

부하를 고려한 LDM의 동특성 해석에 관한 연구

강규홍, 염상부, 홍정표, 김규탁, 정종기, 하근수
 창원대학교 전기공학과, 전자부품연구소

Design and Dynamic Analysis of LDM by using FE Analysis

Gyu-Hong Kang, Sang-Bu Yeom, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, Joong-Gi Jung, Kyeun-Su Ha
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won Univ., KETI

Abstract - In this study, dynamic analysis of Linear DC motor has been performed. Dynamic characteristic is carried out from coupling the electrical circuit equation and mechanical kinetic equation. Trust constant and circuit parameters are obtained by FE analysis and static characteristic experiment. From the previous results, dynamic analysis is performed and the appropriateness of analysed result is verified by comparing with experimental result.

1. 서 론

직선운동을 필요로 하는 시스템에 에너지의 변환 없이 직접 동력을 전달이 가능한 리니어 모터의 요구가 증가되고 있다. 위치 및 속도제어가 용이한 브러쉬레스 리니어 DC 모터(LDM)는 가동자의 구조에 따라 가동코일형과 가동자석형으로 분류되어진다. 가동자석형의 경우 고속운전이 가능하나 가동자의 이동에 따라 각 권선에 전원을 on-off해야 하는 장치에 의해 시스템이 복잡해지고, 자기회로가 이동하기 때문에 자기회로가 불안정하여 장(長)스트로크의 경우 속도 및 위치제어가 어렵다. 반면에 가동 코일형은 시스템 cost가 상승하고 가동자에 전원이 연결된 상태로 고속운전에 불리하지만 시스템의 구조가 간단하고 자기회로가 안정되어 있어 제어성능을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. [1]

따라서, 본 연구에서는 X-Y Table용 양측식 가동 코일형 LDM의 자기회로 및 동특성 해석을 수행하였으며 설계, 제작된 전동기로부터 회로정수 및 추력, 기전력 상수등을 실험으로부터 결정하여 동특성 해석한 결과를 비교, 분석하였다. 자기회로 해석으로부터 회로정수를 산정하기 위해서 수치해석적인 방법으로 주로 적용되고 있는 유한요소법을 적용하였으며 전압방정식과 기계적 운동방정식을 결합하여 동특성 해석을 수행하여 해석의 타당성을 입증하였다. [1][2]

2. 시스템의 제원 및 모델링

X-Y Table용 LDM의 구조는 양측식으로 가동코일형이며, 3상 Bi-polar 구동방식으로 편축만을 나타낸 구조와 기계적 제원 및 시스템 사양을 그림 1과 표 1에 나타

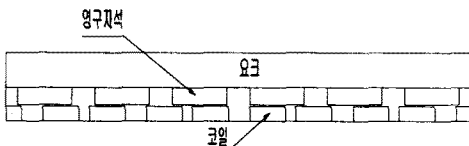


그림 1. 리니어 DC 모터

표 1 전동기의 제원 및 시스템 사양

항목	수치(단위)	항목	수치(단위)
전압	170(Vmax)	적층 폭	100(mm)
일력전류	1.8(A)	상당 Turn수	302
정격추력	104(N)	도체 직경	0.75(mm)
정격속도	1.5(m/s)	coil 한번의 폭	23(mm)
자극비	0.7	coil 높이	8.3(mm)
마그네트 폭	35(mm)	권선계수	0.7
마그네트 두께	5(mm)	요크 두께	14(mm)
시스템 요구사항		최대 가속도	5(g)
전체 스트로크	650(mm)	지지구조	리니어 가이드
유효 스트로크	600(mm)	부하 중량	19(kg)

시스템의 요구사항으로부터 가동자의 운전패턴을 그림 2에 나타내었다. 운전 구간은 가속과 정속, 감속구간으로 나누어 설정하였고 가속 시간은 0.144(sec)를 만족하여 하고 전체 이동시간은 1.35(sec)가 된다.

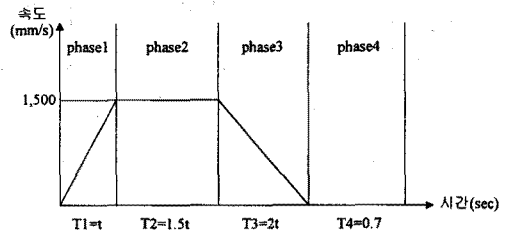


그림 2. 운전패턴

가동자의 추력을 결정하기 위하여 리니어 가이드의 마찰계수 D 를 0.01, 가동자와 고정자 사이의 흡인력 F_{at} 를 1000(N)이라고 가정하여 운전패턴에서 각 구간별 요구 추력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 F_{T1} &= F_f + F_a = D \times (mg + F_{at}) + m \frac{v}{T1} \\
 F_{T2} &= F_f = D \times (mg + F_{at}) \\
 F_{T3} &= F_f - F_a = D \times (mg + F_{at}) - m \frac{v}{T3}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

가동자의 정격추력 F 는 식(2)로부터 구하게 된다.

$$F = \sqrt{\frac{\sum F_i^2 T_i}{\sum T_i}}
 \tag{2}$$

3. 유한요소법에 의한 특성해석

3.1 유한요소 해석

내었다.

LDM의 자속밀도와 추력특성으로부터 동특성 해석을 위한 회로정수들을 산정하기 위해 유한요소해석을 하였다. 양측식 구조의 편축만을 해석 대상으로 정하여 자연 경계조건을 적용하였고 철심 상부에는 고정경계조건을 측면은 주기경계조건을 부여하였다.

2차원 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -(J_0 + J_m) \quad (3)$$

여기서 A, J_0, J_m 은 각각 $\vec{A}, \vec{J}_0, \vec{J}_m$ 의 z방향 성분이다. J_m 은 영구자석의 등가자화전류의 형태로 표현한 식이다. 도체의 단위길이 당 발생하는 힘의 x 및 y방향 성분 F_x 와 F_y 는 Lorentz force로 계산하였다.

$$F_x = \sum_{i=1}^n f_{iv}^{(e)} = \sum_{i=1}^n J_i^{(e)} \Delta_i^{(e)} B_v^{(e)} \quad (4)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^n f_{iv}^{(e)} = \sum_{i=1}^n J_i^{(e)} \Delta_i^{(e)} B_v^{(e)} \quad (5)$$

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

유기전력은 도체에 쇄교하는 총 자속으로 부터 산정하였고 인덕턴스는 에너지 섭동법을 이용하여 구하였다. End coil의 누설인덕턴스는 Liwischitz에 의해 계산된 값을 변형하여 산정하였으며 그 과정을 그림 3과 식 6에 나타내었다.

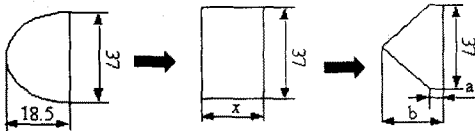


그림 3. End coil 누설인덕턴스 산정과정

$$L_0 = 4 \mu_0 N^2 \times 1.2 \times K_x^2 \left(a + \frac{b}{2} \right) \quad (6)$$

여기서 N 은 도체수이며 K_x 는 권선계수이다.

3.2 유한요소 해석 결과

LDM의 자속밀도 특성을 그림 4에 나타내었다. 구형파 전류구동의 경우 추력 리플을 최소화 하기 위해서는 가동자의 위치별 공극자속밀도 분포도 구형파가 되어야 한다. 그러나 공심코일에서는 코일의 면적도 자기적인 공극이므로 코일 중심에서의 자속밀도는 완벽한 구형파를 이루지 못해 추력 리플이 발생한다.

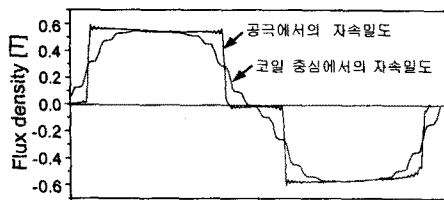


그림 4. 자속밀도 분포

2상 통전구간 동안의 추력특성을 검토하기 위해서 moving line technique를 적용하여 전기각 60° 를 이한 경우의 등포텐셜도를 그림 5에 나타내었다. 가동자의 이동에 따른 추력특성은 그림 6에 나타내었다. 추력 리플은 13 [N]이고 평균 추력은 104[N]이 발생한다.

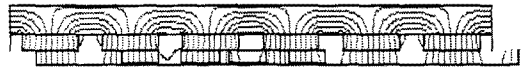


그림 5. 이동 적용시의 등 포텐셜도

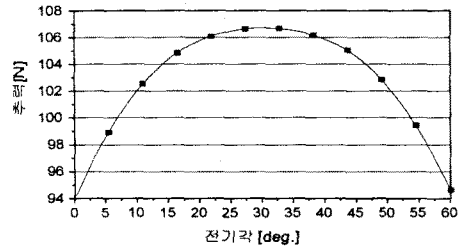


그림 6. 이동변위에 따른 추력 특성

4. 실험에 의한 LDM의 특성

해석의 타당성을 실험치와 비교, 분석하기 위한 LDM의 시작기를 그림 7에 나타내었다.

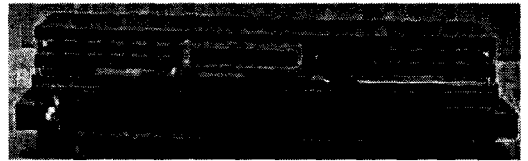


그림 7 LDM의 시작기

무부하 상태에서의 인덕턴스와 속도기전력, 공극 및 coil 중심의 자속밀도 특성은 그림 8, 9, 10에 나타내었다. 속도기전력은 가동자에 폴리를 연결하여 일정속도로 이동하면서 측정하였고 추력특성은 가동자의 위치별로 load cell을 연결하여 측정한 결과를 그림 11에 나타내었다.

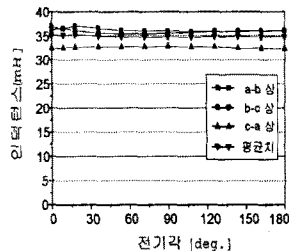


그림 8. 전기각에 따른 인덕턴스

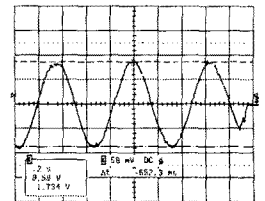
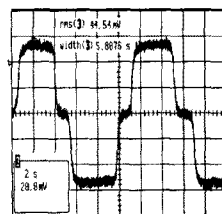
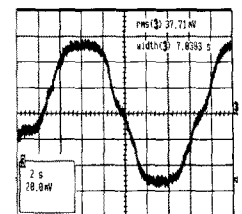


그림 9. 속도기전력 파형



a. 공극



b. coil 중심

그림 10. 자속밀도 분포

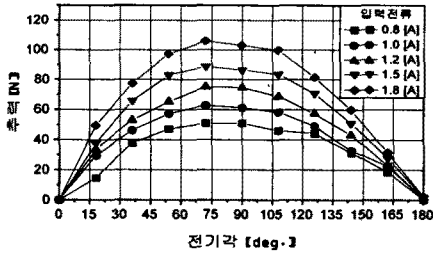


그림 12. 전기각에 따른 추력분포

5. 동특성 해석

LDM의 과도상태에서의 동특성을 해석하기 위해서 전압방정식과 기계적 운동방정식의 모델링으로부터 해석하였다.

$$V = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + k_e v(t) \quad (7)$$

$$F = k_f i(t) = M \frac{dv(t)}{dt} + Dv(t) + F_f \quad (8)$$

여기서 k_f 는 추력상수이고 M 은 가동자 질량, D 는 무부하 손실을 고려한 마찰계수, F_f 은 부하를 나타낸다. 전압방정식을 구성하는 회로정수, 인덕턴스와 기전력상수는 초기 해석모델의 유한요소 해석의 결과와 제작된 전동기의 실험치를 각각 적용하여 동특성 해석을 하였다. 동특성 해석의 파라미터들을 표 2에 나타내었다.

표 2 동특성 해석을 위한 파라미터

	초기치	제작치		초기치	제작치
V	108.6[V]	D	1.25	F_f	104[N]
R	7.82[Ω]	M	19	k_f	57.8
				k_e	63
				L	27.4[mH]
					34.8[mH]

과도상태에서 속도에 대한 미분방정식의 해를 구해서 전류 및 전류의 변화로부터 속도 및 가속도, 추력 특성을 해석하였다. 전류의 변화량으로부터 속도에 대한 미분방정식으로 표현하면 식 (9)와 같다.

$$\frac{LM}{k_f} \frac{d^2 v(t)}{dt^2} + \left[\frac{LD}{k_f} + \frac{MR}{k_f} \right] \frac{dv(t)}{dt} + \left[\frac{RD}{k_f} + k_e \right] v(t) + \frac{F_f R}{k_f} - V = 0 \quad (9)$$

미분방정식의 해로부터 시간에 따른 추력, 속도특성을 그림 13, 14에 나타내었다. 일정전압을 인가한 경우 실험치의 역기전력상수는 작지만 인덕턴스가 커 전류가 해석치보다 적다. 따라서 실험치의 발생추력이 해석치보다 적어 속도 및 가속도 특성이 저하함을 그림 14에 나타내었다. 그림 15와 16은 추력 대 속도, 전류 특성과 부하중량에 따른 속도특성을 나타내었다. 서보용 기기의 정속운전 가능한 범위를 알 수 있다.

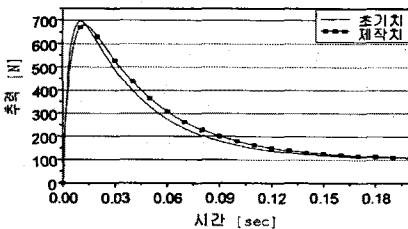


그림 13. 시간에 따른 추력특성

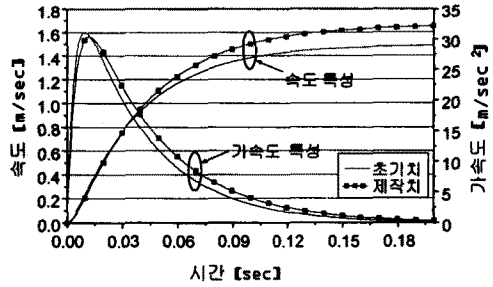


그림 14. 시간에 따른 속도 및 가속도 특성

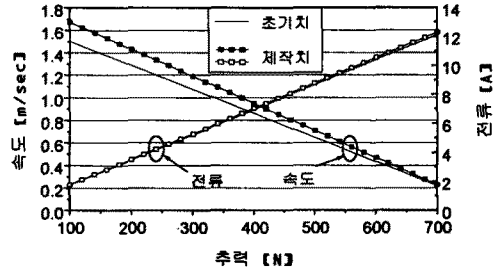


그림 15. 추력 대 속도, 전류 특성

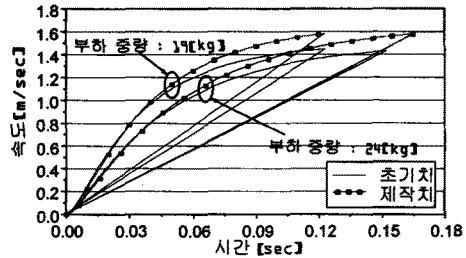


그림 16. 부하중량에 따른 속도 특성

6. 결 론

본 논문에서는 유한요소 해석으로부터 회로정수들을 산정하여 전압방정식을 구성하고 기계적 운동방정식과의 결합하여 정밀 서보시스템용 LDM의 해석 및 동특성을 수행하였다. 동특성 해석 결과 실험치에 의한 결과가 해석치보다 가속능력이 다소 저하함을 알 수 있다. 이는 실제 제작된 시작기의 정특성 시험으로부터 구한 회로정수들을 실험 결과와 비교 분석한 결과 추력특성은 해석치와 유사하나 속도 기전력상수와 인덕턴스는 다소 차이가 발생하였다. 즉 정격전류 인가시 전기자 전류에 의한 반작용으로 해석치가 다소 적어 향후 부하 상태에서의 인덕턴스를 산정하여 동특성을 수행할 예정이다.

(참 고 문 헌)

- (1) BASAK, "PermanentMagnet DC Linear mo 1996
- (2) SALON, "FINITE ELEMENNT ANALYSIS ELECTRICAL MACHINES", 1995
- (3) J. F. Giewas, "Permanent Magnet Motor Technology", Marcel Dekker, Inc., 1997
- (4) Dal-Ho Im, Jung-Pyo Hong and Sang-Baeck Yoon, "A Study on the Optimum Design of Ladder Type LIM Considering Space Harmonics", Procd. of ISEM '95, pp.210-213, 1995