

兩側式 線形펄스모터의 設計 및 特性解析에 關한 研究

A Study on the Design and Characteristics Analysis
of a Double-sided Linear Pulse Motor.

指導教授: 盧 彰 注



1996 年 6 月

韓國海洋大學校 大學院

機關工學科 朴 瀚 錫

兩側式 線形펄스모터의 設計 및 特性解析에 關한 研究

A Study on the Design and Characteristics Analysis
of a Double-sided Linear Pulse Motor.

Key words : Double-sided linear pulse motor(양측식 선형 펄스모터),
Coenergy(자기수반에너지), Magnetic circuit(자기회로), Permeance
method(퍼미언스법)

Abstract

In this paper, the characteristics of a double-sided linear pulse motor(DLPM) with permanent magnet are analysed using the method which combined the coenergy method and the equivalent magnetic circuit method.

In the process of computation, the magnetic material nonlinearities of the permanent magnet, the primary and the secondary core are interpolated by the cubic spline method. Then, the equivalent magnetic circuit modelled by the permeance method including airgap reluctance, which is a function of displacement, is obtained. The static thrust which is the derivative of coenergy is computed by Newton Raphson method at each displacement.

And, in order to investigate the characteristics of the DLPM, the thrust shows as a function of displacement, input current and air gap.

The simulation results are compared with experimental ones obtained from the DLPM with 2 phase and 4 poles.

1. 서 론

선형 펄스전동기(LPM)는 입력신호의 펄스 수에 해당하는 일정의 스텝만큼 직선이동하는 전동기로서 속도는 입력펄스의 주파수에 비례하여 운동하며, 디지털 제어회로와 결합하여 여자 권선에 입력 펄스를 가하면 직접 직선 왕복운동의 위치제어가 용이하다. 최근에는 제어계의 구조가 간단하고 개루프제어가 가능함으로서 OA기기, FA기기 등 직선운동이 요구되는 분야에 경량 박형화 구조의 액추에이터로서의 LPM의 응용이 활발히 연구되고 있다^{1), 2), 3)}

지금까지 LPM의 특성해석 방법으로는 공극 자기저항을 Permeance법으로 근사화한 등가회로법 및 유한요소법 등이 있다. 유한요소법으로 LPM을 해석할 경우는 보통 LPM의 기계적 공극이 미소 공극으로 인해 공극부분에서 요소분할의 어려움, 해석시

간의 과다 및 동특성 해석의 어려움이 있어 초기설계 및 해석단계에서의 그 적용은 비효율적이다. 반면에 등가회로법을 이용한 경우는 그 정확도만 만족된다면 해석시간의 단축이라는 점에서 매우 효과적이라 할 수 있다^{4),5),6)}

본 연구에서는 양측식 LPM의 등가자기회로와 특성해석시의 재질의 자기적 특성을 선형 근사화하여 해석함으로써 생기는 오차의 정확도를 보완하기 위하여 자기적 비선형성을 고려한 Coenergy로부터 정추력을 계산하는 방법을 제안하였다. 또한, 제안한 해석방법의 타당성을 입증하기 위해서는 편측식 LPM에 비해 단위 체적당 발생추력 밀도가 높은 영구자석형 양측식 LPM을 설계, 제작하고 실험치와 비교, 검토하였다.

2. 양측식 선형펄스모터의 구조와 자기 회로

2.1 양측식 선형펄스모터의 구조

영구자석을 갖는 이동자 매입형 양측식 LPM의 구조는 Fig.1과 같이 1,2상 여자 가능한 4극기이다. Fig.1에서 이동자는 영구자석 N극 이동자측과 S극 이동자측의 치는 1/2피치의 위상차로 쌍 E자형 자성체 core을 갖으며, 고정자는 이동자 양측에 설치되는 구조로 자유 왕복운동을 할 수 있는 구조로 되어 있다.

권선 방식은 양측 E자형 core에 감겨져 있는 각 권선을 1,2상 여자시에 병렬운전되게 결선하여 1상 여자시에는 1/4 극피치, 2상 여자시에는 1/8 극피치 이동하도록 되어 있다.

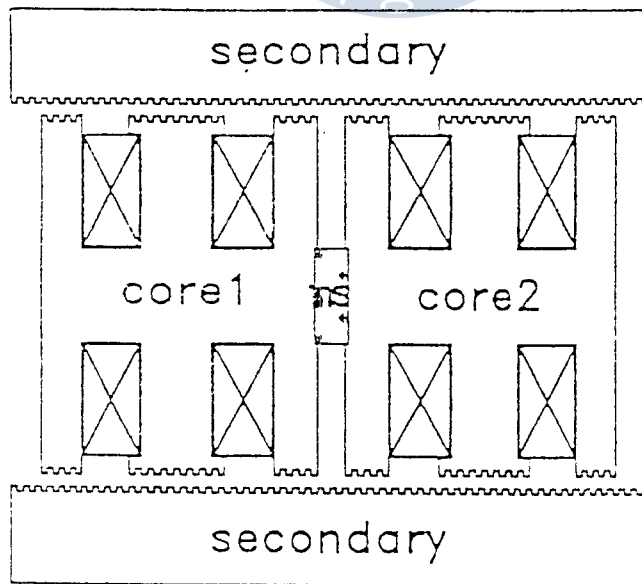


Fig.1 Analysis model of LPM

2.2 등가 자기회로

Fig.1의 양측식 LPM에서 무여자시에는 영구자석이 갖는 기자력에 의해 유지력 (holding force)을 갖으며, 여자시에는 주자속이 이동자의 영구자석과 양쪽 규소강 판의 중심으로 통과한다고 가정하면 LPM의 자기등가회로는 상하의 대칭성을 고려하여 LPM의 1/2에 해당하는 해석모델에 대한 자기등가 회로도 Fig.2와 같이 나타낼 수 있다.

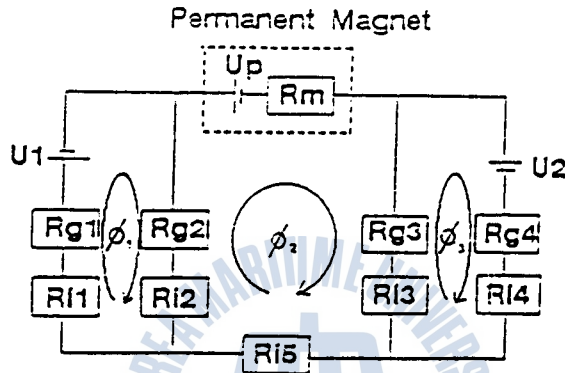


Fig.2 Equivalent magnetic circuit of LPM

Fig.2에서 U_1 , U_2 는 전원에 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 표시할수 있으며, 공극 자기저항은 Fig.3과 같은 Permeance 법을 사용해 이동방향 변위의 함수로서 표현할 수 있다^[4].

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

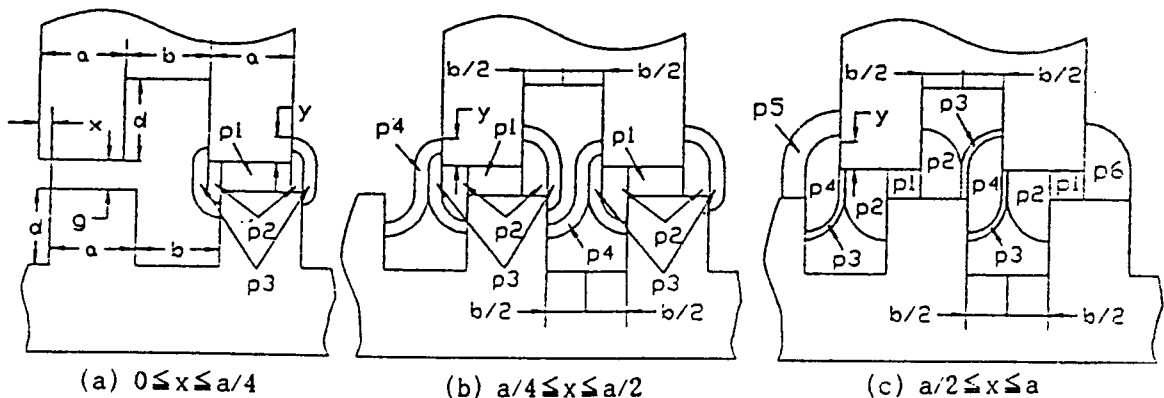


Fig.3 The permeance model of airgap

Fig.1에서 LPM의 치가 1극 3치의 구조로 되어 있으므로 이동자와 고정자사이의 퍼미언스는 치 피치의 상대적 위치에 따라 Fig.3 (a), (b), (c)로 구성되어 있다고 가정하여 이동자와 고정자 치의 상대적 위치에 대한 퍼미언스를 수식화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

경우 I) $0 \leq x \leq a/4$

$$P_1 = \frac{C \cdot \mu_0 \cdot (a-x)}{g}$$

$$P_2 = \int \frac{C \cdot \mu_0}{g + \pi/2 \cdot x} dx = \frac{2}{\pi} C \cdot \mu_0 \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot x}{2g}\right) \quad (2)$$

$$P_3 = \int \frac{C \cdot \mu_0}{g + \pi/2 \cdot y + \pi/2 \cdot (x+y)} dy = \frac{1}{\pi} C \cdot \mu_0 \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot y}{g + \pi/2 \cdot x}\right)$$

여기서, $y = (1 - 4/a \cdot g)x + g$ 로 근사화 한 것이다.

경우 II) $a/4 \leq x \leq a/2$

$$P_1 = \frac{C \cdot \mu_0 \cdot (a-x)}{g}$$

$$P_2 = \frac{2}{\pi} C \cdot \mu_0 \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot x}{2g}\right)$$

$$P_3 = \int_0^y \frac{C \cdot \mu_0}{g + \pi/2 \cdot y + \pi/2 \cdot (x+y)} dy = \frac{1}{\pi} \cdot C \cdot \mu_0 \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot y}{g + \pi/2 \cdot x}\right) \quad (3)$$

$$P_4 = \frac{2x - b/2}{g} + \pi \cdot b/4$$

여기서, $y = (b-x)$ 이다.

경우 III) $a/2 \leq x \leq a$

$$P_1 = \frac{C \cdot \mu_0 \cdot (a-x)}{g}$$

$$P_2 = \int_0^{b/2} \frac{C \cdot \mu_0}{g + \pi/2 \cdot y} dy = \frac{2}{\pi} C \cdot \mu_0 \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot b}{4g}\right)$$

$$P_3 = \int_0^{(x-b/2)} \frac{C \cdot \mu_0}{g + \pi/2 \cdot (b-x+y)} dy = \frac{2}{\pi} C \cdot \mu_0 \ln\left(\frac{g + \pi \cdot b/4}{g + \pi(b-x)/2}\right)$$

$$P_4 = \int_0^{(b-x)} \frac{C \cdot \mu_0}{g + \pi/2 \cdot y + \pi/2 \cdot (b-x-y)} dy = C \cdot \mu_0 \frac{(b-x)}{g + \pi(b-x)/2} \quad (4)$$

$$P_5 = \int_0^{(2x-b)} \frac{C \cdot \mu_0}{g + \pi/2 \cdot (b-x-y)} dy = \frac{2}{\pi} C \cdot \mu_0 \ln\left(\frac{g + \pi \cdot x/2}{g + \pi(b-x)/2}\right)$$

$$P_6 = \int_0^x \frac{C \cdot \mu_0}{g + \pi/2 \cdot y} = \frac{2}{\pi} C \cdot \mu_0 \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot x}{2g}\right)$$

퍼미언스가 치피치 τ 마다 주기적으로 변하므로 식 (2)~(4)에 모터의 치수를 대입해서 수치계산하여 푸리에 급수의 형태로 만드는 것이 해석하기가 용이하다. 이동자의 변위에 대한 퍼미언스의 역수인 자기저항의 변화는 Fig.4와 같다.

이동자의 극 1~4는 1/4피치 어긋나게 배치되어 있으므로 각극의 자기저항은 다음 식 (5)와 같이 푸리에 급수로 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_1(x) &= 1/P = \bar{R} + \sum_{n=1}^{\infty} R_{(n)} \cos(2\pi n x / \tau) \\ R_2(x) &= R_1(x - \tau/2) \\ R_3(x) &= R_1(x - \tau/4) \\ R_4(x) &= R_1(x - 3\tau/4) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, \bar{R} 는 $R(x)$ 의 평균치, $\tau = a+b$ 는 극피치, $R_{(n)}$ 는 푸리에 계수이다. 이러한 릴럭턴스식을 이용해서 등가회로를 풀면 각 극의 자속이 구해진다.

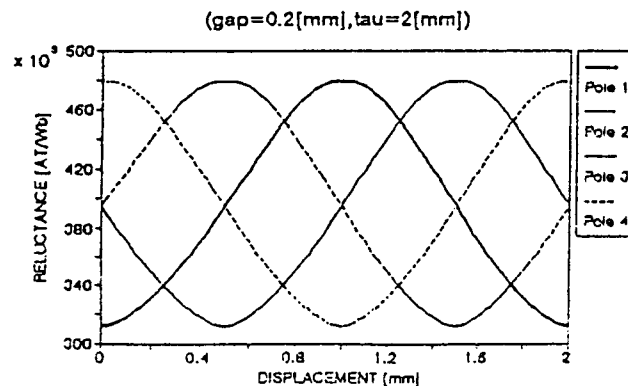


Fig. 4 The airgap reluctance modelled by Permeance Method

3. Coenergy법에 의한 추력 계산

3.1 자기에너지와 자기수반에너지

Fig.1의 양측식 LPM과 같이 전기적 입력에너지를 기계적 에너지로 변환하여 동력을 얻는 계에서 손실이 없다고 가정하면 coenergy의 개념을 도입하여 추력을 계산할 수 있다. 자성체에서는 전기적 입력 기자력 Ni 와 자속 ϕ 의 관계는 자기회로의 성질에 의하여 일반적으로 Fig.5와 같이 비선형성을 가진다.

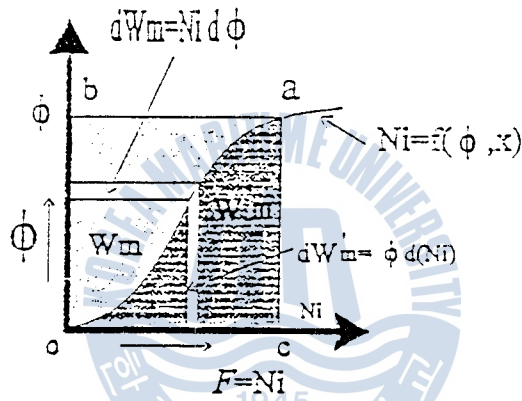


Fig.5 Magnetic Energy and Magnetic Coenergy

Fig.5에서 면적 oab는 자기에너지 W_m 를, 면적 oac는 자기 수반에너지 W_m' 를 나타내며, 이로부터 힘을 구하면 식 (6)과 같다^{[4][5]}

$$f_x = \frac{\partial W_m'(i, x)}{\partial x} \quad (6)$$

3.2 Newton Raphson 법을 이용한 추력의 계산

Fig.2의 자기 등가회로에 대한 등가 방정식을 구하면 다음 식 (7)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} f_1(\phi_1, \phi_2, \phi_3, x) &= (R_{g1} + R_{i1})\phi_1 + (R_{g2} + R_{i2})(\phi_1 - \phi_2) + U_1 \\ f_2(\phi_1, \phi_2, \phi_3, x) &= (R_{g2} + R_{i2})(\phi_2 - \phi_1) + (R_{g3} + R_{i3})(\phi_2 - \phi_3) \\ &\quad + (R_{i5} + R_m)\phi_2 + U_p \\ f_3(\phi_1, \phi_2, \phi_3, x) &= (R_{g3} + R_{i3})(\phi_3 - \phi_2) + (R_{g4} + R_{i4})\phi_3 + U_2 \end{aligned} \quad (7)$$

위의 비선형 방정식의 해를 구하기 위해서는 본 연구에서는 Newton-Raphson 법을 사용하였으며 LPM 특성해석 프로그램의 신호흐름도는 Fig.6과 같다.

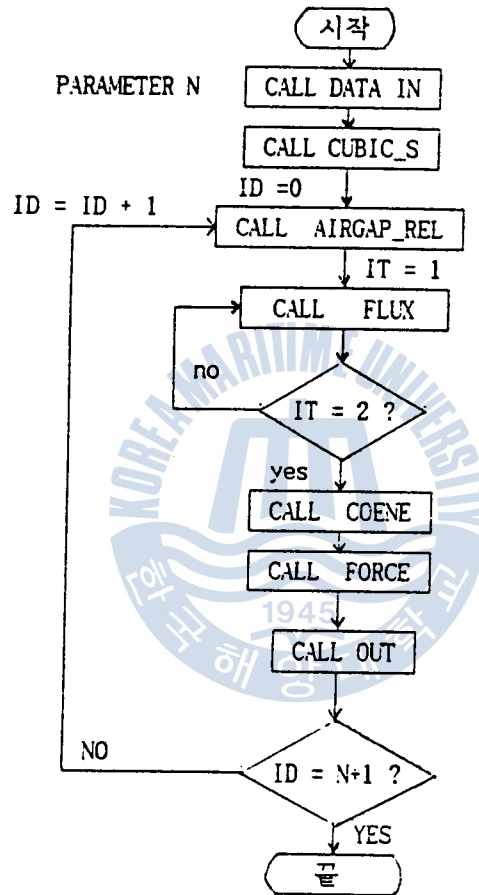


Fig.6 The main flow chart of the analysis

Fig.6의 흐름도를 설명하면 다음과 같다.

- (1) 설계 치수, 코어 및 영구자석의 ν - B 곡선 data, 입력전류 등을 입력하고 MKS 단위로 통일시킨다. (DATA IN, UNIT CONV)
- (2) 영구자석의 ν - B 곡선 data를 CUBIC SPLINE으로 보간한다. (CUBIC_S)
- (3) 입력변위를 N 등분하여 N+1개의 각 변위에서 다음을 반복수행한다.

- ① 각 공극에서의 자기저항을 2.2에서 제시한 퍼미언스법으로 계산한다
- ② IT = 1인 경우, 입력전류를 0 으로 하여 무여자시 영구자석만에 의한 각자속을 FLUX서브루틴에서 계산한다.
- ③ IT = 2인 경우, 입력 data로 주어진 전류로 여자되었을 경우의 각자속을 FLUX 서브루틴에서 계산하고 COENE 서브루틴에서 자기수반에너지를 계산한 다음 FORCE 서브루틴을 수행하여 힘을 계산하여 출력한다.

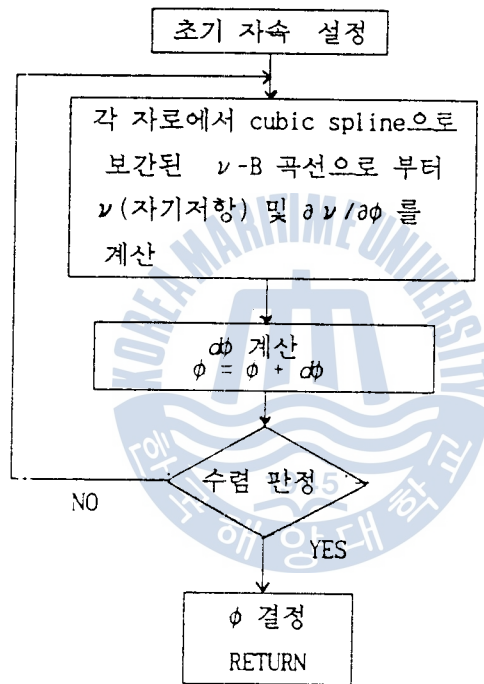


Fig.7 Flow chart of calculation

Fig.7은 FLUX 서브루틴의 흐름도인데 그 비선형해석을 설명하면 다음과 같다.

- (1) 초기자속밀도를 설정한다.
- (2) Cubic spline 으로 보간된 $\nu-B$ 곡선으로부터 자기저항률 ν 및 $\partial\nu/\partial\phi$ 를 계산한다.
- (3) 계산된 ν , $\partial\nu/\partial\phi$ 값으로 부터 식 (8)을 이용하여 $d\phi$ 를 구한다.

$$d\phi = \begin{bmatrix} d\phi_1 \\ d\phi_2 \\ d\phi_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \phi_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \phi_2} & \frac{\partial f_1}{\partial \phi_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \phi_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \phi_2} & \frac{\partial f_2}{\partial \phi_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \phi_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \phi_2} & \frac{\partial f_3}{\partial \phi_3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_1(\phi_1, \phi_2, \phi_3) \\ f_2(\phi_1, \phi_2, \phi_3) \\ f_3(\phi_1, \phi_2, \phi_3) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial \phi_i} = \frac{\partial f_i}{\partial \nu_j} \cdot \frac{\partial \nu_j}{\partial \phi_i} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (9)$$

여기서, ν_j 는 각 자로의 자기저항률이다.

(4) ϕ 를 $\phi + d\phi$ 로 대체한다.

(5) $d\phi$ 의 수렴판정을 하고 수렴되지 않는 경우 (1), (2), (3), (4)과정을 반복한다.

위의 알고리즘을 각 변위마다 반복수행하고 수렴된 쇄교자속으로부터 자기수반 에너지를 구한 다음에 다시 3차 스플라인함수로 보간하여 그 변위 X 에 대한 미분을 하여 정추력을 구한다.

4. 특성 고찰

본 연구에서 설계, 제작하여 개발한 양측식 LPM의 1차측 이동자 치수는 길이 118mm, 폭 177mm, 높이 101mm로서 재질은 규소강판 PN23, 영구자석은 희토류계의 NdFeB를 사용하였다. 또한, 2차측 고정자는 1차측 이동자의 양측면으로 대향하여 슬롯된 순철의 자성체 재질을 사용하여 제작하였다.

실험기를 장착하기 위한 실험장치로서는 이동자의 하중에 의한 영향을 최소화 하도록 linear guide bearing을 사용하였으며, 정추력에 따른 제반특성은 load cell을 2차측 고정자에 고정하여 미소 극피치 변위에 따른 특성을 고찰하였다.

이에 대한 LPM의 사양은 Table 1과 같다.

Fig.8은 Table 1의 시작기 LPM에 대한 시뮬레이션 결과치로 기계적 공극길이가 0.2[mm]에서 입력전류를 1, 2, 3, 4, 5[A]로 변화했을 때에 LPM의 1, 2상 여자시의 극피치 변위에 따른 정추력 특성곡선을 나타낸다.

Fig.8에서 변위 0인 1차측, 2차측이 일치하는 지점에서 이동자를 변위했을 때에 1상 여자시에는 1/4피치 근방지점에서 최대의 정추력을 발생하며 1/2 극피치 지점에서 다시 영(zero)으로 됨을 볼 수 있다. 최대 정추력은 입력전류가 증가함에 따라 거의 자승에 비례하여 증가하다가 3[A]이상에서는 더 이상 증가하지 않음을 볼 수 있는데, 이는 자기적 포화현상으로 본 시험기에서의 정격전류는 3[A]로 극당 1.5[A]임을 나타낸다.

Fig.8(a)의 1상 여자시에는 최대 정추력 발생점은 전류가 증가할수록 1/2 극피치 지점쪽으로 기울며, 공극 길이가 0.2[mm]로 유지된 상태에서의 최대정추력은 약 80[N]정도 발생함을 알 수 있다. 마찬가지로 Fig.8(b)의 2상 여자에도 거의 1/2 극 피치 지점에서 최대 정추력이 발생하며, 크기는 1상여자에 비하여 2배정도의 정추력이 발생하는 것으로 나타난다.

따라서 LPM을 2상 여자구동방식으로 채택하면 1상 여자방식에 비하여 높은 추력특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Table 1 Specification of LPM

기계적 사양			전기적 사양		
항목	치수	항목	치수	항목	치수
1차축	치수	8	극수	4	
	피치	2 mm	coil 권선	200 [회/극]	
	치슬	1 mm	coil 직경	0.8 [mm]	
	슬롯	1 mm	정격전류	1.5 [A/극]	
	1차축	1 mm	coil 저항	0.63 [Ω]	
2차축	1차축	69 mm	영구자석	25 mm	
	1차축	50 mm	길이를	10 mm	
	피치	2 mm	두께	50 mm	
	치슬	1 mm	여자방식	1.2상 여자	
	슬롯	1 mm			
2차축	1 mm				
2차축	1,500 mm				
기계적 공극길이		0.08~0.2 mm			

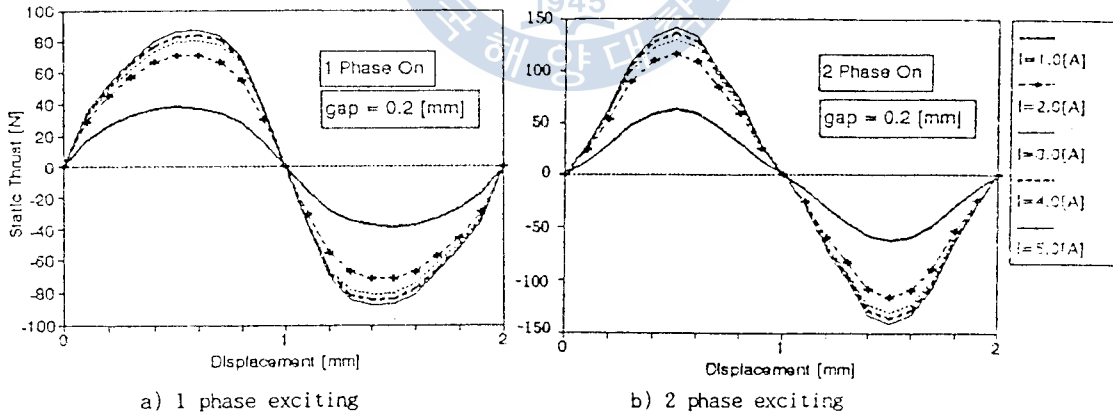


Fig.8 Displacement-thrust characteristics (input current variation)

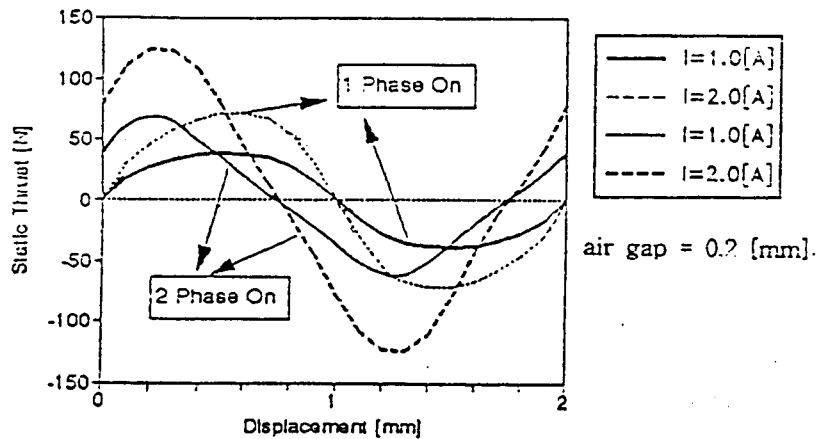


Fig. 9 The static thrust of double-sided LPM (experiment values)

5. 결론

본 연구에서는 영구자석을 포함한 양측식 LPM의 자기등가회로와 자성체의 자기적 비선형이 고려된 정추력 해석을 하기 위하여 자기 수반에너지로부터 추력을 계산하는 방법을 제시하였으며, 그로부터 전류 변화에 따른 정추력의 포화현상 및 변화추이를 분석, 고찰하였다. 또한, 제안된 정추력 계산법의 타당성을 입증하기 위해서 길이 118mm, 폭 177mm, 높이 101mm의 양측식 LPM을 설계, 제작하여 실험치와 계산치를 비교, 검토한바 거의 일치함을 알 수 있었으며 LPM뿐만 아니라 회전형 스텝핑 모터, 릴럭턴스 모터등의 자기적 릴럭턴스 변화에 따른 특성 해석시에 자기적 등가회로법에 의한 비선형 해석이 가능하게 되었다.

참고 문헌

- (1) Takashi Kenjo, Stepping motors and their microprocessor controls, CLARENDON PRESS, 1984
- (2) Syed A. Nasar and I. Boldea, "Linear Electric Motors: Theory, Design and Practical Applications", Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1987
- (3) M. Sanada, Y. Takeda et al., "Cylindrical Linear Pulse Motor with Laminated Ring Teeth", Proc. ICEM'90, vol. 2, pp. 693-698
- (4) 山本 行 雄, 山田 一, "平板狀リアパルスモータの磁氣回路と推力解析", Mag-83-12, JEEE Report (In Japanese)
- (5) S. A. NASAR, "ELECTROMAGNETIC ENERGY CONVERSION DEVICES AND SYSTEMS", Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1970
- (6) M. KARITA, H. NAKAGAWA, D. MAEDA, "Characteristic Analysis and Estimation of LPM for Artificial Heart", MAG-91-29, pp. 91-100 (In Japanese)