

공압 구동식 로봇 손을 위한 소형 4/3-way 비례제어 밸브의 설계 및 실험

류시복*, 홍예선*

Design and Experiment of a Miniature 4/3-Way Proportional Valve for a Servo-Pneumatic Robot Hand

ShiBok Ryu*, Yeh-Sun Hong*

ABSTRACT

Developing robot hands with multi-degree-of-freedom is one of the topics that researchers have recently begun to improve the limitation by adding flexibility and dexterity. In this study, an articulated servo-pneumatic robot hand system with direct-drive joints has been developed whose main feature is the miniaturization of the dimension. The servo-pneumatic system is advantageous to fabricate a dexterous robot hand system due to the high torque-to-weight and torque-to-volume ratio. This enables the design of a finger joint with an integrated rotary vane type actuator which produces high output torque without reduction gears, being very robust. In order to control the servo-pneumatic finger joints, a miniature proportional valve that can be attached to the robot hand is required. In this paper, a flapper nozzle type 4/3-way proportional directional valve has been designed and tested. The experimental results show that the developed valve can control a finger joint satisfactorily without much vibratory joint movements and acoustic noises.

Key Words : Robot hands(로봇 손), Finger joints(손가락 관절), Flapper nozzle valve(플래퍼 노즐 밸브), 4/3-way proportional valve(4/3-way 비례제어 밸브), Pneumatic rotator(공압 로테이터)

기호설명

C_d : 플래퍼 노즐의 유량계수
 C_{db} : 고정 오리피스스의 유량계수
 A_f : 플래퍼의 커튼 면적
 A_o : 고정 오리피스스의 단면적
 D_N : 노즐의 직경

x_0 : 평형상태의 플래퍼 위치
 x_f : 플래퍼의 변위

1. 서론

인간형 로봇 손을 개발하고자 하는 연구는 로봇의 파지

* 한국과학기술연구원 휴먼로봇 연구센터

기능에 능숙성(dexterity)과 유연성(flexibility)을 부여하고자 하는 것이 궁극적인 목표이지만, 기술적으로는 손가락 관절의 설계, 손 동작의 제어 등에 있어서 해결해야 할 많은 과제들을 제시해 주기 때문에 연구 대상으로서의 관심이 높아지고 있다.

인간형 로봇 손은 그 형태나 크기가 인간의 손을 닮아야 한다는 점에서 일반적인 다관절 로봇 손과 구분할 수 있다. 현재까지 개발되어 온 인간형 로봇 손은 손가락 관절을 전기 모터로 구동하기 위하여 텐던 구동장치(tendon drive)를 이용한 방식^(1,2), 타이밍 벨트를 이용한 방식, 또는 기계적 링크를 이용한 방식^(3,4) 등이 있고, 전기 모터를 사용하지 않고 유압 실린더를 이용한 방식⁽⁵⁾도 있다.

텐던 구동방식은 주지되고 있는 바와 같이 와이어와 튜브 간의 마찰력과 와이어의 신장으로 인해 구동력의 전달이 정밀하게 재현되지 못한다는 단점이 있고 손을 작게 만들 수는 있으나 손 외부에 설치되는 텐던 구동모터는 손보다 5~10배 정도 큰 공간을 요구한다.

타이밍 벨트를 이용한 방식은 구동 모터를 손가락에 수직으로 장착할 수 밖에 없기 때문에 그 형태가 인간형과는 다소 거리가 먼 것이 대부분이고, 기계적 링크 방식은 구조가 복잡하고 손 안에 내장된 전기 모터의 크기로는 충분한 관절 구동 토크를 내기 어렵다는 문제점을 갖는다. 그밖에 유압실린더를 이용한 방식은 손 외부에 설치되는 서보 밸브의 설치 공간이 역시 손보다 몇 배 크게 요구된다.

인간형 로봇 손의 개발을 위한 새로운 시도로서 소형의 공압 로테이터로 손가락 관절을 직접 구동하고 이 공압 로테이터의 회전 변위와 구동 토크를 제어하기 위한 소형의 4/3-way 비례제어 밸브를 개발하여 로봇 손 안에 내장 시키는 연구가 저자들에 의해 진행되고 있는데, 본 논문은 소형 4/3-way 방식 비례 방향제어 밸브의 개발에 관한 것이다.

공압 로테이터는 전기모터보다 무게 당 출력비가 높다는 장점이 있고, 손가락 관절을 직접 구동할 수 있으므로 로봇 손의 경량화와 소형화가 가능하다. 반면에 공기의 압축성, 로테이터 내부의 마찰력, 비례제어 밸브에서의 비선형적 특성들로 인하여 유압식이나 전기식 구동방식보다 정밀한 제어가 어렵다는 일반적인 문제점을 안고 있다. 그러나 이러한 문제점들은 현재까지 개발되어 온 다양한 제어 알고리즘들을 응용함으로써 충분히 극복될 수 있을 것이다.

본 논문에서 소개하는 4/3-way 방식 소형 비례제어 밸브는 플래퍼 밸브를 기본 모델로 하여 개발되었는데, 스푼(spool) 밸브에 비하여 소형화가 가능하고 밸브의 제작이 용이하다는 장점이 있다. 여기에서 간단한 솔레노이드 밸브를 사용하여 펄스 폭 변조(PWM)를 하지 않고 굳이 비례제어 밸브를 개발한 이유는 PWM 제어 방식을 사용해 본 결과, 밸브의 잦은 개폐로 인한 소음과 손가락 동작이 단속적으로 이루어지는 현상을 수반하였기 때문이다. 이러한 문제점은 참고문헌 [6,7,8]에서도 지적된 바 있다.

2. 4-3way 비례제어 밸브의 구조 및 설계

본 연구에서 개발한 4-3way 비례 방향제어 밸브는 이중 플래퍼 밸브(double flapper valve)로서 그 일반적인 원리는 Fig. 1과 같다. 여기에서 공급압력 P_s 와 각 포트의 압력 P_1 및 P_2 가 주어졌을 때 플래퍼의 변위 x_f 와 부하 유량 Q_L 간의 관계는 아래와 같다^(9,10).

$$Q_L = Q_1 - Q_2 = C_{d0}A_0 \left[\frac{2}{\rho} (P_s - P_1) \right]^{\frac{1}{2}} - C_{df}\pi D_N (x_{f0} - x_f) \left(\frac{2}{\rho} P_1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$Q_L = Q_4 - Q_3 = C_{df}\pi D_N (x_{f0} + x_f) \left(\frac{2}{\rho} P_2 \right)^{\frac{1}{2}} - C_{d0}A_0 \left[\frac{2}{\rho} (P_s - P_2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

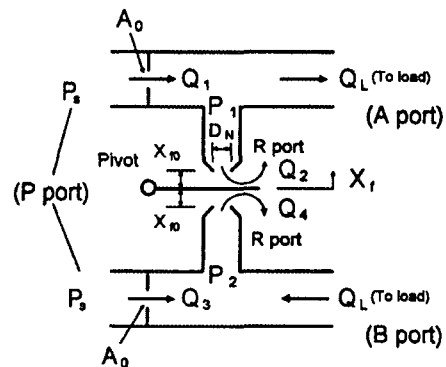


Fig. 1 Schematic diagram of a double flapper valve

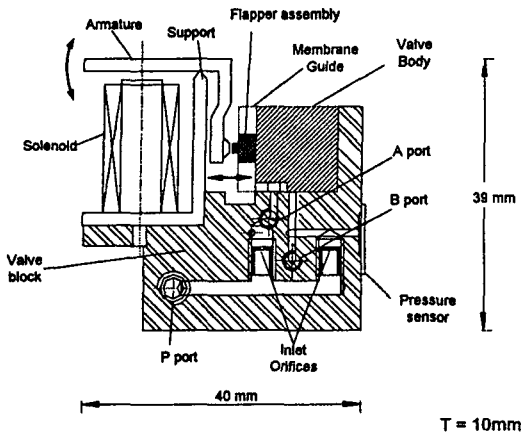


Fig. 2 Cut-off view of a proportional valve

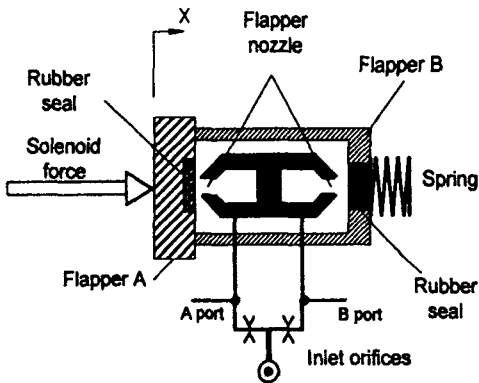


Fig. 3 Schematic diagram of a double flapper valve

이중 플래퍼 밸브는 스플 밸브와 달리 P-포트에서 A/B-포트를 연결하는 입구 오리피스가 불변이고 A/B-포트를 R-포트로 연결하는 출구 오리피스만 플래퍼 변위에 의해 조절될 수 있는 밸브이다. 그리고 중립 위치에서 모든 포트가 연결되므로 언더 랩(under lap)을 갖는 밸브이다. 따라서 중립위치에서도 가압 공기가 대기중으로 방출되는 단점이 있으나 선형성이 좋다는 더 중요한 장점을 갖는다.

이 플래퍼 밸브의 가장 중요한 설계 조건은 다량의 밸브를 로봇 손에 내장하기 위한 밸브의 소형화이다. 예를 들어 3관절을 갖는 손가락 4개로 구성된 로봇 손을 제어하려면 모두 12개의 밸브가 요구된다. 12개의 밸브를 동일한 성능이 보장되도록 수작업으로 제작하는 것은 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 자체 제작하는 부품 수를

최소화하고 제조공정을 단순화하기 위하여 상용화 되어 있는 플래퍼 밸브형 공압 솔레노이드 밸브의 부품을 활용하였다. Fig. 2 는 본 연구에서 제작한 밸브의 구조를 도시한 것이다. 가로와 세로가 각각 12mm 이며 두께가 10mm인 밸브 본체는 Fig. 3 과 같은 이중 플래퍼 밸브가 내장된 상용 부품이고, 2개의 입구 오리피스(inlet orifice)와 각 챔버의 압력을 측정하기 위한 2개의 실리콘 압력센서가 밸브블록에 내장되었다. 사용된 압력센서는 Data Instruments사의 CPC100 모델로서, 최대 사용 압력은 7 Bar이며 센서의 선형성은 $\pm 0.5\%$, 반복성은 0.3%, 응답 시간은 0.1ms의 특성을 갖는다.

플래퍼 노즐은 직경이 0.5mm이고, 플래퍼 노즐들이 Fig. 3에서 보는 바와 같이 서로 등지고 있기 때문에 들로 나뉜 플래퍼는 두개의 붓을 통해 연결되어 있다. 플래퍼 노즐의 최대 간극은 0.085mm 이며 6기압의 압력차에서 최대 10 l/min 의 유량을 통과시킬 수 있다.

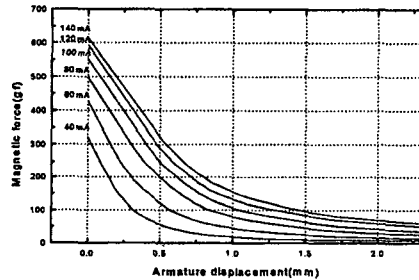


Fig. 4 Magnet force-to-armature displacement curves of the solenoid

밸브 제작에 사용된 솔레노이드도 역시 호환성을 고려하여 일반 직류 릴레이 중에서 충분한 자력을 발생시키는 솔레노이드 부분을 선정하여 활용하였는데, 코일의 권선수는 약 2900회이고, 코일 저항은 165Ω이며 정격 전류는 140mA이다. 선정된 솔레노이드의 자력-변위 특성에 대한 측정 결과는 Fig. 4 와 같다. 직류 솔레노이드의 경우, 일반적으로 아마추어의 변위와 자력은 반비례하므로 비례제어에 사용하려면 전체 변위 중 자력의 변화가 비교적 완만한 일부 구간만 사용하게 된다. 즉, 플래퍼의 작동 변위가 ± 0.1 mm이내이므로 아마추어 변위가 0.8mm 와 1.0mm 사이의 구간에서 변하도록 플래퍼 복원 스프링의 탄성계수와 아마추어의 초기 공극을 선정하면 솔레노이드 입력전류와 아마추어 변위간에 비교적 선형적인 관계를 얻을 수 있게 된다(Fig. 5 참조). 플래퍼 복원스

프링의 탄성 계수 선정시에는 플래퍼 노즐에서 발생하는 유동력(flow force)이 복원력과 같은 방향으로 작용하는 것을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 스프링 계수를 220gf/mm로 선정하였다.

부하 유량이 없는 상태에서 플래퍼 밸브의 A, B-포트 간의 압력차와 플래퍼 변위 간에 선형적인 특성을 얻고자 할 경우에는 노즐의 단면적보다 커튼 면적(curtain area)의 영향이 크게 나타난다. 플래퍼가 중립위치에 있을 때 입구 오리피스와 플래퍼 노즐 직경의 비가 1이 되도록 설계기준을 정하면 식(3)에 의하여 고정 오리피스의 직경을 계산할 수 있다^(9,10).

$$\frac{C_{df}A_f}{C_{do}A_o} = 1 = \frac{C_{df}\pi D_N x_{f0}}{C_{do}A_o} \quad (3)$$

여기에서 C_{df} 는 플래퍼 노즐의 유량계수, C_{do} 는 고정 오리피스의 유량계수, A_f 는 플래퍼의 커튼 면적, A_o 는 고정 오리피스의 단면적, D_N 은 노즐의 직경, x_{f0} 는 평형상태의 플래퍼의 위치, x_f 는 플래퍼의 변위를 나타낸다.

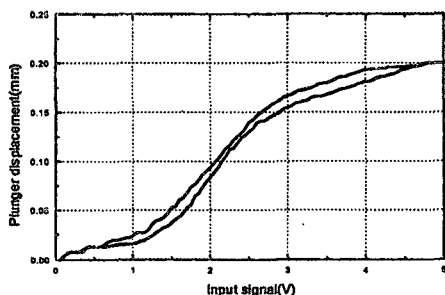


Fig. 5 Input signal-to-plunger displacement curve of the solenoid

입구 오리피스는 가공의 편의 때문에 길이와 직경의 비가 2에서 4사이의 값을 갖게 되므로 단관(short tube)으로 간주하여 유량계수 C_{do} 가 첨각(sharp-edged) 오리피스의 0.6 보다 큰 0.8에서 0.9 정도의 범위에 있다고 가정할 수 있다. 플래퍼 노즐에서의 유량계수는 노즐과 플래퍼 간의 원형 커튼 단면에 대해 결정되어야 하는데, 노즐의 끝이 첨각을 이룬다고 보면, C_{do} 의 값을 0.6으로 가정할 수 있다. 이와 같은 각 변수의 값을 대입하면 고정 오리피스의 직경 D_o 는 0.33mm로 계산되나 가공상의 편의를 고려하여 0.3mm로 결정하였다.

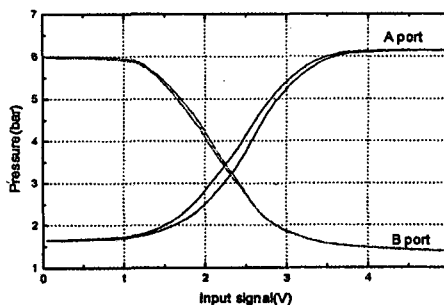


Fig. 6 Input signal-to-pressure curves

3. 밸브의 정특성 및 동특성 실험

본 연구에서 위와 같이 제작된 밸브에 전압-전류 변환기를 이용하여 0에서 120mA 전류에 해당하는 0-5 volt의 전압 신호를 인가했을 때 아마추어의 변위를 레이저 변위센서로 측정된 결과는 Fig. 5와 같다. 이때 부하 유량은 없도록 한 상태이다. 측정에 사용된 센서는 KEYENCE사의 LB72 모델이며 측정범위는 ± 10 mm, 직선성은 1%, 분해능은 2 μ m, 응답 시간은 0.15ms의 특성을 갖고 있다. 입력 신호에 진폭 ± 0.5 Volt, 주파수 100Hz의 사각파형 디더(dither) 신호를 중첩하였으나 밸브 몸체와 플래퍼 사이의 미끄럼 마찰로 인한 히스테리시스가 나타나는 것을 알 수 있다. 완벽한 선형성이 구현되지 않았으나, 선형오차는 제어 프로그램 내에서 쉽게 보상될 수 있기 때문에 제작된 밸브의 특성은 만족할 만한 수준이라고 할 수 있다.

Fig. 6은 밸브 양쪽 포트의 압력 변화를 위와 동일한 실험 조건에서 측정된 것이다. 양쪽 포트의 압력변화 곡선들이 좌우, 상하로 양호한 대칭을 이룸으로써 밸브의 중립위치가 입력신호 범위의 중간에 위치하고 압력변화의 선형성도 양호한 것을 볼 수 있다. 여기에서도 마찰로 인한 히스테리시스를 확인할 수 있는데, 그 크기는 일반 비례제어밸브의 수준에 해당되나, A포트 압력곡선의 히스테리시스가 상대적으로 큰 이유는 밸브의 구조상 Flapper A의 질량이 Flapper B 보다 크기 때문에 디더 신호의 효과가 적게 나타난 것으로 추측된다. (Fig.3 참조)

Fig. 7은 공압 로테이터와 연결된 밸브에 계단파 입력 신호를 인가하였을 때 양쪽 포트의 압력 변화를 측정된 결과이다. 압력의 상승과 하강의 경우 최종치의 10%에서 90%로 변하는데 걸리는 시간이 0.35초 이내이며 상승시간과 하강시간이 약간 다르게 나타나는 것은 솔레노

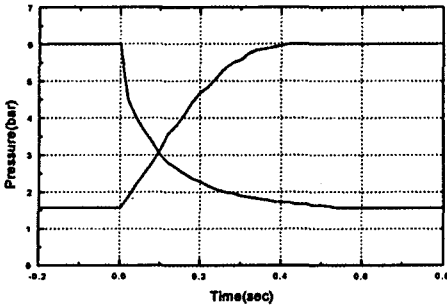


Fig. 7 Step input response of pressure change

이드의 자기력, 스프링의 탄성력과 노즐에서의 유동력 등 플래퍼에 작용하는 힘이 작동 방향에 따라 달라지기 때문이다.

4. 공압 구동식 관절의 회전 변위제어

본 연구에서 개발한 밸브의 유용성을 확인하기 위하여 공압 로테이터로 구동되는 손가락 관절의 회전각 제어 실험을 실시하였다.

Fig. 8은 실험장치의 구성을 나타낸 것이다. 일반적으로 공압으로 작동되는 서어보 시스템을 구성할 때에는 Fig. 9에서와 같이 속도와 가속도 혹은 압력차를 궤환 시키는 상태변수 궤환 제어기가 보편적으로 사용된다 (7.11.12.13). 이러한 목적으로 밸브 블록에 압력센서를 장착하였으며, 압력센서의 신호는 손가락 관절의 토오크 제어에도 활용될 계획이다. Fig. 10은 손가락 관절의 회전각 제어를 실시한 결과로서, 중립 위치를 50도로 정하고 각각 다른 진폭으로 계단형 입력신호를 인가하였을 경우 각각의 위치제어 결과를 측정하였다. 이 경우 정착시간(settling time)은 0.3초 이내, 정상상태 오차는 $\pm 1\%$ 로 나타

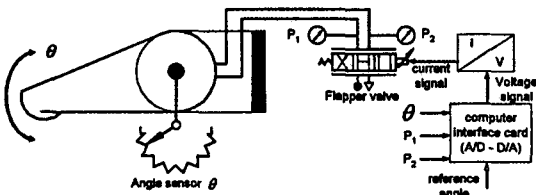


Fig. 8 Experimental setup for the position control of a pneumatic joint

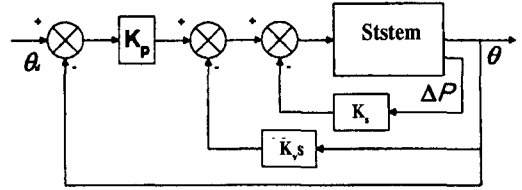


Fig. 9 Proportional error control with minor loop compensation

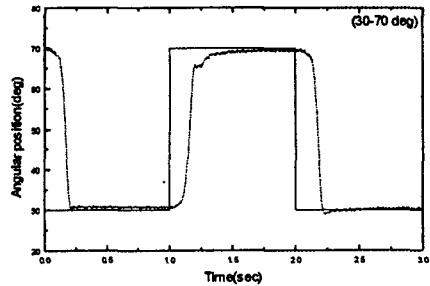
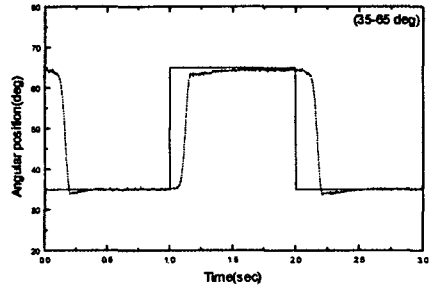


Fig. 10 Experimental results for position control with different amplitudes of step input

났다. 이 결과에서 보면, 로테이터의 마찰력 등 공압 구동 시스템의 비선형적 특성 때문에 입력신호의 크기에 따라서 응답특성이 조금씩 다른 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 제어 알고리즘의 보완을 통해 좀더 개선시킬 수는 있겠으나, 로테이터의 마찰특성 등은 그 보상효과에 한계가 있다.

Fig. 11은 삼각파와 정현파 입력에 대한 손가락 관절의 추종제어 결과를 보여준다. 손가락 관절의 자체 중량으로 인하여 관절이 위로 움직이는 경우와 아래로 구부러지는 경우의 응답성에 차이가 나타나는 것을 볼 수 있고, 공압식으로 구동되는 관절임에도 불구하고 기본적인 추종제어가 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 제어성능은 향후 제어기의 구조를 개선하고 제어이득을 최적화함으로써 더욱 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

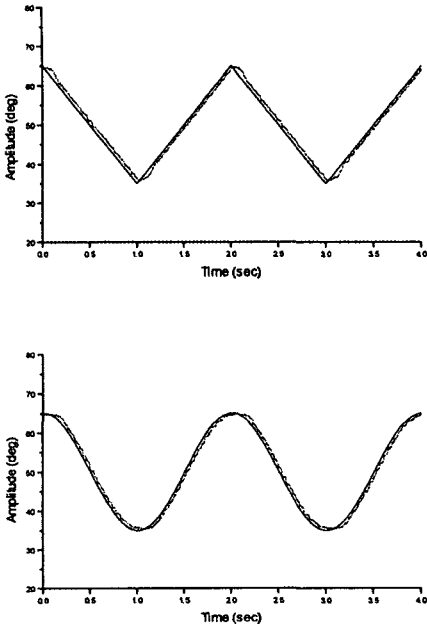


Fig. 11 Experimental results of tracking control of a finger joint

5. 결 론

본 논문에서는 공압으로 관절이 구동되는 인간형 로봇 손을 개발하기 위해 설계, 제작한 소형의 4/3-way 비례 방향제어 밸브에 관해 소개하였다. 밸브의 기본 구조로서 플래퍼 밸브를 채택함으로써 밸브의 소형화가 가능하였고 공압 로테이터의 회전각 제어에 요구되는 최소한의 선형적인 제어특성을 얻을 수 있었다. 그리고 펄스폭 변조 (PWM) 방식에 의해 개폐식 밸브를 제어하는 공압제어 방식의 사전 연구결과와⁽⁷⁾ 비교할 때 소음과 진동이 적고 관절 작동이 부드럽다는 장점도 확인할 수 있었다. 그러나 플래퍼 밸브의 경우 입구 오리피스가 불변이므로 양쪽 포트 간의 최대 압력차가 공급압력의 2/3에서 3/4 정도 밖에 되지 못하는 단점이 있고, 이로 인한 관절 토크의 감소를 감안하면 공급압력을 10 bar 정도로 높이는 것이 필요하다. 이를 위하여 솔레노이드의 자력-변위 특성을 비례전자석처럼 선형화하여 높은 자력이 발생하는 구간에서 플래퍼를 구동시킬 수 있는 설계 보완이 앞으로 요구된다.

참 고 문 헌

1. Mason, M. T. and Salisbury, J. K., "Robot

Hands and the Mechanics of Manipulation," MIT Press, pp. 77-89, 1985.

2. Jacobson, S. C., Wood, J., Knutti, D.F. & Biggers, K.B., "The Utah/MIT Dexterous Hand: Work in Progress," Int. J. Robotic Research 3, pp. 21-50, 1984.

3. Doll, T. J., 1989, "Development & Programming of a Robot Hand," Dissertation, Karlsruhe University

4. Rosheim, W. E., Robot Evolution, John Wiley & Sons

5. Kato, I., Sdamoto, K., Mechanical Hands, Survey Japan, pp. 115-124, 1982.

6. 갈명준, "개폐식 밸브를 이용한 공압실린더의 위치 제어에 관한 연구," 석사 학위 논문, 한국과학기술원, 1991.

7. A. Czinki, Y.S. Hong, "Design and Control of an Anthropomorphic Servopneumatic Finger Joint," Oilhydraulic and Pneumatic, March, pp. 181-184, 1997.

8. 최서호, 홍예선, 이정오, "공기압 서보 시스템의 위치제어 및 시뮬레이션에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제13권, 6호, pp. 104, 1996.

9. Merrit, H. E., Hydraulic control systems, John Wiley & Sons, pp. 118-131, 1967.

10. Watton, J., Fluid power systems, Prentice Hall, pp. 47-67, 1989.

11. Moore, P. R., Weston, R.H., Thatcher, T.W., "Compensation in pneumatically actuated servomechanism," Trans. Inst. Measurement and Control, Vol. 7, No. 5, pp. 238-245, Oct-Dec., 1985.

12. Moore, P. R., Ssenkungo, 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.

13. 황태주, "소형 공압 로테이터의 변위제어를 위한 플래퍼 노즐형 3/2-way 설계 및 실험," 석사학위 논문, 고려대학교, 1997.