

팬부하용 영구자석 전동기의 전절권과 동심권 3D 모델 비교 연구

양정수\*, 전현우\*, 이기덕\*, 이 주\*  
한양대학교\*

A Study on comparison Full-pitch and Concentric Winding 3D model of PMSM for Fan-Load

Jungsoo Yang\*, Hyun-Woo Jun\*, Ki-Doek Lee\*, Ju Lee\*  
Hanyang University\*

**Abstract** - 영구자석 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor : 이하 PMSM)는 기존 유도전동기에 비해 자속량, 토크 리플 측면에서 우수하다. 또한 모터 제작시 특수모터가 아닌 실용 모터임에 따라 절연재를 위한 공간, 가격대비 효율 등을 고려해야 한다. 본 논문에서는 팬부하용 전동기의 권선형태가 전절권과 동심권을 가질 경우 두 전동기의 특성을 비교하며, 엔드코일의 다른 형태를 통해 볼 수 있는 차이점을 분석 하고자 한다.

1. 서 론

기존 유도전동기에 비해 영구자석을 사용한 PMSM은 같은 크기 대비 자속량과 출력밀도가 뛰어나 모터가 들어가는 여러 전기기기에 사용되고 있다. 이러한 PMSM의 장점은 종종 가정용 및 공업용 어플리케이션 생산과 연결되었으며, 이는 곧 모터의 효율을 높이는 연구와 더불어 동시에 절연을 고려한 설계, 가격대비 효율 등 여러 가지 실제적인 측면에서의 모터 기술개발도 늘어나게 하였다. 따라서 단순히 효율 및 출력밀도 뿐만 아니라, 모터 제작시의 실제 적용 상황 반영이라는 키워드도 중요한 자리를 잡게 되었다. 본 논문에서는 모터의 외형, 즉 모양은 바꾸지 않고 단지 권선법만 바꾸었을 때 어떤 점이 달라지는지를 알아보기 위하여 3D 모델링을 통해 해석하였으며, 해석 결과를 통해 전절권과 동심권 두가지 모델의 특성을 비교하였다. 또한 권선법에 의한 엔드코일의 차이를 통해 어떤 모델이 절연 및 가격적인 측면에서 유리한지 비교해 보았다.

2. 본 론

2.1.1 전동기 설계 특성

운전 특성 및 설계치는 표 1에 나타내었으며, 전압 제한치는 인버터를 통한 반도체 소자의 내압 및 여러 소자를 고려한 마진을 둔 수치로 300(Vdc)를 선정하여 3D model simulation을 통해 두가지 권선 설계를 진행하였다.

<표 1> 운전 특성

Contents	Spec.	단위
Voltage	300	Vdc
Rated Power	100	kW
Torque @ Base RPM 20,000 [rpm]	50	Nm

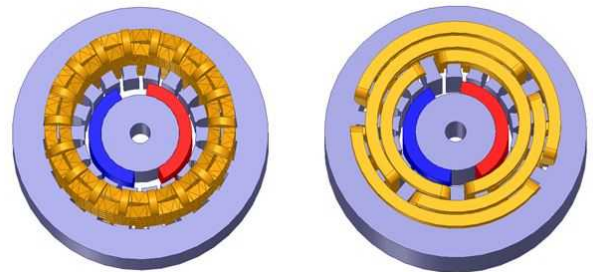
2.1.2 3D modeling and simulation

PMSM 설계를 위하여 2극 18슬롯 전동기를 Maxwell 프로그램을 통해 3D 모델링 하였다. 두가지 권선형태를 비교하기 위해서 두 모델 모두 같은 형태의 고정자(슬롯모양 포함)와 회전자를 가져갔으며, 물성치 또한 똑같이 지정하였다. 전절권 모델의 경우 이층권 Whole Type 형태의 권선으로 병렬 회로수 2로 설계하고 슬롯당 도체수를 4로 지정하였으며, 동심권의 경우 단층권으로 직접 권선을 설정하였으며 병렬회로수 2, 슬롯당 도체수를 8로 지정하여 슬롯 면적당 도체의 집적도를 같게 설계하였다. 그림1은 디자인한 3D 모델링을 보여준다. 표 2는 두 모델에 대한 설계모델 사양을 보여주고 있다.

이때 3D simulation을 한 이유는, 기존 Maxwell 프로그램의 2D 및 RM해석에서는 동일 시간에 전류를 인가하는 전류원 해석일 때 폐회로 코일을 생성하여 설정하더라도 결과적으로 전류의 in, out을 2D로 모델링 한 모터의 단면적에서만 계산하기 때문에 실제 전절권과 동심권의 차이를 볼 수 없었다. 따라서 3D 모델을 통해 권선 엔드코일을 실제로 나타내고, 그 코일을 따라 전류를 가해 해석하여 전절권과 동심권의 차이를 나타내었다.

<표 2> PMSM 설계 사양

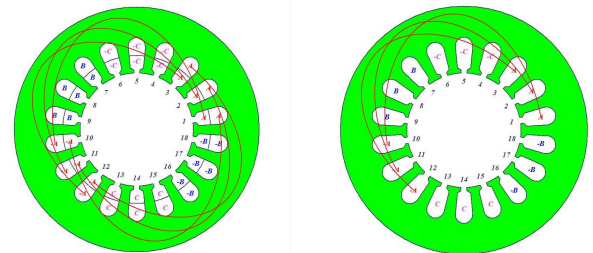
설계 모델	전절권	동심권	단위
고정자 외경	248		mm
회전자 외경	100		
적층 길이	104		
공극	1		
병렬회로수	2		
접적률	57.3		



a) 전절권 3D model      b) 동심권 3D model  
<그림 1> 전절권과 동심권의 3D model

2.2.1 전동기의 특성 해석 및 분석

1) Winding과 3D modeling



a) 전절권 a상 권선      b) 동심권 a상 권선  
<그림 2> 전절권과 동심권의 a상 권선 비교

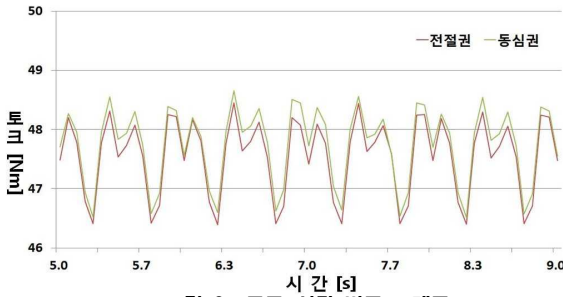
전절권의 경우 병렬회로 수가 2인 이층권으로 설계하여 코일 피치를 극피치와 같게 하였으며, 한 권선당 도체수는 4로 지정하였다. 동심권의 경우 병렬회로수가 2인 단층권으로 설계하였으며, 한 권선당 도체수를 8로 지정하여 두 모델의 접적률을 약 40퍼센트로 동일하게 하였다.

2) No-Load Analysis (무부하 해석)

두 모델에 대해 무부하 해석을 통해 산출된 그래프를 아래 그림에 나타내었다. 전절권의 경우 선간 역기전력의 경우 194.75V 이고, 동심권의 경우 193.86V인 것을 확인할 수 있다. 전절권보다 동심권의 경우에 모두 크기면에서 값이 약간 큰 것을 그래프를 통해 확인할 수 있다. 이러한 특징은 동심권의 경우 엔드코일 부분의 길이 및 권선의 높이가 전절권의 모델과 달라 생기는 자속량의 차이를 원인으로 볼 수 있다.

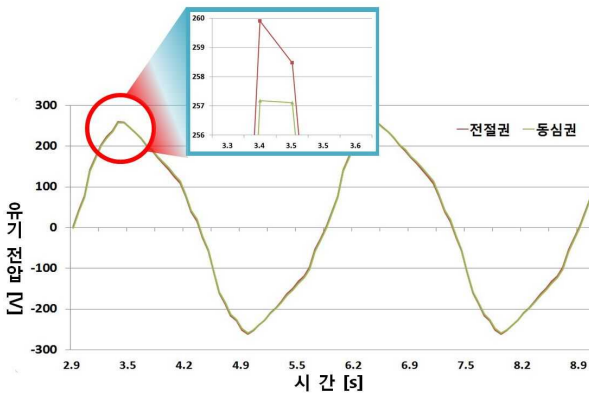
### 3) Load Analysis (부하 해석)

설계한 100kW급 팬모터의 경우 부하시 정격속도 20000rpm에서 50Nm가 요구되며 두 모델 모두 Iamax를 300A로 하여 전류를 가했다. 이를 통해 출력한 그래프는 아래의 그림 3과 같다. 전철권의 경우 약 47.53Nm, 동심권의 경우 약 47.91Nm로 동심권이 전철권에 비해 0.38Nm의 토크가 큼을 알 수 있었다. 또한 순시 정격속도에서 요구된 토크를 만족시키는 경우의 전철권 토크 리플은 약 2.4%, 동심권의 경우는 약 2.3%로 약간 줄어들었다. 이는 수치상으로 영향력이 크지는 않다.



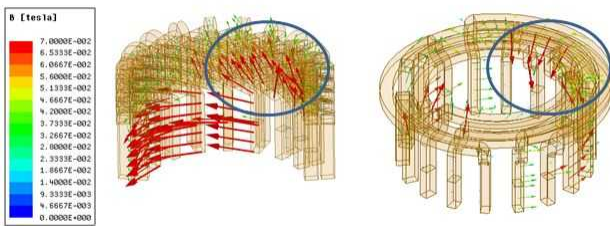
〈그림 3〉 토크-시간 비교 그래프

유기전압을 a상만 비교할 경우, 전철권은 피크치가 약 261.4V, 동심권의 경우 피크치가 약 257.6V로 동심권이 전철권에 비해 약 4V정도 낮은 선간 유기전력 피크치를 가짐을 그림 4를 통해 볼 수 있다.



〈그림 4〉 유기전압-시간 비교 그래프

이는 전철권의 경우 엔드코일 부분의 높이가 동심권에 비해 더 높기 때문에 이 부분으로 누설되는 자속량이 더 커서 생기는 차이로 생각해 보았으며 이를 보이기 위해 누설자속을 비교해 그림 5로 나타내었다. 전철권의 누설자속 벡터 3D플롯의 경우 가독성을 쉽게 하기 위해서 1/4 모델로 만들어 누설자속을 나타내었으며 동심권의 경우 1/2 모델로 나타내었다. 이때 스케일은 0부터 0.07[T] 까지로 동일하게 맞췄다.



a) 전철권 누설자속 벡터플롯 b) 동심권 누설자속 벡터플롯  
〈그림 5〉 전철권과 동심권의 권선 누설자속 비교

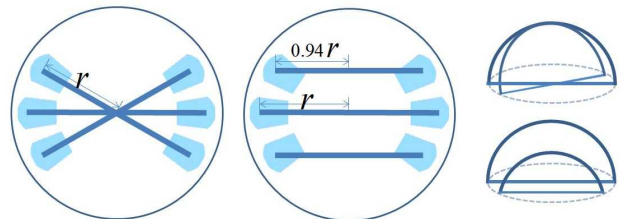
#### 2.2.2 비교

해석을 통한 두 권선법의 3D 모델링 특성 값을 비교하여 표 3으로 나타내었다. 이러한 특성 차이는 수치상으로 미미할 수 있으나 약간이나마 동심권이 전철권에 비해 전자계적인 해석으로서 나은 점을 확인할 수 있었다.

두 권선법 모델링의 가장 큰 차이는 엔드코일 부분으로, 모델링한 윗 부분에 해당한다. 이를 그림 6으로 도식화 하여 나타내었다. 샤프트의 공간을 고려하여 아치형으로 감아올린다고 가정하고, 이를 위에서 내려다 본 그림이라고 생각했을 때, 전선의 면적이 같으므로 면적당 길이를 통해 도선의 양이 줄어들었음을 확인할 수 있다.

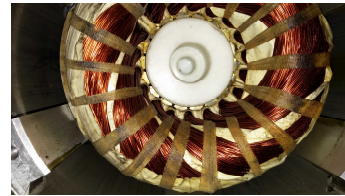
〈표 3〉 전철권과 동심권의 특성 값 비교

	Contents	전철권	동심권	단위
무부하시 (No-Load)	선간전압	194.75	193.86	V
부하시 (Load)	출력	100	100	kW
	토크	47.53	47.91	Nm
	토크리플	2.4	2.3	%
	Induced V-peak	261.4	257.6	V
	전류	300 [A]	300	A
	효율	94.54 [%]	94.54 [%]	%
	역률	0.927	0.927	



a) 전철권 b) 동심권  
〈그림 6〉 동심권과 전철권의 권선양 비교 모식도

한 상의 엔드코일에 쓰인 총 구리의 양을 간략하게 비교하기 위해서 그림 6을 이용하여 두 모델의 권선면적과 길이를 곱하여 계산했을 때 약 45812mm<sup>3</sup> 만큼 차이남을 알 수 있다. 이러한 부피차이 만큼 절연체의 보충이 가능함을 뜻하며 이는 곧 전철권 권선에 비해 동심권이 절연 부분에서 우수할 수 있음을 나타낸다. 전철권 모델의 모터를 실제 제작하여 기동하는 도중에 엔드코일 부분에서의 절연과피로 인해 소손이 일어났던 점을 감안했을 때(그림 7), 동심권으로 권선법을 바꿔 제작할 경우 보충재를 추가하여 절연과피 및 소손의 가능성을 낮출 수 있다.



〈그림 7〉 전철권 실제모델 엔드코일 소손 사진

또한 보충재를 추가하지 않을 경우 이득 본 부피차이에 밀도를 곱해 나타낸 무게로 가격차이를 계산했을 때, 구리의 가격이 g당 10원이라 가정하면 권선법의 변경으로만 모터 1대 당 약 16382.4원의 이득(약 3%)을 취할 수 있다는 결론을 내릴 수 있다. 이는 이론적으로 계산한 것으로 실제 제작과정에서 권선의 감는 방향 및 제작 환경에 따라 달라질 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 같은 형상의 100kW급 팬부하 모터를 권선법만 바꿀 경우 어떤 특성이 다른지 검토해 보았다. 기존 RMxprt나 2D해석의 경우 권선의 엔드코일 및 권선의 폐회로를 반영하지 않기 때문에 3D 모델링을 통해 실제 두 모델을 엔드코일까지 반영한 해석을 통해서 차이점을 보았으며, 해석 결과를 통해서 두 모델의 전자계적 특성을 비교할 수 있었다. 또한 현재 많은 모터의 생산이 실제적인 상황을 고려하여 이뤄진다는 점을 고려하여 권선의 엔드코일 부분의 차이점을 이용, 간략하게 가격적인 부분을 서술하였다. 또한 기존 전철권 모터가 실제 제작 후 기동하는 도중 엔드코일 부분이 타버리는 상황이 발생함을 고려하였을 때, 기존 외형의 변경 없이 동심권으로만 대체하여 절연체의 보충공간 확보를 통해 엔드코일의 소손 가능성을 낮출 수 있음을 언급하였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Ki Chan Kim, "A Study on the Optimal Design and Performance of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for EV/HEV", 2008
- [2] Dong-Seok Ryu, "A Study on Concentric and Distributed Winding of BLAC using FEM for EV", 2012
- [3] Jang-Seok Myong, "Comparison of Winding Method And Characteristics Analysis In Double Rotor Structure Permanent Magnet Generator", 2012