

# 운전조건을 고려한 고속 영구자석형 동기전동기의 회전자 손실 해석

論 文  
56-1-8

## Analysis on the Rotor Losses in High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor Considering the Operating Condition

張錫明\*·趙漢旭<sup>†</sup>·崔璋英\*\*  
(Seok-Myeong Jang · Han-Wook Cho · Jang-Young Choi)

**Abstract** - In this paper, the rotor losses in high-speed permanent synchronous motor (PMSM) considering the operating condition are discussed. In order to maintain the mechanical integrity of a high-speed permanent magnet machine rotor intended for high-speed operation, the rotor assembly is often retained within a stainless steel or Carbon-Fiber/Epoxy sleeve. The sleeve is exposed to fields produced by the stator from either the slotting or the mmf harmonics that are not synchronous with rotor losses. On the basis of analytical field analysis, the rotor losses are analyzed. In particular, the no-load, rated with air-cooled, and forced water cooled conditions are considered. The results are validated extensively by comparison with non-linear finite element method (FEM).

**Key Words** : Analytical field analysis, high-speed permanent magnet synchronous motors, rotor loss.

### 1. 서 론

일반적인 중·저속용 영구자석 동기 전동기의 경우에는 고속기에 비해 회전자 조립체의 도전율이 매우 낮고, 주파수가 상대적으로 낮으므로 회전자 와전류 손실이 고려되지 않는 경우가 많다. 그러나, 고속 운전용 영구자석 전동기의 경우 영구자석 등을 포함하는 회전자 조립체의 비산 또는 이탈을 방지하기 위하여 주로 낮은 도전율을 갖는 슬리브를 회전자에 설치하게 되는데, 이는 전기자 전류에 의한 자계 또는 회전자 리액션 자계의 고조파에 의해, 고주파에서 와전류를 유지시키며, 중·저속 기기에 비해 손실의 큰 비중을 차지한다. 또한, 고정자에서 발생하는 철손이나 동손에 비해 냉각이 어렵다는 점을 감안하면, 설계단계에서부터 회전자 손실의 예측 및 저감에 대한 연구가 필요하다.

회전자 손실의 원인은 3가지로 분류할 수가 있다. 첫째, 고정자의 치-슬롯 형상에 의한 공극 자속밀도의 비정현성에 의한 와전류 손실로써, 무부하 회전자 손실이 이에 해당한다. 둘째, 고정자 기자력의 비정현성에 의한 회전자 손실은 무부하 공극자속밀도에  $q$ -축에 정렬된 전기자 전류에 의한 기자력 성분이 더하여져 발생하는 시간 및 공간 고조파에 의한 손실로 부하 손실에 해당한다. 셋째, PWM 인버터에 의한 시간고조파의 추가적 손실 발생원으로, 전술된 손실에 부가적으로 발생하는 와전류 손실이다 [1].

회전자 손실에 관한 연구는 주로 초고속 전동기 및 발전기에 관한 연구 분야에서, Z. Q. Zhu와 D. Howe 가 [2],[3] 등의 논문에서 해석적 기법을 이용하여 회전자 손실을 계산

하였고, N. Irenji 는 [4]-[6] 에서 유한요소법과 해석적 기법을 각각 자속밀도해석과 손실해석에 적절히 보완 적용하여 고속 전동기에서의 회전자 와전류 손실을 시간고조파 및 공간고조파, 회전자의 각 영역에 대하여 계산한 결과를 발표한 바 있다. 또한, 이와 동일한 기법으로 본 저자는 초고속 전동/발전기에서의 회전자 손실 저감 방안 [7], 고속 발전기의 운용시 정류기의 영향 [8] 등을 발표한 바 있다. 그러나, 유한요소법에 의한 자속밀도 데이터를 이용한다는 해석적 단점을 가지므로, 이에 대한 보완으로 회전자 손실 해석 기법을 제안하였다.

즉, 본 논문에서는, 회전자의 도전성 재질에서 발생하는 회전자 와전류 손실의 해석기법을 제안하였다. 극좌표계 하에서 정밀한 해석적 자속밀도를 이용하여 자계의 고조파 분석을 수행하고, 이를 2-D FFT 와 포인팅 정리에 의하여 시간고조파 및 공간고조파별 손실, 회전자의 영역별 손실을 계산하였다. 특히, 해석대상 전동기의 운전상태, 즉, 무부하시, 공냉 정격 부하시, 수냉 부하시, 속도에 따른 회전자 손실의 변화 추이 및 계산 오차를 면밀히 검토하였다.

### 2. 회전자 손실

#### 2.1 회전자 손실 해석

전자기 에너지 변환기의 특성 해석 방법은 크게 수치 해석법과 전자장 이론에 의한 해석적 기법으로 구분할 수가 있다. 수치 해석법은 전자기 에너지 변환기기의 복잡한 기하학적 형상의 정밀해석에 적용할 수 있으며, 전자장 이론 해석법은 초기 설계 시 설계 변수에 따른 기기의 특성을 분석·파악하는데 적용하기에 용이하다. 그러나, 회전자의 도전성 재질에서 발생하는 회전자 와전류 손실의 해석은 극좌표계에서 축방향으로 존재하는 와전류 해석에 관한 문제로 귀결되므로, 전자장 이론에 의한 해석적 기법을 적용 시, Bessel 방정식의 미분, 적분과 같은 수학적 계산이 포함되어

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 忠南大 工大 電氣工學科 博士修了  
E-mail : hwcho@cnu.ac.kr

\* 正會員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

\*\* 正會員 : 忠南大 工大 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2006年 7月 25日

最終完了 : 2006年 11月 14日

매우 어렵고 복잡하다. 이러한 수학적 수고로움을 덜기 위하여 N. Irenji 는 유한요소법과 해석적 기법을 각각 자속밀도 해석과 손실해석에 적절히 보완 적용하여 고속 전동기에서의 회전자 와전류 손실을 계산한 바 있고 [4]-[6], 본 저자들은 이와 동일한 기법으로 회전자 손실의 해석기법에 관한 연구결과를 발표한 바 있다 [7],[8]. 그러나, 앞서 발표된 연구들은 유한요소법에 의한 자속밀도 데이터를 이용한다는 해석적 단점을 가지므로, 초기 설계시 회전자 손실의 빠른 민감도 해석에 불리하다. 따라서, 본 논문에서는 이에 대한 보완을 위한 회전자 손실 해석 기법을 제안하였다.

본 논문에서 제시하는 회전자 손실 해석 기법은 아래와 같이 크게 3-단계로 나뉘어 질 수 있다.

1-단계) 해석적 기법에 의한 회전자 표면에서의 자속밀도 해석

- 극좌표계 전동기 해석모델에서 영구자석의 자화모델링, 자성재료의 선형화 등을 통해 지배방정식을 유도하고 각 매질에서의 자기 벡터포텐셜, 자속밀도 등을 구한다.
- 공간적 자속밀도의 왜형을 고려하기 위하여 공극에서의 relative permeance를 적용하여 공극자속밀도를 구하고, 시간에 따른 자속밀도의 왜형을 고려하기 위하여 1-슬롯피치를 30 등분한 기계각 0.5 도 씩 이동한 자속 밀도 데이터를 수집한다.
- 무부하시 해석에서는 영구자석에 의한 자계만 고려하고, 부하시 냉각 방식에 따른 운전 조건을 고려하여 q-축에 전기자 자속 벡터가 정렬(전류상차각=0°)된 이상적 벡터제어가 수행되고 있다고 가정하였다. 단, 인버터 전류 왜형에 따른 시간고조파 성분은 없다고 가정하였다.

2-단계) 2-D FFT 해석을 통한 자속밀도의 고조파 성분 분석

- 시간 및 공간고조파가 고려된 고조파 분석을 위해 2-D FFT 이론을 적용한다.
- Matlab 이 지원하는 FFT 함수에 의하여 1-단계에서 얻어진 자속밀도 데이터에서 시간 및 공간고조파를 추출한다.

3-단계) 직교좌표계에서 포인팅정리에 의한 손실 계산

- 직교좌표 상에서 고정자 면전류를 정의하고, 전계의 세기 및 자계의 세기 특성식을 유도한다.
- 2-단계에서 얻어진 자속밀도의 고조파를 전계의 세기 및 자계의 세기 특성식에 대입한다.
- 포인팅 정리에 의하여 자속밀도의 고조파 차수와 동일한 시간 및 공간고조파에서 회전자 와전류 손실을 계산한다.

그림 1은 전술된 회전자 손실 계산에 관한 해석 과정을 요약한 순서도이다. 여기서  $k$ 는 시간 고조파,  $h$ 는 공간고조파이며,  $\Delta k$ 와  $\Delta h$ 는 전동기의 구조가 고려된 시간 및 공간고조파의 증분이다. 그리고, 해석 대상 영구자석형 전동기의 사양은 부록에 나타내었다.

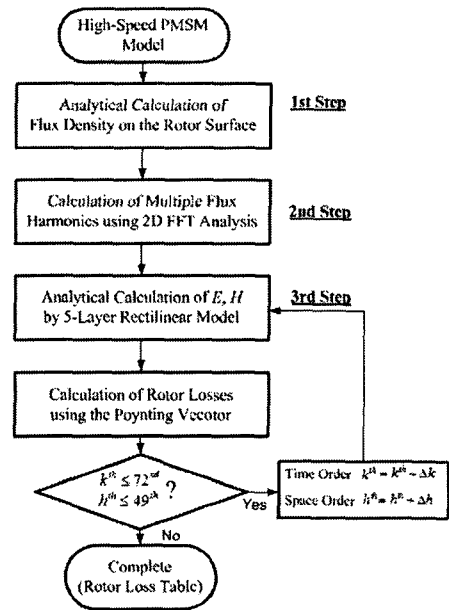


그림 1 회전자 손실의 계산 순서도  
Fig. 1 Flowchart of rotor loss calculation

2.2 회전자 표면 자속밀도 해석 및 고조파 해석

2.2.1 슬롯을 고려한 자속밀도 특성해석

일반적 전동기의 구조에서 고정자에 슬롯이 존재하므로 극당 자속량을 감소시키며, 공극과 영구자석 영역에서 자속 밀도의 분포에 영향을 끼친다. 일반적으로, 유도기에서는 카터계수를 이용하여 1차원적으로 슬롯을 고려한 자속밀도의 분포 현상을 고려하지만 영구자석 기기에서는 유효공극이 크기 때문에 카터계수만으로는 적절한 결과를 얻을 수 없다. 본 절에서는 유효공극이 상당히 큰 영구자석 기기에서 슬롯의 영향에 의한 극당 자속의 감소와 자속 분포를 고려하기 위해 2차원 relative permeance 함수를 적용한다. 따라서, 슬롯리스 기기를 기본으로 유도된 영구자석과 권선에 의한 자속밀도 분포 계산식에 다음의 2차원 relative permeance 함수를 곱하면 슬롯의 영향을 고려할 수 있다 [9],[10].

카터계수가 고려된 공극  $g_e$ 와 고정자 등가 내반경  $R_{se}$ 는 식(1), (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$g_e = g + (K_c - 1)g' \tag{1}$$

$$R_{se} = R_s + (K_c - 1)g' \tag{2}$$

여기서,  $g' = h_m / \mu_r$ 은 유효공극,  $h_m$ 은 영구자석의 높이,  $\mu_r$ 은 영구자석의 비투자율,  $R_s$ 는 고정자 내반경이며, 카터계수  $K_c$ 는 식(3)과 같다.

$$K_c = \frac{\tau_l}{\tau_l - \beta g'} \tag{3}$$

여기서,  $\beta$ 는 식(4)와 같다.

$$\beta = \frac{4}{\pi} \left[ \frac{b_o}{2g'} \tan^{-1} \left( \frac{b_o}{2g'} \right) - \ln \sqrt{1 + \left( \frac{b_o}{2g'} \right)^2} \right] \tag{4}$$

그리고,  $b_o$ 는 슬롯 개구간의 길이를 나타내며,  $\tau_l$ 는 식(5)

와 같다.

$$\tau_t = \frac{2\pi R_s}{N_s} \tag{5}$$

한편, relative permeance 함수는 등각변환법 (Conformal Transformation Method)에 의해 푸리에 급수의 형태로 식(6)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\lambda(r, \theta) = \Delta_0(r) + \sum_{s=1}^{\infty} \Delta_s(r) \cos \varepsilon N_s (\theta + \theta_w) \tag{6}$$

여기서,  $\theta_w$  는 권선피치이고,  $\Delta_0(r)$ 와  $\Delta_s(r)$ 은 식(7), (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta_0(r) = \frac{1}{K_c} [1 - 1.6\Gamma \frac{b_0}{\tau_t}] \tag{7}$$

$$\Delta_s(r) = -\Gamma(r) \frac{4}{\pi \varepsilon} \left[ 0.5 + \frac{(\varepsilon b_0 / \tau_t)^2}{0.78125 - 2(\varepsilon b_0 / \tau_t)^2} \right] \sin(1.6\pi \varepsilon b_0 / \tau_t) \tag{8}$$

따라서, 무부하시의 자계 및 부하시 자계 특성을 각각 relative permeance를 고려하여 계산 할 수 있다. 즉, 슬롯이 고려된 자속밀도는 식(9), (10) 와 같다.

$$B_{open}(r, \theta, t) = B_{magnet}(r, \theta, t) \lambda_{relative}(r, \theta) \tag{9}$$

$$B_{load}(r, \theta, t) = B_{open}(r, \theta, t) + B_{armature}(r, \theta, t) \tag{10}$$

여기서,  $B_{open}$  은 영구자석에 의한 자계만 존재시 무부하 자속밀도를 나타내며, relative permeance가 고려되지 않은 슬롯리스 모델에서의 자속밀도  $B_{magnet}$ 와 relative permeance  $\lambda_{relative}$ 의 곱에 의해 표현되며,  $B_{load}$ 는 부하시 전기자 자속밀도  $B_{armature}$ 와 무부하 자속밀도  $B_{magnet}$ 의 합으로 표현된다.  $B_{open}$ 과  $B_{load}$ 는 본 저자들에게 의해 이미 상세히 다루어진 바 있다 [10],[11].

그림 2부터 그림 4까지는 식(9)와 식(10)에서 얻어진 공간적 자속밀도를 전동기의 1-슬롯 피치, 즉, 기계각 15도에 대하여 0.5 도 씩 회전하면서 얻어진 30개의 회전자 위치에 따른 자속밀도이다. 즉, x 축(Rotor position) 상에 분포하는 데이터들은 자속밀도의 공간적 분포를 나타내고, y 축(1-Slot pitch) 상의 데이터들은 자속밀도의 시간적 분포를 나타낸다.

### 2.2.2 자속밀도의 고조파 분석결과

본 논문에서는 회전자 표면에서 얻어진 자속밀도의 시간 및 공간 고조파 분석을 위하여 Mathwork 사의 MATLAB 이 지원하는 2-D FFT 함수를 이용하였다. 이는 그림 2부터 그림 4와 같이 2차원 배열 형태를 갖는 자속밀도 데이터 행렬에서의 고조파 분석을 보다 간편하게 해주며, FFT 프로그램의 길이를 상당히 줄여주는 장점을 갖는다. 또한, MATLAB의 함수는 이미 많은 사용자에게 의해 정밀도가 검증된 바 있어, 본 논문에서 적용된 FFT 알고리즘 역시 우수한 정밀도를 갖는다고 할 수 있다.

표 1은 무부하 상태에서 회전자 표면에서 취득된 그림 2의 자속밀도의 고조파 분석 결과를 나타낸다. 해석대상 영구자석형 동기전동기의 극당 슬롯수가 6개 이므로, 시간고조파는 12차의 배수차수인 12차, 24차, 36차 등에서, 공간고조파는 11, 13차 23, 25차 35, 37차 등에서 현저하게 큰 특성을

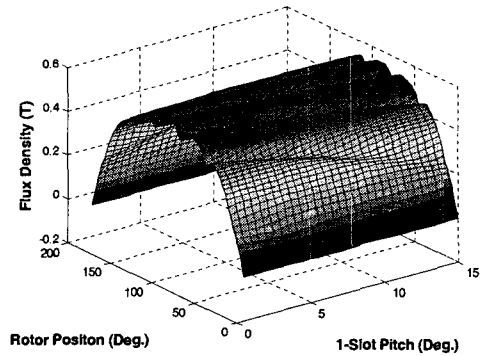


그림 2 무부하시 시 · 공간 자속밀도 분포  
Fig. 2 Magnetic flux distribution for time and space domain under no-load.

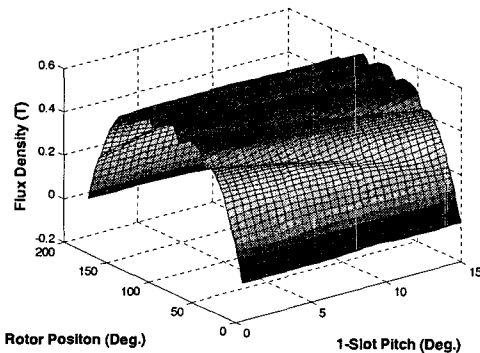


그림 3 공냉 부하시 시 · 공간 자속밀도 분포 (J=6 A/mm²)  
Fig. 3 Magnetic flux distribution for time and space domain under on-load. (J=6 A/mm²)

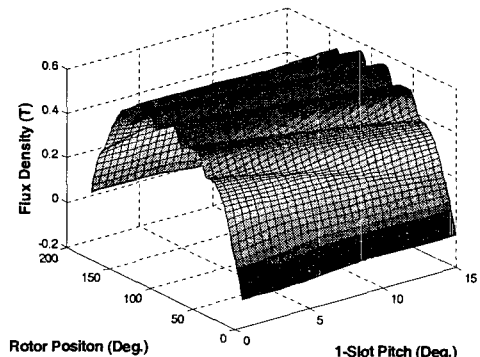


그림 4 수냉 부하시 시 · 공간 자속밀도 분포 (J=15 A/mm²)  
Fig. 4 Magnetic flux distribution for time and space domain under water cooling condition. (J=15 A/mm²)

보인다. 또한, 구조적으로 대칭 형태를 갖고 있으므로, 공간 고조파는 홀수차만 존재하며 표에 표기되지 않은 시간 및 공간 고조파 차수는 값이 매우 작으므로 '0'으로 적용하였다.

표 1 무부하시 시·공간 자속밀도의 고조파

Table 1 Time and space Flux Harmonics under no-load.

Space Order	Time Order		
	12	24	36
9	0.0030	0.0001	0.0001
11	0.0127	0.0000	0.0000
13	0.0140	0.0000	0.0000
15	0.0013	0.0000	0.0000
21	0.0000	0.0013	0.0000
23	0.0000	0.0067	0.0000
25	0.0000	0.0062	0.0000
35	0.0000	0.0000	0.0019
37	0.0000	0.0000	0.0016

표 2 공냉 정격부하시 시·공간 자속밀도의 고조파 (J = 6A/mm<sup>2</sup>)

Table 2 Time and space Flux Harmonics under on-load.

Space Order	Time Order		
	12	24	36
3	0.0004	0.0001	0.0001
5	0.0015	0.0005	0.0003
7	0.0018	0.0004	0.0003
9	0.0036	0.0001	0.0000
11	0.0140	0.0000	0.0000
13	0.0147	0.0000	0.0000
15	0.0012	0.0001	0.0000
21	0.0000	0.0015	0.0000
23	0.0000	0.0068	0.0000
25	0.0000	0.0062	0.0000
35	0.0000	0.0000	0.0019
37	0.0000	0.0000	0.0016

표 3 수냉 부하시 시·공간 자속밀도의 고조파 (J = 15 A/mm<sup>2</sup>)

Table 3 Time and space Flux Harmonics under on-load.

Space Order	Time Order		
	12	24	36
3	0.0012	0.0004	0.0002
5	0.0038	0.0011	0.0007
7	0.0041	0.0009	0.0006
9	0.0039	0.0002	0.0001
11	0.0194	0.0000	0.0000
13	0.0174	0.0001	0.0000
15	0.0014	0.0003	0.0001
17	0.0007	0.0010	0.0003
19	0.0006	0.0012	0.0002
21	0.0001	0.0015	0.0001
23	0.0000	0.0074	0.0000
25	0.0000	0.0064	0.0000
35	0.0000	0.0000	0.0019
37	0.0000	0.0000	0.0016

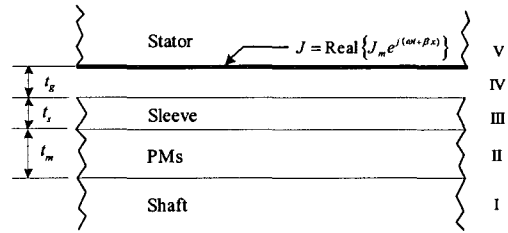


그림 5 직교좌표계 해석 모델

Fig. 5 Rectangular coordinate system analysis model

표 2와 표 3은 그림 3과 그림 4에서 제시된 정격 부하시, 강제 수냉 부하시 자속밀도의 고조파 분석결과를 나타낸다. 전기자 자속이 영구자석 회전자 q-축에 정렬해 있을 때, 회전자 표면에서의 자속밀도의 고조파이며, 전기자 권선의 전류밀도는 각각 6 A/mm<sup>2</sup>, 15 A/mm<sup>2</sup> 하에서 운전된다고 가정하였다.

무부하 상태에서와 마찬가지로 해석 대상 전동기의 기하학적 구조에 의해 시간고조파는 12차의 배수차수인 12차, 24차, 36차 등이고, 공간고조파는 11, 13차 23, 25차 35, 37차 등에서 매우 현저하게 큰 특성을 보인다. 또한, 부하상태에서는 이외의 고조파 차수, 예를 들면, 시간고조파 12차에서 공간고조파 5차, 7차, 9차 등, 시간고조파 24차에서 17차, 19차, 21차 등, 무부하 상태에서 영향이 끼치지 못하던 고조파가 발생한다.

### 2.3 포인팅 정리에 의한 회전자 손실 계산

영구자석형 동기 전동기의 해석모델에서 포인팅 정리를 이용한 회전자 손실의 계산은 직교좌표축 해석 모델과 원통형 극좌표 해석모델 둘 다 사용될 수 있다. 그러나, 극좌표 해석모델을 이용할 때 Bessel 함수의 미·적분에 관련된 수학적 부담을 안고 해석을 수행해야 하므로, 본 논문에서는 직교좌표축 해석 모델을 정의하고, 이에 대한 회전자 손실의 계산을 수행한다.

그림 5는 5영역을 갖는 영구자석형 동기 전동기 해석모델이다. 계자원 및 슬롯에 의한 리액션 자계는 고정자 표면에서 존재하는 면전류 밀도로 등가화 하였다[5].

그림 5에서 x축은 점선성분을 나타내고, y축은 수직 성분, 그리고, z축은 축 방향 성분을 나타낸다. 해석 영역은 축 영역에서부터 I 영역으로 하여 고정자 요크 영역을 V 영역으로 하였다.

또한, 영구자석 및 전기자 전류에 의한 자계와 슬롯에 의한 리액션 자계는 고정자 표면에서의 면전류로 치환되고 식(11)과 같이 시간 및 공간에 대한 분포를 동시에 갖고 z축 방향을 갖는다.

$$J = J_m \cos(\omega t + \beta x) = \text{Real}\{J_m e^{j(\omega t + \beta x)}\} \quad (11)$$

여기서, J<sub>m</sub>은 면전류의 크기, ω는 시간 고조파의 영향을 받는 각속도이고 시간 고조파의 차수가 k차 일때 2kπf이다. 그리고, β는 위상정수로서 극피치가 τ일 때, π/τ이고, 공간고조파의 차수가 h차 일때, hβ이다. 그러므로, 투자율 μ, 도전율 σ를 갖는 모든 영역에 대해 만족하는 일반화된 지배방정식은 식(12)로 정리된다.

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = j\omega\mu\sigma A_z \quad (12)$$

이동자계의 진폭의 변화가  $y$  방향이므로  $\vec{A}$ 는  $x$  또는  $z$  방향을 갖게 되는데, 전기자의 전류가  $z$  방향으로만 흐른다고 가정하면  $\vec{A}$ 는  $z$  방향 성분이다. 그리고, 시간 및 공간적으로 변화를 등가 면전류에 대하여 자기 벡터 포텐셜은 식(13)으로 표현이 가능하고, 식(12)로 표현되는 미분방정식의 일반해는 식(14)의 형태로 표현될 수 있다

$$A_z = A(y)e^{j(\omega t + \beta x)} \vec{a}_z \quad (13)$$

$$A_{zi} = (C_i e^{\gamma y} + D_i e^{-\gamma y}) e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (14)$$

여기서,  $\vec{a}_z$ 는  $\vec{B}$ 의 접선성분이고,  $\vec{a}_y$ 는  $\vec{B}$ 의 수직성분이다.

$\nabla \times \vec{A} = \vec{B}$ 로부터 식(14)를  $x, y$ 에 대하여 각각 편미분하면  $\vec{B}$ 의 접선방향 성분, 법선방향 성분을 식(15), 식(16)으로 구할 수 있다.

$$B_{xi} = \frac{\partial A_{zi}}{\partial y} = \gamma (C_i e^{\gamma y} - D_i e^{-\gamma y}) e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (15)$$

$$B_{yi} = -\frac{\partial A_{zi}}{\partial x} = -j\beta (C_i e^{\gamma y} + D_i e^{-\gamma y}) e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (16)$$

그리고, 각 영역에서 자기 벡터 포텐셜의 시간에 대한 편미분은 전계의 세기를 나타내므로 식(17)을 쓸 수 있다.

$$E_{zi} = -\frac{\partial A_{zi}}{\partial t} = -j\omega (C_i e^{\gamma y} + M_i e^{-\gamma y}) e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (17)$$

미지의 계수를 구하기 위한 경계 조건은 식(18)과 같다.

- i)  $y = \infty \quad A_{zi} = 0$
- ii)  $y = t_g + t_s + t_m \quad B_{yi} = B_{yi}, H_{xi} - H_{xi} = J_m$
- iii)  $y = t_g + t_s \quad B_{ym} = B_{ym}, H_{xm} = H_{xm}$
- iv)  $y = t_g \quad B_{yn} = B_{yn}, H_{xn} = H_{xn}$
- v)  $y = 0 \quad B_{yn} = B_{yn}, H_{xn} = H_{xn}$
- vi)  $y = -\infty \quad A_{zi} = 0$

경계조건에 의해 미지 계수를 구하기 위한 행렬 방정식은 식(19)와 같다.

$$[A][x] = [J] \quad (19)$$

여기서, 미지행렬  $[x]$ 와 등가 면전류 밀도 행렬  $[J]$ 는 식(20), 식(21)과 같다.

$$[x] = [D_1, C_2, D_2, C_3, D_3, C_4, D_4, C_5]^T \quad (20)$$

$$[J] = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, J_m]^T \quad (21)$$

그러므로, 회전자 표면에서의 자속밀도  $B_{step-3}$ 는 식(22)로부터 계산되어 진다.

$$B_{step-3} = B_{ym} \Big|_{y=t_g} = -j\beta (C_3 e^{\gamma t_g} + D_3 e^{-\gamma t_g}) \quad (22)$$

한편, 1-단계와 2-단계에서 얻어진 자속밀도의 고조파  $B_{step-12}$ 를 표 1부터 표 3에 주어지는 무부하 상태, 공냉시

부하상태, 그리고 수냉시 부하 상태에서의 자속밀도라 하면,  $B_{step-12}$ 와 3-단계에서 구해진 자속밀도  $B_{step-3}$ 와 비  $K_p$ 는 식(23)으로 쓸 수 있다.

$$K_p = B_{step-12} / B_{step-3} \quad (23)$$

식(23)의  $K_p$ 는 임의의 면전류  $J_m$ 으로 치환된 3-단계 해석의 자속밀도 결과를 1, 2 단계와 결합시켜주는 비례 계수이며, 고조파 차수별 데이터에 각각 적용되어 포인팅 정리에 의한 손실의 해석에 적용된다.

각 영역에서 정현적 특성을 갖는 자계에 대한 손실의 분포는 각 영역에서 에너지의 전달을 관계 짓는 포인팅 벡터  $\vec{P}$ 에 의해 계산될 수 있다. 포인팅 벡터에 의한 손실 관계식은 식(24)과 같다[5]-[7].

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (24)$$

여기서,  $E$ 는 축방향( $z$ -방향) 전계의 세기를 나타내고,  $H^*$ 는 자계의 세기의 수평방향( $x$ -방향)성분이다. 이처럼 포인팅 벡터를 이용하여 손실을 구할 때의 장점은 회전자의 표면에서의 자속밀도 성분만을 이용하여 슬리브 영역, 영구자석 영역, 축 영역의 손실을 단순히 구해진 손실의 크기만을 산술적으로 가감하여 구할 수 있다는 것이다. 각 영역의 손실에서 슬리브, 영구자석, 축영역 손실의 합을  $P_{III}$ , 영구자석과 축영역 손실의 합을  $P_{II}$ , 축영역의 손실을  $P_I$ 이라 하면  $P_{III}$ ,  $P_{II}$ ,  $P_I$ 은 식(35)부터 식(37)로 주어지는 자계 및 전계의 세기 데이터와 식(24)의 비례 계수를 적용하여, 식(25)부터 식(27)로 쓸 수 있다.

$$P_{III} = \frac{1}{2} \text{Real} \left[ E_{zIII} \Big|_{y=t_g} \times H_{xIII}^* \Big|_{y=t_g} \right] \square K_p^2 \quad (25)$$

$$P_{II} = \frac{1}{2} \text{Real} \left[ E_{zII} \Big|_{y=t_g+t_s} \times H_{xII}^* \Big|_{y=t_g+t_s} \right] \square K_p^2 \quad (26)$$

$$P_I = \frac{1}{2} \text{Real} \left[ E_{zI} \Big|_{y=t_g+t_s+t_m} \times H_{xI}^* \Big|_{y=t_g+t_s+t_m} \right] \square K_p^2 \quad (27)$$

### 2.4 회전자 손실 계산 결과의 고찰

표 4는 식(25)부터 식(27)에 그림 2, 표 1의 자료를 적용하여 얻어진 무부하 상태에서의 회전자 손실을 나타낸다. 고조파 발생이 현저한 시간고조파 12차에서의 공간고조파 11, 13차 시간고조파 24차에서의 공간고조파 23, 25차, 시간고조파 36차에서의 공간고조파 35, 37차에서 상대적으로 큰 손실이 발생한다. 회전자의 재질별 회전자 손실의 발생율은 Inconel718 슬리브에서 94.3785 W/m<sup>2</sup> (99.48%), 영구자석에서 0.4927 W/m<sup>2</sup> (0.52%) 로, 비교적 도전을이 크고 자속밀도 왜형의 영향을 많이 받는 슬리브의 손실이 대부분이다.

표 5는 식(25)부터 식(27)에 그림 3, 표 2의 자료를 적용하여 얻어진 공냉시 정격 부하 상태에서의 회전자 손실 해석결과를 나타낸다. 무부하 상태와 같이 고조파 발생이 현저한 시간고조파 12차에서의 공간고조파 11, 13차 시간고조파 24차에서의 공간고조파 23, 25차, 시간고조파 36차에서의 공간고조파 35, 37차에서 주로 손실이 발생하며, 이 밖에 자속밀도 고조파의 크기가 무부하 상태에 비교하여 상대적으로 큰 고조파 차수, 즉, 시간고조파 12차에서 공간고조파 5차, 7차, 9차 등, 시간고조파 24차에서 17차, 19차, 21차 등에서 손실이 발생된다.

표 4 무부하시 회전자 손실

Table 4 Rotor losses under no-load

Space Order	Time Order		
	12	24	36
1	0.0085	0.0289	0.0725
3	0.7995	0.0046	0.0467
5	0.0325	0.1011	0.0196
7	0.2692	0.0085	0.0446
9	4.5808	0.0190	0.0192
11	45.2540	0.0012	0.0001
13	33.3820	0.0001	0.0003
15	0.1978	0.0008	0.0001
17	0.0116	0.0018	0.0008
19	0.0008	0.0235	0.0001
21	0.0001	0.2888	0.0001
23	0.0000	5.4963	0.0000
25	0.0000	3.6574	0.0000
27	0.0000	0.0365	0.0000
29	0.0000	0.0012	0.0001
31	0.0000	0.0001	0.0013
33	0.0000	0.0000	0.0112
35	0.0000	0.0000	0.2782
37	0.0000	0.0000	0.1673
39	0.0000	0.0000	0.0021
Sleeve	94.3785	(W/m <sup>2</sup> )	
PM	0.4927	(W/m <sup>2</sup> )	
Total	94.8712	(W/m <sup>2</sup> )	

표 6 수냉 부하시 회전자 손실 (J = 15 A/mm<sup>2</sup>)

Table 6 Rotor losses under water cooling condition

Space Order	Time Order		
	12	24	36
1	0.5067	0.1334	0.0443
3	18.6784	6.5259	4.7626
5	44.7057	14.9824	12.3261
7	18.5525	3.5172	3.3278
9	7.9242	0.0989	0.0603
11	104.7968	0.0022	0.0042
13	51.1266	0.0026	0.0006
15	0.2217	0.0394	0.0106
17	0.0367	0.2820	0.0439
19	0.0189	0.2868	0.0206
21	0.0007	0.3597	0.0010
23	0.0000	6.6094	0.0000
25	0.0000	3.9023	0.0001
27	0.0000	0.0345	0.0004
29	0.0000	0.0002	0.0029
31	0.0000	0.0001	0.0050
33	0.0000	0.0000	0.0120
35	0.0000	0.0000	0.2830
37	0.0000	0.0000	0.1667
39	0.0000	0.0000	0.0022
Sleeve	290.0344	(W/m <sup>2</sup> )	
PM	14.3857	(W/m <sup>2</sup> )	
Total	304.4201	(W/m <sup>2</sup> )	

표 5 공냉 정격부하시 회전자 손실 (J = 6 A/mm<sup>2</sup>)

Table 5 Rotor losses under on-load

Space Order	Time Order		
	12	24	36
1	0.0168	0.0002	0.0555
3	1.9538	0.9313	0.5006
5	6.7135	3.2159	1.8024
7	3.3870	0.7210	0.7264
9	6.5562	0.0086	0.0102
11	54.4142	0.0014	0.0007
13	36.3911	0.0004	0.0003
15	0.1543	0.0050	0.0017
17	0.0040	0.0512	0.0086
19	0.0012	0.0796	0.0043
21	0.0000	0.3423	0.0001
23	0.0000	5.6497	0.0000
25	0.0000	3.7002	0.0000
27	0.0000	0.0335	0.0001
29	0.0000	0.0006	0.0007
31	0.0000	0.0000	0.0022
33	0.0000	0.0000	0.0120
35	0.0000	0.0000	0.2781
37	0.0000	0.0000	0.1671
39	0.0000	0.0000	0.0022
Sleeve	125.6922	(W/m <sup>2</sup> )	
PM	2.2145	(W/m <sup>2</sup> )	
Total	127.9066	(W/m <sup>2</sup> )	

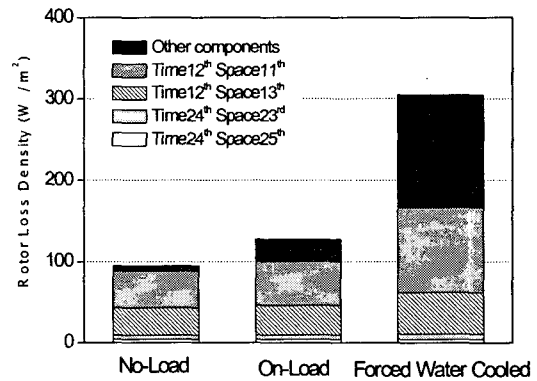


그림 6 운전 상태에 따른 회전자 손실 특성 (@ 28000 rpm)  
 Fig. 6 Characteristics of rotor loss according to the operating condition (@ 28000 rpm)

회전자의 재질별 회전자 손실의 발생율은 Inconel718 슬리브에서 125.6922 W/m<sup>2</sup> (98.26%), 영구자석에서 2.2145 W/m<sup>2</sup> (1.73%) 의 발생률을 보인다.

표 6은 식(25)부터 식(27)에 그림 4, 표 3의 자료를 적용하여 얻어진 강제 수냉시 부하 상태에서의 회전자 손실 해석결과를 나타낸다. 수냉시에는 전류밀도가 2배 가량 증가하므로, 전기자 자속이 증가하여 시간고조파 12차에서의 공간고조파 11, 13차 시간고조파 24차에서의 공간고조파 23, 25차, 시간고조파 36차에서의 공간고조파 35, 37차에서의 주회전자 손실또한 두 배 이상 증가하며, 이 밖에 자속밀도 고조파의 크기가 무부하 상태에 비교하여 상대적으로 큰 고

조파 차수, 즉, 시간고조파 12차에서 공간고조파 5차, 7차, 9차 등, 시간고조파 24차에서 17차, 19차, 21차 등에서 손실이 현격한 증가를 보인다.

회전자의 재질별 회전자 손실의 발생율은 Inconel718 슬리브에서 290.0344 W/m<sup>2</sup> (95.27%), 영구자석에서 14.3857 W/m<sup>2</sup> (4.7256%) 의 발생률을 보인다.

그림 6은 표 4부터 표 6에 의해 제시된 세 가지 운전상태에 따른 무부하시, 공냉 정격 부하시, 수냉 부하시, 각각의 시간 및 공간고조파에 따른 손실 발생 특성을 각 고조파 성분에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 무부하시에는 해석 대상 전동기의 기하학적 구조에 따른 자속밀도의 주 고조파 즉, 시간고조파 12차에서의 공간고조파 11, 13차, 시간고조파 24차에서의 23, 25차 성분이 회전자 손실 발생의 주 원인이 됨을 볼 수 있다. 그러나, 전기자 전류밀도의 증가에 따른 회전자 표면에서의 자속밀도의 일그러짐 현상이 고조파의 증가에 기여하므로, 전류밀도가 높아질 수록 회전자 손실의 증가는 주 고조파 성분 이외의 고조파, 즉, 시간고조파 12차에서 공간고조파 5차, 7차, 9차 등, 시간고조파 24차에서 17차, 19차, 21차 등에서 상당한 양의 손실이 발생한다.

2.5 회전자 손실 해석법의 타당성 검증

본 논문에서 제시하는 회전자 손실 해석기법의 타당성을 검증하기 위하여, ANSOFT 사의 Maxwell을 적용하였다. 그림 7부터 그림 9는 무부하시, 공냉 정격부하시, 수냉부하시 회전자 영역에서 발생하는 와전류 밀도의 분포를 나타낸다.

그림 10부터 그림 12는 각 운전상태에서, 즉, 무부하시, 공냉 정격 부하시, 수냉 부하시 속도에 따른 회전자 손실 특성을 보여준다. 무부하 운전 상태에서 제안된 회전자 손실 해석 기법에 의한 속도-손실 특성은 정격속도에서 유한요소법에 의한 해석결과와 약 19.9 % 오차를 가지며, 공냉 정격 부하시 18.4 %, 수냉부하시 5.9 % 의 오차를 각각 갖는다. 그림에서 속도가 증가 할수록 해석 결과의 오차가 커지는 이유는 본 논문에서 제안한 손실해석의 경우 주파수에 따른 와전류의 침투깊이, 즉, 표피효과가 고려되지 않았고, 회전자 도전성 재질 내에서의 와전류 분포 현상을 해석적으로 정확하게 고려할 수 없기 때문이다. 그러나, 전동기의 회전자 와전류 발생 및 손실에 관한 실험적 검증이 매우 어려운 점을 감안 할 때 본 논문에서 제시한 방법 및 그 결과는 향후 이 분야의 연구 개발에 유용한 자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 논문에서는 고속 전동기를 대상으로 회전자 각 재질에서의 고조파 와전류 손실에 대한 해석적 접근 및 계산을 수행하고, 전동기의 성능에 미치는 영향 분석을 위한 속도-손실 특성 곡선을 제시하였다. 해석적 기법에 의한 자속밀도 해석, 2-D FFT, 포인팅 정리를 적용한 회전자 와전류 손실의 해석 기법을 제안하였다. 또한, 시간과 공간적으로 왜형을 갖는 자속밀도 데이터에서 해석모델의 기하학적 구조에 의해 발생하는 주요 고조파 및 전기자 자속에 의한 시간 및 공간고조파의 크기를 확인 할 수 있었다. 특히, 각 고조파 차수가 고려된 회전자 손실의 해석 결과는 전동기의 운전

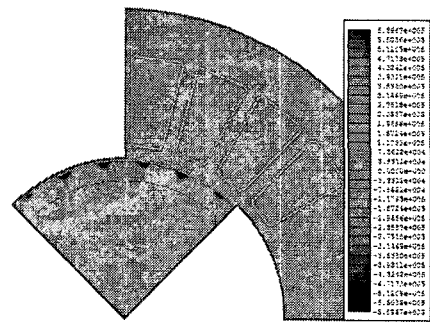


그림 7 회전자 슬리브에서의 전류밀도 분포(무부하 상태)  
Fig. 7 Current density distribution under no-load condition

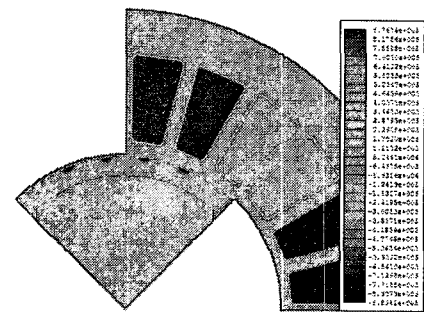


그림 8 회전자 슬리브에서의 전류밀도 분포(공냉 정격부하 상태)  
Fig. 8 Current density distribution under on-load condition

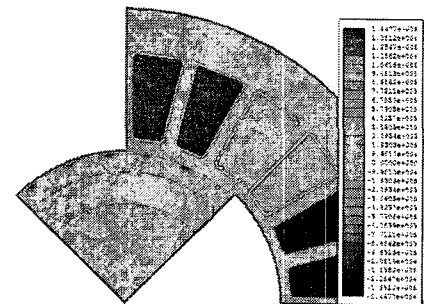


그림 9 회전자 슬리브에서의 전류밀도 분포(수냉부하 상태)  
Fig. 9 Current density distribution under forced water cooled condition

상태, 즉, 무부하시, 공냉 정격부하시, 수냉 부하시에 따라 속도-손실 특성을 해석하였으며, 상용 유한요소해석 프로그램과의 비교로 해석결과의 타당성을 도출하였다. 향후, 고속, 초고속 전동기의 운전조건에 직접적인 영향을 미치는 열적 특성을 고려한 전동기의 설계 및 성능평가 등에 적용하고자 한다.

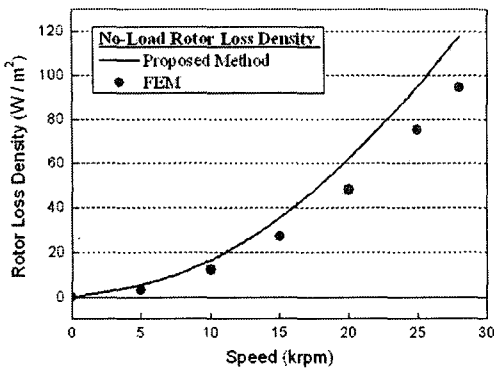


그림 10 무부하시 속도 변화에 따른 회전자 손실 특성  
 Fig. 10 Rotor loss characteristics according to the variation of speed under no-load.

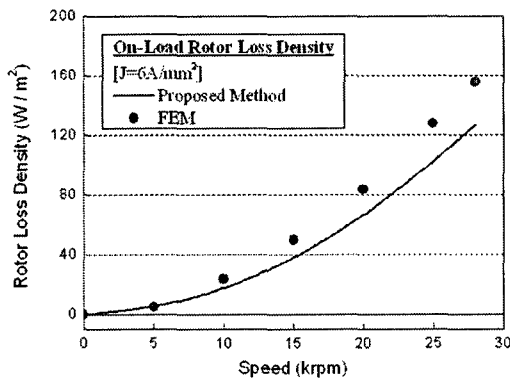


그림 11 공냉 정격부하시 속도 변화에 따른 회전자 손실 특성 ( $J = 6 \text{ A/mm}^2$ )  
 Fig. 11 Rotor loss characteristics according to the variation of speed under on-load.

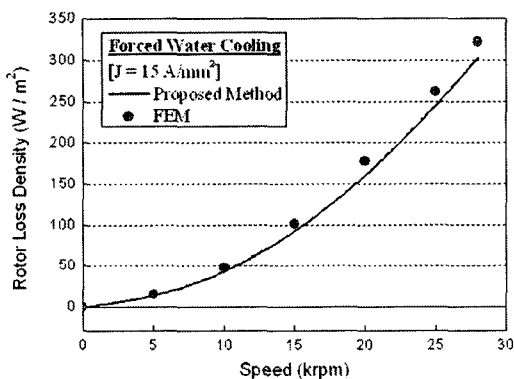


그림 12 수냉 부하시 속도 변화에 따른 회전자 손실 특성 ( $J = 15 \text{ A/mm}^2$ )  
 Fig. 12 Rotor loss characteristics according to the variation of speed under water cooling condition.

감사의 글

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축 지원 사업으로 수행된 논문입니다.

참고 문헌

- [1] L. Zheng, etc., "Design of super-high speed permanent magnet synchronous motor for cryogenic applications," *IEEE International Electric Machines and Drives Conferences (IEMDC 2005)*, San Antonio, Texas, U.S.A., pp.874-881, May 15-18 2005.
- [2] K. Atallah, D. Howe, P.H. Melloor and D.A. Stone, "Rotor Loss in Permanent Magnet Brushless AC Machines," *IEEE Trans. Indust. Applicat.*, vol.31, pp.60-62, 1999.
- [3] Z. Q. Zhu, K. Ng, N. Schofield and D. Howe, "Improved analytical modeling of rotor eddy current loss in brushless machines equipped with surface-mounted permanent magnets," *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 151, pp.641-650, Nov., 2004
- [4] S.M.Abu Sharkh, M.R. Harris, N.Taghizadeh Irenji, "Calculation of rotor eddy current loss in high-speed PM alternators," *Electrical Machines and Drives*, pp.170-174, 1997.
- [5] S.M.Abu Sharkh, M.R. Harris, N.Taghizadeh Irenji, "Effect of power factor on rotor loss in high-speed PM alternators", *Electrical Machines and Drives*, pp.170-174, 1997.
- [6] N.Taghizadeh Irenji, Calculation of electromagnetic rotor losses in high-speed permanent magnet machines, Ph.D. dissertation, Univ. of Southampton, UK, 1998.
- [7] Seok-Myeong Jang, Han-Wook Cho, Sung-Ho Lee, Hyun-Sup Yang, Yeon-Ho Jeong, "The influence of magnetization pattern on rotor losses of permanent magnet high-speed machines," *IEEE Trans. Magn.*, vol.40, pp.2062-2064, 2004.
- [8] Seok-Myeong Jang, Han-Wook Cho, Yeon-Ho Jeong, "Influence on the rectifiers of rotor losses in high-speed permanent magnet synchronous alternator," *Journal of Applied Physics*, vol. 99, 08R315, 2006.
- [9] Z.Q.Zhu, D.Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, Part III : Effect of stator slotting," *IEEE Trans. Magn.*, vol.29, pp.143-151, 1993.
- [10] Seok-Myeong Jang, Jang-Young Choi, Dae-Joon You, Hyun-Sup Yang, "Electromagnetic analysis of high-speed machines with diametrically magnetized rotor, considering slotting effect and applied to new



magnetization modeling," *IEEE International Electric Machines and Drives Conferences (IEMDC 2005)*, San Antonio, Texas, U.S.A., pp.1204-1211, May 15-18 2005.

- [11] 장석명, 조한욱, 최장영, 이성호, "전자기 전달관계를 이용한 슬롯리스형 영구자석 전기기기의 정특성 해석," 대한전기학회 논문지, vol. 55B, no. 3. Mar, 2006.

부록 해석 모델의 사양

Appendix Specification of analysis model

항 목	설 계 사 양	단 위	비 고
정 격 출 력	1	kW	
정 격 속 도	28,000	rpm	
상 수	3	phase	
극 수	4	pole	
고정자 외경	65	mm	
고정자 내경	34.6	mm	
회전자 외경	33	mm	
슬리브 두께	2	mm	
기계적 공극의 길이	0.8	mm	
고정자 적층 길이	48	mm	
슬롯 개구폭	1.2	mm	
정격시	6	A/mm <sup>2</sup>	
전류밀도(강제공냉)			
슬리브 저항률	1.25e-6	Ωm	Inconel718
영구자석 저항률	0.9e-6	Ωm	Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>
축 도전율	0 (Ideal)	Ωm	Lamination

저 자 소 개



장 석 명 (張 錫 明)

1949년 7월 3일생. 1986년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1989년 미국 Univ. of Kentucky (방문연구교수), 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수, 2003년~2004년 대한전기학회 부회장, 전자기기 및 에너지 변환 시스템 부문회 회장.

Tel : 042-821-5658

Fax : 042-822-4933

E-mail : smjang@cnu.ac.kr

Homepage : <http://sems.cnu.ac.kr>



조 한 욱 (趙 漢 旭)

1976년 12월 3일생. 2002년 충남대 전기공학과 졸업(학사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.

Tel : 042-821-7608

E-mail : hwcho@cnu.ac.kr



최 장 영 (崔 璋 英)

1976년 10월 20일생. 2003년 충남대 전기공학과 졸업(학사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2005~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 042-821-7608

E-mail : aramis76@cnu.ac.kr