

3D EMCN을 이용한 양축식 가동 코일형 LDM의 특성 해석

염상부, 하경호, 홍정표, 김규탁
 창원대학교 전기공학과

Characteristic Analysis of Linear DC motor by Using 3 Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network

Sang-Bu Yeom, Kyeong-Ho Ha, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won Nat'l Univ.

Abstract -In this paper, the characteristic of the Linear DC motor(LDM) are analyzed by using 3 Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network (3D EMCN). the movement of mover substitutes for the movement of magnetization in permanent magnet expressed by Fourier series. thrust characteristic analysis is performed and the appropriateness of analysed result is verified by comparing with the results of 2 Dimensional Finite Element Method (2D FEM) and experiment.

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]

해석 대상인 양축식 가동 코일형 LDM은 전장 1[m] 이고, 코일간 거리는 6.67[mm]이다. 해석 모델의 입력 전류는 1.8[A]이고, 그림 2와 같이 영구자석의 두 극분과 이동자 코일의 한 상을 해석 모델로 설정하였다.

1. 서론

리니어 DC 모터는 직선 운동을 필요로 하는 곳에 에너지의 변환없이 직접 적용 가능하다는 관점에서 연구의 대상이 되고 있다. 위치 및 속도제어가 용이한 브러쉬리스 리니어 DC 모터(LDM)는 가동자의 구조에 따라 가동코일형과 가동자석형으로 분류되어진다. 본 논문에서는 시스템 cost가 상승하고 가동자에 전원이 연결된 상태로 고속운전에 불리하지만 시스템의 구조가 간단하고 자기회로가 안정되어 있어 제어성능을 향상시킬 수 있는 장점을 가진 양축식 가동 코일형을 채택하였다. 해석 대상인 양축식 가동 코일형 LDM은 이동자 코일의 엔드링 부분이 존재하는 등, 횡방향으로 자속의 변화가 없다고 가정하여 해석하는 2차원적인 해석 방법으로는 3차원적인 형상 및 특성을 고려 할 수 없게 되어, 해석의 오차를 수반하므로 3차원적인 해석 방법이 요구된다[1][2]. 본 논문에서는 반원 형태인 이동자의 엔드링부분을 직사각형으로 등가화하여 정밀도가 검증된 3차원 등가 자기회로방법(3D EMCN)을 이용하여 [1], 공극과 코일중심의 자속 밀도를 계산하고 이동자의 이동을 요소의 재분할 과정이 없이 영구자석의 자화 분포의 이동으로 대처하여 추력 특성을 해석하였다. 본 해석 결과의 타당성을 2차원 유한 요소 해석 및 실험 결과와 비교 검증하였다.

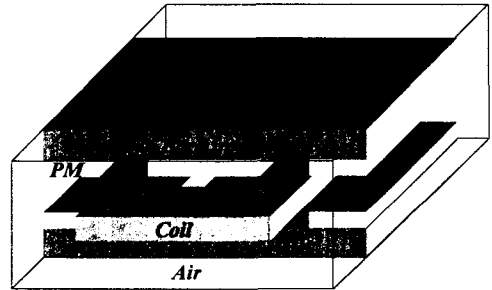


그림 2. 3D EMCN 해석 모델

2.2 해석 이론

3차원 등가 자기회로방법으로 해석을 하기 위하여 그림 2의 해석 모델의 요소 분할을 위해 직육면체 요소를 이용하였고, 각각의 요소의 중심 절점에 의해 그림 3과 같이 자기회로망을 구성하였다. 그림 3은 한 절점에서의 3차원 등가 자기회로망의 구성 및 자속의 흐름도를 나타낸 것이다[1].

2. 시스템의 제원 및 해석 방법

2.1 시스템의 제원 및 해석 모델

해석 대상인 양축식 가동 코일형 LDM의 구조는 그림 1과 같다. 구동 방식은 3상 바이폴라 120도 방식이고, 시스템의 제원은 표 1에 나타내었다[2].

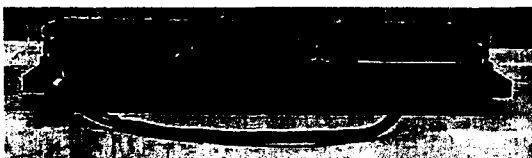


그림 1. 양축식 가동 코일형 LDM의 구조

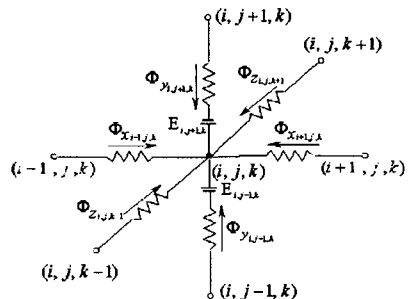


그림 3. 한 절점에서 EMCN의 구성 및 자속의 흐름도

각 요소 절점의 x 방향의 퍼미언스는 그림 4와 같이 각 요소의 투자율과 길이 및 면적에 의해 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

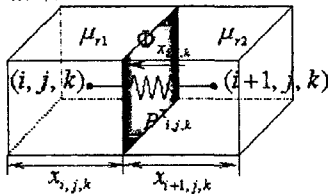


그림 4. EMCN을 위한 퍼미언스 계산

$$P_{i,j,k}^x = P_{i,j,k}^x // P_{i+1,j,k}^x$$

$$= \frac{\mu_0^2 \mu_{r1} \mu_{r2} S_{i,j,k}^x}{\mu_0 \mu_{r1} x_{i,j,k} + \mu_0 \mu_{r2} x_{i+1,j,k}} \quad (1)$$

여기서, $S_{i,j,k}^x$ 는 요소의 x 방향 면적이며, μ_{r1}, μ_{r2} 는 각 요소의 투자율이다. 이와 같이 y 및 z 방향에 대해서도 같은 방법으로 퍼미언스를 구할 수 있다. 각 요소의 기저력 및 자위값을 이용하여 y 방향의 자속을 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\Phi_{i,j-1,k}^y = P_{i,j-1,k}^y (U_{i,j,k} - U_{i,j-1,k} + E_{i,j-1,k}) \quad (2)$$

또한, 해석 영역의 모든 절점에 대하여 한 절점에서의 자속의 유출위량은 불변이라는 자속의 연속 조건을 적용하여 조합함으로써 식 (4)와 같은 계수행렬을 구성하게 된다. 여기서 $U_{i,j,k}$ 는 절점 (i, j, k) 에서의 자위값이며, $E_{i,j,k}$ 는 영구자석과 전자기 권선이 분포하고 있는 절점의 기저력 값이다[1].

$$\Phi_{i-1,j,k}^x + \Phi_{i+1,j,k}^x + \Phi_{i,j-1,k}^y + \Phi_{i,j+1,k}^y + \Phi_{i,j,k-1}^z + \Phi_{i,j,k+1}^z = 0 \quad (3)$$

$$[P] \{U\} = \{F\} \quad (4)$$

2.3 권선의 기저력 분포

해석 모델의 요소 분할을 위해 직육면체 요소를 설정하였기 때문에 반원형 코일의 cndring 부분을 직사각형으로 등가화시켰다. 엔드링 부분의 코일의 폭은 일정하게 두고, 반원을 직사각형의 형상으로 등가화 할 때 인덕턴스의 값을 같도록 설정하였다. 코일의 형상에 따른 인덕턴스의 계산식은 수식 (5)와 같다[3].

$$L = 0.002l \left[\log_e \frac{2l}{\rho} - \left(2 \log_e \sqrt{\frac{l}{S}} + \phi \right) + \frac{\mu}{4} \right] [\mu H] \quad (5)$$

여기서, l 은 코일의 길이, S 는 코일 형상의 면적, μ 는 코일의 경우 1이다. ϕ 와 l/\sqrt{S} 각 코일의 형상에 따른 값으로 표 2와 같다.

표 2. 코일의 형상에 따른 ϕ 와 l/\sqrt{S} 값

	직사각형	원형
ϕ	0.0809	-0.0794
l/\sqrt{S}	4.0000	3.5450

LDM의 실제 코일 형상은 그림 5와 같으며 식 (5)에 의해 등가화 한 엔드링 부분의 치수는 그림 6과 같다.

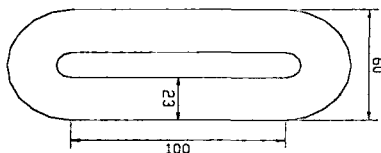


그림 5. LDM의 코일 형상

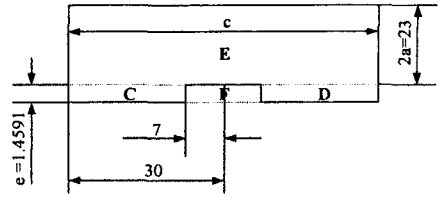


그림 6. 등가 모델

등가 자기회로망의 인가 기저력은 영구자석에 의한 기저력과 코일 권선에 의한 기저력으로 각각 식 (6), (7)과 같다.

$$E(i, j, k) = NI/m \quad (6)$$

$$= \frac{M(x, y, z)}{\mu_0 \mu_r} l_{(i,j,k)} \quad (7)$$

여기서 m 은 코일부분의 y 방향 요소수이다. x 축과 z 축에 따른 3차원적으로 분포된 기저력을 나타내면 그림 7과 같다.

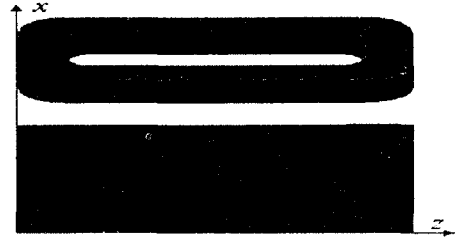


그림 7. 3차원적으로 분포된 기저력

2.4 추력 계산

추력 특성을 해석하기 위하여 이동자의 이동대신 요소의 재분할 과정이 없이 영구자석의 자화 분포의 이동으로 대체하여 추력 특성을 해석하였다. 이를 그림 8과 식 (8)로 나타내었다(1).

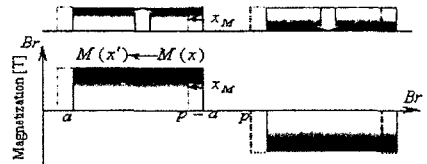


그림 8. 영구자석의 자화분포의 이동

$$M(x') = M(x - x_m) \quad (8)$$

이동자의 이동에 따른 추력 특성을 해석하기 위하여 Lorentz's law를 이용하였다. 전류의 방향이 z 방향일 때 각 방향의 힘을 나타내면 식 (9)와 같다.

$$F_x = \sum_{i=1}^n f_{ix}^{(e)} = \sum_{i=1}^n J_{iz}^{(e)} S_{iz}^{(e)} B_{iy}^{(e)} l_{iz}^{(e)}$$

$$F_y = \sum_{i=1}^n f_{iy}^{(e)} = \sum_{i=1}^n J_{iz}^{(e)} S_{iz}^{(e)} B_{ix}^{(e)} l_{iz}^{(e)}$$

$$F_z = 0 \quad (9)$$

$J_{iz}^{(e)}, S_{iz}^{(e)}, l_{iz}^{(e)}$ 는 각 요소의 z 방향의 전류밀도와 면적 및 전류방향으로의 길이이며, n 은 코일을 구성하는 요소수이다.

3. 해석 결과

3.1 요소 분할도 및 경계조건

해석 모델의 요소 분할도 및 경계조건은 그림 9와 같고 EMCN 해석을 위한 전체 요소수는 32634개이다. x축 양끝 단은 symmetry 경계조건을 y 및 z축의 양 끝 단은 자위의 변화량이 없는 것으로 설정하였다.

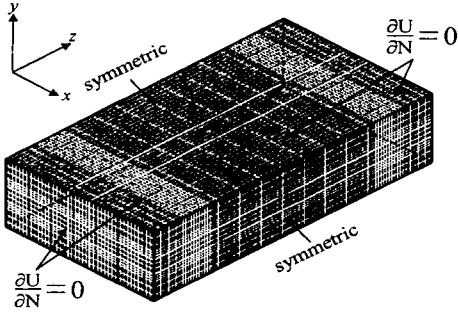


그림 9. 요소 분할도 및 경계 조건

3.2 해석 결과

엔드링 부분을 고려한 3D EMCN의 공극에서의 자속 밀도 분포와 자속의 흐름도 및 추력 특성 해석결과를 나타내면 그림 10~14와 같다. 공극에서의 y축 좌표가 같은 요소들의 x, y, z방향 자속 밀도를 그림 10~12에 각각 나타내었고, 각 요소 중심 절점의 z좌표가 73.13 (mm)일 때 x 및 y방향의 자속밀도를 이용한 자속의 흐름도를 그림 13에 나타내었다. 그림 13의 이동자와 영구자석의 위치는 그림 2와 같다. 그림 14는 이동자의 이동을 영구자석의 자화분포의 이동으로 대체하여 추력 특성을 해석하여 실험치 및 2차원 유한 요소 해석 결과와 비교한 것으로 3-D EMCN의 해석결과와 실험치가 잘 일치함을 알 수 있다.

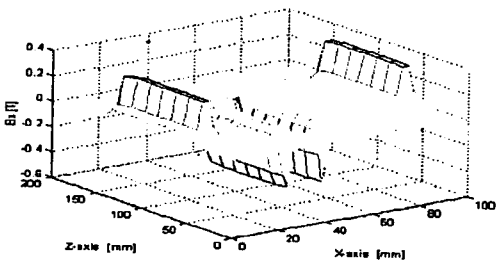


그림 10. 공극에서 B_z 성분

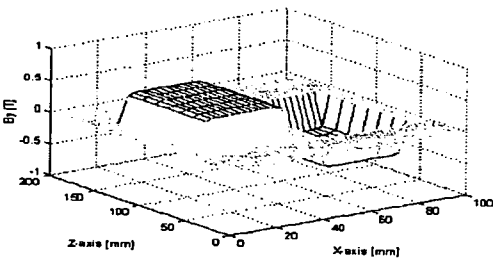


그림 11. 공극에서 B_y 성분

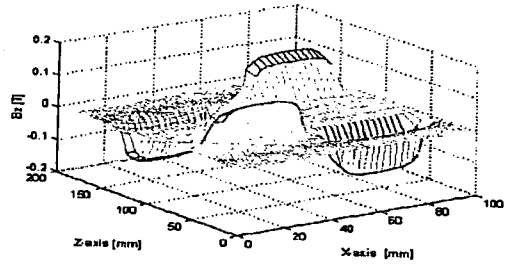


그림 12. 공극에서 B_z 성분

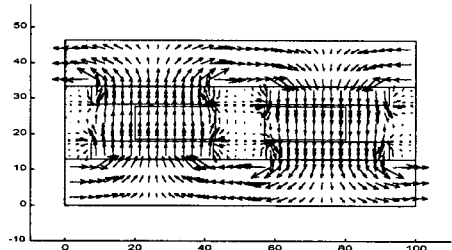


그림 13. 자속의 흐름도

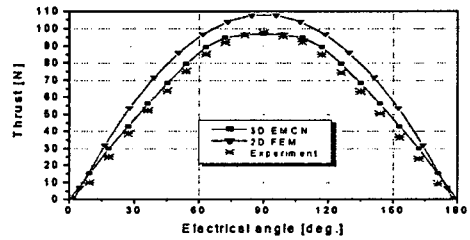


그림 14. 추력 특성

4. 결 론

본 논문에서는 공심 코일형 LDM을 대상으로 3차원 등가 자기회로망법에 의한 해석을 수행하였다. 코일의 엔드링부분을 직사각형으로 등가화하였고, 권선 기자력을 3차원적으로 분포시켜 추력특성을 수행하여 2차원 유한요소해석 및 실험치와 비교 검증하였다. 실험치의 평균 추력은 92.46(N)이고 3D EMCN 해석결과와 평균 추력은 92.34(N)으로 정밀한 해석이 가능함을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] J. Hur, S. B.Yoon, D.Y.Hwang and D.S.Hyun, "analysis of PMLSM using 3 dimensional equivalent magnetic circuit network method," *IEEE, Trans on Magn.*, Vol.33, No.5, pp.4143-4145, 1997
- [2] 강규홍, 염상부, 홍정표, 김규탁, 정중기, 하근수 "부하를 고려한 LDM의 동특성 해석에 관한 연구" 대한 전기학회 학회 학술 대회 논문집, A, pp.164-166, 1999
- [3] FREDERICK W. GROVER, *INDUCTANCE CALCULATIONS*, 1945
- [4] BASAK, *PermanentMagnet DC Linear motors*, 1996