

공압구동식 로봇손을 위한 소형 4/3-way 비례제어밸브의 설계 및 실험

Design and Experiment of a miniature 4/3-way proportional valve for a servo-pneumatic robot hand

류 시복, 김 상만, 홍예선(한국과학기술연구원)

S. B. Ryu, S. M. Kim, Y. S. Hong(Korea Institute of Science and Technology)

ABSTRACT

In the past decade, industrial robots have substituted human workers successfully in certain areas, however, the applications are limited due to the shortcomings in their mechanism and control strategies. Many researchers, therefore, have focused on improving the mechanical and sensory capabilities. Developing multi-degree-of-freedom end effectors, in other words robot hands, is one of the topics that researchers have begun to improve the limitation. A set of direct drive type servo-pneumatic finger joints has been developed for a dexterous robot hand. To control the pneumatic finger joints, a prototype 4/3-way proportional control valve has been designed and tested as a preliminary, research for the control of the pneumatic finger joints. A series of experiments have been conducted to verify the performance characteristics of the valve and the conventional proportional error control with minor-loop compensation has been used to control the angular position of the finger joints.

Key words: Robot hands(로봇 손), Flapper valve(플래퍼 밸브), Proportional control valve(비례 제어 밸브)

1. 서론

로봇은 산업 현장에서 생산의 극대화를 위하여 인간 대신에 여러 작업을 수행하여왔다. 또한 최근에는 로봇이 특수한 목적으로 인간의 신체적 한계를 넘어서는 우주 탐사나 화산 탐사, 해저 탐사 등의 분야와 의료분야 등에서 까지 폭넓게 활용된다¹. 이미 선진국에서는 인간을 대체하는 인간형 로봇에 대한 연구가 1980년대부터 추진되어 왔다.

이와 관계하여 단순한 그리퍼(gripper)의 차원을 넘는 인간의 손을 모사 하는 로봇 손의 개발에 많은 연구가 여러 곳에서 진행되어 왔는데, Utah/MIT hand, Stanford/JPL hand, Barrett hand, Toyota hand 등이 그 예이다.

로봇 손에 관한 연구는 초음파 모터나 직류 전기 모터와 감속기 혹은 하모닉 드라이브 등을 조합하여 관절에 직접 장착하는 방식을 사용한 것이 있다. 그러나 이 방식은 로봇 손의 크기와 부피가 커지며 이로 인하여 매니퓰레이터(manipulator)의 운동특성에 영향을 미치는 단점이 있다².

이런 단점을 최소화하기 위하여 모터와 감속기를 로봇의 몸체에 장착하고 테플론 코팅된 철선(tendon)과 관(conduit) 그리고 풀리(pulley) 시스템을 이용한 소위 텐던방식의 로봇 손도 개발되었다. 텐던 방식은 간결한 손의 형태를 갖는 장점이 있으나 철선의 신축과 관 내부에서의 마찰 등에 의한 정밀한 위치 제어가 힘들고 높은 구동력을 얻기 어려운 단점이 있다².

이와 같은 방식들의 단점은 전기 시스템보다 단위 무게 당 출력이 큰 공압 구동식 방법을 사용하여 로봇 손을 제작할 경우 보완될 수 있다. 본 연구는 공압을 이용한 직접 구동식 로봇 손 개발과제의 일환으로 수행된 공압 구동 회전축 제어를 위한 소형 비례 제어 밸브의 개발에 관한 것이다.

공압을 이용한 위치제어 방식에는 공압 서보 밸브를 이용하거나 on/off 밸브를 이용하는 PWM 방식 등이 있으나 공압 서보 밸브는 값이 비싸고 오염에 민감한 단점이 있고, PWM 방식의 on/off 밸브는 소

음과 진동의 문제 등이 있다.

본 논문에서 개발한 4/3-way 방식의 소형 비례 제어 밸브는 소형 on/off 밸브를 개조한 것으로 최대 6기압(bar)에서 작동한다. 일반적으로 압축공기를 작동유체로 사용하는 공압 구동방식은 압축성 등으로 인한 정밀한 위치제어가 전기식이나 유압식보다 어려운 점이 있다. 그러나 이러한 단점은 비선형성을 보상할 수 있는 제어 알고리즘을 이용하면 극복될 수 있다^{5,6}.

2. 밸브의 구조 및 설계

2.1 밸브의 구조

플래퍼 밸브는 플래퍼와 노즐사이의 간극을 변화시켜 유량을 조절하게 되는데, 유체의 누설로 인한 동력의 손실이 크게 문제가 되지 않는 경우에 사용한다³. 본 논문에서 제작한 4/3-way 방식의 밸브는 이중 플래퍼 노즐 밸브(Double flapper nozzle valve)를 기본개념으로 하여 제작하였으며 Fig. 1 은 이 밸브의 개략적인 구조를 나타낸 것이다^{3,4}. 플래퍼 밸브의 압력-유량곡선을 참고하여 보면, 이 밸브는 선형성이 좋은 특성이 있고, 제어하기가 용이하다³.

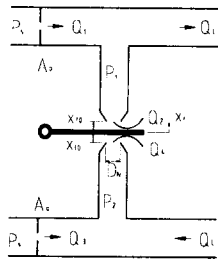
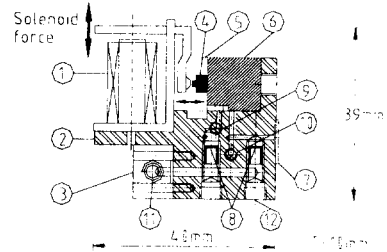


Fig. 1 Schematic diagram of double flapper valve

본 연구에서 제작하는 로봇 손은 각각 3관절을 갖는 4개의 손가락으로 구성되므로 총 구동축의 숫자는 12개이며 이 축들의 제어를 위하여 동수의 비례 제어 밸브가 필요하다. 이와 같은 다수의 밸브를 제작할 경우 호환성과 재현성을 보장하기 위하여 제작하는 부품의 수를 줄이고 제조 공정의 단순화를 위하여 상용화 되어있는 소형 3/2-way on/off 공압 밸브를 개조하여 사용하였다. 밸브 구동 솔레노이드는 양산되어 사용되고 있는 직류 동작식 릴레이의 솔레노이드 부분을 이용하여 제작하였다.

Fig. 2 는 본 연구에서 제작한 밸브의 구조를 나타낸 것이다. 1차 오리피스는 밸브 블록 안에 내장되어 조립되고 각각의 포트의 압력측정을 위한 압력 센서 2개도 밸브블록에 장착되는 구조로 되어있다. 사용된 압력센서의 크기는 가로와 세로가 각각 1cm 정도이고 두께는 4 mm 정도이다.



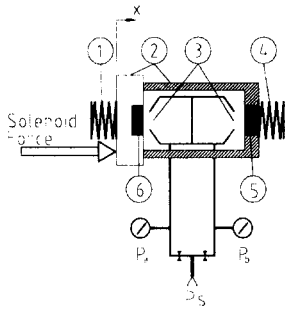
1:Solenoid, 2:Valve block, 3:Manifold, 4:Flapper plunger, 5:Spring, 6:Valve, 7:Pressure sensor, 8:Orifice, 9:A port, 10:B port, 11:P port, 12: Plug hole

Fig. 2 Cut off view of proportional solenoid valve

솔레노이드(1)에 전류가 인가되면, 플래퍼 플런저(4)가 수평방향으로 앞뒤로 움직이며, 전류가 단락되면 밸브(6)내부에 조립되어 있는 스프링에 의해 플래퍼 플런저가 원상으로 복귀하게 된다. 밸브 구동 솔레노이드와 힘의 평형을 유지하기 위한 스프링이 2개인데 앞 스프링의 경우는 박판 스프링을 에칭 공법으로 제작하였고 뒤 스프링은 코일 스프링을 사용하였다. 뒤쪽 스프링과 플래퍼 플런저에는 플래퍼 노즐을 막기 위한 고무 패키징이 조립 되어있다. (Fig. 3참조).

Fig. 3은 밸브의 구조를 개략적으로 나타낸 것이다. 본 밸브는 상용화된 on/off 밸브를 개조하여 사용하였기 때문에 그 형태에 있어서 일반적인 이중 플래퍼 노즐 밸브의 구조와 약간의 상이점이 있다 (Fig. 1 참조). Fig. 3에서 보듯이 두 노즐 사이에 플래퍼가 조립된 일반적인 경우와는 다르게, 반대 방향으로 가공된 두 노즐을 'c'자 모양의 플래퍼에 해당하는 부품과 플래퍼 플런저의 조합으로 노즐의 간극을 조절하는 구조이다.

플래퍼의 위치 제어를 위하여 솔레노이드를 전압-전류 변환기(voltage-current converter)에 연결하여 입력 전압 신호에 따라 전류가 비례적으로 제어되도록 하였다.



1,4: Spring, 2: Flapper Assembly, 3: Nozzle, 5,6: Rubber Seal

Fig. 3 Schematic diagram of modified flapper type proportional valve

솔레노이드에서 발생하는 자력을 각기 다른 조건에서 측정한 결과는 Fig. 4에서 보는 바와 같다. 이 결과에서 보듯이 사용한 솔레노이드가 비례제어를 위한 전용 솔레노이드가 아닌 관개로 선형구간의 자력의 효율이 높지 않은 것을 알 수 있다.

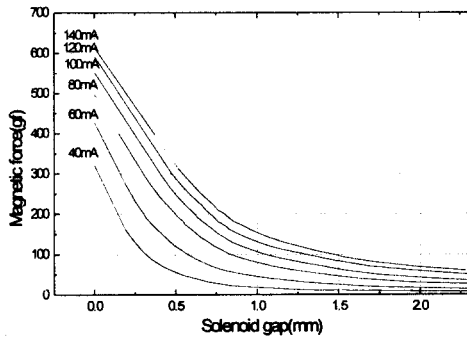


Fig. 4 Solenoid forces at different current

2.2 고정 오리피스 설계

플래퍼의 변위에 따라 제어 압력을 조절하는 경우는 노즐의 단면적 보다는 커튼 면적(Curtain area)이 중요하게 고려된다^{3,4}. 측정된 플래퍼 밸브의 노즐 직경은 0.5 mm 이고 플래퍼와 노즐 사이의 중립위치에서의 간극(Gap) X_{fo} 값은 0.085 mm로 측정되었다.

중립위치에서의 오리피스의 비가 1이 되도록 설계 표준을 정하면 식(1)에 의하여 고정 오리피스의 직경을 다음 식을 사용하여 계산할 수 있다^{3,4}.

$$\frac{C_{df} A_f}{C_{do} A_o} = 1 = \frac{C_{df} \pi D_N x_{fo}}{C_{do} A_o} \quad (1)$$

일반적으로 오리피스는 가공상의 이유로 그 길이와 직경비가 2에서 4사이 정도의 값을 갖게 되기 때문에 단관(short tube) 형태의 오리피스로 고려된다. 이때 오리피스의 유량계수 C_{do} 는 칩각(sharp-edged) 오리피스의 경우인 0.6 보다 큰 0.8에서 0.9 정도의 값을 갖게 되며 플래퍼 노즐에서의 유량계수는 노즐과 플래퍼간의 커튼면적에 의해 결정되어야 한다. 그러나 복잡한 형상으로 인하여 계산이 쉽지 않은 까닭에 Lichtarowicz등이 실험에 의하여 확인한 0.6의 값을 택하였다^{3,4}.

이와 같은 각 변수의 값을 대입하여 오리피스의 직경 D_o 를 0.33mm로 정하였으나 가공상의 편의를 고려하여 0.3 mm로 정하였다.

3. 밸브의 특성 실험

3.1 Blocked load 특성 실험

위에서 서술한 바와 같이 제작된 직경 0.3 mm의 오리피스를 이용하여 실험한 부하고정특성(Blocked load characteristic)곡선의 실험 값과 이론적 계산 값은 Fig. 5와 같다.

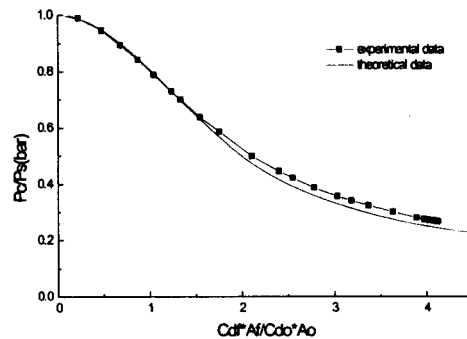


Fig. 5 Blocked load characteristic curve

부하고정특성이란 부하가 걸리는 쪽의 유량이 없을 경우, 즉 부하가 고정되어 있을 경우의 플래퍼 변위와 포트 압력간의 특성을 말하는 것이다. 이를 위한 실험은 Fig. 6에서와 같이 압력계와 유량계

를 설치하고, 밸브의 플래퍼 간극을 마이크로미터로 조절하며 오리피스의 양단의 압력을 측정하였다.

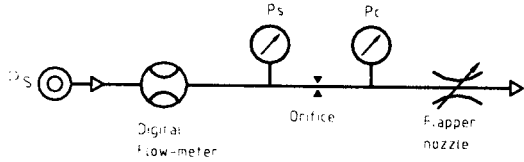


Fig. 6 Experimental setup for blocked load characteristics

3.2 밸브의 정특성 및 동특성 실험

본 논문에서 제작한 밸브의 솔레노이드에 인가되는 전류를 변화시키며 레이저 센서를 이용한 변위 측정 결과는 Fig. 7과 같다. 이 측정에는 전압-전류 변환기를 사용하여 0-5 Volt의 입력 신호 범위에서 최대 120mA 전류가 솔레노이드에 인가되도록 게인 값을 정하였고 밸브의 히스테리시스를 줄이기 위한 디더(dither)신호를 첨가 하였다.

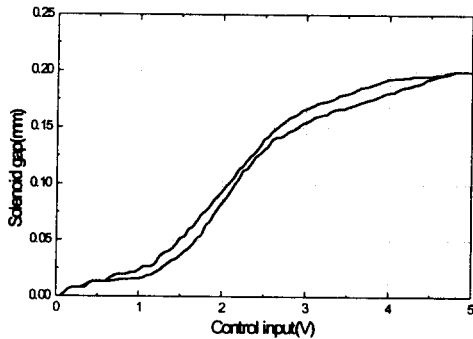


Fig. 7 Control input versus solenoid gap measurement

이때의 밸브의 정적 특성은 Fig. 8에서 나타난 것과 같다. 이 그래프는 제어 입력 전압에 따른 밸브의 양쪽 포트에서 측정한 압력을 나타낸 것으로, 밸브의 구조상 마찰과 고무패킹(seal)등에 의한 히스테리시스가 존재하는 것을 보인다.

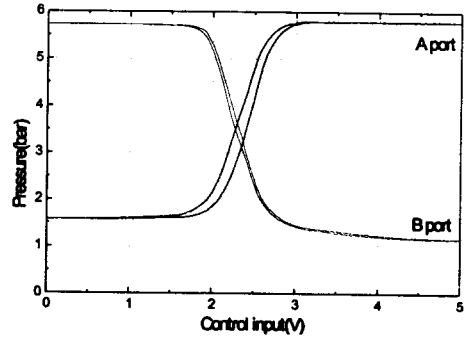


Fig. 8 Control input versus pressure characteristic of the valve

Fig. 9는 제어 신호를 사각파로 입력하였을 경우에 플래퍼의 변위 응답특성을 측정한 결과이다. 점선으로 나타낸 솔레노이드의 위치 명령 값을 거의 완벽하게 추종하는 것을 보여주는데, 이는 제어에서 솔레노이드의 동적 특성이 무시되어도 됨을 보여준다.

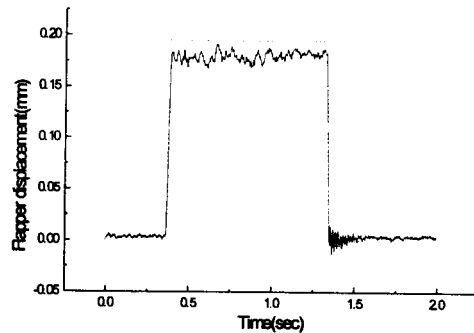


Fig. 9 Step input response of flapper displacement

Fig. 10은 제어 압력의 동적인 특성의 실험 결과를 나타낸 것이다. 스텝 입력에 따른 압력의 상승과 하강시의 응답시간은 대략적으로 0.4초 이내로 나타난다. 응답속도를 빠르게 하려면 고정 오리피스의 직경을 크게 하여 유량을 키우는 것이 가능하나, 이 경우 로테이터를 구동하는 제어압력의 차가 작아지고 공압 로테이터의 내부 마찰 등으로 인한 정상상태 오차(steady state error)가 커지게 된다. 그러므로 오리피스의 직경을 변화시키려면 솔레노이드와

스프링 등이 동시에 새롭게 선정 되어야 하며 플래퍼의 중립위치와 같은 다른 설계 변수의 변화도 함께 고려되어야 한다.

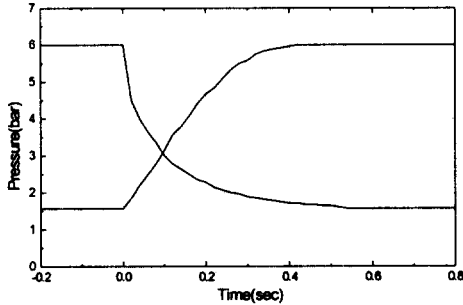


Fig. 10 Step input response of control pressure

4. 공압 손의 위치제어 실험

본 연구에서 플래퍼 노즐의 이론에 기초하여 제작한 4/3-way 소형 공압 비례제어 밸브의 궁극적인 목표는 로봇 손을 구동하기 위한 것이므로, 로봇 손의 1차 시제품을 이용한 관절각도의 위치제어가 수행되었다.

일반적으로 공압시스템에서 P 제어기를 사용하는 경우에는 시스템 자체의 댐핑이 적은 이유로 낮은 비례이득을 사용하게 되고, 이로 인하여 시스템의 과도응답 특성이 느려지며 정상 상태 오차(Steady state error)가 커지게 된다^{5,6,7}. 이러한 시스템의 응답 특성 문제점을 개선하기 위해 속도와 가속도 귀환 루프를 제어기에 첨가하는 방법이 있으나, 이 값들의 측정을 위한 별도의 센서를 장착하는 것은 로봇 손의 크기와 형태를 고려할 때 바람직하지 않다.

또한 이 값들을 얻기 위하여 위치 센서의 측정값을 미분한 속도나 속도 값을 미분한 가속도의 값을 사용할 경우는 노이즈의 문제로 인하여 좋은 결과를 기대할 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 공압 손에 장착되어 있는 압력센서를 이용하여 로테이터 양단의 압력을 측정하고, 이 압력차 값을 가속도 대신에 귀환하여 위치제어를 구현하는 방법을 사용하였다. 이것은 로테이터 내부의 중력과 마찰력을 무시할 경우 로테이터의 가속도에 비례하는 것을 이용한 것이다.

Fig. 11은 본 연구에서 사용된 제어기의 구성을 나타낸 것이다. 회전축의 각도 측정값과 로테이터의 양단의 측정된 압력 값이 아날로그-디지털 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력되고 위에서 언급한 제어방식

에 의한 적절한 제어 값이 계산되어 디지털-아날로그 변환기를 통하여 제어신호로 출력된다. 이 제어신호는 밸브의 솔레노이드를 구동하기 위한 전압-전류 변환기에 입력되고 이 변환기는 전압신호에 비례하는 전류를 솔레노이드에 인가함으로써 플래퍼의 변위를 제어하게 된다.

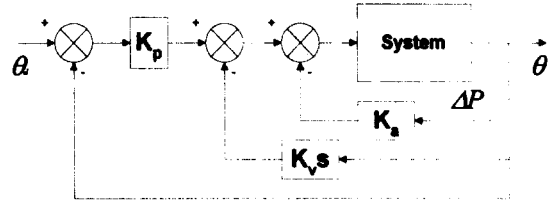


Fig. 11 Proportional error control with minor loop compensation

Fig. 12는 본 연구에서 제작된 밸브를 이용하여 실제 위치제어를 수행한 결과의 예이다. 이 실험에서는 중립위치를 50도로 정하고 진폭을 상하 15도로 명령하였다. 입력 신호에 따른 위치추종 결과를 각각 다른 비례 이득 값($K_p=0.09, 0.11, 0.13$)에 따라 나타내었는데, 이 경우의 속도와 압력 차를 이용한 귀환이득은 최적화된 동일한 값을 사용하였다 ($K_v=0.02, K_a=0.17$). 그러나 다른 회전각도의 위치제어를 위하여 다른 제어성능으로 인한 귀환 이득 값의 변화가 필요하게 된다.

이 실험에서 최적화된 각각의 귀환이득 값($K_p=0.11, K_v=0.02, K_a=0.17$)을 사용하여 위치제어를 할 경우의 시간 지연을 포함한 응답속도가 0.25초 이내에 들어오는 것을 보여준다.

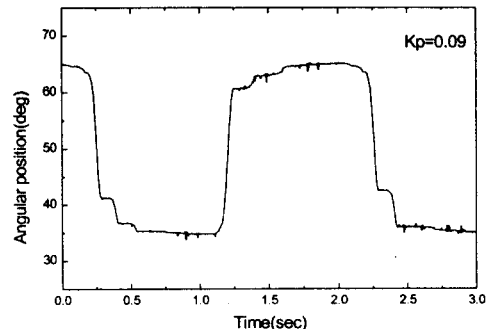


Fig. 12 Experimental results for position control with different feedback gain
(Continued)

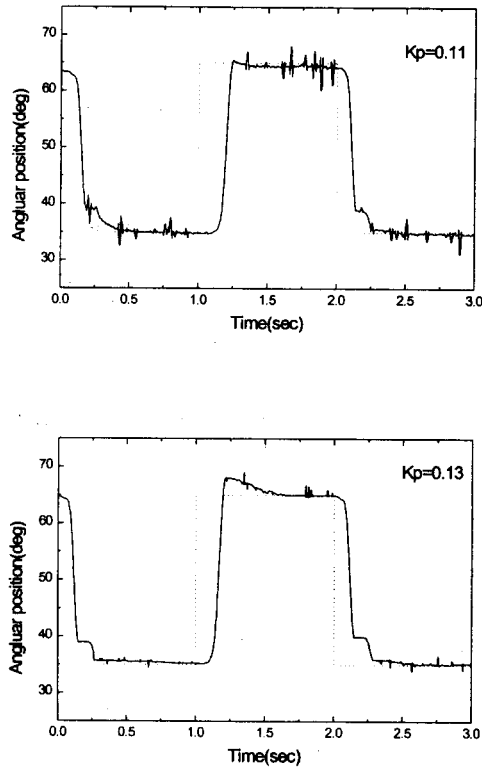


Fig. 12 Experimental results for position control with different feedback gain

5. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 공압 구동식 로봇 손의 개발을 위한 연구의 일환으로 초소형 공압 비례 방향제어 밸브를 개발하고, 이것의 성능을 시험하여 그 사용가능성을 검증하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 공압 구동식 로봇 손의 위치제어를 위하여 소형 on/off 밸브를 개조하여 비례제어 밸브로 사용가능한 것을 보였다. 솔레노이드의 자기력의 선형성 구간을 극대화하여 효율을 높이면 더 작은 밸브의 개발이 가능하다. 또한 이때, 플래퍼 양단의 스프링 힘과 유동력(Flow force)이 솔레노이드의 자력과 평형을 이루는 설계가 수행되어야 한다.

2) 플래퍼 밸브의 고정 오리피스 설계는 밸브개

발의 중요한 요소로서 노즐의 간극과 노즐의 직경을 통하여 설계 기준에 따라 정할 수 있다.

3) 본 연구에서 개발된 밸브를 이용하여 위치제어를 하는 경우, 비례 귀환 이득, 속도 귀환이득과 로테이터의 양단의 압력 차를 이용하여 위치제어를 적절하게 수행할 수 있었으나, 각각 다른 위치 명령값의 추종제어를 위하여 오차에 따른 각각의 귀환이득을 찾아낼 수 있는 알고리즘 개발이 필요하다.

4) 로봇 손의 중요한 기능은 적절하게 힘을 조절하여 물건을 잡을 수 있는 것이므로, 장착된 압력 센서를 이용하여 위치제어와 동시에 힘제어를 수행할 수 있는 알고리즘을 개발한다.

참고 문헌

1. Luh, J.Y.S. "An Anatomy of Industrial Robots and Their Control," IEEE Trans. on Automatic Control, V.AC-28, #2, pp133-153, Feb., 1983
2. Mason, M. T. Salisbury, J. K., *Robot Hands and the Mechanics of Manipulation*, M.I.T. Press.
3. Merritt, H. E., *Hydraulic control systems*, John Wiley & Sons.
4. Watton, J., *Fluid power systems*, Prentice Hall.
5. Moore, P.R., Weston, R.H., Thatcher, T.W., "Compensation in pneumatically actuated servomechanism," Trans. Inst. Measurement and Control, Vol. 7, No.5, pp238-245, Oct-Dec., 1985
6. Moore, P.R., Ssenkongo, F.W. Weston, R.H., Thatcher, T.W., Harrison, R., "Control strategies for pneumatic servo drives", Int. J. Prod. Res., Vol. 24, No.6, pp 1368-1382, 1986
7. 황태주, "소형 공압 로테이터의 변위 제어를 위한 플래퍼 노즐형 3/2-way 서보밸브의 설계 및 실험," 고려대학교 기계공학과 석사학위 논문, 1997
8. Liv, s. , Bobrow, J. , "An Analysis of a Pneumatic Servo System and its Application to a Computer-controlled Robot," ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.110, 1988