

리니어 컴프레서용 리니어 모터의 철손 해석

이 헌\*, 왕세명\*, 박경배\*  
 광주과학기술원 기전공학과, LG전자 디지털 어플라이언스 연구소\*

Iron Loss Analysis of Linear Motor for Linear Compressor

Heon Lee\*, Semyung Wang\*, Kyeongbae Park\*\*  
 GIST(Gwangju Institute of Science & Technology)\*, Digital Appliance Research Laboratory, LG Electronics Inc\*\*

**Abstract** - The linear motor is widely used to generate linear motion. In this paper, the iron loss analysis of the linear motor is performed by using ANSYS, a commercial FEA tool and iron loss curves obtained by an Epstein test apparatus. For the validation of the iron loss analysis result, the experiment measuring the iron loss of the linear motor is performed and this result is compared with iron loss analysis result.

1. 서 론

리니어 컴프레서는 LOA(Linear Oscillating Actuator)와 피스톤과 스프링이 직접 연결되어 공진 운동을 하며, 리니어 모터의 성능은 리니어 컴프레서 전체의 성능에 직접적인 영향을 준다. 따라서 높은 효율을 가지는 리니어 모터를 설계하기 위하여 고효율을 가지는 리니어 모터가 필요하다. 리니어 모터는 스크류나 체인, 베어링, 기어같은 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 장치가 필요없기 때문에 대부분의 손실은 전기적 손실이다. 리니어 모터의 전기적 손실은 크게 동손과 철손으로 나눌 수 있으며, 철손은 교번 자속에 의해 발생하는 eddy current 손실과 hysteresis 손실, 자성 물질의 움직임에 의해 발생하는 excess 손실로 나눌 수 있다. 또한 리니어모터의 효율을 높이기 위하여 전기적 손실을 줄일 수 있는 새로운 리니어 모터의 설계가 필요하며, 전기적 손실 성분인 철손의 정확한 해석이 선행되어야 한다.

철손은 리니어 모터의 손실 중에서 가장 중요한 성분 중 하나임에도 불구하고 정확한 해석이 쉽지 않다. 따라서 대부분의 연구자들은 실험적 방법을 토대로 철손값을 얻는다. 하지만 실험적 방법은 모터의 설계 파라미터가 변경될 때마다 새로운 모터를 제작해야 하기 때문에 불필요한 제작 시간과 비용을 소비하게 된다. 그러므로 효율적인 모터 설계를 위하여 실험적 방법을 사용하지 않는 새로운 방법이 필요하다.

본 논문에서는 수학적이며 해석적인 방법을 이용하여 철손 해석을 수행한다. 또한 eddy current 손실과 hysteresis 손실의 해석을 목적으로 한다. 철손 해석을 위하여 Method I과 Method II, Method III의 세가지 방법을 사용한다. Method I은 상용 유한 요소 해석 툴인 ANSYS를 직접 사용하여 철손 해석을 수행하는 방법이다. Method II와 Method III는 ANSYS와 실험적 방법을 통해 이미 검증된 철손 curve를 이용하여 철손 해석을 수행하는 방법이다. 위와 같은 세가지 방법을 이용하여 리니어 모터의 철손 해석을 수행한다. 또한 철손 해석 결과의 검증을 위하여 철손 실험을 수행한다. 철손 해석 결과와 철손 실험 결과의 비교를 통하여 본 논문에서 언급한 철손 해석 방법을 검증한다.

본 연구는 리니어 모터의 정확한 해석 및 설계에 관한

연구에 이용할 수 있다.

2. 철손 해석

2.1 Method I

모터의 철손은 주로 교류 전류를 인가한 코일에서 만들어진 교번 자속으로부터 발생한다. 일반적으로 전자기 문제를 풀 수 있는 유한요소해석 툴은 eddy current 손실은 계산할 수 있지만 hysteresis 손실의 계산을 할 수 없다. 따라서 대부분 실험을 통하여 hysteresis 손실을 계산한다.

Method I은 상용 유한요소해석 툴인 ANSYS를 직접 사용하여 철손 성분 중의 하나인 eddy current 손실의 해석을 수행한다.

정적 시변 해석의 지배 방정식은,

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -J_0 + j\omega\sigma A \tag{1}$$

이다.

식 (1)에서 eddy current density는

$$J_e = j\omega\sigma A \tag{2}$$

이며, 식 (2)의 eddy current density는 ANSYS에 의해 얻게 된다.

주어진 eddy current density를 통해 eddy current 손실을 계산할 수 있다. 철손 계산 식은 다음과 같다.

$$P_e = \frac{1}{2\sigma} \int_V J_e \cdot J_e' dV \tag{3}$$

식 (3)에서  $J_e$  는 eddy current density이며,  $\sigma$  는 전도율이다.

2.2 Method II

자속 밀도와 주파수를 고려한 총 철손 밀도를 계산하는 식은 식(4)와 같으며 사인 곡선을 가지며 변화하는 자속 밀도를 가지는 자성체의 철손을 구할 때 적용할 수 있다.

$$P_{iron} = p_h + p_e = k_h B^\alpha f + k_e B^2 f^2 \left[ W / m^3 \right] \tag{4}$$

식 (4)를 이용해 철손을 계산하기 위하여  $k_h, k_e, \alpha$  를 알아야 하는데, 철손 곡선을 이용하여  $k_h, k_e, \alpha$  를 구할 수 있다. 그림 1은 Epstein test apparatus에 의해 얻은

철손 곡선이다.

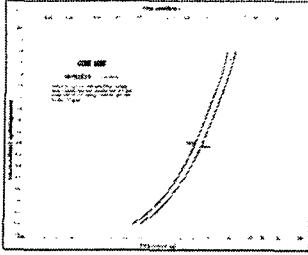


그림 1. 철손 곡선

그림 1의 데이터의 조정을 통하여  $k_h, k_e, \alpha$  를 얻게 된다.

철손 곡선을 사용함에 있어서, 몇가지 가정을 고려해야 하며, 가정은 다음과 같다. 첫째, 코어를 적층시킬 때 층간 단락은 고려하지 않는다. 둘째, 자속 밀도를 고려할 때, 회전 자계를 제외한 교번 자계만을 고려한다.

결국, Method II는 각 요소의 자속밀도를 얻기 위하여 사용되는 ANSYS와  $k_h, k_e, \alpha$  를 얻기 위하여 사용되는 철손 곡선을 이용하여 철손 해석을 수행한다.

식 (4)로부터, 유한요소법을 사용하기 위해 이산 형태의 식 (5), (6)을 유도할 수 있으며, 이 식을 가지고 eddy current 손실과, hysteresis 손실을 계산할 수 있다.

$$P_e = \frac{p}{2} \sum_{m=1}^M A_m l_{fe} \frac{2k_e}{T} 2 \int_0^{T/2} \left( \frac{dB}{dt} \right)^2 dt [W]$$

$$= 2pNk_e l_{fe} f^2 \quad (5)$$

$$\cdot \sum_{m=1}^M \left\{ A_m \left[ \sum_{n=1}^N (B_{mx,n} - B_{mx,n-1})^2 + \sum_{n=1}^N (B_{my,n} - B_{my,n-1})^2 \right] \right\}$$

$$P_h = 2\pi f k_h l_{fe} \sum_{m=1}^M [A_m B_{m,max}^\alpha] [W] \quad (6)$$

식 (5)에서, N은 코일 턴수,  $l_{fe}$ 는 코어의 길이,  $A_m$ 은 m 요소의 넓이, M은 요소의 총 개수를 의미한다.

### 2.3 Method III

Method III는 ANSYS와 철손 곡선을 이용하여 철손 해석을 수행한다. Method III를 통해 얻어지는 철손 값은 eddy current 손실과 hysteresis 손실로 각각 고려하지 않고 전체적인 철손으로 고려하여 계산한다.

Method III를 통해 얻어지는 철손 밀도식은 다음과 같다.

$$P_{iron} = aB_{max}^2 + bB_{max} + c [W/kg] \quad (7)$$

식 (8)에서의 a, b, c는 임의의 수이며, 철손 곡선의 값들로부터 위의 값을 얻을 수 있다. 또한  $B_{max}$ 는 방향성을 고려하여  $B_{max}^x, B_{max}^y, B_{max}^{sum}$ 으로 각각 철손 밀도를 구하며,  $B_{max}^x, B_{max}^y, B_{max}^{sum}$ 은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$B_{max}^{sum} = \sqrt{(B_{max}^x)^2 + (B_{max}^y)^2} \quad (8)$$

최종적으로, 총 철손 값은 각 요소의 철손값을 합하여 얻게 된다.

$$P_{iron} = \sum_{n=1}^m P_{iron}^n \cdot weight^n [W]$$

$$= \sum_{n=1}^m P_{iron}^n \cdot (\rho^n \cdot A^n \cdot l_{fe}) \quad (9)$$

식 (9)에서 m은 총 요소의 개수, A는 요소의 넓이,  $l_{fe}$ 는 코어의 길이,  $\rho$ 는 코어의 밀도를 나타낸다.

## 3. 리니어 모터의 철손 해석

### 3.1 리니어 모터의 유한 요소 해석

본 논문에서 고려하는 철손 해석 방법은 각 요소의 자속 밀도를 얻기 위하여 유한 요소 해석법을 사용한다.

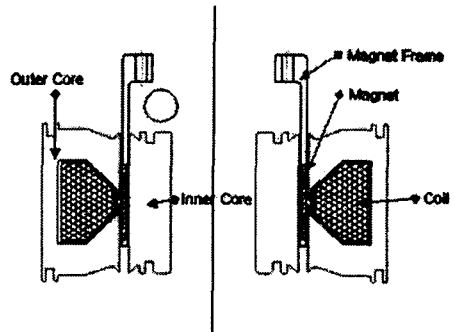


그림 2. 리니어 모터의 구조

철손 해석을 위한 리니어 모터의 구조는 그림 2와 같다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, 리니어 모터는 Inner Core, Outer Core, Inner Ring, Coil, Magnet, Magnet Frame으로 구성되어 있다.

유한 요소 해석을 위하여 정적 해석을 수행하며, 각 부분의 물성치는 표 1과 같이 인가해 준다. 특히, Inner Core와 Outer Core의 물성치는 그림 3과 같은 비선형 B-H 곡선을 인가해 준다.

표 1. 물성치

	Relative Permeability	Current Density (Js)	Resistivity ( $\rho$ )
Inner Core	B-H Curve		
Outer Core	B-H Curve		
Coil	0.98	0.68A and 600 Turns	1.75e-8
Magnet			
Inner Ring	1		7.20e-7
Air	1		

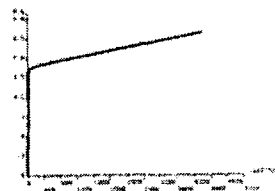
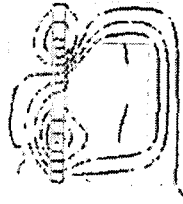
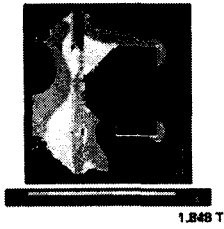


그림 3. B-H 곡선



(a). 자속 밀도 (b). 자속선  
그림 4. 유한 요소 해석 결과

유한 요소 해석을 통해 얻은 자속 밀도 및 자속선 등이 그림 4 (a), (b)에 나타나 있다.

지금까지 수행한 리니어 모터의 유한 요소 해석으로부터 얻은 유한 요소 모델을 철손 해석에 사용하기 위하여 유한 요소 모델의 검증이 필요하며, 검증을 위하여 축방향 힘과 공극의 자속 밀도를 측정하는 두가지 실험을 진행하였다.

첫 번째 실험은 리니어 모터의 축방향 힘을 측정하는 실험이며, 실험 결과를 유한 요소해석 결과와 비교하였다. 표 2에서 볼 수 있듯이, 두 결과의 오차가 거의 없으며, 두 결과가 거의 비슷함을 알 수 있다.

표 2. 축 방향 힘의 비교

	FEA[%]	Experiment[%]	Error[%]
Force	101.6	100	1.64

두 번째 실험은 공극의 자속 밀도를 측정하는 실험이며, 실험 결과를 유한요소해석 결과와 비교하였다. 그림 5는 본 실험을 위한 실험셋이며, 표 3에서 볼 수 있듯이, 두 결과의 오차가 5%이내이며, 두 결과가 거의 비슷함을 알 수 있다.

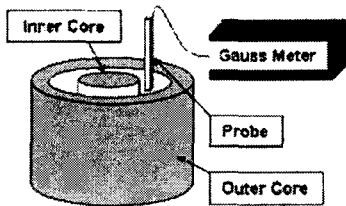


그림 5. 공극 자속 밀도 측정을 위한 실험 셋

표 3. 공극 자속 밀도의 비교

Current[Arms]	Experiment[%]	FEA[%]	Error[%]
0.15	100	103.7	3.3
0.21	100	103.9	3.7
0.25	100	104.1	4.0

축 방향 힘과 공극 자속 밀도를 측정하여 유한요소해석 결과와 비교함으로써, 유한요소해석을 통해 얻은 유한요소 모델을 검증하였으며, 검증된 유한요소 모델을 철손 해석에 사용할 수 있다.

### 3.2 철손 실험

각 철손 해석 방법을 통해 얻은 철손 결과를 검증하기 위해 실제 모터의 철손 측정 실험을 진행하였다. 그림 6은 철손 실험을 위한 실험 셋을 나타낸다. 그림 6에서 볼 수 있듯이, 철손 측정을 위하여 슬라이더스, 파워 메터, 프레임 및 모터로 실험셋을 구성하였다. 특히, 프레임의 상부가 Magnet과 결합된 Magnet Frame과 붙어 있어 Magnet frame을 움직이지 않도록 고정하고 있다.

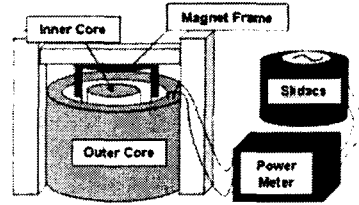


그림 6. 철손 측정을 위한 실험 셋

인가되는 전류를 0.7[Arms]부터 1.1[Arms]까지 변화시켜 가며 모터의 철손 값을 측정하였다.

### 3.3 철손 해석 결과와 철손 실험 결과의 비교

철손 해석 결과의 검증을 위해, 측정된 철손 값과 해석 결과값을 비교하였다. 표 4는 해석 결과와 실험 결과의 오차를 나타내고 있다.

표 4. 철손 해석 결과와 실험 결과의 비교를 위한 오차

Current [A]	Method II [%]	Method III-1 [%]	Method III-2 [%]
0.7	0.2	9.0	11.0
0.8	5.3	0.6	1.8
0.9	2.1	0.6	2.3
1.0	5.4	6.9	4.0
1.1	2.0	6.0	2.8

표 4에서 볼 수 있듯이, Method I을 통해 얻은 해석 결과와 실험 결과와의 비교는 언급하고 있지 않다. 그 이유는, Method I은 eddy current 손실만을 고려하기 때문에 총 철손을 고려할 수 없기 때문이다. 따라서 Method I은 Method II의 eddy current 손실과의 비교를 통해  $k_h, k_e, \alpha$  값을 검증하기 위해 사용하였다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 리니어 모터의 철손 해석을 위하여 Method I과 Method II, Method III의 철손 해석 방법을 적용하였다. 철손 해석 결과의 검증을 위해 철손 측정 실험을 수행하였으며 실험 결과를 해석 결과와 비교하였다. 비교한 결과, 두 결과의 오차가 거의 10% 미만임을 확인할 수 있었다. 위 결과로부터 본 논문에서 고려한 철손 해석 방법은 신뢰할 수 있는 방법이며 리니어 모터의 철손 해석에 적합한 방법이라 할 수 있다.

## 5. 후 기

이 연구는 LG 전자 디지털 어플라이언스 연구소와 두뇌 한국 21 사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] H.K.Lee, W.H.Jung, and K.B.Park "Development of the Compressor for a Household Refrigerator," Proceedings of International Compressor Engineering Conference, 2000
- [2] M.Hippner, H.Yamada and T.Mizuno "Iron Loss Analysis in Linear dc Motor," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 35, no. 5, September 1999
- [3] C. Mi, G.R.Slemon and R.Bonert "Modeling of Iron Losses of Permanent-Magnet Synchronous Motors," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, no. 3, June 2003