

자기등가회로법을 이용한 영구자석 가동자를 갖는 직선형 왕복운동 전동기의 특성해석

장석명*, 김정만*, 김관호*, 최장영*, 정상섭**, 박영태***
 충남대학교*, LG전자(주)**, 한국표준과학연구원***

Characteristic Analysis of Permanent Magnet Linear Oscillatory Motor Using Equivalent Magnetic Circuit

Seok-Myeong Jang*, Jeong-Man Kim*, Kwan-Ho Kim*, Jang-Young Choi*, Sang-Sub Jeong**, Young-Tae Park***
 Chungnam National University*, LG Electronics**, KRISST**

Abstract - This paper deals with the characteristic analysis of permanent magnet linear oscillatory motor (LOM). The back EMF and airgap flux density was calculated by Equivalent Magnetic Circuit (EMC) method, it can be computing times less than the finite element method (FEM). In addition, analysis results obtained by proposed EMC are validated by comparison with those by Finite Element Method.

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 짧은 스트로크의 선형 왕복 운동이 요구되는 공작기기, 컴프레서, 조정밀 위치제어, 인공심장 장치 등에 직선형 운동 기기가 광범위하게 응용되고 있다. 그러나 지금까지는 유압이나 가스터빈에 의한 실린더, 회전형 모터와 기계적 변환 기구에 의해 직선운동 시스템이 응용 개발되어왔다. 따라서 많은 부품이 필요하고 시스템이 복잡하여 중량이나 부피가 커지므로 생산비나 유지관리비등 경제성 측면에서 매우 불리하였다. 이러한 점을 극복할 수 있는 가장 효과적인 방안이 직선형 왕복 액추에이터 (Linear Oscillatory Motor : LOM)를 응용하는 것으로, 국내외적으로 구동개념 및 종류 방법이 다양하게 개발되고 있다. [1-2]

본 논문에서는 냉장고에서 냉매를 순환시키고 열 교환을 수행하기 위한 동력을 제공하는 컴프레서용 전동기의 특성해석을 다루고 있다. 컴프레서는 냉장고에서 소비되는 전기 에너지의 대부분을 차지하며, 이에 따라 가정용 냉장고의 에너지 절감을 위해 고효율 컴프레서에 대한 많은 연구가 있어왔다. LOM을 용하는 컴프레서는 기계적 전달 장치가 불필요함에 따라 마찰, 소음이 적고, 에너지의 효율이 향상되어 가정용 냉장고, 에어컨에 이르기 까지 그 응용 범위를 넓혀가고 있다. [3]

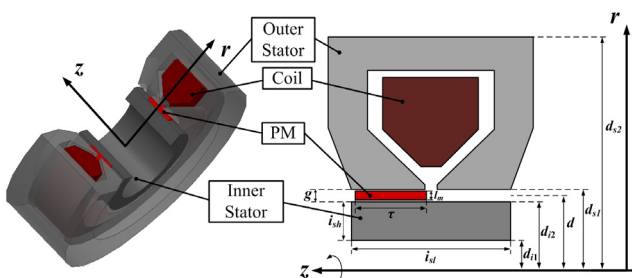
LOM을 석하는 방법에는 자기등가 회로법과 유한요소해석을 통해 특성을 확인하는 방법이 있다. 자기등가 회로법을 통해 특성을 해석하는 경우 유한요소해석에 비해 해석 시간이 매우 빠르다는 장점이 있는 반면, 해석 결과의 오차가 유한요소해석에 비해 크기 때문에 결과의 신뢰성이 떨어진다는 단점이 있다.[4]

본 논문에서는 이러한 자기등가회로의 단점을 개선하기 위하여 프린팅 효과와 가동자의 이동에 따른 자속의 변화를 고려한 자기등가회로법을 제안하였다. 이를 통하여 LOM의 영구자석 가동자 이동에 따른 역기전력과 공극영역에서의 자속밀도 특성해석을 수행하였다. 제안된 자기등가회로법의 해석 결과의 타당성은 유한요소해석법의 결과를 통해 검증하였다.

2. 직선형 왕복운동 전동기의 특성 해석

2.1 LOM 구조 및 해석모델

그림 1은 영구자석 가동자를 갖는 LOM 해석모델을 나타내고 있다. 해석모델에서 영구자석은 반경방향으로 착자되어 있으며 표 1은 해석모델의 설계 사양을 나타낸다.

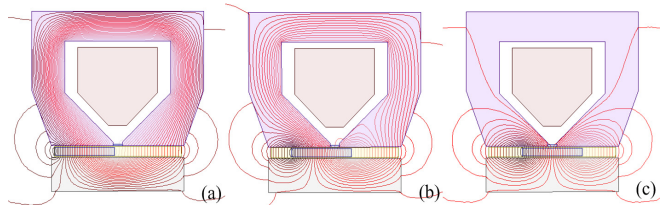


<그림 1> LOM의 해석모델

<표 1> 직선형 왕복운동 전동기 해석 모델의 사양

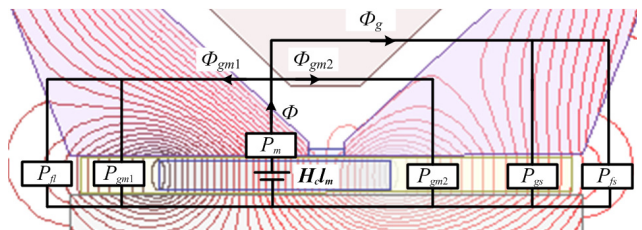
항 목		사 양
Outer Stator	Inner radius of Outer Stator (d_{s1})	35 [mm]
	Outer radius of Outer Stator (d_{s2})	73.3 [mm]
PM	Length of Magnet (l_m)	2.3 [mm]
	Width of Magnet (τ)	18 [mm]
Inner Stator	Inner radius of Inner Stator (d_{i1})	22 [mm]
	Outer radius of Inner Stator (d_{i2})	31.7 [mm]
Airgap	Length of Airgap (g)	3.3 [mm]

2.2 자기등가회로의 구성



<그림 2> 해석 모델의 자속경로 : (a) 0[ms] (b) 6[ms] (c) 10[ms]

그림 2는 해석모델의 자속경로를 보여주고 있다. 가동자는 스트로크 구간 내에서 $v=1[m/s]$ 의 속도로 이동한다. 그림 2에서 알 수 있듯이 가동자가 스트로크 구간 내에서 이동함에 따라 Stator에서의 자속량이 변화한다. 자속의 변화는 10 [ms]를 기준으로 대칭을 이룬다. 이러한 자속의 변화에 의해 코일에 역기전력이 유도된다. 가동자가 스트로크 구간 내에서 동일한 속도로 이동할 때 역기전력이 일정한 값으로 발생해야만 안정된 추력이 발생한다. 즉 가동자의 이동에 따라 Stator로 흐르는 자속량이 일정한 비율로 증가 또는 감소되어야 한다.



<그림 3> 6ms에서의 자기등가회로

해석모델의 가동자의 이동에 따른 스트로크 구간의 자기등가회로는 그림 3과 같이 나타 낼 수 있다. 스트로크 구간 내에서 총 자속량 Φ 는 항상 일정하며 가동자의 이동에 의해 누설자속 Φ_{gm1} , Φ_{gm2} 이 변화한다. 이로 인하여 Stator로 흐르는 Φ_g 의 변화가 발생한다. 본 논문에서는 가동자의 이동에 따른 자속의 변화를 구간별로 나누어 각 구간에서의 Φ_g 를 구함으로써 역기전력을 계산하였다. 먼저 공극영역의 각 요소별 퍼미언스를 구하면 식 (1)-(5)과 같이 표현된다.

$$P_m = \frac{\mu_0 \tau 2\pi d}{l_m} + \frac{\mu_0 \tau 2\pi d}{(g-l_m)} \quad (1)$$

$$P_{gm1} = \frac{\mu_0 W_{g1} 2\pi d}{g} \quad (2)$$

$$P_{gm2} = \frac{\mu_0 W_{g2} 2\pi d}{g} \quad (3)$$

$$P_{gs} = \frac{\mu_0 W_{g3} 2\pi d}{g} \quad (4)$$

$$P_{fl} = P_{fs} = \frac{\mu_0 2\pi (0.8d + g/2) (\ln(g + 2(i_{sh})) - \ln(g))}{\pi/0.8} \quad (5)$$

여기서 P 는 각 영역에서의 퍼미언스, μ_0 는 공기의 투자율($4\pi \times 10^{-7}$), W_{g1} , W_{g2} 와 W_{g3} 는 각 영역별 자속경로의 폭을 말하며 가동자의 이동에 따라 계속 변화하게 된다. 초기 위치에서 $W_{g2} = 0$ 으로 이 부분에 의한 누설자속은 없으며, 가동자가 Stator의 중앙에 위치할 때 $W_{g3} = 0$ 으로 이 때에는 누설자속만 존재한다고 가정하였으며 식 (6)-(8)과 같이 계산된다.

$$W_{g3} = \tau_1 - \tau_2 \quad (6)$$

$$W_{g1} = \tau_2 + 2 \quad (7)$$

$$W_{g2} = 40 - (\tau + W_{g2} + W_{g3}) \quad (8)$$

여기서 τ_1 과 τ_2 는 r축을 기준으로 한 각 구간에서의 가동자 위치를 나타낸다. 가동자는 r축을 중심으로 대칭을 이루기 때문에 식 (6)-(8)은 $\tau_1 \geq \tau_2$ 일 때의 기준이며 $\tau_2 < \tau_1$ 에서 대칭적으로 변화하게 된다. 각 영역별 퍼미언스의 합은 식 (9)-(12)로 정리 된다.

$$P_g = P_{fl} + P_{fs} + P_{gm1} + P_{gm2} + P_{gs} \quad (9)$$

$$P = 1 / \left[\frac{1}{P_g} + \frac{1}{P_m} \right], \quad R = \frac{1}{P} \quad (10)$$

$$R_l = \frac{1}{(P_{fl} + P_{gm1} + P_{gm2})} \quad (11)$$

$$R_g = \frac{1}{(P_{gs} + P_{fs})} \quad (12)$$

여기서 R 은 퍼미언스의 역수로 자기저항을 나타낸다. 각 영역별 퍼미언스를 이용하여 각 영역별 자속을 구할 수 있으며 식(13), (14)로 계산 된다.

$$\Phi = \frac{H_c l_m}{R} \quad (13)$$

$$\Phi_{gs} = \left(\frac{R_l}{R_l + R_g} \right) \Phi \quad (14)$$

가동자의 이동에 따른 역기전력은 Stator의 코일의 턴수 N 과 Φ_{gs} 의 변화량을 통하여 구할 수 있으며 식 (15)로 표현된다.

$$e = -N \frac{d\Phi_{gs}}{dt} = -N \frac{(\Phi_{gsn+1} - \Phi_{gsn})}{(t_{n+1} - t_n)} \quad (15)$$

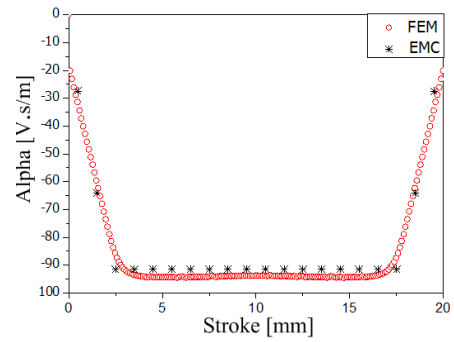
여기서 n 은 가동자 이동에 따른 각 구간을 의미하며 t 는 각 구간에서의 가동자의 이동시간을 의미한다. 공극에서의 자속밀도는 가동자 영역과 공극 영역 크게 두 부분으로 나뉘어 계산하였으며 식 (16), 식(17)로 표현된다.

$$B_m = \frac{\Phi}{S_m} = \frac{\Phi}{2\pi r d} \quad (16)$$

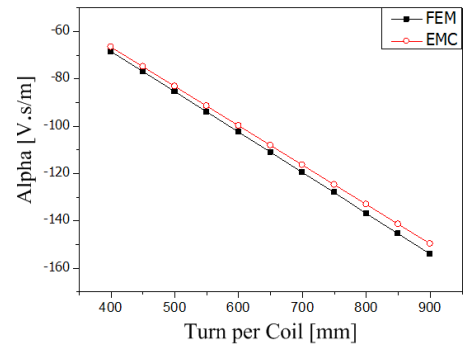
$$B_g = \frac{(\Phi - \Phi_f)}{2\pi d(W1 + W2 + W3)} \quad (17)$$

2.3 유한요소해석법을 통한 특성 해석 결과 검증

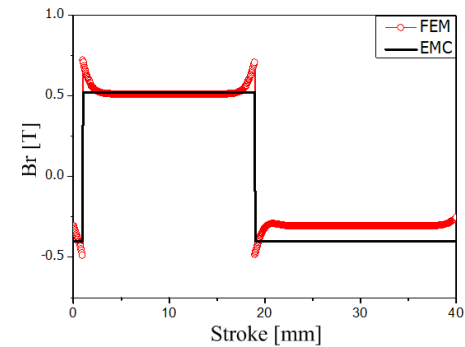
자기등가회로법을 이용하여 구한 역기전력과 공극 자속 밀도의 결과는 유한요소해석을 통하여 그 타당성을 검증하였다. 각각의 결과는 그림 4~6에 나타내었다. 역기전력의 경우 유한요소해석의 결과와 2.61%의 오차를 보였으며, 공극 자속밀도는 가동자 영역에서 1.9%, 공극에서 22.89%의 오차가 발생하였다. 공극에서의 자속밀도는 각 영역별로 자속 밀도를 고려함에 있어 많은 변수가 포함되기 때문인 것으로 판단된다.



〈그림 4〉 Alpha 해석 결과 비교 (550턴)



〈그림 5〉 코일 턴수별 Alpha 해석 결과 비교



〈그림 6〉 공극 자속 밀도 해석 결과 비교

유한 요소 해석법과의 비교를 통해서 자기등가회로법의 타당성을 검증한 결과 역기전력 계산 시 높은 정확성을 나타내었다. 이를 통해 본 논문에서 제안한 자기등가회로법의 해석결과와 신뢰성을 검증함으로써 LOM의 초기 설계 시 설계 변수에 따른 회로정수의 도출에 있어서 매우 유용할 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 논문에서는 자기등가회로법을 이용하여 영구자석 가동자를 갖는 직선형 왕복운동 전동기의 특성 해석을 수행하였다. 자기등가회로법의 경우 해석 결과의 신뢰성이 낮아 LOA의 해석에 오랜 시간이 걸림에도 불구하고 유한요소해석법을 사용해 왔다. 하지만 본 논문에서 제시한 자기등가 회로법은 유한요소해석 결과와 비교해 비교적 낮은 오차율을 갖기 때문에 LOA의 특성을 해석함에 있어서 빠른 해석시간과 신뢰성을 동시에 충족시킬 수 있다. 이를 이용하여 LOA의 초기 설계 시 역기전력과 공극자속밀도를 예측하는데 있어서 매우 유용할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. A. Nasar, Linear electric motors: theory, design and practical application. prentice-Hall. inc., 1987
- [2] E. R. Laithwaite. A history of linear electric motors, published by macmillan education Ltd. 1987
- [3] 정상섭, “진동제어 시스템을 위한 리니어 왕복 액추에이터의 동특성 해석, 충남대학교 박사학위논문 2002.
- [4] X. Chen and Z. Q. Zhu, “Analytical Determination of Optimal Split Ratio of E-core Permanent Magnet Linear Oscillating Actuators”, IEEE Transactions on, volume 47, page 25-33, 2011.