

리니어 펄스 모터의 추력 및 수직력에 대한 특성 해석

(The Characteristic Analysis for Thrust and Normal Force of Linear Pulse Motor)

윤신용* · 백수현** · 김용***

(Shin-Yong Yoon · Soo-Hyun Baek · Yong Kim)

요 약

리니어 펄스 모터 (LPM)는 유연한 선형운동이 필요한 분야에 사용되며 LPM의 위치정밀도는 리드스크류 보다 매우 높다. LPM은 간단한 기계적 구조, 고 반복성, 정밀한 오픈루프 동작 및 저 관성 등의 장점을 지니고 있으므로 공장 자동화 및 고속 위치제어용과 같은 응용분야에서 광범위하게 활용된다. 본 논문에서는 고 정밀성과 반복성을 지닌 LPM의 힘 특성을 해석하였다. 추력과 수직력은 고정자와 가동자의 치 피치와 공극에 매우 민감하다. 이 때 수직력은 추력에 비해서 매우 높지만 추력도 상당히 크다. 본 LPM의 자기회로는 복잡한 구조이기 때문에, 힘을 계산하기 위한 적합한 방법으로는 유한요소법(FEM)을 적용한다. 여기서는 가상변위와 맥스웰 응력을 이용하였다.

Abstract

Linear Pulse Motors (LPM) are used a field where smooth linear motion is required, and it's position accuracy higher than that of a lead. According to the advantage such as simplicity of mechanical frame, high reliability, precise open-loop operation, low inertia etc. LPM is applied largely where it have made motor of this kind more and more attractive in many application areas such as factory automation and high speed positioning. This paper is researched to analyze for force characteristics of hybrid LPM with high accuracy and repeatability. Both the thrust and normal force are very sensitive to the airgap and tooth pitches of the forcer and platen. Here, the thrust shows a high content while the normal force is much higher than the thrust. For magnetic circuits of hybrid LPM is the complicated structure, the finite element method (FEM) is employed with suitable method for calculating the force. Therefore, both the virtual work principle and maxwell stress tensor have been used

1. 서 론

산업의 발달에 따라 공장자동화(FA), 사무자동화(OA) 및 통신 주변기기에서 직선운동이 가능한 선형

기기의 필요성이 대두되고 있다. 리니어 모터(Linear Motor)는 기존의 회전형 모터에 보조변환기구를 연결하여 선형운동을 얻는 것에 비해 직접 선형운동이 가능하며 구동원리는 회전형 스텝모터와 동일하다. 리니어 모터중 고정도의 제어성능을 갖는 리니어 펄스모터 (LPM, linear pulse motor)는 반도체소자 자동 검사장치, 프린터, X-Y 플로터, 자동반송장치, 자동 카드검출장치, 자기헤드 구동장치, 고분해능 이미지

* 정회원 : 동국대학교 산업기술연구원 전임연구원
** 정회원 : 동국대학교 전기공학과 교수
*** 정회원 : 동국대학교 전기공학과 부교수
접수일자 : 1999년 9월 21일

스캐너(image scanner), 고속 팩시밀리, 인공심장용 액추에이터 및 혈액순환 펌프용 등에 적용할 수 있다.

리니어 펄스모터는 가변 릴럭턴스형 (Variable Reluctance, VR), 영구자석형 (Permanent Magnet, PM) 및 하이브리드형 (Hybrid Type, HB) LPM으로 분류할 수 있다. 이 중 HB형 LPM은 VR형과 PM형을 결합한 복합구조로서 다른 형태의 LPM에 비하여 단위 입력 펄스당 발생 추력이 크며, 치(teeth) 구조에 의한 정추력(thrust) 특성곡선의 안정점에서 강성(stiffness)이 크므로 위치정밀도가 우수한 특성을 지니고 있다.

LPM의 위치정밀도와 힘의 특성은 모터의 기계적인 치 구조, 여자전류, 영구자석의 종류, 공극 및 철의 재질에 영향을 받으므로 이를 고려하여야 힘을 해석하는 것이 중요하다. HB형 LPM의 공극 치피치 크기는 위치정밀도, 치구조는 선형추력, 영구자석은 디텐트력, 여자전류는 추력과 수직력에 민감함 영향을 준다[1, 2].

본 HB형 LPM의 구조는 각형 치, 보조극, 2상 여자권선, 희토류 영구자석으로 구성되어있다. 무여자로 이동시 영구자석의 디텐트력에 의한 추력리플(진동) 저감과 정격전류에 의한 구동시 자기포화가 발생하지 않도록 구성하였다. 따라서 본 LPM은 고정자 평면상에서 여자전류로 가동자가 미소한 피치를 이동시 정추력을 발생한다[3, 4].

LPM의 힘 계산은 퍼미언스법 (permeance method) 및 유한요소법 (finite element method)에 의해서 가능하지만, 본 연구에서는 비선형성을 고려한 보다 정확한 해석을 위해서 유한요소법을 적용한다. 유한요소법의 해석을 통하여 디텐트력, 추력 및 수직력을 구하며, 이를 위하여 클롱접근법과 맥스웰 응력법을 적용한다. 이에 대한 타당성은 실험을 통하여 입증하고자 한다.

2. LPM의 구조 및 자기등가회로

본 연구의 하이브리드형 LPM의 구조는 그림 1과 같다. 고정자와 가동자 사이의 치 배열은 고정자의 변위를 따라 가동자에 가해지는 펄스로 한 스텝당 1/4 피치씩 이동하며 정추력을 발생하도록 구성하였다.

본 2상 4극 LPM은 각각의 영구자석과 전자석이 결합된 동일형태의 가동자 2개를 양쪽에 결합함으로써 다른 형태의 LPM 보다 큰 추력을 발생하도록 되어 있다. 또한 위치정밀도와 추력특성의 개선을 위하여 각 극의 양쪽에 보극을 설치하였다.

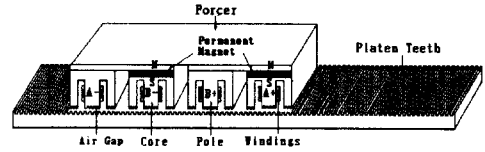
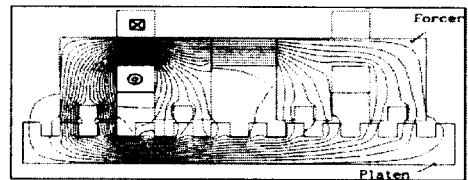


그림 1. LPM의 구조
Fig. 1. Construction of LPM

가동자 권선은 모노필러 (monofiler) 권선을 두 쌍씩 직렬로 연결한 2상 (A+, A-) 및 (B+, B-) 구조이다. LPM의 고정자 (platen)는 강철 (C1018) 재질의 미세한 치 형상을 변위에 따라 길게 펼쳐놓은 구조이다. 가동자 (forcer)는 2개의 희토류 영구자석(NdFeB)과 4개의 모노필러 권선으로 A, B상의 전자석을 구성함으로써 큰 추력을 발생한다.

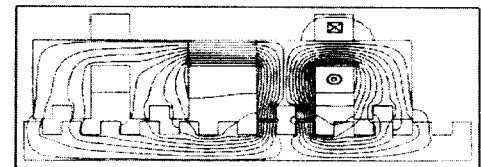
LPM 가동자의 영구자석 N극과 S극의 치 피치는 1/2의 위상차로 되어 있으며 가동자 A상과 B상의 위상차는 1/4 치피치를 지니고 있다. LPM의 추력은 한 치 피치에 대해서 1상 여자시 한 스텝당 1/4 피치씩 이동함에 따라 4개의 폴 스텝당 고정자의 한 피치를 이동한다. 그림 2는 한 스텝당 여자전류의 공급에 따라 이동자계를 발생하는 원리를 나타낸 것이다.



(a) A+ phase

$$I_1 = 0, \Phi_1 = \Phi_{pm}, \Phi_2 = \Phi_{pm}$$

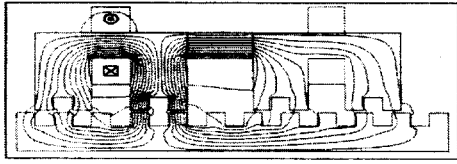
$$I_2 = -1, \Phi_3 = -\Phi_{pm} + \Phi_{nl2}, \Phi_4 = -\Phi_{pm} + \Phi_{nl2}$$



(b) B+ phase

$$I_1 = 0, \Phi_1 = \Phi_{pm}, \Phi_2 = \Phi_{pm}$$

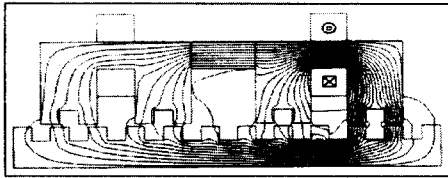
$$I_2 = +1, \Phi_3 = -\Phi_{pm} + \Phi_{nl2}, \Phi_4 = -\Phi_{pm} + \Phi_{nl2}$$



(c) A- phase

$$I_1 = -1, \quad \Phi_1 = \Phi_{pm} - \Phi_{nl1}, \quad \Phi_2 = \Phi_{pm} + \Phi_{nl2}$$

$$I_2 = 0, \quad \Phi_3 = -\Phi_{pm}, \quad \Phi = -\Phi_{pm}$$



(d) B- phase

$$I_1 = +1, \quad \Phi_1 = \Phi_{pm} + \Phi_{nl1}, \quad \Phi_2 = \Phi_{pm} - \Phi_{nl2}$$

$$I_2 = 0, \quad \Phi_3 = -\Phi_{pm}, \quad \Phi = -\Phi_{pm}$$

여기서, $I_1 = A$ 상의 전류, $I_2 = B$ 상의 전류

Φ_{pm} = 영구자석에 의한 자속

Φ_{nl} = 권선전류에 의한 자속

Φ_1 = 영구자석과 $+I_1$ 전류에 의한 극1의 자속합

Φ_2 = 영구자석과 $+I_2$ 전류에 의한 극2의 자속합

Φ_3 = 영구자석과 $-I_1$ 전류에 의한 극3의 자속합

Φ_4 = 영구자석과 $-I_2$ 전류에 의한 극4의 자속합

그림 2. 스텝당 이동자계의 변화에 따른 변위특성
Fig. 2. Displacement characteristics with moving field per step

HB형 LPM의 구조에서 공극과 영구자석의 자기저항, 영구자석과 전자석의 기자력으로 구성된 자기 등가회로는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

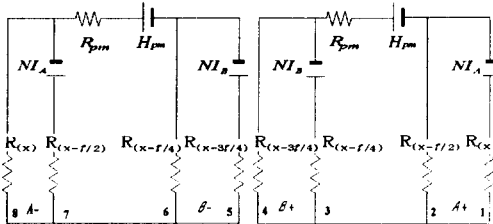


그림 3. LPM의 자기등가회로
Fig. 3. Magnetic equivalent circuit of LPM

여기서 철심의 자기저항은 공극의 자기저항에 비해 매우 작으므로 철심의 자기저항을 무시하기로 한다. 먼저 영구자석의 기자력은 자기저항 R_{pm} 에 대해서 H_{pm} 으로 나타내고 식 (1)과 같이 영구자석의 세기 B_r 과 크기의 함수 h 로 나타내며 자기저항 R_{pm} 은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{pm} = \frac{B_r h}{\mu_0 \mu_r} \quad (1)$$

$$R_{pm} = \frac{h}{\mu_0 \mu_r A} \quad (2)$$

여기서 h 는 자석의 높이, A 는 자석의 면적을 나타낸다.

3. 자계해석에 의한 추력계산

3.1 영구자석의 등가 자화전류 및 지배방정식

HB형 LPM은 영구자석과 전자석이 복합된 구조이므로 먼저 영구자석에 의한 정자계 특성을 해석하면 다음과 같다. 여기서 적용한 희토류(Nd계) 영구자석의 자화특성은 그림 4와 같다. 영구자석의 동작점은 2상한에 있으므로 식 (3)과 식 (4)의 관계가 성립한다 [5][6][7].

$$\frac{H}{H_c} + \frac{B}{B_r} = 1, \quad (H < 0) \quad (3)$$

$$B = B_r + \mu_r H \quad (4)$$

여기서 μ_r : 직선부분의 투자율, H_c : 직선이 H 축과 만나는 교점, B_r : 잔류자속 밀도

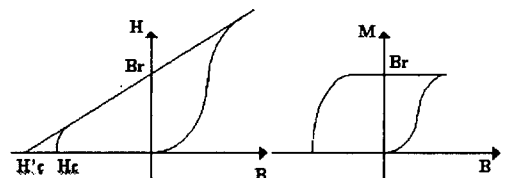


그림 4. 희토류 영구자석의 감자곡선
Fig. 4. Demagnetization curve of rare-earth magnet

영구자석의 투자율은 일반적으로 $\mu_r = \mu_0$ 이며 최대 에너지적은 식 (5)와 같다.

$$[BH]_{\max} = \frac{1}{4} B_r H_c' = \frac{B_r^2}{4\mu_r} \quad (5)$$

$$B = \mu_0 H + M, \quad M = B - \mu_0 H \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)의 관계로부터 $H = 0$ 일 때 $M = B_r$ 이므로 영구자석의 등가자화 전류밀도 J_m 은 보자력 H_c 와 영구자석의 형태에 따라 좌우된다.

그림 5와 같이 영구자석이 z 방향으로 무한히 길고 xy 평면으로 균일하게 여자 되었다고 하면 y 축으로 여자된 직사각형 영구자석에서 $H_c = jH_c'$ 이므로 J_m 은 식 (7)과 같다.

$$J_m = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times M = \nu_0 \frac{\partial M_y}{\partial x} = \frac{\partial H_c'}{\partial x} \quad (7)$$

$$\cong \frac{\Delta H_m}{\Delta x}$$

여기서 H_m 은 영구자석 내부에서 H_c' 이고 외부에서는 0인 계단함수이며 Δx 는 매우 작은 값이지만 0은 아니다.

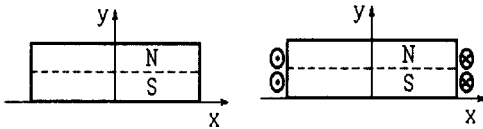


그림 5. 직사각형 자석의 등가 자화전류
Fig. 5. Equivalent magnetization current of rectangular magnet

영구자석을 포함한 구조강판 성층철심의 자기저항 ν 는 자속밀도 B 의 등방성 비선형 함수로 식 (8)과 같이 나타낸다.

$$\nu_{(B)} \cdot B = H + H_c \quad (8)$$

암페어 주회적분의 미분형 $\nabla \times H = J$ 에서

$$\nabla \times \nu_{(B)} \cdot B = J_0 + \nabla \times H_c' \quad (9)$$

여기서, J_0 : 여자전류 밀도

영구자석의 등가 자화전류는 식 (7)로부터 식 (10)과 같이 나타낸다.

$$J_m = \nabla \times H_c' \quad (10)$$

자속밀도 B 와 벡터 포텐셜의 관계 $B = \nabla \times A$ 로 나타낸 영구자석과 자성체가 혼합된 해석영역의 지배방정식은 비선형 포인슨 방정식으로 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \{ \nu_{(B)} \nabla \times A \} = J_0 + J_m \quad (11)$$

여기서, 비선형 자기저항 $\nu_{(B)}$ 는 철심에서는 H/B 이 되고, 영구자석과 자성체가 혼합된 영역에서는 $(H + H_c)/B$ 으로 된다.

3.2 추력 및 수직력 계산

힘은 자기 수반에너지(co-energy)로부터 구할 수 있다. 이에 따라 유한요소법에 의해 힘을 계산하기 위해서는 자계에 관한 스칼라 포텐셜과 벡터 포텐셜의 계산이 필요하며, 스칼라 포텐셜의 경우 포텐셜 및 자계는 식 (12), 식 (13)과 같이 나타낸다.

$$\phi = \sum a_i \phi_i \quad (12)$$

$$H = - \sum \nabla a_i \phi_i \quad (13)$$

여기서 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_i, \dots, \phi_n$ 는 유한요소의 포텐셜 노드, $a_i(x, y, z)$ 는 형성함수를 의미한다. 자속밀도 $B(x, y, z)$ 는 자계벡터 포텐셜 $A(x, y, z)$ 에 의해 구할 수 있으며 식 (14)와 같다.

$$B = \nabla \times A \quad (14)$$

자기에너지와 힘은 히스테리시스 특성과 가상변위의 원리에 따라 s 를 가상변위로 설정한 경우 다음 같다.

리니어 펄스 모터의 추력 및 수직력에 대한 특성 해석

$$W = \int_V \int_0^H \mathbf{H} d\mathbf{B} dv \quad (15)$$

$$F_s = - \frac{\partial W}{\partial s} \quad (16)$$

따라서 유한요소 해석은 식 (12), (13)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{A} = \sum \alpha_i \mathbf{A}_i \quad (17)$$

$$\mathbf{B} = - \sum \nabla \alpha_i \times \mathbf{A}_i \quad (18)$$

여기서 \mathbf{A}_i 는 노드에서의 벡터포텐셜이다. 전체 노드의 좌표 (x_i, y_i, z_i) 로부터 가상변위를 알 수 있으며 x 축 방향의 노드축으로부터 x 축 성분의 힘은 식 (19)와 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial x_i}{\partial s} = p, \quad \frac{\partial y_i}{\partial s} = 0, \quad \frac{\partial z_i}{\partial s} = 0 \quad (19)$$

이때 $p=1$ 은 이동 노드이고 $p=0$ 은 고정 노드이며 $0 < p < 1$ 은 임의의 중간노드이다.

자기수반에너지는 전체 유한요소에 대한 자계에너지의 총합을 의미하므로 식 (20)과 같이 표현할 수 있다.

$$W = \sum_e \int_{V_e} \int_0^H \mathbf{B} d\mathbf{H} dv \quad (20)$$

각각의 자기 수반에너지 합은 요소노드의 축에 의해서 구할 수 있으며 이들의 합으로부터 힘을 구할 수 있다. 이때 전체 좌표 (x, y, z) 는 각 요소에 대한 부분 좌표 (u, v, w) 의 항으로 구성되므로 식(21)과 같이 표현된다.

$$[x, y, z] = \sum_i \beta_i [x_i, y_i, z_i] \quad (21)$$

4개의 노드를 갖는 4 면체의 경우는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha_1 = \beta_1 = u, & \quad \alpha_2 = \beta_2 = v \\ \alpha_3 = \beta_3 = w, & \quad \alpha_4 = \beta_4 = 1 - u - v - w \end{aligned} \quad (22)$$

부분적인 자코비안 연산 후 식 (16)과 식 (20)에 의해 다음과 같이 힘을 구할 수 있다.

$$F_s = \sum_e \left[\int_{V_e} \mathbf{B} \cdot \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial s} dv + \int_{V_e} \int_0^H \mathbf{B} d\mathbf{H} \frac{\partial}{\partial s} (dv) \right] \quad (23)$$

여기서 $\frac{\partial}{\partial s} (dv) = |G|^{-1} \cdot \frac{\partial |G|}{\partial s} \cdot dv$ 이며, $|G|$ 는 식 (21)의 자코비안 행렬 $[G]$ 의 행렬식을 의미하므로 식 (13)의 자계에 대한 도함수는 식 (24)와 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial s} = - \sum_i \frac{\partial}{\partial s} (\nabla \alpha_i) \cdot \phi_i \quad (24)$$

$$\frac{\partial}{\partial s} (\nabla \alpha_i) = -[G]^{-1} \cdot \frac{\partial [G]}{\partial s} \cdot \nabla \alpha_i \quad (25)$$

가상변위에 대한 노드 축의 도함수로부터 힘을 구할 수 있으며 노드에 대한 좌표축 도함수는 식 (26)과 같이 된다.

$$\left[\frac{\partial x_i}{\partial s} \quad \frac{\partial y_i}{\partial s} \quad \frac{\partial z_i}{\partial s} \right] = [x_i \ y_i \ z_i \ 1] D \quad (26)$$

여기서 D 는 가상 연산자를 나타내는 4×3 의 행렬이며 3개의 연산자(F_x, F_y, F_z)는 x, y, z 축을 따라 가상변위에 대해 식 (27)과 같이 나타낸다.

$$F_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad F_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad F_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

식 (22)의 4 면체 형성함수와 식 (21)을 이용함으로써 요소내부 상수인 자코비안 행렬 식 (28)을 구할 수 있다.

$$[G] = \begin{bmatrix} x_1 - x_4 & y_1 - y_4 & z_1 - z_4 \\ x_2 - x_4 & y_2 - y_4 & z_2 - z_4 \\ x_3 - x_4 & y_3 - y_4 & z_3 - z_4 \end{bmatrix} \quad (28)$$

여기서 행렬의 취급이 용이하도록 노드좌표의 3열

벡터 X, Y, Z 는 식 (29)와 같이 나타낸다.

$$X = \begin{bmatrix} x_1 - x_4 \\ x_2 - x_4 \\ x_3 - x_4 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1 - y_4 \\ y_2 - y_4 \\ y_3 - y_4 \end{bmatrix}, Z = \begin{bmatrix} z_1 - z_4 \\ z_2 - z_4 \\ z_3 - z_4 \end{bmatrix} \quad (29)$$

여기서 $[G]$ 는 식 (30)과 같다.

$$[G] = [X, Y, Z] \quad (30)$$

자코비안 행렬 $[G]$ 의 행렬식 $|G|$ 는 식(31)과 같다.

$$|G| = X \cdot (Y \times Z) = Y \cdot (Z \times X) = Z \cdot (X \times Y) \quad (31)$$

4면체의 부피 V_e 는 $V_e = \frac{|G|}{6}$ 의 관계를 갖는다.

$[G]$ 의 역 행렬 $[G]^{-1}$ 은 식 (32)와 같다.

$$[G]^{-1} = |G|^{-1} [Y \times Z \quad Z \times X \quad X \times Y]^T \quad (32)$$

가상변위에 대한 좌표축의 도함수는 식 (32)으로부터 X, Y, Z 의 미분을 정의한다. 이 때 식 (30)과 식 (31)의 함수는 식 (33) 및 식 (34)와 같다.

$$\frac{\partial [G]}{\partial s} = \left[\frac{\partial X}{\partial s} \quad \frac{\partial Y}{\partial s} \quad \frac{\partial Z}{\partial s} \right] \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial |G|}{\partial s} &= \frac{\partial X}{\partial s} \cdot (Y \times Z) \\ &+ \frac{\partial Y}{\partial s} \cdot (Z \times X) + \frac{\partial Z}{\partial s} \cdot (X \times Y) \end{aligned} \quad (34)$$

고정 요소에 대해서 X, Y, Z 의 도함수는 4개의 노드가 같은 가상변위를 지니므로 제로를 나타낸다. 다음에 형성함수는 식 (35)와 같으며 전위경도는 식 (36)과 같다.

$$[a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4] = [u \ v \ w \ 1-u-v-w] \quad (35)$$

$$[\nabla a_1 \ \nabla a_2 \ \nabla a_3 \ \nabla a_4] = [G]^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

이상의 관계식으로부터 H 및 $\frac{\partial H}{\partial s}$ 를 구하면

$[G], |G|, [G]^{-1}, \frac{\partial [G]}{\partial s}, \frac{\partial |G|}{\partial s}, V_e$ 를 구할 수 있다. 변형된 요소가 4면체 외부의 영역에 위치하는 경우는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = \mu_0 H \quad (37)$$

$$\int_0^H B dH = \frac{\mu_0 H^2}{2} \quad (38)$$

1계 4면체 내부에서 이러한 양은 공간에 대해 독립적이므로 식 (23)의 요소합과 같으며 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = - \sum_i \left[\mu_0 H \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{\mu_0 H^2}{2} |G|^{-1} \frac{\partial |G|}{\partial s} \right] \cdot V_e \quad (39)$$

가상변위에 대한 힘의 식 (23)은 다음과 같이 나타낸다.

$$F_s = - \sum_i \left[\int_{V_i} H \frac{\partial B}{\partial s} dv + \int_{V_i} \int_0^B H dB \frac{\partial (dv)}{\partial s} \right] \quad (40)$$

여기서 $\frac{\partial B}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s} (\nabla a_i) \times A_i, H = \frac{B}{\mu_0}$,

$$\int_0^B H dB = \frac{B^2}{2\mu_0} \text{이다.}$$

한편, 1계로 표현되는 4면체의 경우 식 (40)의 해석 결과는 다음과 같다.

$$F_s = - \sum_i \left[\frac{B}{\mu_0} \frac{\partial B}{\partial s} + \frac{B^2}{2\mu_0} |G|^{-1} \frac{\partial |G|}{\partial s} \right] \cdot V_e \quad (41)$$

전체적인 힘 F_s 는 추력 F_x 와 수직력 F_y 로 분류할 수 있으며 가상변위법과 맥스웰용력법을 이용함으로써 구할 수 있고 이에 대한 수식은 식 (42), (43)과 같다.

$$F_x = - \frac{\partial W}{\partial x}, \quad F_y = - \frac{\partial W}{\partial y} \quad (42)$$

리니어 펄스 모터의 추력 및 수직력에 대한 특성 해석

$$F_x = \frac{w}{\mu_0} \int B_x B_y dl, \quad (43)$$

$$F_y = \frac{w}{2\mu_0} \int (B_y^2 - B_x^2) dl$$

여기서 x 는 변위축, y 는 수직축, W 는 축적된 자기에너지, w 는 철심의 축 길이, B_x 는 자속밀도의 x 축 성분, B_y 는 자속밀도의 y 축 성분을 각각 나타낸다. 가상변위는 식 (43)과 같이 변위에 대한 2개의 결과식으로부터 구할 수 있으며 이때 쿨롱 접근(Coulomb approach)에 의한 추력의 계산은 식 (44)와 같다.

$$F_x = -\sum_e \left(\frac{B^T}{\mu_0} \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{B^T B}{2\mu_0} [G]^{-1} \frac{\partial [G]}{\partial x} \right) V_e \quad (44)$$

여기서 B 는 공극 자속밀도의 벡터, B^T 는 B 의 역행렬, $[G]$ 는 자코비안 행렬, V_e 는 요소의 부피를 각각 나타낸다.

선형 삼각요소에 의해서, 식 (44)는 다음 식과 같이 보다 간소화할 수 있다.

$$F_x = \sum_e \sum_i \frac{1}{4\mu_0} [(y_2 - y_3)\Delta_1^2 + 2(x_3 - x_2)\Delta_1\Delta_2 - (y_2 - y_3)\Delta_2^2] \quad (45)$$

또한 수직력은 식 (46)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_y = \sum_e \sum_i \frac{1}{4\mu_0} [(x_3 - x_2)\Delta_1^2 + 2(y_3 - y_2)\Delta_1\Delta_2 - (x_3 - x_2)\Delta_2^2] \quad (46)$$

식 (45)와 식 (46)에서 x, y 는 2차원 모델의 직각 좌표계이다. e 와 i 는 각각의 요소수 내에서 가상으로 이동한 노드와 왜형된 요소수이고 1, 2, 3은 삼각 요소의 노드에 대응하므로 A_1, A_2, A_3 을 삼각 요소의 각 노드에 대응하는 자기벡터 포텐셜이라 할 때 파라미터 Δ_1 과 Δ_2 는 식 (47) 및 (48)과 같다.

$$\Delta_1 = \frac{A_1(x_3 - x_2) + A_2(x_1 - x_3) + A_3(x_2 - x_1)}{[G]} \quad (47)$$

$$\Delta_2 = \frac{A_1(y_3 - y_2) + A_2(y_1 - y_3) + A_3(y_2 - y_1)}{[G]} \quad (48)$$

LPM의 구동을 위한 2상의 여자전류는 다음과 같다.

$$i_A = I_{m1} \cos \omega t + \frac{I_{m3}}{I_{m1}} \cos 3\omega t \quad (49)$$

$$= I_{m1} \left[\cos\left(\frac{2\pi x}{t_p}\right) + \frac{I_{m3}}{I_{m1}} \left(-\frac{2\pi x}{t_p}\right) \right]$$

$$i_B = I_{m1} \sin \omega t - \frac{I_{m3}}{I_{m1}} \sin 3\omega t \quad (50)$$

$$= I_{m1} \left[\cos\left(\frac{2\pi x}{t_p}\right) + \frac{I_{m3}}{I_{m1}} \left(\frac{2\pi x}{t_p}\right) \right]$$

여기서, t_p : 치피치, I_{m1} : 기본파 상전류, I_{m3} : 3고조파 상전류, $\omega = 2\pi v/t_p$, $v = x/t$,

3.3. 유한요소 해석

LPM의 힘을 계산하기 위해서는 고정자 치에 대한 가동자 치의 상대적인 이동위치에 따라 자속분포를 구하는 것이 중요하다. 이를 위하여 퍼미언스법에 비해서 비선형 특성을 고려함으로써 오차율이 적은 유한요소법을 적용하였다.

유한요소법에 의한 힘 계산은 에너지의 분포를 지배하는 편미분방정식을 설정하여 계산결과와 오차가 최소화 되도록 하여 구할 수 있다. 그림 6은 LPM 전체 해석모델에 대한 삼각요소 분할도 이다. 이때 요소 분할수는 66,230개, 노드수 120,250개를 적용하였다.

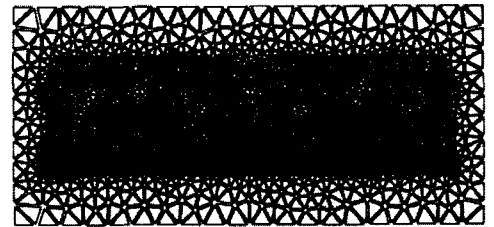
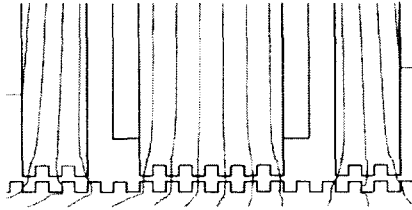


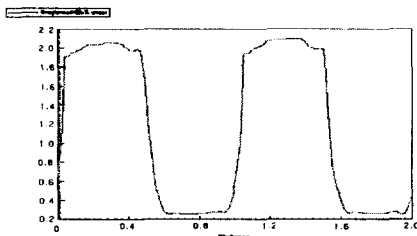
그림 6. 요소 분할수
Fig. 6. element mesh number

그림 7은 그림 6의 전체 모델 중 보조극이 결합된

1상, 1극에 일정여자 전류를 공급한 경우의 자속분포이다. 이때 해석조건은 영구자석의 잔류자속밀도 B_r , 1.23[T], 기자력 NI 180[AT], 상전류 I_m 2.7[A]이다.



(a) 자속분포도



(b) 자속밀도의 크기

그림 7. 공극의 자속분포 (치원전 정렬시)
Fig. 7. Magnetic flux distribution of the airgap

해석영역의 경계조건은 고정자와 가동자의 상, 하단을 자연경계 조건으로 하고 좌우를 고정경계 조건으로 하여 해석하며 가동자의 미소 이동변위에 따른 추력 변화를 구하기 위해 고정자와 가동자의 정렬된 위치 ($x=0$)에서 비정렬된 위치($x=\tau$)까지를 20등분하여 모델링 하였다.

해석영역은 자기 벡터포텐셜을 이용하여 공극의 자속분포를 계산하였으며 이로부터 구한 자속밀도는 맥스웰용력법으로 LPM의 추력과 수직력을 계산하였다. 그림 7(a)의 1극 중 고정자와 가동자의 치 배열이 $x = \tau/4$ 인 위치에서 추력 F_x 가 최대이며 이 위치에서는 자속밀도 B_x 성분이 최대로 발생하고 치 구조는 비 정렬된다.

수직력 F_y 는 자속밀도 B_y 의 성분이 최대일 때 가장 크며 고정자와 가동자 사이의 치 배열은 거의 완

전히 정렬된다. 그림 7(b)는 그림 (a)와 같이 치 피치가 완전히 정렬된 경우 공극의 자속크기를 나타낸 것이다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 장에서는 설계 모델의 LPM에 유한요소법을 적용함으로써 정추력, 순시추력, 디텐트력 및 수직력의 결과를 구할 수 있었다. 이에 대한 사양은 표 1과 같다.

표 1. LPM의 사양
Table 1. Specifications of LPM

Specifications			
Tooth width	0.45 [mm]	Phase current	2.7 [A]
Slot width	0.55 [mm]	Drive type	Hybrid
Tooth pitch	1.016 [mm]	Flux density	1.23 [T]
Platen width	50 [mm]	Excitation method	2 상
Step displacement	0.25 [mm]	Air gap	0.013 [mm]
Magnet type	NdFeB (Neo35)	Drive method	bipolar
Resistance of coil	2.7 [Ω]	Forcer load	22.7[Kg]
Minimum inductance	2 [mH]	Thrust force	80 [N]
Turns of coil	60 [회]	Normal force	800 [N]
Forcer mass	0.36 [Kg]	Maximum load of forcer	22 [Kg]

그림 8은 일정한 공극의 LPM에 1상 여자전류를 공급하였을 경우 미소변위 1 [mm]에 대한 정추력 특성을 나타낸 것이다. 유한요소법에 의한 정추력의 계산결과 쿨롱 접근과 맥스웰용력은 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

또한 실험결과와도 거의 일치함을 알 수 있다. 그러나 고정자와 가동자사이의 슬롯 면 차와 영구자석의 디텐트 영향 및 자기의 비선형성으로 인해 이상적인 정추력 특성을 얻을 수 없었다. 이 때 정추력의 최대 홀딩 추력은 80[N] 정도이다.

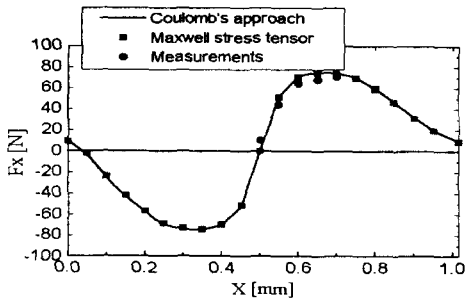


그림 8. 변위에 대한 정추력 특성
Fig. 8. Thrust characteristics versus displacement

그림 9는 그림 8과 동일한 해석조건을 적용한 경우, 수직력이 고정자의 변위를 따라 가동자가 이동할 경우 기계적인 구조면에서 영구자석과 치 구조에 의해 맥동성분이 발생함을 알 수 있다. 이때 쿨롱접근과 맥스웰응력에 의한 해석결과는 잘 일치하지만 무여자시는 수직력이 약 500[N], 2상 여자시는 수직력이 약 260[N] 정도에 차이가 발생함을 알 수 있다.

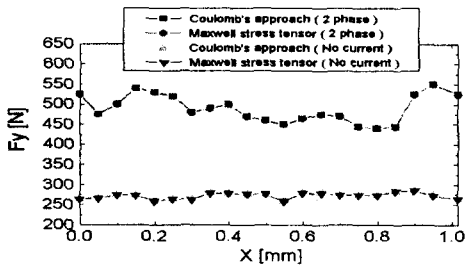


그림 9. 변위에 대한 수직력
Fig. 9. Normal force against the displacement

그림 10은 한 치 피치의 변위에 대한 고정자와 가동자 사이의 순시추력 결과를 나타낸 것으로 1상여자시의 순시추력은 쿨롱접근과 맥스웰응력을 이용하여 계산하였다. 이때 하이브리드형 LPM의 순시추력 특성을 계산하기 위해서 일정한 속도에서 LPM이 고정자를 따라 가동자가 이동하는 것으로 가정하였다. LPM의 2상 중 A상은 정현파 전류, B상은 여현파 전류를 공급하였다.

또한 변위에 대한 순시추력은 고정자에 대한 가동자의 위치에 따라 진동이 발생함을 알 수 있다. 실험치와의 비교결과 측정된 힘이 계산된 힘 보다 약 14% 정도가 더 높았다. 여기서 가정한 공극이 실험에

의해 측정된 실제 공극보다 약간 큰 것은 공극에서 약간의 편차가 발생기 때문으로 간주된다.

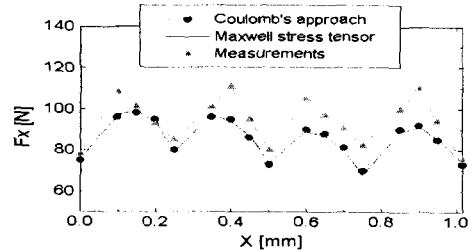


그림 10. 변위에 대한 순시 추력
Fig. 10. Instantaneous thrust force

그림 11은 전류에 대한 수직력을 나타낸 것이다. 이때 LPM의 수직력은 전류에 의해서 증가하나 맥동은 전류와 무관하다. 따라서 수직력은 최대 정격전류 2.7[A]에 대해서 철심이 포화되지 않고 증가함으로써 LPM의 최대 정격전류로 적합함을 알 수 있다.

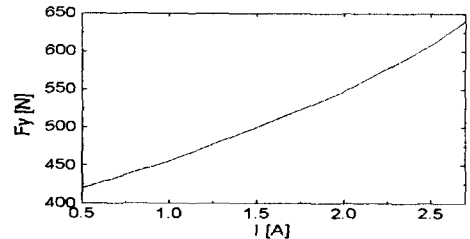


그림 11. 정격전류에 대한 수직력
Fig. 11. Normal force versus rated current.

그림 12는 한 치 피치에 대한 디텐트력 특성을 나타낸 것으로 디텐트력은 80[N]의 정추력에 대해서 10% 이하 약 6[N] 정도이며 치 절환시 힘의 변동차 작음을 알 수 있다. 하이브리드형 LPM은 릴럭턴스형 LPM에 비해서 무여자시 디텐트력을 발생한다. 하이브리드형 LPM은 디텐트력으로 안정된 동작이 가능하지만 디텐트력이 부하로 작용할 경우 진동을 야기하게 된다. 따라서 이동시 진동이 작은 안정된 디텐트력의 발생이 중요하다.

그림 13은 본 연구에서 제작한 LPM과 측정시스템을 나타낸 것이다. 추력 측정은 구동전류에 의해서 이동된 가동자의 반대방향에 로드셀을 설치하여 측정할 수 있다. 변위 측정은 레이저를 광원으로 한 Laser Interferometer를 이용하여 측정하였다.

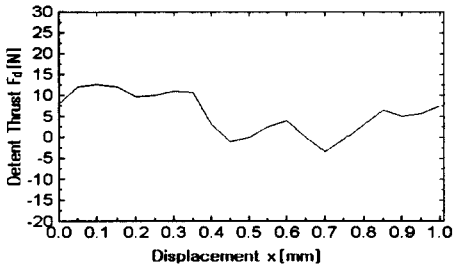


그림 12. 변위에 대한 디텐트력
Fig. 12. Detent force versus displacement

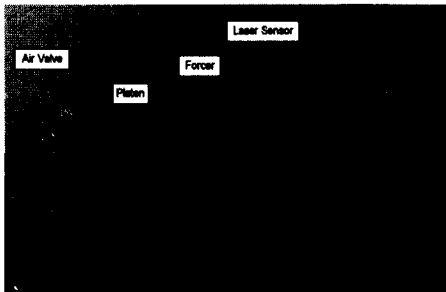


그림 13. LPM의 측정 시스템
Fig. 13. Measurement system of LPM

5. 결 론

본 논문에서는 입력 펄스에 의해 치 절환되어 이동 시 큰 추력과 고정도의 위치제어가 가능한 2상 4극 HB형 LPM을 대상으로 하여 힘을 구하였다. LPM의 고정자와 가동자 사이 공극의 치 구조는 각형이고 한 치피당 치와 슬롯의 폭 비는 0.45/0.55로 하여 공극의 자기 저항의 변화로 이동 시 정추력을 발생하도록 구성하였다. 또한 가동부의 각 극 사이에 보조극을 설치함으로써 더욱 정밀한 위치제어가 가능하며 여자전류에 의해 구동시 한스텝당 미소변위 0.25mm 씩 이동하게 된다.

본 논문에서는 쿨롱접근과 맥스웰용력의 유한요소법을 이용하여 하이브리드형 LPM의 정추력, 순시추력 및 수직력을 계산하였으며 실험을 통하여 비교, 검토한 결과 이에 대한 타당성을 입증 할 수 있었다. 또한 LPM의 실험결과를 통하여 가동자의 이동 시 진동을 야기하는 디텐트력 6[N]의 저감과 큰 정추력 80[N]이 발생함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Kuo, S. C. ed. 1974, "Theory and Application of Step Motors". West Publishing, USA
- [2] Matsui, N., Nakamura, Mand Kosaka, T.: Instantaneous Torque Analysis of Hybrid Stepping motor, IEEE Trans Ind. vol 32, no 5, pp 1176-1182, 1996
- [3] Coulomb, J. L. and Meunier, G. : Finite Element Implementation of Virtual Work Principle for Magnetic or Electric Force and Torque Comutation, IEEE Trans Magnetics, vol MAG-20, no 5, pp1984-1986, 1984
- [4] 백수현, 윤신용, 임태빈, 김철진, "리니어 펄스 전동기의 정밀도 향상을 위한 마이크로스텝구동," 대한전기학회 논문지, 제 46권 4호, pp.501-509, 1997. 4

◆ 저자소개 ◆

윤 신 용 (尹信容)

1964년 9월 1일생, 1992년 국립서울산업대학교 전기공학과 졸업, 1994년 동국대학교 전기공학과 졸업(석사), 1999년 동국대학교 전기공학과(박사), 1994-1997년 전자부품연구원 정밀기기제어팀 연구원, 1997-1999년 8월 엘지토탈시스템 기술연구소 선임연구원, 1994-1999년 현재, 동서울대학 겸임교수, 1999년 9월-1999년. 현재 동국대학교 산업기술연구원 전임연구원.

백 수 현 (白壽鉉)

1947년 5월 2일생.1972년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1977년~현재 동국대 공대 전기공학과 교수. 전기학회 평의원. 1999년 현재 전기학회 산학협동위원회 위원장. 1999년 현재 동국대 산업기술연구원 원장.

김 용 (金 龍)

1957년 3월 20일생. 1981년 동국대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과(박사). 1988~1995년 대림전문대학 제어계측과 부교수. 1995년~현재 동국대 공대 전기공학과 조교수.