

양측식 영구자석 가동형 LDM의 설계 해석

백 수현* 윤 신용** 이 준영* 김 민수** 김 학련**
 *동국대학교 전기공학과 ** 서울산업대학교 전기공학과

The Design and Analysis of Linear D.C Motor with double-Side Moving Permanent Magnets

S.H. Baek* S.Y. Youn* J.Y. Lee* M.S. Kim** H.R. Kim**
 * Dongguk Univ. ** Seoul National Technical Univ.

ABSTRACT

In this paper, Take two permanent magnets and three iron bars and wind copper wire around one of the bars. This paper demonstrate that the method of calculation yields the right results with MAXWELL-2D program package for computing magnetic field, also indicate the value to which the current in the coil has to be limited to prevent saturation of the iron of the cores. The Finally procedures for design of LDM are discussed.

1. 서론

직선운동을 하는 리니어 모우터는 직접 직선형의 구동력을 발생시키므로 기계적인 변환장치가 필요치 않으며, 에너지손실과 소음발생이 적고 구조가 간단하며 속도제어가 용이하다는 등의 잇점때문에 많은 산업분야에서 다양한 목적으로 그 필요성이 중요시되고 있다.

리니어 모우터는 사용목적에 따라 크기는 승객운송용으로 부터 단거리 직선운동을 요구하는 다양한 종류의 리니어 모우터가 있다.

본 LDM구조는 중앙철심 사이를 영구자석이 이동하는 양측식구조이다. 구동원리는 영구자석과 고정자코일 사이에 작용하는 플레밍의 왼손법칙에 의해 직선구동력을 발생한다.

본 연구에서는 설계파라미터를 등가자기회로법에 의해 도출하고, MAXELL-2D를 이용하여 자계해석 및 추력분포를 계산하여 실험치와 비교하였다. 또한 철심포화에 따라 발생추력에 미치는 영향을 분석함으로써 전스트로크에 걸쳐서 일정한 추력을 발생하는 전류값을 산정하였다.

2. LDM의 설계식 산출

2.1. 영구자석의 특성 계산

영구자석에 대한 추력을 계산하기 위해, 에너지적인 면에서 다음과 같은 영구자석 합성적인 아래의 일반 방정식을 산출할 수 있다.¹⁾

$$F = I \frac{d\phi_{CM}}{dp} - \frac{dW_m}{dp} + \frac{1}{2} I^2 \frac{dL_c}{dp} \quad (1)$$

여기서, I : 코일의 전류

ϕ_{CM} : 코일과 영구자석사이의 자속쇄고수

p : 영구자석의 위치좌표

W_m : 영구자석의 자계 에너지

L_c : 코일의 인덕턴스

식(1)에서 W_m 은 자석의 위치에 따라 불변하므로 두번째항은 영이 되며, 영구자석의 비투자율이 1이라고 가정하면 세번째항도 영이 된다.

그러므로, 식(1)은 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$F = I \frac{d\phi_{CM}}{dp} \quad (2)$$

여기서, ϕ_{CM} 을 계산하기 위해서, 코일의 $w dx/2l$ 편수와 영구자석의 쇄고자속수를 다음과 같이 적분할 수 있다.

$$\phi_{CM1} = \int_{-l}^p (\phi_{EG} + 2(1+x)bB_G) \frac{w dx}{2l}$$

$$\phi_{CM2} = \int_p^{p+l} (\phi_{EG} + 2(1+p)bB_G - 2(x-p)bB_E) \frac{w dx}{2l}$$

$$\phi_{CM3} = \int_{p+l}^l (\phi_{EG} + 2(1+p)bB_G - 2l_m b B_E + 2(x-p-l_m)bB_G) \frac{w dx}{2l}$$

여기서 ϕ_{EG} : 양철심끝의 표유자속

B_G : 표유자속밀도

B_E : 실효자속밀도

x : LDM 중심에서의 길이방향좌표

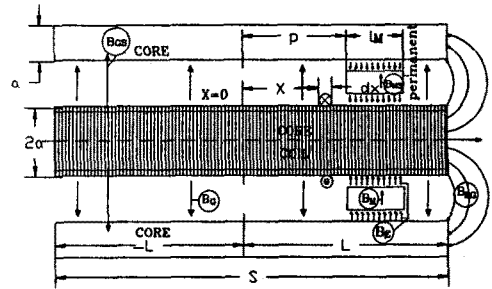


그림 1. 영구자석과 철심사이의 자계분포

잇식에서, 두철심의 표유자속밀도 B_{GS} 도 고려하여야 하지만 B_{GS} 는 변수 p 에 무관하므로 생략한다. 계산한 자속 쇄고수 ϕ_{CM} 을 p 에 관해서 미분하면,

$$F = I (B_E + B_G) \frac{l_m w}{l} b \quad (3)$$

여기서, B_E : 실효자속밀도

w : 코일의 편수

b : 철심의 높이

LDM의 전체 길이 $2l$ 가 영구자석 길이 l_m 보다 크다면, 귀선자속밀도 B_G 는 실효자속밀도 B_E 에 비해서 무시할 수 있을 정도이므로 다음과 같이 간단히 된다.

$$F = \frac{l_m}{l} w I B_E b \quad (4)$$

그러므로 추력을 계산하는 기본식은 식(4)를 사용하며, 식(4)에서 F 를 계산하려면 실효자속밀도 B_E 를 결정해야 한다. 이것은 전체자속을 등가자기회로로 여러개의 부분자속으로 나누어 계산을 쉽게할 수 있다.

2.2. 실효 자계의 계산

자기회로의 대칭성을 고려하여 전해석 영역의 절반에 대해서 자기회로를 구성하여 정전압원, 저항 및 전류가 있는 전기적 인 등가회로도 나타냈다. 회로전류는 등가전압원 \$V_s\$에서 자속 \$\Phi\$로 나타낸다. 영구자석은 등가회로에서 정전압원이며 기자력 \$F_M\$을 운반한다. 균등자계에 대한 자기저항 \$H\$ (Henry)에서 퍼미언스 \$\Lambda\$는 다음과 같다.

$$\Lambda = \mu_0 \mu_r \frac{A}{d} \quad (5)$$

여기서, \$A\$: 힘의 선방향에 면적
\$d\$: 힘의 선방향 길이

\$\Lambda_E, \Lambda_G\$ 및 \$\Lambda_M\$은 식(5)에서 쉽게 계산할 수 있다. \$\Lambda_{MS}, \Lambda_{GS}\$ 및 \$\Lambda_{EG}\$는 자속의 주력에 실질적인 영향을 미치지 않으므로 무시할 수 있다.

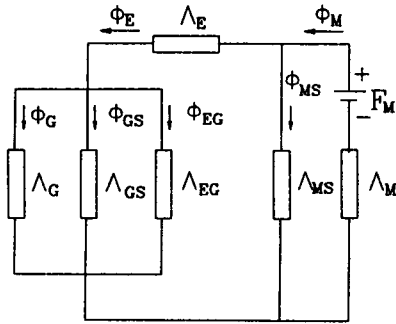


그림 2. 자기회로에 대한 전기적인 등가회로

그림2의 등가전기회로로부터 다음식을 유도할 수 있다.

$$\Phi_E = \Phi_G + \Phi_{GS} + \Phi_{EG}$$

$$\Phi_M = \Phi_E + \Phi_{MS}$$

$$\frac{\Phi_{MS}}{\Lambda_{MS}} = \frac{\Phi_E}{\Lambda_E} + \frac{\Phi_G + \Phi_{GS} + \Phi_{EG}}{\Lambda_G + \Lambda_{GS} + \Lambda_{EG}}$$

\$F_M \Lambda_M = B_r \Lambda_M\$인 경우, \$\Lambda_M\$이 영구자석의 극단면적이며, \$\Phi_E = A_M B_E\$라하면, 실효자속밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_E = \frac{B_r}{\left[\frac{1}{\Lambda_G + \Lambda_{GS} + \Lambda_{EG}} + \frac{1}{\Lambda_E} \right] (\Lambda_{MS} + \Lambda_M) + 1} \quad (6)$$

주력에 실질적으로 영향을 미치지 않는 표유자계에 대한 영향을 무시하면, \$\Phi_{GS} = \Phi_{EG} = \Phi_{MS} = 0\$ 같이되며 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$B_E = \frac{B_r}{\left[\frac{1}{\Lambda_G} + \frac{1}{\Lambda_E} \right] \Lambda_M + 1} \quad (7)$$

2.3. 철심의 자계

영구자석에 대한 철심의 자속밀도를 계산하고 다음에 코일 전류로 인한 자계를 고려해야 한다. 여기서 내부철심은 외부 철심단면의 2배로 하였다. 그러므로 3개 철심의 자속밀도는 같다. 먼저 영구자석으로 인한 철심내의 최대자속밀도 (\$B_{C,max}\$)는 지정된 위치에서 다음식이 된다.

$$B_{C,max} = \frac{I_M}{a} B_E \quad (8)$$

여기서 공극의 자장은 일정하다고 가정하고 영구자석이 스트로크 맨원쪽으로 이동할 때, 철심의 자속밀도 (\$B_C\$)는 영구자석 안쪽 끝부분에서 철심의 최대자속밀도 (\$B_{C,max}\$)가 된다. 스트로크 오른쪽 끝까지 직선적으로 감소한다. 코일의 전류로 인한 철심내에서의 \$x\$좌표 위치에 따라 자속밀도 \$B_I\$는 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$B_I = \frac{w I \mu_0}{4 a l \delta} (l^2 - x^2) \quad (9)$$

윗식에서 \$\delta\$: 공극폭이며, \$\Phi_I = a b B_I\$이므로 \$B_I\$를 \$\Phi_I\$에 대입하면 아래식과 같이 된다.

$$\Phi_I = \frac{b w I \mu_0}{4 l \delta} (l^2 - x^2) \quad (10)$$

코일 전류로 인한 스트로크 중앙위치(역자계)에서 철심의 최대자속밀도 (\$B_{I,max}\$)는 다음과 같다.

$$B_{I,max} = \frac{w I l \mu_0}{4 a \delta} \quad (11)$$

여기서 \$B_I = B_{I,max} \left(1 - \frac{x^2}{l^2}\right)\$

\$B_C\$와 \$B_I\$의 합인 전체 자속밀도 \$B_T = B_C + B_I\$이다. \$B_C\$와 \$B_I\$가 같은 크기의 값일때 전체 자속밀도가 최대값에 도달한다. \$B_T\$에 대해서 계산한 값을 이용하여 모우터의 치수를 정하며 철심이 포화 되지 않는 \$I\$의 최대값을 결정한다. 철심의 끝은 자기적으로 연결되는 것은 바람직하지 않다. 왜냐하면 자기저항은 보다 작아지며 자속은 크게 증가하고, 철의 포화는 \$I\$값보다 낮은 값에서 이루어지므로 추력의 불균형을 야기시킨다.

2.4. MAXWELL-2D의 자계해석

위에 기술한 내용을 입증하기 위해서 유한요소용 패키지인 MAXWELL-2D로 몇가지 경우의 자계를 해석하였다. 아래 그림은 전해석모델의 절반에 대한 자속밀도분포를 나타낸다.

그림3 (a) - (e)에서 자속밀도는 서로 비교될 수 있다. 영구자석의 위치를 이동시킬 때 영구자석 자계에 대한 철심 자속밀도와 코일전류방향 변화에 대한 철심자속밀도 크기의 합(\$B_T\$)인 자속밀도분포 변화를 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 그림(a)는 중앙위치 자석에서 영구자석에 대한 철심자속밀도와 코일전류에 대한 철심자속밀도의 합(\$B_T\$)인 자속밀도 분포이며, 그림(e)에서는 오른쪽 자석위치에서 철심자속밀도와 코일전류에 의한 철심자속밀도의 합(\$B_T\$)이 같은 크기일 때 최대자속밀도가 발생하며, 그림(b)와 (d)에서 코일전류방향 변화에 대한 철심의 자속밀도와 오른쪽 중간위치에서 철심 자속밀도의 크기 값이 두번 방향이 변함을 알 수 있다.

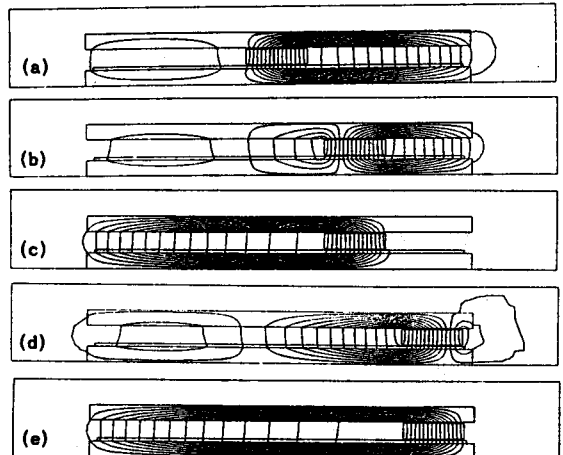


그림 3. LDM의 자속밀도분포

2.5. LDM의 설계

LDM을 설계하려면 자석의 재질을 결정하여야 한다. 본 LDM에서는 페라이트 영구자석을 선택하였고, 영구자석의 높이 b 와 철심 길이 l , 자석길이 l_m 를 선정하여 동선두께를 결정한다. 이로부터 유효자속밀도 B_E 를 식(4)에서 계산하고 정격 추력을 결정한 다음 영구자석의 추력 $2N$ 에 대해서 식(4)로부터 w 를 결정하고 식(11)는 철심의 최대자속밀도 12 wb/m^2 [T]의 값을 기준으로 철심폭(a)를 결정하며, 이에 따라 모우터단면적 $A = (4a + 2dw + 23) b$ [mm^2]를 결정할 수 있으며, 코일의 소비전력도 구할 수 있다. 잊식을 시뮬레이션한 결과는 아래와 같다.

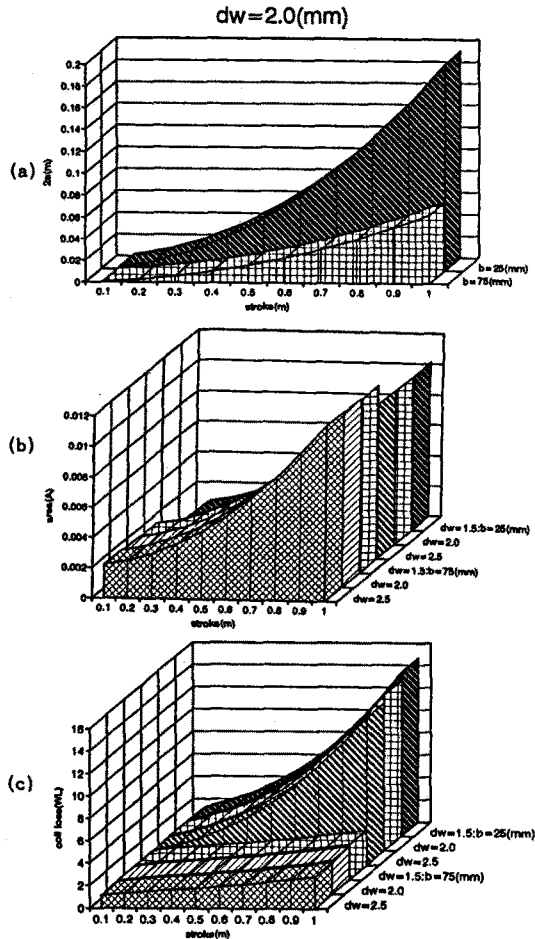


그림 4. LDM의 스트로크에 따른 철심폭(2a), 면적 및 전력 손실

거리의 증가에 따라 철심폭(2a), 면적(A), 손실(WL)의 크기가 점차적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이런 LDM은 일반적인 법칙을 만드는 것은 불가능하다. 왜냐하면, 가동부의 질량(영구자석의 규격), LDM의 외부치수(A), 전력손실(W_L), dw (코일 폭) 중 어느것을 파라미터로 결정하느냐에 따라 다르기 때문이다. 그러나 본 연구에서는 영구자석 $b = 25[\text{mm}]$, $s = 250[\text{mm}]$ 그리고 $dw = 2[\text{mm}]$ 를 선택하여 LDM을 설계하였다.

3. 실험결과

전류의 변화에 따라 철심이 포화되지 않고 일정한 추력을 발생하는 계산결과와 실험을 통하여 측정된 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 계산치와 측정치가 잘 일치함을 알 수 있다.

며, 이로 인하여 LDM 코일에 흐르는 전류에 대한 정격치는 철심의 포화에 의해 결정됨을 알 수 있다.

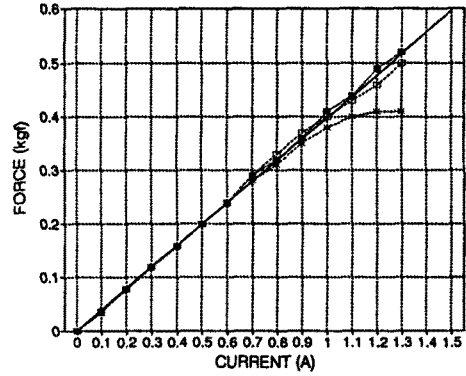


그림 5. 전류의 증가에 대한 추력(F)변화 (직선은 시뮬레이션결과, 마크는 다른 세 위치에서의 실험측정치 $F=2.3N$)

4. 결론

본 LDM은 전류의 변화율 0.6A이상 계속 증가 시켰을때, 철심이 포화되어 추력값이 스트로크 중앙위치에서 감소함을 알 수 있었다. 이로 인하여 전류가 0.6A를 흘릴 때 철심이 포화되지 않고 $F=2.3N$ 정도의 일정한 추력을 발생하며, 스트로크(250mm)구간을 직선구동력을 발생하는 LDM을 설계제작 하였다. MAXWELL-2D 프로그램을 이용하여 자체해석을 하였다.

본 연구의 양축식 영구자석 가동형 LDM에 정밀한 제어장치를 추가하면 앞으로 공장자동화기기, 레코더 등의 서보특성을 이용하는 응용면에 널리 적용될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Liner Electric Machines, IEE Conf. Pubin No.120, 1974.
- [2] E.M.H. Kamerbeek, Electric motors, Rev. 33, 215-234, 1973.
- [3] This follows from equation (9) on page 223 of [2]
- [4] H.C. Roters, Electromagnetic devides, Wiley, New York, 1970.
- [5] J.Langlois and H.Goetzki, Linearmotor und Regelung des Nachlaufsystems fureinen 12-Kanal-Punktdrucker, ETZ ARCH, 3, 77-83, 1981.