

공기압 Servo Valve 설계 및 해석

고진호[†], 류동렬*, 이주호*, 김영석*, 김동수**

The Analysis and Design of Electro-pneumatic Servo Valve

J. H. KO[†], D. L. RYU*, J. H. LEE*, Y. S. KIM*, D. S. KIM**

Key Words: Servo valve(서보밸브), Fluid power(유공압), Solenoid(솔레노이드), PWM(펄스폭변조), Magnetic force(자기력)

Abstract

Electro-pneumatic servo valve is an electro-mechanical device which converts electric signal into pneumatic flow rate or pressure.

In order to improve the overall performance of pneumatic servo systems, electro-pneumatic servo valves are required, which have fast dynamic characteristic, no air leakage at null, and can be fabricated at a low-cost. The first objective of this research is to design and fabricate a new electro-pneumatic servo valve which satisfies the above-mentioned requirements.

In this paper, we has been modeled as a system consisting of coupled electro-mechanic and mechanical subsystems. The appropriateness of the model has been verified by simulation. The simulation model resolves the valve body motion and the solenoid current at high accuracy. Also, we are calculate the displacement of spool and computed results show winding currents, magnetic actuator force, flux density line, displacement, velocity, back EMF, eddy current etc.

기호설명

B_r : 잔류자속밀도 [T]
 B_g : 영구자석 동작점에서의 자속밀도 [T]
 μ_r : 자석 비투자율
 P_d : 자석두께 [mm]
 g : 공극길이 [mm]
 n : 코일의 권선수
 \dot{m} : 밸브를 지나는 공기의 질량유량 [kg/s]
 P_H : 밸브 입구 압력 [N/m²]
 P_L : 밸브 출구 압력 [N/m²]
 b : 임계 압력비

R : 공기의 기체상수 [N m/kg K]
 T_H : 밸브의 입구 온도 [°C]
 A_e : 밸브 유효 단면적 [m²]

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 작은 로봇이나 매니플레이터 및 최근에는 바이오기계 등의 새로운 분야에 응용되어져 왔다. 이와 같은 시스템에서 서보밸브는 동력을 제어하는 매우 중요한 요소이다(3).

본 연구에서는 공기압 서보밸브를 설계하였으며 솔레노이드의 흡인력과 스풀의 변위에 따른 유량 변화에 대해 각각의 시뮬레이션을 수행하였다.

[†](주) K.A.T 기술연구소

E-mail : juckjang1214@msn.com

TEL : (055)299-0536 FAX : (055)299-0538

* (주) K.A.T 기술연구소

** 한국기계연구원 나노기계연구본부

그리고, 서보밸브의 플런저(plunger) 재질을 강자성의 영구자석을 사용함으로써 저 소비전력형 코일을 설계하였으며, 코일설계를 위해 자기회로 개념을 이용하여 모델링하였다. 또한 상용 자기장 해석 프로그램을 이용하여 모델링의 타당성을 검증하였다.

2. Servo Valve 설계

2.1 Servo Valve 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 네오디움계열 자석인 NdFe35를 사용하였다(6).

그리고 영구자석을 좌,우로 착자시켰으며 양쪽의 착자면에는 순철 와셔를 부착하였다. 흡인력을 키우기 위해 와셔의 내경 두께보다 외경 두께를 상대적으로 크게 설계하였으며, 알루미늄 스펴과 일체형으로 설계하였다(1).

그리고 정밀 유량 제어밸브로서 기본적으로 5/3 way 구조로 동작이 되며, 동작 신호는 0~10[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.

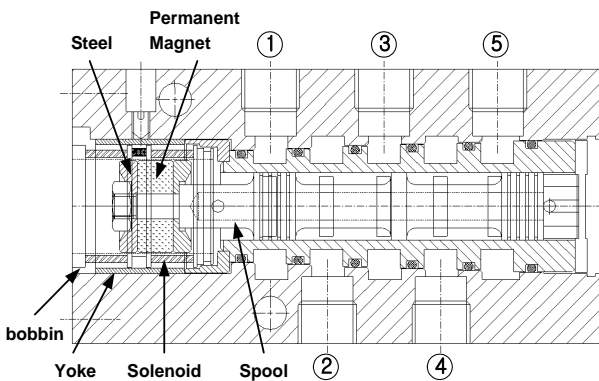


Fig. 1 Scheme of the servo valve

Table 1 Specification of a servo valve

항 목		사 양
정 격 전 압		24 [V]
제 어 전 압		0~10 [V]
전체 소비전류	무 부 하	0.05 [A]
	과 부 하	1.5 [A]
코일당 톨수		260 [N]
코 일 직 경		0.18 [mm]
코 일 저 항		20 [Ω]
영 구 자 석	계 열	NdFe35
	잔류자속밀도	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 격		0.7 [mm]
공 급 압 력		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 Servo Valve 제어

서보밸브에서 솔레노이드에 걸리는 전자기력은 코일에 인가되는 전류와 권선수에 비례한다.

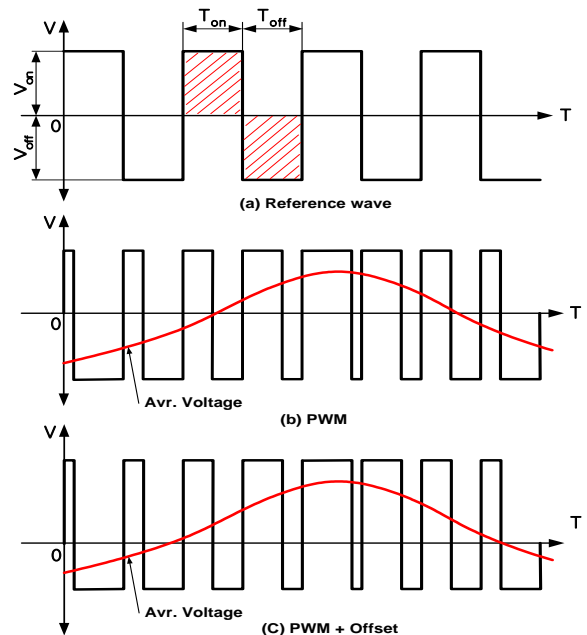


Fig. 2 Principle of the pulse width modulation and the time diagram

여기서 권선수와 코일의 저항은 일정하므로 입력 전압에 의해 전류량을 제어할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 전압제어 방법으로 PWM (Pulse Width Modulation) 방법과 오프셋(offset) 전압제어 방법을 사용하였다. 제어입력에 대한 전압제어 방법으로는 오프셋 전압 가변 방법을 이용하였으며, 공기압이나 기타 외란에 의해 발생하는 스톱의 변위를 빠르고 정밀하게 제어 해주기 위해 고주파의 PWM 제어방법을 이용하였다.

Fig. 2는 전압제어 방법의 원리를 보여준다. Fig. 2에서 (a)는 기준 파형이며 (b)와 같이 Ton>Toff 일 경우 평균전압이 증가하며 반대일 경우 감소하게된다.

$$Avr. V(t) = \begin{cases} \text{positive} , & T_{on} > T_{off} \\ \text{zero} , & T_{on} = T_{off} \\ \text{negative} , & T_{on} < T_{off} \end{cases} \quad (1)$$

2.3 Servo Valve 전자석 설계 및 모델링

서보밸브의 솔레노이드 해석을 위해 Fig. 3과 같이 모델링하였다. 솔레노이드와 영구자석간의 작용하는 전체 힘 FT [N/m]는 다음 식 (2)와 같다.

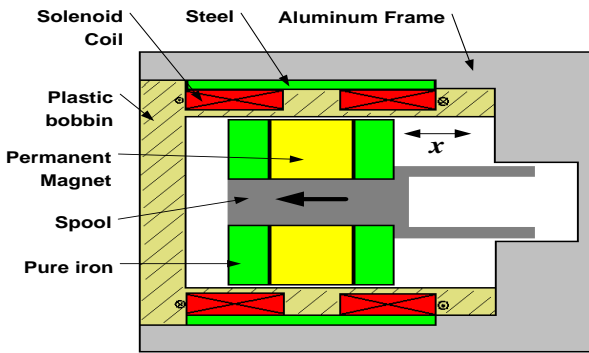


Fig. 3 Model of the servo valve (solenoid part)

$$F_T = F_L + F_R \quad (2)$$

여기서 FL ,FR 은 각각 좌,우측 코일에 작용하는 힘이며 식 (3)과 같다. 그리고 양측의 코일 저항 및 권선수는 동일하며, 단지 코일 방향이 서로 반대로 감겨져 있다.

$$F_L = lnB_g i , F_R = lnB_g i \times (-1) \quad (3)$$

여기서 l 은 코일의 축방향 유효길이, i 는 코일에 흐르는 전류이다. 그리고 솔레노이드의 전류코일에서의 전압방정식은 식 (4)와 같다(2).

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + k_e \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

위 식에서 우변의 세 번째 항은 영구자석의 운동에 의한 유기 기전력이며 기계적인 운동방정식은 식 (5)와 같다.

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = k_e i - C_d \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

서보밸브의 솔레노이드에서 가동자인 영구자석에 의한 공극자속밀도는 식 (6)과 같다(4)(5).

$$B_g = k_x \frac{B_r}{1 + \frac{\mu_r}{P_d/g}} \quad (6)$$

3. Solenoid 시뮬레이션

설계한 서보밸브의 솔레노이드 부분에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 솔레노이드 내부 전기회로는 Fig. 6과 같다. 그리고 코일 저항 R1, R2는 각각 10Ω이며 공급전압은 단위계단 입력으로 -3[V]를 인가해 주었다.

Fig. 4와 Fig. 5는 플런저를 최대로 전진 시켰을 때의 자속밀도선도와 B vector 그래프이다.

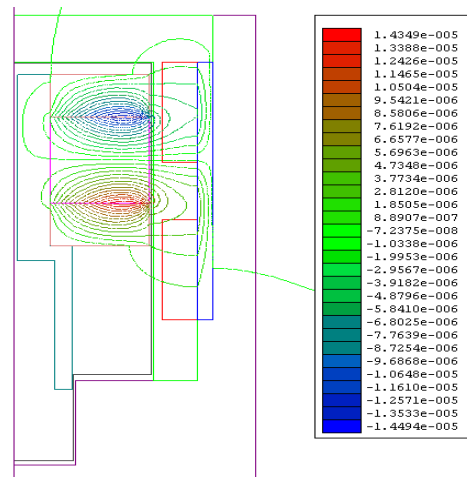


Fig. 4 Flux density lines

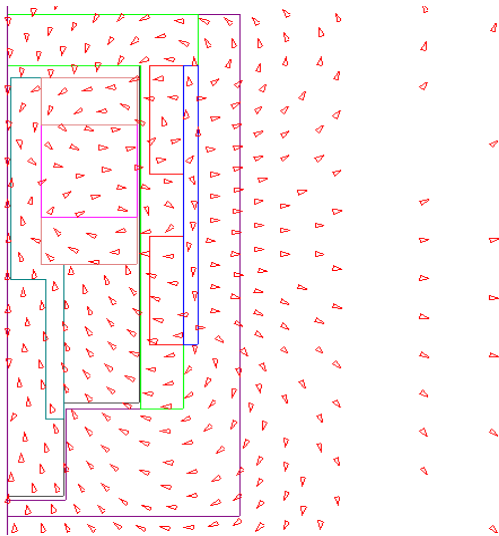


Fig. 5 The direction of B vector

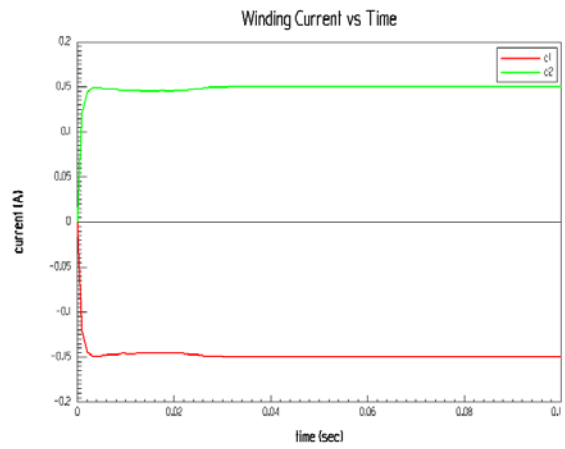


Fig. 8 Winding current .vs. time graph

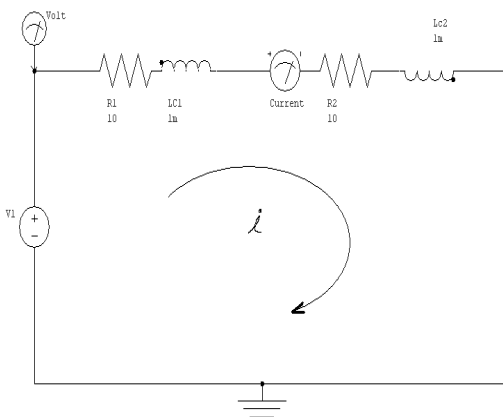


Fig. 6 Scheme of the solenoid circuit

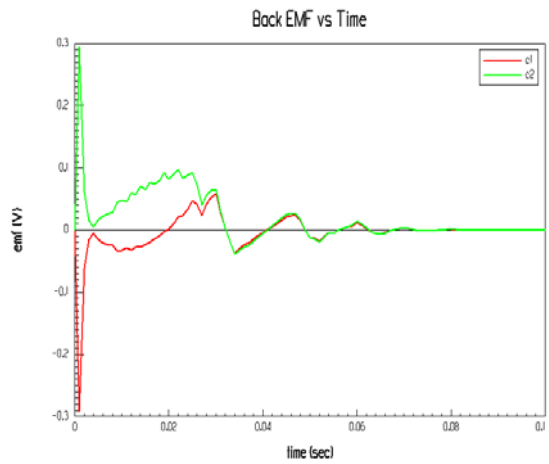


Fig. 9 Back EMF .vs. time graph

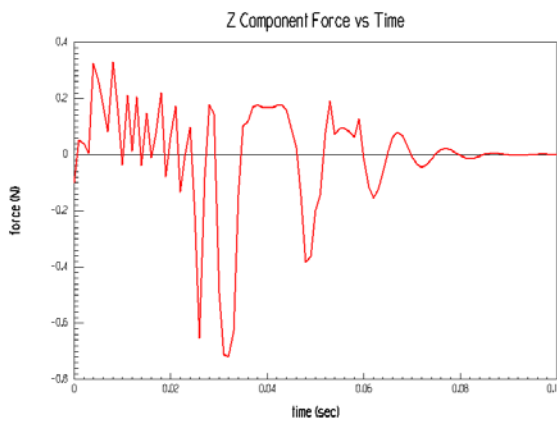


Fig. 7 Magnetic force of Z direction

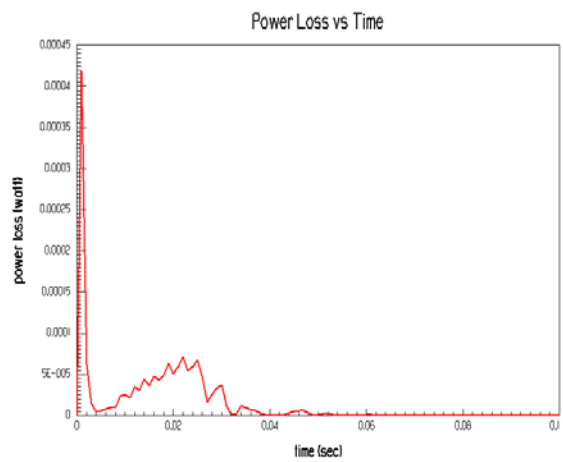


Fig. 10 Power loss .vs. time graph

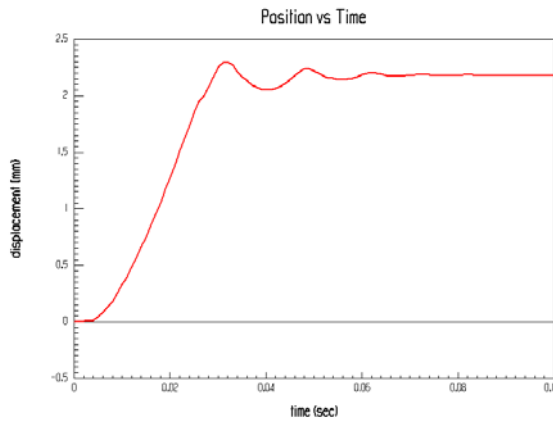


Fig. 11 Position of plunger .vs. time graph

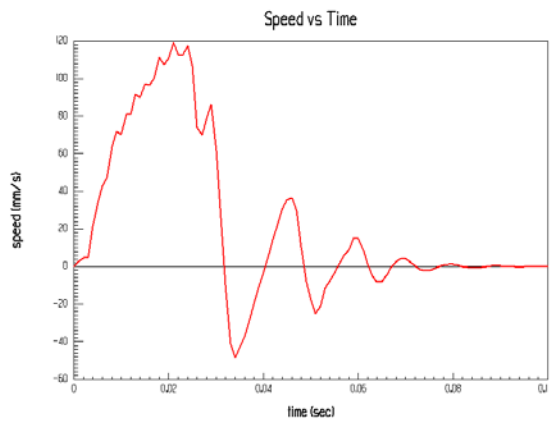


Fig. 12 Speed of plunger .vs. time graph

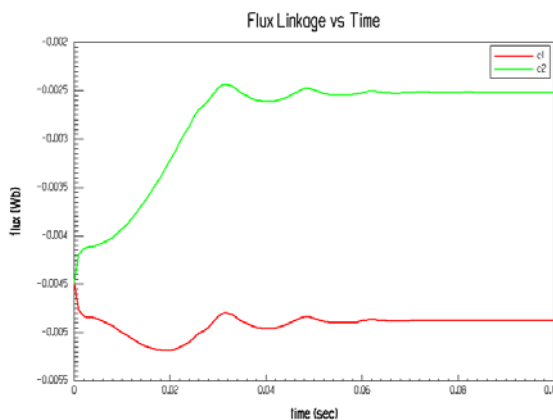


Fig. 13 Flux linkage .vs. time graph

Fig. 7~Fig. 13은 전자장 시뮬레이션 결과이다. Fig. 7의 흡인력에서 보면 맥동현상을 볼수 있는데, 이는 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 두 코일이 서로 다른 방향으로 감겨져 있으므로 결국 양쪽 코일에 작용하는 힘의 방향이 반대이기 때문이

다. 그리고 Fig. 9와 Fig. 10은 역기전력과 전력손실에 대한 시뮬레이션 결과이며, Fig. 11과 Fig. 12에서는 솔레노이드에 의한 플런저의 변위와 속도를 보여준다. 마지막으로 누설자속에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 13과 같다.

4. 결론

본 연구에서는 공압서보밸브를 설계하였으며 그 특성을 해석하였다. 먼저, 서보밸브의 핵심기술인 솔레노이드를 설계하였을 뿐만 아니라 상용해석 프로그램을 이용하여 전자계의 시뮬레이션을 수행함으로써 전자장 해석 및 시스템의 과도응답을 확인하였다. 차후 서보밸브의 제어기설계와 솔레노이드의 전자장 해석분야 및 스펴의 위치 변화에 의한 유동해석 분야에 계속적인 연구를 수행하고자 한다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 에너지관리공단이 지원하는 에너지지원기술개발 사업 “고성능 Servo Actuator 개발” 과제지원으로 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Burgaud C., Solenoid Design, KIMM, 1999.
- (2) K. Ichiryu, H. Tamura, and S. Kogarashi, "Development of linear motor servo valve", Fluid Power, Third JHPS, p391-396, 1996.
- (3) 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.
- (4) Anderson, "The Analysis and Design of Pneumatic System", 1967.
- (5) John D. Kraus, "Electromagnetics", McGraw-Hill, Third edition, 1984.
- (6) W.J, Duffin, "Electricity and magnetism", McGraw-Hill, p162-193, 1990.