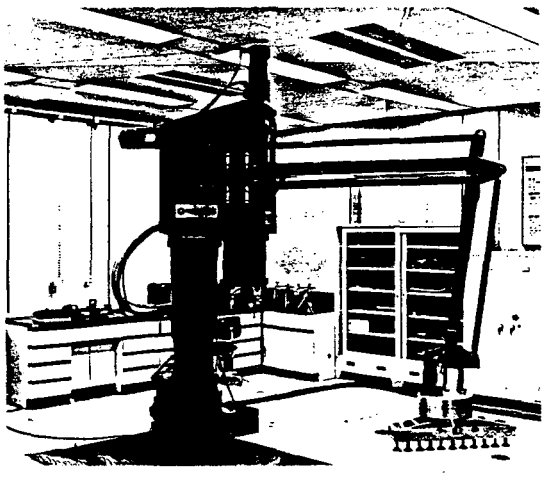

Photo. 1 제작된 로봇 매니퓰레이터

따라서 매니퓰레이터의 팔(arm)이 설계되면 식 (6) 및 식 (7)에 의해 수직축과 수평축 발란싱 실린더의 출력이 계산될 수 있으며 수직 및 수평축 발란싱 실린더에 각각 식 (6)과 식 (7)에서 계산된 힘을 발생하도록 압력을 제어하면 매니퓰레이터는 팔의 형상에 무관하게 발란싱이 이루어진다. 설계된 각 팔의 물성치는 Table 1과 같고 제작된 로봇의 사진은 Photo.1과 같다.

3. 공압-전기모터 복합구동 방식 및 제어방법

3.1 공업-전기모터 복합구동 mechanism

Fig.3은 AC 서보모터와 공압실린더의 복합구동 mechanism을 나타낸다.

작동원리는 먼저 부하가 가장 많이 걸기는 수직축 구동부의 위치제어시 수직하중은 압력제어가 가능한 수직축 발란싱 실린더가 식 (6)과 같이 부하에 비례하는 힘을 발생하여 지지하고, 수직모터는 볼스크류를 이용하여 부하의 수직위치를 정밀하게 제어하는 구조로서 대중량물 작업시 위치제어를 위한 모터와 동력전달 장치의 크기를 최소화하자는 것이 기본개념이다. 수평축 구동부의 위치제어는 식 (7)에 해당하는 힘을 수평축 발란싱 실린더에서 발생하여 수평축의 구동력을 암의 형상에 무관하게 일정하게 유지하고, 수평축 구동모터와 볼스크류를 이용하여 위치를 제어한다. 수직축 발란싱 실린더와 수평축 발란싱 실린더의 사양은 식 (6)과 식 (7)에 의해 결정할 수 있다.

매니퓰레이터의 몸체부에서 수평축 구동부와 수직축 구동부를 움직이면, Fig.3에서 θ_1, θ_2값이 변하면서 E 점의 위치가 평면상을 움직이게 되므로 수평축 발란싱 실린더의 행정은 Δy_{max}, 발란싱 실린더의 이동슬롯의 길이는 Δx_{max}가 되도록 하여야 한다. Δx_{max}, Δy_{max}값은 θ_1, θ_2에 따라 각각 아래와 같다.

$$\Delta x_{max} = \max[l_3 (1-\cos\theta_1)],$$
$$\Delta y_{max} = \max[l_2 (1-\sin\theta_2)] \quad (8)$$

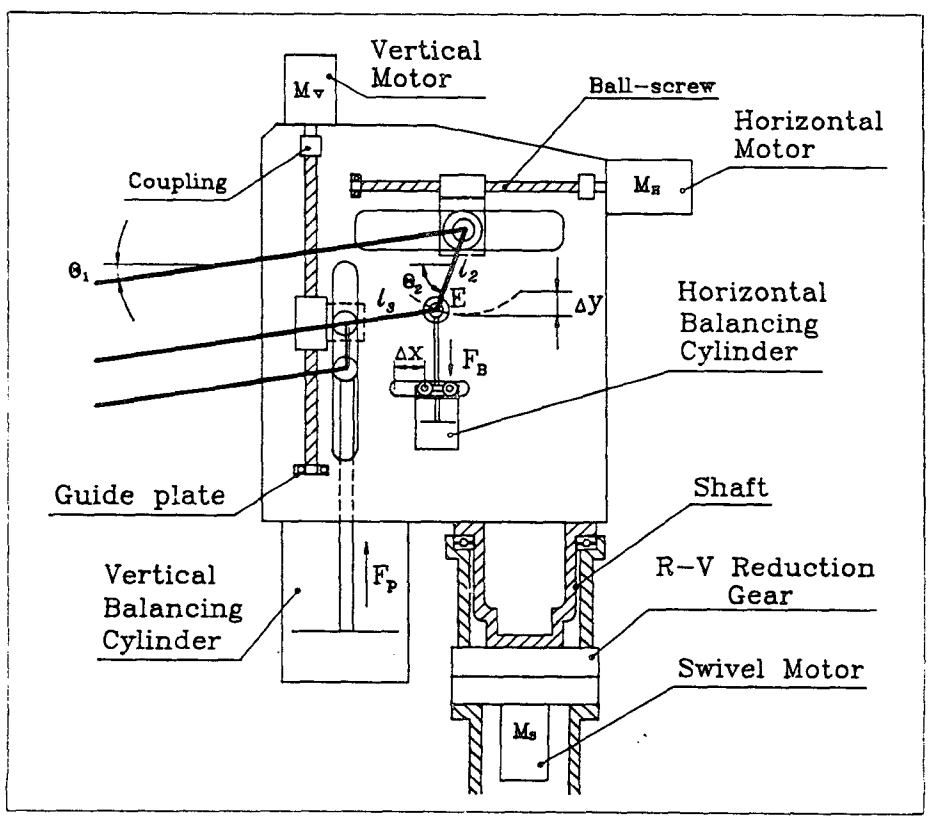

Fig.3 로봇 몸체 각 구동부의 개략도

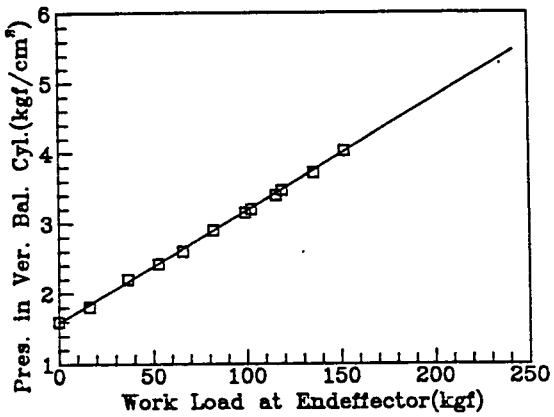

Fig. 4 작업부하의 변화에 따른 수직축 발란싱 실린더 내의 발란싱 압력 변화

Fig. 4는 로봇 말단효과부에 걸리는 부하의 무게변화에 따른 수직축 발란싱 실린더내의 발란싱 압력변화의 실험치이다.

설계된 매니퓰레이터의 무게는 약 1,000kg이며, Fig. 4의 결과에 의하면 6kgf/cm²의 공압을 사용할 경우 가반중량은 260kg 정도로서, 로봇 자체 무게(1ton)에 대한 가반중량의 비는 약 4 : 1임을 알 수 있다.

3.2 각 실린더의 압력제어방법

수직축 발란싱 실린더와 수평축 발란싱 실린더의 압력 제어회로는 Fig. 5와 같다.

작동원리는 먼저 수직축 발란싱 실린더가 지지해야 할 부하의 무게를 발란싱 시켜주는 실린더의 압력 F_p를 식 (6)에 의해 계산하며 F_p를 발생하는 압력에 해당하는 신호를 압력형 전기-공압비례 밸브에 입력으로 가한다. 이 전기-공압비례 밸브에 의해 조절된 압력은 공압작동식 레규레타의 입력으로 작용하며 레규레타는 실린더 내에 부하를 이길 수 있는 압력을 형성시킨다. 이 상태에서는 부하를 중력방향의 반대방향으로 지지하는 힘은 공압실린더에서 발생하므로 작은 용량의 모터에 의해 수직위치 이동이 가능하다.

예를 들어 매니퓰레이터의 말단효과부에 150kgf의 부하가 달린 경우 식 (2)에 의하면 수직축 발란싱 실린더가 받는 힘은 약 1890kgf이다. 150kgf의 부하를 달고 모터만을 사용하여 수직축을 구동할 경우 말단효과부에서의 요구속도를 66.72cm/s 즉, 수직슬롯에서의 속도를 66.72/(7+1)=8.3cm/s로 하고 볼스크류의 리이드를 5mm, 가속시간을 0.3초로 했을 때 필요한 모터의 토오크는 300kgf-cm이고 볼스크류의 직경은 55mm이

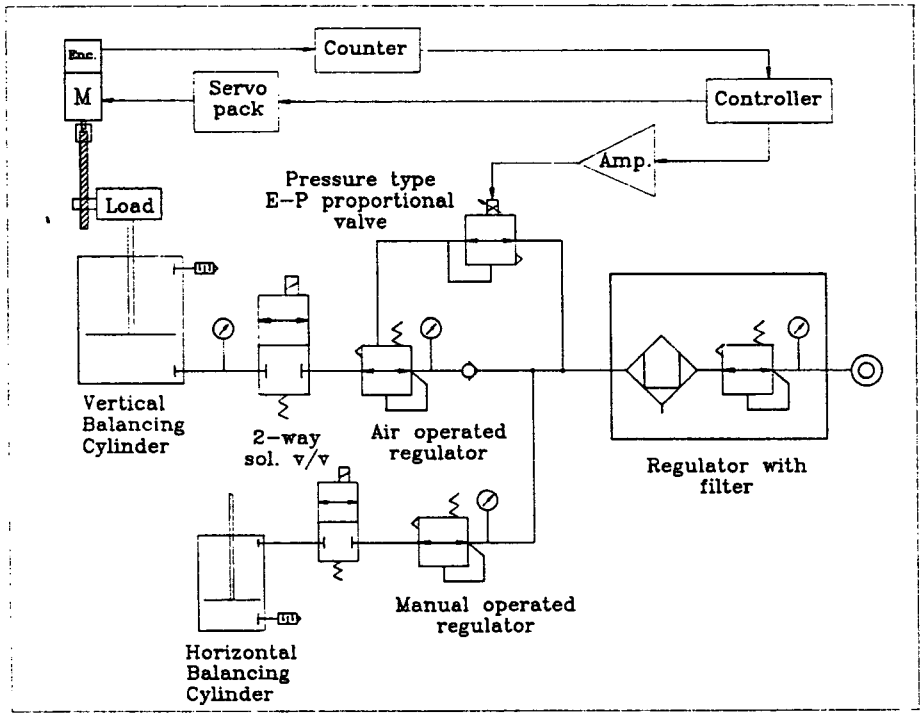

Fig. 5 수직축 발란싱 실린더 및 수평축 발란싱 실린더의 압력 제어회로의 개략도

다. 그러나 본 연구에서 사용한 것과 같이 공압실린더와 AC 서보모터를 동시에 사용할 경우 150kgf의 부하에 대해서 필요한 모터의 토오크는 약 73kgf이고 볼스크류의 직경은 20mm 정도로서 모터만 사용했을 때 보다 모터의 출력을 약 75%, 볼스크류의 크기는 약 60% 감소 시킨다. 또한 부하의 수직 이동시 중력에 의한 영향을 없애주는 효과가 있으며, 로봇의 운전중 정전 등의 비상사태 발생시에도 수직축 발란싱 실린더 입구의 솔레노이드 밸브를 차단하면 실린더 내에 발란싱 압력이 그대로 유지되어서 중력의 영향에 의해 로봇팔이 추락해서 모터나 볼스크류 및 작업대상물에 나쁜 영향을 주는 것을 방지하는 등의 장점이 있다.

모터의 구동으로 인해 부하가 상승할 때 공압작동식 레규레타에 의해 부족한 공기가 실린더 내로 공급되며, 부하가 하강할 때 남는 공기는 대기중으로 배기되므로 실린더 내에는 항상 부하를 발란싱 시켜주는 압력이 유지된다.

수평축 발란싱 실린더는 식 (7)의 결과와 같이 한번 정해진 로봇팔의 물성치에 대해 항상 일정한 힘을 발생하면 되므로 수평축 발란싱 실린더 내의 압력은 수동식 레규레타에 의해 설정되어서 일정 압력이 유지된다.

4. 실험 및 결과의 고찰

설계된 매니플레이터의 수직축 발란싱 실린더의 발란싱 압력변화에 따른 수직축 구동모터의 토오크 특성을 알아보기 위해 다음과 같은 방법으로 실험을 수행하였다. 즉, 매니플레이터의 말단효과부에 70kg의 부하를 달고 크기 ±1 volt, 주파수 1Hz인 정현파(sine wave)를 위치입력으로 가하면서 수직축 발란싱 실린더의 압력변화에 따른 모터의 토오크를 측정하였다. Fig.6은 작업부하의 무게 W_L=70kg이고 이때 Fig.4에 의한 적절한 발란싱 압력인 2.7kgf/cm²이 수직축 발란싱 실린더에 가해졌을 때 정현파(sine wave) 입력에 대한 모터 토오크에 해당하는 전압을 측정한 것이며, 이때의 모터 토오크 전압은 100%(88kgf-cm)의 토오크에 3V의 크기이다.

Fig.6의 결과에 의하면, 수직축 발란싱 실린더의 압력이 적절할 때는 모터 토오크 전압은 ±0.8V이며 부하의 상승 및 하강시에도 거의 일정하게 안정화 됨을 알 수 있다.

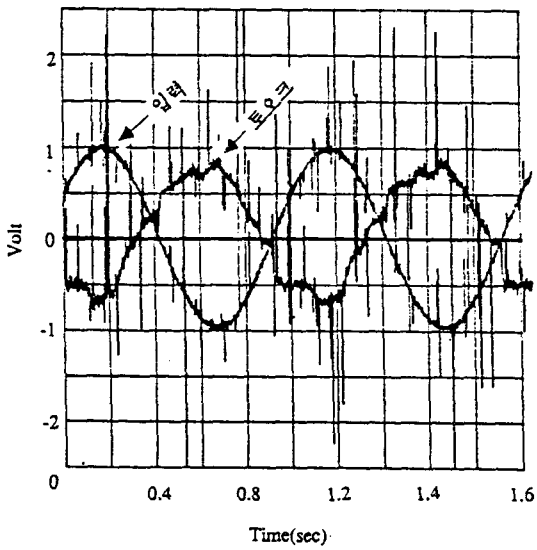

Fig.6 W_L=70kg, 발란싱 압력이 2.7kgf/cm²일 때의 정현파 입력에 대한 개회로(Open loop) 토오크 응답

Fig.7은 W_L=70kg, 발란싱 압력이 2.4kgf/cm²일 때의 토오크 응답으로, 부하 하강시의 토오크 전압은 +0.6V이고, 부하 상승시의 토오크 전압은 -1.5V로서 부하의 상승시에 모터에 큰 토오크가 걸림을 알 수 있다.

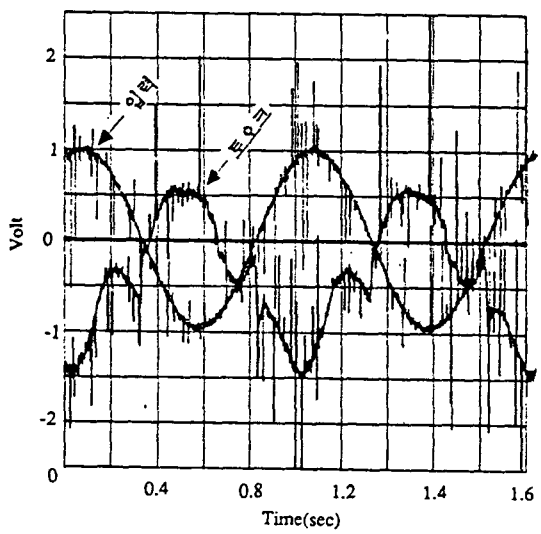

Fig.7 W_L=70kg, 발란싱 압력이 2.4kgf/cm²일 때의 정현파 입력에 대한 개회로(Open loop) 토오크 응답

Fig. 8은 W_L=70kg, 발란싱 압력이 2.9kgf/cm²일 때의 토오크 응답으로, 부하 하강시의 토오크 전압은 +1.2V이고, 부하 상승시의 토오크 전압은 -0.4V로서 부하의 하강시에 모터에 큰 토오크가 걸림을 알 수 있다.

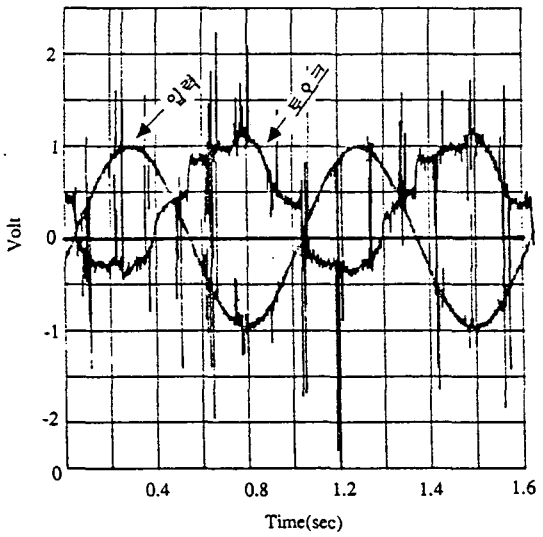

Fig. 8 W_L=70kg, 발란싱 압력이 2.9kgf/cm²일 때의 정현파 입력에 대한 개회로(Open loop) 토오크 응답

Fig. 9는 W_L=100kg이고 이때 Fig. 4에 의한 적절한 발란싱 압력인 3.2kgf/cm²이 수직축 발란싱 실린더에 가해졌을 때 정현파(sine wave) 입력에 대한 모터 토오크에 해당하는 전압을 측정한 것으로 부하의 상승 및 하강시의 토오크 전압은 ±0.9V로서 Fig. 6의 결과에 비해 작업부하의 증가에 따른 관성력(Inertia) 토오크만 약간 증가했을 뿐 전반적인 모터 토오크는 부하의 상승 및 하강시에도 거의 일정하게 안정화 됨을 알 수 있다.

즉, 이상의 실험을 통해 매니퓰레이터의 말단효과부의 부하에 따라 수직축 발란싱 실린더에 발란싱 압력을 적절히 보상함으로써 모터의 토오크를 최소화 하고 안정화 할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 로봇 말단효과부의 동역학적 특성을 측정하여 피이드백(Feed back) 함으로써 부하의 상승시에는 수직축 발란싱 실린더에 발란싱 압력을 식 (2)에 의한 정상치 보다 높게 해주고 부하의 하강시에는 정상치 보다 낮아지도록 발란싱 압력을 능동적으로 제어하면 수직축 구동모터의 토오크를 현저히 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

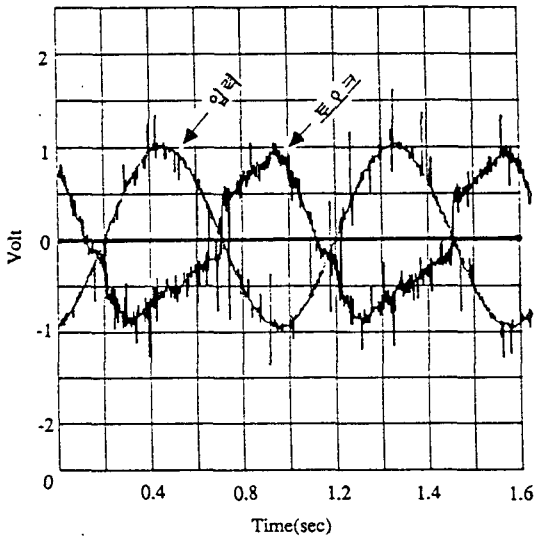

Fig. 9 W_L=100kg, 발란싱 압력이 3.2kgf/cm²일 때의 정현파 입력에 대한 개회로(Open loop) 토오크 응답

Fig. 10 및 Fig. 11은 각각 적절한 발란싱 압력이 설정되었을 때의 수평축 및 수직축의 1000펄스 계단입력(step input)에 대한 서보제어 위치응답이다. 여기서 1000펄스의 입력은 모터의 반바퀴에 해당하는 크기이며 수평, 수직 슬롯에서는 각각 2.5mm의 변위가 생기게 하고, 수평, 수직 말단효과부에서는 각각 17.5mm 및 20mm의 변위를 발생한다. 이 결과는 시스템 이득값(Gain)에 따사 달라질 수 있으나, 수직축의 경우, 발란싱 실린더가 시스템에 큰 감쇄(Damping) 효과를 주므로 오버슛(Overshoot)이 없이 정확하게 제어됨을 알 수 있다.

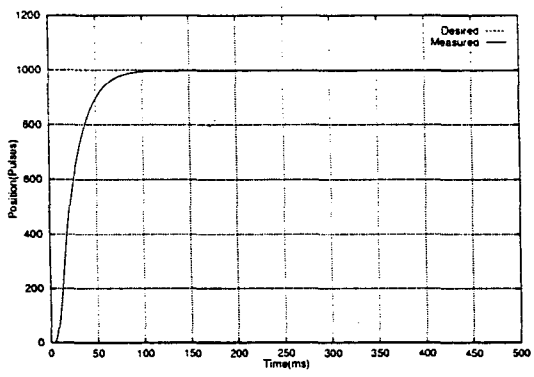

Fig. 10 서보제어시의 계단입력에 대한 수직축의 위치응답

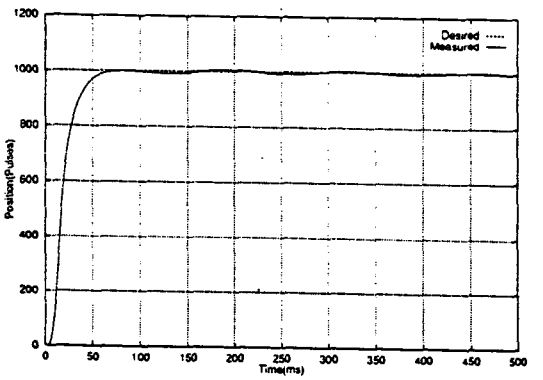

Fig. 11 서보제어시의 계단입력에 대한 수평축의 위치응답

5. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 이중 평행사변형 구조를 갖는 로봇 자체 몸무게 대 가반중량의 비가 4 : 1인 대중량물 취급용 로봇을 설계·제작하였다.

(2) 대중량물 취급용 로봇의 수평, 수직축 위치제어를 위해 공압실린더와 AC 서보모터로 동시에 구동되는 mechanism을 구성하였으며 그 결과 모터의 토오크와 동력전달 장치의 크기를 현저히 줄일 수 있었다.

(3) 개발된 대중량물 취급용 로봇의 작업부하에 따른 응답을 실험을 통해 비교하였으며, 그 결과 작업부하의 변화에 대해 일정하고 안정된 응답을 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. 박상덕, 정완균, 염영일, 1990, "대중량물 취급용 로봇의 위치제어를 위한 비례제어 및 단속제어를 혼합한 공기압 서보시스템의 개발" 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 189~192.
2. 정규원, 박상덕, 최진태, 1991, "전로 축로 자동화를 위한 로봇 시스템 개발(Ⅱ)", 산업과학기술연구소 연구보고서, pp. 6~8.