

Solid type 요크를 사용하는 횡자속 전동기의 철손해석

이지영, 홍정표, 장정환\*, 강도현\*  
 창원대학교 전기공학과, \*한국전기 연구원

Iron Loss Analysis of Transverse Flux Linear Motor using Solid type Yoke

Ji-Young Lee, Jung-Pyo Hong, Jung-Hwan Chang, Do-Hyun Kang\*  
 Changwon National University, \*KERI

**Abstract** - This paper deals with a qualitative analysis of iron loss in Transverse Flux Linear Motor (TFLM). 3D equivalent magnetic circuit network method (EMCNM) is used as an analytical method to get flux density of each element. The total core loss is calculated with the magnetic flux density and core loss curves of an optional material. The results of iron loss analysis can be used as a criterion to decide the manufactural shape such as lamination or solid type core, skew position, etc.

1. 서 론

철손 저감을 위해 일반적으로 사용하는 적층 코어 대신 solid type의 코어를 사용하는 경우, 전동기의 제작적인 측면에서 적층 코어에 비해 용이하나, 전동기의 효율적인 측면에서는 철손의 증가로 인하여 적층 코어에 비해 떨어지게 된다. 이 두 가지 상충되는 조건을 고려하여 고정자에만 Solid type 요크를 사용하든지, 혹은 이동자에만 사용할 수 있다. 또한 일정방향 추력 발생을 위하여 어긋나 있는 극을 서로 이어주는 skew 형상을 고정자 또는 이동자에 선택적으로 줄 수도 있다. 이러한 사항을 설계 및 제작에 반영하기 위해서는 전동기 세부 영역에 대한 철손해석 평가가 필요하다.

철손해석 기법으로서는 정도 높은 해석 결과를 도출하기 위하여 전동기 철심 재질의 자속밀도와 그 재질의 철손 데이터를 이용하는 방법을 들 수 있는데 [1],[2], 이는 철손 데이터에 대한 신뢰성을 먼저 전제조건으로 한다. 적층 코어에 대한 시편의 경우, 히스테리시스 손실과 와전류 손실에 대해서 교번 자체뿐만 아니라, 회전 자체에 의한 손실까지 고려한 테스트가 가능하나, solid type의 시편인 경우, 이들 손실을 모두 포함하는 신뢰성 있는 철심데이터를 얻는 것은 시험 장치에서 요구하는 시편의 제한으로 인해 힘든 현실이다.

따라서, 본 논문에서는 횡자속 선형 전동기의 제작 형태를 결정하기 위한 하나의 판단 기준으로서, 정상적인 철손해석을 수행하여 그 결과를 분석하였다.

횡자속 전동기의 3차원적인 자료를 고려한 신뢰성 있는 분석을 하기 위하여, 철심의 자속밀도를 3차원 등가 자기회로망법(Equivalent Magnetic Circuit Network Method, EMCNM)을 이용한 정자계 해석으로부터 얻었다[3],[4]. 얻어진 자속밀도로 상대평가를 위한 철손을 산정하는 데 있어서는 일반적인 자성 재질의 철손 데이터를 이용하였다. 이는 실제 값과 정량적으로 차이가 날 뿐, 대상 전동기 각 위치에서의 상대적 비교는 가능한 것으로 볼 수 있다. 전동기 특정 부분에 위치한 요소에서의 자속밀도 및 손실을 분석함으로써, 전동기의 이동자와 고정자에 solid type 요크를 사용하는 것, 또는 스큐를 주는 것과 같은 결정에 대한 하나의 판단 자료로 사용할 수 있을 것이다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1은 추진기용 횡자속 선형 전동기의 3차원 형상을 나타낸다. 이에 대한 주요 사양은 표 1과 같다.

기본 모델에서 이동자의 재질은 S20C, 고정자 재질은 SM490A이고, 정자계 해석은 이들 재질을 이용하여 수행하도록 한다. 해석 모델에서 이동자의 영구자석 배치는 그림 2와 같고, 그림 3은 정추력 해석 시 고려되는 권선 기저력 파형을 나타낸다.

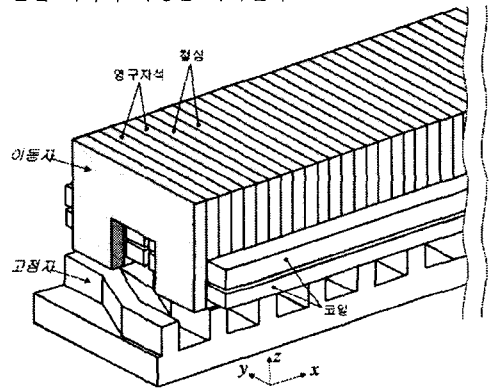


그림 1. 횡자속 선형전동기의 3차원 형상

표 1. 추진기용 횡자속 선형 전동기의 주요 사양

고정자	극 수	16 쌍
	재 질	SM490A
이동자	극 수	16개
	영구자석 수	15개
	영구자석	$B_r = 1.2T \quad \mu_r = 1.05$
	상당 직렬턴수	288 turn
	정격전류	17.36A
	정격 기저력	5000 AT
	재 질	S20C

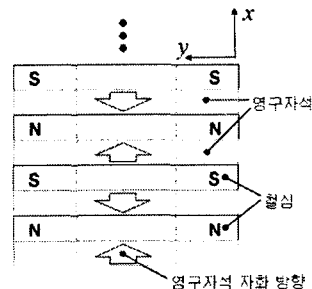


그림 2. 이동자 자극배치에 대한 개념도

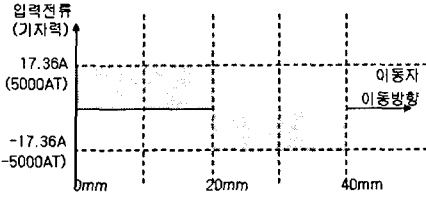


그림 3. 정추력 해석 시 고려되는 권선 기저력 파형

## 2.2 철손 해석 방법

신뢰성 있는 해석방법으로 알려진 3차원 등가 자기회로방법을 이용한 철손해석은 그림 4와 같은 순서로 진행되고 그에 대한 자세한 사항은 다음과 같다.

### 가. 3차원 등가자기회로방법 (EMCNM)

3차원적인 자료를 형성하는 횡자속 전동기 구조를 고려하여 3차원 등가자기 회로방법을 이용하여 해석모델의 각 요소에서 시간에 따른 자속밀도 분포를 보다 빠르고 정확하게 산정할 수 있다. 이 때, 자속밀도는 x, y, z 성분의 각각에 대한 분포를 구한다.

### 나. 이산 푸리에 변환

각 요소에서의 자속밀도 분포를 구한 후, 각 요소 별 자속밀도 분포를 이산 푸리에 변환(DFT)을 통해서 각 고조파 성분에 따른 자속밀도의 크기를 식 (1)과 같이 구한다.

$$B_{pv} = \sum_{n=0}^N B_p(n) e^{j2\pi nv/N} \quad (1)$$

여기서,  $v$ 는 고조파 차수,  $B_{pv}$ 는  $v$ 번째 고조파에 대한 자속밀도의 최대값,  $B_p$ 는 각 시간에 따른 요소에서의 자속밀도 값을 각각 나타낸다.

다. 각 요소에서 자속밀도분포의 주파수에 따른 철손 합 각 고조파 주파수에 따른 자속밀도의 크기를 구한 후 주파수에 따른 자속밀도-철손 데이터로부터 각 요소에서 고조파 성분에 따른 철손의 합을 구한다. 여기서,  $W_{ne}$ 는  $i$ -번째 요소,  $v$ -차 고조파 성분의 철손을 나타내며,  $W_{me}$ 는  $i$ -번째 요소에서 고조파를 고려한 철손 성분을 나타낸다. 본 논문에서 횡자속 전동기에 적용한 자속밀도-철손 데이터는 S18재질의 철손데이터로서 그림 5와 같다.

라. 전 요소에 대한 철손의 합으로부터 전체 철손 계산 각 요소에서 고조파 성분을 고려한 철손을  $m$ -개의 전 요소에 대한 합을 통하여 횡자속 전동기의 전체 철손  $W_t$ 를 구할 수 있다.

## 2.3 철손 해석 결과

### 가. 자속밀도 분포

그림 6은 그림 1의 추진기용 횡자속 선형 전동기의 3차원 해석 모델과 각 부분의 자속밀도를 대표하는 요소를 나타낸 것이다. 그림 4의 해석 순서로서, 철손해석을 한 결과 그림 7, 8, 9와 같은 그래프를 얻었다.

그림 7은 그림 6에서 보여주는 대표 요소에서의 이동자 변위에 따른 자속밀도 변화를 보여주고 있다. 이동자의 요크 중심 부분에 해당하는 MUC(Mover-Upper-Center) 요소에서는 좌측에서 우측 또는, 우측에서 좌측 극을 횡단하는 자속성분으로 인해 By 성분이 지배적이다. MUL(Mover-Upper-Left) 요소에서는 이동자 극 사이를 횡단한 자속이 고정자로 이동하는 중간단계로서 By와 Bz 성분이 지배적이다.

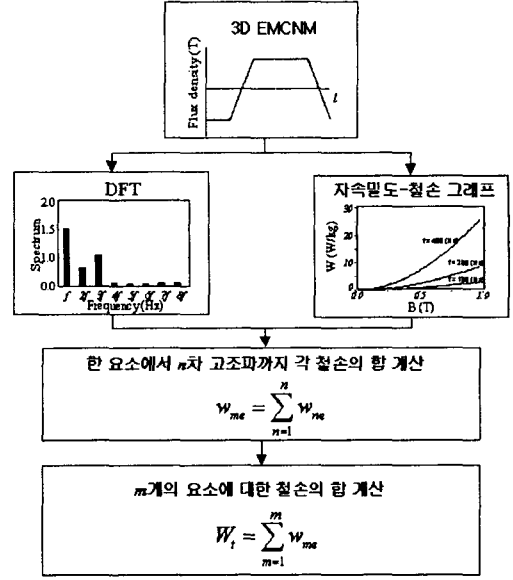


그림 4. 철손해석 순서

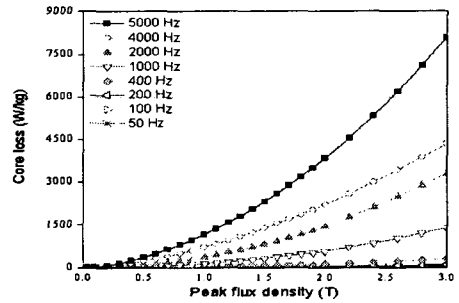


그림 5. 자성 재질 S18의 철손 데이터

표 2. 대표 요소에서 자속밀도 변화

	대표요소	주요 자속밀도 변화
이동자	MUC	By
	MUL	By, Bz
	MDL	Bz
고정자	SUL	Bx, By, Bz
	SUC	Bx, By

그러나 MDL(Mover-Down-Left)요소에서는 고정자로 이동해 가는 자속이 지배적이므로, Bz 성분만이 교번하게 된다.

DC성분에 해당하는 영구자석과 AC 성분에 해당하는 전기자 권선을 모두 가진 이동자에서 그림 7 (f)와 같이 교번자계만 존재한데 비해, 고정자인 그림 7(d)와 (e)에서는 그림 7 (g)에 보는 것과 같이 회전자계가 존재하게 된다.

### 나. 고조파 분석 및 철손 비교

그림 8은 고조파 차수에 따른 누적 철손량을 나타내고 있다. 각 요소별 철손 누적량이 100차 고조파 이후 거의 일정하므로, 철손 산정시 요소의 자속분포에 대한 고조파 분석은 100차 까지 고려하였다. 그림 9는 이동자와 고정자, 그리고 전체적인 철손량을 속도에 따라 산정한 결과이다. 고정자와 이동자 중, 자속의 포화가 심한 이동자의 철손량이 고정자 보다 큰 것을 알 수 있다.

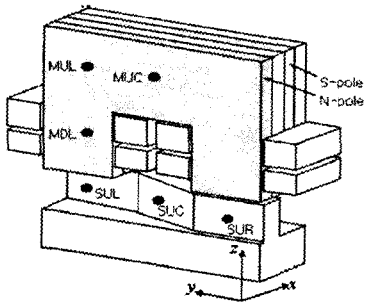
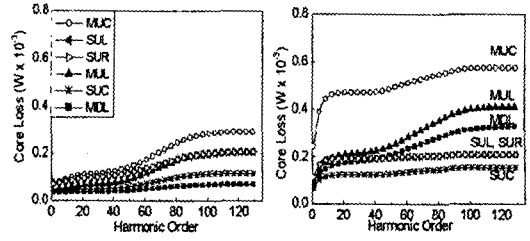
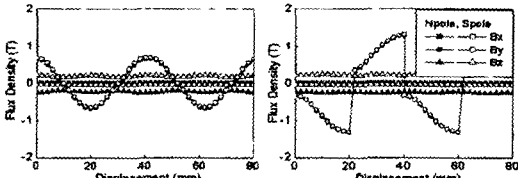


그림 6. 횡자속 선형전동기의 해석 모델과 부분별 대표 요소

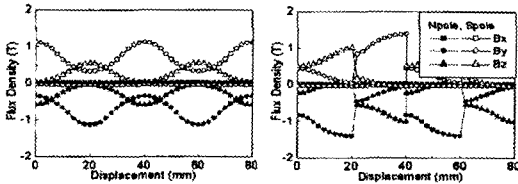


(a) 무부하 운전 (b) 부하 운전

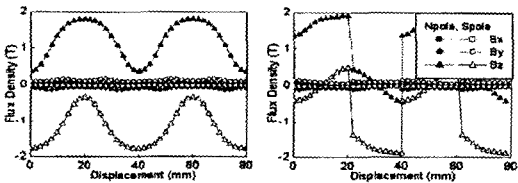
그림 8. 고조파 차수 고려 정도에 따른 그림 6의 대표 요소에서의 누적 철손량 변화



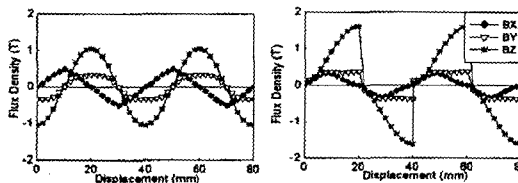
(a) MUC (좌:무부하 운전, 우:부하 운전)



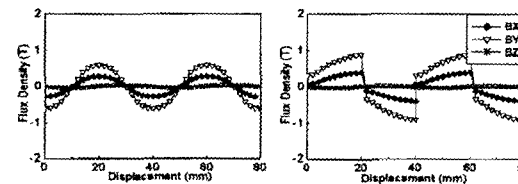
(b) MUL (좌:무부하 운전, 우:부하 운전)



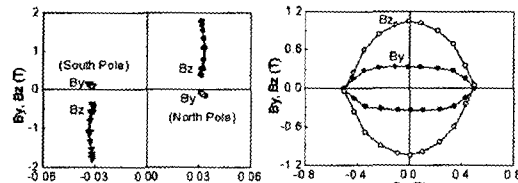
(c) MDL에서 자속밀도 I (좌:무부하 운전, 우:부하 운전)



(d) SUL에서 자속밀도 I (좌:무부하 운전, 우:부하 운전)



(e) SUC (좌:무부하 운전, 우:부하 운전)



(f) MDL에서 자속밀도 II (g) SUL에서 자속밀도 II

그림 7. 대표 요소에서의 이동자 변위에 따른 자속밀도 변화

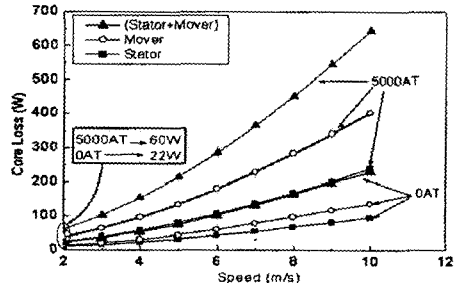


그림 9. 횡자속 전동기의 속도에 따른 철손량

### 3. 결론

본 논문에서는 횡자속 선형 전동기 제작시 이동자와 고정자에 solid type 코어를 사용하는 경우와, 스큐를 주는 위치 결정 등에 따른 제작 형태를 결정하기 위한 하나의 기준으로서, 정성적인 철손해석을 수행하여 그 결과를 분석하였다.

해석 대상에서 영역별 대표 요소를 5개 선정하여 자속밀도 변화를 분석해본 결과, 제작과 전기자를 모두 가지고 있는 이동자에서는 교번자계만 발생하고, 고정자에서는 회전자계가 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 고정자와 이동자를 분리해서 철손을 산정해 본 결과 무부하시에는 큰 차이를 보이지 않으나, 부하 전류 인가시 이동자의 철손이 고정자에 비해 크게 나타나는 것을 확인함으로써, solid core를 사용한다면, 고정자에 이를 사용하고, 이동자에는 가능한한 적용 코어를 사용하는 것이 적합하다고 판단할 수 있다. 상대적으로 어긋난 극형상을 유지하기 위해서 고정자 또는 회전자에 적용되는 skew로 인한 철손 비교는 평가해보아야 할 앞으로의 과제이다.

### [참고 문헌]

- [1] Hyuk Nam, Kyung-Ho Ha, Jeong-Jong Lee, Jung-Pyo Hong, and Gyu-Hong Kang, "A Study on Iron Loss Analysis Method Considering the Harmonics of the Flux Density Waveform Using Iron Loss Curves Tested on Epstein Samples," *IEEE Trans. on Magn.* vol.39, No.3, pp.1472-1475, 2003
- [2] Jeong Jong Lee, Youngk Kyoun Kim, Hyuk Nam, Kyung Ho Ha, Jung-Pyo Hong, and Don Ha Hwang, "Loss Distribution of Three-Phase Induction Motor Fed by Pulsewidth-Modulated Inverter," *IEEE Trans. on Magn.* vol.40, No.2, pp.762-765, 2004
- [3] 허진, 홍정표, 현동석, "3차원 외전류 해석을 위한 동가자 기하포방법의 개발", *전기학회 논문지* 51권 5호, pp.228-233, 2002
- [4] Jin Hur, Sang-Baeck Yoon, Dong-Yun Hwang, an Dong-Seok Hyun, "Analysis of pmlsm using three dimensional equivalent magnetic circuit netwo method," *IEEE Trans. Magn.* vol. 33, No. 5, 1997