

Static Characteristics Investigation of LPM According to Input Current Waveforms

許斗石* · 曹允鉉**
(Du-Suk Heo · Yun-Hyun Cho)

Abstract - This paper presents the selection method of the input current wave forms for the thrust force ripple of linear pulse motor (LPM). We have developed and tested a prototype 2-phase 4-poles LPM with the permanent magnet and its control driver. To obtain the thrust performance curve of LPM, the permeance curve at the air gap and the thrust are calculated and estimated by the analytical method on the base of the magnetic equivalent circuit and the finite element method. And, the thrust characteristics at the static operation state are analyzed and experimented with the respect to the input wave forms such as the rectangular, the triangular micro-step and the sine micro-step wave forms to investigate the thrust ripple and the vibration effects of LPM.

Key Words : Linear Pulse Motor (LPM), Micro-step wave form, Thrust, Vibration, Finite element method

1. 서 론

최근 디지털 제어의 발달에 따라 리니어 펄스 모터(Linear Pulse Motor : 이하 LPM)는 디스크 드라이브나 프린터를 비롯한 컴퓨터 주변 장치와 선반 기계 등의 사무 자동화 및 산업용 정밀 서보장치 등의 분야에서 핵심 구동원으로 비중이 커지고 있다. 특히 마이크로프로세서의 급속한 발달과 영구자석의 고성능화에 힘입어 LPM의 고 정밀화, 소형화, 고투크화가 이루어져 그 사용 범위는 더욱 증가하고 있다 [2][4]. 이는 별도의 동력변환 장치 없이 직선, 왕복 운동을 얻을 수 있으며, 초 저속에서 고속 운전까지 속도 범위가 넓고, 단위 입력 당 추력이 매우 크며, 마이크로스텝 구동(Micro-step drive)에 의해서 위치정밀도를 향상시킬 수 있기 때문이다[1, 2].

하지만 LPM의 단점으로는 구동 시 구조적으로 큰 진동이 발생하며, 부하 변화 시 역전이나 탈조 현상이 발생하는 문제가 발생할 수 있다[4]. 이러한 LPM의 구동 특성은 주로 정추력 특성에 의해 결정되므로 이에 관한 상세한 해석이 필요하다. LPM의 정추력은 이동자와 고정자 사이의 자기저장 에너지의 변화에 의해 결정된다. 자기 저장에너지는 이동자와 고정자의 기계적, 자기적 형상에 따른 퍼미언스 함수로 표현되며, 입력 전류의 시간에 따른 크기와 형태에 의해 발생 추력이 영향을 미치게 된다.

이에 본 논문은 정상 운전 상태에서 LPM이 발생하는 진

동의 영향을 최소화하는 입력 전류 파형을 선정하는 방법 및 특성을 고찰하였다. 정특성 고찰을 하기 위해서는 먼저 2상 4극 LPM의 시작기를 설계, 제작하였으며, 입력 전류 파형에 따른 특성을 고찰하기 위해서는 전류 제어형 구동 드라이버를 설계, 제작하였다. 정상 상태의 추력 특성을 얻기 위해서는 자기 등가 회로방법과 유한요소법을 이용하여 공극 퍼미언스 곡선을 구하였다. 또한, LPM의 운전 중의 진동 영향을 고찰하기 위해서는 구형파, 삼각파와 마이크로스텝, 정현파와 마이크로스텝의 입력 전류 파형에 따른 추력 계산식을 도출하고, 시뮬레이션 값과 실험값을 비교, 분석하였다.

2. LPM의 구조와 추력 계산식

2.1 LPM의 구조

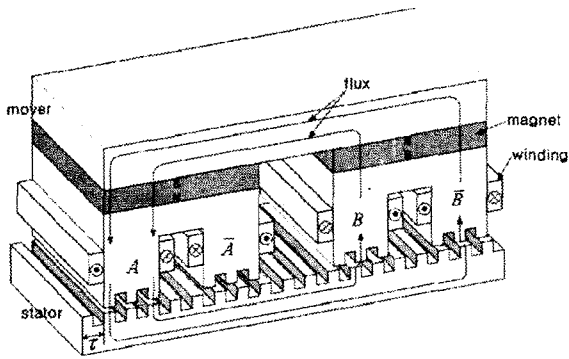
본 논문에서 제작한 LPM의 구조는 그림 1(a)과 같이 영구자석과 전자석을 갖는 하이브리드형 LPM이다. LPM은 크게 이동자와 고정자로 두 부분으로 나눌 수 있다. 이동자는 순철로 된 Back Yoke, 두 개의 전자석과 희토류(NdFeB) 영구자석으로 구성되어 있다. 그림 1(a)에서 각상의 치의 배치 간격은 A상과 B상의 경우 치 피치의 $\tau/4$ 피치만큼 어긋나 있으며, A상과 \bar{A} 상, B상과 \bar{B} 상은 각각 $\tau/2$ 피치만큼 어긋난 구조로 되어 있다. A상 코일과 \bar{A} 상 코일은 직렬로 서로 반대 방향으로 결선된다. 고정자는 일정한 치 피치에 슬롯은 규소강판을 적층한 구조로 되어 있다. 그림 1(b)은 영구자석을 고려한 간략화 된 자기 등가회로도이며, 고정자와 이동자의 자기 투자율은 무한대라고 가정하였다.

* 學生會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 碩士

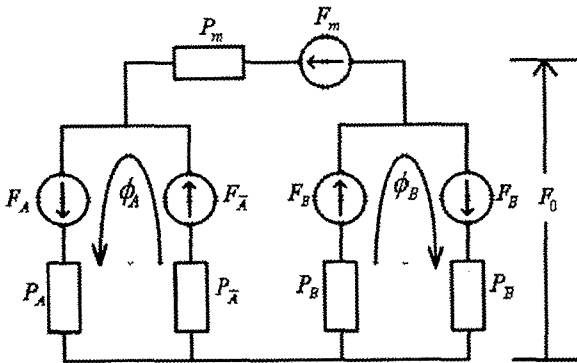
** 正 會 員 : 東亞大 工大 電氣工學科 教授, 工博

接受日字 : 2004年 1月 19日

最終完了 : 2004年 5月 21日



(a) LPM의 구조



(b) 자기 등가회로

그림 1 2상 4극 하이브리드형 LPM의 구조 및 자기 등가회로

Fig. 1 Construction and magnetic equivalent circuit of 2 phase 4 pole Hybrid type LPM

여기서,

- F_0 : 여자 소스를 포함한 공극 기자력 강하,
- $F_A, F_{\bar{A}}, F_B, F_{\bar{B}}$: 각 극에서의 기자력,
- $P_A, P_{\bar{A}}, P_B, P_{\bar{B}}$: 각 극에서의 퍼미언스,
- F_m, P_m : 영구자석에서의 기자력과 퍼미언스이다.

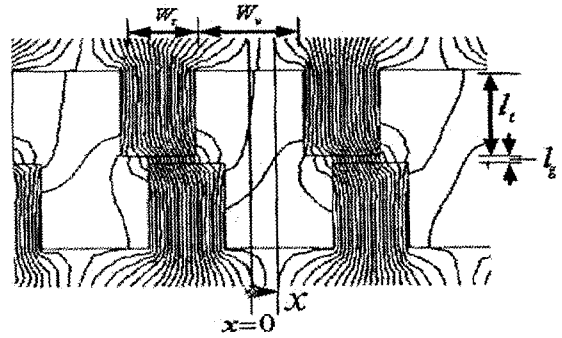
2.2 LPM의 추력 계산식

본 연구의 시작기 LPM은 2상 4극기로 한 극에 8개의 치를 가지고 있다. LPM의 추력 특성은 치의 형상과 입력전류 크기에 많은 영향을 받으므로 추력 특성을 해석하기 위해서는, 먼저 공극 부분의 퍼미언스를 구해야 한다.

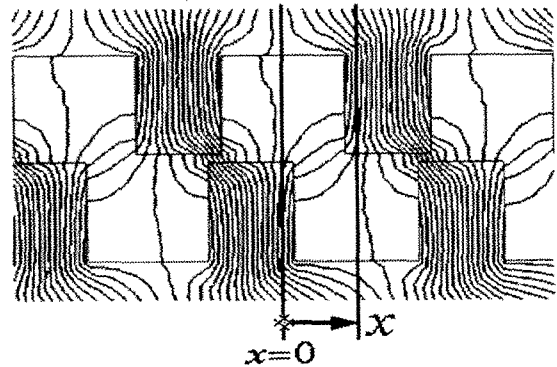
일반적으로 퍼미언스는 식 (1)과 같이 표현된다[2].

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

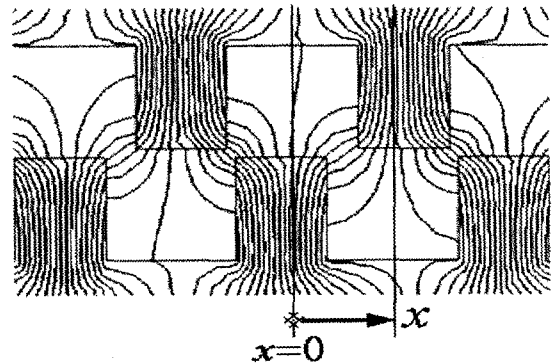
여기서, dA = 자로의 미소 단면적[m^2], l = 자로의 길이 [m], μ_0 = 공극의 투자율($4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]) 이다. 그림 2는 시작기 LPM 이동자와 고정자의 위치에 따른 자속분포 선도를 유한요소법으로 해석한 결과를 나타낸다.



(a) $0 \leq x \leq 0.5 w_v$



(b) $0.5 w_v \leq x \leq w_t$



(c) $w_t \leq x \leq 0.5(w_t + w_v)$

그림 2 이동자 변위에 자속 분포 선도

Fig. 2 Flux distribution diagram according to the displacement of mover

여기서, w_t = 치 폭, w_v = 슬롯 폭, l_g = 공극 길이이다.

그림 3은 식 (1)을 이용하여 시작기 LPM의 $\tau/2$ 피치 변위에 퍼미언스를 계산한 값과 FEM으로 시뮬레이션 값을 비교한 곡선이다. 본연구의 시작기 LPM 치 피치는 2[mm], 치 폭 0.82[mm], 슬롯 폭 1.18[mm], 공극 길이는 0.1[mm]이며, 자속 밀도가 1.1[T]인 회토류 영구자석을 사용한 2상 4극이다. 그림 3에서 최대 퍼미언스는 약 7.6×10^{-7} [Wb/A], 최저 퍼미언스는 약 2.7×10^{-7} [Wb/A]이며, 정현파 곡선과 비슷함을 알 수 있다.

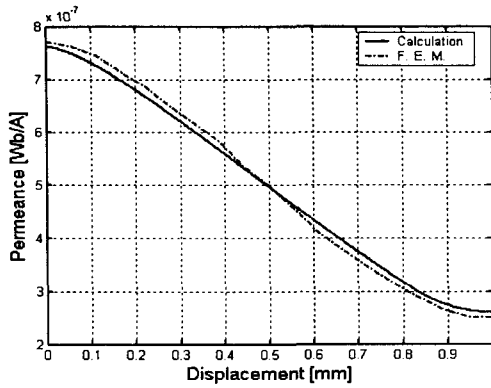


그림 3 시작기 LPM의 퍼미언스 곡선
Fig. 3 Permeance curve of the prototype LPM

그림 3의 퍼미언스 특성 곡선과 같이 각 자극 A, B, \bar{A} , \bar{B} 에 대한 공극 퍼미언스는 식 (1)을 기초로 한 이론적 해석방법으로 식 (2)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 각 자극의 퍼미언스는 공간적으로 $\tau/4$ 만큼 어긋나며, 본 연구에서는 퍼미언스의 고차항은 기본 고조파에 비해서 작으므로 6차 고조파까지 표현하였다.

$$\begin{aligned}
 P_A &= P_0 + P_1 \cos \frac{2\pi}{\tau} x + P_2 \cos 2 \frac{2\pi}{\tau} x + \dots \\
 &\quad + P_6 \cos 6 \frac{2\pi}{\tau} x \\
 P_B &= P_0 + P_1 \cos \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{4}\right) + P_2 \cos 2 \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{4}\right) + \dots \\
 &\quad + P_6 \cos 6 \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{4}\right) \\
 P_{\bar{A}} &= P_0 + P_1 \cos \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{2}\right) + P_2 \cos 2 \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{2}\right) + \dots \\
 &\quad + P_6 \cos 6 \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{2}\right) \\
 P_{\bar{B}} &= P_0 + P_1 \cos \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{3}{4} \tau\right) + P_2 \cos 2 \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{3}{4} \tau\right) + \dots \\
 &\quad + P_6 \cos 6 \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{3}{4} \tau\right)
 \end{aligned} \tag{2}$$

표 1은 식 (2)에서 본 연구의 시작기 LPM의 퍼미언스를 계산한 값과 FEM 시뮬레이션 값의 계수를 나타낸다.

표 1 시작기 LPM의 퍼미언스 값의 고조파계
Table 1 Permeance harmonic coefficient of prototype LPM

	Calculation	FEM
P_0	0.4993×10^{-6}	0.3502×10^{-6}
P_1	0.2322×10^{-6}	0.141×10^{-6}
P_2	0.0045×10^{-6}	0.0378×10^{-6}
P_3	0.0146×10^{-6}	0.0495×10^{-6}
P_4	0.0032×10^{-6}	0.0278×10^{-6}
P_5	0.003×10^{-6}	0.0509×10^{-6}
P_6	0.0019×10^{-6}	0.0262×10^{-6}

표 1의 퍼미언스 계수를 토대로 각 자극에서 생성되는 퍼미언스 곡선은 그림 4와 같다.

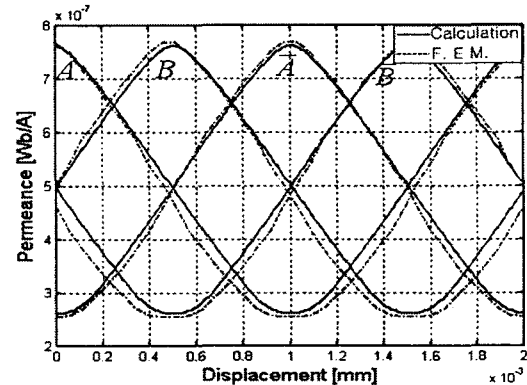


그림 4 LPM의 공극 퍼미언스 곡선
Fig. 4 Airgap permeance curve of LPM

LPM의 추력은 공극의 자기 저장에너지의 변화 분, 즉 공극의 퍼미언스 변화 분으로 표현되므로 식 (2)을 변위 x 에 대한 편미분을 하면 식 (3)과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial P_A}{\partial x} &= \frac{2\pi}{\tau} \left(-P_1 \sin \frac{2\pi}{\tau} x - 2P_2 \sin \frac{2\pi}{\tau} 2x - \dots \right. \\
 &\quad \left. - 6P_6 \sin \frac{2\pi}{\tau} 6x \right) \\
 \frac{\partial P_B}{\partial x} &= \frac{2\pi}{\tau} \left(P_1 \cos \frac{2\pi}{\tau} x + 2P_2 \sin \frac{2\pi}{\tau} 2x - \dots \right. \\
 &\quad \left. + 6P_6 \sin \frac{2\pi}{\tau} 6x \right) \\
 \frac{\partial P_{\bar{A}}}{\partial x} &= \frac{2\pi}{\tau} \left(P_1 \sin \frac{2\pi}{\tau} x - 2P_2 \sin \frac{2\pi}{\tau} 2x + \dots \right. \\
 &\quad \left. - 6P_6 \sin \frac{2\pi}{\tau} 6x \right) \\
 \frac{\partial P_{\bar{B}}}{\partial x} &= \frac{2\pi}{\tau} \left(P_1 \sin \frac{2\pi}{\tau} x + 2P_2 \sin \frac{2\pi}{\tau} 2x + \dots \right. \\
 &\quad \left. + 6P_6 \sin \frac{2\pi}{\tau} 6x \right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

식 (2)로부터 각 극에 대한 퍼미언스의 합은 P_0 항과 P_4 항만 남게 되므로 식 (4)와 같다

$$\sum P_i = 4P_0 + 4P_4 \cos \frac{2\pi}{\tau} 4x \quad i = A, B, \bar{A}, \bar{B} \tag{4}$$

각 극에 대한 퍼미언스를 변위 x 에 대해 편미분한 값의 합은 P_4 항만 남게 되어 식 (5)와 같다.

$$\sum \frac{\partial P_i}{\partial x} = -\frac{2\pi}{\tau} 16P_4 \sin \frac{2\pi}{\tau} 4x \tag{5}$$

각 극에 대한 퍼미언스와 영구자석의 퍼미언스의 합은 다음 식 (6)과 같이 얻어진다.

$$\sum P_i + P_m = 4P_0 + 4P_4 \cos \frac{2\pi}{\tau} 4x + P_m \tag{6}$$

자기 등가회로 그림 1(b)로부터 기자력 강하 F_0 를 나타 내면 식 (7)과 같이 얻어진다.

$$F_0 = \frac{\sum P_i F_i + \Phi_m}{\sum P_i + P_m} \quad (7)$$

여기서, Φ_m 은 다음 식 (8)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\Phi_m = F_m P_m = \left(\frac{B_0 l_m}{\mu_m} \right) \left(\frac{\mu_m A_m}{l_m} \right) = B_0 A_m \quad (8)$$

여기서 B_0 : 영구자석의 자속밀도, A_m : 영구자석의 단 면적, l_m : 영구자석의 높이, μ_m : 영구자석의 투자율이다. 따라서, 각 자극의 자성체 코아 내에 통과하는 자속 Φ_i 는 식 (9)와 같다.

$$\Phi_i = (F_i - F_0) P_i \quad (9)$$

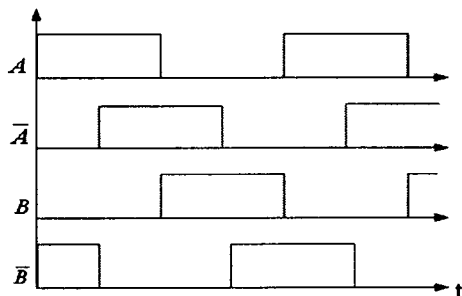
각 극의 자속 Φ_A, Φ_B 일 때, 이동자에 작용하는 추력 은 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F_t &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \Phi_i^2 \frac{\partial R_i}{\partial x} \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \frac{\Phi_i^2}{P_i^2} \frac{\partial P_i}{\partial x} \end{aligned} \quad (10)$$

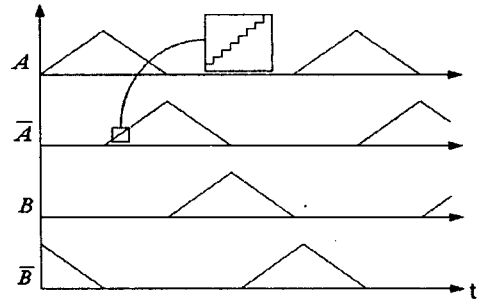
여기서, R_i : 자기저항 ($= \frac{1}{P_i}$), N_R : 이동자 길이에 대한 고정자 치의 개수, τ : 한 피치의 길이이다. 이상에서 LPM에서 발생하는 추력 F_t 는 공극 기자력 강하 F_0 을 포함 하는 식으로 표현되며 식 (11)과 같이 된다.

$$F_t = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 (F_i - F_0)^2 \frac{\partial P_i}{\partial x} \quad (11)$$

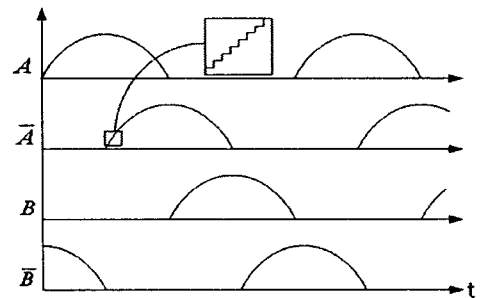
본 연구에서는 식 (11)을 이용하여 LPM의 발생 추력의 특성을 고찰하기 위하여 전류파형에 따른 정특성을 그림 5와 같이 3가지 종류에 대해 연구하였다. 그림 5에서 (a)는 구형파 입력 전류 파형, (b)는 삼각파 마이크로스텝 입력 전류 파형, (c)는 정현파 마이크로스텝 입력 전류 파형이다.



(a) 구형파 전류



(b) 삼각파 마이크로스텝 전류



(c) 정현파 마이크로스텝 전류

그림 5 각 상의 입력 전류 파형

Fig. 5 Input current wave of each phase

2.1.1 구형파 입력 전류

그림 5(a)의 구형파 전류를 LPM에 입력하면 기자력은 식 (12)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F_A &= -F_{\bar{A}} = NI_m \\ F_B &= -F_{\bar{B}} = NI_m \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, N 은 코일의 턴 수이고, I_m 은 최대 전류이다.

LPM의 추력 방정식인 식 (11)의 기자력 강하 F_0 을 구 하기 위해서는 식 (2)의 각 극에 대한 퍼미언스와 기자력의 합을 구하면 식 (13)과 얻어진다. 여기서 $F = NI_m$ 이다.

$$\begin{aligned} \sum P_i F_i &= F(-P_A - P_B + P_{\bar{A}} + P_{\bar{B}}) \\ &= -2\sqrt{2}FP_1 \sin \frac{2\pi}{\tau} x \end{aligned} \quad (13)$$

기자력 강하 F_0 는 다음 식 (14)과 같이 표현된다.

$$F_0 = \frac{P_m F_m - 2\sqrt{2}FP_1 \cos \frac{2\pi}{\tau} x}{4P_0 + 4P_4 \cos \frac{2\pi}{\tau} 4x + P_m} \quad (14)$$

기자력 강하 F_0 을 식 (11)에 대입하여 2상 구형파 입력 전류에 대한 정 추력은 식 (15)과 같이 얻어진다.

$$F_t = -\frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{FF_m P_m P_1}{P_0} \right) \left[\sin \frac{2\pi}{\tau} x - \frac{FP_1}{F_m P_m} \sqrt{2} \sin 2 \frac{2\pi}{\tau} x \right] \quad (15)$$

여기에서 $F = NI$ 이고, $F_m P_m = B_0 A_m$ 이므로 식 (15)을 다시 쓰면, 식 (16)과 쓸 수 있다.

$$F_t = -\frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{NI_m B_0 A_m P_1}{P_0} \right) \times \left[\sin \frac{2\pi}{\tau} x - \frac{NI_m P_1}{B_0 A_m} \sqrt{2} \sin 2 \frac{2\pi}{\tau} x \right] \quad (16)$$

식 (16)에서 $NI_m P_1$ 에 비해 $B_0 A_m$ 이 매우 크므로 제 2 고주파 항은 무시 할 수 있다. 따라서, 식 (16)을 다시 고쳐 쓰면, 구형파 입력 파형에 대한 정추력 F_t 는 식 (17)과 같이 얻어진다.

$$F_t = -\frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{NI_m B_0 A_m P_1}{P_0} \right) \left[\sin \frac{2\pi}{\tau} x \right] \quad (17)$$

2.1.2 삼각파 마이크로스텝 입력 전류

그림 5(b)의 삼각파 마이크로스텝 입력 전류를 인가한 경우 A상과 B상의 전류파형을 푸리에 급수로 전개하면 식 (18)과 같이 나타낸다.

$$I_A = \frac{8I_m}{\pi^2} \left\{ \sin \frac{2\pi}{\tau} x + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2} \sin(2n+1) \frac{2\pi}{\tau} x \right\}$$

$$I_B = \frac{8I_m}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cos(2n-1) \frac{2\pi}{\tau} x \quad (18)$$

또한, $I_A = -I_B$, $I_B = -I_A$ 이다.

따라서, 식 (18)의 삼각파 마이크로스텝 입력 전류를 식 (11)에 대입하면 추력을 얻을 수 있다.

2.1.3 정현파 마이크로스텝 입력 전류

그림 5(c)의 정현파 마이크로스텝 입력 전류에 대한 각 극의 기자력은 다음 식 (19)과 같이 표현된다.

$$F_A = -F_{\bar{A}} = NI_m \sin \frac{2\pi}{\tau} x$$

$$F_B = -F_{\bar{B}} = NI_m \cos \frac{2\pi}{\tau} x \quad (19)$$

기자력 강하 F_0 을 구하기 위해 식 (2)부터 식 (6)을 이용하면

$$\sum P_i + P_m = 4P_0 + P_m$$

$$\sum P_i F_i = 2P_1 NI_m$$

기자력 강하 F_0 는 식 (20)과 같다.

$$F_0 = \frac{2P_1 NI_m + P_m F_m}{4P_0 + 4P_4 \cos \frac{2\pi}{\tau} 4x + P_m} \quad (20)$$

F_t 와 F_0 을 식 (11)에 대입하여 정리하면, 식 (21)과 같다.

$$F_t = \left(\frac{P_1 NI_m + P_m F_m}{P_0} \right) \left[P_1 NI_m \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\tau} x \right) + P_1 NI_m \cos^2 \left(\frac{2\pi}{\tau} x \right) \right] \quad (21)$$

식 (21)을 간단히 하면 식 (22)과 같이 정현파 마이크로스텝 입력 전류 파형에 대한 정추력 F_t 가 얻어진다.

$$F_t = \left(\frac{P_1 NI_m + B_0 A_m}{P_0} \right) P_1 NI_m \quad (22)$$

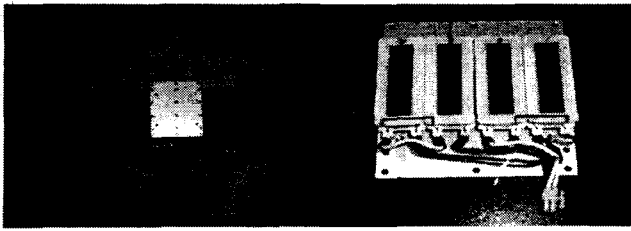
3. 시작기 LPM과 측정 실험장치

3.1 시작기 LPM

본 논문에서 제작된 시작기의 LPM에 대한 기계적인 사양과 전기적인 사양은 표 2와 같다. 이동자의 길이는 120 [mm], 폭 60 [mm], 높이 40 [mm]이며, 이동자는 리니어 베어링에 의해 직선 왕복 운동이 가능하도록 제작되었다. 치 피치는 2 [mm]이며, 슬롯 폭 1.18[mm]와 치 폭 0.82[mm]이며, 이동자와 고정자 사이의 공극은 0.1[mm]로 하였다. 그림 6은 본 연구에서 개발한 시작기의 LPM 외형을 나타낸다. 이동자의 Back Yoke는 Core(RM440)를 사용하였고, 이동자의 영구자석은 희토류(NdFeB)를 사용하였다. 고정자의 치는 자성계열의 S45C를 사용하였고, 길이는 550[mm]이다.

표 2 LPM의 기본 사양
Table 2 Brief Specification of LPM

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



(a) LPM (b) 이동자의 형상

그림 6 시작기 LPM과 이동자
Fig. 6 Prototype of Linear pulse motor and mover

3.2 LPM의 제어기 및 측정 시스템

그림 7은 마이크로스텝 제어기의 블록도를 나타낸다. 본 논문에서 입력 전류 파형에 따른 제어 특성을 고찰하기 위하여 구동 드라이버의 제어기는 인텔사의 80C196KC 16bit 마이크로프로세서를 사용하였다. 제어기의 기본 동작은 삼각파 마이크로스텝과 정현파 마이크로스텝 전류 파형을 Lookup Table로 ROM에 저장하고, LPM의 기준 전류 파형을 D/A 컨버터를 통해 출력한다. 이것은 Hall-CT를 통해 얻어지는 LPM의 입력 전류 파형과 비교하여 PWM출력을 발생하며, 이 PWM 파형을 OP-Amp를 거쳐 H-Bridge 회로에 공급하게 된다. 시스템의 구성은 PC를 통한 보다 유연한 사용자 인터페이스와 제어프로그램 개발의 편의성을 위해 RS-232 직렬통신이 가능하도록 설계, 제작하였다. 그림 8은 본 논문을 위해 제작한 전류 제어형 LPM 구동 드라이브이다.

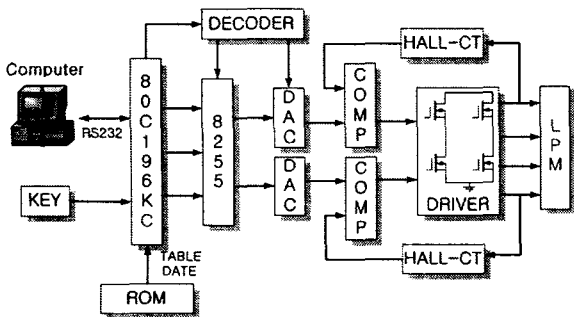


그림 7 LPM 제어 시스템의 구성도
Fig. 7 The block diagram of LPM control driver

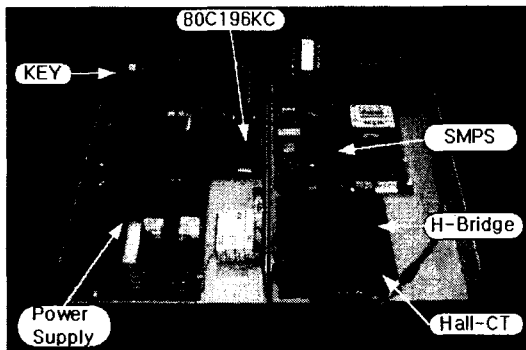


그림 8 LPM 구동 드라이브
Fig. 8 Control driver of LPM

그림 9는 본 논문에서 사용한 LPM 정추력 측정 시스템을 나타낸다. 이 시스템은 LPM의 이동자와 고정자의 공극을 0.01 [mm]까지 조절 할 수 있는 구조로 설계 되었으며, LPM의 위치에 따른 특성을 고찰하기 위해서는 리니어 엔코더가 장착되어 있다. 또한, LPM의 발생하는 추력,수직력을 측정할 수 있게 전후, 상하, 좌우에 로드셀(Load Cell)을 장착되어있다.

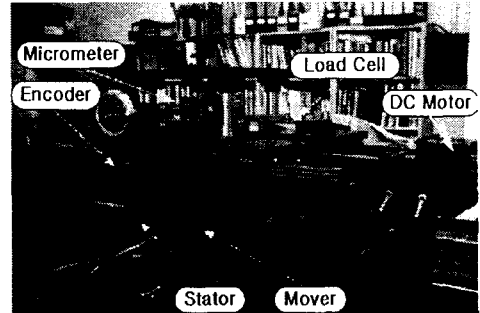


그림 9 LPM의 측정 시스템
Fig. 9 Measurement System of LPM

4. 시뮬레이션 및 실험결과

4.1 정추력 해석

그림 10은 정격전류 2[A]를 LPM의 권선에 인가했을 때 이동자의 변위에 따른 정추력 곡선을 나타낸다. 정추력 곡선은 식 (17)에서 제시한 이론적 계산값과 유한요소 해석 값 및 실험값을 비교하였다. 이때 최대 추력은 약 70[N]이며, 고조파가 포함된 정현파로 시뮬레이션 값과 실험값이 거의 일치함을 알 수 있다. 이와 같이 LPM의 추력 특성은 진동과 소음을 유발하는 원인이 되며, 이를 최소화하기 위해서는 최적 운전의 여자 방식을 선정하여야 함을 알 수 있다.

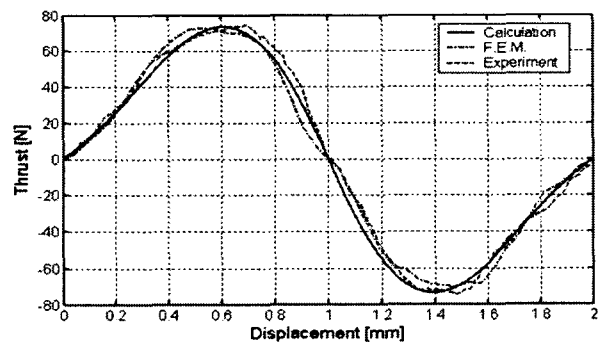
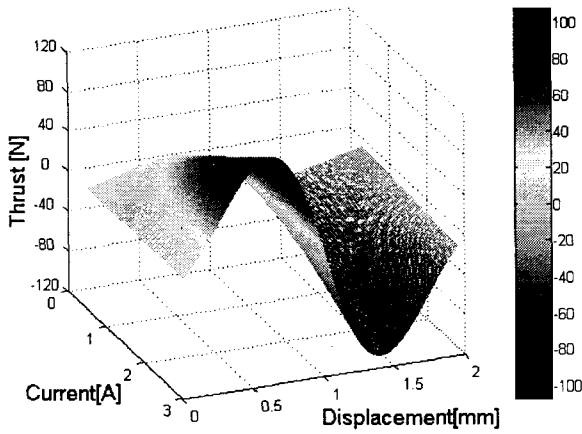
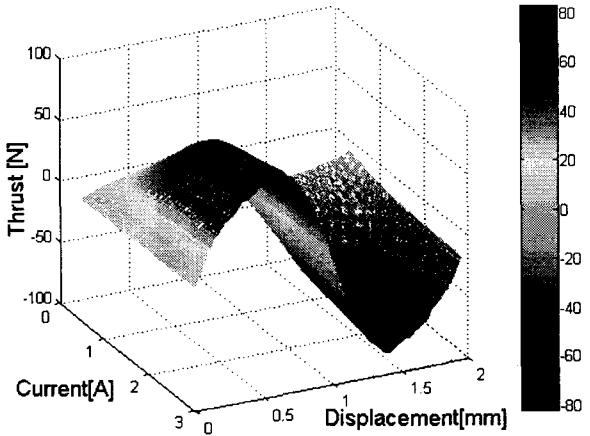


그림 10 정추력 곡선
Fig. 10 Static thrust curve of LPM

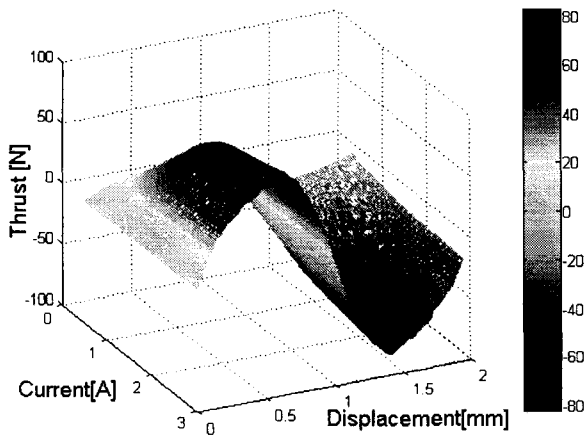
그림 11은 입력 전류를 0.5[A]에서 3[A]까지 인가했을 때 이동자의 변위에 따라 추력 곡선을 나타낸다. 그림 11에서 입력 전류가 증가하면 이론적 계산 값인 그림 11(a)는 선형적으로 증가하나, 그림 11(b)의 FEM 해석 값과 그림 11(c)의 실험값은 2[A] 이상에서 비선형적으로 변화함을 알 수 있다. 이는 자성체의 비선형 특성에서 기인된 현상이다.



(a) Simulation



(b) FEM



(c) Experiment

그림 11 전류 크기와 변위에 따른 정추력 곡선
Fig. 11 Static thrust curve according to current magnitude and displacement

그림 12는 여자 전류의 크기에 따른 최대 정추력 곡선이다. 그림 11에서 추력 특성 곡선에서 최대 값들을 전류에 대하여 나타내었다. 전류가 2[A] 이상 일 때 계산 값의 추력은

선형적으로 증가하여 3[A] 일 때 약 107[N]이지만 FEM 및 실험값은 약 80[N] 정도 나타나고 있다. 이는 이론적인 계산값은 이동자와 고정자의 포화를 고려하지 않았으므로 선형적으로 증가하나, 실험 및 FEM 값은 2[A] 이후 부터는 자속의 포화가 일어나기 때문에 비선형적으로 증가하게 된다.

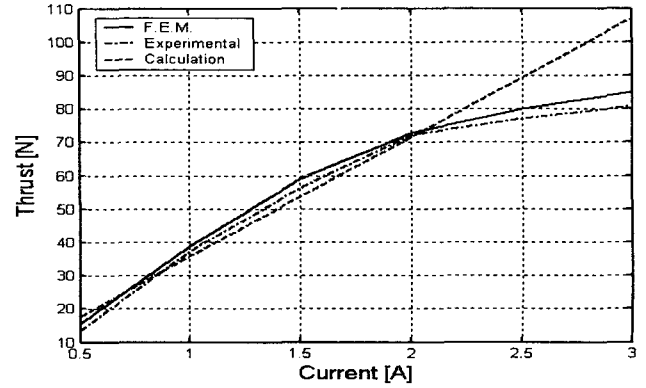
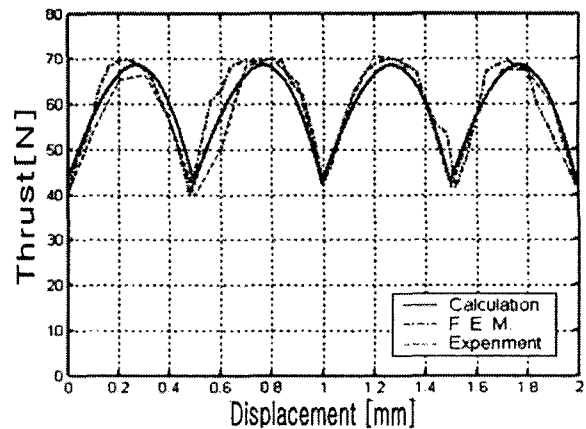


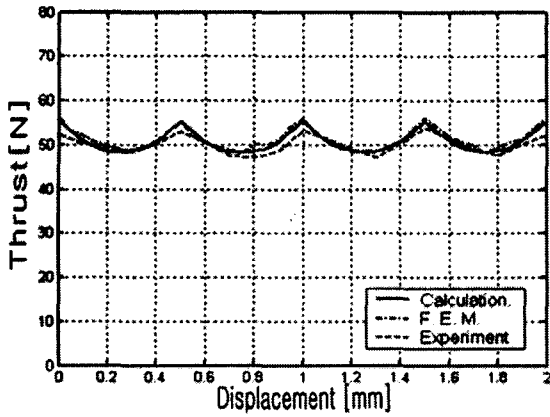
그림 12 최대 추력 특성

Fig. 12 Maximum thrust characteristics

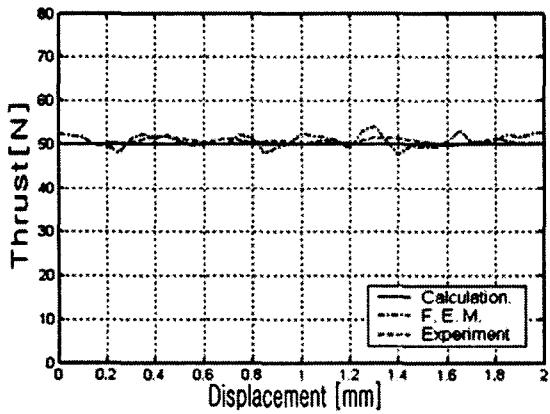
그림 13은 한 피치 동안 2상 구형파, 삼각파와 마이크로스텝, 정현파와 마이크로스텝 입력 전류 파형에 대한 추력 특성을 나타낸 것이다. 마이크로스텝 입력 전류에 대해 추력을 측정할 경우 이동자의 변위에 따라 입력되는 전류의 크기가 변하게 된다. 변화된 전류는 각 변위에 맞게 마이크로스텝 제어기에서 공급해 주고 있다. 2상 구형파 구동에서 정추력은 최대 약 70[N]에서 최소 약 42[N]까지의 주기로 나타나고 있다. 이와 같은 추력의 리플은 LPM의 진동을 유발하는 원인이 된다. 삼각파와 마이크로스텝 인가 시 구형파와 같은 주기를 가지고 추력 특성 곡선이 발생하게 된다. 하지만 그 리플 폭은 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. 반면에, 정현파와 마이크로스텝을 입력 전류 파형으로 인가했을 때 추력은 약 50[N] 정도로 일정하게 나타난다. 정현파와 마이크로스텝 구동에서 추력은 구형파나 삼각파와 마이크로스텝 구동에 비하여 리플이 거의 나타나지 않는다는 것을 실험과 FEM을 통해 알 수 있다. 따라서 LPM 구동 시 추력 리플이 가장 작은 입력 전류 파형은 정현파와 마이크로스텝 파형임을 알 수 있다.



(a) 구형파 인가 시



(b) 삼각파 마이크로스텝 전류 인가 시



(c) 정현파 마이크로스텝 전류 인가 시

그림 13 정상 운전 시 입력 전류 파형에 따른 추력 특성
Fig. 13 Static thrust characteristic according to input current waveforms during the static operation

5. 결 론

LPM은 공극 퍼미언스 변화에 의해 추력이 발생하므로 입력 전류에 따라 극에서 발생하는 추력의 불균형은 진동, 소음, 탈조 현상 등의 원인이 된다. 이에 본 연구에서는 LPM의 추력 리플을 최소화하기 위한 방법으로 구형파, 삼각파와 마이크로스텝과 정현파 마이크로스텝 입력 전류 파형에 대해 정추력 특성을 고찰하였다. 각 입력 파형에 따른 정추력 특성을 고찰하기 위해서는 추력 방정식을 이용하여 추력을 계산하고, 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 실험을 통해 비교, 분석하였다. 그 결과로 정현파와 마이크로스텝 전류 파형이 추력 리플을 최소화 할 수 있는 파형임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 동아대학교(과제번호 : 2003-001-02-108) 교비 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] 조운현, 이광호, "선형 펄스 전동기의 특성 해석", 대한 전기학회, 48B권 5호, pp249-256, 1999.
 [2] Benhamin C. Kuo, "Theory and Applications of Step Motors", West Publishing Co.
 [3] M.P.Rahman and C. Grantham, "Design Approaches For Microstepping Step Motor Controllers", IEEE, 1990.
 [4] Takashi Kenjo AND Akira Sugawara, "Stepping Motors and Their Microprocessor Controls", Oxford University Press 1984.
 [5] Kwang-Woon Lee, Won-Sik Jang, Jung-Bae Park, etc, "Development of High Performance Microstepping Driver", KIPE, Vol2, No3, pp37-43, 1997.
 [6] Tan Kok Kiong and Lee Tong Heng, "Precision Motion Control" Springer, 1995.

저 자 소 개



허두석 (許斗石)

1979년 1월 2일 생. 2002년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 동아대 공대 전기공학과 대학원 졸업(석사).
 Tel : (051) 200-6952
 E-mail : doodol@dreamwiz.com



조운현 (曹允鉉)

1960년 2월 27일 생. 1984년 한양대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1986~1988년 삼성종합기술원 전자기기연구소 연구원.
 1990~1995년 한국전기연구소 선임연구원.
 1997년~현재 동아대학교 전기공학과 부교수
 Tel : (051) 200-7742
 Fax : (051) 200-7742
 E-mail : yhcho@dounet.donga.ac.kr