

MOVING MAGNET형 LDM의 설계해석

백수현* 박영호* 이준철* 함중걸**

*동국대학교 전기공학과 **생산기술연구원

Design and Analysis of Moving Magnet Type LDM

S.H. Baek* Y.H. Park* J.C. Lee* J.G. Ham**

*Dongguk Univ. **KAITECH

Abstract

This study presents a design methods for linear DC motor and the designed motor is analyzed. To design the linear DC motor, magnetic circuit design is introduced and characteristics of LDM is analyzed by using the voltage equation and dynamic equation. And the thrust characteristics are investigated using MEXWELL 2D.

1. 서론

회전형 모우터는 회전방향으로 무한 연속운동을 하지만 리니어 모우터는 구조적으로 길이가 유한하여 단부가 존재하므로 end effect가 있게되며 또한 공극이 커서 공극의 자속분포, 추력특성에 영향을 받아 효율이 떨어지는 단점이 있다. 그러나 리니어 모우터를 응용하는 경우는 직접 직선형의 구동력을 발생하므로 기계적인 변환장치가 필요치 않아 에너지 손실이나 소음을 발생하지 않은 것은 물론 운전속도에도 제한을 받지 않은 잇점이 있다. 또한 기기의 고성능화가 요구되고 있는 가운데 리니어 직류모우터(LDM)는 제어성, 응답성이 뛰어나 정밀 위치제어를 필요로 하는 OA, FA분야와 자동차 분야에 광범위하게 적용되고 있다.

LDM에는 자계 발생원으로서 영구자석을 이용하는 것과 전기자 여자에 의한 것이 있다. 전기자 여자 LDM은 차량 구동용 모우터등 비교적 대형기에 채용되며, 영구자석 가동형(MM TYPE) LDM은 가동부에 급전기구를 필요로 하지 않고 고성능 영구자석의 개발로 고정자를 포함한 장치 전체의 경량화가 가능하여 증, 소형기에 응용되며, 위치 및 속도검출기와의 조합으로 장스트로크화가 가능하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 LDM 설계시 요구되는 자기회로 구성 및 특성해석에 필요한 기본이론을 도출하고 설계된 LDM에 대하여 유한요소법키지인 MAXWELL 2D를 이용하여 자계분포 특성을 해석하여 공극자속 분포, 발생추력에 대한 분석을 통하여 체계적인 LDM설계의 가능성을 제시 하였다.

2. 영구자석 자기회로

리니어 직류모우터의 자기회로 구성은 전체를 소형, 경량화 하여 입력에 대한 효율이나 재료의 사용효율을 높이는데

중요한 역할을 한다. 영구자석 재료로서는 페라이트, 알니코, 회로류계 자석등이 있고 이들의 특성차에 따라 최적의 자석배치, 형상, 자화방향등이 다르게 된다. 그림 1의 좌측은 영구자석 감자곡선을 나타내며, B 와 H의 적은 자석이 가진 단위 체적당의 자기에너지를 나타내며 그림 오른쪽의 곡선과 같이 된다. 이 에너지가 코일이 존재하는 공극부에 자기에너지원으로 공급된다. 따라서 (BH)가 최대로 되는 최대 에너지적 (BH)max 점에서 자석을 사용하면 필요한 자석의 체적을 최소로 할 수 있어서 효율이 좋다. 또한 최대 에너지적 이 큰 재질을 사용함으로써 고추력을 얻을 수 있다.

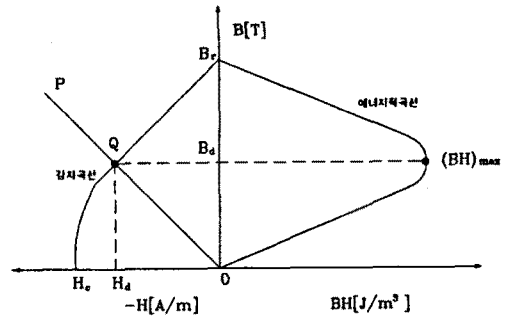


그림 1 영구자석의 감자곡선과 에너지적 곡선

그림 1에서 동작점을 나타내는 퍼미넌스 계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{B_d}{\mu_0 H_d} = \frac{l_m A_m \sigma}{A_m l_g \lambda} \quad (1)$$

여기서, B_d , H_d 는 동작점의 자속밀도[T], 자계의 세기 [A/m], $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 은 진공의 투자율, l_m , A_m , l_g , A_g 는 각각 자석의 공극길이와 단면적이며, σ 는 누설계수, λ 는 기자력 손실계수를 나타내며 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{\phi_m}{\phi_g} = \frac{B_d A_m}{B_g A_g} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{H_m}{H_g} = \frac{H_d l_m}{H_g l_g} \quad (3)$$

여기서, ϕ_m 는 유효자속, H_g 는 기자력을 나타낸다.

따라서 LDM설계시 영구자석 제질과 치수를 결정하고 이로부터 영구자석이 최대 에너지적을 갖도록 자기회로를 구성함으로써 고성능화가 가능하며, 코일의 단면적과 턴수는 유한요소법과 점속함으로써 정격추력 및 정격전류로부터 계산이 가능하다.

3. 특성해석

리니어 직류모터는 서보부프에 포함되어 사용되는 경우가 많다. 이 경우 고속 응답성이 요구되며 이때 LDM의 고속 응답성을 검토하는 경우 미분방정식으로 표현되는 회로방정식과 운동방정식으로부터 모터의 동특성이 고려되어야 한다.

$$L \frac{dI}{dt} + RI + K_e \cdot v = E \quad (4)$$

$$(M_1 + M_2) \frac{dv}{dt} + K_d \cdot v + F_f = F \quad (5)$$

여기서, L은 코일의 인덕턴스, I는 코일에 흐르는 전류, R은 전기자 권선저항, K_e 는 역기전력상수, M_1 은 가동자의 질량, M_2 는 부하질량, v는 가동자의 속도, F_f 는 마찰력, K_d 는 점성 마찰계수이다. 그런데 전기자 권선 인덕턴스가 매우 작다고 한다면 식(4)와 (5)는 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$E = K_e \cdot v + RI \quad (6)$$

$$K_f \cdot I = (M_1 + M_2) \frac{dv}{dt} + K_d \cdot v \quad (7)$$

여기서, K_f 는 추력계수이다.

t=0에서 v=0 이라고 한다면, 가동자의 이동속도는 다음과 같다.

$$v = v_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (8)$$

여기서, 정상상태 속도 v_s , 기계적 시정수 τ 는 아래와 같다.

$$v_s = \frac{K_f \cdot E}{K_e \cdot K_f + K_d \cdot R} - \frac{R \cdot F_f}{K_e \cdot K_f + K_d \cdot R} \quad (9)$$

$$\tau = \frac{R (M_1 + M_2)}{K_e \cdot K_f + R \cdot K_d} \quad (10)$$

기계적인 시정수는 가동자의 부하가 최대속도의 63%에 이를 때까지 소요되는 시간이다.

4. 시작기 구성

시작기는 고응답, 고추력, 고속, 장수명인 DC 브러시리스 방식으로 장스트로크화가 가능하게 하였으며 가동자용 자석은 회로류계 자석을 사용하여 가동자의 소형화와 고추력화를 추구하였다. 다음 표1은 본 LDM의 계원을 나타내고 있다. 본 LDM의 구조는 추력리플을 저감하고 안정된 추력을 발생하도록 3상 4극식으로 하였으며 코아리스 형으로 코강토크가 발생하지 않는 잇점이 있으며 고정자와 가동자에는 각각 요크를 부착하여 자기회로를 폐회로로 구성하므로 효율을 높이고 고추력을 발생하도록 하였다. 다음 그림2는 자석 및 코일의 배치관계를 나타내고 있다. 이때 여자코일은 3상 Y결선하

표 1. LDM의 계원

항 목	치 수
영구자석치수	12 × 50.8 × 5 [mm]
영구자석 사양 (회로류계 N-33H)	최대에너지적: 248 [KJ/m ³] 잔류자속밀도: 1.13 [T] 보자력 : 844 [KA/m]
공극	1 [mm]
공극자속밀도	0.47 [T]
코일치수	3 × 66.8 × 24 [mm]
코일턴수	180 턴
코일피치	24 [mm]
자극피치	18 [mm]

여 여자의 결환을 각 상단위로 행하도록하여 제어가 용이하게 구성하였으며 여자방법은 자석의 바로 밑의 코일은 추력효율이 나쁘므로 이 위치에는 코일은 여자하지 않고 나머지 2상을 여자하는 3상 120° 통전 인버터 방식을 이용하여 가동자에 추력이 발생하게 하는 3상 결선 2상 여자방식을 채용하였다.

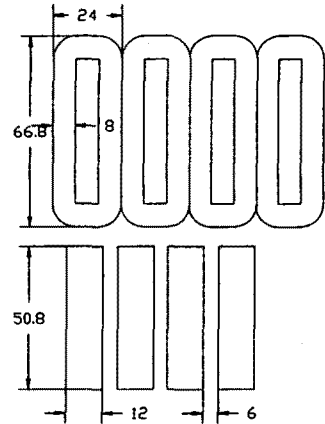


그림 2. 영구자석과 코일의 배치관계

5. FEM에 의한 자체해석

본 논문에서의 자체해석은 유한요소 해석 패키지인 MAXWELL 2D를 이용하여 공극자속 분포, 발생추력 특성을 해석 하였다. 그림 3은 유한요소 해석 모델과 이때의 자속분포를 나타내며 그림4는 공극자속 분포를 나타내고 있다. 본 모델에 대한 추력의 계산은 FEM해석결과를 이용하여 다음과 같은 체적 적분식을 이용하여 발생추력을 계산하였다.

$$F = \int_{vol} J \times B \, dv \quad (11)$$

그림 5는 코일 한상에 대해 전류 1[A]를 흘릴때 가동자를 2mm씩 이동 시키면서 이때 발생하는 추력을 계산한 값이며 대칭성을 고려하여 전 해석구간의 반에 대해서만 해석하였다. 이로부터 직선형 기기에서 필연적인 단부효과로 인한 추력리플, 전기자 코일의 위치관계에 따른 발생추력의 분포 및 여자패턴 전환점을 알 수 있다. 또한 이로부터 추력상수 K_f 를 구할 수 있다. 다음 그림6은 최대추력을 발생하는 점에서 여자전류 변화에 대한 정추력특성을 해석하였으며 실측

치와 비교하였다.

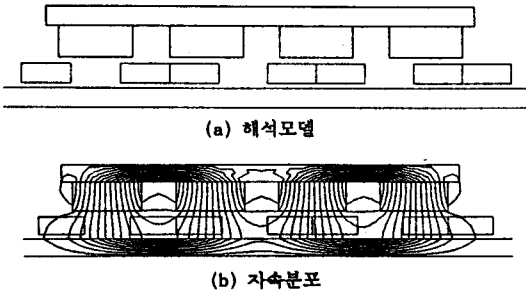


그림 3. 유한요소 해석모델 및 자속분포

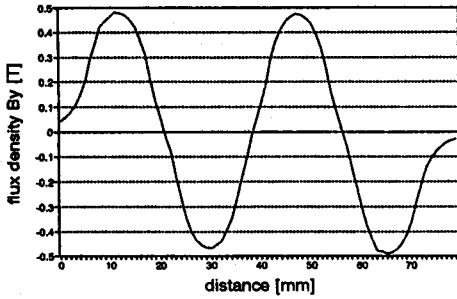


그림 4. 공극자속 분포

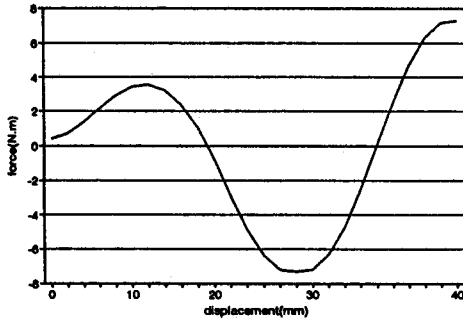


그림 5. 코일 한상에서의 추력분포

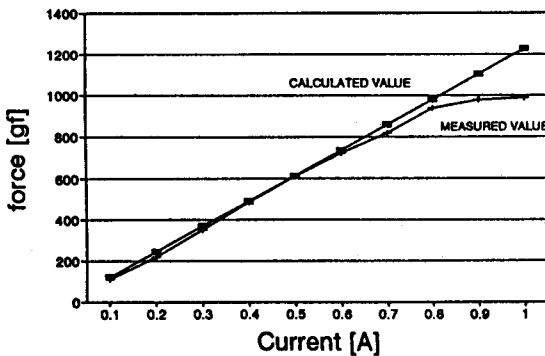


그림 6. 여자전류 변화에 대한 발생추력

6 결론

본 연구에서는 영구자석 제자형 브러시리스 리니어 직류형 모터의 자기회로 설계방법 및 특성해석에 대하여 살펴보았으며 고정자와 가동자의 위치관계에 따른 추력특성을 분석함으로써 LDM의 성능 분석에 대한 가능성을 제시하였다. 차후의 과제는 브러시리스형 LDM에서 존재하는 추력리플의 저감에 관한 연구와 속도 및 위치센서와의 조합으로 제어계 구성에 관한 연구가 진행되어야 한다.

참고문헌

1. "리니어모터 응용 핸드북", 도서출판 세화, 1988
2. P.Y. Hu, "Linear actuator design" INCREMENTAL MOTION CONTROL P173-188, 1975.
3. 白木 學, 圖解リニアサ-ボモ-タとシステム設計
4. 日本電氣學會, 리ニア모-타とその應用
5. T. Umemori, M. Kawashima, M. Oda, S. Ohsawa
"Development of D.C. Linear Motor" -Fundamental Construction and Feasibility- IEEE Trans. on PAS Vol. PAS-98, No. 4 July/Aug 1979