

양측 여자형 LDM의 다권선화에 관한 연구

이승명* 백수현 김 용 윤신용 맹인재
동국대학교

A study with multi-winding of double excited type LDM

S.M.Lee*, S.H. Baek, Y. Kim, S.Y.Yoon, I.J. Maeng
Dongguk University

Abstract - In this paper, by designing the width of the stator coil, double sided excitation LDM with multi-separated winding which is possible to obtain the constant thrust force is proposed.

Using Permeance method, equivalent magnetic circuit method, Maxwell 2D, which is the magnetic field analysis package, we were analyzed and proved the validity of design process, also the characteristics of LDM according to magnet vs. coil width ratio of LDM was almost in accord with the experiment results.

1. 서 론

최근에는 선형 운동이 요구되는 시스템의 발달과 함께 변환 장치에 의한 에너지 손실이나 비효율성을 제거할 수 있는 선형 기기를 이용하여 직접 직선 추력을 얻으려는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 응용 분야도 확대되고 있다. 특히 가동 자석형 Linear DC Motor(LDM)은 가동부를 영구 자석으로 대체함으로써 전력 공급을 위한 전기적 연결과 동손에 의한 발열이 없으며, 가동부의 자석을 강자성체로 사용할 경우 공극이 큰 구조에서도 높은 자속밀도를 얻을 수 있으므로 슬롯리스 전자기로 사용할 수 있다 [1][2].

그러나 고정자 권선을 단일 권선으로 성층할 경우에는 고정자 철심의 중앙에서 자기 포화로 인해 정추력 발생이 어렵다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 양측 여자형 가동자석형 LDM을 대상으로 이러한 단점의 보완 및 추력 리플을 저감시키기 위해 고정자 권선을 동일 간격으로 독립되게 분할하는 다권선화법에 대해 제안하고자 한다. 이를 위해 영구자석 대 고정자 권선의 폭 비에 대해 퍼미언스법을 이용하여 공극에서의 자속 밀도를 구하고 이를 등가 자기회로방법을 사용하여 모터 전체에 대해 적용, 적당한 폭 비를 산정한다. 이를 상용 자계 해석 프로그램을 사용하여 각 조건에 대한 힘의 분력을 평가함으로써 자석 대 권선 폭 비의 타당성을 검증하고자 한다 [3][4][5].

2. 본 론

2.1 양측 여자형 LDM의 추력식

LDM의 추력은 영구 자석에 의한 LDM 추력은 영구 자석에 의한 자속밀도 \vec{B}_g 내에 위치한 길이 l_c , 턴수 N 인 고정자 권선에 전류 i 를 흘리면 자석에서 발생하는 자속과 고정자 권선에서 발생하는 자속과의 상호작용으로 전자기력이 발생하며 이 전자기의 크기를 로렌츠의 법칙을 이용하여 구하면 식(2.1)과 같다[6].

$$\vec{F} = \int_0^{l_c} \vec{B}_g \times \vec{i} \left[\frac{N\omega_m}{l_t} \right] d\vec{l}_c \quad (2.1)$$

여기서

- \vec{F} : 전자기력 벡터
- N : 고정자 전체 턴수
- ω_m : 자석 폭
- l_t : 코일 길이
- \vec{l}_c : 유효도체 길이
- \vec{i} : 여자 전류
- \vec{B}_g : 공극에서의 자속밀도 벡터

이로부터 $3\vec{l}_c$ 는 LDM의 1/2구조를 고려할 때 가동자 자석 3개가 고정자 여자 코일과의 상호작용으로 추력을 발생시키게 되는 유효도체 길이이다. 식(2.1)은 \vec{B}_g 와 \vec{i} 의 수직으로 만나므로 식(2.2)로 나타낼 수 있다.

$$F = 3 \left[\frac{N\omega_m}{l_t} \right] B_g i l_c \quad (2.2)$$

식 (2.2)에서 추력을 추력을 얻기 위해서는 공극에서의 자계 계산이 필요함을 알 수 있다.

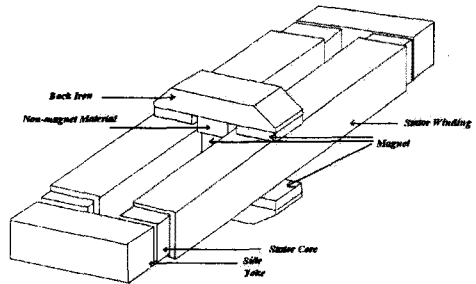


그림 2.1 양측 여자 LDM의 기본형

2.2 정추력을 위한 전기자 권선 폭 비 산정

가동자석형 LDM을 단일권선으로 성층할 경우에는 고정자 철심의 중앙에서 자기포화의 발생으로 인해 정추력의 발생이 어려운 단점을 지니고 있다. 따라서, 이를 개선하기 위한 방법의 하나로 설계 측면에서 고정자 권선을 다권선화하는 방법을 본 논문에서는 제시하고 자석 대 권선 폭 비를 선정함으로써 정추력 및 추력 리플을 저감시키고자 한다. 그 과정으로 먼저 퍼미언스법을 사용하여 자석 한 개의 P값을 산출하여 공극 자속 밀도를 산정하고 다음으로 자기회로방법을 이용하여 이동 변위에 따른 퍼미언스 값을 계산한다

2.2.1 퍼미언스 법에 의한 자기회로 해석

가동자의 변위에 따른 공극 퍼미언스 계산을 위해 자석 대 권선비가 1:0.5, 1:0.8, 1:1인 경우에 대하여 직선과 원호로 구성된 가상 자로를 구성하고 퍼미언스법을

수행하였다. 본 논문에서 다루고 있는 LDM는 Slotless 형태이기 때문에 같은 형태의 가상 자료가 모터의 동작 영역에서 반복적으로 수행된다. 자료의 구성에 따라 전체 해석 길이 l 을 n 개의 변위로 가정하였고 다시 이 영역을 분할하여 각각의 영역을 계산후 전체 퍼미언스 P 를 계산하였다.

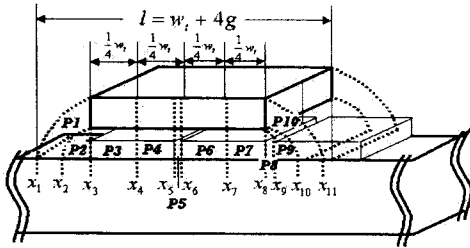
일반적으로 자기 저항의 역수인 퍼미언스는 다음과 같이 표현된다.

$$dP = \mu_0 \mu_r \frac{l_g dx}{l_g} \quad (2.3)$$

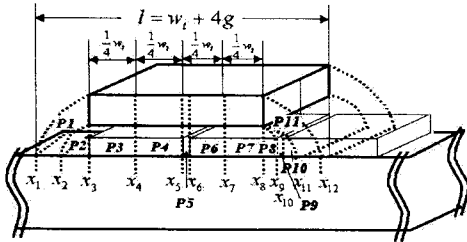
$$P = \mu_0 \int \frac{dA}{l} [H/m] \quad (2.4)$$

여기서, μ_0 : 진공의 투자율, dA : 공극의 미소단면적
 l_g : 공극의 길이

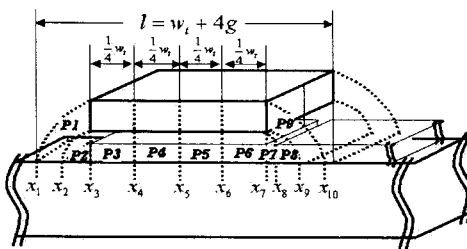
따라서 가동자의 변위 x 를 그림 과 같이 분할하여 식 (2.4)를 이용하여 각 공극자료의 퍼미언스를 다음과 같이 독립적으로 구할 수 있다.



(a) 폭 비 1 : 0.5



(b) 폭 비 1 : 0.8



(c) 폭 비 1 : 1

그림 2.2 영구자석 대 권선 폭의 비에 대한 자료

1) 1 : 0.5인 경우

$$P_1 = \mu_0 \frac{3\pi g^2}{4} \quad (2.5)$$

$$P_2 = \mu_0 \frac{\pi g^2}{4} \quad (2.6)$$

$$P_3 = \mu_0 \frac{w_c w_t}{4g} \quad (2.7)$$

$$P_4 = \mu_0 \frac{w_c}{g} \left(\frac{1}{4} w_t + \Delta x_1 \right) \quad (2.8)$$

$$P_5 = \mu_0 \frac{2w_c \Delta x_1}{g} \quad (2.9)$$

$$P_8 = \mu_0 \left(\frac{0.052\pi}{0.31g} + \frac{w_c \Delta x_2}{0.69g} \right) \quad (2.10)$$

$$P_9 = \mu_0 \left(\frac{\pi g^2}{4} - \frac{0.052\pi}{0.31g} + \frac{w_c \Delta x_2}{0.69g} \right) \quad (2.11)$$

1 : 0.5인 경우의 전체 퍼미언스값은 다음과 같다.

$$P_{total} = 2P_1 + P_2 + 2P_3 + 2P_4 + P_5 + P_8 + P_9$$

2) 1 : 0.8인 경우

$$P_1 = \mu_0 \frac{3\pi g^2}{4} \quad (2.12)$$

$$P_2 = \mu_0 \frac{\pi g^2}{4} \quad (2.13)$$

$$P_3 = \mu_0 \frac{w_c w_t}{4g} \quad (2.14)$$

$$P_4 = \mu_0 \frac{w_c}{g} \left(\frac{1}{4} w_t + \Delta x_1 \right) \quad (2.15)$$

$$P_5 = \mu_0 \frac{w_c}{g} \left(\Delta x_2 - \Delta x_1 \right) \quad (2.16)$$

$$P_6 = \mu_0 \frac{w_c}{g} \left(\frac{1}{4} w_t - \Delta x_2 \right) \quad (2.17)$$

$$P_8 = \mu_0 \Delta x_3 \left(\frac{1.012\pi}{0.31g} + \frac{w_c}{0.69g} \right) \quad (2.18)$$

$$P_9 = \mu_0 \left(\frac{0.052\pi}{0.31g} + \frac{w_c}{0.69g} \right) \left(\Delta x_4 - \Delta x_3 \right) \quad (2.19)$$

$$P_{10} = \mu_0 \left(\pi g^2 - \frac{1.064\pi}{0.31g} - \frac{w_c \Delta x_4}{0.69g} \right) \quad (2.20)$$

1 : 0.8인 경우의 전체 퍼미언스값은 다음과 같다.

$$P_{total} = P_1 + P_2 + 2P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_8 + P_9 + P_{10}$$

3) 1 : 1인 경우

$$P_1 = \mu_0 \times \frac{3\pi g^2}{4} \quad (2.21)$$

$$P_2 = \mu_0 \times \frac{\pi g^2}{4} \quad (2.22)$$

$$P_3 = \mu_0 \times \frac{w_c w_t}{4g} \quad (2.23)$$

$$P_7 = \mu_0 \left(\frac{0.052\pi}{0.31g} + \frac{w_c \Delta x_1}{0.69g} \right) \quad (2.24)$$

$$P_8 = \mu_0 \left(\frac{\pi g^2}{4} - \frac{0.052\pi}{0.31g} - \frac{w_c \Delta x_2}{0.69g} \right) \quad (2.25)$$

1 : 1인 경우의 전체 퍼미언스값은 다음과 같다.

$$P_{total} = 2P_1 + P_2 + 4P_3 + P_7 + P_8$$

2.2.2 자기 회로방법에 의한 자기회로 해석

그림 2.1의 모터의 단면으로부터 그림 2.3과 같은 자기 회로를 산정한다. 그림 2.3과 같은 자기 회로에 대하여 에너지 보존의 법칙에 의한 암페어 회로법칙은 식 (2.26)과 같이 정의된다.

$$\oint H dS = 0 \quad (2.26)$$

회로 내 요크의 기자력 손실을 무시하면 식(2.27)이 성립한다.

$$H_m \cdot t_m - H_g \cdot t_g = 0 \quad (2.27)$$

여기서 H_m : 동작점 자계의 세기, t_m : 자석 두께
 H_g : 공극에서 자계의 세기, t_g : 공극 두께

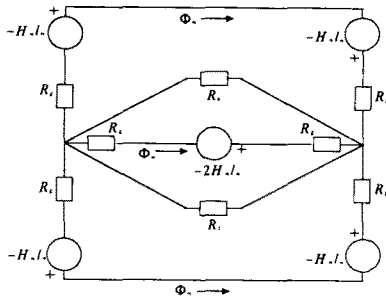


그림 2.3 양측 여자형 LDM의 자기 등가회로

감자곡선 상에서 동작점 P(B_m , H_m)와 공극에서의 자속 밀도와와의 관계는 다음 근사 식(2.28)이 성립한다.

$$B_m = B_g - \mu_m \cdot \mu_0 \cdot H_m \quad (2.28)$$

여기서 μ_m : 영구자석의 비투자율

μ_0 : 공기의 투자율

자기등가회로의 1/2에 대해 암페어의 법칙을 적용하면, 기자력은 식(2.29)와 같다.

$$3H_m l_m + 3H_g l_g + \frac{1}{2} R_{ab} B_m A_m = 0 \quad (2.29)$$

여기서, $R_{ab} = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b}$ 이다.

R_a , R_b : 가동자철심의 자기저항

$\frac{1}{2} R_{ab} B_m A_m$ 는 철심의 기자력을 나타내며, 공극에서의 기자력 H_g 에 대해 정리하면 식(2.30)과 같다.

$$H_g = - \frac{(3H_m l_m + \frac{1}{2} R_{ab} B_m A_m)}{3l_g} \quad (2.30)$$

$$B_m A_m = B_g A_g \quad (2.31)$$

$$B_g = \mu_0 H_g \quad (2.32)$$

식(2.30), (2.31), (2.32)로부터 퍼미언스 계수로 나타낸 식(2.33)을 얻을 수 있다.

$$\frac{B_m}{H_m} = -\mu_0 f_m \left(\frac{A_g}{A_m} \right) \frac{l_m}{l_g + \frac{3}{2} \mu_0 A_g \left(\frac{R_a R_b}{R_a + R_b} \right)} \quad (2.33)$$

여기서, H_m : 자석의 자계 세기

H_g : 공극의 자계 세기, f_m : 누설자속 계수

식(2.33)으로부터 전기자 철심의 자기저항은 공극에서의 자기저항임을 알 수 있다. 자기저항은 다음과 같이 주어진다.

$$R_{ab} = \frac{\left(\frac{k+2x}{\mu_l c w_c} + \frac{2l_0}{\mu_0 S_0} \right) \left(\frac{k+2l_l-2x}{\mu_l c w_c} + \frac{2l_0}{\mu_0 S_0} \right)}{\left(\frac{k+2x}{\mu_l c w_c} + \frac{2l_0}{\mu_0 S_0} \right) + \left(\frac{k+2l_l-2x}{\mu_l c w_c} + \frac{2l_0}{\mu_0 S_0} \right)} \quad (2.34)$$

식 (2.33)으로부터 B_g 와 비례 관계인 P값의 추이를 구하고 P값에 반비례하는 저항 성분을 수치적으로 계산함으로써 정추력 및 추력 리플을 최소화할 수 있는 자석 대 권선 폭 비를 구하여 이를 상용 자계 프로그램을 통해 검증한다.

3 시뮬레이션 및 실험 결과

3.1 수치 계산 및 시뮬레이션

수치 계산인 등가 자기 회로방법에 의해서 각 비에 대해 변위 10(mm)에서 가동자의 이동에 따른 유효 도체 길이를 계산하고 공극 자속 밀도 B_g 에 비례하는 저항 성분 및 퍼미언스 계수의 값을 구하였다.

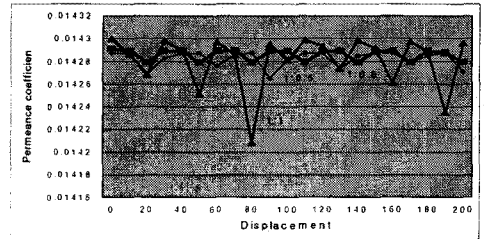


그림 3.1 변위에 따른 각 비의 저항값

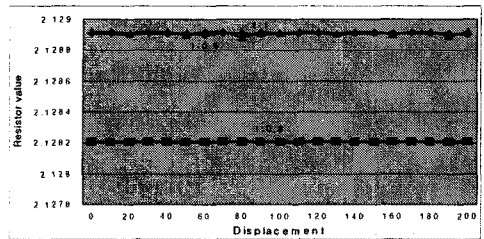


그림 3.2 변위에 따른 각 비의 퍼미언스 계수

그림 3.1은 변위에 따른 저항값의 추이로 1 : 0.8일 때 가장 안정된 값의 변화를 보이고 있다. 실제의 수치 계산에 있어 저항값의 변화가 가장 큰 부분을 차지하며 이 값으로부터 구해진 변위에 대한 퍼미언스 계수값 역시 1 : 0.8에서 일정한 값을 가진다(그림 3.2). 따라서 자석 대 권선비의 값은 1 : 0.8일 때 가장 이상적인 상태를 나타내고 있다.

그림 3.3에서 3.5는 상용 자계 해석 프로그램을 사용한 각 비에 대한 유한요소법의 해석결과로부터 힘의 분력을 분석한 결과이다. 유한 요소해석에 있어서도 비 1 : 0.8일 때 수직력과 수평력에서 가장 양호한 상태를 나타내고 있다. 특히 LDM에 있어서는 수직력이 가능한 작으며 전 영역에서 일정한 추력값을 가져야 한다. 유한요소법에 의한 해석은 전류 1.5[A]에서 수행되어졌다.

본 논문에서는 추력이 크게 발생하면서 추력의 리플을 억제할 수 있는 양측 여자 LDM의 영구자석 폭 대 권선 폭의 비가 1 : 0.84인 형태를 제작하였다.

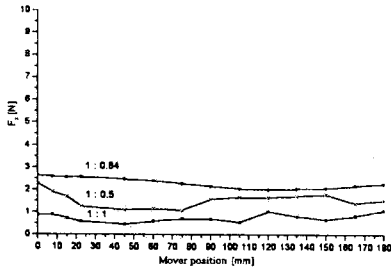


그림 3.3 자석 대 권선 폭 비에 따른 수평력 F_x

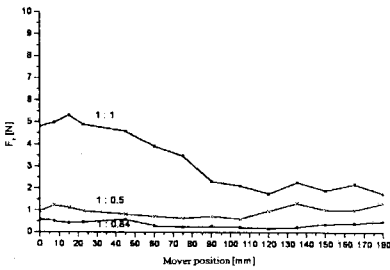


그림 3.4 자석 대 권선 폭 비에 따른 수직력 F_y

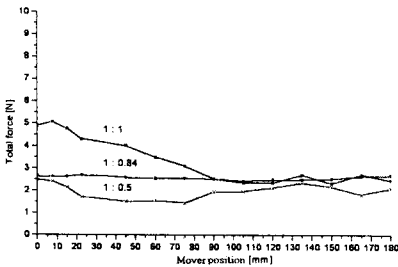


그림 3.5 자석 대 권선 폭 비에 따른 합성력 F

3.2 추력의 실험치 및 시뮬레이션(1 : 0.8)

그림 3.6은 전류에 따른 추력 분포의 실험치(전류1[A], 변위[15mm]당)이다. 실험치로부터 가장 정추력에 가까운 전류의 값은 4[A]일 때이다.

그림 3.7은 전류 4[A]에서 3D 자계 해석과 시작기의 추력의 비교값이다. 실험 결과, 오차는 존재하였으나 추력의 추이가 일정한 패턴을 가짐을 확인 할 수 있었다.

그림 3.8은 시작기의 공극 자속밀도의 측정값을 나타내고 있다.

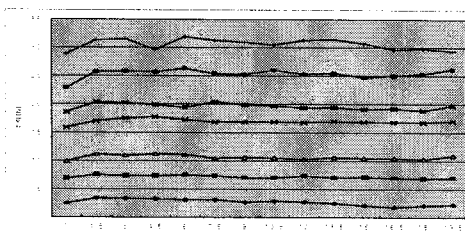


그림 3.6 전류에 따른 추력 분포

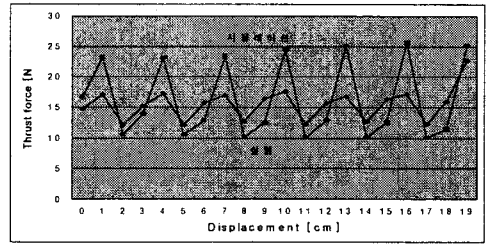


그림 3.7 변위에 따른 추력 특성(전류 4[A])

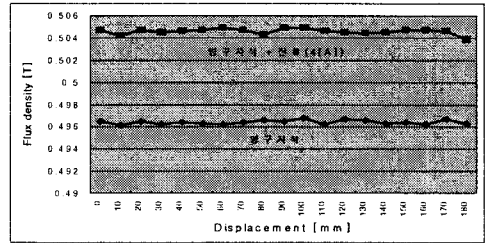


그림 3.8 시작기의 공극 자속밀도의 측정결과

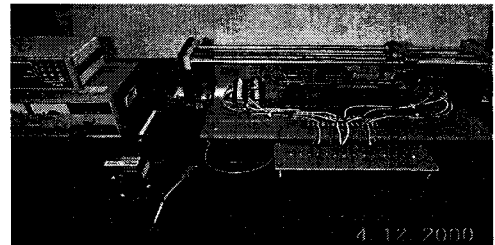


사진 3.1 LDM 측정 시스템

4. 결 론

본 논문에서는 단권선 LDM에 있어 큰 단점인 고정자 철심의 중앙부에서의 자기포화로 인한 추력의 감소를 보완하고 정추력 및 추력 리플 저감을 이루기 위해 영구자석 대 권선 비를 통한 다권선화를 다루었다. 수치적 계산과 유한 요소법을 이용한 자계 시뮬레이션을 통해 알맞은 비인 1 : 0.8을 산정하고 시작기 제작을 통해 실험한 결과, 오차는 존재하였으나 추력의 추이가 일정한 패턴을 가짐을 확인 할 수 있었다.

앞으로 2차원 해석으로 수행된 자계 해석을 3차원으로 수행하여 각 비에 따른 추력 해석의 오차를 비교, 검토하는 것이 요구된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 통상자원부 "고속정밀 리니어 브러시리스 직류모터 개발", 4-7, 1996
- [2] 권집부, "Linear Motor Application", 세화출판사, 1988
- [3] A. Basak and A. F. Flores Filho, "Investigation of a novel double armature brushless dc linear motor", IEEE, p789-795, 1995
- [4] T. Mizuno, T. Anzai, A. Nakamura, "Static Thrust Characteristics of a Moving Magnet-Type Linear DC Motor", 일본용융자기학회지, Vol. 21, No 4.2, p837-840, 1997
- [5] H. Yajima and K. Minegishi, "Consideration on High-Response of a Linear DC Motor", IEEE,
- [6] A. Basak, "Permanent magnet DC Linear Motor", Oxford, 1996