

LPM의 자기회로 설계를 위한 해석방법

李殷雄
忠南大學校

金一中
忠南大學校

The Analysis Methods for the Design of Magnetic Circuits in Linear Pulse Motors

Lee, Eun Woong
Chungnam Nat. Univ.

Kim, Il Jung
Chungnam, Nat. Univ.

Abstract

LPM is a characterized motor to reciprocate linear motion for the office automation(OA), the factory automation(FA) and the field of information instruments because it can generate direct drive without any mechanical converter.

For the design and analysis of permanent magnet type linear pulse motor, it is therefore necessary to investigate the characteristics of magnetic flux distribution, static and dynamic thrust force, normal force, etc, by analyzing its magnetic circuit.

This paper describes various useful methods for improving the characteristics of LPM. And these method is adopted on the PM and flat type, double side 2-phase 8-pole LPM.

1. 서 론

현대 고도산업사회에서 요구되고 있는 사무자동화(OA), 공장자동화(FA), 정보통신 분야의 정밀화, 자동화, 소형화는 이들 기기의 구동원인 액츄에이터의 새로운 개념을 도입해 하였으며, 최근에는 디지털 제어기술과 신소재의 출현으로 전자액츄에이터 가운데 직선형 전동기 분야의 눈부신 발전을 이루고 있다.

현재는 직선운동을 요구하는 응용기기의 대부분이 회전형 전동기로 부터 직선운동을 실현하고 있다. 이때 회전운동을 직선운동으로 변환하여 동력을 전달하기 때문에 벨트, 기어 등의 변환기구가 반드시 필요하게 되며 응용기기 내에서 구동원이 차지하는 공간이 크며, 효율 및 내구성 등의 문제를 가지고 있을뿐 아니라 직접구동(direct drive)이 불가능하다. 따라서 짧은 스트로크의 직선운동이 필요한 기기의 구동에는 단위 입력당 직선추력이 다른 리니어모터와 비교하여 대단히 큰 LPM(Linear Pulse Motor)을 사용함으로써 응용기기 전체의 크기와 부품수를 줄일 수 있기 때문에 소형경량화와 내구

성, 신뢰성을 높일수 있게 된다.¹⁾

최근 공작기계, 제도기, 컴퓨터 주변장치등에는 구동기구의 고성능화, 소형화등을 위해 LPM의 도입을 시도하고 있다. 데이터 통신등에 사용되는 출력기기에서도 고속도와 높은 정밀도의 위치결정 특성을 필요로하므로 인쇄 헤드 구동용으로 채택되고 있다. LPM이 가지는 기본적인 특성의 장단점을 정리하면 다음과 같다.²⁾

장점

*회전-직선운동 변환기구가 불필요하며 마이크로스텝구동이 가능하다.

*Forward, Feedback 제어가 모두 가능하다.

*Backlash 및 기계적 마찰에 의한 고장을 피할수 있다.

*제어기 성능에 따른 구동중의 오차누적이 없다.

*제어시스템과 일체형으로의 제작이 가능하다.

*높은 위치결정 정도와 저속도 운전이 가능하다.

*기계적 손상없이 반복적인 간헐운전이 가능하다.

단점

*직접구동시 LPM의 제작 가공 오차가 직접 위치결정 오차로 연결된다.

*기계적으로 간단하나 자로의 비대칭, 비독립성으로 자기간섭이 있다.

*가동자의 지지기구가 취약하면 주행에 따른 공극의 길이 변화가 크다.

*인 스트로크 운전에는 적합하지 않다.

*출력과 크기에 제한이 있다.

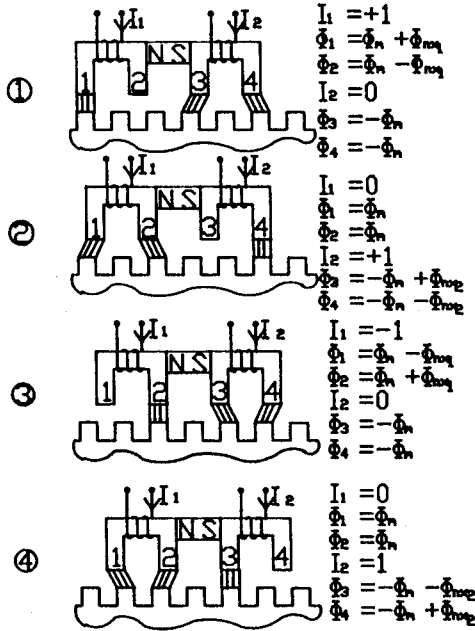
그러나 이 같은 단점들은 고효율 제어기와 마찰이 없는 선형 자기베어링의 개발등으로 극복될 수 있다고 본다.

본 연구에서는 이와 같은 특징을 갖는 LPM을 제안하고 설계 및 제작에 앞서 필요한 자기회로의 설계에 따른 자기회로의 특성해석 방법을 살펴보고 그 가운데 장단점을 파악하여 앞으로 시작기의 제작에 앞서 이들 해석방법을 적용코자 한다.

2. LPM의 기본이론

2.1 구동원리

LIM, LDM, LSM이 각각 회전형 유도전동기, 직류전동기, 동기전동기를 그 원형으로 하는 것처럼 LPM은 회전형 스테핑 모터가 원형이며 스테핑모터의 구동원리와 동일하다.^{3,4)} PM(영구자석)형 LPM의 구동원리와 여자모드는 그림-1과 같다.



I_1 Coil	+	-	+	-
I_2 Coil	-	+	-	+
Mode	1	2	3	4

(a) 1상 여자 모드

I_1 Coil	+	-	+	-
I_2 Coil	+	+	-	-
Mode	1	2	3	4

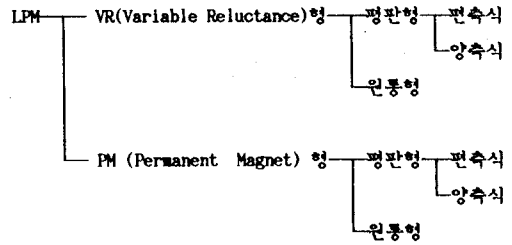
(b) 2상 여자 모드

그림-1. PM형 LPM의 구동원리와 여자모드

가동자의 이동속도는 주어진 입력 펄스 주파수(pps)로 결정되며 이동거리(번위)는 입력 펄스의 수에 따라 결정되므로 속도제어의 요소는 펄스주파수가 된다. 또한 구동시 추력의 크기는 전류에 비례하며 펄스 전류에 의한 시퀀스 여자 전원을 필요로 한다.

2.2 종류 및 구조

LPM은 자속을 발생시키는 방법에 따른 자기회로의 구성, 기계적인 모양, 여자방식 등에 따라 특수용도에 알맞은 다음과 같은 다양한 형태의 LPM으로 분류된다.⁵⁾



또 자기회로의 상수에 의해 2상에서 부터 다상 다극으로 제작하여 사용목적에 맞는 구동특성을 얻을 수 있으며 고정자와 가동자가 가지고 있는 치와 홈의 형태도 각형과 반원형의 것이 있다. 발생추력의 크기는 PM형이 VR형 보다 크지만 구동시의 소음이 적고 구조가 간단한 면에서는 VR형이 유리하다. 그러나 실제 응용기기에 사용되는 형태는 PM형이 훨씬 많이 채택되고 있다. 또한 가동자의 이동 자유도를 크게하고 보다 간단한 구동회로를 구성하기 위하여 양속식 보다는 편속식이 유리하다. 그러나 편속식은 가동자와 고정자 철심 상호 간에 작용하는 수직력(흡인력, 반발력)이 작용하여 운전 특성을 저하시키는 원인이 된다.

특히 PM형 LPM에서는 자속이 통과하는 방향에 따라 자속종방향형(LFM; longitudinal flux machine)과 자속횡방향형(TFM; transverse flux machine)으로 나누어진다.

2.2.1 LFM과 TFM의 비교⁶⁾

그림-2(a)는 자속종방향형(LFM)과 자속횡방향형(TFM) LPM의 구조를 나타내고 있다. 가동자는 LFM에서는 2개의 극을 갖는 C 자형 철심 2개를 앞뒤로 배치하고 있으며 TFM에서는 4개의 극을 갖는 2개의 철심 사이에 비자성체를 끼워 좌우로 배치하고 있다. 코일은 동일 철심에서 서로 반대 방향으로 기자력을 발생하도록 권선된다. 따라서 자속통로가 LFM에서는 전후방향, TFM에서는 좌우방향이 된다.

고정자속의 치는 LFM에서는 1 열로 균일하지만 TFM에서는 반 피치 어긋나게 2열로 만들어 진다. 1상 여자시의 자기회로를 그림-2(b)에 표시하고 있으며 LFM에서는 여자전류의 극성을 바꾸면 자로 길이의 변화가 있게되고 따라서 추력의 변동이 크게되어 진동 및 소음의 원인이 됨을 알 수 있다. 그러나 TFM에서는 자로 길이의 변화가 거의 없어 추력의 변동이 작기 때문에 위치결정 정도가 높아진다.

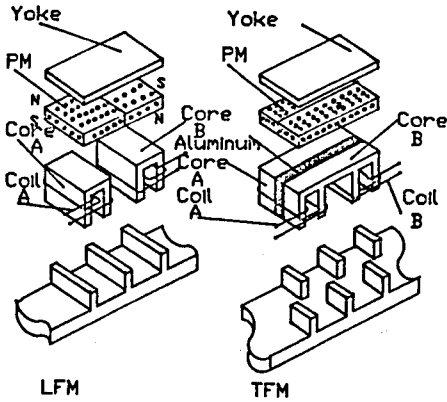
일반적으로 LFM은

- (1) 자기간섭이 크다.
- (2) 구조가 간단하다.

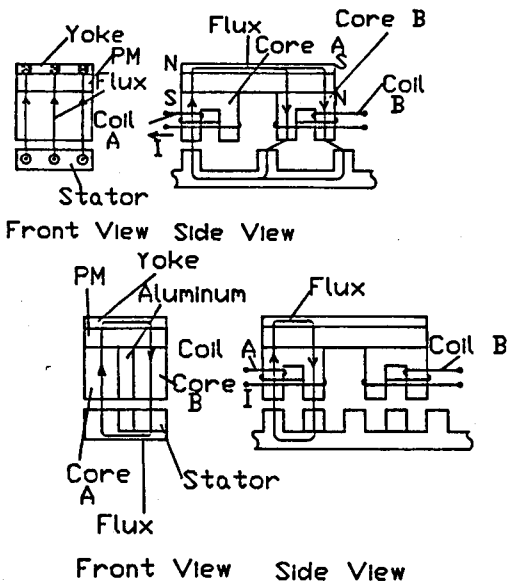
TFM은

- (1) 자기간섭이 적다
- (2) 적층철심의 사용이 어렵다.

는 특징을 가지고 있다.



(a) LFM과 TFM의 구조



(b) 1상어자시 자기회로

그림-2. LFM과 TFM의 구조와 1상어자시 자기회로

3. 자기회로해석

3.1 해석방법의 이론적 고찰

LPM의 형태 가운데 가변리터런스(VR)형은 영구자석이 없으며 여자코일에 흐르는 전류에 의한 기자력만으로 구동된다.

VR형 LPM에 관한 자기회로 특성 해석은 다수의 연구자들에 의해 발표되고 있으나^{7,8,9)} 소모 총자속의 1/2 정도를 차지하는 영구자석을 가진 PM형은 자기회로가 복잡하기 때문에 정확한 해석이 이루어지지 않고 있다. 또한 PM형은 권선과 자심의 이용률이 높다는 특징을 가지고 있어 그 특성을 충분히 이용하고 실제작을 위해서는 정밀도가 높은 자기회로의 해석이 필요하다. 일반적으로 LPM은 자기회로의 에너지 본포의 작은 오차가 추력의 계산 결과에서는 대단히 큰 오차로 나타나게 된다. 따라서 가동자의 변위에 따른 공극을 포함한 전체 자기회로의 변화를 정확히 계산할 필요가 있으며 PM형 LPM에서는 영구자석과 권선에 의해 여자되는 모든 극이 만드는 추력을 계산해야 한다. LPM의 구동력은 가동자의 치

위치의 고정자에 대한 상대적인 변위에 따라 공극에서의 퍼미언스 값 변화로 얻어지므로 자기회로의 해석에 필요한 자속밀도의 정확한 본포를 얻어 내기 위해서는 공극의 퍼미언스를 정확히 구하는 것이 요구된다. 퍼미언스를 구하는 방법으로는 퍼미언스 모델을 가지고 공극에서의 퍼미언스 값을 구하는 방법과 일정 해석영역에서 자기스칼라 포텐셜을 이용한 수치해석법(유한요소법, 차분법등)으로 공극의 퍼미언스를 구하는 방법이 있으며 속도기전력식을 이용하여 자속밀도를 구하는 방법도 있다. 이와 같은 방법으로 자계 값이 구해지면 이를 이용한 추력이나 수직력을 구하는 방법에는 다음과 같은 것이 있다.^{10,11,12)}

- (1)BLI method (2)Magnetic co-energy method
- (3)Maxwell stress tensor method

이들 서로 다른 기법은 각각 장단점이 있기 때문에 그 가운데 어느 하나의 기법을 이용하여 해석대상이 되는 모든 기기를 해석하는 것은 바람직하지 않다. 간단히 위의 기법들을 살펴보면

(1)Lorentz force 법

$$F = I \times B \quad (1)$$

자계 중에 전류가 흐르는 도체가 있으면 그 도체에 힘이 작용한다고 하는 Lorentz법칙에 의해 힘을 구하는 방법으로 2차원 자장의 문제에서 전류는 z 방향 성분만 존재하고 따라서 자계는 x,y 방향 성분만 존재하는 것으로 한다. 따라서 (1) 식은

$$F = - I_2 B_y i + I_2 B_x j \quad (2)$$

가 된다. 이 방법은 가동자 표면에 전기자 권선이 감겨 있는 smooth, slotless인 기기의 해석에 유용하다.

(2)Magnetic Co-energy 법

$$F = dWc/dx \quad (\text{단, } Wc = \int_0^1 \lambda dI \text{ ; magnetic co-energy}) \quad (3)$$

에너지 보존법칙에 기초한 힘 계산 방법으로서 LPM의 입력전기에너지는 저장된 전기자기 에너지와 열로 소비된 에너지를 합한 것과 같다. 열로 소비된 저항, 마찰, 뎀핑 손실과 히스테리시스, 와류손을 고려치 않으면 쇄고자속(λ)와 변위(x)의 함수인 저장에너지(Wc)와 전류(I)와 변위(x)의 함수인 자기수반에너지(Wc)만 남게된다. 따라서 자기에너지의 선형변화 구간에서의 설계를 가정하면 가동자의 이동에 필요한 기계적인 일은 자기수반에너지의 변위에 따른 변화 또는 저장에너지의 변위에 따른 변화분의 (-)와 같다.

$$\text{즉, } F = (+) dWc/dx, F = (-) dWe/dx \quad (4)$$

위에서 언급한 것처럼 저장에너지는 쇄고자속과 변위의 함수 [$Wc(\lambda, x)$] 이고, 자기수반에너지는 전류와 변위의 함수 [$Wc(I, x)$]이다. 그러므로 변위에 따른 힘을 계산하기 위해서 저장에너지를 이용 할 경우에는 가동자의 위치에 따라 자기회로의 퍼미언스 값이 달라지기 때문에 쇄고자속이 변하므로 퍼미언스 변화분을 보상하기 위한 여자전류를 변화시키기 가 매우 어렵지만 자기수반에너지를 이용한다면 전류를 일정

하게 하기는 쉬우므로 자기수반에너지를 이용한 해석방법이 주로 사용된다.

(3) Maxwell stress tensor 법

공극을 사이에 두고 고정자와 가동자 사이에 발생하는 힘은 반드시 자계에 의해서만 전달되며 따라서 자계만을 고려함으로써 힘을 결정할 수 있다.

$$F = J \times B \quad (5)$$

$$\nabla \times H = J, \quad B = \mu H \quad (6)$$

(5)식에 (6)식을 대입하면 선형 조건 하에서

$$F = \mu \nabla \times H \times H \quad (7)$$

벡터공식을 적용하면

$$F = \mu(H \cdot \nabla)H - \frac{1}{2} \mu \nabla(H \cdot H) \quad (8)$$

x, y, z좌표를 X_1, X_2, X_3 로 표시하고 미분기호로 표현하면

$$\frac{\partial H_n}{\partial X_n} = \frac{\partial H_1}{\partial X_1} + \frac{\partial H_2}{\partial X_2} + \frac{\partial H_3}{\partial X_3} = \nabla \cdot H \quad (9)$$

$$H \cdot \nabla = H_n \frac{\partial}{\partial X_n} = H_1 \frac{\partial}{\partial X_1} + H_2 \frac{\partial}{\partial X_2} + H_3 \frac{\partial}{\partial X_3} \quad (10)$$

Kronecker delta (δ_{mn})의 성질을 이용하여 (8)식의 n^{th} 성분을 정리하면

$$F_m = \mu H_n \frac{\partial H_m}{\partial X_n} - \frac{1}{2} \mu \frac{\partial}{\partial X_m} (H_k H_k) \quad (11)$$

$$F_m = \frac{\partial}{\partial X_n} (\mu H_n H_m - \frac{1}{2} \mu \delta_{mn} H_k H_k) - H_m \frac{\partial \mu H_n}{\partial X_n} \quad (12)$$

(12)식의 오른쪽 끝항은 $H_m (\nabla \cdot \mu H) = H_m (\nabla \cdot B) = 0$ 이 된다.

Maxwell stress tensor T_{mn} 을

$$T_{mn} = \mu H_n H_m - \frac{1}{2} \mu \delta_{mn} H_k H_k \quad (13)$$

로 표시하면

$$F_m = \frac{\partial T_{mn}}{\partial X_n} \quad (14)$$

으로 나타낼 수 있다.

공간에서의 자계를 알면 T_{mn} 의 성분을 계산할 수 있으며 대칭성을 고려하면 $T_{mn} = T_{nm}$ 이기 때문에 6.요소에 대해서만 계산하면 되며 동일 매질 내 (예를 들면 가동자, 공극, 고정자)에서의 각 방향 힘 f_m 은 F_m 의 체적적분이되어

$$f_m = \int_V F_m dV = \int_V \frac{\partial T_{mn}}{\partial X_n} dV = \int_V (\nabla \cdot T_{mn}) dV \quad (15)$$

전류값을 계산하지 않고 자계만으로 힘을 산출하는 stress tensor의 도입으로 임의 체적당 작용하는 힘을 체적적분으로 구할 수 있으며 적분 한도를 줄이기 위해 divergence theorem을 적용하면 (15)식은

$$f_m = \int_V (\nabla \cdot T_{mn}) dV = \int_S T_{mn} n dS \quad (16)$$

로 된다.

3.2 해석 예

예.1 공극퍼미언스모델과 자기수반에너지법에 의한 해석.¹³⁾

자기회로 해석의 대상이 되는 LPM은 1극당 2치의 구조로서 가동자의 변위에 따른 공극의 퍼미언스를 계산한다. 그림-3은 통상의 퍼미언스 계산방법과 마찬가지로 직선과 원호만으로 자속 튜브를 구성하고 있다.

a: 치폭, b: 홈폭, d: 홈 높이, C: 치의 길이(LPM의 폭), x: 가동자의 변위, δ : 공극길이, p: 공극퍼미언스이다.

(1) $0 \leq x \leq a/4$ (그림-3(a))

$$p = 2(p_1 + 2p_2 + 2p_3) = 2\mu_0 C \left[\frac{a-x}{\delta} + \frac{4}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi x}{2\delta}\right) + \frac{2}{\pi} \ln\left(\frac{\pi y/\delta}{1 + \pi x/2\delta} + 1\right) \right] \dots \dots \dots (17)$$

여기서 y : fringing flux의 고려범위로 $x=0$ 에서 $y=\delta$, $x=a/4$

에서 $y=x$ 가 되는 것으로 근사시킨다.

(2) $a/4 \leq x \leq a/2$ (그림-3(b))

$$p = 2\mu_0 C \left[\frac{a-x}{\delta} + \frac{4}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi x}{2\delta}\right) + \frac{2}{\pi} \ln\left(\frac{1 + \pi(b-x)/2\delta}{1 + \pi x/2\delta}\right) + \frac{2x/\delta - b/2\delta}{1 + \pi(b-x)/2\delta} \right] \dots \dots \dots (18)$$

(3) $a/2 \leq x \leq a$ (그림-3(c))

$$p = 2\mu_0 C \left[\frac{a-x}{\delta} + \frac{3}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi b}{4\delta}\right) + \frac{3}{\pi} \ln\left(\frac{1 + \pi b/4\delta}{1 + \pi(b-x)/2\delta}\right) + \frac{1}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi x}{2\delta}\right) + \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{1 + \pi x/2\delta}{1 + \pi(b-x)/2\delta}\right) + \frac{(b-x)/\delta}{1 + \pi(b-x)/2\delta} \right] \dots \dots \dots (19)$$

식(17)(18)(19)를 이용하여 자기저항 R(x)를 다음과 같이 후리에 급수로 전개한다.

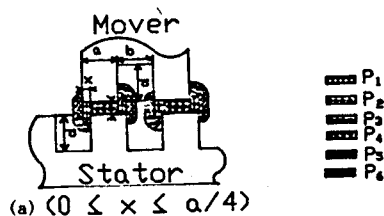
$$R(x) = \bar{R} + \sum_{n=1}^{\infty} R_n \cos \frac{2n}{\tau} \pi x = \frac{1}{p} \dots \dots (20)$$

여기서 R : R(x)의평균값, $\tau = a+b$: 치피치, R_n : 후리에계수 극 1, 2, 3, 4의 자기저항을 각각 R_1, R_2, R_3, R_4 라 하면 가동자와 고정자의 어긋난 배치를 고려하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. $R_1=R(x)$, $R_2=R(x-\tau/2)$, $R_3=R(x-\tau/4)$, $R_4=R(x-3\tau/4)$

영구자석과 전자석에 의한 수반에너지 W_0 는 다음과 같으며,

$$W_0 = \int_0^l \lambda dI \text{ ; magnetic co-energy} \dots \dots (21)$$

따라서 $F = dW_0/dx$



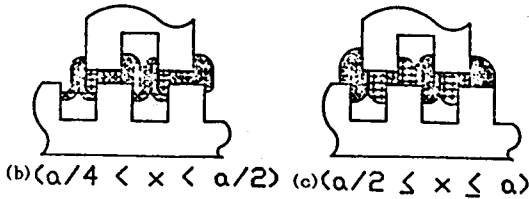


그림-3.가동자의 위치별 퍼미언스 모델

예.2 속도기전력과 BIL법에 의한 해석.14)

1극당 3치를 갖는 구조의 LPM을 해석대상으로 권선에 전류를 흘리지 않은 상태에서 가동자를 속도 V로 등속운 동시킬 경우 a극에는 $-(N/2) \times d\phi_{ap}/dt$ 의 전압이 나타난다. a극과 b극의 속도기전력은 각각

$$E_a(x) = e_a(-\sin \frac{2\pi x}{\tau} - k_3 \sin \frac{6\pi x}{\tau} + k_5 \sin \frac{10\pi x}{\tau} - \dots) \quad (22)$$

$$E_b(x) = e_a(\sin \frac{2\pi x}{\tau} + k_3 \sin \frac{6\pi x}{\tau} - k_5 \sin \frac{10\pi x}{\tau} + \dots) \quad (23)$$

A상 권선에 의한 속도기전력 E는 $E_a(x)$ 와 $E_b(x)$ 의 차이이므로

$$E(x) = -2e_a(\sin \frac{2\pi x}{\tau} + k_3 \sin \frac{6\pi x}{\tau} - \dots) \quad (24)$$

$E_a(x)$ 와 $B_a(x)$ 의 기본파 성분에 관하여 식을 세우고 x에 있어서의 $B_a(x)$ 를 구하고 이로부터 유효자속 ϕ_m 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi_m = e/(2\pi fN) \quad [Wb] \quad (25)$$

추력의 계산은 다음과 같이 IBL법칙으로 구한다.

$$F_l(x) = (N/2) aN l [B_a(x+a) - B_a(x-a) + B_b(x-a) - B_b(x+a)] \quad (26)$$

또한 식(26)을 속도기전력 E(x)를 이용하여 표시하면

$$F_l(x) = IE(x)/V = IE(x)/(f(x\tau)) \dots \dots \quad (27)$$

예.3 FEM을 이용한 퍼미언스 계산과 자기수반에너지법에 의한 해석.15)

예.4 퍼미언스 함수를 이용한 수직력해석.16)

3.3 양속식 PM type 2상 8극형 LPM의 자기회로 제안

LPM의 원리는 회전형 스텝모터와 같지만 그 기계적 인 구조 때문에 발생하는 수직력(normal force)이 가동자의 변위속도에 따라 가동자와 고정자 사이에 크기가 서로 다른 흡인력과 반발력으로 작용한다.

PM형과 VR형을 비교하면 PM형의 추력특성이 우수하며, 편속식과 양속식을 비교하면 편속식이 가동자의 이동 자유도가 크고 구조면에서 간단하지만 가동자의 변위에 따라 수직력(흡인력, 반발력)이 작용하게 된다. 일반적으로 이 수직력은 발생 추력의 약 10배에 달하는 것으로 알려져 있다. 이러한 현상은 LPM의 진동과 추력의 불균형을 유발하며, 또한 물려 등 가동자 지지기구에 큰 부하로 작용하여 마찰력을 증가시키게 된다. 이와 같은 이유로 기계구조, 설치상의 문제 그리고 발생 추력의 이용상의 문제만 제안 받지 않는다면 편속식보다 고정자를 1대본 생략할 수 있으며 추력/질량의 비가 크

고 수직력에 의한 영향을 적게 받는 그림-4와 같은 양속식, PM형, 2상 8극형, TFM형 LPM을 제안한다. 앞으로 시작기의 설계 제작시 위에서 언급한 자기회로 해석 방법 가운데 가장 적합하다고 판단되는 FEM에 의한 수치해석법으로 자기회로의 특성을 해석하고 설계에 필요한 자료를 얻고자 한다.

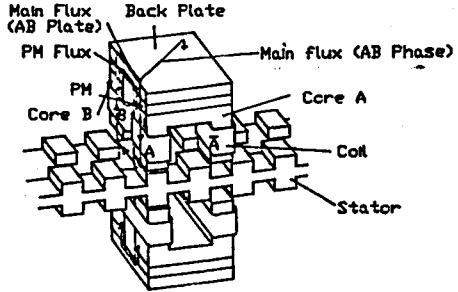


그림-4. 제안된 양속식 2상 8극형 LPM의 구조

4. 결 론

LPM의 연구 필요성과 기본적인 이론 및 종류를 열거하고 일반적인 전기기기 해석법 가운데 LPM의 자기회로 해석에 관한 해석기법을 논하였다. 또한 VR형, 편속식, 원통형, LPM형 보다 지지기구, 추력의 안정도, 효율면에서 유리하다고 판단되는 양속식, PM형, 2상 8극형, TFM형 LPM을 제안하고 설계에 앞서 필요한 자기회로 해석에 필요한 여러가지 해석 기법에 관하여 살펴보았다. 특정 모델 LPM에 위에서 열거한 각종 해석방법을 적용하여 그 해석 정밀도를 비교해 보는 연구와 실용화에 가장 적합한 형태의 LPM을 제안하기 위한 다양한 모델의 LPM에 대한 특성해석 및 지지기구, 치형상에 따른 영향, 제어기법 등에 대한 연구가 앞으로 계속되어야 할 과제로 남아 있다.

참고문헌

1. 山田 外, "リニアモータ應用ハンドブック", 工業調査會, 1984
2. S. A. Nasar, "Linear Electric Motors; Past, Present and Future(Keynote Talk)", Proc. of Incremental Motion Control Systems and Devices(IMCSD), pp.K1-K6, 1987
3. J. I. Nordquist, E.R. Pelta, "Constant Velocity Systems using Sawyer Linear Motors", IMCSD, pp.215-231, 1986
4. 小型モータ設計 マニュアル, (株)トリケップス, pp.496-519 1986
5. 李殷雄, 金一中, "直線形 펄스 電動機 (LPM)", 電氣學會誌, Vol.39, No.9, pp.39-45, 1990
6. 山田外, "磁束縱方向形および磁束橫方向形リニアブルモータ의特性比較", MAG-85-129, pp.87-96, 1985
7. J. W. Finch et al, "Normal Force in Linear Stepping Motor", IEE Conf. Publ., No.202, pp.78-81, 1981
8. 酒井, "リニアステップモータ의磁氣回路設計", 電子通信學會論文誌, Vol.J64-C, No.10, pp.682-689, 1981
9. O. Pozimek, "Linear Stepping Motor with the Increased Precision of Positioning", MAG-84-102, 1984
10. T. J. Harned, S. R. Prina, "Finite Element Analysis of Electro-mechanical Devices", IMCSD, pp.275-296, 1987
11. D. R. Brown, E. P. Hamilton III, "Electromechanical Energy Conversion", Macmillan Publishing Co., pp.57-95, 1984
12. H. H. Woodson, J. R. Melcher, "Electromechanical Dynamics Part II", John Wiley & Son, pp.418-466, 1968
13. 山本外, "平板狀永久磁石形 리ニアブルモータ의磁氣回路と始動特性解析", 電氣學會論文誌, Vol.104-B, No.5, pp.265-272, 1984
14. 馬場外, "LPM의速度起電力定數に關する一考察", 電氣學會論文集, Vol.107-D, No.5, pp.642-649, 1987
15. 海老原外, "二相8極形リニアブルモータ의特性解析", 電氣學會論文集, Vol.108-D, No.1, pp.77-82, 1988
16. J. A. Wagner, W. J. Cornwell, "A Study of Normal Force in a Toothed Linear Reluctance Motor", Electric Machines and Electromechanics, 7, pp.143-153, 1982