

## 서보 액츄레이터용 Hybrid형 LPM의 정추력 및 수직력 계산

조운현, 구 대현, 이재봉  
한국전기연구소 전기자동차 개발팀

### The static thrust and normal force calculation of a Hybrid type LPM as a servo actuator

Yunhyun Cho, Daehyun Koo, Jaebong Lee  
Korea Electrotechnology Research Institute, E.V.Team

#### ABSTRACT

This paper proposes the new method to calculate the static thrust and normal force of a hybrid type double-sided linear pulse motor by the coenergy which considered the magnetic nonlinearities.

In the process of the computation, the nonlinear characteristics of the magnetic material were interpolated by the cubic spline method. And, to investigate the characteristics of the hybrid type DLPM, the static thrust and the normal force is shown as a function of displacement, input current and air airgap length. Also the simulation values are compared with the experimental ones obtained from a hybrid type DLPM.

#### 1. 서론

오늘날 FA기기, OA기기, 정보단말기기등의 분야에 있어서 경량, 소형화 하기 위한 연구가 활발히 연구되고 있다. 특히 직선운동이 요구되는 분야에 선형펄스전동기(LPM)를 사용할 경우에 open loop 제어로 입력 펄스신호에 따라 일정한 스텝만큼 직선왕복 운동을 얻을 수 있으므로 프린터, x-y plotter, FDD등 OA기기와 로보터, 동작기계등 직선운동이 요구되는 분야에 경량, 박형화 구조의 액츄레이터용으로 LPM의 응용이 활발히 연구되고 있다.

지금까지 개발된 LPM의 종류로는 LPM의 운동방향에 따라 자기회로의 리럭턴스의 변화에 의해 동작하는 가변리럭턴스(Variable Reluctance)형 LPM과 이동자는 적당한 시퀀스제어로 각 상(Phase)에 여자시키고, 고정자에는 무여자시에 유지력이 발생하도록 영구자석을 갖는 PM(Parament magnet)형 LPM이 있다. 또한 VR형과 PM형의 복합형인 Hybrid형이 있다.

본 연구에서는 공장자동화 시스템의 servo 액츄레이터로써 Hybrid형 LPM을 채택함으로써 단위 면적당 추력을 향상시킬 수 있으며, 시스템의 구조를 간단화할 수 있게

고정자를 양측면을 이용할 수 있는 4극 2상의 양축식 LPM을 개발하였다.

또한, LPM의 설계 및 해석시에 가장 중요한 문제중의 하나는 전동기의 정추력과 수직력 특성으로, 이러한 특성을 고찰하기 위해서는 이동자의 변위와 입력 여자전류 변화에 따른 특성등을 자기수반 에너지와 자기동기회로 법으로 부터 힘을 계산하는 방법을 제시하였다.

#### 2. 양축식 LPM의 구조 및 특성식

그림 1은 본 연구과정을 통하여 제안한 2상 4극기의 영구자석 이동자 매입형 양축식 LPM의 구조를 나타낸다. 그림 1에서 이동자는 영구자석 N극과 S극 이동자축의 치는 1/2피치의 위상차로 어긋난 쌍 E자형 자성체 core을 갖고, 고정자는 이동자 양측에 설치되는 구조로 자유 왕복운동을 할수 있는 구조로 되어 있다.

권선방식은 양축 E자형 core에 감겨져 있는 각 권선을 1, 2상 여자시에 병렬운전되게 결선하여 1상 여자시에는 1/4 극피치, 2상 여자시에는 1/8 극피치 이동하게 굽여 있다. 그림 2는 양축식 LPM이 무여자시에 영구자석에 의해 발생하는 자속과 여자시에 발생하는 주자속이 양쪽 규소강판의 중심으로 통과한다고 가정하면 LPM의 자기동기회로는 상하의 대칭성으로 LPM의 1/2에 해당하는 자기동기회로도를 나타낼 수 있다.

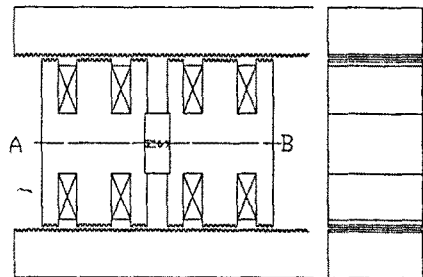


그림 1 Hybrid형 양축식 LPM의 구조  
Fig. 1 Configuration of a Hybrid type DLPM

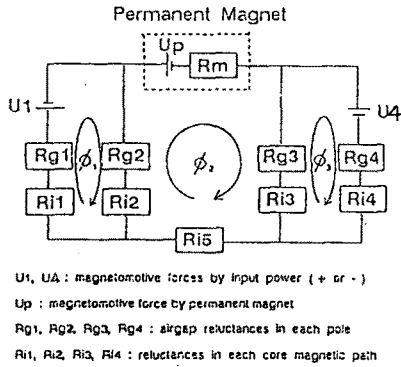


그림 2 LPM의 자기 등가 회로  
Fig. 2 Equivalent magnetic circuit of a LPM

그림 2에서  $U_1$ ,  $U_4$  는 전원 에 의한 기자력이고,  $U_p$  는 영구자석에 의한 기자력이다. 또한,  $R_{g1}$ ,  $R_{g2}$ ,  $R_{g3}$ ,  $R_{g4}$  는 각 극에서의 공극 자기저항이고,  $R_{i1}$ ,  $R_{i2}$ ,  $R_{i3}$ ,  $R_{i4}$ ,  $R_{i5}$  는 코어 각 자로에서의 자기저항을 나타내며,  $R_m$  은 영구자석의 내부 자기저항을 나타낸다.

이때 철심부의 자기저항  $R_{ik}(k=1,2,\dots,5)$  은 식 (1)로 표시할 수 있으며, 공극 자기저항은 그림 3과 같은 Permeance 법을 사용해 이동방향 변위의 함수로서 표현할 수 있다. [3]

$$R_{ik} = \frac{l_{ik}}{\mu_k S_k} \quad (k=1,2,\dots,5) \quad (1)$$

그림 1의 양축식 LPM과 같이 전기적 입력에너지를 기계적 에너지로 변환하여 동력을 얻는 계에서 손실이 없다고 가정하면 coenergy의 개념을 도입하여 추력 및 수직력을 계산할 수 있다. 자성체는 일반적으로 전기적 입력 기자력  $N_i$  와 자속  $\Phi$  의 관계는 자기회로의 성질에 의하여 일반적으로 비선형성을 가지며, 그림 2의 자기 등가회로에 대한 동가 방정식을 구하면 다음 식(2)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} f_1(\phi_1, \phi_2, \phi_3, x) &= (R_{g1} + R_{i1})\phi_1 + (R_{g2} + R_{i2})(\phi_1 - \phi_2) + U_1 \\ f_2(\phi_1, \phi_2, \phi_3, x) &= (R_{g2} + R_{i2})(\phi_2 - \phi_1) + (R_{g3} + R_{i3})(\phi_2 - \phi_3) \\ &\quad + (R_{i5} + R_m)\phi_2 + U_p \\ f_3(\phi_1, \phi_2, \phi_3, x) &= (R_{g3} + R_{i3})(\phi_3 - \phi_2) + (R_{g4} + R_{i4})\phi_3 + U_4 \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)의 비선형 방정식의 해를 구하기 위해서는 본 연구에서는 Newton-Raphson 법을 사용하였으며 LPM 특성해석 프로그램의 흐름도는 그림 3과 같다.

그림 3에서  $d\phi$  는 식(3)이고,  $\partial f_i / \partial \phi_k (i, k = 1, 2, 3)$  는 식(4)로부터 계산할 수 있다.

$$d\phi = \begin{bmatrix} \partial \phi_1 \\ \partial \phi_2 \\ \partial \phi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \phi_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \phi_2} & \frac{\partial f_1}{\partial \phi_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \phi_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \phi_2} & \frac{\partial f_2}{\partial \phi_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \phi_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \phi_2} & \frac{\partial f_3}{\partial \phi_3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_1(\phi_1, \phi_2, \phi_3) \\ f_2(\phi_1, \phi_2, \phi_3) \\ f_3(\phi_1, \phi_2, \phi_3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial \phi_k} = \frac{\partial f_i}{\partial \nu_j} \frac{\partial \nu_j}{\partial \phi_k} \quad (i, k = 1, 2, 3) \quad (4)$$

위의 알고리즘을 각 변위마다 반복 수행하고 수렴된 채고 자속으로 부터 자기 수반에너지를 이용하여 정추력과 수직력을 계산할 수 있다.

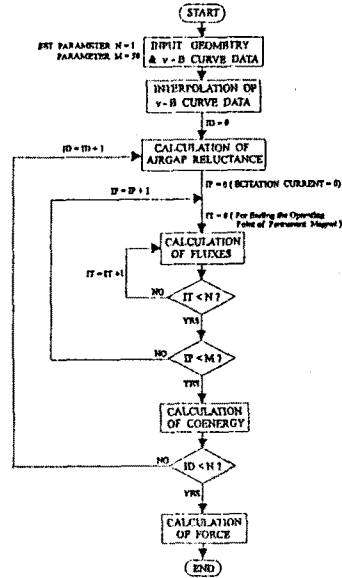


그림 3 LPM 특성 해석 Main 프로그램 흐름도  
Fig. 3 The main flow chart of the analysis

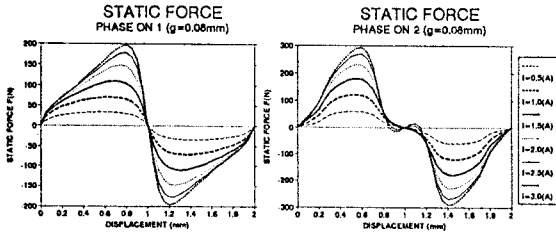
### 3. 특성 고찰

본 연구에서 개발한 Hybrid형 양축식 LPM의 이동자 치수는 길이 118mm, 폭 177mm, 높이 101mm로서 재질은 규소강판 PN23, 영구자석은 희토류계의 NdFeB를 사용하였다. 또한, 2차축 고정자는 1차축 이동자의 양축면으로 대향하여 슬롯된 순철의 자성체 재질을 사용하였으며 사양은 표 1과 같다.

그림 4는 표 1의 시작기의 LPM에 대한 시뮬레이션 결과치로 기계적 공극길이가 0.08(mm)일때 입력 여자전류를 변화했을 때에 LPM의 1,2상 여자시의 극피치 변위에 따른 정추력 특성곡선을 나타낸다.

그림 4에서 변위 0인 1차축, 2차축 일치하는 지점에서 이동자를 변위했을 때에 1상 여자시에는 1/4피치 근방지점에서 최대의 정추력을 발생하며 1/2 극피치 지점에서 다시 영(zero)로 됨을 볼 수 있다.

최대 정추력은 입력전류가 증가할수록 거의 비례하여 증가하며, 1상 여자시에는 최대 정추력 발생점은 여자전류가 클수록 1/2 극피치 지점쪽으로 기울며, 전류 1.5(A)를 인가했을 때에 추력은 약 100(N)정도 발생함을 알 수 있다. 2상여자를 했을 경우에는 거의 1/2 극피치 지점에서 최대 정추력이 발생하며 크기는 1상여자에 비하여 약 2배정도 정추력이 발생하는 함을 볼 수 있다. 따라서 LPM을 2상 여자구동방식으로 채택하면 1상 여자방식에 비하여 높은 추력특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.



a) 1 phase exciting b) 2 phase exciting

그림 4 변위에 따른 정추력 곡선  
Fig. 4 Thrust-Displacement characteristics

그림 5은 공극길이가 0.08mm일때 입력전류의 크기변화에 따른 최대 추력곡선으로 시뮬레이션 결과치와 실험 결과치를 나타낸다. 그림 5에서 입력전류가 증가함에 따라 1, 2상 여자시에 1.5(A)부근까지는 크기가 거의 선형적으로 증가하다가 그이상에서는 증가하지 않고 포화하는 현상을 볼수 있다.

이것은 자기적으로 자성체 내에 포화현상이 발생함을 나타내며, 본 시험기의 정격전류는 약 1.5(A)임을 알수 있다. 그리고 그림에서 실험치와 시뮬레이션치를 비교해보면 본 연구에서 제안한 자성체의 비선형특성을 고려한 coenergy법을 이용한 계산 수식이 잘 일치함을 알수 있다.

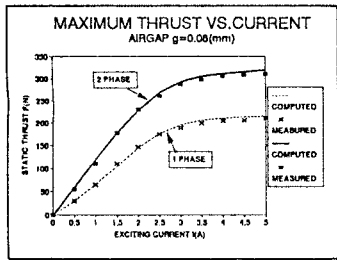


그림 5 최대 정추력 곡선

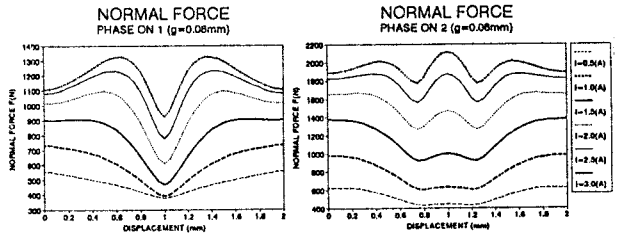
Fig. 5 The maximum static thrust

표 1. LPM의 사양

Table 1 The specification of LPM

기계적 사양		전기적 사양	
항목	치수	항목	치수
1차축	치수	8	극수 4 coil권수 200(회/극) coil직경 0.8(mm) 정격전류 1.5(A/극) coil저항 0.63(Ω)
	피치	2 mm	
	치폭	1 mm	
	슬롯폭	1 mm	
	슬롯깊이	1 mm	
	1차축폭	69 mm	
2차축	1차축두께	50 mm	
	2차축깊이	1,500mm	
영구자석		영구자석 폭	25 mm
		길이	10 mm
		두께	50 mm
		여자방식	1.2상여자
기계적 공극길이 0.08~0.2 mm			

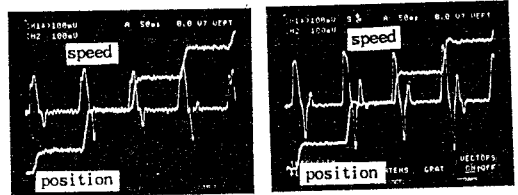
그림 6은 1, 2상 여자시의 수직력-변위 특성곡선으로 그림 6(a)는 여자전류가 증가하면 수직력은 변위가 0(mm)에서 900(N), 변위가  $\pi/2$ 인 지점에서는 최소치로 약 450(N)이 발생한다. 그림 6(b)는 2상 여자시의 수직력 곡선으로 1상여자시와는 달리  $\pi/2$ 에서 오히려 전류를 증가하면 차츰 증가하는 현상을 보인다. 최소 수직력은 1.5(A)에서 900(N)이며, 최대는 1400(N)으로 1상여자보다 훨씬 큰 수직력이 발생함을 알수 있다. 또한 수직력의 크기는 이동자의 변위점마다 다른 값을 발생함으로 이동자와 고정자간에 진동 및 소음을 야기시킴을 알수 있다. 따라서 LPM의 설계시에 이러한 현상을 고려하여 수직력의 변화를 최소화 할수 있는 설계방법 및 제어 알고리즘을 개발하는 것이 중요함을 알수 있다.



a) 1 phase exciting b) 2 phase exciting

그림 6 변위에 따른 수직력 곡선  
Fig. 6 Normal force characteristics

그림 6은 1상여자시의 스텝응답 특성으로 입력 전류를 1.0(A), 1.5(A)를 인가했을 경우에 속도 및 step이동거리 특성을 나타낸다. 입력전류의 크기를 증가함으로써 이동시의 속도의 hunting 현상이 크게 됨을 볼수 있다. 또한, 그림에서 속도의 정방향과 역방향의 천이현상은 정밀 정속도운전뿐만 아니라 정위치제어시에 이러한 문제점을 해결하는 것이 중요하다. 이에 대한 대책으로는 치의 형상등 자기회로의 시정수 및 기계적 시정수를 잘 고려하여 설계되어야 함을 알수 있다.



a) current 1.0(A) b) current 1.5(A)

그림 6. 스텝 응답 특성(1상 여자시)  
Fig. 6 The step response (1 phase exciting)

#### 4. 결론

본 연구에서는 공장자동화 시스템에서 직선운동이 요구되는 서보 액츄레이터용으로 2상 4극기의 hybrid형 양측식 LPM을 개발하였다. LPM의 정추력 및 수직력의 계산은 자성체 재질의 비선형성을 고려한 자기수반에너지와 자기 등가회로로 부터 힘을 계산하는 방법을 제시하였으며, 이에 대한 타당성을 입증하기 위하여 시뮬레이션 결과치와 실험치를 비교, 검토하였다. 그결과로 실험치와 잘 일치함을 알수 있었다. 또한, LPM의 step응답 특성을 고찰하기 위하여 실험장치에 속도, 변위측정기를 설치하여 입력 여자전류변화에 따른 응답을 고찰하였다.