

Design of Current Waves for the Vibration Decrease of Linear Pulse Motor

曹允鉉* · 徐振瑚** · 李權純†
(Yun-Hyun Cho · Jin-Ho Suh · Kwon-Soon Lee)

Abstract - Linear pulse motor (LPM) has the vibration during the operation because of magnetic characteristic which is caused by the mechanical configuration and the electromagnetic property. This paper proposes the calculation of thrust on the base of magnetic equivalent circuit for the purpose of the vibration minimization of LPM. The permeance of LPM is calculated and simulated from the construction tooth. The thrust is compared with the analytical method, the 3D finite element method (FEM) and the experimental values. The vibration of LPM is measured and estimated to select the input current wave for an optimal operation condition.

Key Words : Linear Pulse Motor(LPM), Permeance Method, Finite Element Method(FEM), Vibration

1. 서 론

스텝 모터(step motor)는 개루프 위치 제어(open-loop position control)가 가능하며 주변의 디지털 기기와 인터페이스가 기 때문에 여러 분야에서 이용범위가 확대되어지고 있다. 또한 고정도 위치 결정 제어를 필요로 하는 자동화 기기분야에서도 서보 모터(servo motor)의 수요가 증가하고 있다. 이러한 위치 결정 장치에 사용되는 서보 모터는 대부분이 회전형 모터와 회전운동을 직선운동으로 변환시키는 변환장치로 이루어진다. 이때, 회전형 모터를 이용한 고정도의 직선운동 시스템은 가격이 고가이고 설치공간도 크게 차지할 뿐 아니라, 기어 등을 사용한 기계 요소장치의 마모로 인하여 정도가 떨어져 정밀 위치 제어(precision position control)를 유지하기 위해서는 유지 및 보수를 위한 비용경비가 많이 소요된다. 따라서 직선 왕복운동을 직접 얻을 수 있는 정밀 위치 제어 시스템의 동력 장치로 최근에 선형 서보 모터(linear servo motor)가 주목을 받고 있는 추세이다 [1][2].

일반적인 선형 서보 모터 중에서, 선형 펄스 모터(linear pulse motor, LPM)는 직선 운동력을 발생하여 개루프 제어에 의해서 정밀한 위치 제어가 가능하여 여러 분야에서 응용이 되고 있고 최근에는 LPM을 이용한 직선 유닛개발에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 특히 LPM의 특징으로는 기구적으로 간단하고 개루프 제어에 의하여 고정도의 위치 결정이 가능할 뿐 아니라 변위 오차가 누적되지 않으므로 기동, 정지, 역전 시 응답성이 우수해서 신뢰성이 높다고 할 수 있

다. 더구나 다른 종류의 선형 모터에 비하여 정지할 때 매우 큰 유지력(detent force)을 가지고 있으므로 별도의 유지 장치가 필요 없고 수리 보수가 필요 없으므로 경비가 저렴하다. 따라서 프린터, 스캐너, X-Y 테이블 등과 같은 고정밀 위치 제어 관련 작동기(actuator)로서 많이 사용되어지고 있다 [1][4]. 그러나 LPM의 단점으로는 구동 시 구조적으로 큰 진동이 발생하며 부하 변화 시에 역전이나 탈조 현상이 발생하는 문제가 발생할 수 있다. 또한 스텝 크기가 기계적으로 결정됨으로 위치 결정에는 한계가 있으며 제작 시에 가공오차가 존재함으로 위치 오차가 발생할 수 있다.

본 논문에서는, 먼저 LPM의 퍼미언스 방법(permeance method)에 의하여 추력 방정식(thrust equation)을 구하고, 정특성(static characteristic) 실험과 모의실험을 통하여 기존의 2상(2-phase) 구동에서 정특성을 고찰하였다. 또한 입력 전류 크기에 따른 정추력을 퍼미언스 방법에 의하여 계산된 추력 방정식을 이용하여 계산된 값, 모의실험을 통한 값 그리고 추력 측정 시스템을 이용하여 측정된 추력 값들을 비교하였고 LPM의 진동을 최소화하기 위한 동작 상태를 위한 입력 전류를 분석하여 선택하였다. 또한 진동특성을 고찰하기 위하여, 마이크로 스텝 제어기(micro-step controller)를 설계 및 제작하여 삼각파 마이크로 스텝(triangle micro-step)과 정현파 마이크로 스텝(sine micro-step)을 인가하여 2상 구동에서의 정특성과 비교하여, 최적의 입력 전류 파형(input current wave)을 산출하였다.

2. 선형 펄스 모터

2.1 LPM의 구조 및 동작원리

본 논문에서 고려되어진 LPM의 구조는 그림 1과 같다. 그림 1에서는 하이브리드형(hybrid type) 스텝 모터의 구조를 직선형으로 변형한 영구자석과 전자석을 갖는 직선형 하이브

† 교신저자, 正 會 員 : 東亞大 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : kslee@dau.ac.kr

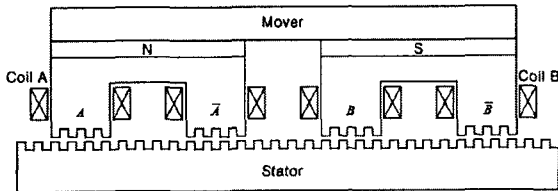
* 正 會 員 : 東亞大 電氣工學科 副教授 · 工博

** 正 會 員 : 東亞大 電氣工學科 Post-Doctor · 工博

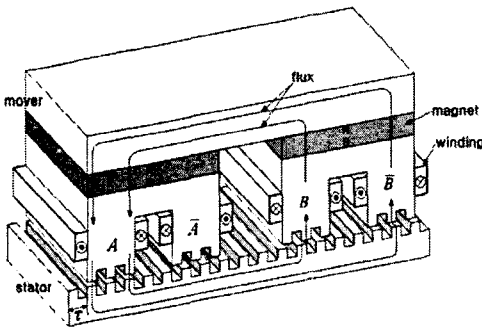
接受日字 : 2005年 1月 17日

最終完了 : 2005年 2月 21日

리드형 스텝 모터를 나타내고 있고, 이때 LPM 구조는 크게 이동자와 고정자 두 부분으로 나눌 수 있다. 이동자는 순철로 된 Back Yoke, 두 개의 전자석과 회로류 영구자석으로 구성되어 있다. 그리고 그림1(a)에서 각 상의 배치간격은 A상과 B상의 경우에 피치의 1/4 피치만큼 어긋나 있으며, A상과 \bar{A} 상, B상과 \bar{B} 상은 각각 1/2 피치만큼 어긋난 구조로 되어 있다. 따라서 본 논문에서 고려되어진 LPM은 전통적인 2상 4극 하이브리드형으로 설계되어 있기 때문에 이동자는 매 단계마다 1/4피치에서 동작되는 두 개의 위상으로 활성화되어지게 된다. 또한 A상 코일과 \bar{A} 상 코일은 서로 반대방향으로 연결되어 있으므로, 만약 A상에 전류가 여자했을 때 A권선의 자속 방향이 영구자석의 자속방향과 같다면 \bar{A} 권선의 자속방향은 영구자석의 자속방향과 반대방향으로 형성되어 서로 상쇄되므로 자속이 흐르지 않게 된다. 즉, A상 코일과 \bar{A} 상 코일, B상 코일과 \bar{B} 상 코일은 서로 반대방향으로 감겨져 있음을 의미한다. 고정자는 이동자와 같은 치와 슬롯 피치에 규소강판을 적층한 구조로 되어있다 [7][8].



(a) 정면도
(a) A front view



(b) 전체도
(b) General drawing

그림 1 2상 4극 LPM의 기본적인 형상
Fig. 1 Basic Configuration of 2-phase 4-poles LPM

2.2 LPM의 추력 방정식

본 시작기 LPM은 한 극에 8개의 치를 가지고 있으며 각 극들은 같은 극 피치를 가지고 위치하고 있다. 따라서 한 치에 관한 추력 해석을 통하여 전체의 합성 추력을 얻을 수 있다. 또한 LPM의 추력 특성은 치의 형상에 많은 영향을 받으므로 치 형상에 따른 추력 특성을 해석하기 위해서는, 먼저 치 형상에 따른 공극 부분의 퍼미언스를 구해야 한다. 일반적으로 퍼미언스는 식(1)과 같이 표현 되어진다 [4][5].

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

여기서, dA : 자로의 미소 단면적

l : 자로의 길이

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

식(1)을 이용하여, 1/2 피치에 대한 퍼미언스 분포를 구할 수 있고 고려되어진 LPM의 1/2 피치에서 이동자와 고정자 위치에 대한 세 가지 경우에 대한 자속 패턴을 유한요소방법 (finite element method, FEM)을 이용하여 모의실험 결과로서 세 가지 경우에 대한 퍼미언스 식을 적용함으로써 구할 수 있다. 이때 그림 2는 퍼미언스 식(1)과 FEM을 이용한 시작기 LPM의 자속선 형태를 고려함으로써 퍼미언스와 FEM으로 모의실험 결과를 나타내고 있다. 특히 본 논문에서는 LPM 추력이 퍼미언스 방법을 이용하여 구해짐으로서 먼저 퍼미언스를 구하는 것이 중요하다.

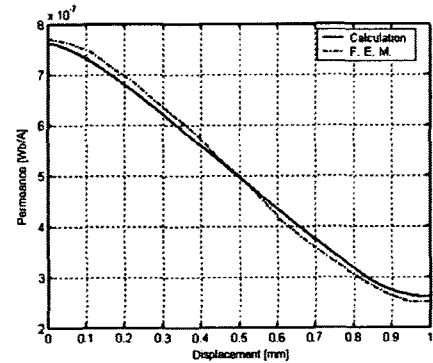


그림 2 표준 LPM의 퍼미언스
Fig. 2 Permeance of prototype LPM

이때, 각 극에 대한 퍼미언스의 합과 각 극에 대한 퍼미언스를 이동자와 고정자 사이의 이동거리에 대하여 편미분한 값들의 합으로서 나타낼 수 있고, 따라서 각 극에 대한 퍼미언스와 영구자석의 퍼미언스 합은 식(2)와 같이 나타낼 수 있고 영구자석에서의 2상 4극 LPM의 자기등가회로(magnetic equivalent circuit)는 그림 3과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^4 P_i + P_m \approx 4P_0, \quad (P_m \ll P_0) \tag{2}$$

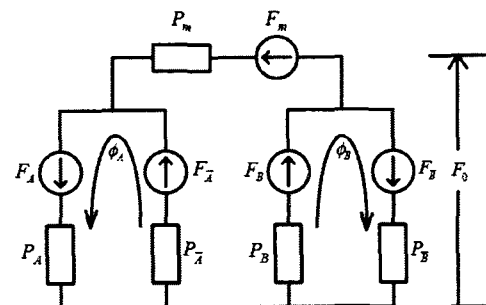


그림 3 LPM의 자기 등가 회로
Fig. 3 Magnetic Equivalent Circuit of LPM

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 퍼미언스

그림 3에서 보여지는 LPM의 자기동기회로를 이용함으로써, 기자력 강하 F_0 를 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_0 = \frac{\sum_i P_i F_i + P_m F_m}{\sum_i P_i + P_m}, \quad (i = A, B, \bar{A}, \bar{B}) \quad (3)$$

또한 식(3)의 $F_m P_m$ 은 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$F_m P_m = \left(\frac{B_0 l_m}{\mu_m} \right) \left(\frac{\mu_m A_m}{l_m} \right) = B_0 A_m \quad (4)$$

여기서, B_0 : 영구자석의 자속밀도
 A_m : 영구자석의 단면적
 l_m : 영구자석의 높이
 μ_m : 영구자석의 투자율

따라서

$$\Phi_i = (F_i - F_0) P_i \quad (5)$$

이고 각 극의 자속이 Φ_A, Φ_B 일 때, 가동자에 작용하는 힘은 다음과 같이 나타내어진다.

$$F_i = \frac{1}{2} \sum_i \Phi_i^2 \frac{\partial R_i}{\partial x} = \frac{1}{2} \sum_i \frac{\Phi_i^2}{P_i^2} \frac{\partial P_i}{\partial x} \quad (6)$$

여기서, R_i : 자기저항(= $1/P_i$)

이때, 공극 기자력 강하 F_0 에 대한 추력 F_i 는 식(7)과 같이 표현되어질 수 있다.

$$F_i = \frac{1}{2} \sum_i (F_i - F_0)^2 \frac{\partial P_i}{\partial x} \quad (7)$$

본 논문에서 설계되어진 LPM의 여자 방식은 2상 여자 방식으로서, 2상 구형과 여자 방식에 대한 추력 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$F_A = F_B = NI, \quad F_{\bar{A}} = F_{\bar{B}} = -NI \quad (8)$$

이때 식(3)과 식(3)에 식(8)을 대입함으로써, 추력 방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$F_i = -\frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{NiF_m P_m}{P_0} \right) \left[\sin \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{8} \right) \right] \quad (9)$$

그때, LPM의 동적 방정식(dynamic equation)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M \frac{d^2 X}{dt^2} + 2\xi M \frac{dX}{dt} = F(t) \quad (10)$$

여기서, M : 전체 질량

ξ : 제동 계수(damping factor)

3. 표준 선형 펄스 모터 설계 및 제어

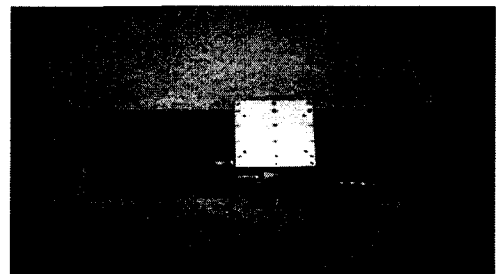
3.1 표준 LPM의 설계

본 논문에서 제작되어진 LPM에 대한 기계적 및 전기적 사양들을 표 1에서 나타내어진다. 이때 이동자의 길이는 120[mm], 폭 60[mm], 높이 40[mm]이며, 이동자는 선형 베어링에 의하여 직선 왕복 운동이 가능하도록 제작되었다.

표 1 설계된 표준 LPM의 차원

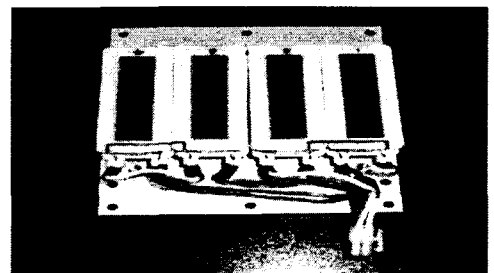
Table 1 Dimension of the Designed Prototype LPM

Mechanical Dimensions		Electrical Dimensions	
Number of tooth	8	Number of pole	4
Slot pitch	2.00[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	0.2[mm]	Coil resistance	1.6[Ω]
		magnet	NdFeB



(a) 표준 LPM

(a) Prototype LPM



(b) Mover 형상

(b) Mover configuration

그림 4 표준 LPM 및 이동자 형상

Fig. 4 Prototype LPM and Mover Configuration

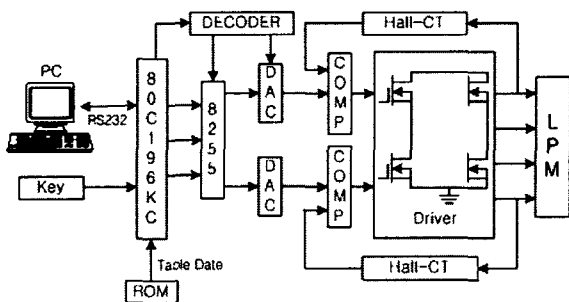
또한, 그림 4(a)는 본 논문에서 개발되어진 표준 LPM의 형상을 나타내고 그림 4(b)는 표준 LPM의 치와 슬롯의 형상을 나타내고 있다. 이동자의 Back Yoke는 코어(RM440)를 사용하였고, 이동자의 영구자석은 희토류(NdFeB)를 사용하였다. 그리고 고정자의 치는 자성계열의 S45C를 사용하였고 길이는 550[mm]이다.

3.2 제어기 및 계측 시스템 설계

그림 5는 본 연구를 위하여 설계되어진 표준 LPM 시스템의 전체 시스템을 표현하고 있다. 그림 5(a)는 본 연구를 위해 제작된 LPM 구동 드라이브를 나타내고 있다. 여기에서, 좌측 상단부분은 인텔사의 80C196KC 컨트롤러이고 우측 상단부분은 메인보드에 전원을 공급하는 SMPS를 의미한다. 좌측 하단에 있는 power supply는 LPM에 직접 전원을 공급하는 장치로서 상용전압 220V를 인가했을 때 LPM에 공급되는 전압을 제어할 수 있도록 설계되었다. 또한 메인 보드에 전원을 공급하는 장치인 SMPS와 LPM에 전원을 공급하는 power supply는 상용 전원 220V를 직접 입력 가능하도록 설계하여 별도의 DC 전압 공급 장치를 필요로 하지 않으며, LPM에 공급되는 전압의 결정부분도 사용자가 소프트웨어를 이용하여 직접 변경 가능하도록 설계하였다. 더불어서, 메인 보드와 구동 드라이브의 전원은 포토커플러로 분리해서 사용하였고 구동 드라이브는 압단락 방지, 상전류(over current) 검출의 기능을 칩 내부에 가지고 있는 IR2130을 사용하여 구성하였다. 우측 하단부분은 8개의 MOSFET로 구성된 H-Bridge와 상전류를 검출하는 Hall-CT 회로를 나타내고 있다.



(a) LPM 구동 마이크로 스텝 드라이브
(a) Actuator micro-step drive of LPM



(b) LPM 마이크로 스텝 구동 드라이브의 블록선도
(b) Block diagram of LPM actuator drive

그림 5 표준 LPM의 형상
Fig. 5 Configuration of Prototype LPM

또한 그림 5(b)는 LPM 마이크로 스텝 구동 드라이브의 블록선도를 의미한다. 본 논문에서 입력 전류 파형에 따른 제어 특성을 고찰하기 위하여 구동 드라이브 제어기는 인텔사의 80C196KC 16비트 마이크로프로세서를 사용하였고 제어기의 기본동작은 기준 전류파형을 Lookup Table로 ROM에 저장하고, LPM의 기준 전류파형을 D/A 변환기를 통해 출력한다. 이것은 Hall-CT를 통하여 얻은 전류파형과 비교하여 PWM 출력을 발생하고, 이러한 PWM 파형을 OP-앰프를 거쳐 H-Bridge 회로에 공급하게 된다. 시스템의 구성은 PC를 통하여 유연한 사용자 인터페이스와 제어 프로그램 개발의 편의성을 위하여 RS232 직렬통신 인터페이스로서 데이터를 주고받을 수 있도록 설계 및 제작되었다. 이때, 본 논문에서 사용하게 될 입력파형은 크게 3가지로 나눌 수 있는데 구형과 전류, 삼각파와 마이크로 스텝 전류 그리고 정현파와 마이크로 스텝 전류형태로서 LPM에 공급하도록 하였다.

4. 실험

LPM은 슬롯 고정자와 이동자 사이에서의 공극 진동에 영향을 받는다. 이것은 LPM의 특성에 기초를 둔 이동자의 위치에 따라 공극 퍼미언스를 얻는 것이 매우 중요하다. 그림 6은 LPM의 이동자의 위치에 따른 각각의 상을 나타내는 A, B, \bar{A} , \bar{B} 에 대한 퍼미언스를 의미한다. 이때 이동자의 치(tooth)들과 고정자를 정렬 시킬 때, 치 피치(teeth pitch)의 1/4 포인터 극에서 최대 퍼미언스가 존재함을 알 수 있다.

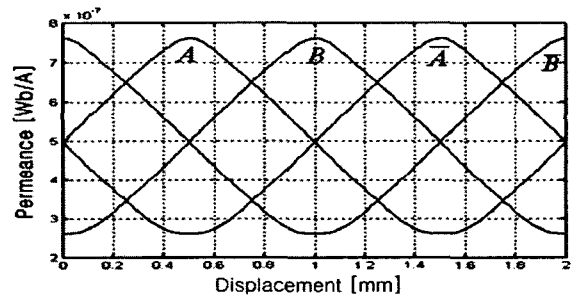


그림 6 이동에 따른 각 상의 퍼미언스 파형
Fig. 6 Permeance Waves of Each Pole through movement

그림 7은 표준 LPM에 일정비율로 입력 전류가 공급되어질 때 변위에 따른 추력을 나타낸다.

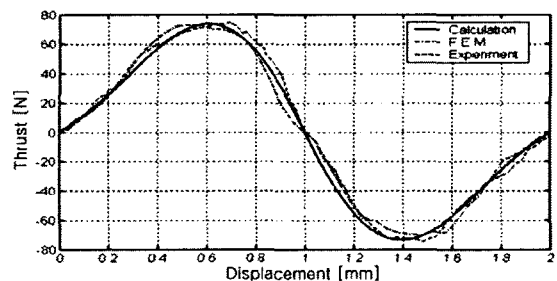
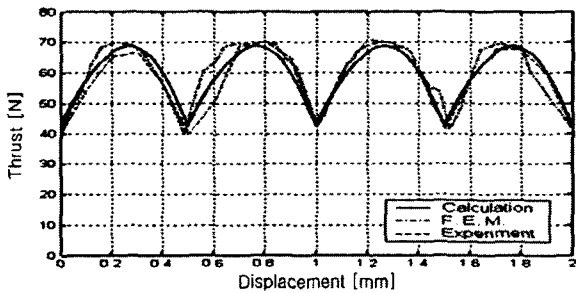
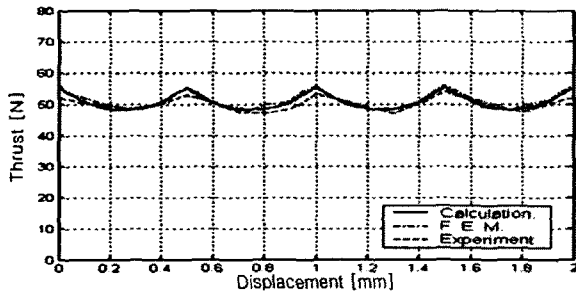


그림 7 변위에 대한 모의 추력, FEM 및 실험 파형
Fig. 7 Thrust Simulation, FEM and Experimental Waves according to the Displacement

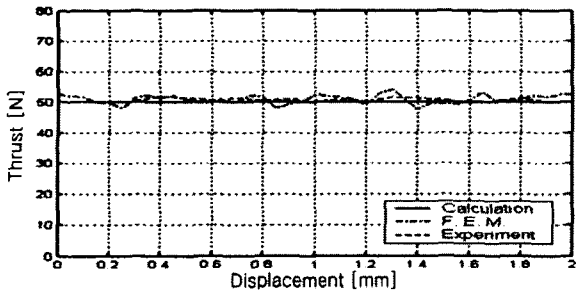
이때 LPM의 정추력은 모의실험, FEM 그리고 정추력 측정 장치를 이용한 실제 실험값과 비교하였다. 실험 파형은 정추력 측정 장치에서 x 변위에 따라 측정된 정추력 신호를 인디케이터(indicator)로 받고, Labview를 이용하여 PC로 나타낸다. 그리고 정추력 측정을 위해서는 먼저 2[A]의 전류를 인가시킨 후, 가동자를 2[mm/s]의 속도로 DC 모터가 밀어주고, 이때 선형 엔코더의 변위값인 X축과 로드셀(load cell)의 정추력 값인 Y축을 X-Y 그래프로 표시한 결과이다. 우리는 이러한 결과를 통하여, 정추력 곡선이 정현파와 유사하지만 상당량의 고주파 성분이 포함되어 있음을 알 수 있다.



(a) 구형파 입력 전류 구동
(a) Rectangular wave input current driving



(b) 삼각파 마이크로 스텝 입력 전류 구동
(b) Triangle micro-step wave input current driving

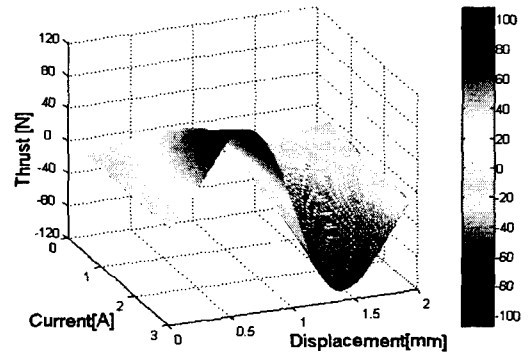


(c) 정현파 마이크로 스텝 입력 전류 구동
(c) Sine micro-step wave input current driving

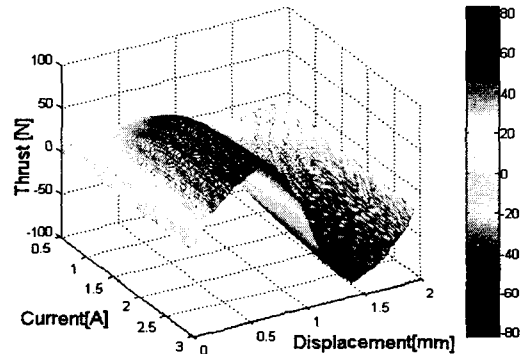
그림 8 입력 전류에 따른 추력 파형의 특성
Fig. 8 Characteristic Comparisons with Thrust Waves according to Input Current

그림 8은 한 피치 동안 2상 구형파 입력 전류, 삼각파 마이크로 스텝 입력 전류, 정현파 마이크로 스텝 입력 전류에 대한 정추력 특성을 나타낸 것이다. 특히 마이크로 스텝 입력 전류 구동 시 정추력 특성 곡선을 측정할 경우에 한 피치

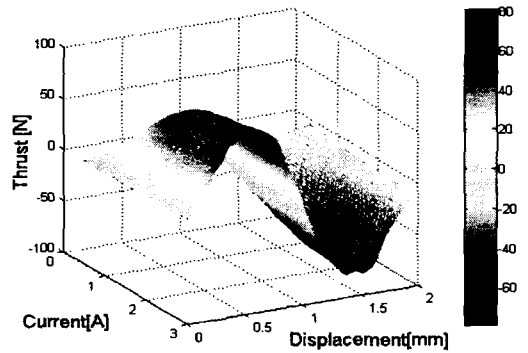
에 들어가는 전류는 일정하게 정해져 있는 전류 값이 아니라 여러 단계로 분주를 하여 각 분주의 전류만큼 인가한 다음 정추력을 측정하였다. 이러한 실험 결과에서, 2상 구형파 구동에서의 정추력은 리플이 크게 나타나고, 이론식에서 정현파를 입력 전류 파형으로 인가했을 때 추력은 50[N] 정도로 일정함을 알 수 있다. 또한 정현파 마이크로 스텝 구동에서의 정추력은 구형파나 삼각파 마이크로 스텝 구동에 비하여 리플이 거의 나타나지 않음을 FEM과 실제 실험을 통하여 그 결과를 확인할 수 있다.



(a) 이론적 계산치
(a) Theoretical calculation values



(b) 유한 요소 방법
(b) Finite element method(FEM)



(c) 실험
(c) Experiment

그림 9 전류 크기에 따른 추력 곡선
Fig. 9 Thrust curve according to current magnitude

그림 9는 입력 전류를 0.5[A]에서 3[A]까지 인가했을 때

이동자의 변위에 따른 추력 곡선을 나타내고 있다. 그림 9에서 알 수 있듯이, 입력 전류가 증가하면 이론적 계산치는 선형적으로 증가함을 그림 9(a)에서 알 수 있고 FEM 해석치와 실제 실험치인 그림 9(b)와 그림 9(c)는 2[A] 이상에서 비선형적으로 변화함을 알 수 있다. 특히 이러한 비선형적 변화는 자성체의 비선형 특성에 기인된 현상이라고 할 수 있다. 또한 그림 10은 여자 전류의 크기에 따른 최대 정추력 곡선으로서, 그림 9의 추력 특성 곡선에서 최대값들에 대한 전류에 대하여 나타내었다. 전류가 2[A] 이상 일 때 계산값의 추력은 선형적으로 증가하여 3[A]일 때 약 107[N]이지만 FEM 및 실험치는 약 80[N] 정도로 나타나고 있음을 알 수 있다.

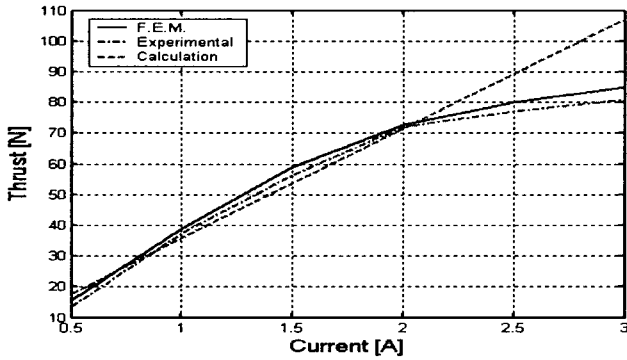
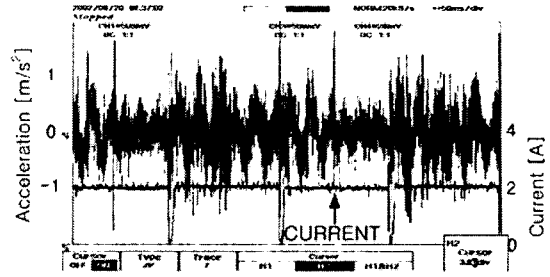
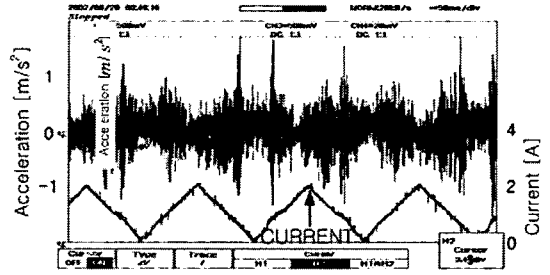


그림 10 최대 추력 특성
Fig. 10 Characteristics of Maximum Thrust Force

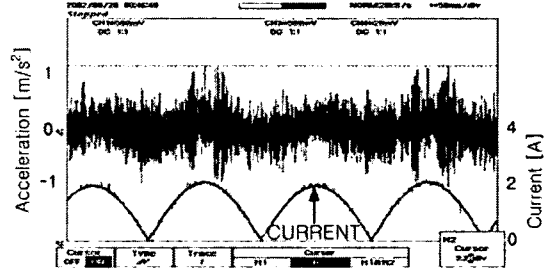
그림 11은 LPM에 일정 비율의 입력 전류를 공급하기 위하여 3가지 형태의 진동 특성을 보여주고 있다. 그림 11(a)는 LPM에 구형파 입력 파형을 인가하였을 때의 Hall-CT를 이용하여 전류 A상과 B상 그리고 진동을 나타내고 있다. Hall-CT에 입력되는 전류는 2[A]이지만 출력되는 전압은 1[V]이다. 사용되어진 진동계는 AP Tech사와 AP37을 사용해 진동을 측정된 결과이다. 특히 LPM이 이동할 때 토크가 큰 부분, 즉 가동자의 치와 고정자의 치가 겹쳐지기 시작하는 부분엔 큰 진동이 나타나는 것을 알 수 있고 따라서 한 피치당 4개의 큰 진동이 나타남을 알 수 있다. 기존의 2상 구형파 구동방식의 LPM은 각 극에서 발생하는 추력의 불균형으로 인한 진동, 소음, 탈조 등의 문제점을 가지고 있기 때문에 그 응용에서 많은 제약조건을 가지고 있었다. 그림 11(b)는 LPM에 삼각파 마이크로 스텝 입력을 인가하였을 때 전류 A상, B상 그리고 진동을 측정된 파형이다. 이러한 그림 11(a)와 (b)를 비교했을 때, 기존 전류로 구형파를 입력했을 때보다 삼각파 마이크로 스텝 입력을 했을 경우에 더욱 진동이 감소함을 알 수 있다. 마지막으로, 그림 11(c)는 LPM에 정현파 마이크로 스텝 입력을 인가했을 때 전류 A상, B상 및 진동을 나타내는 파형이다. 정현파를 입력하여 구동시킨 LPM의 진동은 구형파 및 삼각파를 인가했을 때보다 현저히 감소함을 알 수 있고 이러한 결과를 통하여 LPM의 진동을 감소시키기 위한 가장 이상적인 입력파형은 정현파임을 확인할 수 있다. 그리고 마이크로프로세서를 이용하여 구형파의 분주 수를 나눌 수 있으므로 정밀한 위치제어가 가능하다. 여기에서는 구형파의 스텝 분주를 250등분으로 분할하여 구도하였다.



(a) 구형파 입력 전류
(a) Rectangular wave input current



(b) 삼각파 마이크로 스텝 입력 전류
(b) Triangle micro-step wave input current



(c) 정현파 마이크로 스텝 입력 전류
(c) Sine micro-step wave input current

그림 11 각 입력 전류 파형들에 대한 진동 특성
Fig. 11 Vibration Characteristics according to Each Input Current Waves

5. 결 론

LPM은 공극 퍼미언스 변화에 의하여 추력이 발생함으로서 입력 전류와 기하학적 형상에 따라 각 극에서 발생하는 추력의 불균형은 진동, 소음, 탈조 현상 등의 문제를 발생한다. 이에 본 논문에서는, LPM의 추력 리플을 최소화하기 위한 한 가지 방법으로서 입력 전류 파형에 따른 정추력 특성 및 진동 특성을 고찰하는 연구를 수행하였다.

특히 본 논문에서, LPM의 개루프 운전 시에 문제가 되는 진동 영향을 고찰하기 위해서 구형파, 삼각파 마이크로 스텝, 정현파 마이크로 스텝 구동방식을 비교하였고 그 결과로서 정현파 마이크로 스텝 구동방식이 진동 및 소음이 가장 적음을 FEM 해석 및 실제 실험을 통하여 나타내었다. 그러나 정현파 마이크로 스텝 구동전류의 경우에도 고정자 치와 가동자 치가 만나는 부분에는 여전히 진동이 남아 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 LPM의 기하학적 형상에 기인된 고주파에 의한 영향으로 판단되어지며, LPM의 기하학적 형상에 기인된 영향과 이동자와 고정자의 치 끝단 자기포화계 의해 생

기는 현상으로 추후에 지속적으로 연구되어야 할 과제일 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술부(MOST)의 국가지정연구실사업(NRL)의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] T. Kenjo and A. Sugawara, *Stepping motors and their microprocessor controls*, Oxford University Press, 1984.
- [2] H. Yamada, M. Mirei, K. Kawakatu, Y. Yamamoto, Z. Miwa, "Characteristics of assist device for artificial heart using linear pulse motor", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 23, No. 5, pp. 3011-3-13, 1987.
- [3] D. Ebihara, F. Satoh, H. Dohmeki, "The characteristic of two-phase eight-pole linear pulse motor by using micro-step drive", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 23, No. 5, pp. 2838-2840, 1987.
- [4] T. K. Kiong, L. T. Heng, *Precision motion control*, Springer, 1995.
- [5] Y. H. Cho, S. D. Kim, J. C. Kim, D. H. Koo, T. B. Lim, "The static characteristics analysis of the linear pulse motor for X-Y table", *Proceedings of Compumag 11th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields*, pp. 707-708, 1997.
- [6] 최동수, 하이브리드형 선형 스텝모터의 센서 없는 제어를 위한 비선형 상태 관측기 설계, 서울대학교, 1998.
- [7] 조운현, 이광호, 김성도, "선형 펄스 전동기의 특성 해석", 대한전기학회논문지, 48B권, 5호, pp. 249-256, 1999.
- [8] 이동주, 이은용, 김성현, 김성종, "리니어 펄스 모터에서 치 형상과 기자력 불평형이 정추력 특성에 미치는 영향", 대한전기학회논문지 49B권 3호, pp.131-137, 2000.
- [9] 구대현, 홍정표, 강도현, "부하 변동에 따른 선형 유도 전력 전달 장치의 특성 해석", 대한전기학회논문지 52B권 12호, pp. 595-601, 2003.

저 자 소 개



조운현(曹允鉉)

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



서진호(徐振瑚)

1969년 12월 27일 생. 1993년 한양대 수학과 졸업. 1998년 부경대학교 대학원 졸업(석사). 2002년 동경공업대학 제어시스템공학과 졸업(공학). 2002~2003년 부경대학교 해양산업개발연구소 선임연구원. 2003~현재 동아대학교 전기공학과 국가지정연구실(NRL) Post-Doctor
Tel : (051) 200-6950
E-mail : suhgang@hanmail.net



이권순(李權純)

1955년 1월 18일 생. 1977년 충남대 공업교육과 졸업. 1981년 서울대 전기공학과 졸업(석사). 1990년 오레곤주립대 전기및컴퓨터공학과 졸업(공학). 1982년~현재 동아대학교 전기공학과 교수.