

전압구동 3차원 등가자기회로망법을 이용한
선형 직류전동기의 동특성 해석

염상부, 하경호, 홍정표, *허진
창원대학교 전기공학과, *한양대학교 전기공학과

Dynamic Characteristics Analysis of Linear DC Motor Using 3D
Equivalent Magnetic Circuit Network Method by Voltage Driven

Sang-Bu Yeom, Kyung-Ho Ha, Jung-Pyo Hong and *Jin Hur
Dept. of Electrical Eng., Changwon Nat'l Univ., *Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ.

Abstract - This paper presents the dynamic characteristics Linear DC Motor(LDM) using 3 Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network Method(3-D EMCN) by voltage driven. The movement of mover substitutes for the movement of magnetization in permanent magnet expressed by Fourier series. The Dynamic characteristics are carried out from coupling the electrical circuit equation and mechanical kinetic equation.

1. 서론

일반적으로 전장장의 해석방법은 해석적 방법의 일종인 퍼미언스법과 수치해석적방법인 유한요소법 및 경계요소법등이 있다. 본 논문에서는 재질의 비선형성을 고려할 수 있고, 정밀하고 빠르게 동특성 및 과도 특성을 해석할 수 있는 3차원 등가자기회로망법(Equivalent Magnetic Circuit Network Method : EMCN)을 사용하였다[1],[2].

3차원 유한 요소해석은 치와 슬롯의 구조를 3차원적으로 표현할 수 있어 비교적 정확한 계산이 가능하나 선처리 작업이 힘들고 많은 요소절점수로 인해 행렬연산이 방대해져 계산시간이 많이 소요되며 동특성 해석시 이동자의 이동을 고려하기 위해 요소를 재분할하여야 하는 단점이 있다. 3차원 등가자기회로망법은 이러한 문제점들을 보완한 것으로 3차원 유한 요소법에 비해 선처리 작업이 간편하고 계산 시간이 적은 장점을 가지고 있다. 또한 이동에 따른 동특성 해석시 영구자석의 상대적 위치에 따라 변화하는 자화분포를 인가하여 초기 요소를 그대로 사용하므로 요소 재분할의 필요가 없어 해석 시간을 줄일 수 있는 기법이다[3].

본 논문에서는 구동함수를 전압 구동으로 하고, 3차원 등가 자기회로망법을 이용하여 양측식 가동 코일형 LDM의 동특성 해석을 수행하였다.

동특성 해석은 3상 바이폴라 구형과 전압을 인가하여, 전기계의 전압방정식과 기계계의 운동 방정식을 결합하여 미소구간의 운동은 등가속도 운동이라 설정을 하여 수행하였다. 설정된 전압에 의해 양측식 가동 코일형 LDM의 미소구간의 전류를 계산하고, 3차원 등가자기회로망법에 의해 자속 밀도 및 추력을 계산하여, 운동방정식에 의해 미소구간의 속도와 구간의 이동시간을 계산한다. 미소 구간의 이동시간에 의해 역기전력을 구한 후, 전압방정식을 만족하는 전류를 재 계산하여 다음 미소구간의 전류로 설정을 한다. 이런 과정을 계속 반복하여 설정된 전압에 따른 양측식 가동 코일형 LDM의 전류, 속도, 역기전력등의 과도 및 정상상태에서의 특성을 해석하였다. 단, 이때 이동자의 이동은 요소의 재분할 과정을 거치지 않고, 영구자석의 자화 분포의 이동으로 대체하였다[3],[4].

2. 시스템의 제원 및 해석 모델

해석 대상인 양측식 가동 코일형 LDM은 전장 1[m]이고, 코일간 거리는 6.67[mm]이다. 해석 모델의 정면도는 그림 1과 같이 영구자석 6극분과 이동자 권선 3상을 설정하였다. 구동 방식은 3상 바이폴라 120도 방식이고, 시스템의 제원은 표 1에 나타내었다.

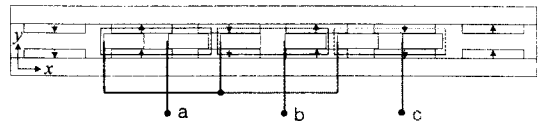


그림 1. 해석모델

표 1. 전동기의 제원 및 시스템 사양

항목	수치[단위]	항목	수치[단위]
최대공급전압	170 [V]	적층 폭	100 [mm]
정격 전압	108 [V]	상당 Turn수	302
최대 속도	3.0 [m/s]	도체 직경	0.75 [mm]
정격속도	1.5 [m/s]	coil 한변의 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]

3. 해석 이론

3.1 3차원 등가 자기회로망법

3차원 등가 자기회로망법으로 해석을 하기 위하여 그림 1의 해석 모델의 요소 분할을 위해 직육면체 요소를 이용하였고, 각각의 요소의 중심 절점에 의해 그림 2와 같이 자기회로망을 구성하였다. 그림 2는 한 절점에서의 3차원 등가 자기회로망법의 구성 및 자속의 흐름도를 나타낸것이다[1].

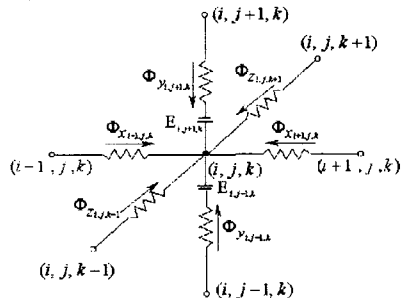


그림 2. 한 절점에서 EMCN의 구성 및 자속의 흐름도

3차원 등가자기회로망법은 기존의 자기회로에 유한요소법의 수치적 기법을 도입하고 분포정수로 퍼미언스를, 계변수로, 자기스칼라 포텐셜을 사용하여 기기의 분포적

인 특성을 해석할 수 있는 방법으로서 그 절차는 다음과 같다[4].

- 가. 이동자 권선 및 영구자석의 구조를 그대로 두고 해석영역을 매질의 종류에 따라 구분한 후 각 영역을 격자요소로 분할한다.
- 나. 각 요소의 중점에 절점을 잡고 절점 사이를 각 인접요소의 퍼미언스, 영구자석과 전기자 권선의 기자력으로 연결하여 3차원 등가자기회로망을 구성한다.
- 다. 각 절점에 대해 자속과 자기저항의 곱이 기자력과 등가라는 조건과 자속의 연속조건으로부터 절점방정식을 구성한다.
- 라. 절점방정식을 조합한 계 방정식으로부터 전체 해석 영역의 각 절점에 대한 자위를 계산한다.
- 마. 이때 구동벡터인 각 요소에서의 기자력은 영구자석 잔류자속밀도와 전기자권선의 기자력으로부터 구하여 계산된 각 절점의 자위와 절점사이의 자기저항과 단단면적으로부터 자성재질의 비선형 포화특성을 고려한 자속밀도를 계산하여 추력등을 계산한다.

3.2 동특성 해석

본 논문에서 동특성 해석에 적용한 회로 방정식과 운동 방정식을 나타내면 식(1), (2)와 같다. 입력 전압은 3상 바이폴라 구동이고, 본 해석 모델의 실제 적용에서는 부하가 없으므로 식(2)의 운동 방정식에서 부하 (f_{load})는 0으로 설정하였다. 코일 엔드링 부분의 누설 인덕턴스는 Liwaschitz수식에 의해 계산하였다.

$$V_i = I_i R + L \frac{dI_i}{dt} + NB_i l_i v_i \quad (1)$$

$$f_i = m a_i + k_f v_i + f_{load} \quad (2)$$

여기서, V_i 는 입력전압, I_i 는 전류, R 는 선간저항, v_i 는 속도, L 는 권선 엔드링부분 인덕턴스, N 는 상당턴수, k_f 는 손실계수, f_i 는 발생추력, m 은 가반중량, a_i 는 가속도, f_{load} 는 부하이고, B_i 는 자속밀도, l_i 는 적층길이이다.

3상 바이폴라 구형과 전압에 의한 동특성 해석을 하기 위하여 이동자의 이동거리를 매 스텝마다 일정하게 두고 일정한 미소구간에 대하여 이동자가 운동을 시작하는 시점부터 정상상태에 도달할 때까지의 각 미소구간의 시작지점의 속도와 끝지점의 속도를 계산하였고, 미소구간의 이동시간을 계산하였다.

미소구간의 시작하는 지점에서 계산된 입력 전류 및 영구자석의 기자력을 인가하여 3차원 등가 자기회로방법에 의해 자속밀도를 계산하여 로렌츠의 힘의 방정식으로부터 추력을 구한다. 그리고, 식(2)의 운동 방정식과 물리학의 등가속도 운동에서 속도를 위치에 관계시키는 식(3)에 의하여 미소구간의 시작 지점의 속도와 힘을 안다면 미소구간의 끝나는 지점의 속도를 식(4)에 의해 구할 수 있다.

$$v_i^2 = v_{i-1}^2 + 2a_i(x_i - x_{i-1}) \quad (3)$$

$$v_i = \frac{-k_f \Delta x + \sqrt{(k_f \Delta x)^2 + M}}{m} \quad (4)$$

여기서, $M = m(2 \times f_i \Delta x + m v_{i-1}^2)$ 이고, v_i 는 미소구간의 끝나는 지점의 속도, v_{i-1} 는 미소구간의 시작 지점의 속도, x_i 는 미소구간의 끝나는 지점의 위치, x_{i-1} 는 미소구간의 시작 지점의 위치, Δx 는 미소 이동거리이다.

단, 이때 미소구간의 시작점의 전류에 의해 발생하는 추력은 미소구간에서 일정하고, 미소구간에서의 가속도는 일정하다. 또한 각각의 미소구간은 가속도가 다른 등가속도 운동을 한다.

식(4)에 의하여 계산된 미소구간의 끝나는 지점의 속도에 의해 등가속도 운동에서 속도와 위치를 시간에 관계시키는 식(5)에 의해 미소구간의 이동시간을 알 수 있다.

$$v_i = a_i \Delta t_i + v_{i-1} \quad (5)$$

미소구간의 끝나는 지점의 속도의 결정에 의해 역기전력을 계산하여 식(1)의 전압 방정식을 만족하는 전류를 재 계산하여, 다음 구간의 전류값으로 설정한다. 이런 과정을 반복 계산하여 동특성해석을 수행하였다. 그림 3은 동특성 해석의 순서도를 나타낸다.

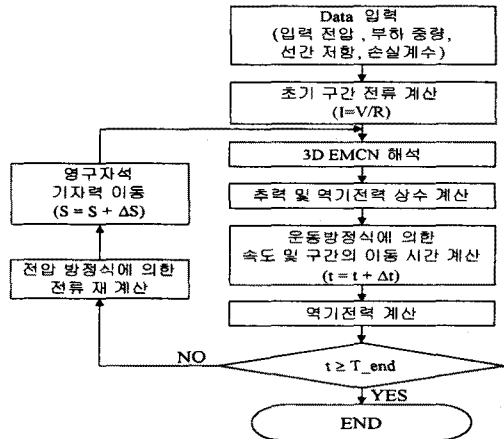


그림 3. 동특성 해석의 순서도

4. 해석 결과

4.1 해석 결과

해석 모델의 요소 분할도 및 경계조건은 그림 4와 같고, EMCN 해석을 위한 전체 요소수는 54978개이다. x 축 양끝 단은 symmetric 경계조건을 y 및 z 축의 양 끝단은 자위의 변화량이 없는 것으로 설정하였다.

공극에서의 자속밀도 분포와 자속의 흐름도 및 동특성 해석결과를 나타내면 그림 5~10과 같다.

그림 5, 6은 입력 전류 1.8[A]일 때 공극 및 코일 중심에서 y 축 좌표가 같은 요소들의 $x-z$ 평면에서 y 성분 자속밀도를 나타내었다. 공극에서는 y 성분 자속밀도의 분포가 구형과에 가까운 형태로 나타나고, 코일 중심에서는 정형과에 가까운 형태가 나타남을 알 수 있다.

각 요소 중심 절점의 z 좌표가 100[mm]일 때 $x-y$ 평면에서 x 및 y 성분의 자속밀도를 이용한 자속밀도의 벡터분포를 그림 7에 나타내었다.

그림 8은 입력 전압 108[V], 손실계수 50일때의 각 상의 전류의 변화 양상을 나타내었다. 그림 8에서 이동자의 이동에 따른 각 상의 전류의 변화를 나타내는 것으로 초기 기동시 큰 전류가 발생함을 알 수 있다.

그림 9, 10은 입력전압 108[V]와 144[V]일때의 속도 및 역기전력 양상을 나타내었다. 전압이 108[V]일 때 정상상태에서의 속도는 1.95[m/sec]이고, 144[V]일 때 2.74[m/sec]로 전압이 증가함으로써 속도가 증가함을 알 수 있다. 그림 10에서 입력 전압이 증가함으로써 속도가 증가하므로 역기전력도 증가함을 알 수 있다.

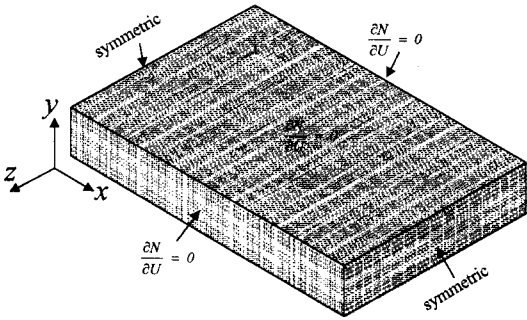


그림 4. 요소분할도 및 경계조건

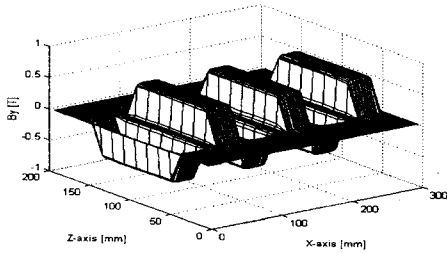


그림 5. 공극에서의 y 성분 자속밀도 성분

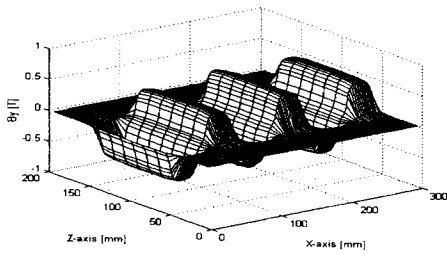


그림 6. 코일 중심에서의 y 성분 자속밀도 성분

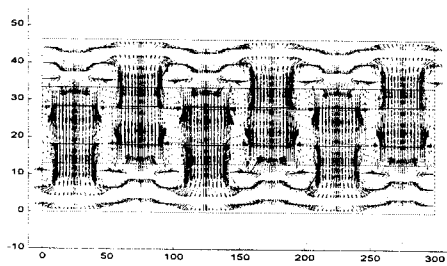


그림 7. x-y 평면에서의 자속밀도의 벡터분포

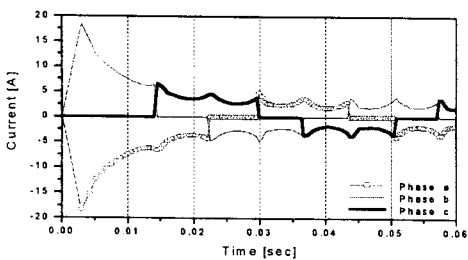


그림 8. 시간에 따른 각 상의 전류의 변화

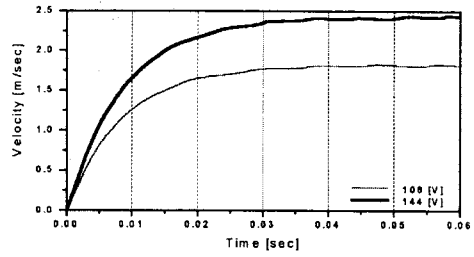


그림 9. 입력 전압에 따른 속도의 변화

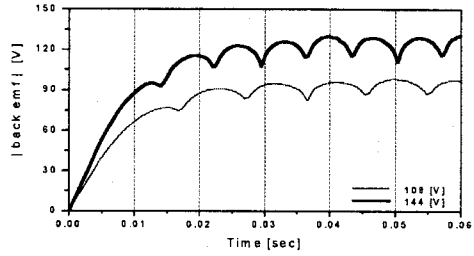


그림 10. 입력 전압에 따른 역기전력의 변화

5. 결 론

본 논문에서는 구동함수를 전압 구동으로 하고, 수치 해석 기법중 하나인 3차원 등가 자기회로방법을 이용하여 양축식 가동 코일형 LDM의 동특성 해석을 수행하였다. 3상 바이폴라 구형과 전압원 구동에 의한 동특성 해석결과 시간의 변화에 따른 전류파형은 정현파를 뒤집어 놓은 양상으로 나타났는데, 이는 코일중심의 자속 밀도 분포가 정현파에 가까운 분포를 하고 있기 때문에 타당한 것을 볼 수 있다. 또한, 역기전력은 속도 가 정상상태에 도달하기까지 증가하는 양상이 나타남을 알 수 있다. 입력전압 108[V]와 144[V]일때의 속도 및 역기전력 양상에서 전압이 증가함으로써 속도 및 역기전력이 증가함을 알 수 있다.

본 논문에서와 같이 구형과 입력 전압일 경우, 미소구간의 운동을 등가속도 운동으로 가정하고 미소구간의 시작지점의 발생 추력으로부터 미소구간의 끝 지점의 속도를 바로 계산함으로써 미소구간의 이동시간을 계산할 수 있다. 따라서 기존의 유한 요소에 의한 동특성 해석보다 해석시간 및 해석상의 오차를 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 또한 구형과 입력 전압의 타 전동기의 동특성 해석에도 유용하게 적용 할 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 임달호, 홍정표, " 3차원 등가자기회로방법에 의한 영구자석모터의 자계해석," *대한전기학회논문지*, Vol.43, No9, 1994, pp1432-1439
- [2] J.Hur, Y. D. Chun, J. Lee and D. S. Hyun, " Dynamic Analysis of Radial Force Density in Brushless DC Motor Using 3 Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network Method," *IEEE Trans.on Magnetics*, vol.34,no.5, pp. 3142-3145, 1998
- [3] T.W.Nehl, F.A.Fouad and N.A. Demerdash, " Dynamic Simulation of Radially Oriented Permanent Magnet-Type Electronically Operated Synchronous Machines with Parameters Obtained from Finite Element Field Solution," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, Vol.1A-18, No.2, pp. 172-182, 1982
- [4] J. Hur, S. B.Yoon, D.Y.Hwang and D.S.Hyun, "analysis of PNLDM using 3 dimensional equivalent magnetic circuit network method," *IEEE, Trans.on Magn.*, Vol.33, No.5, pp. 4143-4145, 1997