

리니어 펄스 모터를 이용한 전자비례제어 밸브의 실용화

김성현*, 이은웅**, 이승학***, 김옥환*, 이동주**, 김성중**
 천안공업대*, 충남대**, 대덕대***

Practicability of Electromagnetic Proportional Valve Using LPM

Chonan Technical College*, Chungnam National University**, Taedok College***

Sung-Hun Kim*, Eun-Woong Lee**, Seung-Hak Lee***, Ok-Whan Kim, Dong-Ju Lee, Sung-Jong Kim

Abstract - Recently, the electromagnetic proportional valve has been widely used in order to control pressure and flow in such systems as NC machine and automatic facility. The linear electromagnetic solenoid used for proportional control valve ought to have hysteresis characteristic because of control the thrust force proportionably by input current. Therefore, in this study, we analysis the thrust force characteristics and established design for practical use, which allows Linear Pulse Motor(LPM) to be used as a driving system for electromagnetic proportional control valves.

과 직류 솔레노이드 추력이 평형 되어 제어 압력이 정해진다. 즉, 입력전류에 대하여 비례적으로 압력이 제어된다. 압력포트의 압력을 p라 하고 포켓 시트의 단면적을 A라 하면 유체에 의하여 포켓을 미는 힘 F는 다음과 같다.

$$F = pA \tag{1}$$

식(1)에서 F는 스프링을 통하여 포켓을 미는 힘과 같으며 그 힘은 솔레노이드에서 발생하는 힘으로 식(2)와 같다.

$$F = kI \tag{2}$$

여기서 I는 입력신호전류이며 k는 비례상수이다.

식(1)과 식(2)로부터 압력 p는 식(3)이 된다.

$$p = cI \tag{3}$$

여기서 $c = k/A$ 는 비례상수이다.

식(3)으로부터 밸브에서 제어되는 압력은 입력신호전류에 비례하는데 이는 식(2)의 추력 F와 입력신호전류 I가 선형성을 유지한다는 전제하에 가능하나 실제의 솔레노이드는 선형성을 유지하지 못하여 정확한 압력 비례제어에 어려움이 있다.

1. 서 론

최근 정밀기계 및 공장자동화 설비에 사용되고 있는 리니어 전자 솔레노이드는 소형 경량으로 구조가 간단하고 추력/입력비가 크다는 장점 때문에 비례제어 밸브의 기능 부품으로서 폭 넓게 이용되어 지고 있다. 이러한 리니어 전자 솔레노이드는 스트로크에 따라 추력이 변하는 어프로치 영역과 스트로크에 관계없이 일정한 추력을 유지하는 컨트롤 영역이 존재하는데 리니어 전자 솔레노이드는 전류값만으로 추력을 비례적으로 제어하기 때문에 컨트롤 영역에서만 가능하다는 단점을 가지고 있다. [1] 이러한 문제점을 개선하기 위해서는 넓은 스트로크 범위에 걸쳐 일정한 추력특성과 그 평형점이 전류에 의하여 비례적으로 제어할 수 있는 비례제어 밸브용 리니어 구동장치를 검토할 수 있다. 단위 입력당 추력이 커서 소형 경량화가 가능하고 개루우프 제어시에도 누적오차가 발생하지 않는 리니어 펄스 모터(LPM)는 구동장치로서 적합한 특성을 가지고 있다.

본 연구에서는 LPM을 이용한 전자비례제어 밸브의 해석과 이미 제작된 편축식 LPM의 자속밀도, 추력, 미세 스텝 구동 특성을 바탕으로 전자비례제어밸브의 구동장치로의 실용화를 위한 양축식 LPM을 설계하고자 한다.

2. 리니어 구동 액추에이터

2.1 전자비례제어 밸브의 구조

비례전자식 파일럿 릴리프 밸브는 각종 압력제어나 가변 피스톤 펌프 등의 압력을 입력신호에 대해 비례적으로 제어하기 위한 밸브로서 일반적으로 직류 솔레노이드와 직동형인 포켓 밸브로 구성된다. 그림 1은 비례전자식 파일럿 릴리프 밸브 구조로 직류 솔레노이드에 입력전류가 공급되면 그에 비례한 추력이 가동철심에 발생하고 이는 스프링을 압축하는 방향으로 이동하며 스프링을 통하여 포켓을 시트에 밀어붙인다. 한편 압력포트에 유입한 유체는 시트에서 포켓으로 향하여 유출되며 이 압력

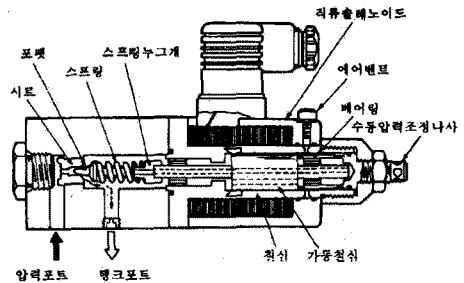


그림 1. 비례전자식 파일럿 릴리프 밸브

2.2 LPM을 이용한 압력제어 밸브의 해석

그림 1의 비례전자식 파일럿 릴리프 밸브에서 솔레노이드를 LPM으로 교체하여 작동하는 경우에는 LPM에서 발생하는 추력이 스프링을 변형시켜 변위를 발생시키고 이 추력으로 인하여 밸브의 압력이 제어되는 것이다. LPM에 발생하는 추력에 따른 스트로크를 x라 할 때 이에 의하여 스프링에서 발생하는 추력은 다음과 같다.

$$F = \alpha x \tag{4}$$

여기서 α 는 스프링 상수이며 LPM에 필요한 추력은 힘 F와 같음을 알 수 있다.

따라서 식(1)과 식(4)에 의하여 식(5)를 얻는다.

$$p = \beta x \tag{5}$$

여기서 $\beta = \alpha/A$ 는 비례상수이다.

따라서 제어하고자 하는 압력은 LPM의 스트로크에 비례하며 LPM은 정확한 위치제어가 가능하여 결과적으로 정확한 압력제어가 가능하다.

3. LPM의 유한요소 해석

설계할 양축식 리니어펄스 모터는 가동자의 상부, 하부에 각각 같은 구조를 한 편축식 리니어펄스모터가 위치하고 있으므로 해석시 한 개의 편축식 리니어펄스모터 부분만을 해석하여 축 대칭 관계로 적용하면 전체적 해석이 가능하다. 정추력 특성을 얻기 위해서 A상을 여자시켜 놓고 가동자의 변위를 이동시키면서 반복적으로 해석해야 하고 A상의 가동자와 고정자의 치가 일치하는 $x=0$ 의 위치에서 유한요소해석을 하면 가동자와 고정자의 상대적인 변위에 따른 자속분포는 그림 2와 같다.

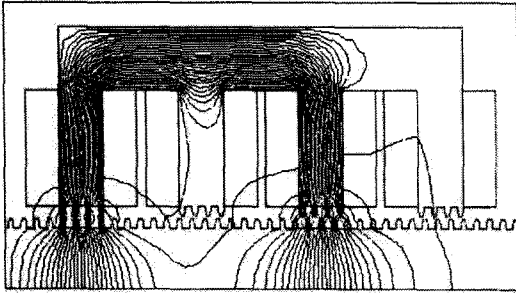


그림 2. 자속분포도

그림 3과 그림 4는 $x=0$ 에서의 변위에 따른 공극자속밀도의 수평성분 B_x 와 수직성분 B_y 를 나타낸 것이다.

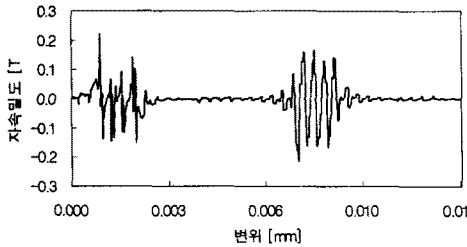


그림 3. 수평성분 분포(B_x)

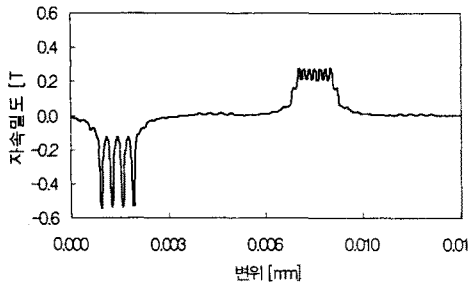


그림 4. 수직성분 분포(B_y)

그림 5와 그림 6은 $x=0$ 에서의 추력 F_x 와 수직력 F_y 의 분포를 나타낸 것이고, 표 1은 추력분포로부터 얻은 합성 추력 값을 정리한 것이다. 양축식에서 수직력 성분은 구조적으로 상쇄되고 수평성분은 편축식 LPM의 2배가 되므로 양축식 LPM에서는 수직력을 고려할 필요

가 없다.

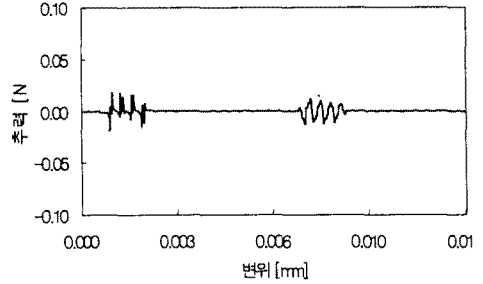


그림 5. 추력분포(F_x)

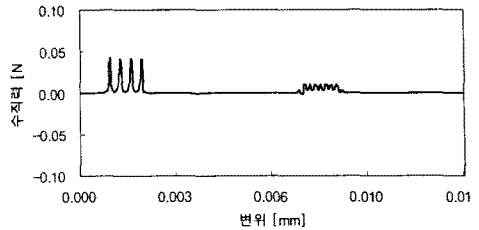


그림 6. 수직력 분포(F_y)

표 1 변위에 따른 추력 및 수직력

변위[mm]	0	$\tau/4$	$\tau/2$	$3\tau/4$
특성				
추력[N.m]	0.0345	0.0618	0.0325	0.0648

3. LPM의 미세스텝 구동

3.1 미세스텝 구동의 수학적 모델

N 턴을 감은 권선에 i [A]의 전류가 흐를때 발생하는 추력 F 는 식 (6)과 같이 주어진다.

$$F = \frac{1}{2} (N \cdot i)^2 \cdot \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad [\text{N.m}] \quad (6)$$

여기서, P = 퍼어미언스 [H], θ = 각변위 [rad]
권선 a와 권선 b에 90도 상차를 갖는 정현적인 전류 i_a, i_b 가 각 권선에 인가된다고 가정하자.

$$i_a = -I_0 \sin \theta \quad (7)$$

$$i_b = -I_0 \cos \theta \quad (8)$$

여기서, I_0 = 기준 여자전류의 최대치 [A]
그리고 식(7)과 식(8)을 각각 식(6)에 대입하면 각 상에서 발생하는 추력을 구할 수 있으며, a극과 b극에 의한 합성 추력은 식(9)로 표현된다.

$$F_{\text{total}} = F_a + F_b \quad (9)$$

$$= I_0 (k_a \sin^2 \theta + k_b \cos^2 \theta)$$

위 식에서 권선 a와 권선 b의 턴수와 a극과 b극의 치형상이 같아서 그에 의한 퍼어미언스 변화가 같다면, 합성 추력은 식(10)과 같이 일정하게 된다.

$$F_{\text{total}} = k_0 I_0 (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) \quad (10)$$

$$= k_0 I_0 \Rightarrow \text{"Constant"}$$

여기서, $k_0 = k_a = k_b$

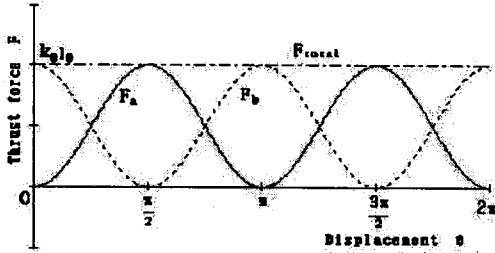


그림 7. 미세스텝구동에 의한 합성추력

3.2 미세스텝 구동 특성

본 연구실에서 선행연구된 편측식 2상 8극 HB형 LPM(2)을 대상으로 미세스텝 제어를 제작하여 다양한 성능을 시험하였다. 그림 8은 2상 여자시 과도응답으로 그림 9의 미세스텝 구동시와 비교하여 볼 때 진동이 크게 나타나고 있기 때문에 정밀 위치제어가 곤란하게 되고 최대응답주파수도 제약을 받게 된다. 그림 10은 4-미세스텝 구동시 정추력을 측정할 것을 나타낸 것으로 정추력과 스티프니스 형상이 정현적이고, 정추력 특성은 정지점 부근에서 최대 스티프니스 형태로 되어 있기 때문에 위치정도가 좋게 나타난다. 그리하여 양측식 LPM은 유한요소 해석에 의한 편측식 LPM의 추력특성을 기반으로 설계되어 양측이 동일 드라이버로 운전될 것이므로 편측식 LPM에서와 같이 미세스텝 구동시 정추력 특성이 우수할 것으로 판단된다.

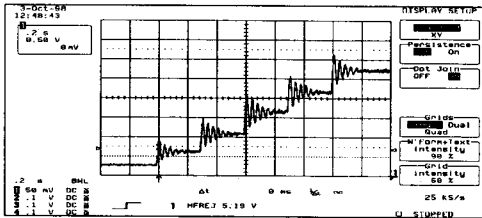


그림 8. 2상 여자시 응답특성

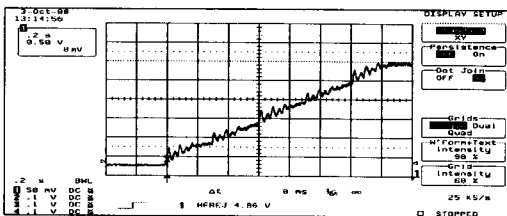


그림 9. 4-미세스텝시 응답특성

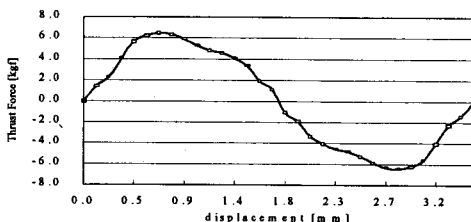


그림 10. 정추력 특성 곡선(4-microstep)

4. 리니어 펄스 모터의 설계

비례제어밸브의 구동용으로 사용하기 위한 리니어 액추에이터는 구조상 수직력이 서로 상쇄되어 지지기구에 부담이 적게 될 뿐 아니라 공극을 작게하여 큰 추력을 얻을 수 있는 양측식(double-side type) LPM이 적합하다. 그래서 본 연구에서 선행연구(3)하여 성능을 확인한 편측식 2상 8극 HB형 LPM의 해석결과와 미세스텝 구동특성을 준용하여 전자 비례제어 밸브의 구동용에 적합한 양측식 2상 8극 VR형 LPM을 설계하였다. 기본적으로 양측식은 두 개의 편측식 리니어펄스 모터를 축 대칭으로 배치시킨 구조를 하고 있다. 양측식 VR형 2상 8극 리니어펄스모터의 구조는 그림 11과 같고 상세한 설계치수는 표 2와 같다.

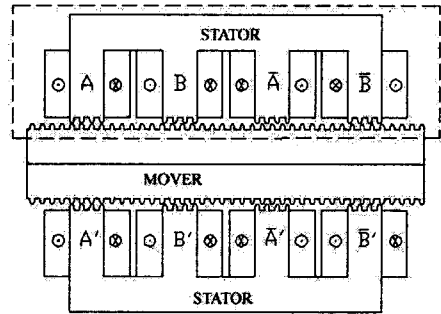


그림 11. 양측식 리니어펄스 모터의 구조

표 2 양측식 리니어펄스모터의 사양

	사 양	치 수
가동자	극 피치	3.2375(mm)
	치 피치	3.5(mm)
	치 폭	0.15(mm)
	슬롯 폭	0.2(mm)
	슬롯 깊이	0.2(mm)
	치의 갯수	4(ea/pole)
공극	공극길이	55(μm)
	치 피치	0.35(mm)
	치 폭	0.15(mm)
	슬롯 폭	0.2(mm)
고정자	슬롯 폭	0.2(mm)
	슬롯 깊이	0.2(mm)

5. 결 론

본 연구에서는 LPM을 이용한 전자비례제어 밸브의 해석과 선행연구 되어진 편측식 LPM의 자속밀도, 추력, 미세스텝 구동 특성을 바탕으로 전자비례제어 밸브의 구동기구를 개발하기 위해 구조상 수직력이 서로 상쇄되어 지지기구에 부담을 덜고 추력은 편측식 LPM의 2배인 양측식 VR(Variable Reluctance)형 LPM을 설계하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 白木學, 宮尾修美, "리니어모터 設計·應用 및 要點", Electronic essential series No.2, 1985
- [2] 김일중, "자기회로의 평형을 고려한 하이브리드형 리니어 펄스 모터의 특성해석", 충남대학교, 박사학위논문, 1995
- [3] 김성현, "횡자속형 LPM의 정밀위치제어에 관한 연구", 충남대학교, 박사학위 논문, 1999