2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

오버행을 가지는 SMC재질을 이용한 BLDC전동기의 3차원 철손 해석

이상호, 이지영, 남혁, 홍정표, 허 진*, 성하경*
창원대학교 전기공학과, *전자부품연구원

3-D Core Loss Calculation in BLDC Motor having Overhang made of SMC Material.

Sang-Ho Lee, Ji-Young Lee, Hyuk Nam, Jung-Pyo Hong, Jin Hur*, Ha-Kyung Sung*
Changwon National University, *KETI

Abstract - This paper deals with the core loss calculation of a BLDC motor made of Soft Magnetic Composite material. Since the teeth of motor partially have overhang in axial direction, 3 - dimensional equivalent magnetic circuit network (3D-EMCN) 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 the SMC material. The calculated result is compared with core loss of the motor without overhang in stator teeth.

1. 서 론

기존의 전동기들은 운전상태중 전동기 내부에서 발생하는 열적인 문제점과 손실을 최소화하기 위하여 전기강판의 적층을 통한 조립이 대부분 이었다.

한편, SMC(Soft Magnetic Composite) 재질은 분말소재로써 성형을 통한 가공으로 전동기 제작이 가능하며 복잡한 전동기 형상에 대한 제작이 용이하고 부드러운 표면 가공이 쉬운 장점이 있다. 또한, 등방성의 자기적 특성과 열적인 특성으로 인하여 고속 운전 시, 와전류손을 줄일 수 있고 분말소재로 제작되었기에 전동기 재활용이 용이하므로 선진국에서 각광받는 소재로 대두되고 있다. 하지만, SMC 재질은 전기강판에 비해 비투자율이 낮아 저주파수에서의 전체 철손은 일반적인 전기 강판보다 매우 크므로 철손에 대한 평가는 전동기의 특성 분석에 중요한 요소로서 작용한다 [1].

철손은 자속밀도와 동작 속도에 따른 주파수에 따라 변화하게 된다. 기존의 철손 해석은 축방향으로 동일한 형상을 가지는 전동기에 대해 2차원 유한요소법(2 dimensional Finite Element Method, 2D-FEM)을 통한 자속 분포와 재질의 철손 데이터로부터 철손을 산정하였다 [2].

그러나, 2D-FEM 해석 특성상 3차원 형상을 가지는 전동기에 대해서는 정도 높은 철손 산정에 어려움을 지니므로 3차원 모델링을 통한 자속밀도 변화를 산정하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 3차원 형상을 갖는 전동기를 대상으로 3차원 등가 자기회로망법(3D Equivalent Magnetic Circuit Network, 3D-EMCN)을 이용한 철손 해석 기법에 대하여 다루었다.

3D-EMCN은 육면체 요소 중심에서의 퍼미언스(Permeance)법에 의해 자기 스칼라 포텐셜를 이용한 수치해석 기법이다 [2]. 모델링 구현의 어려움과 해석 시간이 2D-FEM보다 긴 단점을 지니지만 복잡한 전동기 형상의 표현과 3차원 자속 변화를 산정하는데 유용하다 [3].

해석 대상 전동기는 6-step으로 구동하는 BLDC 전동기로서 전동기 토크 특성을 향상시키기 위하여 축방향으로 오버행을 가진다 [4].

오버행을 가지는 해석대상 전동기의 자속밀도 변화를 3D-EMCN을 이용하여 산정하고 SMC 재질의 철손 데이터를 이용하여 철손을 산정하였으며 오버행을 가지지 않는 경우의 철손 해석 결과와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 해석 이론

일반적으로 철손은 자속밀도 변화가 기본파 주파수에 의해 정현적으로 변화한다고 가정할 때 히스테리시스 손실계수와 와전류 손실계수를 반영한 방정식은 다음과 같다.

$$w = B^2\left\{\sigma_H(\frac{f}{100}) + \sigma_E d^2(\frac{f}{100})^2\right\} \quad [W/kg] \qquad (2.1)$$

여기서 w는 단위중량당 철손, B는 자속밀도, σ_H 및 σ_E는 각각 히스테리시스 손실계수와 와전류 손실계수이며 f는 주파수, d는 전기 강판의 두께를 나타낸다.

실제 운전중인 전동기의 자속밀도는 고조파 성분에 의해 비정현적으로 변화하므로 자속밀도의 고조파 성분에 의한 철손이 고려되어야 한다.

그림 1은 고조파를 고려한 철손을 산정하기 계산 과정을 도시한 것이다.

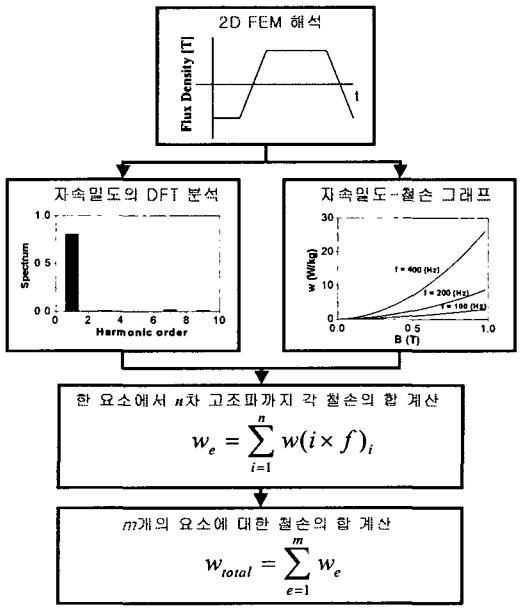


그림 1. 철손 계산 과정

유한 요소법을 이용하여 철심 요소에서의 자속밀도 변화를 구한 후 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transfrmation, DFT)을 통한 각 고조파별 분석을 수행한 후 각 고조파 성분에 따른 자속 밀도의 크기를 다음과 같이 구한다.

$$B_{pv} = \sum_{n=0}^{N} B_p(n) e^{j2\pi nv/N} \qquad (2.2)$$

여기서 v는 고조파 차수, B_{pv}는 v번째 고조파에 대한 자속밀도의 최대값, $B_p(n)$는 각 시간에 따른 요소에서의 자속밀도값을 각각 나타낸다.

B_{pv}를 이용하여 철심 재질의 데이터로부터 고조파 주파수별로 각각의 철심 요소 w_e를 구한 후 전체 철심 요소에 대한 철손 w_{total}을 산정한다.

2.2 해석 모델

표 1은 해석 대상 전동기의 사양으로서 상당 직렬턴수가 432이며 4개의 직렬회로로 구성되어 있다. 그림 2는 오버행을 갖는 해석대상 전동기의 3차원 형상을 나타낸 것이다. 이 오버행은 엔드턴에 의해 발생하는 축방향으로의 빈 공간에 대하여 영구자석, 회전자 요크부 그리고 고정자 요크부를 축 방향으로 늘려주는 역할을 하여 전동기 토크 및 출력 특성을 향상시키게 된다.

표1. 해석 대상 전동기 사양

항 목		내 용	단 위
DC link 전압		220.0	V
상 수		3	-
정격 속도		3000	rpm
정격 토크		9.8	kgf-cm
정격 출력		300	W
전기자	전류	1.24	A
	상당직렬턴수	432	Turns
	권선방식	집중권	-
영구자석	Br	0.4	T
	μ_{rec}	1.2	-
철심 재질		SMC	
축방향길이		71mm+(오버행5.5mm×2)	
구동 방식		6-step구동 (120° 도통)	

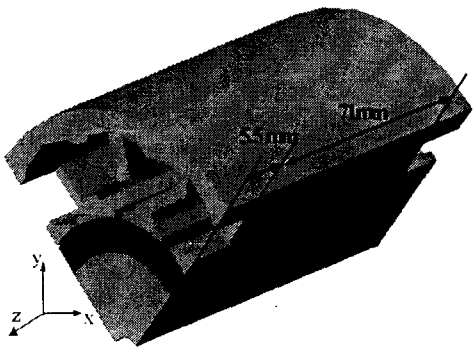


그림 2. 오버행을 갖는 해석 대상 전동기의 3차원 형상

2.3 해석 순서

해석대상 전동기는 3상 6-step 구동방식으로 동작하므로 2상씩 스위칭 도통되는 구간에 대해 회전자를 이동시키면서 해석하였다 [5]. 한 주기에 대한 자속밀도 변화를 산출하고 그림 3에 있는 SMC 재질의 철손 데이터를 이용하여 주파수별 철손을 산정하였다. 이때, 회전자 철심에서 발생하는 철손은 고정자 철심에 비해 매우 작은 값을 가지므로 본 논문에서는 고려하지 않았다.

2.4 해석 결과

그림 4는 철심에서의 대표 요소를 나타내며, 대표 요소 ⓑ에서의 축 방향 변위에 따른 자속밀도 변화를 그림 5에서 나타내었다. 이 때, 축 중심을 변위 0mm로 한다. 축 방향 변위에 따라 수직성분 B_n은 엔드턴 쪽으로 갈수록 누설 영향에 의하여 자속밀도가 작아지는 것을 알 수 있다. 접선성분 B_t은 일정한 자속밀도를 가지며 축 방향 변위 성분 B_z는 엔드턴쪽으로 갈수록 프린징 현상에 의하여 증가하였다.

그림 6은 오버행이 있을 때와 없을 때 철손을 비교한 것으로서 2D-FEM은 축 방향 변위에 따른 자속밀도 변화를 반영하지 못하므로 3D-EMCN보다 철손이 크게 산정되었다.

그림 7은 그림 4의 대표요소에 대한 B_x, B_y 의 변화를 나타낸 것이며, 그림 8은 3D-EMCN으로부터 산정된 자속밀도를 반영하여 오버행과 부하 조건에 따른 운전 속도별 철손 결과이며 정격 주파수에 대하여 5차 고조파(1KHz)까지 고려하였다. 정격속도 3000rpm에서 오버행이 존재할 때의 오버행이 없을 때 보다 토크는 10%, 정격출력에 대해서는 1.8% 크게 나타났다. 이 결과로부터 오버행에 따른 자속 증가는 전동기 토크 특성을 향상시키는 장점을 가지지만 자속 증가에 의한 자속밀도의 증가로 인해 철손을 증가시키고 있음을 알 수 있다.

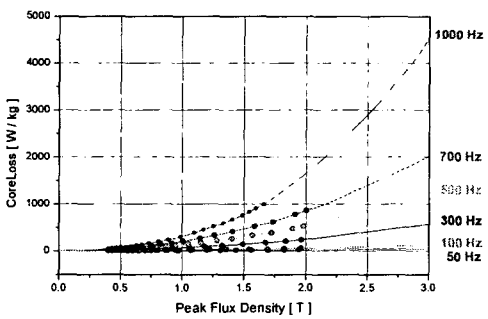


그림 3. 주파수별 SMC 철손 데이터

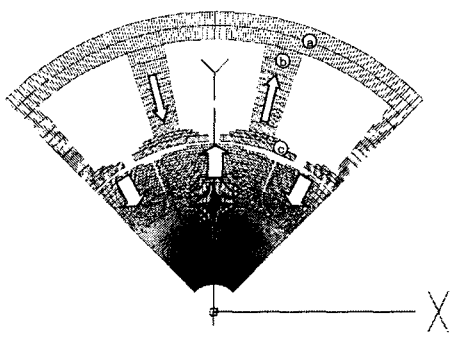


그림 4. 자속밀도 분포에 대한 대표 요소

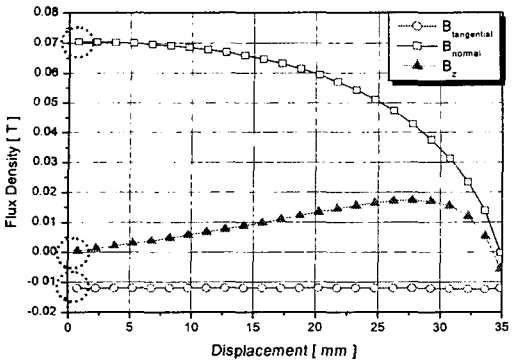


그림 5. 축방향 변위에 따른 ⓑ요소에서의 자속밀도 변화

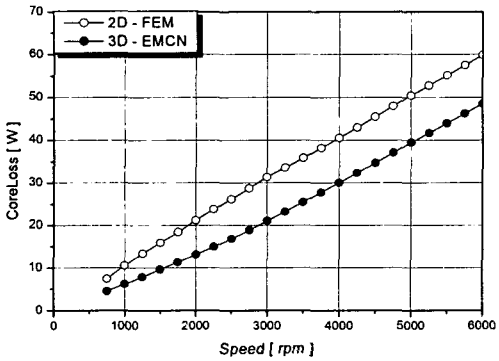
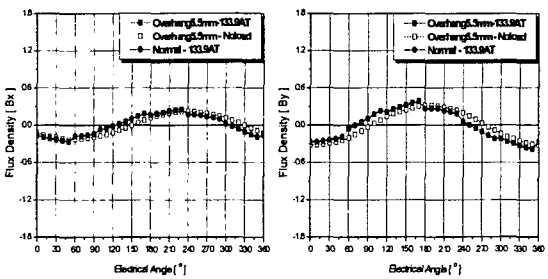
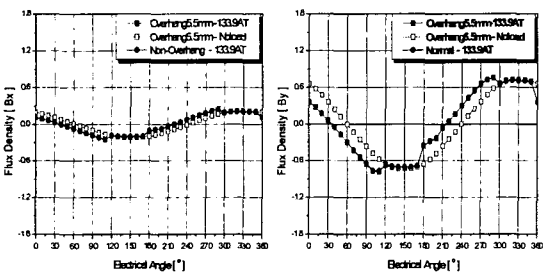


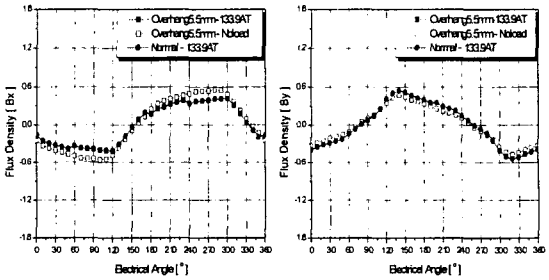
그림 6. 오버행이 없을 때 철손



(a) ⓐ요소에서의 자속밀도 변화



(b) ⓑ요소에서의 자속밀도 변화



(c) ⓒ요소에서의 자속밀도 변화

그림 7. 대표 요소부분에서의 자속밀도 변화

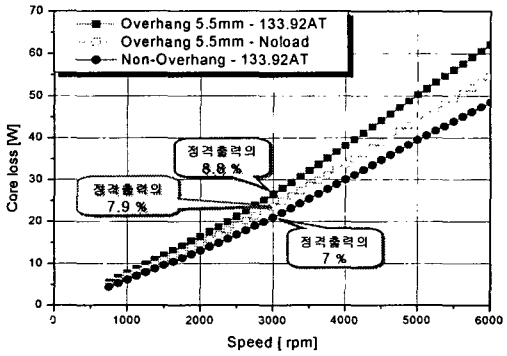


그림 8. 운전 속도별 철손

3. 결 론

본 논문에서는 SMC 재질을 이용하며 오버행을 갖는 BLDC 전동기를 대상으로 자속밀도 변화와 철손 데이터를 이용한 철손 해석에 대하여 다루었다.

3D-EMCN을 이용하여 3차원 형상을 고려한 자속밀도를 산정하여 철손 계산에 반영하였고, 2D-FEM에 의한 철손해석 결과와 비교하여 상당한 차이가 발생함을 확인하였다. 그리고 오버행 유무에 따른 해석 결과로부터 오버행은 전동기 토크 특성을 향상시키지만 철심에서의 자속밀도를 증가시켜 철손 또한 증가시킨다는 것을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] YouGuang, Jian Guo Zhu, Jin Jiang Zhong and Wei Wu, "Core losses in Claw Pole Permanent Magnet Machines With Soft Magnetic Composite Stators", IEEE, Trans. Magnetics, vol. 39, No. 5, Sept 2003

[2] Goga Cvetkovski, Lidija Petkovska and Milan Cundev, "Improved Design of a Novel PM Disk Motor by Using Soft Magnetic Composite Material.", IEEE, Trans. Magnetics, vol. 38, No. 5, Sept 2002

[3] Jin Hur, Sang-Baeck Yoon, Dong-Yun Hwang and Dong Seok Hyun, "Analysis of PMLSM using three dimensional equivalent magnetic circuit network method.", IEEE, Trans. Magnetics, vol. 33, No. 5, 1997

[4] Young Kyoun Kim, Jung-Pyo Hong, Kyung-Ho Ha, Jin Hur and Ha-Kyung Sung,"Characteristic Comparisions between Iron Powder Materials and Lamination Cores in Brushless Motors.", ISEF 2003, vol. 1, pp307 312

[5] J.R. HENDERSHOT JR and TJE MILLER "DESIGN OF BRUSHLESS PERMANENT-MAGNET MOTORS",OXFORD MAGNA PHYSICIS, pp2-27 2 29, 1994