

직동식 공압서보밸브의 Force Motor 설계 및 성능시험

이원희*(한국기계연구원), 김동수(한국기계연구원), 박상운(한국기계연구원)

Design and Performance Test of the Force Motor for Direct Drive-type Pneumatic Servo Valve

W. H. Lee(KIMM), D. S. Kim(KIMM), S. Y. Park(KIMM)

ABSTRACT

A pneumatic servo valve which is widely applied in industrial field. And It is consist of force motor, spool & sleeve and servo controller. In this study, we developed the force motor which is consume to low power for a pneumatic servo valve. We could reduce the number of turn of the solenoid by using ferromagnetic permanent magnet and took different direction of each other using one coil instead of two coil. we modeled a system consisting of various electro-mechanical subsystems. The appropriateness of the model was verified by simulation. The simulation model resolved the motion of spool, the winding current and the magnetic force. Also, we calculated the displacement and velocity of the spool, flux contour line, b vector, flux density, flux linkage, back EMF etc.

Key Words : 공압서보밸브(pneumatic servo valve), 직동식(direct drive-type), 힘모터(Force Motor), 서보솔레노이드(servo solenoid), 영구자석(permanent magnet), 서보제어기(servo controller)

Nomenclature

- B_r : 잔류자속밀도 [T]
- B_g : 영구자석 동작점에서의 자속밀도 [T]
- μ_r : 자석 비투자율
- P_d : 자석두께 [mm]
- g : 공극길이 [mm]
- n : 코일의 권선수

1. 서론

공기압 구동기는 전기식과 유압식의 중간 정도의 파워를 제공하며, 산업계에서 꾸준히 사용되어지고 있다. 공기압 서보시스템은 가격면에서 경쟁력이 있고, 유지 보수가 간편하며, 작업환경이 깨끗하고, 신뢰성이 높아 로봇이나 매니플레이터 및 최근에는 바이오기계 등의 새로운 분야에 응용되고 있다. 이와 같은 시스템에서 서보밸브는 동력을 제어하는 매우 중요한 요소이다⁽³⁾⁽⁸⁾.

본 연구에서는 공기압 서보밸브를 설계하였으며, 서보 솔레노이드의 흡인력에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고, 서보밸브의 플런저(plunger) 재질

을 강자성의 영구자석을 사용함으로써 저 소비전력형 코일을 설계하였으며, 코일설계를 위해 자기회로 개념을 이용하여 모델링 하였다. 또한 상용 자기장 해석 프로그램을 이용하여 모델링의 타당성을 검증하였다. 또한 서보제어기 설계, 제작 및 제어실험을 통하여 성능의 우수성을 확인하였다.

2. Force motor 설계

2.1 구성 및 설계사양

본 연구에서 개발중인 서보밸브의 구성은 Fig. 1과 같다. 서보밸브의 구동부는 플라스틱 보빈(bobbin)에 코일을 감은 솔레노이드(solenoid)와 누설자속을 방지하기 위한 요크(yoke)와 영구자석을 이용한 가동자로 구성된다. 가동자에 사용된 영구자석으로는 최근에 여러 분야에 많이 응용되고 있는 네오디뮴계열 자석인 NdFe35를 사용하였다⁽⁶⁾. 그리고 영구자석을 좌,우로 착자시켰으며 양쪽의 착자면에는 순철 와서를 부착하였다. 흡인력을 키우기 위해 와서의 내경 두께보다 외경 두께를 상대적으로 크게 설계하였으며, 알루미늄 스펀과 일체형으로 설계하였다⁽¹⁷⁾. 그리고 정밀 유량 제어밸브로서 기본적으로 5/3 way 구조로 동작이 되며, 동작 신호는 0~

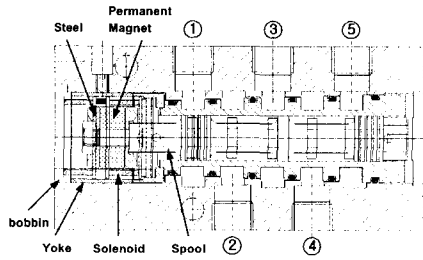


Fig. 1 Scheme of the pneumatic servo valve

10[V]이다. 또한 0~5[V]에서는 전진단 포트(2)가 개방되며, 5~10V에서는 후진단 포트(4)가 개방된다. 개발하고자 하는 서보밸브의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of a servo valve

항 목	사 양	
정 격 전 압	24 [V]	
제 이 전 압	0~10 [V]	
전 체 소 비 전 류	무 부 하	0.05 [A]
	과 부 하	1.5 [A]
코 일 당 톨 수	260 [N]	
코 일 직 경	0.18 [mm]	
코 일 저 항	20 [Ω]	
영 구 자 석	계 열	NdFe35
	잔 류 자 속 밀 도	1.23 [T]
	자 석 치 수	외경: ϕ 15, 내경: ϕ 4, 폭: 6 [mm]
스 트 로 크	\pm 2.6 [mm]	
공 급 극	0.7 [mm]	
공 급 압 령	6 [bar]	
정 격 유 량	700 [l/min]	
공 급 포 터	1/8 [inch]	
유 효 직 경	6 [mm]	
스 풀 직 경	11 [mm]	

2.2 설계 및 모델링

서보밸브의 솔레노이드 해석을 위해 Fig. 2와 같이 모델링 하였다. 솔레노이드와 영구자석간의 작용하는 전체 힘 F_T [N/m]는 다음 식 (1)와 같다.

$$F_T = F_L + F_R \quad (1)$$

여기서 F_L, F_R 은 각각 좌,우측 코일에 작용하는 힘이며 식 (2)와 같다. 그리고 양측의 코일 저항 및 권선수는 동일하며, 단지 코일 방향이 서로 반대로 감겨져 있다.

$$F_L = l n B_g i, \quad F_R = l n B_g i \times (-1) \quad (2)$$

여기서 l 은 코일의 축방향 유효길이, i 는 코일에

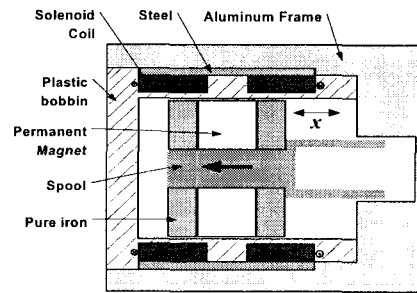


Fig. 2 Model of servo solenoid

흐르는 전류이다. 그리고 솔레노이드의 전류코일에 서의 전압방정식은 식 (3)과 같다⁽²⁾.

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + k_e \frac{ax}{dt} \quad (3)$$

위 식에서 우변의 세 번째 항은 영구자석의 운동에 의한 유기 기전력이며 기계적인 운동방정식은 식 (4)와 같다.

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = k_e i - C_d \frac{ax}{dt} \quad (4)$$

서보밸브의 솔레노이드에서 가동자인 영구자석에 의한 광속 자속밀도는 식 (5)와 같다⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

$$B_g = k \times \frac{B_r}{1 + \frac{\mu_r}{P_d/g}} \quad (5)$$

2.3 시뮬레이션

설계한 서보밸브의 솔레노이드 부분에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 솔레노이드 내부 전기 회로는 Fig. 3과 같다. 그리고 코일 저항 R_1, R_2 는 각각 10 Ω 이며, 입력전압으로는 +/- 12[V]의 구형파를 35kHz의 고주파 신호로 가하였으며, 오프셋(offset) 전압으로 1[V]를 설정하였다. 또한, 시뮬레이션의 시간 간격을 0.001 [ms] 설정하였으며, 전체 시간은 0.5초로 하였다.

시뮬레이션 결과를 Fig. 4 ~ Fig. 8에 나타내었다. Fig. 4는 자기력(magnetic force), winding current 그리고 그때의 스펴의 위치를 보여주고 있으며, Fig. 5는 속도 그래프이다. 해석결과 최대 자기력은 0.8[N]이며, 정상상태에서의 winding current는 500[mA]이고, 스펴의 최대 속도는 80[mm/s]이다. 또한 Fig. 7은 솔레노이드 코일의 누설 자속이며, Fig. 8은 역기전력을 보여주고 있다. 마지막으로 Fig. 6에서는 Fig. 4의 그래프에서 자기력이 플러스(A) 일 때와 마이너스(B) 일 때의 각각의 자속밀도를 나타내었다.

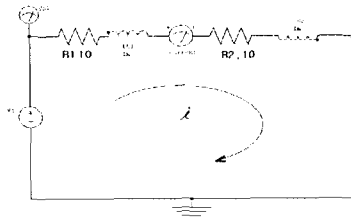


Fig. 3. Scheme of the solenoid circuit

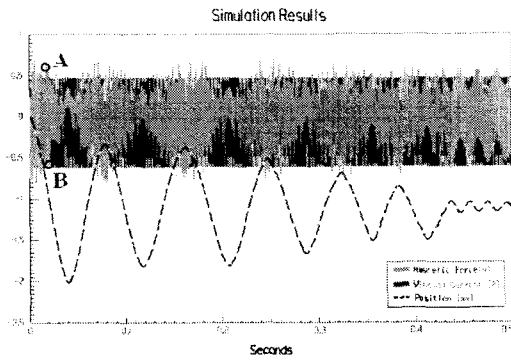


Fig. 4. Magnetic force, winding current, position

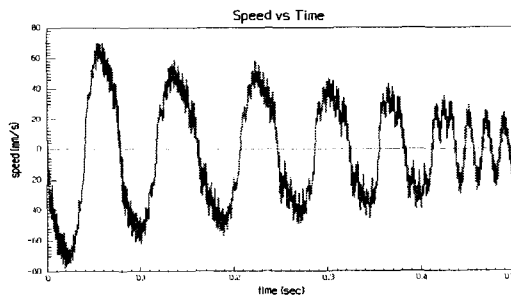


Fig. 5. Speed of spool

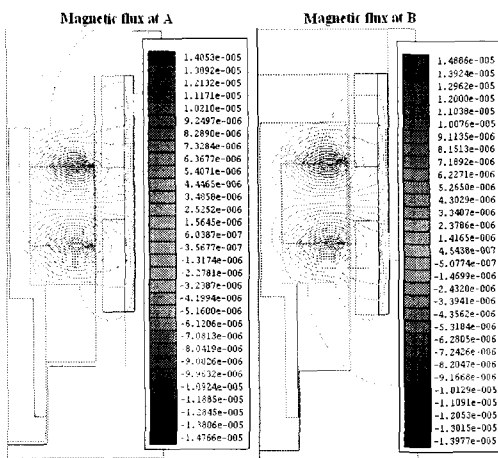


Fig. 6. Flux density diagram in A and B point of Fig. 4

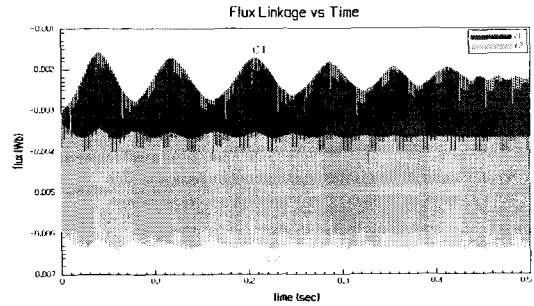


Fig. 7. Flux linkage of solenoid coil(C1, C2)

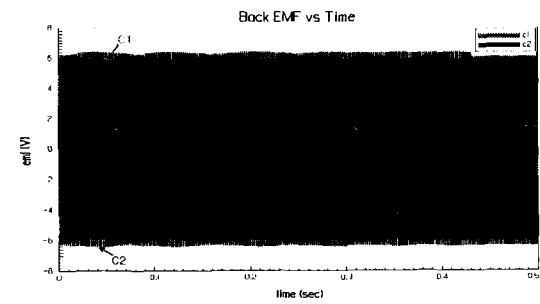


Fig. 8. Back emf of solenoid coil(C1, C2)

3. 제어기 설계

공기압 서보밸브의 제어 시스템 구성은 Fig. 9로 나타낼 수 있다. 그림에 기술된 바와 같이 본 시스템은 외부로부터의 기준 신호의 크기에 비례하여 공압 실린더에 흐르는 유체의 양을 선형적으로 제어할 수 있도록 하는 장치이다. 이때 외부 기준 신호에 정확하게 부합되도록 유량을 제어하기 위해서는 기준 신호와 실제 시스템의 응답과의 차이를 감지하여 그 차이 값만큼 연속적으로 제어가 가능한 폐 루프 (closed loop) 제어 시스템의 구축이 필요하다. Fig. 9

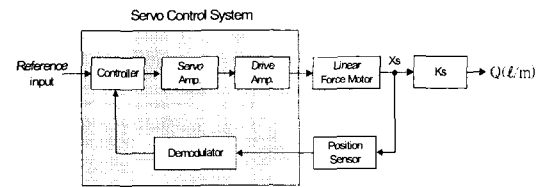


Fig. 9. Scheme of control block

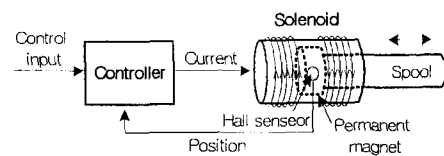


Fig. 10 Scheme of position detection system

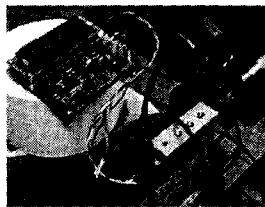


Fig. 11 Controller of the force motor

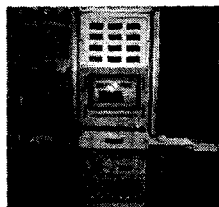


Fig. 12 Performance test device

의 시스템에서도 위치 센서를 이용하여 폐 루프를 구성하였으며, 시스템 내부적으로 원하는 위치의 제어가 가능하도록 되어 있다. 그리고 스톱의 위치 검출을 위해 홀(hall) 센서를 사용하였으며, 위치 검출 시스템의 개략도는 Fig. 10과 같다.

4 제어기 실험

본 연구에서 개발한 force motor의 시험용 제어기는 Fig. 11과 같으며, Fig. 12는 공기압 서보밸브 성능시험을 위한 전용 장비이다. 개발한 서보 솔레노이드의 성능시험을 위해 입력전압 가변에 따른 공기압 밸브 스톱의 변위를 측정된 결과를 Fig. 13 및 Fig. 14에 나타내었다. 아래의 실험결과에서 알 수 있듯이 개발된 제어기로부터 선형적인 출력 값을 얻었으며, 단지 스톱의 변위 변화량이 일정치 않아 향후, 제어 프로그램의 개인 튜닝 작업을 통해서 조절할 계획이다.

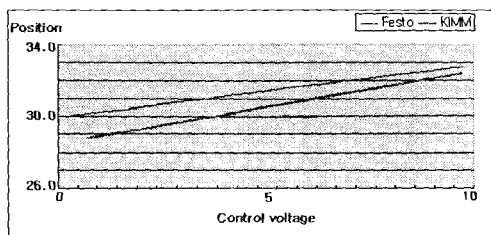


Fig. 13 Test result from FESTO and KIMM

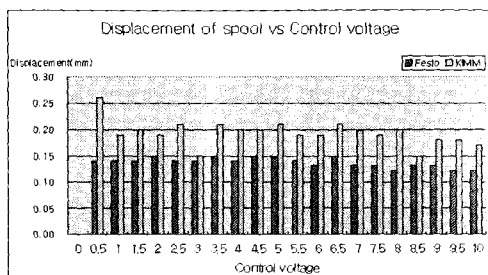


Fig. 14 Average displacement of spool

5. 결론

본 연구에서는 공기압 서보밸브의 Linear Force Motor를 개발하였다.

1. Force Motor를 설계하였으며, 상용해석 프로그램을 이용하여 전자장 해석 및 시스템의 과도응답을 확인하였다.

2. 솔레노이드 구동 및 홀 센서를 이용한 스톱의 위치제어를 위해 PWM 디지털 제어기를 설계 및 제작하였다.

3. 제어기 실험 결과 개발목표치의 선형성을 얻었으며, 향후 개인 튜닝 및 다양한 실험을 통해 성능을 분석 하고자 한다.

후기

본 연구는 산업자원부의 "100Hz 이하급 직동식 공기압 Servo Valve 개발" 과제 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) W.J. Duffin, "Electricity and magnetism", McGraw-Hill, p162-193, 1990.
- 2) John D. Karaus, "Electromagnetics", McGraw-Hill, Third edition, 1984.
- 3) Anderson, "The Analysis and Design of Pneumatic System", 1967.
- 4) N. Ye, S. Scavarda, M. Betemps and A. Jutard, "Models of a pneumatic PWM solenoid valve for engineering applications", Transactions of the ASME, Vol. 114, p680-688, 1992.
- 5) K. Ichiryu, H. Tamura, and S. Kogarashi, "Development of linear motor servo valve", Fluid Power, Third JHPS, p391-396, 1996.
- 5) Burgaud C., Solenoid Design, KIMM, 1999.
- 6) 윤석길, "희토류 영구자석 재료와 그 응용", UUP, 1999.
- 7) 김준규, "자석과 모터", 한진, 1999.
- 8) 최서호, 포핏형 전자식 공기압 서보밸브의 해석 및 설계에 관한 연구, 한국과학기술원, 2000.