

입력 전류 파형에 따른 Linear Pulse Motor의 정특성 고찰

허두석, 김경호, 황동원, 조윤현
 동아대학교 전기공학과

The Static Characteristics Investigation of Linear Pulse Motor
 According to Input Current Waveforms

Du-Suk Heo, Kyung-Ho Kim, Dong-Won Hwang, Yoon-Hyun Cho
 Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University

Abstract - When the input current wave forms of Linear Pulse Motor(LPM) is excited as three difference type such as the square, the rectangular and the micro sinusoidal wave, this paper is proposed the calculation of thrust on the base of magnetic equivalent circuit of LPM. The thrust is analyzed and compared by the analytical method, the F.E.M. and the experimental values. Also, to decide the input current wave for optimal operation condition, the vibration of LPM is experimented and estimated.

되어 있다. A상 코일과 \bar{A} 상 코일은 서로 반대 방향으로 연결되어 있으며, A상 여자 시 권선 기자력의 방향과 영구 자석의 방향은 반대이므로 한 방향으로만 자속이 흐르고, 다른 한 방향은 서로 상쇄되어 자속이 흐르지 않는다. 고정자는 일정한 치 피치에 슬롯은 극소 강판을 적층한 구조로 되어 있다.

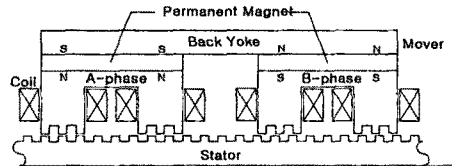


그림 1 LPM의 구조

1. 서 론

리니어 서보 모터 중에서 리니어 펄스 모터(Linear Pulse Motor: 이하 LPM)는 입력 펄스 신호에 따라 정해진 스텝 량으로 직선 운동이 가능함으로 최근에 LPM을 이용한 직선 유닛 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. LPM의 특징으로는 기계적으로 간단하고, Open Loop 제어에 의해 고정도의 위치 결정이 가능하며, 변위 오차가 누적되지 않고 기동, 정지, 역전 시 응답성이 우수해서 신뢰성이 높다. 뿐만 아니라 다른 모터에 비해 정지 시 매우 큰 유지토크(Holding Torque)를 가지고 있으므로 별도의 유지장치가 필요 없고, 유지 보수비용이 낮아진다. 하지만 LPM의 단점으로는 구동 시 구조적으로 진동이 발생하며, 부하 변화 시 역전이나 탈조 현상이 발생하는 경우가 있다. 또한, 스텝 크기가 기계적으로 정해지므로 위치 결정에서 한계가 있고, 제작 시 가공 오차가 존재함으로 위치 오차가 발생할 수 있다[1]. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 LPM의 이론적 방법을 통해 추력 방정식을 구하고, 정추력을 시뮬레이션 하였다. LPM의 기본 구동 방식인 2상 구형과 방식과 새롭게 제안한 삼각과 마이크로스텝, 정현과 마이크로스텝 방식을 비교하여 진동의 영향을 고찰 하였다.

2. 본 론

2.1 LPM의 구조

본 논문에서 제시한 LPM의 구조는 그림 1과 같이 영구자석과 전자석을 갖는 하이브리드형 LPM이다. LPM은 크게 이동자와 고정자로 두 부분으로 나눌 수 있다. 이동자는 순철로 된 Back York, 두 개의 전자석과 회로류 영구자석, A, B, \bar{A} , \bar{B} 각 극으로 구성되어 있다. 그림 1에서 각 상에 대한 치 배치 간격은 A상과 B상의 경우 치 피치의 1/4피치만큼 어긋나 있으며, A상과 \bar{A} 상, B상과 \bar{B} 상은 각각 1/2피치만큼 어긋난 구조로

2.2 LPM의 기본 방정식

2상 4극형 LPM의 한 극에 8개의 치를 가지고 있으며 이동자의 치와 고정자의 치는 같은 피치를 가지고 위치하고 있다. 한 치에 관한 추력 해석을 통해 전체의 합성 추력을 얻을 수 있다. LPM의 추력 특성은 치의 형상에 많은 영향을 받으므로 먼저 치 형상에 따른 추력 특성을 해석하기 위해서는 공극 부분의 퍼미언스를 구해야 한다. 일반적으로 퍼미언스는 식 (1)과 같다[2].

$$P = \mu_0 \int \frac{dA}{l} \tag{1}$$

여기서, dA : 자로의 미소 단면적 [m^2]

l : 자로의 길이 [m]

μ_0 : 공기의 투자율 ($4\pi \times 10^{-7}$ [H/m])

그림 1의 모델에서 LPM의 극 A, \bar{A} , B, \bar{B} 에 대한 퍼미언스 분포는 다음과 같이 표현된다.

$$P_A = P_0 + P_1 \cos \frac{2\pi}{\tau} x + P_4 \cos 4 \frac{2\pi}{\tau} x$$

$$P_B = P_0 + P_1 \cos \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{4}\right) + P_4 \cos 4 \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{4}\right)$$

$$P_{\bar{A}} = P_0 + P_1 \cos \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{2}\right) + P_4 \cos 4 \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{2}\right)$$

$$P_{\bar{B}} = P_0 + P_1 \cos \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{3}{4} \tau\right) + P_4 \cos 4 \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{3}{4} \tau\right)$$

이상에서 구한 각 극에 대한 퍼미언스 분포를 가지고 자기 등가회로를 구성하면 그림 2와 같이 나타낸다. 그림 2에서 기자력 강하 F_0 를 나타내면 식 (2)과 같다.

$$F_0 = \frac{\sum_{i=1}^4 P_i F_i + P_m F_m}{\sum_{i=1}^4 P_i + P_m} \tag{2}$$

여기서, F_0 : 여자 전원을 포함한 공극 기자력 강하

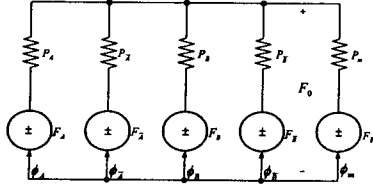


그림 2 LPM의 자기 등가회로

여기서, $F_A, F_{\bar{A}}, F_B, F_{\bar{B}}$: 각 극에서의 기자력
 $P_A, P_{\bar{A}}, P_B, P_{\bar{B}}$: 각 극에서의 퍼미언스

따라서, 이동자에 작용하는 힘은

$$F_t = \frac{1}{2} \frac{iN_R}{2\pi} \sum_{i=1}^4 (F_i - F_0) \frac{\partial P_i}{\partial x} \quad (3)$$

각 극의 퍼미언스에 대한 식과 식 (3)에서 P_i 는

$$\sum_{i=1}^4 P_i = 4P_0 + 4P_4 \cos 4 \frac{2\pi}{\tau} x \approx 4P_0 \quad P_0 \gg P_4 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^4 \frac{\partial P_i}{\partial x} = -\frac{2\pi}{\tau} 16P_4 \sin 4 \frac{2\pi}{\tau} x \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^4 P_i + P_m \approx 4P_0 \quad \text{since } P_m \ll P_0 \quad (6)$$

여기서, P_i : A, B, \bar{A} , \bar{B} , P_m : 자석에 의한 퍼미언스

P_0 : 퍼미언스의 평균값

본 논문에서 사용하는 LPM의 여자 방식은 2상 여자 방식이다. 따라서 2상에 대한 추력식을 계산하면 식 (8)과 같다. 식 (7)은 A상과 B상의 여자 전류이다.

$$F_A = -F_{\bar{A}} = NI \quad (7)$$

$$F_B = -F_{\bar{B}} = NI$$

$$F_t = -\sqrt{2} \frac{N_R}{2} \left(\frac{NIB_0 A_m P}{P_0} \right) \left[\sin \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{8} \right) - \frac{NIP}{B_0 A_m} \sqrt{2} \sin 2 \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{8} \right) \right] \quad (8)$$

여기서, B_0 : 영구자석의 자속밀도, P : 퍼미언스

A_m : 영구자석의 단면적

2.2 LPM 시작기와 Microstep 제어기

본 논문에서 제작된 시작기 LPM에 대한 기계적인 사양과 전기적인 사양은 표 1과 같다. 이동자의 길이는 120 [mm], 폭 60 [mm], 높이 40 [mm]이며, 이동자는 리니어 베어링에 의해 직선 왕복 운동이 가능하도록 제작되었다.

표 1 LPM의 기본 사양

Mechanical Dimension		Electrical Dimension	
Number of Tooth	8	Number of Pole	4
Slot Pitch	2 [mm]	Number of Coil	60 [turns]
Tooth Width	0.82 [mm]	Diameter of coil	0.8 [mm]
Slot Width	1.18 [mm]	Rating Current	2[A/Pole]
Air Gap	0.1 [mm]	Coil Resistance	1.6 [Ω]
		Magnet	NdFeB

그림 3은 본 연구에서 개발한 시작기의 LPM 외형을 나타낸다.

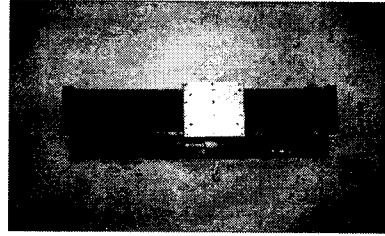


그림 3 리니어 펄스 모터

그림 4는 마이크로스텝 제어기의 블록도를 나타낸다. 제어기의 기본 동작은 기준 전류 파형을 Lookup Table로 ROM에 저장하고, 80C196KC은 LPM의 기준 전류 파형을 D/A 컨버터를 통해 출력한다. LPM의 마이크로스텝 구동에서 가장 주목해야 할 점은 입력전류 파형에 따라서 LPM의 출력 특성도 달라진다는 점이다. 본 논문에서 사용하게 될 입력 파형을 크게 세 가지로 나누었다. 하나는 LPM에 일반적인 방식인 구형파 형태, 그리고 본 논문에서 새롭게 제안한 방식인 삼각파 마이크로스텝 형태, 다른 하나는 정현파 마이크로스텝 형태로 전류를 공급했다.

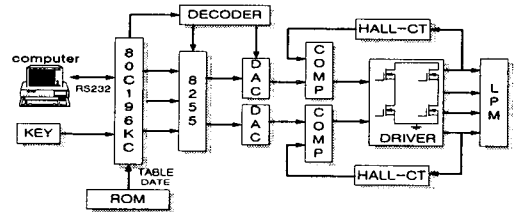


그림 4 마이크로스텝 제어기의 블록도

2.3 시뮬레이션 및 실험결과

그림 6은 LPM의 정추력을 시뮬레이션과 F.E.M, 그리고 정추력 측정 시스템을 이용한 실험치를 서로 비교하고 있다. LPM의 정추력 실험에서 입력 전류는 2[A]이다.

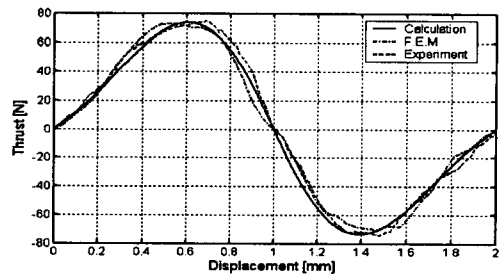
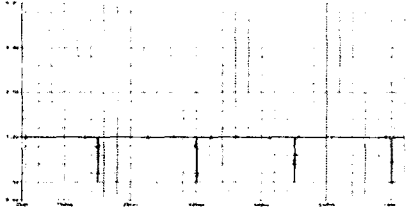


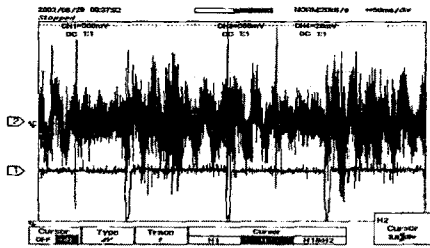
그림 5 LPM의 정추력

그림 6(a)은 PSpice를 이용하여 시뮬레이션 파형을 나타낸 것이다. 그림 6(b)은 LPM에 2상 구형파 전류를 인가하였을 때의 전류 A상과 B상, 그리고 진동을 나타내고 있다. 이 그림에서 한 피치 당 4개의 큰 진동이 나타나는걸 볼 수 있다. 기존의 2상 구형파 구동 방식의 LPM은 각 극에서 발생하는 추력의 불균형으로 인한 진

동, 소음, 탈조 등의 문제점을 가지고 있기 때문에 서보압으로 제어하기 위한 LPM의 응용에 많은 제약 조건을 가지게 된다.



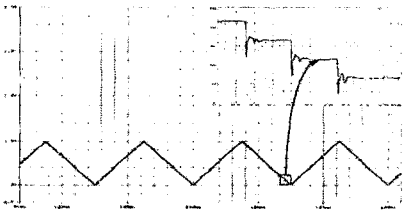
(a) 구형파 시뮬레이션



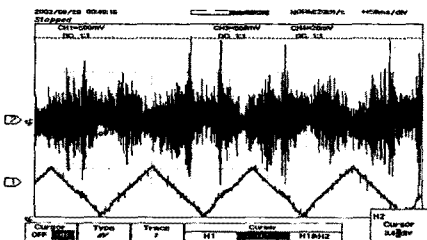
(b) 구형파 입력 시 실험 파형

그림 6 구형파 전류 시뮬레이션 및 실험 파형

그림 7(a)은 삼각파 마이크로스텝 입력 전류의 시뮬레이션 파형이다. 삼각파 마이크로스텝 구동 방식을 채택하여 전류를 입력했고, 우측 상단에 마이크로스텝 시뮬레이션 파형을 볼 수 있다. 그리고 그림 7(b)은 그림 7(a)의 실험 측정 파형이다. 즉 LPM에 삼각파 마이크로스텝을 입력하였을 때 전류 A상, B상, 그리고 진동을 측정한 파형이다. 두 그림을 비교했을 때 기준 전류로 정현파를 입력했을 때 보다 삼각파 마이크로스텝을 입력했을 때가 진동이 감소함을 알 수 있다.



(a) 삼각파 마이크로스텝 시뮬레이션 파형

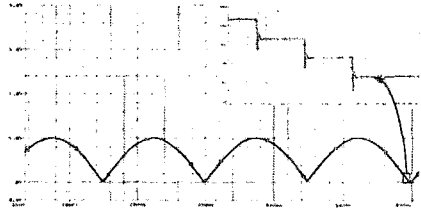


(b) 삼각파 마이크로스텝 입력 시 실험 파형

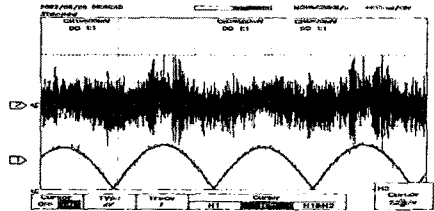
그림 7 삼각파 마이크로스텝 입력 전류 시뮬레이션 및 실험 파형

그림 8(a)은 정현파 마이크로스텝 입력 전류의 시뮬레

이션 파형이다. 삼각파와 마찬가지로 마이크로스텝 구동 방식을 채택했기 때문에 마이크로스텝 시뮬레이션 파형을 볼 수 있다. 그림 8(b)은 LPM에 정현파 마이크로스텝을 입력했을 때 전류 A상, B상 및 진동을 나타내는 파형이다. 구형파를 인가했을 때나 삼각파 마이크로스텝을 인가했을 때 보다 진동이 현저히 감소함을 알 수 있다. 앞의 시뮬레이션과 정추력 특성 곡선을 비교 해 봤을 때 LPM의 진동을 줄이는 가장 좋은 입력 파형은 정현파 마이크로스텝이라는 걸 알 수 있다. 그리고 마이크로프로세서를 이용하여 정현파의 분주 수를 나눌 수 있으므로 정밀한 위치제어가 가능하다.



(a) 정현파 마이크로스텝 시뮬레이션 파형



(b) 정현파 마이크로스텝 입력 시 실험 파형

그림 8 정현파 마이크로스텝 입력 전류 시뮬레이션 및 실험 파형

3. 결 론

LPM은 공극의 퍼미언스 변화에 의해 추력이 발생하며, 추력의 불균형은 진동, 소음, 탈조 현상 등의 문제를 발생한다. 이에 본 논문에서는 LPM 운전 시 진동을 최소화하기 위한 방법으로 입력전류 파형에 따른 정추력 특성 및 진동 특성을 고찰하였다.

LPM의 진동 영향을 고찰하기 위해 구형파, 삼각파 마이크로스텝, 정현파 마이크로스텝 구동 방식을 비교한 결과로는 정현파 마이크로스텝 방식이 진동, 소음이 가장 작았음을 실험을 통하여 알 수 있었다. 그러나 정현파 마이크로스텝 구동전류의 경우에도 고정자 치와 가동자 치가 만나는 부분에 여전히 진동이 남아 있음을 볼 수 있다. 이는 고정자에 의한 영향으로 판단되어지며, 이는 LPM이 기하학적 형상에 기인된 영향과 이동자와 고정자의 치 끝단 자기포화에 의해 생기는 현상으로 향후 계속 연구되어야 할 과제이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Takashi Kenjo and Akira Sugawara, 'Stepping Motors and Their Microprocessor Controls', Oxford University Press 1984
- [2] Benjamin C. Kuo, 'Theory and Applications of Step Motors', West Publishing Co.
- [3] MP.Rahman and C. Grantham, 'Design Approaches For Microstepping Step Motor Controllers', IEEE, 1990
- [4] Kwang-Woon Lee, Won-Sik Jang, Jung-Bae Park, etc, 'Development of High Performance Microstepping Driver', KIPE, Vol2, No3, pp37-43, 1997