

양측식 선형펄스모터의 자기회로 및 정추력해석

박 한 석* · 노 창 주**

Analysis of Magnetic Circuit and Static thrust of a Double - sided Linear Pulse Motor

H. S. Park · C. J. Noh

Key words : Double - sided linear pulse motor(양측식 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 일정한 스텝만큼 직선이동하는 전동기로서 속도는 입력펄스의 주파수에 비례하여 운동

하며, 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

* 정회원, 부산공업대학교

** 정회원, 한국해양대학교

액츄에이터로서의 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, 해석시간의 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

영구자석 이동자 매입형 양측식 LPM의 구조는 Fig.1과 같이 1,2상 여자 가능한 4극기이다. Fig.

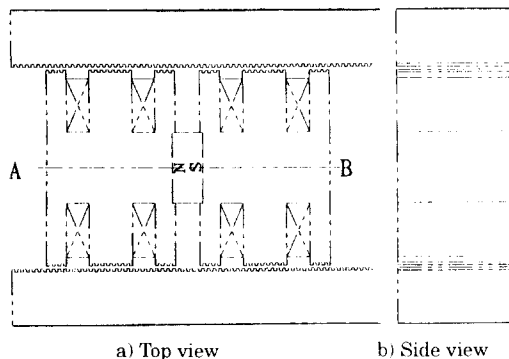


Fig. 1 Configuration of a double side LPM

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.

2.2 등가 자기회로

Fig. 1의 양측식 LPM에서 무여자시에는 영구자석이 갖는 기자력에 의해 유지력(holding force)을 갖으며, 여자시에는 주자속이 이동자의 영구자석과 양쪽 귀소강판의 중심으로 통과한다고 가정하면 LPM의 자기동회로는 상하의 대칭성을 고려하여 LPM의 1/2에 해당하는 해석모델 Fig. 2에 대한 자기동회로도 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 3에서 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,

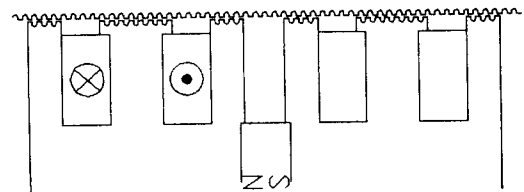


Fig. 2 Analysis model of LPM

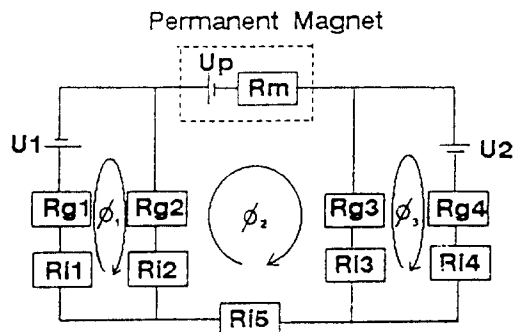


Fig. 3 Equivalent magnetic circuit of a LPM

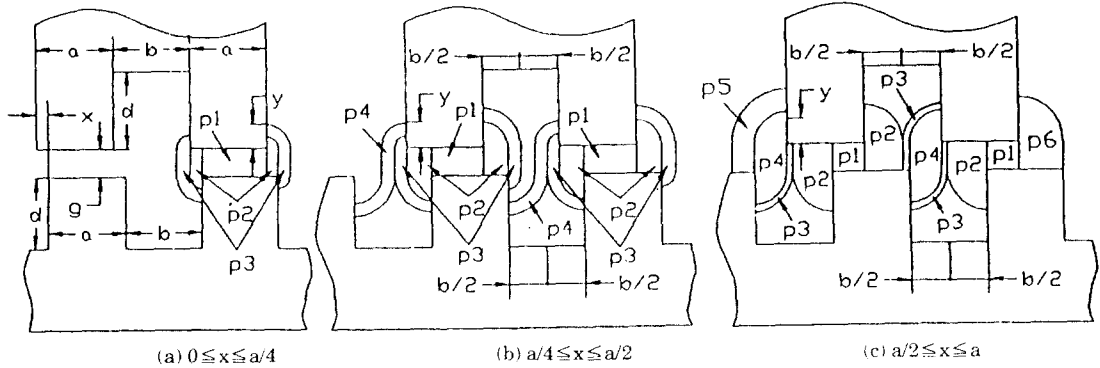


Fig. 4 The permeance model of airgap

$R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}, R_{i4}, R_{i5}$ 는 코아 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. 4와 같은 Permeance 법을 사용해 이동방향 변위의 함수로서 표현할 수 있다⁴⁾.

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

Fig. 2에서 LPM의 치가 1극 3치의 구조로 되어 있으므로 가동자와 고정자사이의 퍼미언스는 치 피치의 상대적 위치에 따라 Fig. 4(a), (b), (c)로 구성되어 있다고 가정하여 가동자와 고정자 치의 상대적 위치에 대한 퍼미언스를 수식화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

① Case I ($0 \leq x \leq a/4$)

$$P = 2\mu_0 l \left[\frac{a-x}{g} + \frac{4}{\pi} \log \left(1 + \frac{\pi x}{2g} \right) + \frac{2}{\pi} \log \left(\frac{\pi y/g}{1 + \pi x/2g} + 1 \right) \right] \quad (2)$$

② Case II ($a/4 \leq x \leq a/2$)

$$P = 2\mu_0 l \left[\frac{a-x}{g} + \frac{4}{\pi} \log \left(1 + \frac{\pi x}{2g} \right) + \frac{1}{\pi} \log \frac{1 + \pi(a-x)/2g}{1 + \pi x/2g} + \frac{2x/g - a/2g}{1 + \pi a/4g} \right] \quad (3)$$

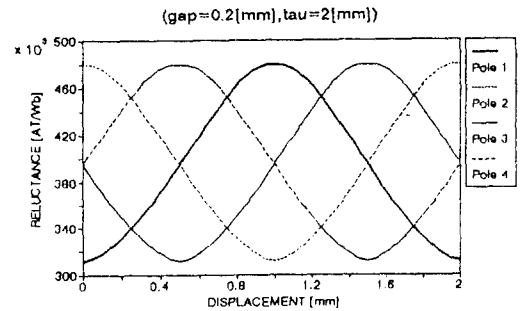


Fig. 5 The airgap reluctance modelled by Permeance Method

③ Case III ($a/2 \leq x \leq a$)

$$P = 2\mu_0 l \left[\frac{a-x}{g} + \frac{3}{\pi} \log \left(1 + \frac{\pi a}{4g} \right) + \frac{3}{\pi} \log \frac{1 + \pi a/4g}{1 + \pi(a-x)/2g} + \log \frac{(a-x)/g}{1 + \pi(a-x)/2g} + \frac{1}{\pi} \log \frac{1 + \pi x/2g}{1 + \pi(a-x)/2g} + \frac{1}{\pi} \log \left(1 + \frac{\pi x}{2g} \right) \right] \quad (4)$$

퍼미언스가 치피치 τ 마다 주기적으로 변하므로 식 (2)~(4)에 모터의 치수를 대입해서 수치계산하여 푸리에 급수의 형태로 만드는 것이 해석하기가 용이하다.

가동자의 변위에 대한 퍼미언스의 역수인 자기저항의 변화는 Fig. 5와 같다.

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

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

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

3. Coenergy법에 의한 추력 계산

3.1 자기에너지와 coenergy

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 자속의 관계는 자기회로의 성질에 의하여 일반적으로 Fig. 6과 같이 비선형성을 가진다.

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

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

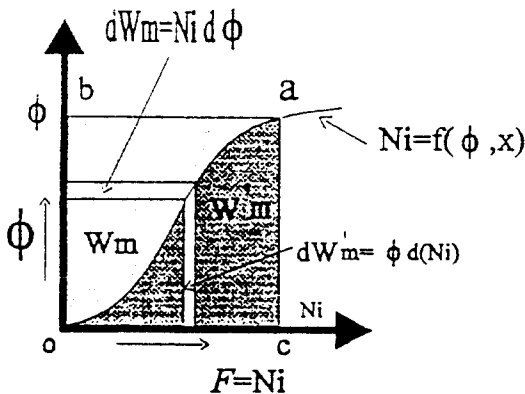


Fig. 6 Magnetic energy and magnetic coenergy

3.2 Newton Raphson 법을 이용한 추력의 계산

Fig. 3의 자기 등가회로에 대한 등가 방정식을 구하면 다음 식 (7)과 같이 얻을 수 있다.

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

변위 X 의 변화에 따라 철심부의 자기저항식(1)에서의 자성체의 비투자율 μ_{ik} 가 비선형적으로 변하므로 식(7)의 비선형방정식의 해 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 를 구하기 위해서는 본 연구에서는 Newton - Raphson

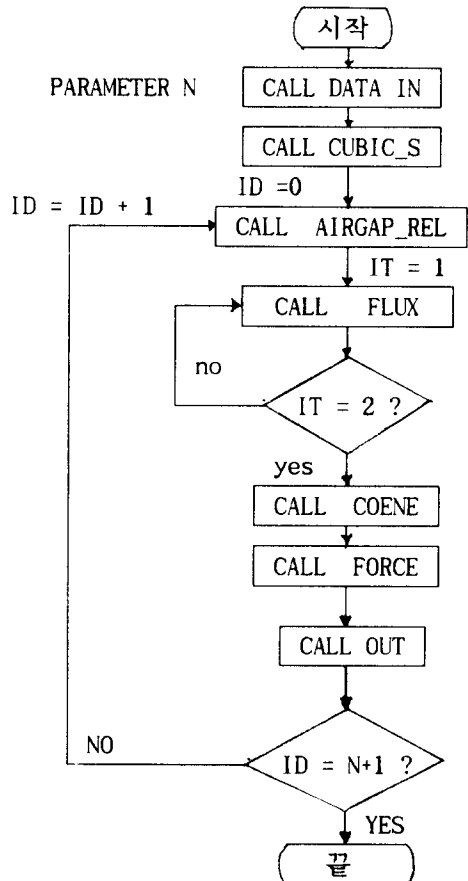


Fig. 7 The main flow chart of the analysis

법을 사용하였으며 LPM 특성해석 프로그램의 실행 흐름도는 Fig. 7과 같다.

서브루틴 FLUX의 상세한 실행 흐름도는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 계산된 $v, \partial v / \partial \phi$ 값으로부터 식(6)을 이용하여 $d\phi$ 를 구하면 식(8)이 되고 이 때 $\phi_i / \phi_k (i, k=1, 2, 3)$ 는 식 (9)로부터 계산한다.

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

$$\frac{\partial f_i}{\partial\phi_k} = \frac{\partial f_i}{\partial v_j} \frac{\partial v_j}{\partial\phi_k} \quad (i, k = 1, 2, 3) \quad (9)$$

여기서, v_j 는 각 자로의 자기저항률이다.

위의 알고리즘을 각 변위마다 반복 수행하고 수렴된 쇠교자속으로부터 자기 수반에너지를 구한 다음에 변위 X에 대한 편미분을 취하여 정추력을

계산한다.

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 최소화하도록 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. 9는 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. 9에서 변위 0인 1차측, 2차측이 일치하는 지점에서 이동자를 변위했을 때에 1상 여자시에는 1/4피치 근방지점에서 최대의 정추력을 발생하며

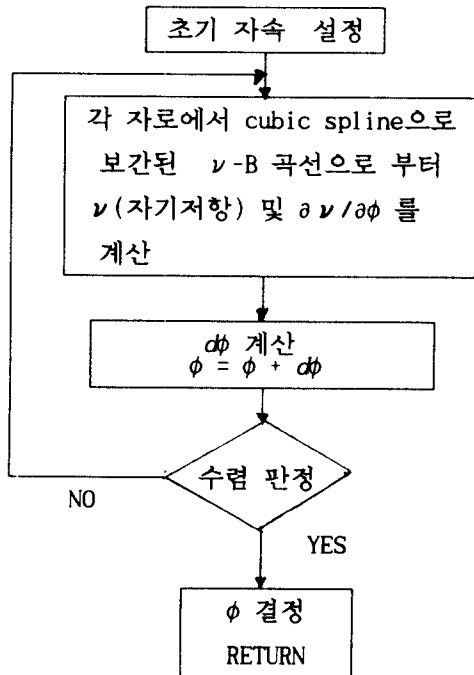


Fig. 8 Flow chart of FLUX calculation

Table 1 Specifications of LPM

기계적 사양			전기적 사양		
항목	치수		항목	치수	
1차측	치수	8	극수	4	
	피치	2mm	coil 권수	200(회/극)	
	치폭	1mm	coil 직경	0.8(mm)	
	슬롯 폭	1mm	전력전류	1.5(A/극)	
	슬롯 깊이	1mm			
	1차측 폭	69mm	coil 저항	0.63(W)	
	1차측 두께	50mm			
2차측	피치	2mm	영구자석 폭	25mm	
	치폭	1mm	길이	10mm	
	슬롯 폭	1mm	두께	50mm	
	슬롯 깊이	1mm	여자방식	1, 2상 여자	
	2차측 길이	1,500mm			
기계적 공극길이	0.08~0.2mm				

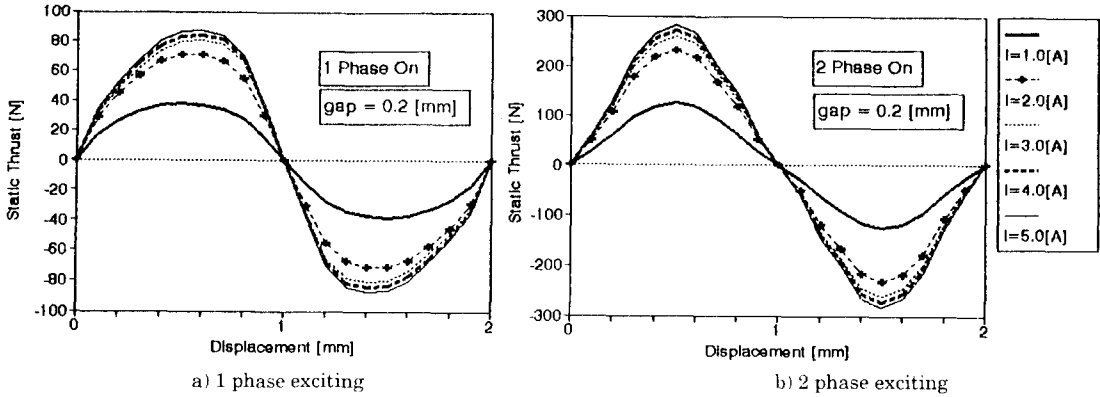


Fig. 9 Displacement - thrust characteristics (input current variation)

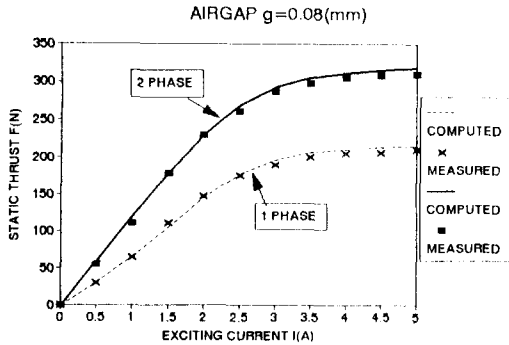


Fig. 10 Displacement - thrust characteristics(experiment value)

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. 9(a)의 1상 여자시에는 최대 정추력 발생점은 공극 길이가 짧을 수록 1/2 극피치 지점쪽으로 기울며, 공극 길이가 0.08mm로 유지된 상태에서의 추력은 약 80(N)정도 발생함을 알 수 있다. 마찬가지로 Fig. 9(b)의 2상 여자에 도 거의 1/2 극피치 지점에서 최대 정추력이 발생하며, 크기는 1상 여자에 비하여 2배이상의 정추력이 발생하는 것으로 나타난다.

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

Fig. 10은 공극 길이가 0.08(mm)일 때 입력전류를 0.5, 1.0, 1.5(A)로 변화했을 때에 이동자의 변위에 따른 정추력 특성곡선의 실험 결과치를 나타낸다. Fig. 10에서 입력이 0.5(A)일 때에는 최대 정추력이 35(N)정도 발생하나 전류를 1.5(A)로 증가했을 때에는 100(N)정도로 약 3배정도 증가하였으며, 최대 정추력 발생지점은 1/2 극피치점으로 이동하는 현상을 볼 수 있다.

Fig. 11은 1, 2상 여자방식에 대한 입력 전류 변화에 따른 최대 정추력 특성곡선의 시뮬레이션 결과치를 나타낸다. Fig. 11에서 공극길이를 0.08, 0.12, 0.16, 0.2(mm)로 증가함에 따라 최대 정추력은 감소하며, 전류의 증가에 따라서는 거의 직선으로 증가하다가 약 3(A)이상에서는 더 이상 증가하지 않음을 볼 수 있다. 이것은 자성체의 자기적 포화현상으로 기인된 것으로 본 연구에서 개발한 LPM의 정격은 1.5(A)이하에서 구동함으로 입력 당 높은 추력특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 10(a)에서 공극 길이가 0.08(mm), 입력전류가 0.5, 1, 1.5(A)에서 실측한 실험치와 Fig. 11의 시뮬레이션 결과치와 비교해 보면 본 연구에서 제안한 자성체의 비선형 특성을 고려한 LPM특성 계산방법으로서 coenergy법을 이용한 계산 수식이 잘 일치함을 알 수 있다. 이상에서 본 연구에서 개발한 양축식 LPM의 추력/입력 비는 공극길이가 0.08(mm)일 때 105.8(N/W), 추력/질량 비는 17.9 (N/Kg)으로서 LPM의 고효율화, 소형, 경량화에 대한 연구와 정밀 속도, 위치제어에 대한 연구가 계속 필요하다.

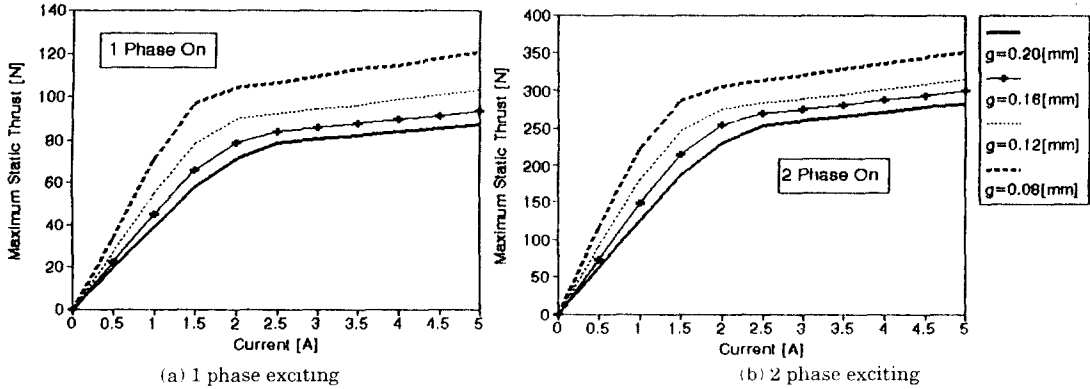


Fig. 11 maximum static thrust

5. 결 론

참고 문헌

본 연구에서는 영구자석을 포함한 양측식 LPM의 자기등가회로와 자성체의 자기적 비선형이 고려된 정추력 해석을 하기 위하여 자기 수반에너지로부터 추력을계산하는 방법을 제시하였으며, 그로부터 전류 및 공극 변화에 따른 정추력의 포화현상 및 변화추이를 분석, 고찰하였다. 또한, 제안된 정추력의 계산법의 타당성을 입증하기 위해서는 길이 118mm, 폭 177mm, 높이 101mm의 양측식 LPM을 설계, 제작하여 실험치와 계산치를 비교, 검토하였다.

그 결과로 개발한 양측식 LPM의 추력/입력 비는 공극길이가 0.08(mm)일 때 105.8(N/W), 추력/질량 비는 17.9(N/Kg)로 실험치와 거의 일치함을 알 수 있었으며, LPM뿐만 아니라 회전형 스텝핑모터, 리럭턴스 모터등의 자기적 리럭턴스 변화에 따른 특성 해석시에 자기적 등가회로법에 의한 비선형 해석이 가능하게 되었다.

- 1) Takashi Kenjo, Stepping motors and their micro-processor 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, "平板狀リニアパルスモータの磁気回路と推力解析", 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)