

# 리니어 직류 모터의 설계와 특성 해석

\*임달호   \*\*김학현   \*홍정표   \*최영준  
\*한양대학교 전기공학과   \*\*서울산업대학 전기공학과

## Design and Characteristics Analysis of Linear DC Motor

\*Dal-Ho Im, \*\*Hak-Ryun Kim, \*Jung-Pyo Hong, \*Young-Jun Choi  
\*Department of Electrical Engineering, Hanyang University  
\*\*Dep. of Electrical Engineering, Seoul National Polytechnic University

### Abstract

This study presents a design method for linear DC motor which substituted for rotary motor combined with conversion apparatus and the designed motor is analyzed. To design the linear DC motor, magnetic circuit network method is introduced and characteristics of motor at steady state are analyzed using FEM. And the transient behavior is investigated by using the finite element analysis coupling voltage equation and dynamic equation.

### 1. 서론

최근에 들어서, 기기의 고성능화의 요구가 고조되고 있는 가운데, 리니어 모터는 직선구동장치의 강력한 구동원으로 대두되고 있으며, 그 중에서 리니어 직류모터(LDM)는 제어성, 응답성이 뛰어나 정밀위치제어를 필요로 하는 OA, FA분야와 자동화분야 등에 광범위하게 적용되고 있다.[6]

리니어 직류모터를 고정밀도의 위치제어가 요구되는 제어용 모터에 적용하기 위해서는 기존의 고전적인 설계방법으로는 한계가 있다. 따라서 사용목적에 맞는 제어용 리니어 직류모터를 설계하기 위해서는 기존의 퍼미언스법을 보완할 수 있는 자기회로 설계방법이 요구되며, 아울러 입력에 대한 응답특성과 과도현상을 해석할 수 있는 수치해석기법이 필요하다. 즉, 자기회로 설계시에는 공극자속의 정확한 계산이 무엇보다 중요하기 때문에 공극자속 밀도를 간단하면서도 정확하게 계산할 수 있어야 하며, 가동자의 입력에 대한 응답특성을 고찰하기 위해서는 유한요소법과 같은 수치해법과 회로방정식 및 운동방정식을 결합하여 입력에 대한 가동자의 과도현상을 분석할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 LDM에 대하여 퍼미언스법의 일종인 자기회로 방법을 이용한 자기회로의 설계방안을 제시하였다. 또한, 그 설계 모델을 유한요소법으로 분포특성을 해석하였으며, 전압입력을 고려한 유한요소해석과 운동방정식을 결합하여 과도현상 및 응답특성을 고찰하였다. 그리고 각 방정식들의 시간미분항은 차분근사법을 이용하여 처리하였다.

### 2. LDM의 자기회로설계

로보트 반송용 LDM과 같은 모터는 고정밀도의 위치제어를 필요로 하게 되므로 코팅력의 영향을 고려하여야 하므로 무절실함으로 하였다. 또한 가동자에 전원을 공급할 필요가 없으며 고정자의 권선배치에 의해 긴 스트로크를 얻을 수 있도록 영구자석 계자류 가동형으로 하였다. 전기자 권선은 3상 Y결선하였으며, 2상씩 순차적으로 통전시키는 3상 전파정류방식을 사용하여 추력변화를 작게하였다.[6]

#### 2.1 자기회로방법에 의한 자속 밀도 계산

자기회로방법이란 퍼미언스법의 일종으로 전체 자기회로를 세분한 후 자로전체의 등가회로망을 만들어 전기회로망의 전류를 구하는 것과 같은 방법으로 자속을 계산하는 방법이다.[3] 본 연구에서는 대칭성을 고려하여 영구자석 한국의 반만유 계산대상으로 하여 공극자속을 계산하였다. 계산영역의 등가 자기회로망은 그림 1.과 같다.

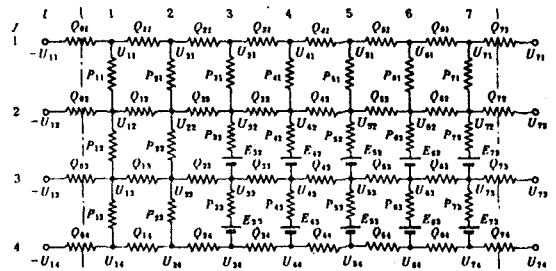


그림 1. 등가회로망  
Fig. 1 Equivalent circuit network

여기에서

$P_{ij}$  : 종방향 퍼미언스,  $Q_{ij}$  : 횡방향 퍼미언스  
 $U_{ij}$  : 기자력,  $E_{ij}$  : 영구자석 등가 기전력

그림 1.에서 각 절점에 흐르는 자속에 대하여 자속의 연속조건을 적용하면 각 절점에 대하여 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_{i-1,j} + \Phi_{i,j-1} + \Phi_{i,j} + \Phi_{i,j+1} &= 0 & (1) \\ \Phi_{i-1,j} &= Q_{i-1,j} * (U_{i,j} - U_{i-1,j}) & (1-1) \\ \Phi_{i,j-1} &= P_{i,j-1} * (U_{i,j} - U_{i,j-1} - E_{i,j-1}) & (1-2) \\ \Phi_{i,j} &= Q_{i,j} * (U_{i,j} - U_{i+1,j}) & (1-3) \\ \Phi_{i,j+1} &= P_{i,j} * (U_{i,j} - U_{i,j+1} - E_{i,j}) & (1-4) \end{aligned}$$

이제 식 (1)을 모든 절점에 대하여 조합한 후 여기에 경계조건을 적용하여 기자력을 계산하면 모든 자로에 대한 자속을 구할 수가 있다. 자기회로방법에 의한 계산결과와 타당성을 검증하기 위해 FEM으로 해석한 결과와 비교, 검토하였다.

그림 2.는 자기회로방법과 FEM에 의한 코일 중심부에서의 자속밀도 분포도이다. 그림에서도 알 수 있듯이 FEM에 의한 해석과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

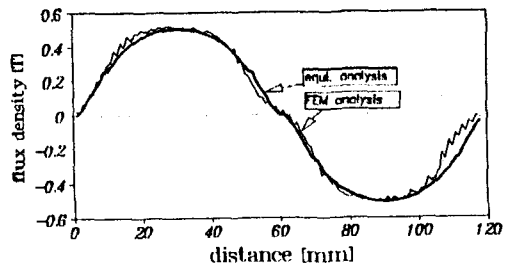


그림 2. 자속밀도 분포의 비교  
Fig. 2. Comparison of Flux Density

그림 3.은 본 연구에서 제안한 LDM의 설계 흐름도이다.

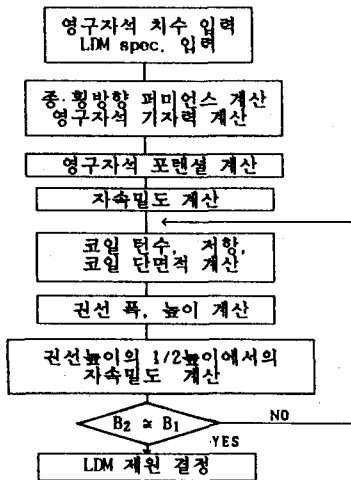


그림 3. LDM 설계 흐름도  
Fig. 3. Design Flow Chart

표 1. 과 표 2. 는 LDM의 사양 및 주요 재원이다.

표 1. LDM의 사양  
Table 1. Specification of LDM

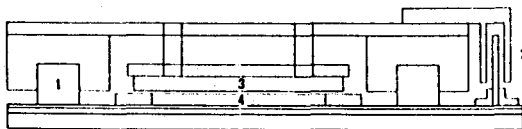
항 목	치 수
정격 추력	10 [N]
정격 속도	0.2 [m/sec]
정격 전압	10 [V]
정격 전류	0.67 [A]
효 율	30 [%]

표 2. LDM의 주요 재원  
Table 2. Design Parameter of LDM

항 목	치 수
영구자석 치수	12 x 50.8 x 5 [mm]
영구자석 재질	희토류 (N-33H) (단위: MKS)
	간류자속밀도 보자력
	1.15 [T] 860 [kA/m]
착자방향 두께	5 [mm]
총 영구자석 수	4 [개]
공극 크기	1.0 [mm]
공극 자속밀도	0.47 [T]
턴 수	198 [Turns]
코일 치수	15 x 50.8 x 6.0 [mm]

### 3. 해석 모델

그림 4. 는 LDM을 이용한 서보 시스템의 기본 구조이다. 가동자에는 마그네트를 부착하고 있으며 일정한 공극을 유지하기 위하여 리니어 베어링으로 가이드에 연결되어 있다. 고정자에는 코일이 요오크위에 일정한 배연로 부착되어 있으며 추력 리플을 줄이기 위하여 3상 전파정류를 행하였으며, 2상식 순차적으로 통전되는 방식이다. 그림 5. 는 해석모델이다.



1. 리니어 가이드, 2. 리니어 스케일, 3. 가동자, 4. 고정자

그림 4. LDM을 이용한 서보 시스템  
Fig. 4. Servo System of LDM

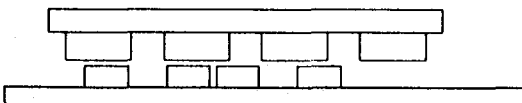


그림 5. 해석 모델  
Fig. 5. Calculation Model

### 4. FEM에 의한 특성해석

#### 4.1 지배방정식

변위전류를 무시한 준정상상태에서 영구자석이 있는 경우, 기본방정식은 다음과 같이 표현된다. [2]

$$B = \mu_0(H + M), \quad \nabla \times H = J_0 + J_0$$

$$J_0 = \sigma(V \times B), \quad \nabla \times A = B, \quad \nabla \cdot B = 0$$

여기서 A, B, H, M는 각각 자기벡터 포텐셜, 자속밀도, 자계강도 및 영구자석 자화값이며,  $\mu_0, \sigma$ 는 각각 투자율과 도전율이며,  $J_0$ 는 입력전류 밀도,  $J_0$ 는 와전류 밀도를 나타내고, V는 계자자속에 대한 도체의 상대 이동속도이다. 이때 투자율 특성은 등방성으로 가정하였다.

윗식들을 A에 대하여 정리하면 식(2)와 같이 된다.

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A - M) - J_0 - J_0 = 0 \quad (2)$$

여기서  $\nu$ 는 자기저항율이다. 식 (2)에  $\nabla \cdot A = 0$ 인 Coulomb gauge조건을 적용하면 지배방정식은 다음과 같이 된다.

$$-\nu \nabla^2 A = J_0 + J_0 + J_m \quad (3)$$

이때,  $J_m$ 은 영구자석을 등가자화전류로 처리한 것이다.

#### 4.2 회로방정식과의 결합

$V_s, R_s, L_c$ 을 각각 입력전압, 회로 저항 및 전기자 권선의 인덕턴스라고 하면 전기회로에 대한 회로방정식은 식(4)와 같다.

$$V_s = R_s i + L_c \frac{di}{dt} + E \quad (4)$$

식(4)에서 E는 FEM으로 계산되어지는 유기기전력이며, 속도 기전력으로 나타난다. 식(3)의 지배방정식에 Galerkin법을 적용하고, 식(4)의 회로방정식을 결합하면 식 (5)와 같은 매트릭스를 얻게 되며 이 식을 풀어 포텐셜과 전류를 구하게 된다.

$$\begin{bmatrix} [S] & [K_{11}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [A] \\ [I] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J_m] \\ [V_s] \end{bmatrix} \quad (5)$$

#### 4.3 추력 계산

무철심형의 경우, 자속밀도가 B인 자계중에 전류 I가 흐르는 도체가 있으면, 이 도체에 작용하는 힘은 플레밍의 왼손법칙에 의해 간단하게 계산할 수 있다. 힘 F는 식(6)으로 표현된다.

$$F = I \times B \quad (6)$$

유한요소로 분할한 도체에 작용하는 힘은, 각 요소에 작용하는 힘  $F_i(x)$ 를 합한 값이 된다. 2차원장에 있어서, 도체의 단위 길이당 발생하는 힘 F는 x방향 성분  $F_x$ 와 y방향 성분  $F_y$ 를 사용하여 다음식으로 구해진다.

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (7)$$

이때

$$F_x = \sum_{i=1}^n f_{ix}(e) = \sum_{i=1}^n J_i(e) \cdot \Delta_i(e) \cdot B_{iy}(e) \quad (8)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^n f_{iy}(e) = \sum_{i=1}^n J_i(e) \cdot \Delta_i(e) \cdot B_{ix}(e) \quad (9)$$

여기서  $J_i(e)$ 와  $\Delta_i(e)$ 는 요소 e의 전류밀도와 면적이며, n은 도체를 구성하는 요소수이다.

#### 4.4 운동방정식의 적용

LDM의 동특성은 서보모터로서의 모터의 성능을 반영하는 중요한 특성이 된다. 식 (10)은 리니어 직류모터의 운동방정식이다.

$$F_x = m \frac{dv}{dt} + k_1 \cdot v + F_{load} \quad (10)$$

여기서 m은 가동자의 질량이며,  $k_1$ 은 무부하손실을 고려한 계수로서 속도에 비례하는 것으로 가정하였으며, 무부하손실이 정격추력의 5%가 되도록 설정하였다.  $F_{load}$ 는 부하를 나타낸다. 이제 식(10)으로부터 계산된 힘  $F_x$ 로부터 속도 v와 변위 S를 차분근사법을 사용하여 구할 수 있다. 다음 그림은 전체적인 흐름도이다.

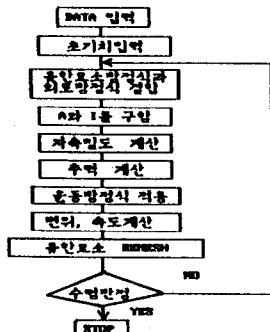


그림 6. 흐름도  
Fig. 6. Flow Chart for Analysis

4.5 시간 미분항의 처리

전류와 속도, 변위의 시간 미분항들을 처리하는 방법에는 차분근사법과 복소근사법이 있다. 본 연구에서는 과도특성을 해석하기 위하여 차분근사법을 이용하였다. [7], [8]

시간 t에서  $I_t$ 가 참값이라고 가정하면  $\Delta t$ 시간 후의  $t+\Delta t$  시각에 있어서의 근사치  $I_{t+\Delta t}$  를 구하기 위해서는  $I_t$ 와  $I_{t+\Delta t}$  사이의 미분식을 근사화해 줄 수 있는 관계식이 필요하다.

이 관계식을 구하기 위하여 다음과 같은 가정을 둔다.

- 1)  $\Delta t$  구간에서는 현상이 선형적으로 변화한다.
- 2) 이 직선의 기울기  $(I_{t+\Delta t} - I_t) / \Delta t$  는 구간내의 적당한 시각  $t_0$ 에서의 곡선의 접선기울기와 같다.

본 연구에서는 시간  $t_0$ 를  $t + \Delta t$ 로 하는 후퇴차분근사법을 이용하였다. 따라서 전류의 시간 미분항은 식(11)로 표현된다. 속도와 변위에 대한 미분항도 식(11)과 같은 형태로 나타난다.

$$\frac{\partial I_{t_0}}{\partial t} = \frac{\partial I_{t+\Delta t}}{\partial t} = \frac{I_{t+\Delta t} - I_t}{\Delta t} \quad (11)$$

5. 특성 고찰

5.1 자속 분포도

그림 7.은 해석 모델의 자속 분포도이다. 절점의 수는 1377개, 요소의 수는 2639개로 하였다. 해석 모델에서는 2상이 통전된 상태이다.

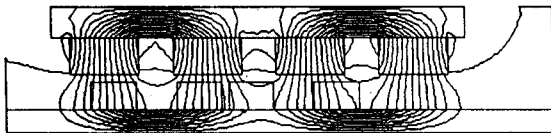


그림 7. 자속분포도  
Fig. 7. Flux Distribution

5.2 과도상태에서의 특성 고찰

특성고찰을 위한 회로정수로 권선저항은 10.5[Ω], 인덕턴스는 3[mH], 가동자 중량은 0.7[kg]으로 하였으며, 인가전압은 10[V]로 하였다.

5.2.1 무부하 특성

이 상태에서는 운동방정식, 식(10)에서  $F_{load}$ 가 0가 된다. 따라서 그림 8.과 같이 전압인가 순간에 전류가 피크치에 도달하였다가 감소하여 무부하전류치에 도달함을 알 수 있다. 또한 속도는 완만이 증가하여 최대치로 수렴해 감을 알 수 있다.

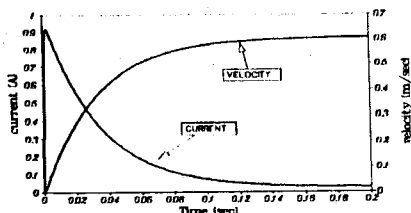


그림 8. 시간에 따른 전류, 속도 변화(무부하시)  
Fig. 8. Characteristics of Current with respect to time (No-Load)

5.2.2. 구속 특성

구속 상태에 있을 때, 속도는 0이 되므로 전류가 서서히 증가하여 구속전류로 된다. 그림 9.에서는 구속시의 전류의 시간적 변화를 나타내었다.

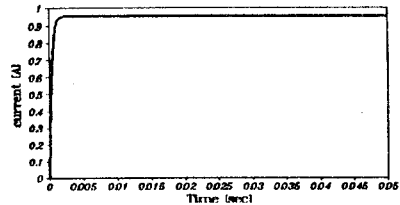


그림 9. 시간에 따른 전류 특성 (구속시)  
Fig. 9. Characteristics of Current with respect to time (locked status)

5.2.3 부하 특성

모터의 정격에서의 과도특성을 살펴보면 식(10)에서  $F_{load}$ 를 정격부하인 10[N]으로 하면 그림 10.에서와 같이 정격전류 부근에서 안정화 됨을 알 수 있다.

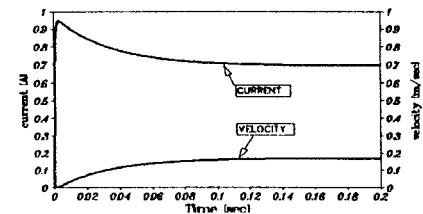


그림 10. 시간에 따른 전류, 속도 특성 (정격 부하시)  
Fig. 10. Characteristics of Current with respect to time (Rated Load)

또한 영구자석 계자형 모터의 경우, 계자자속은 일정하다고 볼 수 있으므로 속도-추력 및 전류-추력특성이 직선적으로 변화한다고 가정할 수 있다. 따라서 무부하특성과 구속특성으로부터 그림 11.과 같은 특성곡선을 얻을 수가 있으며, 이로 부터 정속제어가 가능한 부하범위를 알 수 있다.

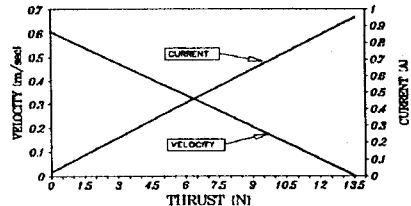


그림 11. 전류-추력, 속도-추력 특성곡선  
Fig. 11. Current vs. Thrust, Velocity vs. Thrust

6. 결론

본 연구에서는 일반적인 영구자석 계자형 브러시리스 모터의 자기회로 설계방법을 제안하였으며, 그 타당성을 유한요소법과 비교하여 검증하였다. 그리고 리니어 직류 모터의 과도특성과 응답특성을 해석하기 위해 전압원을 고려한 유한요소법과 운동방정식을 결합하여 입력에 대한 전류, 속도변화를 고찰하였다. 따라서 본 연구의 결과가 자기회로를 설계하고, 제어회로를 포함한 전체시스템의 동특성해석을 수행하여, 효율과 제어 응답성이 좋은 모터를 설계하는데 좋은 자료로 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

참고논문

1. 大川 光吉, 永久磁石 回轉機, pp20~62(昭50), 總合電子出版社
2. 任達 鎔, 電氣界의 有限要素法, 동명사
3. 大川 光吉, 永久磁石磁氣回路의 設計, 特性 計算法
4. National Technical Report, Vol. 29, No.4, Aug. 1983
5. 日本電氣學會, 리ニア모-타의 應用
6. 白木 學, 圖解리니아사-모-타와 시스템設計
7. 中田高義, "有限要素法による非線形過度磁界解析", 日本電氣學會, pp.380~386, 昭59
8. 崔仁好, 高彰燮, 鄭泰慶, 韓松輝, "슬레노이드 액츄에이터 電磁氣 시스템의 有限要素 解析"