

Design and Dynamic Analysis of Air-core Coil type Linear DC Motor

姜圭洪* · 洪正杓** · 金奎卓*** · 河根秀§ · 鄭重基§§ · 任泰彬§§§
 (Gyu-Hong Kang · Jung-Pyo Hong · Gyu-Tak Kim · Kyeun-Su Ha · Joong-Gi Jung · Tae-Bin Im)

Abstract - This paper proposes a technique to design of air-core coil type Linear DC Motor(LDM) by using Equivalent Magnetizing Current(EMC) method and has performed its dynamic analysis. The magnetic flux density differ in accordance with airgap position due to the difference of mechanical and magnetic air gap length and the coil shape has an influence on the thrust. Therefore, the analysis of magnetic field due to the magnets is carried out by EMC. The phenomena according to the various coil shape under the same Magneto Motive Force(MMF) has been analyzed and its result is applied to the design process. The appropriateness of the proposed technique is confirmed by Finite Element Method(FEM) and its dynamic analysis is carried out from the coupling of the electrical circuit equation and mechanical kinetic equation.

Key Words : air-core coil type LDM(Linear DC Motor), EMC(Equivalent Magnetizing Current)

1. 서 론

리니어모터는 기계적인 동력변환장치 없이 직접 직선 추력을 발생하므로 시스템의 성능향상 및 간소화에 적합하다. 리니어 DC 모터(LDM)는 가동자의 형태에 따라 가동 코일형(Moving Coil type)과 가동 자석형(Moving Magnet type)으로, 자기회로의 구성에 따라 편축식과 양축식으로 분류되어진다. 가동 자석형의 경우 가동부에 전원공급 장치가 필요 없어 고속운전이 가능하나 가동자의 영구자석 위치를 검출하여 각 권선에 전원을 분리하여 공급(섹션 구동이라고도 함)해야 하는 구동장치가 필요하고, 자기회로가 불안정하여 장(長)스트로크의 경우 속도 및 위치제어가 어렵다. 반면에 가동 코일형은 영구자석의 수가 가동 자석형에 비해 증가하여 시스템 cost가 상승하고 가동자에 전원이 연결된 상태로 운전되기 때문에 고속운전이 불리하다[1][2]. 그러나 이동자의 위치별 전원의 투입이 필요 없고 자기회로가 안정되어있어 제어 성능을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 양축식 가동 코일형 LDM의 설계 및 동특성 해석을 수행하였다.

영구자석을 포함하는 전동기의 자기회로 설계는 주로 영구

자석과 자기회로의 제원으로부터 퍼미언스계수를 결정하여 공극자속을 산정하는 퍼미언스법을 이용하고 있다[3]. 그러나 치, 슬롯이 없는 공심(空心) 코일형 기기에 있어서는 자기적 공극이 크기 때문에 코일과 쇠교하는 유효자속을 퍼미언스법으로 정확히 산정하기는 어렵다. 이러한 문제를 해소하기 위해서 전자계의 수치해석적인 방법으로 널리 적용되고 있는 유한요소법을 이용하여 설계의 타당성을 보완 및 검증하고 있다[3-5]. 유한요소법은 자기회로의 자기포화현상을 고려한 자속량이나 자계의 분포등은 비교적 정확하게 계산할 수 있으나 방대한 량의 데이터와 계산시간이 요구되기 때문에 많은 설계변수를 갖는 기본 설계에 직접 적용하기는 어렵다 [5][6]. 한편, 영구자석을 등가자화전류(Equivalent Magnetizing Current)로 치환하여 공극에서의 자계를 해석하는 등가자화전류법은 철심의 비선형 특성을 고려할 수 없어 유한요소법에 비해 해의 정도는 다소 떨어지나 공심코일형 LDM과 같이 자기적인 공극이 커서 자기포화현상이 그리 심하지 않은 경우에는 아주 짧은 시간 안에 정성적으로나 정량적으로 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다[6-8].

본 논문에서는 등가자화전류법을 공심코일형 LDM의 설계 단계에 직접 적용하여 도체 영역과 쇠교하는 유효자속으로부터 추력을 산정하는 방법을 제시하였다. 영구자석의 제원을 결정하고 기자력의 변화에 따른 추력 특성 변화 및 일정 기자력에서 코일의 형상에 따른 추력특성 변화를 검토하여 단위 기자력당 최대 추력이 발생하는 코일의 형상을 도출하였다. 설계 방법의 타당성은 유한요소해석의 결과와 비교, 분석하여 검증하였다. 또한, 시스템의 운전특성을 해석하기 위해서 기계적 운동방정식과 전압방정식을 결합하여 과도상태에서 시간에 따른 전류 및 속도, 가속도의 변화를 해석하여 기동특성을 분석하였다.

* 正 會 員 : 昌原大 電氣學科 博士課程
 ** 正 會 員 : 昌原大 電氣學科 助教授 · 工博
 *** 正 會 員 : 昌原大 電氣學科 副教授 · 工博
 § 正 會 員 : 電子部品研究所 精密機器研究 傳任研究員
 §§ 正 會 員 : 電子部品研究所 精密機器研究 首席研究員
 §§§ 正 會 員 : 電子部品研究所 精密機器研究 센터長 · 工博
 接受日字 : 1999年 10月 1日
 最終完了 : 2000年 2月 14日

2. 등가자화전류법에 의한 LDM의 설계

2.1 자계 해석

등가자화전류법을 이용한 공심코일형 LDM의 자계 해석을 위한 해석모델을 그림 1에 나타내었다. 양측식 구조의 편측만을 해석 영역으로 선정하였으며 각 영역에서의 자계를 계산하기 위하여 다음과 같은 가정을 두었다[6][7].

- ① 영구자석은 x방향으로 주기적으로 분포되어 있다.
- ② 철심의 자기포화 현상은 무시한다.
- ③ 전류는 z방향 성분만 존재하고 z방향으로의 변화는 없다.

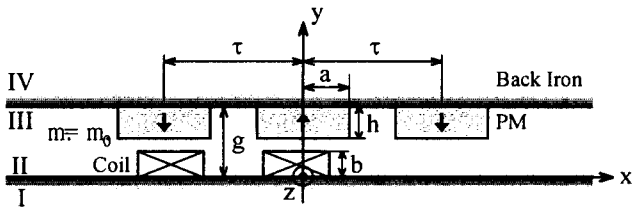


그림 1 해석모델

Fig. 1 Analysis model

그림 1과 같이 해석모델의 영역을 4영역으로 나누면 영역별 지배방정식은 맥스웰 전자방정식으로부터 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial y^2} = 0 \quad \text{I, III, IV 영역 } (b \leq y \leq g) \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial y^2} = -\mu_0 J(x) \quad \text{II 영역 } (0 \leq y \leq b) \quad (2)$$

전기자권선의 코일에 의한 자계는 각 영역의 경계면에서 자계강도의 접선성분과 자속밀도의 법선 성분에 대한 경계조건을 적용하여 구하면 다음 식과 같다[6-8].

$$B_{II}^x = -\mu_0 \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\sinh(nk(g-h))}{\sinh(nkg)} \sinh(nky) \cdot \frac{b_n}{nk} \cdot \sin(nkx) \quad (3)$$

$$B_{II}^y = -\mu_0 \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(1 - \frac{\sinh(nk(g-h))}{\sinh(nkg)} \cosh(nky) \right) \cdot \frac{b_n}{nk} \cdot \cos(nkx) \quad (4)$$

$$B_{III}^x = \frac{\mu_0}{2} \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{\sinh(nkh)}{\sinh(nkg)} \right) \left(\frac{e^{nky}}{e^{nkg}} - \frac{e^{nkg}}{e^{nky}} \right) \cdot \frac{b_n}{nk} \cdot \sin(nkx) \quad (5)$$

$$B_{III}^y = -\frac{\mu_0}{2} \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{\sinh(nkh)}{\sinh(nkg)} \right) \left(\frac{e^{nky}}{e^{nkg}} + \frac{e^{nkg}}{e^{nky}} \right) \cdot \frac{b_n}{nk} \cdot \cos(nkx) \quad (6)$$

여기서 $k = \frac{\tau}{\pi}$ 이고 n은 푸리에 급수(Fourier series)

전개에서 주기함수의 차수이다.

한편, 영구자석은 식(7)과 (8)을 이용하여 그림 2와 같이 자석 양단의 끝 부분에 미소한 두께 δ 를 갖는 등가자화전류로 나타낼 수 있다.

$$I_{pm} = \oint \mathbf{M} \cdot d\mathbf{L} = \pm M \cdot h \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{M} \quad (8)$$

$$J_{pm} = \frac{I_{pm}}{\delta \times h} = \pm \frac{M}{\delta} = \pm \frac{B_r}{\mu_0 \delta} \quad (9)$$

여기서, B_r 은 영구자석의 잔류자속밀도이다.

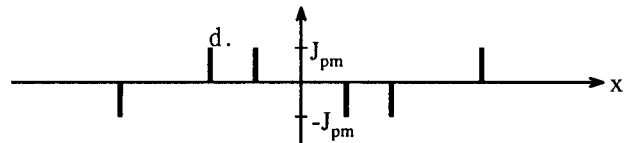


그림 2 영구자석의 등가자화전류

Fig. 2 EMC of permanent magnet

그림 2의 등가자화전류를 푸리에 급수 전개하면 다음 식과 같다.

$$J_p(x) = \sum_{n=1,3}^{\infty} b_{pn} \cdot \sin(nkx) \quad (10)$$

여기서, $b_{pn} = \frac{4J_{pm}}{n\pi} [\cos(nka) - \cos nk(a+\delta)]$ 이다.

영구자석이 분포한 III영역에서 영구자석에 의한 공극자속 밀도 분포는 전기자 권선 전류에 의한 자속밀도와 동일한 형태로 다음과 같다[6].

$$B_{III}^{x,p} = \frac{\mu_0}{2} \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{\sinh(nkh)}{\sinh(nkg)} \right) \left(\frac{e^{nky}}{e^{nkg}} - \frac{e^{nkg}}{e^{nky}} \right) \cdot \frac{b_{pn}}{nk} \cdot \sin(nkx) \quad (11)$$

$$B_{III}^{y,p} = -\frac{\mu_0}{2} \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{\sinh(nkh)}{\sinh(nkg)} \right) \left(\frac{e^{nky}}{e^{nkg}} + \frac{e^{nkg}}{e^{nky}} \right) \cdot \frac{b_{pn}}{nk} \cdot \cos(nkx) \quad (12)$$

2.2 LDM의 설계

초기 설계시 시스템의 요구 추력으로부터 극수 및 구동방식을 고려하여 설계를 수행하였다. 본 논문에서는 3상 바이폴리 구동방식을 채용하였으며 영구자석의 제원을 결정하는 다음 요구 추력으로부터 기자력을 결정하고 기자력의 분포형상

을 변경하여 동일한 기자력에서 추력이 최대화되도록 설계하였다. 공심코일형은 전기자코일의 도체부분도 자기적인 공극으로 작용하게 되며, 이 도체 영역을 미소 영역으로 세분화한 다음, 등가자화전류법을 이용하여 각 영역에서의 유효자속을 산정한 후 도체에 흐르는 전류로부터 발생 추력을 계산하였다. 동일한 기자력에서도 도체 단면의 형태에 따라 자기적 공극의 길이가 변화하여 공극자속밀도의 크기와 분포가 달라지므로 발생추력도 변화하게 된다. 도체 형상의 변화에 따른 쇄교자속 및 발생 추력의 계산 방법을 그림 3에, LDM의 설계 과정을 그림 4에 나타내었다.

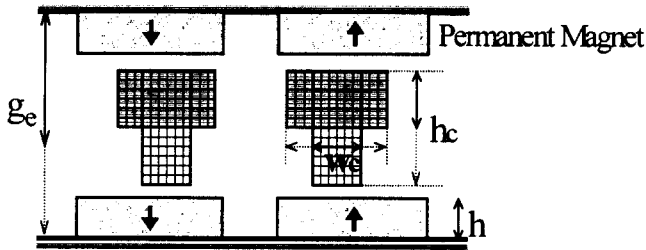


그림 3 도체 형상 변화에 따른 추력 계산
Fig. 3 Thrust analysis by variation of coil area shape

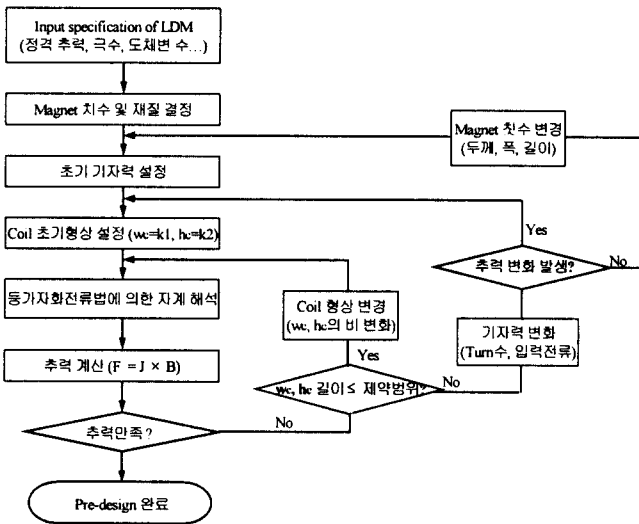


그림 4 등가자화전류법 이용한 설계 과정
Fig. 4 Design process by EMC

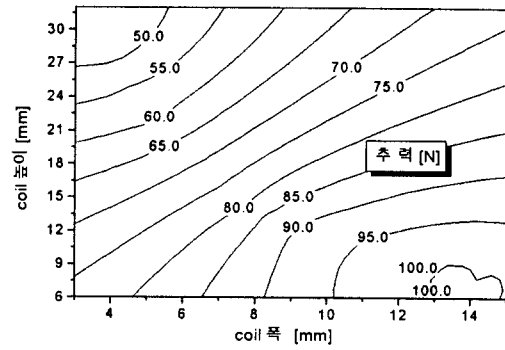


그림 5 도체 형상의 변화에 따른 추력 특성
Fig. 5 Thrust characteristic by variation of coil area shape

등가자화전류법으로 설계한 전동기의 단면도와 제원을 그림 6, 표 1에 나타내었다. 3상 바이폴러 구동방식으로 8극 6코일을 가지는 구조이다.

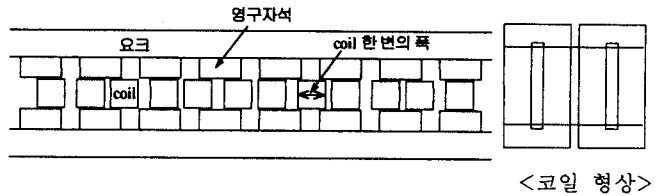


그림 6 LDM의 단면도
Fig. 6 Cross section of LDM

표 1 전동기의 입력 및 제원
Table 1 Specification of LDM

항목	수치[단위]	항목	수치[단위]
전압	170[Vmax]	적층 폭	60[mm]
전류	1.8[A]	극간격	27[mm]
정격추력	104[N]	상당 직렬 도체수	524
정격속도	1.5[m/s]	기계적 공극	0.5[mm]
자극비	0.74	coil 한변의 폭	13.5[mm]
잔류자속밀도(B _r)	1.15[T]	coil 높이	8.3[mm]
마그네트 폭	20[mm]	상간 거리	3[mm]
마그네트 두께	6[mm]	요크 두께	8[mm]

2.3 설계 결과

영구자석 사양을 결정한 다음 정격전류 1.8[A]에서 요구 추력을 내기 위한 기자력을 257[AT]으로 설정하였다. 이때의 도체단면적은 56[mm²]로서 도체 단면적의 형상변화에 따른 추력 변화를 그림 5에 나타내었다. 극간격 25[mm], 영구자석 폭 20[mm]의 경우 동일한 단면적에서 도체 영역의 높이가 낮아질수록 자기적 공극은 감소하여 발생 추력이 증가하는 추이를 보이다가 도체 영역의 폭이 15[mm] 보다 증가하는 경우에는 추력이 감소함을 알 수 있다.

3. 유한요소 해석에 의한 설계 검증

등가 자화전류법에 의한 설계의 타당성은 전자계 수치해석으로 널리 적용되고 있는 유한요소 해석의 결과와 비교하여 검증하였다. 양측식 구조의 편축을 해석 영역으로 설정하였다. 2차원 유한요소 해석을 위해 다음과 같은 가정으로부터 지배방정식을 도출하면 식(13)과 같다[4].

1) 전류는 z축을 방향으로만 존재한다.

- 2) 영구자석은 이방성이다.
- 3) 철심의 재질은 등방성이다.

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -(J_0 + J_m) \quad (13)$$

여기서 A, J_0, J_m 은 각각 $\vec{A}, \vec{J}_0, \vec{J}_m$ 의 z방향 성분이
다. J_m 은 영구자석의 등가자화전류의 형태로 표현한 식으로
자화의 세기 \vec{M} 의 x 및 y방향의 성분을 각각 M_x, M_y 라
하면 영구자석의 등가자화 전류밀도는 다음과 같다.

$$J_m = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial M_x}{\partial x} - \frac{\partial M_y}{\partial y} \right) \quad (14)$$

도체에 작용하는 힘은 Lorentz's law로부터 계산하여 다음
과 같다[4][5].

$$F_x = \sum_{i=1}^n f_{ix}^{(e)} = \sum_{i=1}^n J_i^{(e)} \Delta_i^{(e)} B_y^{(e)} \quad (15)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^n f_{iy}^{(e)} = \sum_{i=1}^n J_i^{(e)} \Delta_i^{(e)} B_x^{(e)} \quad (16)$$

여기서, $J_i^{(e)}$ 와 $\Delta_i^{(e)}$ 는 요소(e)의 전류밀도와 면적이며, n
은 도체를 구성하는 요소수이다.

유한요소 해석 결과 자속밀도 분포 특성을 그림 7에 나타
내었다. 기계적인 공극에서의 자속밀도 분포는 구형과 형태
이나 도체 중심에서는 정현파에 가까운 형태로 가동자의 이
동에 따라 자속밀도의 차가 발생하므로 추력의 ripple이 발생
한다. 추력 특성은 가동자의 위치를 이동시켜가면서 해석하
는 moving line 기법을 이용하여 해석한 결과를 등가자화전
류법과 비교하여 그림 8에 나타내었다. 추력 특성은 유한요
소 해석 결과와 거의 일치하여 공심 코일형 기기에서 등가자
화전류법에 의한 자체해석을 통하여 설계한 결과가 타당성이
있음을 검증하였다.

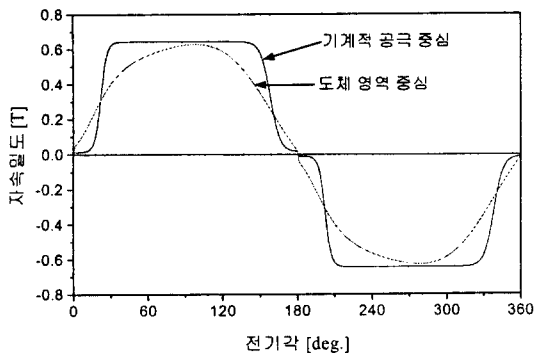


그림 7 자속밀도 분포
Fig. 7 Flux density distribution

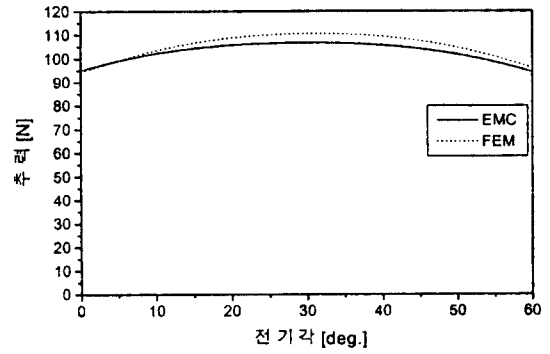


그림 8 위치변화에 따른 추력 특성
Fig. 8 Thrust characteristic by position variation



그림 9 이동 line기법 적용시의 등 포텐셜도
Fig. 9 Equi-potential by moving line technique

4. 동특성 해석

기계적 운동방정식과 전압방정식의 결합으로부터 속도 및
전류의 시간 미분방정식의 해를 구하여 시간 차분법으로 동
특성을 해석하였다.

4.1 동특성 해석의 모델링

LDM의 과도상태에서의 동특성을 해석하기 위해서 전압방
정식과 기계적 운동방정식의 모델링으로부터 해석하므로 과
도상태에서 인덕턴스에 의한 역기전력도 고려해야한다. 따라
서, 전압방정식은 식(17)으로 기계적 운동방정식은 식(18)과
같다.

$$V = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + k_e v(t) \quad (17)$$

$$F = k_f i(t) = M \frac{dv(t)}{dt} + Dv(t) + F_l \quad (18)$$

여기서 k_e 는 기전력 상수이고 k_f 는 추력상수이고 M 은
가동자 질량, D 는 마찰계수, F_l 은 부하를 나타낸다. 전압방
정식과 운동방정식을 구성하는 파라미터들은 표 2에 나타내
었다.

표 2 동특성 해석을 위한 파라미터
Table 2 Parameters for dynamic analysis

V	108[V]	L	40.4[mH]	F_l	104[N]	D	0.01
R	11.9[Ω]	k_e	57.8	M	19[kg]	k_f	57.8

과도상태에서 전류는 시간 변화에 따른 속도의 함수로 표현된다. 이러한 전류의 변화에 의해 속도 기전력 및 변압기 기전력이 함께 발생하고 추력도 변화한다. 따라서 속도에 대한 미분방정식의 해를 구해서 전류 및 전류의 변화로부터 속도 및 가속도, 추력 특성을 해석하였다. 전압방정식과 운동방정식의 결합으로부터 시간에 대한 전류는 식 (19)로부터 구할 수 있고 전류의 변화량으로부터 속도에 대한 미분방정식으로 표현하면 식 (20)과 같다.

$$I = \frac{M}{k_f} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{D}{k_f} v(t) + \frac{F_l}{k_f} \quad (19)$$

$$\frac{LM}{k_f} \frac{d^2v(t)}{dt^2} + \left[\frac{LD}{k_f} + \frac{MR}{k_f} \right] \frac{dv(t)}{dt} + \left[\frac{RD}{k_f} + k_e \right] v(t) + \frac{F_l R}{k_f} - V = 0 \quad (20)$$

식(20)의 미분방정식을 풀면 시간에 따른 속도는 다음과 같다.

$$v(t) = v_c(t) + v_p(t) \quad (21)$$

$$v_c(t) = C_1 e^{\frac{-(\frac{D}{M} + \frac{R}{L}) + \sqrt{(\frac{D}{M} + \frac{R}{L})^2 - 4(\frac{DR}{LM} + \frac{k_e}{LM})}}{2}} + C_2 e^{\frac{-(\frac{D}{M} + \frac{R}{L}) - \sqrt{(\frac{D}{M} + \frac{R}{L})^2 - 4(\frac{DR}{LM} + \frac{k_e}{LM})}}{2}} \quad (22)$$

$v_p(t) = C$, $v_p'(t) = 0$, $v_p''(t) = 0$ 으로부터 $v_p(t)$ 는 식 (23)과 같이 된다.

$$v_p(t) = \frac{k_f V - F_l R}{DR + k_f k_e} \quad (23)$$

초기속도는 0이라는 초기조건으로부터 미정계수를 결정하면 다음과 같다.

$$A = \frac{F_l R - k_f V}{DR + k_f k_e} \quad B = \sqrt{C^2 - 4A}$$

$$C = -\left(\frac{D}{m} + \frac{R}{L}\right) \text{ 일 때}$$

$$m_1 = \frac{-C + \sqrt{C^2 - 4A}}{2}$$

$$m_2 = \frac{-C - \sqrt{C^2 - 4A}}{2} \quad (24)$$

전압 방정식과 운동방정식을 결합하여 방정식을 속도로 나타내면 식 (25)와 같다.

$$v(t) = \frac{\frac{m_2}{m_1}}{\left(\frac{m_2}{m_1} - 1\right)} A e^{m_1 t} + \frac{1}{\left(1 - \frac{m_2}{m_1}\right)} A e^{m_2 t} - A \quad (25)$$

4.2 동특성 해석 결과

동특성 해석 결과는 정격전압을 인가한 경우와 최대 공급 전압을 인가한 경우를 비교하여 나타내었다. 일정 전압을 인가한 경우 기동시 급격한 전류로부터 발생 추력이 증가한다. 이러한 발생 추력의 증가는 시스템의 가속특성이 향상되어 가속시간이 줄어드는 반면 구동회로의 전류 용량을 증가시켜야 하는 문제가 있다. 미분방정식의 해로부터 시간에 따른 전류 및 추력 특성을 그림 10, 11에 나타내었다.

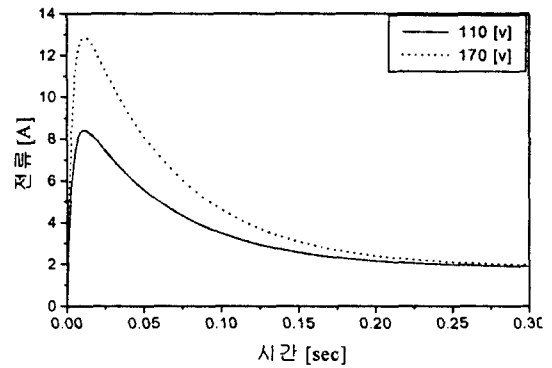


그림 10 전류 변화

Fig. 10 current variation

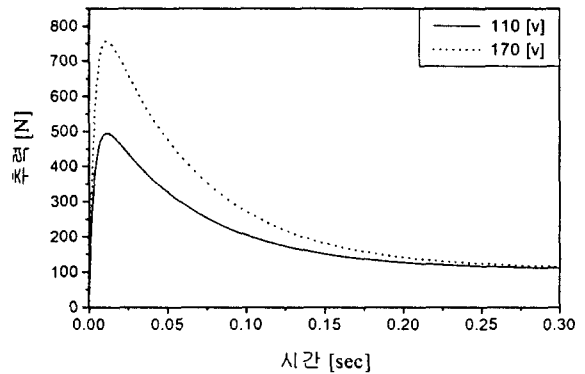


그림 11 추력 특성

Fig. 11 Thrust characteristic

부하가 일정한 경우 공급 전압을 증가하면 전류 및 추력의 증가로부터 가속특성은 증가하지만 정상상태에 이르는 시간은 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 부하가 일정하므로 전압의 증가는 정상상태 속도는 증가하는 반면 도달 시간은 거의 같음을 그림 12에 나타내었다. 따라서 구동회로를 고려하여 동특성을 해석하는 경우 가속특성을 만족하기 위해 전

압의 변동과 전류 용량의 한계를 고려한 설계 및 해석이 수행되어야함을 알 수 있다. 그림 13은 부하에 따른 전류 및 속도의 한계를 나타내었으며 부하에 따른 속도 및 전류 특성이 선형적임을 알 수 있다. 이러한 특성은 넓은 부하범위에서 우수한 제어특성을 갖기 때문에 속도 및 위치제어용 기기로서 적합하다.

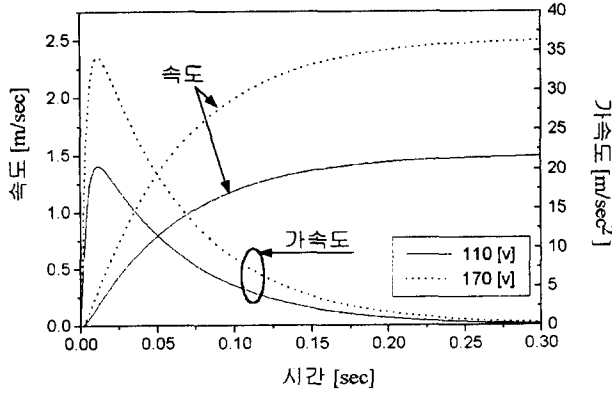


그림 12 속도 및 가속도 특성
Fig. 12 Velocity and acceleration characteristic

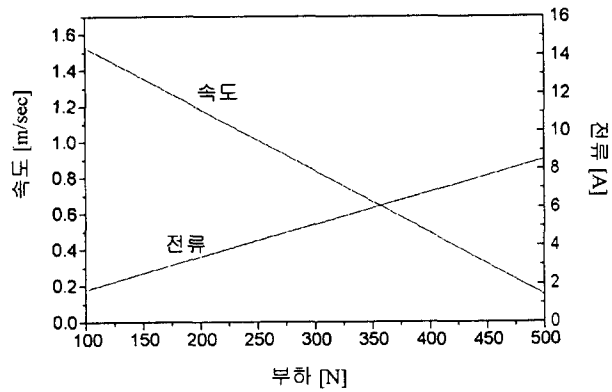


그림 13 부하 변화에 따른 속도 및 전류 특성
Fig. 13 Velocity and current by load variation

5. 결 론

본 논문에서는 등가자화전류법을 이용하여 공심 코일형 영구자석 리니어 직류모터를 설계하고 운동방정식을 이용하여 동특성 해석을 하였다. 공심 코일형 기기는 자기적 공극이 커 집중정수로 고려한 자기회로의 설계는 큰 오차를 수반한다. 따라서 본 논문에서는 등가자화전류를 이용하여 공극에서의 자계를 해석하고 도체의 영역을 미소 분할하여 각 영역에서의 유효자속으로부터 발생 추력을 산정하였으며 동일한 전기자 기자력에서 최대 추력이 발생하는 코일의 형상설계를 수행하였다. 설계의 타당성을 검증하기 위해 유한요소해석 결과와 비교하여 추력 특성은 거의 일치하여 공심 코일형 전동기의 설계에 유용하게 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

설계된 전동기의 동특성 해석을 위하여 전압 방정식과 운

동방정식의 결합으로부터 시간 변화에 따른 전류 및 추력, 속도의 변화를 해석하였다. 설계된 LDM은 정격에서 0.128[sec]에 정상상태에 도달하는 가속특성을 가지지만 추력 리플은 13[N]으로 다소 큰 값을 가진다. 이는 코일중심에서의 자속밀도 분포가 구형파가 아니기 때문에 나타나는 특성으로 향후, 추력 리플을 줄이기 위해서 자속밀도의 분포나 또는 구동방식의 특성을 고려한 설계를 수행할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술센터의 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

- [1] Basak, "Permanent Magnet DC Linear Motors", Clarendon press · oxford 1996
- [2] I. Boldea and S. A. Nasar, Linear Motion Electromagnetic Systems, John Wiley and Sons, 1985.
- [3] J. F. Gieras, "Permanent Magnet Motor Technology", Marcel Dekker, Inc., 1997
- [4] SALON, "Finite Element Analysis of Electrical Machines", 1995
- [5] Dal-Ho Im, Jung-Pyo Hong, et al., "The optimum design of permanent magnet linear synchronous motor", Int'l Conference of IEEE CEFC '96, pp.166, 1996.
- [6] 임기채, 홍정표, 김규탁 "공간고조파법을 이용한 영구자석 선형 동기전동기의 슬롯을 고려한 정특성 해석", 전기학회 논문지 48B-4-1, pp.145-151, 1999.
- [7] Zesheng Deng, I. Boldea and S. A. Nasar, "Field in permanent magnet linear synchronous machines", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-22, No. 2, March pp. 107-112, 1986
- [8] T. Mizuno, H. Yamada, "Magnetic circuit analysis of a linear synchronous motor with permanent magnets", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 28, pp.3027-3029, 1992.

저 자 소 개



강규홍 (姜圭洪)

1967년 11월 5일생. 1992년 창원대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~1998년 LG전자(주) 주임 연구원. 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 0551-279-7519

E-mail : kgh1004@cosmos.changwon.ac.kr



홍 정 표 (洪 正 杓)

1959년 4월 17일생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1996년 한양대 산업과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 조교수

Tel : 0551-279-7517

E-mail : jphong@sarim.changwon.ac.kr



정 중 기 (鄭 重 基)

1982년 서울대 기계설계학과 졸업. 1982년 - 1994년 금성통신(주) 책임연구원. 1994년 - 1999년 전자부품연구원 정밀기기연구센터 선임연구원 2000년 - 현재 전자부품연구원 정밀기기연구센터 수석연구원. 대한전기학회 정회원

기학회 정회원

Tel : 0333-6104-292

E-mail : chungjk@nuri.keti.re.kr



김 규 탁 (金 奎 卓)

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 창원대 공대 전기공학과 부교수. 1996년~1997년 일본 福岡大 客員研究員

大 客員研究員

Tel : 0551-279-7515

E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr



임 태 빈 (任 泰 彬)

1957년 3월 6일생. 1979년 한양대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 (석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 (공학박). 1985년~1987년 금성정밀 중앙연구소. 1987년~1992년 한국써보(주) 연구실장. 1993년~1995년 삼성전기(주) 연구실장. 1995년~현재 : 전자부품연구원 정밀기기연구센터장. 대한전기학회 정회원

1993년~1995년 삼성전기(주) 연구실장. 1995년~현재 : 전자부품연구원 정밀기기연구센터장. 대한전기학회 정회원

Tel : 0333-6104-292



하 근 수 (河 根 秀)

1970년 2월 20일생. 1993년 홍익대 전기제어공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기 제어공학과(석사). 1995년~현재 전자부품연구원 정밀기기연구센터 선임연구원. 대한전기학회 정회원

Tel : 0333-6104-292

E-mail : haks@nuri.keti.re.kr