

대용량 추진용 BLDC전동기의 자계 및 열계 해석

김 한들¹, 김 철¹, 신 판석¹, 김 동석², 성 일권², 박 관수²
 흥의대학교 전기공학과¹, 부산대학교 전기공학과²

A Magnetic and Thermal Analysis of the large scale BLDC Motor for Propulsion System

Han-deul Kim¹, Chul Kim¹, Pan-seok Shin¹, Dong-sok Kim², Il-kwon Sung², Gwan-soo Park²
 Dept. of Electrical Engineering, Hongik University¹, Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University²

Abstract - 본 연구는 대용량 추진용 32극, 192슬롯의 3MW급의 BLDC(Brushless DC) 전동기를 모델로 2차원 유한요소법(FEM)을 이용 전자계 및 열계 특성을 해석한 것이다. 이러한 해석을 통하여 BLDC 전동기의 진동 및 소음의 원인을 분석하고 성능향상을 위한 방법을 연구하며 이에 전동기의 소음 및 진동의 저감과 성능을 향상시킬 수 있는 최적설계에 그 목적이 있다.

또한 FEM을 이용 열계 특성을 해석하고 이를 분석하여 설계정수 변경에 반영한다. 위의 결과들을 설계에 적용하여 BLDC의 성능향상을 위한 최적설계 모델을 제시하게 될 것이다.

1. 서 론

추진용 전동기의 진동 및 소음원으로는 기계적인 원인, 전자기적인 원인, 공기역학적인 원인이 있다. 그러나 추진용 전동기는 대부분 저속으로 구동되므로 추진용 BLDC 전동기 같은 경우 상대적으로 전자기적인 원인에 의한 진동 및 소음에 주원인이다. 전동기의 코킹 토크(Cogging torque)가 소음 및 전동의 주원인으로 이러한 코킹 토크를 FEM을 이용하여 해석하고 이를 분석하여 전동기의 코킹 토크를 저감시킬 수 있도록 전동기의 설계변경에 관한 방법을 연구한다.

BLDC전동기 특성상 일반적으로 타 전동기에 비하여 전력밀도, 관성모멘트에 대한 토크 비, 단위전류 당 토크비 등이 더 높은 고효율의 전동기임에도 불구하고 추진용 모터는 일반적으로 저속 구동됨에 따라 상대적으로 큰 코킹 토크가 발생된다. 그리고 인버터의 스위칭에 의한 전류 리플 때문에 발생되는 토크 리플도 해석해 볼 필요성이 있다.

이러한 문제점들을 보완하기 위하여 대용량 추진용 내전형 BLDC 전동기의 전동 및 소음원을 FEM을 이용한 시뮬레이터로 해석해봄으로써 추후 향상된 대용량 추진용 BLDC 전동기의 설계에 도움이 되고자 한다.

2. 전자계 해석

2.1 5MW PM 사양 및 전자계 해석 모델

대용량 추진용 PM BLDC MOTOR의 기본 사양은 다음과 그림 1 및 표 1과 같이 3상 32극 150[rpm], 정격전압 600[V], 전류 9600[A]이하이다.

표 1. PM BLDC MOTOR의 기본 사양

용량[MW]	극수[극]	상수[상]	슬롯수[개]	Rated Voltage Range[Volts]	전류[A]	Rated Speed [rpm]
5	32	3	192	550 ~ 830	< 9600	150

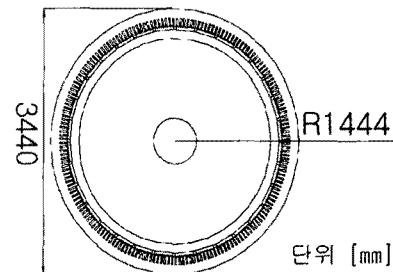


그림 1. 3MW PM BLDC MOTOR 단면

자계 해석모델의 도면은 그림 2에서 보듯이 해석의 용이성을 위하여 전체 도면에서 1/16만을 해석 하였다. 재질조건은 그림 2에서 보이는 각각의 재질에 따라 다음 표 2의 조건을 부여하였다. 재질조건 중 영구 자석의 방향은 N극과 S극이 번갈아 가면서 위치하고 착자방향은 방사상이다. Shaft는 재질은 구조용 강판, 고정자 및 회전자 코어는 전기용 강판, 그리고 영구자석은 SmCO이다.

표 2 자계 해석 모델의 재질조건

재질	SmCO	Shaft	core	Coil
특성	Br=0.9T	a=3500	Js=1.8T, a=7500	copper

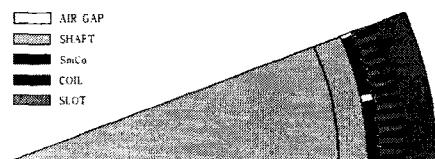


그림 2. FEM 자계해석 모델

그림 3은 해석모델의 외부 회로도이며, Y결선으로 동일 상내의 코일들은 병렬 결선이다. BLDC의 동작방법은 회전자내의 영구자석의 기계각에 따라 동작한다. 각각의 소자에 있어서 인덕턴스의 값은 $1 \times 10^{-6} [H]$ 이고, 각각의 코일은 단면적 30[m²]에 56번으로 내부 저항값은 91[mΩ]이다.

회로와 각각의 코일과의 연결은 분포권의 결선방법에 따라 그림 4와 같다. 1 Phase는 그림 4의 회로도에서 S1, S2의 제어를 받는 코일들로 좌로부터 1, 2, 3, 4번의 코일들이다. 2 Phase와 3 Phase은 각각 S3, S4와 S5, S6의 세어를 받는 코일들이다.

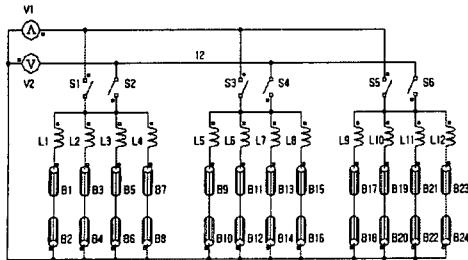


그림 3. FEM 해석모델의 회로도

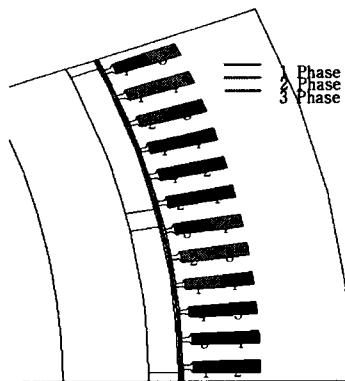


그림 4. 고정자 해석 모델의 각 상과 결선 방법

2.2 자계 해석 결과

본 절에서는 코킹토크, 토크리플, 전압·전류파형 해석을 한 결과를 기술한다.

2.2.1 코킹 토크 해석

코킹토크가 전동기의 전동 및 소음의 원인으로 이에 대한 해석을 일차적으로 하였다. 코킹 토크는 외부회로를 연결하지 않고, 정속회전(여기서는 150rpm) 할 때의 한 극에 걸리는 토크를 해석함으로써 확인할 수 있다.

다음 그림 5는 해석결과의 예로서 기계각 = 0°에서 외부회로가 없을 때의 자속선도와 자속밀도이다.

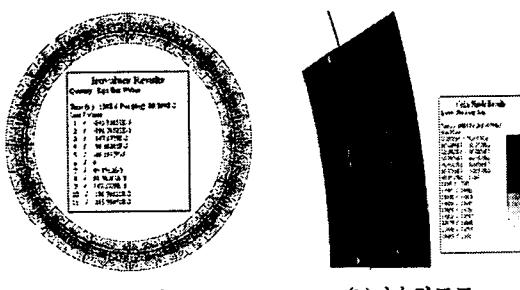
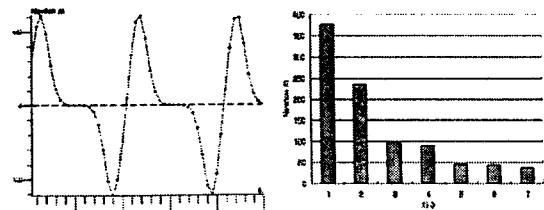


그림 5. 자속선도와 자속밀도

그림 6은 한 극에 의한 코킹토크를 해석한 결과이다. 그림 6의 (a)는 계산된 코킹토크 값이고, (b)는 코킹토크의 한 주기에 대한 스펙트럼 분석을 한 것이다. 그중 코킹 토크의 최대 값은 613.4 [Newton. m]이다.

기본 주파수는 480[Hz]이며 차수에 따라 $480n$ [Hz] 형으로 주파수는 증가하게 된다. 1고조파의 성분비는 44.5%로

가장 크며, 2차 39.1%, 3차 11.6%, 4차 1.7%, 5차 2.2% 순이다.

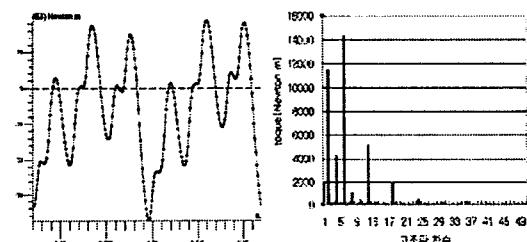


(a) 코킹 토크 (b) 코킹토크 스펙트럼

그림 6. 코킹토크와 코킹토크의 스펙트럼

2.2.2 토크 리플, 공극자속밀도 및 전압·전류 파형

그림 7은 외부 회로를 연결한 후 공극의 토크리플을 분석한 것으로써 (a)는 공극의 토크 리플이고, (b)는 (a)에서 한 주기에 대한 스펙트럼이다. 토크리플은 $-35.314\sim20.729\times E3$ [Newton. m]의 값을 가진다. 그리고 스펙트럼에서 기본 주파수는 20[Hz]이고 차수에 따라 $20\times n$ [Hz] 형으로 주파수는 증가하게 된다. 여기서 6차의 성분비는 33.2%로 가장 크며 다음 순으로는 2차는 26.6%, 12차는 12.0%, 4차는 9.8%, 18은 4.7%, 1차는 4.5%순으로 이 6개의 성분비의 총 합은 90.8%이다. 그리고 나머지 차수들은 상대적으로 작은 값들이다.



(a) 공극 토크리플

(b) 공극 토크리플 스펙트럼

그림 7. 공극의 토크리플과 토크리플의 스펙트럼

그림 8은 외부 회로를 연결한 후 공극의 자속밀도에 관한 결과로써 (a) 공극의 자속밀도, (b)는 (a)에서 한 주기에 대한 공간고조파에 대한 스펙트럼이다. 공간고조파란 실제 전류가 인가되는 정보를 직접적으로 나타내어 위치별 시간별로 그 특성을 바로 나타내는 법으로서 공간상의 배치를 고조파형식으로 표현하는 방식이다.

공극 자속 밀도의 최대값은 0.806 [T]이다. 그리고 스펙트럼에서 1차의 성분비는 53.4%로 가장 크고, 다음 순으로 3차 15.1%, 5차 7.3%, 7차 4.9%, 25차 2.6%, 13차 2.4%순이며 이 6개의 성분비의 총 합은 85.7%이며 나머지 차수들은 상대적으로 작은 값들이다.

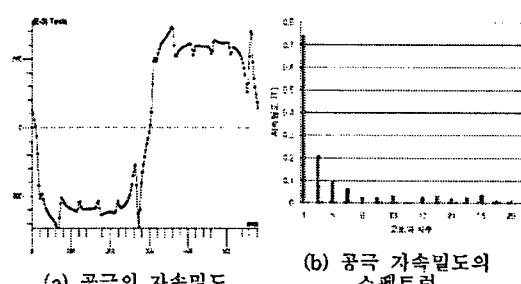


그림 8. 공극의 자속밀도와 공극 자속밀도의 스펙트럼

그림 9에서 (a)는 코일에 걸리는 전압파형이고, (b) 코일에 흐르는 전류파형이다. 전압 및 전류는 40[V]이고 전류는 전압에 대해 -148°의 위상차가 생긴다. 전류 파형은 구형파로 안정적이나, 코일에 인가되는 전압파형은 그림 9의 (c)에서 기본 파형이 58.4%, 2고조가 3.6%, 3고조파가 22.8%이다.

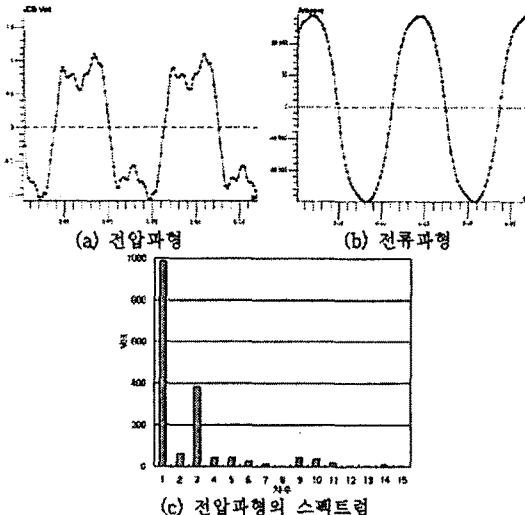


그림 9. 전압·전류 파형

3. 열계 해석

전동기내의 온도 분포는 energy 방정식에 의해 다음 식 이용하여 해석한다.

$$\nabla \cdot K \nabla T + q' = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

여기서 K 는 열전도도 [W/m°C], q' 는 체적내 발열 밀도 [W/m³], ρc 는 열용량 [Ws/°C]이다. 열계 해석 모델은 기본적으로는 전자계해석과 동일하나 해석의 용이성을 위하여 그림 10의 (a), (b)처럼 전자계해석 모델보다 더 작은 1/32(회전자)와 1/64(고정자) 부분으로 각각 나누어서 해석 하였다. 실제 코일은 그림 11과 같이 7x8개의 코일들로 구성되어 있으며, 용이한 해석을 위하여 그림 10의 (b)처럼 2x3으로 간략화하였다. 열계해석의 재질조건과 조건은 다음 표 3 및 4와 같다.

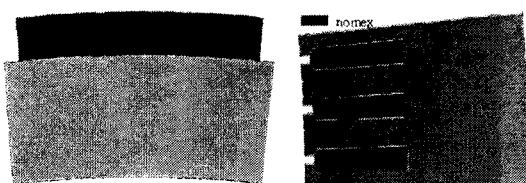


그림 10. 열계해석 모델 (좌 회전자, 우 고정자)

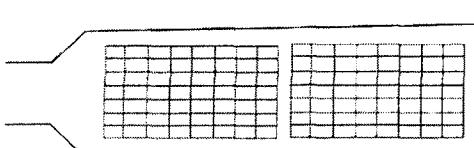


그림 11. 고정자 코일 모델

표 3. 열계 해석 모델의 재질조건(열전도도 [W/m°C])

Shaft	coil	slot wedge	nomex	SmCO	Silicon Iron
44.88	383.85	0.3	0.155	600	380

표 4 열계 해석 조건

고정자 표면	열 교환 계수 [W/m²°C]	80
공극면	열 교환 계수 [W/m²°C]	80
주위온도	[°C]	24
공극온도	[°C]	60
천손(회전자)	[W]	1075.54
철손(고정자)	[W]	4506.3
동손(고정자)	1 slot [W]	2036

열계의 해석 조건으로 고정자에서의 철손(Core)은 부피×밀도×철손=75533[α]×7.85[g/α]×7.6[W/d]=4506.3[W]에 의해 입력전력은 4506.3[W]로, 동손은 $P = I^2 R$ 에 의해 코일 1개당 전류 150[A], 저항 0.0014[Ω]값에 의해 입력전력은 211.3[W]이고, 회전자의 철손은 부피×밀도×철손=77600[α]×7.7[g/α]×1.8[W/d]=1075.5[W]에 의해 입력전력은 1075.5[W]로 입력하였다.

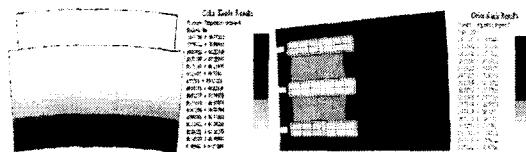


그림 12. 온도분포도

그림 12. 온도분포도

그림 12는 열계해석 결과로서 고정자의 발열은 코일에서 주로 발생하며 그 최고 온도는 183°C이고, 회전자의 온도는 공극을 통하여 열이 전달되며 최고 온도는 62°C이다. 코일에서 발열량이 크므로 이에 적절한 냉각 시스템을 필요로 하며, 영구자석에 대한 냉각은 고려하지 않아도 될 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 대용량 추진용 BLDC 전동기의 자계 및 열계 해석을 수행하였다. 높은 코킹토크가 발생됨에 따라 높은 진동 및 소음이 발생될 것으로 사료된다. 그리고 토크리플은 120[Nm]의 6고조파가 33.2%의 성분비로 확인되었으며, 공극 자속밀도에서는 기본파가 53.4% 성분비가 커졌다. 이에 진동 및 소음원을 줄이기 위해서는 극/슬롯비, 또는 형상의 변화 등을 통한 저감 대책이 필요하다. 그리고 전압원에서는 기본 파형이외에 41.6%로 전동기의 효율향상을 위해서는 이 또한 고려해야 하며, 코일에서의 발열량 또한 크므로 이에 대한 적절한 냉각시스템을 갖추어야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김 한수, “민감도 기법을 이용한 300W급 BLDC 전동기의 자구 형상 최적 설계 연구”, 홍익대학교 석사논문, 2004
- [2] J. R. Hendershot Jr 외, “Design of brushless permanent-magnet motor”, Oxford University Press, 1994