

퍼미언스법에 의한 양측식 영구자석 가동형 LDM의 설계

배성식^{*)}, 백수현^{*}, 김 용^{*}, 윤신웅^{*}, 맹인재^{*}, 김일남^{**}
^{*}동국대학교 전기공학과 ^{**}대유공업전문대

The Design of Linear DC Motor with Double-Sided Moving Permanent Magnets by Permeance Method

S. S. Bae^{*}, S. H. Baek^{*}, Y. Kim^{*}, S. Y. Yoon^{*}, I. J. Maeng^{*}, I. N. Kim^{**}
^{*}Dongguk University, ^{**}Daeyu Tech College

Abstract - In the paper, we present the design procedure and analysis the fundamental characteristics for Linear DC Motor(LDM) using permeance method and finite element method (FEM). Designed LDM is made of two permanent magnets, three iron core and armature windings. For the design of the LDM, first of all it is necessary to calculate the air gap flux density and thrust force, after that to determine core size, the numbers of winding turns, winding width, etc. To demonstrate the method of caculation yields the right results, we used Maxwell program package for computing magnetic fields. Finally we find that the proposed design procedure in this paper is effective to design of LDM.

1. 서 론

리니어 모터는 일반 회전기와는 달리 직선운동을 하며 회전력이 아닌 추력을 발생시키는 점과 유한 직선운동을 하며 단부효과가 있고, 수직운전과 개-루프제어가 곤란하다는 점에 있어서 일반 회전기와 구분되고 있으나 기본적인 구동 원리는 같다고 볼 수 있다. 종래에는 직선력을 얻은 수단으로 회전기와 운동량 변환기구를 결합한 시스템이 주로 이용되어 왔으나 전동기와 운동량 변환기구를 결합한 장치의 구성이 복잡하다는 점과 비용이 고가라는 측면에서 단점을 지니고 있으며 마찰에 의한 손실과 오차 및 속응성이 뒤질 뿐 아니라 소음을 유발하는 문제점을 지니고 있다. 이와 같은 문제점들은 정밀 소형 제어기기의 경우 더욱 현저하게 되는 데 이의 개선에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다. 리니어 모터는 이와 같은 연구 결과중의 하나로 리니어 모터가 지니고 있는 여러 장점 즉, 별도의 운동량 변환기구가 불필요함으로 소형화, 경량화가 가능하며 소음이 없고 구조가 간단하다는 점에 의해 최근 HA, OA, FA와 같은 각종 분야에서 널리 실용화되는 추세에 있으며 더욱이 펄스-루프제어로 구성되는 속도 및 위치 검출장치를 결합함에 따라 위치 결정 정도가 좋으며, 고정밀성, 속도제어가 용이하다는 등의 잇점 때문에 각종 서보시스템에 있어서 리니어 모터의 응용은 더욱 증대될 것으로 예상된다.[1]-[5]

본 연구에서는 여러 형태의 리니어 모터중 장-스트로크의 측면에서 비교적 유리한 양측식 가동 자석형 LDM을 대상으로 특성에 영향을 미치는 여러 요인에 대해 분석하여 설계시 필요로 되는 자기회로의 구성과 특성해석에 필요로 되는 이론을 도출하고, 이 이론을 기초로 하여 LDM의 최적설계에 필요한 각각의 설계 변수를 구하고자 한다. 또한, 주어진 조건하에서 가동자인 영구자석을 코일로 대체할 경우, 발생하는 추력에 대해서도 고려하고자 한다.

2. 본 론

1) 가동자석형 LDM의 구조 및 동작원리

그림 1은 LDM의 기본구조를 나타낸 것이다. 고정자 중앙부분은 직사각형의 철막대에 코일을 성층하였으며 양쪽에는 보조막대를 형성하였다. 가동자부분은 영구자석을 양쪽에 설치함으로써 전자력에 의해서 양측식 추력을 발생하는 가동자석형 구조로 되어있다.

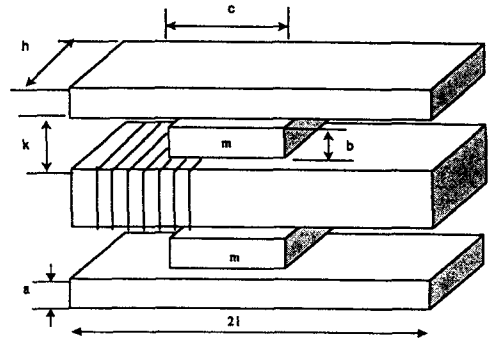


그림 1. 가동자석형 LDM의 구조 및 동작특성

2) 영구자석에 의한 추력계산

영구자석에 의한 힘을 계산하기 위해 필요한 에너지에 대한 토모크식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = I_s \frac{d\Phi_{sr}(\theta)}{d\theta} - \frac{dW_{mr}(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} I_s^2 \frac{dL_c(\theta)}{d\theta} \quad (1)$$

식 (1)로부터 영구자석에 의한 추력은 식 (2)와 같이 표현 할 수 있다.

$$F = I \frac{d\Phi_T}{dx} - \frac{dW_m}{dx} + \frac{1}{2} I^2 \frac{dL_c}{dx} \quad (2)$$

여기서, l : 코일의 전류

Φ_T : 코일과 영구자석 사이의 자속쇄교수

W_m : 영구자석으로 인한 자계 에너지

L_c : 코일의 인덕턴스

x : 영구자석의 이동 위치

식 (2)에서 W_m 은 자석의 위치에서 상관없이 일정하기 때문에 두 번째 항은 영이 되며, 매우 높은 비투자율을 지닌 재료에 의해 특성이 나타나는 세 번째 항도 영구자석의 비투자율을 1이라고 하면 역시 영이 되므로, 결국, 식 (3)과 같이 간단히 할 수 있다.

$$F = I \frac{d\Phi_T}{dx} \quad (3)$$

여기서, Φ_T 를 계산하기 위해서, 코일의 턴 수와 영구자석의 쇄교 자속수를 적분하면 식 (4), (5), (6)과 같이 된다.

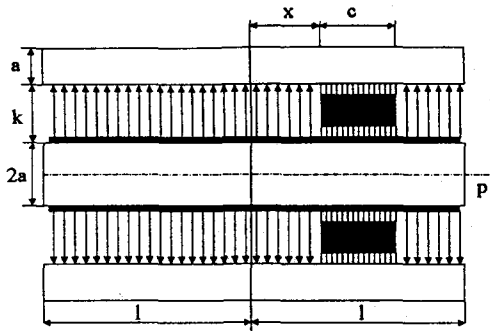


그림 2. 영구자석과 철심사이의 자계분포

$$\Phi_1 = \int_{-l}^x \{ \Phi_{EG} + 2(l+p)h \Phi_G \} \frac{ndp}{2l} \quad (4)$$

$$\Phi_2 = \int_x^{x+l_m} \{ \Phi_{EG} + 2(l+x)h \Phi_G - 2(p-x)h B_E \} \frac{ndp}{2l} \quad (5)$$

$$\Phi_3 = \int_{x+l_m}^l \{ \Phi_{EG} + 2(l+x)h \Phi_G - 2l_m h B_E + 2(p-x-l_m)h B_G \} \frac{ndp}{2l} \quad (6)$$

여기서, Φ_{EG} : 단부 분산자속

Φ_G : 귀환 자속

Φ_E : 실효 자속

p : 중앙에서의 길이 방향 좌표

h : 자석의 두께

계산된 자속 쇄교수 Φ_T 를 x 에 관해서 미분하면, 식(7)과 같이 얻을 수 있다.

$$F = I(B_E + B_G) \frac{l_m N}{l} h \quad (7)$$

LDM의 전체길이가 영구자석길이 보다 충분히 크다면, 귀환자속밀도는 실효자속밀도에 비해서 무시할 수 있을 정도 이므로 식 (7)은 식 (8)과 같이 간단히 된다.

$$F = I B_E \frac{l_m N}{l} h \quad (8)$$

그러므로 추력을 계산하는 기본식은 식 (8)을 사용한다. 추력계산을 위해서는 공극에서의 자계에 대한 계산이 필요하다. 모든 부분자장이 자석 작용점에 영향을 주며 그에 따라 추력에도 영향을 주기 때문에 전체 자장을 여러 부분으로 나누어 계산해야 한다.

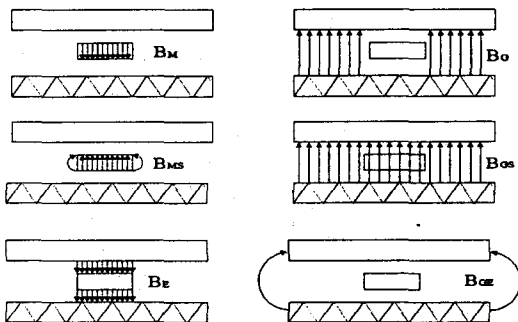


그림 3. 영구자석에 의한 LDM의 각 자계 경로도

그림 3은 영구자석의 3차원 자계를 여러개의 균일한 2차원 자계로 간소화한 것이다. 여기서 코일의 전류로 인한

자장은 포함되지 않았고 철의 투자율은 무한히 큰 것으로 가정하였다.

3) 페리먼스법에 의한 공극의 실효자속밀도 B_E

자기회로의 대칭성을 고려하여 다음의 계산에서, 하나의 영구자석과 코일의 1/2을 포함한 모터의 절반만을 해석하고자 한다. 그림 4는 전압이 인가되지 않을때 코일이 있는 자기회로를 정전압원과 저항 및 전류가 있는 전기적인 등가회로로 나타내었다. 영구자석은 등가회로에서 정전압원이고, 기자력 F_M 을 운반하는데, 이 값은 결보기 보자력 H_c^* 와 자석의 두께 (dm)의 곱이다.

$$F_M = H_c^* \cdot dm \quad (9)$$

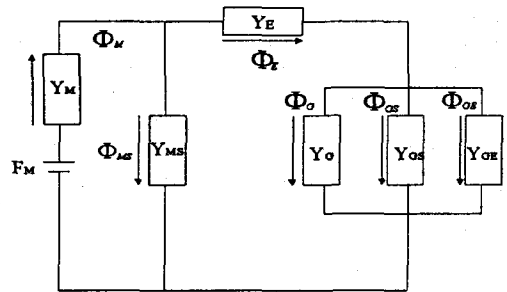


그림 4. LDM의 자기 등가회로

균등자계에 대한 자기저항에서 페리먼스 Y 는 식(10)과 같다.

$$Y = \mu_0 \mu_r \frac{S}{d} \quad (10)$$

여기서, S : 힘의 직선방향에 수직인 면적

d : 힘의 직선 방향에 대한 변위

Y_E, Y_G, Y_M 는 식 (10)에서 쉽게 구할 수 있다. 그러나, Y_{MS}, Y_{CS}, Y_{ES} 는 자속이 추력에 실질적인 영향을 미치지 않기 때문에 무시할 수 있다. 위의 등가회로로부터 식(11) ~ (14)를 유도할 수 있다.

$$\Phi_E = \Phi_G \quad (11)$$

$$\Phi_M = \Phi_{MS} + \Phi_E \quad (12)$$

$$\frac{\Phi_{MS}}{Y_{MS}} = \frac{\Phi_E}{Y_E} + \frac{\Phi_G}{Y_G} \quad (13)$$

$$F_M = \frac{\Phi_{MS}}{Y_{MS}} + \frac{\Phi_M}{Y_M} \quad (14)$$

S_M 은 영구자석의 극단면적과 같고 $F_M Y_M = B_r S_M$ 인 경우 실효자속 밀도는 식 (15)와 같이 나타낼 수가 있다.

$$B_E = \frac{B_r}{\left[\frac{1}{Y_G} + \frac{1}{Y_E} \right] Y_M + 1} \quad (15)$$

따라서, 식 (15)로부터 공극에서의 실효자속밀도는 공극의 페리먼스값에 의존함을 알 수 있다.

4) 고정자 철심의 자계

철심의 자계를 계산하기 위해서 첫째, 영구자석에 대한 철심의 자속밀도를 계산하고 다음에 코일 전류로 인한 자계를 고려해야 한다. 여기서, 내부 철심을 외부철심의 2배로 하였기 때문에 3개 철심에 대한 자속밀도는 동일하다. 먼저 영구자석에 의한 철심내의 최대자속밀도는 지정된 위치에서 식 (16)과 같다.

$$B_C(\max) = \frac{l_m}{a} B_E \quad (16)$$

다음, 코일의 전류로 인한 스트로크 중앙위치에서 생기는 철심의 최대자속밀도는 식 (17)과 같다.

$$B_I(\max) = \frac{N I l \mu_0}{4 a k} \quad (17)$$

B_C 와 B_I 의 합인 철심전체 자속밀도 $B_T = B_C + B_I$ 이다. B_T 에 대해서 계산된 값을 이용하여 설계하고자 하는 LDM의 치수를 결정할 수 있다. 또, 철심이 포함되지 않는 전류의 최대값은 식 (18)에 의해서 결정한다.

$$B_T = \frac{l_m B_E}{a} + \frac{N I l \mu_0}{4 a k} \quad (18)$$

5) 영구자석을 코일로 변환

가동자인 영구자석을 움직이는 코일로 대체해보자. 그림 5에서 알 수 있듯이 MPB280의 B-H곡선은 선형 영역에서 다음의 관계를 보여 준다.

$$dB/dH \cong \mu_0 \quad (19)$$

이러한 조건하에서 전류를 자석의 전체체적에 대해 적분하면 외부 가장자리만 존재하게 된다.

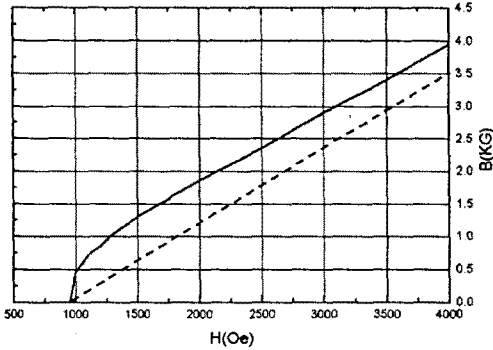


그림 5. MPB 280의 특성곡선

공극에서의 자석대체물(코일)이 그림 6의 형태로 되어 있을 때 철과 공극에서 자속 폐곡선 λ 를 볼 수 있다. 이 자속의 흐름은 α 와 β 점에서 자석 대체물을 갈라 놓는다.

$$\oint_{\lambda} H \cdot dl = \int \int i \cdot ds \Leftrightarrow \sum H \cdot dl = \sum n \cdot i \quad (20)$$

여기서, dl = 폐곡선 λ 를 따르는 길

i = 고정자 코일의 전류

n = 폐곡선 λ 의 개수

그림 6에서 폐회로에 대해 선적분하면,

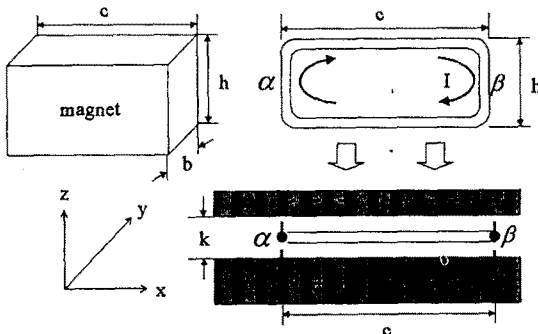


그림 6. 코일 형태로된 자석 대체물

$$H_{\alpha} k + H_{Fe} c - H_{\beta} k + H_{Fe} c = n \cdot i \quad (21)$$

여기서 $n \cdot i$ 는 길이 c 를 따라서 전류의 감아진 횟수를 의미한다. 철 부분의 규격이 확정되면 포화는 나타나지 않는다. 그 때문에 H_{Fe} 는 매우 작아지며 식 (22)와 같이 나타낼 수 있다.

$$k(H_{\alpha} - H_{\beta}) = n \cdot i \quad (22)$$

공기중에서 $B = \mu_0 H$ 이므로,

$$B_{\alpha} - B_{\beta} = \frac{\mu_0 n \cdot i}{k} \quad (23)$$

따라서, 전류가 고정자 코일에 흐르면 공극에서의 자기 밀도의 차이로 전자기력이 발생한다.

$$F = I h \times B \quad (24)$$

h : α 와 β 점에서의 자석대체물(코일)의 높이

F_x 를 고정자 코일에 수평으로 놓으면 α 와 β 부분은 힘을 전달한다.

$$F_{\alpha} = (-I_{\beta}) \cdot h \cdot B_{\alpha} \quad (25)$$

$$F_{\beta} = I_{\alpha} \cdot h \cdot B_{\beta} \quad (26)$$

$$F_x = F_{\alpha} + F_{\beta} = -I_{\beta} \cdot h \cdot (B_{\alpha} - B_{\beta}) \quad (27)$$

여기서, $n \cdot i = J \cdot c$, $I_{\beta} = h \cdot B_{\beta} / \mu_0$ 이므로,

식 (27)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_x = J \cdot B_{\beta} \cdot c h b / k \quad (28)$$

여기서, $c h b$ 는 자석의 체적이며, J 는 전류 밀도를 나타낸다. 위의 식으로 계산한 결과, 추력은 2.69[N]을 얻을 수 있었으며, 가동자를 영구자석으로 한 것보다 추력이 약 10.3% 정도 감소한다는 것을 알 수 있었다. 역시 추력은 전류에 비해하고, 가동자의 위치와는 상관이 없다는 것을 알 수 있다.

6) LDM의 설계 기법 및 시뮬레이션 결과

LDM을 설계하는데 있어서 철심폭, 코일폭, 전류, 추력, 공극등 기준을 어디에 두느냐에 따라서 설계 파라미터의 크기가 변화되기 때문에 특별히 어떠한 기준 범위를 정한다는 것은 불가능하다. 본 논문에서는 LDM에서 중요한 것이 추력이라 보고 정추력을 얻는 것을 목적으로 하였다. 자석의 크기와 자속밀도를 기준으로 하여 각각의 변수를 구하였다. 그림 7은 설계 변수를 구하기 위한 순서를 나타낸 Flowchart 이다. 첫 번째 근사화는 동선의 두께를 결정하였다. 이로부터 실효자속밀도 (B_E)를 식 (15)에서 계산하고, 정적 추력을 결정한다. 다음 영구자석에 의한 추력 3[N]에 대해서 식 (8)을 통해서 철심의 최대자속밀도의 값을 기준으로 철심폭 (a)를 근사화 시킨다.

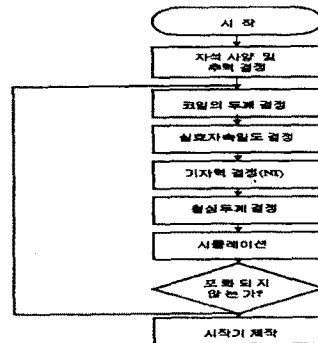


그림 7. LDM의 설계 Flowchart

외부 철심과 중앙 철심 사이의 간격은 15[mm]이고, 공극은 3[mm]의 구리코일(0.7 mm 동선직경의 4배)과 자석 폭이 10[mm]인 자석이 놓인다. 또, 기계상의 오차는 2[mm]이며, 이 오차는 철심의 정밀조립을 방지하고, 양쪽 자석의 위치는 간단히 고정하는데 충분하다. 이러한 설계이론의 수식을 이용하여, 다음과 같은 LDM의 설계 사양을 얻을 수 있었다.

표 1. LDM의 기계적, 전기적 사양

추력 [N]	3
고정자 길이 [mm]	280
고정자 높이 [mm]	22
고정자 폭 [mm]	10
페라이트자석(MPB280)의 치수 [mm]	47×22×10
코일의 두께 [mm]	3
코일 턴수 [회]	1600
철심(S10C)의 최대자속밀도 [T]	1.4
자석의 잔류자속밀도 [T]	0.35
실효자속밀도 [T]	0.194

그림 8은 코일의 두께의 변화에 따른 실효자속밀도의 크기를 나타내고 있다.

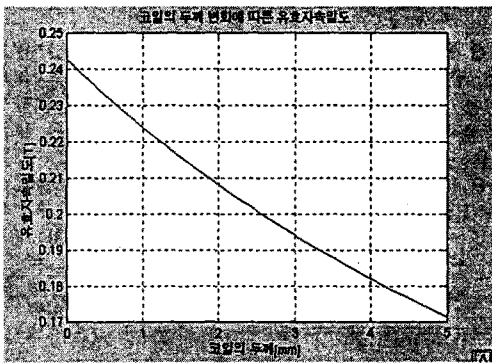


그림 8. 코일의 두께 (dw)에 따른 실효자속밀도

그림 9는 전류의 변화에 대한 철심의 두께 (a)의 변화를 보여 주고 있다.

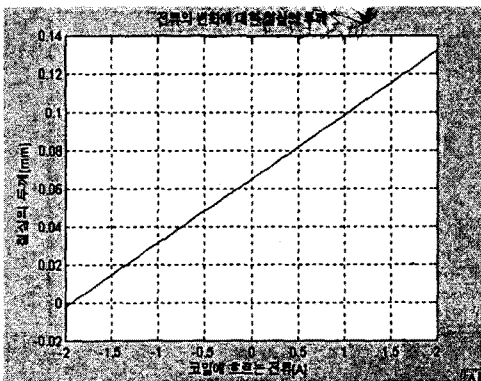
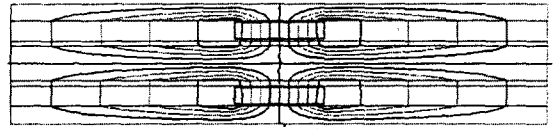
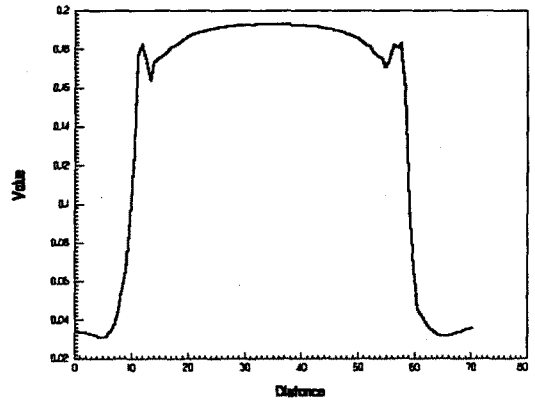


그림 9. 전류의 변화에 대한 철심의 두께

그림 10은 가동자가 중간위치에 있을 때 코일에 전류가 흐르지 않고, 영구자속만 있을 경우의 자속분포와 시뮬레이션값을 나타낸 것이다. 그림에서 처럼, 앞에서 퍼미언스법으로 구한 실효자속밀도 $B_E=0.194$ 와 시뮬레이션 값이 거의 일치함을 알 수 있다.



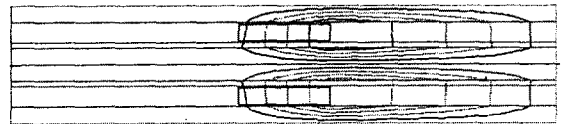
(a) 자속 분포도



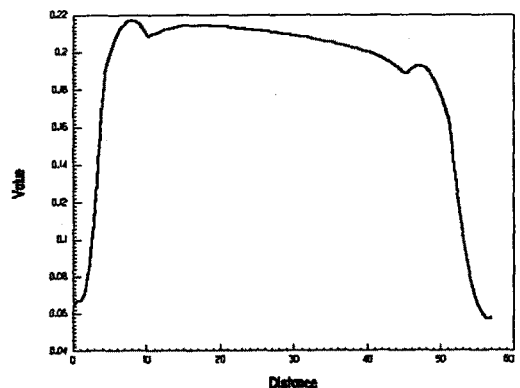
(b) 공극에서의 실효자속밀도

그림 10. 영구자속만 존재할 경우

또한, 영구자석이 존재하며, 고정자 코일에 전류가 흐르는 경우의 자속분포와 자속밀도를 그림 11에 나타내었다.



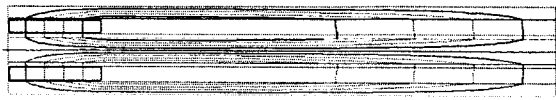
(a) 자속 분포도



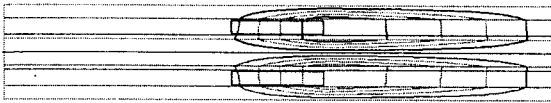
(b) 공극에서의 실효자속밀도

그림 11. 영구자석과 코일에 전류가 흐르는 경우

그림 12는 가동자와 위치에 대한 자속 분포를 나타낸 것이며, 이것은 영구자석의 위치에 따른 철심자속 밀도의 합을 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 플레밍의 왼손법칙에 따라 자속분포가 말한 부분으로 추력이 발생함을 알 수 있다.



(a) 가동자의 위치가 -140[mm]일 때



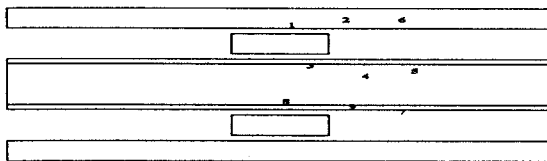
(b) 가동자의 위치가 0[mm]일 때



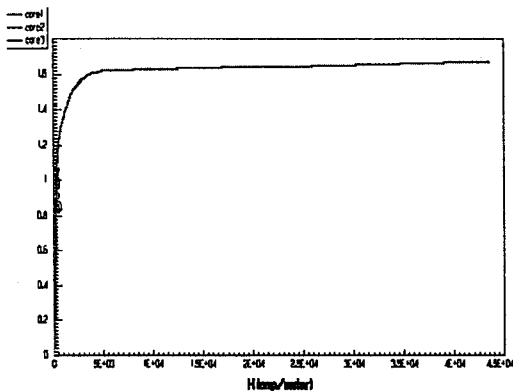
(c) 가동자의 위치가 140[mm]일 때

그림 12. 변위에 따른 자속분포

그림 13은 설계한 LDM의 공극과 철심속에서 B-H곡선 상의 최대 자속 분포를 나타낸 것이다. 전류가 흐를 때 공극과 철심내부의 자속이 철심의 B-H곡선의 선형 구간에서 존재하여야 포화가 되지 않고 정추력을 발생할 수 있다. 그림 13의 (a)에서 나타나 있는 숫자는 자속값을 측정할 점을 나타낸 것이고 그 숫자들이 (b)의 B-H곡선 상에서 선형구간에 존재하므로 최종 설계한 LDM은 자속의 포화 없이 정추력을 발생시키는 것을 알 수 있다.



(a) 자속밀도 지정 위치



(b) 지정된 위치의 자속밀도 크기

그림 13. 지정된 철심내에서 자속밀도 위치 및 크기

3. 결 론

영구자석형 LDM의 설계에 있어서 우선 영구자석은 리니어 모터의 소형, 경량화 및 고 효율화를 이룩하는 데 매우 중요한 요소로 작용하므로 영구자석에 대한 정확한 특성 파악이 필요로 된다. 다음으로 철심폭, 코일폭, 전류, 추력, 공극등 기준을 어디에 두느냐에 따라서 설계 파라미터의 크기가 변화되기 때문에 특별한 기준이 되는 법칙을 정하기는 어렵다. 본 논문에서는 양축식 영구자석 가동형 LDM을 등가 자기회로로 표현하고 등가 자기회로에 퍼미언스법을 적용하여 각 퍼미언스계수와 영구자석의 기자력을 계산하여 공극의 실효 자속밀도를 구하였으며 이로부터 설계에 필요한 코일턴수, 철심폭등을 산출하였다. 또한, 가동자인 영구자석을 코일로 대체했을 경우 발생하는 추력을 생각해 보았다. 본 모델의 실효자속밀도와 추력에 대한 이론해석의 결과는 유한요소법 패키지인 Maxwell을 이용하여 최적의 설계에 대한 타당성을 입증하였다.

[참고 문헌]

1. L. Honds and K. H. Meyer, "A Linear motor with permanent magnets."
2. E. M. H. kamerbeek, "Electric motors", Philips tech. Rev. 33, 215-234
3. A. Basak, "Permanent magnet DC Linears.", Oxford, 1996
4. Magnetic Actuator Survey Special Committee, "Linear Motors and Their Applications", p.3, 65, I.E.E, Japan, 1984.
5. FA용 영구자석형 교류서보모터 및 구동장치개발, 통상 산업부.
6. 편집부, "Linear Motor Application Handbook", 세화출판사, 1988