

영구자석 가동자를 갖는 직선형 왕복운동 전동기의 철손 특성 해석

장석영*, 김관호*, 최장영*, 조한욱*, 정상섭**, 서진호***
 충남대학교*, (주)LG전자**, 한국항공우주연구원***

An Analysis on Core Loss Characteristics for Linear Oscillatory Motor with Permanent Magnet Mover

Seok -Myeong Jang*, Kwan-Ho Kim*, Jang-Young Choi*, Han-Wook Cho*, Sang-Sub Jeong**, Jin-Ho Seo***
 Chungnam National University*, LG Electronics**, Korea Aerospace Research Institute***

Abstract - This paper deals with an improved core loss calculation of Linear Oscillatory Motor from curve fitting method using modified Steinmetz equation considered anomalous loss. For an accurate calculation, magnetic field analyses in stator core considering, magnetic field analyses in stator core considering the time harmonics are performed. And using the nonlinear finite element analysis (FEM), we applied separated rotating and alternating magnetic field to core loss calculation.

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 짧은 스트로크의 선형 왕복 운동이 요구되는 스틸링 엔진, 공작기, 컴프레서, 조정밀 위치제어, 인공심장 장치 등에 직선형 운동기기가 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 차지하는 공간이 커지고 생산비나 유지관리비등 경제성 측면에서 매우 불리하였다. 이러한 점을 극복할 수 있는 가장 효과적인 방안이 직선형 왕복운동 전동기 (Linear Oscillatory Motor: LOM)를 응용하는 것으로, 최근 국내외적으로 구동 개념 및 종류, 방법이 다양하게 개발되고 있다[1,2].

본 논문에서는 냉장고에서 냉매를 순환시키고 열 교환을 수행하기 위한 동력을 제공하는 컴프레서용 전동기의 철손 특성 해석을 다루고 있다. 컴프레서는 냉장고에서 소비되는 전기 에너지의 대부분을 차지하며, 이에 따라 가정용 냉장고의 에너지 절감을 위해 고효율 컴프레서에 대한 많은 연구가 요구되며, 이를 위해 컴프레서의 정확한 손실 예측이 필수적이다. 영구자석 기기에서의 손실을 대부분 동손, 철손, 회전자손으로 구분되어지며 이 중 동손과 철손이 손실의 대부분을 차지한다. 동손의 경우 직류 및 교류 저항의 정확한 계산이 가능하여 기기의 설계 시에 이를 고려한 설계가 가능하나 철손은 고정자 철심 내 지속밀도의 고조파 성분과 자계의 거동 즉, 회전자계에 의해 그 양이 대폭 증가하기 때문에 영구자석 기기의 설계 및 성능의 해석에 이를 적용하는 것이 매우 어렵다. 국내·외에서 전기기기에서 발생하는 철손의 정확한 해석을 위해 1990년 이후 많은 연구자들이 의해 연구가 지속되어 왔다. 이로부터 본 논문에서는 Curve Fitting 법을 이용하여 철손 계수 합수를 도출하였고, 유한요소해석법을 이용하여 고정자의 영역을 세분화하고 원주방향 및 반경방향 자속밀도를 계산하였으며, FFT를 이용하여 각각의 세분화된 영역에서 고조파 및 거동이 고려된 주파수를 변수로 갖는 철손 특성식을 도출하였다. 도출된 철손 특성식을 통한 영구자석 가동자를 갖는 직선형 왕복운동 전동기의 철손 해석 결과는 2-d FEM에 의한 결과와 비교하였다[3-5].

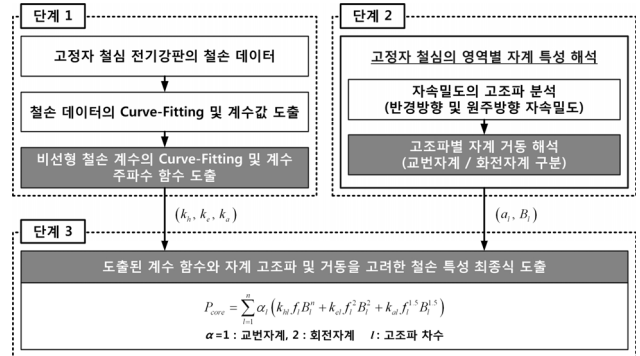
2. 고조파 자계를 고려한 철손 특성 해석

2.1 철손 특성방정식

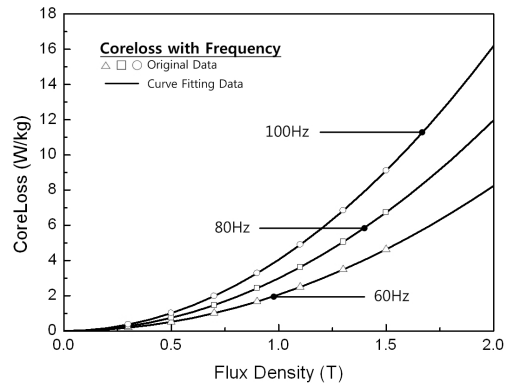
일반적으로 철손은 시변 하는 자계에 의해 철심 내 자구의 변화에 따른 에너지 손실에 기인하는 히스테리시스 손실(P_h)과 철심의 도전율에 의해 발생하는 와전류 손실(P_e)로 구분되어진다. 즉, 히스테리시스 손실은 자석재료가 단위 시간당 히스테리시스 루프를 몇 회 주회하는가에 의해 결정되어, 이는 주파수와 자속밀도에 비례한다. 그리고 와전류 손실은 주파수 증가에 따른 재질의 도전성에 의해 발생하는 기전력변화에 의해 발생되어, 주파수와 자속밀도의 자승에 비례한다. 그러므로 이상적인 정현과 자계의 크기와 주파수의 변화에 따른 철손식인 Steinmetz 식을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_c = P_h + P_e = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 \quad (1)$$

여기서, f 는 직선형 왕복운동 전동기의 왕복운동에 따른 자계의 주파수, B 는 영구자석에 의한 철심의 자속밀도, k_h 와 k_e 는 각각 히스테리시스 손



〈그림 1〉 철손 해석 특성식 도출 순서



〈그림 2〉 Curve fitting에 의한 주파수별 철손 예측 결과

실 계수와 와전류 손실 계수이며, n 은 Steinmetz 상수이다. 재료내부의 자구 폭이나 판에 미치는 장력에 의해 발생하는 이상 와전류 손실성분을 고려하여 식 (1)에 이상 와전류 손실분, P_a 를 더하여 식 (2)를 도출할 수 있다.

$$P_c = P_h + P_e + P_a = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \quad (2)$$

여기서, k_a 는 이상 와전류 손실 계수이다.

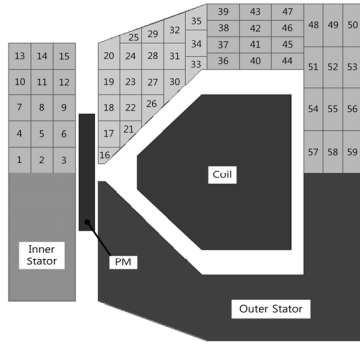
그림 1은 자계 고조파를 고려한 철손 특성식 도출 과정을 보여준다. 본 논문은 코어 제조사에서 제공된 철손 데이터로부터 각각의 주파수에 따른 철손을 다시 도출하고, 간소화를 위해 중량당 철손을 주파수로 나누어 식 (3)에 의해 curve fitting 함으로써 주파수에 따른 각 계수들을 예측하였다.

$$P_c/f = (P_h + P_e + P_a)/f = k_h B^n + k_e f B^2 + k_a f^{0.5} B^{1.5} \quad (3)$$

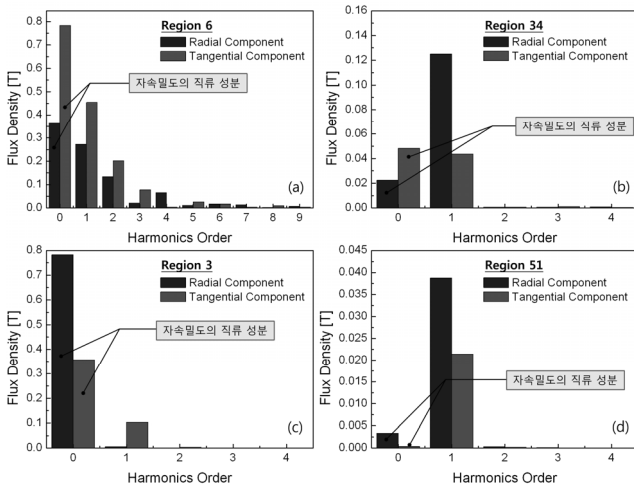
그림 2는 식 (3)에 의해 재 정렬된 철손 데이터와 curve fitting에 의해 얻어진 철손 곡선을 나타낸다.

2.2 고조파를 고려한 자계 특성 해석

본 논문에서는 무 부하 시에 가동자의 왕복 운동에 의해 발생하는 철손인 $P_{C_shuttle}$ 과 가동자인 자석을 제거하고 권선에 교류 전류를 인가했을 때 발생하는 철손인 P_{R_ac} 를 해석하였다. 고정자 철심에서의 자속밀도 반경방향 성분과 원주방향 성분을 각각 계산하였고, 또 이 자속밀도 특성을 FFT 분석을 하여 자계에 포함되어 있는 고조파를 차수별로 파



〈그림 3〉 고정자 코어와 해석 영역 모델



〈그림 4〉 (a), (b): $P_{C_shuttle}$ 해석 시 영역별 자계 고조파 해석 결과, (c), (d): P_{R_ac} 해석 시 영역별 자계 고조파 해석 결과

악하였다. 그림 3은 자계해석을 위한 고정자 해석 모델을 보여주고 있으며, 고정자 영역을 59개의 영역으로 세분화하고 각각의 영역에서 자계 분포 특성 해석을 수행하였다. 그림 4는 각 영역에서의 원주방향 자속밀도와 반경방향 자속밀도의 FFT 해석 결과를 보여주고 있다. 일반적으로 전기기기의 자속밀도는 홀수 고조파만을 포함하는 것이 대부분이나 본 논문에서 해석한 직선형 왕복운동 전동기의 경우 그림 4에서와 같이 직류 성분과 짝수 고조파의 성분이 모두 포함되어 있다. 이러한 경우, 자속밀도의 고조파만을 고려하여 자계 특성 해석을 수행하면 된다[3].

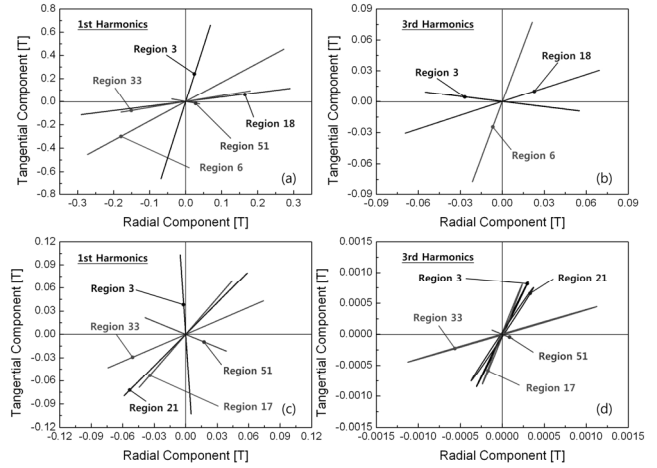
2.3 자계 거동 해석

대부분의 전기기기의 설계자들이 사용하는 철손데이터는 Epstein 실험에 의해 얻어진 것으로 변압기와 같은 교번자계만을 갖는 기기에서는 그 데이터의 이용이 매우 바람직하나, 복잡한 자계분포를 갖는 모터의 경우 교번자계뿐만 아니라 회전자계 영역이 매우 많이 발생하게 되면 Epstein 실험에 의한 데이터를 이용한 curve fitting으로 얻어진 철손 해석결과는 타당성이 매우 결여된다. 실제 하경호 [4]와 M.Enokizono [5]은 반경방향 자속밀도와 원주방향 자속밀도에 대한 축비를 정의하고 이 축비에 의해 교번자계와 회전자계를 정의 내렸다. 또한, 손대락 외-는 철손 해석 및 측정 기술개발에 관한 연구에서 철심 내 자속밀도가 같은 경우 회전자계 영역의 철손 발생이 교번자계 영역에서 철손 발생이 100% 이상 증가함을 실험을 통해 규명하였다. 따라서 본 논문에서는 그림 5에서 보여 지는 것처럼 각각의 해석 영역에서 고조파별 자계 거동 분석을 통해 교번자계와 회전자계를 구분하고 이를 식 (4)에 적용하여 최종적인 철손결과를 도출하였다.

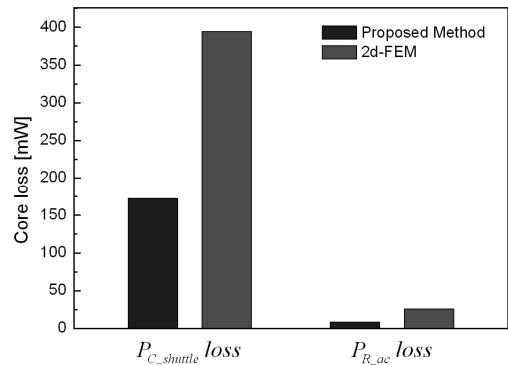
$$P_{core} = \sum_{l=1}^{\infty} \alpha_l (k_{hl} f B_l^n + k_{cl}(f) f^2 B_l^2 + k_{al}(f)^{1.5} B_l^{1.5}) \quad (4)$$

3. 특성 해석 결과

제안된 해석법에 의해 얻어진 $P_{C_shuttle}$ 과 P_{R_ac} 의 철손 해석 결과는 상용 프로그램의 2d-FEM 해석 결과와 비교하여 그림 6에 나타내었다. 제안된 해석법에 의해 계산된 철손은 2d-FEM에 의해 해석된 철손과 비교하여 약 40% 수준으로 매우 낮은 결과를 보인다. 이는, 상용 프로그



〈그림 5〉 (a), (b): $P_{C_shuttle}$ 해석 시 고조파별 각 영역의 자계 거동 해석, (c), (d): P_{R_ac} 해석 시 고조파별 각 영역의 자계 거동 해석



〈그림 6〉 해석법에 따른 철손 해석 결과 비교

램의 2d-FEM을 이용한 철손 해석의 경우 자속밀도의 최댓값만을 취득하여 계산하기 때문이다. 본 논문에서 해석한 직선형 왕복운동 전동기의 고정자 영역이나 매입자석 동기전동기의 회전자 영역에서와 같이 자속밀도의 고조파에 직류 성분을 갖는 경우 철손이 더 높게 해석되어 신뢰성을 갖기 어렵다.

4. 결 론

본 논문은 냉장고에 사용되는 컴프레서용 전동기의 철손 해석법을 제시하였다. 각 영역별로 자계의 고조파 성분을 고려하였고, 고조파별 자계 거동 분석을 통해 철손을 해석하여 상용 프로그램의 2d-FEM을 이용한 철손 해석 결과와 비교하였다. 상용 프로그램의 2d-FEM을 이용한 철손 해석의 경우 자계 파형에서 직류성분을 갖는 경우 철손이 더 크게 해석되는 단점을 갖는다. 그러므로 직선형 왕복운동 전동기의 고정자 영역이나 매입자석 동기전동기의 회전자 영역은 본 논문에서 제시한 철손 해석법을 이용하여 철손 해석을 수행해야 할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. A. Nasar, Linear electric motors: theory, design and practical application. Prentice-Hall, Inc., 1987.
- [2] 정상섭, “진동제어 시스템을 위한 리니어 왕복 액추에이터의 동특성 해석”, 충남대학교 박사학위논문 2002.
- [3] 서장호, 임계원, 전원, 정호창, 김민석, 정현교, “동력분산형 고속 전철용 견인전동기의 고조파 철손 해석”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.162-168, 2008
- [4] Koug-Ho Ha, Sang-Yoon Cha, Jae-Kwan Kim, Jung-Pyo Hong, “Analysis of magnetic field behavior and iron loss in stator core of permanent magnet type motor”, Transactions of the KIEE, vol.55, pp.76-82, Feb. 2006. (Korean)
- [5] M.Enokizono, T.Suzuki, J.Sievert, J.Xu, “Rotational power loss of silicon steel sheet”, IEEE Trans. Magn., vol.26 no.5, pp.2562-2564, 1990