

1. 구동 시스템의 역학 모델

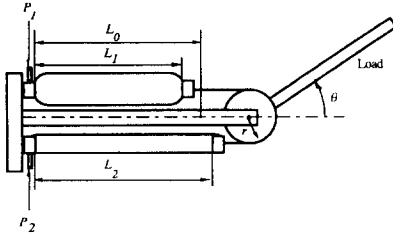


그림 1. 러버 액츄에이터 구동 시스템
Fig. 1. Rubber actuator drive system

그림 1은 두 개의 러버 액츄에이터를 사용하여 단일 축을 구동하는 시스템이다. 두 개의 러버 액츄에이터의 내부 압력이 동일한 상태를 초기 상태로 하면 각 러버 액츄에이터의 초기 상태로 부터의 수축률의 변화량, dY_i 는 식 (3) 과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} dY_1 &= r \theta / L_0 \\ dY_2 &= -dY_1 \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서,

- dY_1, dY_2 : 각 러버 액츄에이터의 수축률의 변화량.
- L_0 : 초기 상태의 러버 액츄에이터의 길이.
- r : 회전축의 반지름.
- θ : 회전량.

각 러버 액츄에이터의 내부 압력 및 수축률은 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} P_i &= P_{\theta} + dP_i \\ Y_i &= Y_{\theta} + dY_i \end{aligned} \quad (4)$$

압력과 수축률의 변화량이 작다고 가정하고 식 (4)를 러버 액츄에이터의 역학 모델식 (2)에 대입하면 수축률의 변화량을 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$dF_i = K_a dP_i - K_b \quad (5)$$

여기에서, $K_a = c - aY_{\theta}$, $K_b = dP_{\theta} + b$.

이를 회전축의 회전량과 두 개의 러버 액츄에이터 사이의 내부 압력차의 관계로 나타내면 다음의 운동 방정식이 얻어진다.

$$J \dot{\theta} + B \dot{\theta} + K_r \theta = K_t \Delta P \quad (6)$$

여기에서,

- J : 부하의 관성 모멘트, B : 점성 계수,
- $K_r = 2r^2 K_b / L_n$, $K_t = r K_a$, $\Delta P = P_1 - P_2$.

기본적으로 러버 액츄에이터에 의해 구동되는 로봇팔의 역학 관계는 이 운동 방정식에 의해 축에 가해지는 회전 구동력과 로봇팔 자체의 운동 및 공간 상의 위치에 의해 축에 가해지는 회전력과 상관 관계에 근거한다.

2. 제어 방식

먼저 각 러버 액츄에이터의 내부 압력을 조절하기 위한 공압 조

절 밸브 장치는 간단히 시간 지연을 갖는 일차 시스템으로 근사화할 수 있다. 즉 입력 신호와 출력 압력과의 관계를 나타내는 시스템 전달 함수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{P}{P_u} = \frac{K_v}{1 + Ts} \quad (7)$$

여기에서 P : 출력 압력, P_u : 입력 신호, K_v : 비례 상수, T : 시상수.

또한 (6) 식을 라플라스 변환하여 두 개의 러버 액츄에이터 간의 압력차를 입력으로 하고 축의 회전량을 출력으로 하는 시스템 전달 함수를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\theta}{\Delta P} = \frac{K_t}{Js^2 + Bs + K_r} \quad (8)$$

따라서 각 러버 액츄에이터의 내부 압력을 조절하여 축을 회전시키는 개루프(open loop) 시스템의 블록선도는 그림 2와 같다. 여기서 각 압력 조절 밸브 장치는 동일한 것으로 가정하였다.

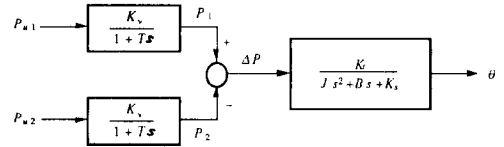


그림 2. 개루프 구동 시스템의 블록선도
Fig. 2. Block diagram of open-loop system

위의 러버 액츄에이터 구동 시스템은 시상수 T 가 충분히 작다고 가정하면, 정상 상태를 갖는 안정된 시스템이 되므로 개루프 제어가 가능하다. 그러나 실제 시스템은 계수 오차를 포함하며, 또 시상수 T 도 무시할 만큼 충분히 작지 않아서, 개루프 제어로는 시스템의 응답이 느리고 부하량의 변동 등에 의해 출력 오차가 발생하므로 보다 나은 시스템의 성능을 얻기 위해서는 폐루프 제어가 필수적으로 요구된다. 본 논문에서 사용한 폐루프 제어 방식에 대해 아래에서 설명한다.

위치 제어에는 일반적으로 선형 시스템의 폐루프 제어에 많이 사용되는 비례-적분-미분 제어 방식(PID Control)을 사용한다. 다음은 일반적인 PID 제어 방식을 나타낸 식이다.

$$\begin{aligned} dP_r &= K_p \theta_e + K_d \dot{\theta}_e + K_i \int \theta_e dt \\ \theta_e &= \theta_r - \theta \end{aligned} \quad (9)$$

여기에서,

- dP_r : 기준 압력 변화량,
- θ_r : 목표 회전량, θ : 실제 회전량, θ_e : 회전량 오차,
- K_p : 비례제어 계인, K_i : 적분제어 계인, K_d : 미분제어 계인.

그러나 실제 제어 시스템에서는 그림 3과 같은 기본적인 방식을 약간 변형시킨 PID 제어 방식을 사용한다 [9].

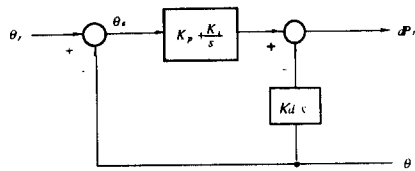


그림 3. PID 제어기의 블럭선도
Fig. 3. Block diagram of PID controller

한편, (6) 식에서 보여지는 바와 같이 러버 액추에이터는 스프링 특성을 가지며 이는 시스템의 응답 속도를 지연시킨다. 따라서 시스템의 응답 속도를 빠르게 하기 위해서는 이상의 제어 방식으로 얻어진 제어량에 스프링 특성을 보상해 주는 보정량을 더해 주어야 한다. 다음은 보정량을 결정하는 식이다.

$$P_c = K_s \theta / (2 K_i) \quad (10)$$

이로부터 각 러버 액추에이터의 내부 압력을 제어하기 위한 최종 기준 압력량은 다음 식으로 구해진다.

$$\begin{aligned} P_{r1} &= P_0 + dP_r / 2 + P_c \\ P_{r2} &= P_0 - dP_r / 2 - P_c \end{aligned} \quad (11)$$

압력 제어에 대해서는 충분히 빠른 응답 속도 및 정확도를 갖는, PWM 구동 방식의 서보 밸브 장치(servo valve unit, SVU) [8]를 사용하여 제어 구조를 간단하게 하였으나 최종 제어 목표인 압력차를 신속하게 얻기 위해서는 약간의 제어 보상을 해주어야 했다. 본 논문에서는 기준 압력과 실제 압력차의 오차에 대해 비례 제어 방식을 사용하여 SVU의 제어 입력량을 보정해서 제어 응답 시간을 단축시켰다. 다음은 SVU의 제어 입력량을 결정하는 식이다.

$$\begin{aligned} P_{u1} &= P_{r1} + K_e \Delta P_e \\ P_{u2} &= P_{r2} - K_e \Delta P_e \\ \Delta P_e &= \Delta P_r - \Delta P \\ \Delta P_r &= P_{r1} - P_{r2} \end{aligned} \quad (12)$$

여기에서,

K_e 는 비례 제어 게인.

그림 4는 이상에서 설명한 제어 방식에 의한 압력 제어 시스템의 블럭선도이다.

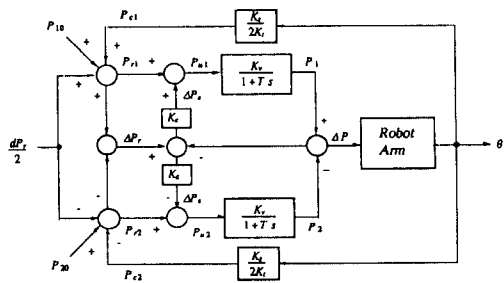


그림 4. 압력 제어 시스템의 블럭선도
Fig. 4. Block diagram of pressure control system

3. 시뮬레이션

이상의 제어 방식으로 두 개의 축을 갖는 로봇팔을 제어하는 컴

퓨터 시뮬레이션을 수행하여 실제의 제어 결과 및 특성을 예측하여 본다.

현재의 회전량과 회전 속도, 회전 가속도, 입력 압력량을 초기치로 하는 2차 미분 방정식을 수치 해석적으로 풀면 충분히 짧은 시간이 경과한 후의 회전량과 각속도를 구할 수 있다 [10]. 시뮬레이션에서 사용한 로봇팔의 파라미터들은 실제 로봇팔의 것을 측정과 실험을 통해 구하였으며 부록에 그 값들을 보였다.

그림 5는 시뮬레이션 결과를 보이는 그림이다.

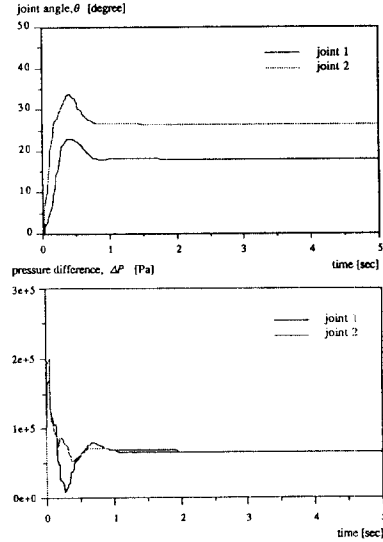


그림 5. 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulation results

IV. 실험 및 결과

1. 제어 시스템의 구성

그림 6은 로봇팔을 구동하는 러버 액추에이터의 내부 압력을 제어하기 위한 시스템의 개략도이다.

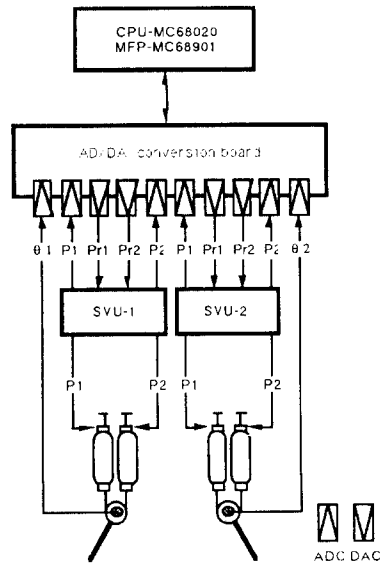


그림 6. 제어 시스템
Fig. 6. Control System

그림 7은 제어시스템의 실제 모습을 압축 공기를 얻는 공기압 시스템과 함께 보여준다. 공기압 시스템은 공기압축기와 공기압 필터, 감압밸브 등으로 구성된다.

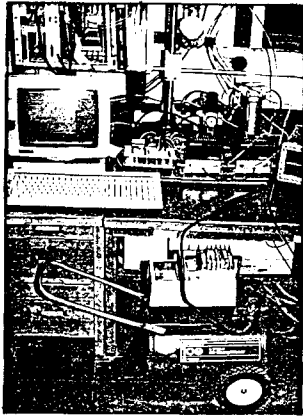


그림 7. 제어시스템과 공기압시스템
Fig. 7. Control System & air-pressure system

2. 로봇팔의 제작

로봇팔은 회전축을 갖는 두 개의 팔과, 위팔을 구동하는 러버 액츄에이터가 부착된 움직이지 않는 하나의 팔로 이루어져있다. 러버 액츄에이터는 자신이 부착된 팔에 연결된 축을 갖는 다음 팔을 구동하며, 아래팔에는 러버 액츄에이터가 부착되지 않는다. 그림 8은 430g 정도의 컵을 들어 올리는 로봇팔의 실제 모습을 보인다.



그림 8. 로봇팔의 모습
Fig. 8. Robot arm

3. 실험 결과 및 분석

그림 9는 제어량을 보정하지 않은 기준 압력만을 SVU에 입력 신호로 보냈을 경우의 1축 팔에 대한 축의 회전량을 보인다. 압력 감소축의 시간 지연으로 인하여 정상 상태의 위치에 도달하기도 전에 출렁임이 생기는 등 로봇팔의 운동 특성이 좋지 못하다. 그림 10은 식 (12)와 같이 제어량을 보정한 기준 압력으로 입력 제어를 하여 로봇팔을 제어하였을 경우의 1축 팔에 대한 축의 회전량을 보인다. 그림 9의 결과에 비해 로봇팔의 운동 특성이 상당히

좋아졌음을 알 수 있다. 그림 11은 위치 센서로부터 로봇팔의 실제 회전량을 알아내어 3장에서 설명한 PID 제어 방식을 사용한 폐루프 제어를 수행하였을 경우의 로봇팔의 각축의 회전량과 각 축을 구동하는 러버 액츄에이터의 내부 압력치의 기준량과 실제량을 보인다. 그림 11에서 보이는 바와 같이 정상 상태의 오차가 거의 없는(1도 이내) 출력을 얻을 수 있었다. 그러나 로봇팔의 견고성의 부족으로 초기압력을 크게 할 수 없었으며 이로 인해 응답특성이 우수하지는 못하였다.

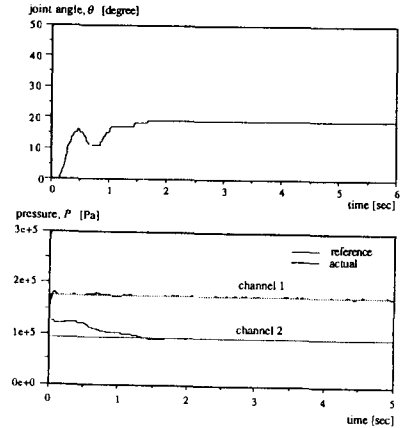


그림 9. 압력 보정을 하지 않은 개루프 제어 결과
Fig. 9. Open-loop control results without pressure compensation

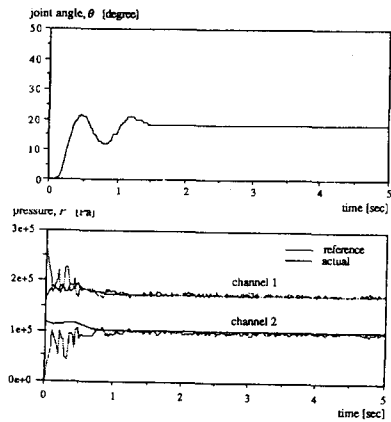


그림 10. 압력 보정을 한 개루프 제어 결과
Fig. 10. Open-loop control results with pressure compensation

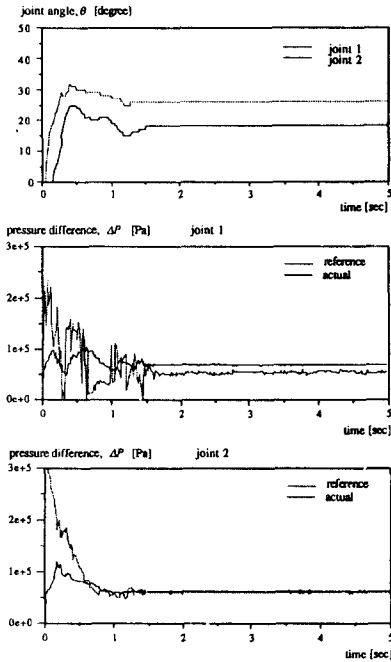


그림 11. 폐루프 제어 결과
Fig. 11. Closed-loop control results.

V. 결론

본 논문에서는 리버 액츄에이터로 구동되는 2축 로봇팔을 제작하였으며 이를 제어하기 위한 제어 방식을 개발하였고 공압 시스템과 제어 시스템을 구성하여 실제 제어를 수행하였다. 이상의 논문 연구를 통하여 리버 액츄에이터를 사용하는 로봇 매니퓰레이터의 특성 및 실용 가능성을 보였으며, 이의 개발을 위한 연구의 기초를 마련하였다.

보다 우수한 응답 특성을 얻기 위해서는 견고한 로봇팔을 제작하여 초기 압력을 보다 높게 설정할 필요가 있다. 또한 압력 제어의 응답 특성을 향상시킬 수 있는 제어 방식을 개발하여야 할 것이다. 하나의 예로서, 각각 분리된 압력 제어 성분을 종합적으로 취급할 수 있는 보다 총괄적인 제어 방식이 제안되어질 수 있다. 이러한 연구를 통하여 보다 향상된 시스템이 구성되었다면 리버 액츄에이터의 여러가지 장점을 살린 다양한 응용 작업을 설정하여 이를 수행할 수 있는 제어 방식을 개발할 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. K. Tanie, "Research Review of Robot Actuators," JRSJ, Vol. 2 No. 4, 1984.
2. K. Inoue, "Rubbertuators and Applications for Robots," Proc. of the 4th Int. Symp. of Robotics Research, 1987.
3. K. Miyata and H. Hanafusa, "Modeling and Control of Pneumatic Rubber Actuator Drive Mechanism," Proc. of the 20th Int. Symp. on Industrial Robots, 1989.
4. O. Sonoyama, et al., "Motion Control of Pneumatic Rubber Artificial Muscles," The 28th SICE Annual Conference, 1989.

5. J. K. Mills, "Hybrid Actuator for Robot Manipulators: Design, Control and Performance," Proc. of the Int. Conf. on Robotics and Automation, 1990.
6. K. S. Fu, et al., Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence, McGraw Hill, 1988.
7. R. P. Paul, Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control, MIT Press, 1982.
8. M. W. Spong and M. Vidyasagar, Robot Dynamics and Control, John Wiley & Sons, 1989.
9. K. J. Astrom and B. Wittenmark, Computer Controlled Systems: Theory and Design, Prentice-Hall International, 1984.
10. W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, Numerical Recipes in C, Cambridge University Press.
11. Servo Rubbertuator Kit Operation Manual, Bridgestone.
12. Servo Drive Unit Operation Manual, Bridgestone.
13. MVME133 32-bit Monoboard Microcomputer User's Manual.
14. MVME133 Debug Monitor User's Manual.
15. MC68020 32-bit Microprocessor User's Manual.
16. MC68901 Multi-Function Peripheral Data Sheet.

부록

로봇 팔의 parameters

	J [kgm ²]	B [Nm s/rad]	K _t [Nm/rad]	K _i [m ³]
위팔	0.025	0.18	2.47	8.3e-6
아래팔	0.005	0.10	0.80	4.5e-6
중량 [kg중]	길이 [mm]	축지름 [mm]	회전범위[도]	
위팔	0.91	465	26	+60
아래팔	0.39	377	24	+52
l ₁ : 156mm, l ₂ : 143mm				