

퍼미언스법에 의한 공압 부상형 리니어 펄스모터의 힘 특성 해석

(Force Characteristic Analysis of Airflow Type Linear Pulse Motor by Permeance method)

김일남* · 백수현** · 윤신용***

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

요 약

리니어 펄스 모터(LPM, Linear Pulse Motor)는 고정자와 가동자 사이의 공극에 미세한 치 피치로 되어 있기 때문에 고정밀의 유연한 선형운동을 필요로 하는 분야에 적합하다. 리니어 펄스모터의 힘과 위치는 치 피치, 공극, 영구자석 및 여자전류에 의해서 민감하게 영향을 받는다. 따라서 LPM은 힘 특성을 해석하는 것이 매우 중요하다. 본 논문은 공극에서 힘 계산을 위하여 퍼미언스법을 적용하였다. LPM의 공극은 공압베어링에 의해서 발생된 압력으로 부상된다. 간단한 공압과 퍼미언스법은 일정 조건에서 공극을 계산하는 데 사용되었다. 따라서 최대 이용할 수 있는 힘은 공극의 가변에 대한 자기수반 에너지법으로부터 구하였으며, 또한 수직력과 선형 추력은 미세 변위 1[mm] 로부터 얻을 수 있었다.

Abstract

Linear pulse motor (LPM) be suitable a field where smooth linear motion of high precision is required, because it's structured with minute teeth pitch in airgap of between and stator and mover(forcer). Force and position of LPM are effected sensitively by the teeth pitch, air gap, permanent magnet and excitation current. So, LPM is much important to analyze the force characteristics. This paper was applied to permeance method for force calculation at airgap. The airgap of LPM is maintained from the pressure generated by an air-bearing. Simplified airflow and permeance methods will be used to calculate the air gap under static conditions. Therefore, the maximum available force is then derived using the coenergy method with variable air gap, also normal force and linear thrust was acquired from variable minute displacement 1[mm].

1. 서 론

최근 정보산업사회의 발달에 따라 다양한 종류의 정밀제어용 모터는 자동화 (FA, OA) 분야에서 폭

넓게 활용되고 있다. 이중에서도 선형모터(Linear Motor)는 회전형 모터에 컨베이어와 같은 보조기구를 부착함으로써 직선운동을 변환할 필요없이 직접 직선운동이 가능하다. 선형모터는 구조가 간단하고, 기계적인 마찰이 작으며, 진동과 소음이 작으며, 가격이 저렴한 장점을 지니고 있다. 응용분야는 크게 자기 부상열차, 엘리베이터, 경전철, 공장의 운송용 자동화 장치, 정밀기기로부터 X-Y테이블, 레코더, 플로터 및

* 정회원 : 동서울대학 교수

** 정회원 : 동국대학교 전기공학과 교수

*** 정회원 : 동국대학교 산업기술연구원 전임연구원
접수일자 : 1999년 10월 5일

컴퓨터의 드라이버장치 등에 이르기까지 광범위하게 활용되고 있다[1]-[3].

본 연구에서는 선형 모터중 하이브리드형 리니어 펄스모터 (Linear Pulse Motor : LPM)를 대상으로 하고자 한다. LPM은 오픈루프제어에 의해서 입력 펄스에 비례한 일정스텝 만큼의 유연한 직선운동이 가능하며 디지털 제어회로와 결합하여 여자권선에 입력 펄스를 가하면 고정도의 위치제어가 가능하다. 속도제어는 입력펄스의 주파수에 비례하여 가능하다.

기계적인 모터의 설계 및 특성해석 방법은 유한요소법과 등가회로(퍼미언스)법이 있다. 유한요소법의 경우는 복잡한 자기회로와 미소 공극의 요소분할 해석상 어려움과 많은 시간이 소요되지만, 등가회로법은 모터의 모델을 간단히 등가회로화하여 적합한 해석이 가능하며 해석시간도 유한요소법에 비하여 단축된다 [4]-[8].

본 논문에서는 유연한 선형운동을 위해 가동자의 공압베어링을 모델링하며 반복기법으로 공극의 가변에 의한 공압베어링의 힘을 결정하도록 한다. 전자흡인력(수직력)은 포화특성을 고려한 퍼미언스법을 이용하여 구할 수 있으며 공극의 가변에 의해 힘의 재조정이 가능하도록 한다.

이러한 공압베어링의 힘과 전자흡인력의 두 힘이 결합되어 균형이 될 때 이용할 수 있는 최고 선형의 이동 힘은 자기 수반에너지법을 이용하여 구하고자 한다. 본 연구에서는 수반에너지 (Coenergy)로부터 자기적 비선형성을 고려한 자기 퍼미언스법에 의하여 본 LPM의 힘을 계산하며 이에 대한 타당성은 실험을 통하여 입증한다.

2. LPM구조 및 공기베어링의 모델링

그림 1은 본 연구에서 설계 해석한 LPM의 구조이다. LPM의 구조는 크게 두가지로 분류할 수 있다. 고정자 (Platen)는 일정한 폭의 치로 구성되어 있으며, 가동자 (Forcer)는 성층된 철심의 여자권선과 영구자석으로 되어 있다.

고정자는 고밀도 강철로 되어있으며 가동자의 네개 모노필러 (Monofilar) 권선은 두 개씩 직렬로 연결되어 있다. 양쪽 두개의 회로류 영구자석 사이에는 공통자속의 경로가 없으므로 가동자는 자기적으로 독립된 양측 여자형 LPM의 구조로 되어 있다.

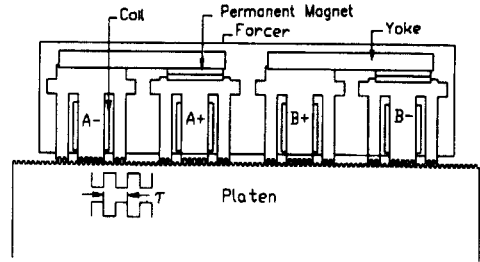


그림 1. 하이브리드형 LPM의 구조
Fig. 1. Construction of Hybrid Type LPM

본 연구에서는 LPM의 유연한 선형운동을 위하여, 기존의 선형 가이드레일 보다는 마찰저항이 작은 공압 베어링을 이용하였다. 고정자와 가동자 사이의 공극은 자기흡인력에 대응하여 부상할 수 있는 공압 베어링을 이용하였으며 이 힘은 공극을 감소시킴에 따라 증가시킬 수 있다. 전자력은 고정자에 대한 가동자의 상대적인 위치와 공극의 양쪽에 따라 변화된다. 본 LPM에 대한 수직력의 균형 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{ab}(d) \pm mg - f_{em}(I, d, x) = m \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} \quad (1)$$

여기서 d : 공극

x : 가동자의 이동변위

I : 여자전류

먼저 공압 부상형 베어링을 모델링하는 것이 필요하다. 가동자에 대한 공압의 흐름 (기류: Airflow) 경로는 그림 2와 같이 복잡하므로 이 공압 베어링의 구조에 대한 수학적 모델링을 간소화하기 위하여 다음과 같이 가정하였다.

(1) 공압은 부분적인 압축이 불가능하므로 이상적인 가스로 가정하며 본 연구에서 공압의 크기는 $M < 0.3$ 를 적용하였다.

노즐의 전장(全長)은 압력의 감소가 10% 이하로 되도록 아주 짧게 구성하였다. 공압의 밀도는 일정하며 기류는 등온선(等溫線)으로 가정한다[4].

(2) 가동자는 고정자에 대해서 평평하다.

(3) 공압은 각 노즐(Nozzle)의 출구를 통하여 일정하게 발산되며 이 평균길이는 가동자 내의 공기흐름

에 대한 마찰을 계산하는데 사용하였다.

(4) 공압은 가동자의 중심으로부터 밖으로 발산되며 이때 노즐사이의 압력과 출구의 압력은 일정하다고 가정한다.

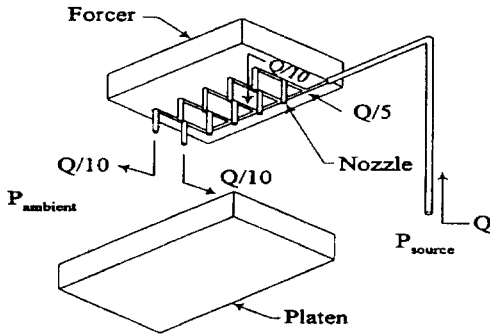


그림 2. 시스템의 공압 경로도
Fig. 2. Airflow Paths of the System

공압의 경로는 공극의 압력원으로부터 가동자의 노즐출구까지의 공압흐름과 고정자와 가동자사이의 공극에서 발생된 공압의 흐름으로 분류한다. 부상력은 일정 공압에서 가동자가 이동할 경우 일정하지만 공극이 감소하면 상대적으로 증가한다.

이때 감소된 공압의 흐름은 상대적으로 노즐의 출구에 대한 압력을 더욱 증가시킬 것이며 이것은 고정자에 대한 전체적인 압력을 더욱 증가시킬 것이다. 다음의 식 (2)는 공압의 흐름을 나타내는 기본적인 모델링의 수식이다.

$$\sum \Delta P = 0 \quad (P_{source} \sim P_{ambient}) \quad (2)$$

여기서, 각 ΔP 는 임의의 경로에 대한 면적의 변화와 마찰손이다.

각각에 대한 압력손실은 식(3)에 의해서 구할 수 있다.

$$\Delta P = P_2 - P_1 = K_t \rho \frac{Q^2}{A^2} \quad (3)$$

여기서, Q : 공압의 경로에 대한 체적

A : 단면적

ρ : 밀도

공압에 대한 밀도는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = \frac{P_1}{RT_{amb}} \quad (4)$$

여기서, R : 가스의 상수

가동자에서 발생하는 공압의 총손실 계수 K_t 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_t = K + K_f \quad (5)$$

가동자가 90° 이동할 경우 면적이 A_1 에서 A_2 로 변화되는 크기에 대한 기하학적 손실계수는 다음의 식 (6) 및 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$K = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right), \text{ 면적이 축소될 경우} \quad (6)$$

$$K = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2, \text{ 면적이 확대될 경우} \quad (7)$$

이동변위에 대한 마찰 손실계수 K_f 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_f = \frac{fl}{d} \quad (8)$$

여기서, l : 변위

원형호수의 경로에 대한 직경 d 는 식 (9)와 같다.

$$d = \frac{4A}{P_w} \quad (9)$$

여기서, P_w : 습도계수

f : 마찰계수

호수의 거침정도를 나타내는 Reynolds Number (Re) 상수는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (10)$$

$$V = \frac{Q}{A} \quad (11)$$

여기서, μ : 점착계수

$Re < 2,500$ 경우, 표면 거칠기 정도는 다음 식(12)와 같은 마찰계수로 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (12)$$

$Re > 2,500$ 경우, 표면 거칠기 정도는 식(13)과 같이 마찰계수로 나타낼 수 있다

$$f = (1.14 - 2 \log(\frac{\epsilon}{d} + \frac{21.25}{Re^{0.9}}))^{-2} \quad (13)$$

여기서, ϵ : 표면의 거칠기 정도

식 (12), (13)은 호수의 공압에 대한 마찰계수 결정을 위해서 사용된 거칠기 정도를 나타낸 수식이다.

그림 3은 일정한 공극 0.18[mm]을 유지하고 있는 미소변위에 대해서 호수 끝(Nozzle exit)에서 발생하는 압력모드를 나타낸다. 또한 이 그림은 고정자와 가동자 사이의 압력모드를 의미하며 이때 부상력은 압력모드를 통합함으로써 구할 수 있다.

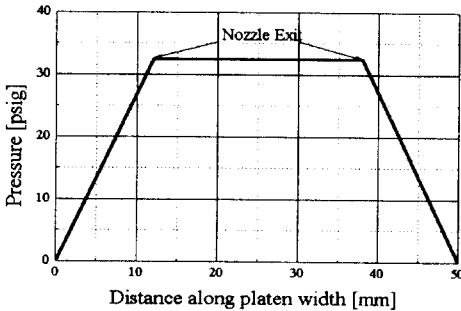


그림 3. 시스템의 압력 프로파일
Fig. 3. Pressure Profile of System

이러한 압력 프로파일에 대한 반복해석은 그림 4와 같이 각각의 공극의 변화로부터 얻을 수 있으며 그림 4는 공극의 가변에 대한 기류와 공압 베어링을 상호 비교한 결과를 나타낸 것이다.

곡선의 적합성은 이동변위에 대해서 공압베어링의 힘이 선형화 할 수 있는 구간을 그림 4와 같은 데이터로 나타낼 수 있다. 이에 대한 공기베어링의 힘은 식 (14)와 같다.

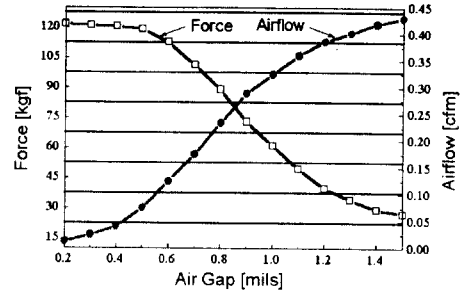


그림 4. 공극의 변화에 대한 공압베어링의 힘과 기류
Fig. 4. Air Bearing Force and Airflow with Variable Air Gap

$$f_{ab}(d) = 215 + 423d - 845d^2 + 387d^3 - 39d^4 \quad (14)$$

여기서, d : 공극의 길이 (mm)

f_{ab} : 가동자의 공기베어링에 대한 힘

3. 퍼미언스의 모델 및 자기에너지의 해석

그림 5는 그림 1의 양측 2상 4극 하이브리드형 LPM의 구조 중 가동자 한 극의 확대된 구조를 나타낸 것이다. 권선으로 감겨진 내부 치(Tooth)는 외부 치로부터 반 피치 떨어져 있다. 치 폭과 홈 폭을 0.45 : 0.55로 함으로써 큰 추력을 발생하도록 하였다. 각각 4 극으로 된 가동자는 치피치당 1/4 편차를 지니고 있으며 각 두권선쌍 ($A-B-$, $A+/B+$)으로 된 내부극 ($A-$)와 외부극 ($A+$)는 1/2 치피치 만큼 떨어져 있다. 전체 자속경로는 그림 5와 같이 큰추력을 발생하도록 영구자석과 전자석의 결합된 구조이다.

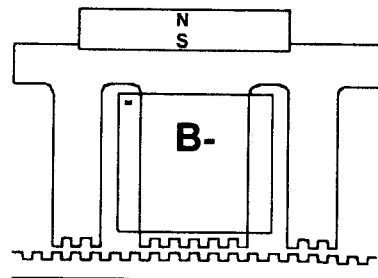


그림 5. 가동자 한 극의 확대된 치 구조
Fig. 5. Expanded Teeth Frame of Forcer One Pole

가동자는 와전류손을 억제 하기위하여 철심을 성층 하였으며 전체적인 와류손은 무시하기로 한다. 철의 재질은 고투자율의 강철 (M-22) 은 고정자와 가동자 양쪽에 사용되었다.

본 LPM의 구조에서 공극과 자기저항을 고려한 등가자기회로는 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

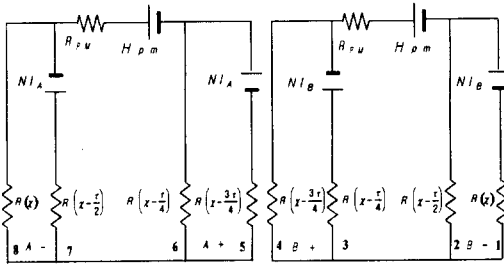


그림 6. LPM의 등가자기회로
Fig. 6. Equivalent Magnetic Circuit Model

여기서 영구자석은 자기저항 R_{pm} 에 대해서 기자력(MMF)원 H_m 으로 모델화할 수 있으며, 기자력의 크기는 영구자석의 세기와 크기의 함수로서 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

여자권선은 공급전류의 함수에 따라 변화되는 기자력원을 나타낸다. 자기저항 R_{pm} 은 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_m = \frac{B_p h}{\mu_0 \mu_r} \quad (15)$$

$$R_{PM} = \frac{h}{\mu_0 \mu_r A} \quad (16)$$

여기서 h 는 극성의 방향에 대한 자석의 높이를 나타내며 A 는 자석의 면적을 나타낸다.

식 (17)은 LPM을 2 상 여자할 경우 고조파 성분이 포함된 여자전류의 파형을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} I_A &= I_{\mu} \left(\cos \left(\frac{\pi x}{\tau} - \phi \right) + K_3 \cos \left(\frac{3\pi x}{\tau} - 3\phi \right) \right) \\ I_B &= I_{\mu} \left(\sin \left(\frac{\pi x}{\tau} - \phi \right) - K_3 \sin \left(\frac{3\pi x}{\tau} - 3\phi \right) \right) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 K_3 는 제 3고조파 성분의 크기를 나타내

며, 각도 ϕ 는 부하에 의해서 나타난 지상분의 크기를 나타낸다[10]-[12]. 이때 상전류에 10%의 3고조파 성분이 포함되며, 이것은 디텐트력을 감소시킴으로서 보상할 수 있다.

본 논문에서는 LPM의 힘을 구하기 위하여 자기 수반에너지법을 적용한다. 자기 수반에너지법은 가동자의 위치와 여자권선의 함수에 대해서 고정자와 가동자 사이의 수직력을 계산할 수 있으며 이러한 힘은 공극의 변화에 대한 저장에너지의 변화로 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{em}(I, d, x) &= \frac{\partial}{\partial d} W(I, d, x) \\ &= - \sum_{j=0}^8 \frac{\Phi_j(I, d, x)^2}{2} \frac{\partial}{\partial d} R_j(d, x) \end{aligned} \quad (18)$$

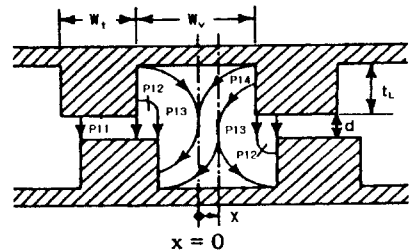
위의 식 (18)에서 공극의 자속 Φ_j 는 공극의 크기와 위치보다 실제적으로 여자전류 I 와 전체 자기저항 R 에 달려있다.

이 때 각각의 공극자속은 그림 6의 등가자기회로를 이용함으로써 얻을 수 있으며, 각각의 공극에 대한 합성자속인 Φ_j^2 은 실제 각 자속의 제곱합으로서 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

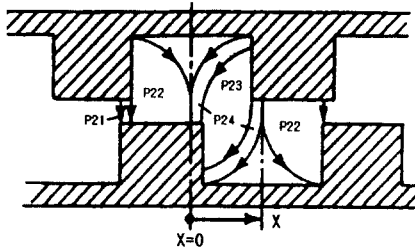
$$\Phi_1^2 = \Phi_{1,B-}^2 + \Phi_{1,B+}^2 + \Phi_{PM}^2 \quad (19)$$

그림 7은 페미언스법에 의해서 본 LPM 공극의 자기저항을 구하기위한 고정자와 가동자 사이의 치형상을 나타낸 것이다.

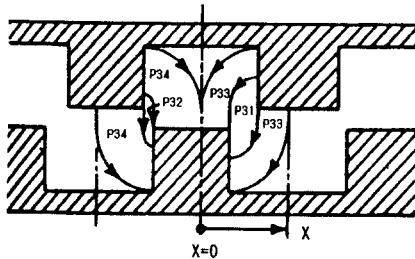
그림 7(a), (b), (c)는 이동변위에 대한 3가지 해석 모델을 나타낸 것이다[7].



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



(b) $0.5 W_v \leq x \leq W_t$



(c) $W_t \leq x \leq 0.5(W_t + W_v)$

그림 7. 이동변위에 대한 LPM의 치 형상
Fig. 7. Teeth Frame of LPM with Moving Displacement

여기서는 고정자와 가동자 사이의 치 형상에 대한 공극의 자기저항을 구하기 위하여 퍼미언스법을 적용하였으며 이에 대한 식은 식 (20)과 같이 표현할 수 있다. 이로부터 한 치피치의 면에 대한 자속 값을 알 수 있다[8].

그림 8은 고정자와 가동자사이 공극의 한 치피치에 대한 공극퍼미언스의 계산결과를 얻을 수 있다.

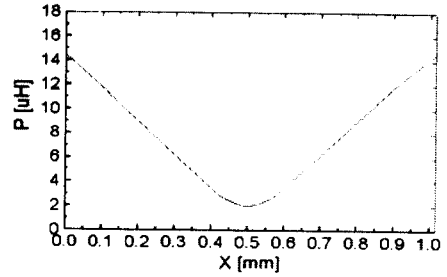


그림 8. 한 피치에 대한 공극의 퍼미언스 분포
Fig. 8. Airgap permeance distribution over one tooth pitch

그림 8의 공극퍼미언스에 대한 고조파 분포는 그림 9와 같다.

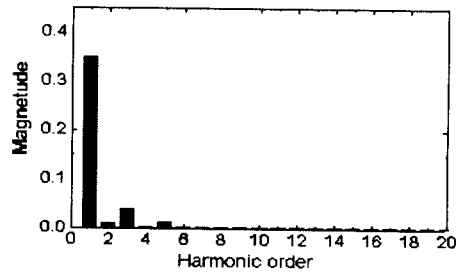


그림 9. 퍼미언스의 고조파 분포
Fig. 9. Harmonic distribution of permeance

일정 공극에 대해서 본 LPM의 사양 파라미터를 적용할 경우, 공극에 대한 자기저항은 그림 10과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 수평축은 이동변위 (40mm)이며, 수직축의 크기는 자기저항 $(\mu H)^{-1}$ 로 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 P(d, x) = & \left\{ \mu_0 L \left[\frac{W_t - x}{d} + \frac{4}{\pi} \ln \left(1 + \frac{0.5\pi x}{d + 0.5\pi x} \right) + \frac{2}{\pi} \ln \left(1 + \frac{\pi(0.5 W_v - x)}{d + 0.5\pi x} \right) + \frac{x}{d + 0.5(W_v - x)} \right] \right. \\
 & \left. 0 \leq X \leq 0.5 W_v \right. \\
 & \left. \mu_0 L \left[\frac{W_t - x}{d} + \frac{4}{\pi} \ln \left(1 + \frac{0.25\pi W_v}{d} \right) + \frac{W_v - x}{d + 0.5\pi(W_v - x)} + \frac{4}{\pi} \ln \left(\frac{d + 0.25\pi W_v}{d + 0.5\pi(W_v - x)} \right) \right] \right. \\
 & \left. 0.5 W_v \leq x \leq W_t \right. \\
 & \left. \mu_0 L \left[\frac{W_v - x}{d + 0.5\pi(W_v - x)} + \frac{x - W_t}{d + 0.5\pi(x - W_t)} + \frac{4}{\pi} \ln \left(\frac{d + 0.25\pi W_v}{d + 0.5\pi(W_v - x)} \right) \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{4}{\pi} \ln \left(\frac{d + 0.25\pi W_v}{d + 0.5\pi(x - W_t)} \right) \right] \right. W_t \leq x \leq 0.5(W_t + W_v)
 \end{aligned} \tag{20}$$

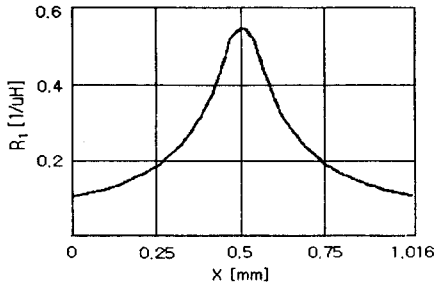


그림 10. 불포화시 치 피치에 대한 자기저항
Fig. 10. Reluctance with one pitch at unsaturation

따라서 식 (20)에 주어진 모델은 철에 대한 자기포화가 이루어지지 않는 것으로 그림 10과 같이 나타낼 수 있지만 실제에 있어서, 약간의 포화는 심지어 여자 레벨의 치 부분에서 발생한다.

이러한 제한된 포화는 식 (20)에 의해서 주어진 최대, 최소 자기저항과 식 (21)과 같은 극한값 사이에서 정현적인 변화로 가능하다.

$$R(d, x) \approx \frac{R_{\max}(\dots, x) + R_{\min}(\dots, x)}{2} + \frac{R_{\max}(\dots, x) - R_{\min}(\dots, x)}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{W_t + W_v}\right) \quad (21)$$

먼저, 공극에 대한 최대 및 최소 자기저항은 식 (22), (23)와 같이 공극의 함수에 의해서 표현 할 수 있다.

$$R_{\max} = \left[6 \mu_0 L \left(\frac{W_t}{d} + \frac{2}{\pi} \ln \left(1 + \frac{0.5\pi W_v}{d} \right) \right) \right]^{-1} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial d} P(d, x) = & \left\{ \mu_0 L \left[\frac{x - W_t}{d^2} + \frac{-2x/d}{d + 0.5\pi x} + \frac{x - 0.5 W_v}{d + 0.5\pi(W_v - x)} + \frac{2}{d + 0.5\pi W_v} + \frac{-x}{d + 0.5\pi(W_v - x)} \right] \right. \\ & \left. 0 \leq x \leq 0.5 W_v \right. \\ & \mu_0 L \left[\frac{x - W_t}{d^2} + \frac{-W_v/d}{d + 0.25\pi W_v} + \frac{x - W_v}{(d + 0.5\pi(W_v - x))^2} + \frac{W_v - 2x}{(d + 0.25\pi W_v)(d + 0.5\pi(W_v - x))} \right] \\ & \left. 0.5 \leq x \leq W_t \right. \\ & \mu_0 L \left[\frac{x - W_v}{(d + 0.5\pi(W_v - x))^2} + \frac{W_t - x}{(d + 0.5\pi(x - W_t))^2} + \frac{W_v - 2x}{(d + 0.25\pi W_v)(d + 0.5\pi(W_v - x))} \right. \\ & \left. + \frac{2(x - W_t - 0.5 W_v)}{(d + 0.25\pi W_v)(d + 0.25\pi(x - W_t))} \right] W_t \leq x \leq 0.5(W_t + W_v) \end{aligned} \quad (24)$$

$$R_{\min} = \left[6 \mu_0 L \left(\frac{W_v - W_t}{d + 0.25\pi(W_v - W_t)} + \frac{8}{\pi} \ln \left(1 + \frac{d + 0.25\pi W_v}{d + 0.25\pi(W_v - W_t)} \right) \right) \right]^{-1} \quad (23)$$

이 값은 자기포화의 제한된 양을 나타내며 그림 11과 같이 더욱더 변화된 파형을 나타낸다.

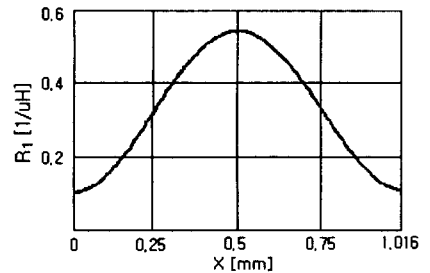


그림 11. 포화시 한 피치에 대한 자기저항
Fig. 11. Reluctance with one pitch at saturation

이 수직력의 계산은 공극에 대한 자기저항의 부분적인 유도에 의해서 가능하다. 다음의 식(24)는 식 (20)에 주어진 일부분의 퍼미언스를 변환한 것이다.

그림 11과 같이 이러한 한 치 피치에 대해 자기저항이 발생한 것은 공극의 미소한 자기저항의 변화 때문이며 이에 대한 수식은 식(25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial d} R(d, x) = & -\frac{1}{P(d, x)^2} \frac{\partial}{\partial d} P(d, x) \\ \approx & \frac{R_{\max}(d_{\max}, \dots) - R_{\max}(d_{\min}, \dots)}{d_{\max} - d_{\min}} \end{aligned} \quad (25)$$

시뮬레이션을 통한 자기수직력은 그림 12와 같이 공극의 함수에 의해서 구할 수 있다.

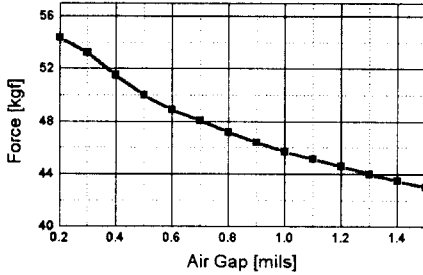


그림 12. 시뮬레이션한 공극의 수직력
Fig. 12. Simulationed Air Gap Force

코일이 여자된 경우 식 (21)과 식 (25)는 일정 공극에 대해 고정자의 임의의 한 기준점에서 식 (18)로부터 선형화된 자기적인 힘을 구할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 가동자 1.13[kgf]에 대해서 그림 12의 흡인력과 그림 4의 공압베어링 힘을 비교하여 적합한 선형 힘(추력)을 얻었으며 이때 공극은 1.15 [mm]이다.

본 실험은 각각 8-스텝의 위치에서 최대 힘을 계산할 수 있으며 무부하시 이 최대의 힘은 90°의 위치로부터 놓여 있다. 등가자기회로의 일정자속에서 미세 이동 변위에 대한 공극의 자기저항 변화로부터 선형 추력은 식 (26)과 (27)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$f_x(I, d, x) = \frac{\partial}{\partial x} W(I, d, x) = - \sum_{j=1}^8 \frac{\Phi_j(I, d, x)^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} R_j(d, x) \quad (26)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} R(d, x) \approx -K \frac{R_{\max}(\dots) - R_{\min}(\dots)}{2} \sin(Kx) \quad (27)$$

여기서, $K = \frac{2\pi}{W_t + W_v}$

4. 실험 및 고찰

본 장에서는 앞의 퍼미언스법 모델을 기준으로한

추력은 그림 14, 15와 같이 이동 변위에 대해서 시뮬레이션한 추력과 실제 측정된 추력을 비교, 고찰한 결과를 나타낸다. 먼저 설계, 제작한 본 LPM의 전기적인 사양 및 기계적인 사양을 나타낸 것이다.

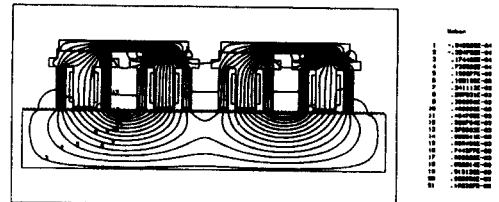
표 1. LPM의 사양
Table 1. Specification of LPM

사 양	치 수 [단위]
치 폭 : W_t	0.45 [mm]
흡 폭 : W_v	0.55 [mm]
치의 길이 : l	50 [mm]
자석의 높이 : h	3 [mm]
자석의 면적 : A	25 [Cm ²]
잔류자속 밀도 : B_r	1.23 [T]
코일의 턴수 : N	57 [턴]
최대 상전류 : I_{pk}	2.7 [A]
고정자 폭 : w_{platen}	50 [mm]
가동자의 길이 : l_{forcer}	118 [mm]
정 추력 : f	9 [kgf]
정 격 : P	324 [W]

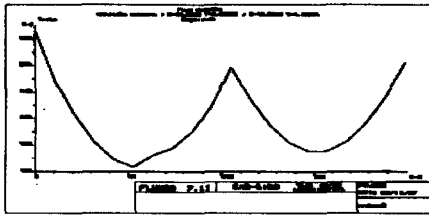
그림 13은 그림 1의 LPM 구조를 유한요소법의 요소분할에 의해서 해석된 자속분포를 나타낸 것이다.

여기서 2상 여자전류로 $I_{pk} = 2.7[A]$, 노드수 5,120, 절점수 1,0530을 해석조건으로 하였으며 이때 영구자석과 전자석에 의해 발생된 자속분포는 그림 13 (a)와 같다.

그림 13 (b)는 그림 13 (a)에 대한 공극의 자속밀도 크기를 나타내며 여기서 두 자속밀도의 차는 영구자석과 전자석에 의한 기자력의 합과 차를 나타낸다 [5],[6].



(a) LPM의 자속분포도
(a) Flux Distribution of LPM



(b) LPM의 공극 자속밀도
(b) Air Gap Flux Density of LPM

그림 13. LPM의 자속분포 및 공극 자속밀도
Fig. 13. Flux Distribution and Air Gap Flux Density of LPM

이 결과로부터 그림 8의 퍼미언스 분포가 유한요소의 자계분포와 거의 유사함을 알 수 있다. 그림 14는 미세 이동변위에 대해서 시뮬레이션된 선형 추력을 나타낸 것이다. 여기서 2 상의 여자된 위치는 단상보다도 22%나 더 많은 힘을 발생하며 이때 평균 선형 추력 f 는 8.95 [kgf]이다.

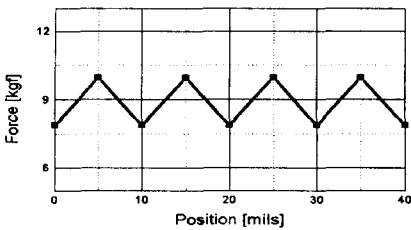


그림 14. 시뮬레이션된 선형 힘
Fig. 14. Simulationed Linear Force

본 LPM은 최대 이용할 힘을 결정할 수 있도록 8-스텝의 위치에서 측정되었으며 이 때 추력으로서 A상은 정현파, B상은 여현파의 힘을 발생한다. 그림 15는 각각 10개의 위치에서 측정된 힘을 나타낸 것이다.

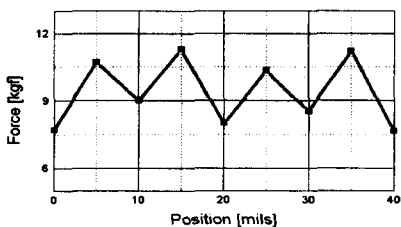


그림 15. 측정된 선형 힘
Fig. 15. Measured Linear Force

LPM의 측정장치는 이용할 힘에 있어서 7%의 오차가 존재함을 알 수 있다. 그러나 이 값은 예측한 값보다 약 0.675[kgf]가 더 큰 9.63[kgf]의 힘이 발생함을 알 수 있다. 이러한 오차는 실제 모델에 의해서 예측된 것보다 공극이 작기 때문에 발생하는 것으로 여겨진다.

다음의 그림 16은 본 연구에서 적용한 LPM의 실제 측정 시스템을 나타낸 것이다. 추력측정용 로드셀 20[kgf]와 레이저 변위측정 장비 0.01 [μm]를 이용함으로써 수직력 및 추력을 측정할 수 있었다[9].

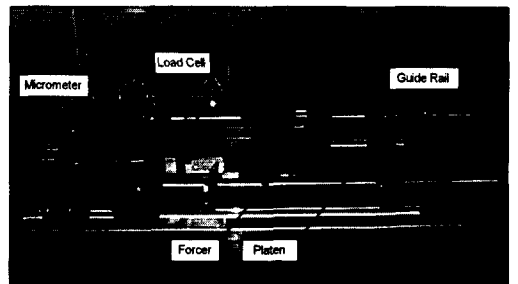


그림 16. LPM의 측정 시스템
Fig. 16. Measurement System of LPM

여기서 수직력은 보조 지지기구를 이용하여 가동자를 평형하게 유지시킨 상태에서 마이크로미터 0.01[mm]나 공압 10 [kgf/cm^2]의 부상에 의해 공극을 가변시켰으며 이때 발생하는 추력은 로드셀을 이용하여 측정하였다[10].

또한 추력은 일정한 공극에서 스텝펄스의 신호에 따라 이동하는 가동자의 추력을 측정할 수 있었으며, 이동변위에 대한 선형 추력은 무여자로부터 여자시 $I = 2.7[A]$ 까지 마이크로미터로 가동자를 이동시키면서 로드셀에 의해 측정할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 고정도, 고 추력용 2상 4극 하이브리드형 LPM의 힘 특성을 해석하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 추력 계산은 비선형성을 고려한 등가자기회로의 퍼미언스법을 적용하여 자기 수반에너지로부터 구하였다. 이 때 공극의 가변에 따른 부상력과 전자흡인력의 상호 관계로부터 힘(수직력, 추력)을 얻을 수 있었다.

2) 본 LPM은 스텝구동에 따라 미세 치피치를 이동함으로써 고정밀 위치제어와 고추력의 발생이 가능이 가능함을 실험을 통하여 입증하였다. 이때 계산된 추력은 측정된 결과와 비교하여 실제 공극의 차이로 약간의 차이는 발생하지만 거의 일치함을 알 수 있었다.

3) LPM 가동자의 보조 지지기구는 기존의 선형 가이드레일 대신에 소음과 마찰저항이 작은 새로운 형태의 공압 부상형 베어링을 적용하였다.

앞으로 본 LPM에 고 정밀, 고속제어가 가능한 제어장치 적용하면 X-Y 테이블, 반도체 칩 이송장치 등에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Yokozuka, T. and Baba, E., " Force displacement characteristics of Linear Stepping Motors," IEE Proceeding-B, Electric Power Applications, Vol. 139, No.1, Jan. 1992, pp.37-43.
 [2] Fu, Z. X. and Naser, S.A., " Analysis of a Hybrid Linear Stepper Motor," Proc. of the 21st Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices, San Jose, CA, 1992, pp.234-240.
 [3] Matsui, N., Nakamura, M. and Kosaka, T., "Instantaneous Torque Analysis of Hybrid Stepper Motor," Proc of the 30th Annual IEEE IAS Meeting, Orlando, FL, 1995, pp.69-78.
 [4] Blevins, Robert D., Applied Fluid Dynamic Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York, 1984, Chapter 6.
 [5] Shames, Irving Herman, Mechanics of Fluids, McGraw-Hill, New York, 1986, Chapter 8.
 [6] Krause, P.C., Analysis of Electric Machinery, McGraw-Hall, New York, 1986, chapter 1.
 [7] Hanselman, D.C., Brushless Permanent-Magnet Motor Design, McGraw-Hall, New York, 1994, Chapter 3.

[8] Chai, H.D., "Permeance Model and Reluctance Force between Toothed Structures," from the book, Theory and Application of Step Motors, B.C.Kuo, ed, West Publishing 1974, pp. 141-153.
 [9] S.H. Baek et al., "The Motion Characteristics Analysis of LPM using Laser Interferometer," Proceeding of international conference on Electrical Engineering, ICEE'96 Vol.2, August 12-15, pp.544-548, 1996.
 [10] 윤신용, 백수현, 임태빈, 김철진, "고조파 보상에 의한 하이브리드형 LPM의 정밀도 향상," 대한기학회논문지, 제47권 3호, pp.313-319, 1998.3

◆ 저자소개 ◆

김 일 남 (金一男)

1942년 12월 10일생. 1967년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동국대 공대 전기공학과(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과(박사과정수료). 1979년~1999년 현재 동서대학교 전기과 교수.

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.

윤 신 용 (尹信容)

1964년 9월 1일생, 1992년 서울산업대학교 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.