

# 풍력터빈 PM형 동기발전기의 와전류손실과 열 해석에 관한 연구

## A Study on Rotor Eddy Current Loss and Thermal Analysis of PM Synchronous Generator for Wind Turbine

최 만 수\* · 장 영 학\*\* · 박 태 식\*\* · 정 문 선\*\* · 문 채 주†

(Man Soo Choi · Young Hag Chang · Tae Sik Park · Moon Seon Jeong · Chae Joo Moon)

**Abstract** - Abstract - In this paper, eddy current loss, iron loss and heat transfer of PMSG with 2,000kW capacities were analyzed for wind turbine. The PMSG with 3 split magnet was analyzed using ansoft maxwell commercial program and, generator was tested by Back to Back converter with no load condition at laboratory. Rotor surface temperature was measured by Pt100 sensors for investigating heat transfer from rotor to atmosphere. The simulation results shows 27.4kW eddy current loss in no load condition and 50.2kW eddy current loss in rated load condition with 3 split magnet, and also shows 4.3kW iron loss in no load condition and 7.3kW iron loss rated load condition. The heat transfer coefficient of convection between rotor surface and atmosphere was investigated by 9.6 W/m<sup>2</sup>·K. Therefore the heat transfer from rotor to atmosphere was about 17kW(54%) and from rotor to air-gap was about 14.6kW(46%) in no load condition. It is identified that the cooling system for stator have to include the 46% of iron loss, and heat dissipation structure of rotor surface have to be suggested and designed for efficiency improvement of generator.

**Key Words** : Ansoft Maxwell Program, Eddy Current Loss, Iron Loss, PMSG, Heat Transfer, Convection, Conduction, Radiation, Thermal Property, Heat Transfer Coefficient

### 1. 서 론

최근 풍력발전기 산업에서는 고장이 적고 간단한 Drive Train의 요구가 점점 커지고 있으며, 이에 직결 방식의 풍력발전기가 현재 활발히 연구되고 있다. 직결방식 중에서도 크기와 무게 측면에서 장점이 많은 영구자석형 동기발전기의 개발이 네덜란드Delft 공대, Harkosan, Vensys사 등을 중심으로 더욱 활발히 이루어져 왔으며, 최근 그 기술들이 완성 단계에 이르러 제품들을 출시하고 있다[1].

최근 영구자석 발전기 설계에서 회전자 부분에서 발생하는 손실에 관한 연구가 많이 이루어지고 있으며, 회전자 부분에서 발생하는 손실은 주로 회전자의 도전체에서 발생하는 와전류 손실을 의미한다.[2] 와전류 손실은 회전자의 도전체, 즉 영구자석이나 영구자석의 비산을 방지하기 위해 삽입된 리테이너 등에서 발생하는 손실을 의미한다. 이러한 와전류 손실은 모두 열의 소스원이 되며 이는 영구자석의 감자 현상에 영향을 줄 뿐만 아니라 권선의 저항 등에도 영향을 미치게 되어 발전기의 안정적인 운전을 방해하는 요소가 되고 있다[3~5].

자속이 도전체를 통과할 때 자속의 변화에 상응하는 와전류가 생성 되는데, 그 도전체의 면적이 클수록 큰 전압 불균형으로 인해 큰 와전류가 생성된다. 그러므로 자속이 통과하는 도전체는 자속 통과면적을 작게 할 필요가 있다. 영구자석 또한 동일한 영향으로 와전류가 생성되며 이 손실을 줄여야 발전기 효율을 높일 수 있다. 그러나, 현실적으로 영구자석을 무한하게 분할할 수 없고, 설계되는 발전기의 제작 가능성과 제작비용 등을 고려하여 분할 수량을 결정하여야 한다.

본 연구에서는 설계된 발전기는 와전류손을 줄이기 위하여 영구자석을 최대 3개로 분할하였다. 한편 영구자석의 와전류 손실계산에서는 영구자석의 길이와 넓이의 비례관계에서 2차원 해석결과는 보정을 통하여 3차원 해석과 유사한 결과를 확인할 수 있다.

따라서, Ansoft maxwell 2D 프로그램을 이용해 영구자석의 분할에 따른 와전류 손실을 2차원 유한요소 해석을 통하여 해석결과를 확인하고 로터 요크의 철손을 확인하고자 한다[6]. 한편 발전기에서 생성되는 손실은 모두 열로 발산이 되며, 열의 발산방식은 대류, 전도, 복사 3가지의 형태를 가진다. 열의 발산이 잘되지 않고 열에너지가 축적되는 곳은 온도가 상승하여 재질이 열화 혹은 소손이 발생하므로 열 방출을 위한 구조 및 냉각시스템의 설계가 매우 중요하다[7].

본 연구에서는 자석의 와전류분석, Rotor Yoke의 철손 분석 및 연계된 열해석을 통해 적절한 발전기 냉각시스템 설계의 방향을 제시하고자 한다.

† Corresponding Author : Smartgrid Research Institute of Mokpo National University, Korea.

E-mail : cjmoon@mokpo.ac.kr

\* R&SD Center of Hanyang University

\*\* Smartgrid Research Institute of Mokpo National University, Korea.

Received : June 01, 2014; Accepted : October 07, 2014

## 2. 동기발전기 설계 및 시뮬레이션

### 2.1 해석 모델

2,000kW 풍력터빈 표면부착형 영구자석 동기발전기의 설계 요구사항은 표 1과 같다. 설계출력과 회전속도는 각각 2,080kW, 17rpm 이며 부하 선전압은 392Vrms의 조건이다. 그림 1은 설계된 발전기로 영구자석은 1극당 3개로 분할한 형태이며, 동기발전기의 해석모델의 설계사양은 표 2와 같다.

표 1 풍력발전기 시스템 설계 사양

Table 1 Design specifications of WTG

| Item                    | Design Requirement |
|-------------------------|--------------------|
| Rated speed             | 17 rpm             |
| Number of Poles         | 98                 |
| Load voltage            | 392 Vrms           |
| Load current            | 2,300 Arms         |
| Load output power       | 2,000 kW           |
| Efficiency requirements | 96 %               |
| Rotation method         | Outer Rotor        |

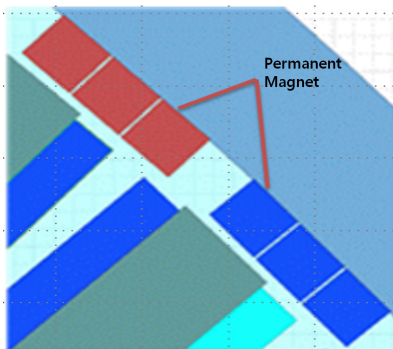


그림 1 영구자석 설계

Fig. 1 Design model of PMSG

표 2 PMSG 발전기 설계사양

Table 2 Design specifications of PMSG model

| Item   | Model                |        |
|--|----------------------|--------|
| Rotor diameter                                 | 4,330 mm             |        |
| Permanent magnet Bore                          | 4,110 mm             |        |
| Permanent magnet height                        | 30 mm                |        |
| Circumferential length of the permanent magnet | Magnet               | 33 mm  |
|  | Air                  | 1.5 mm |
| Stator outer                                   | 4,105 mm             |        |
| Air gap  | 5 mm                 |        |
| Winding method                                 | Concentrated Winding |        |
| Number of Turns                                | 6                    |        |
| Material                                       | NdFeB                |        |

본 논문에서 선정된 영구자석의 경우 다른 자석 보다 높은 에너지 밀도를 갖고 에너지 변환기에 적용 시 높은 출

력밀도를 낼 수 있는 NdFeB를 선정하였으며, NdFeB계의 영구자석 특징은 표 3과 같다.

표 3 영구자석 재료 물성치

Table 3 Material Properties of PM

| Material Property          | Value  |
|----------------------------|--------|
| Flux density of the magnet | 1.25 T |
| Permeability of the magnet | 1.05   |

### 2.2 와전류 해석이론

일반적으로, 자계 분포 예측을 위한 해석은 자계  $\vec{H}$ , 자속 밀도  $\vec{B}$ , 그리고 전류밀도  $\vec{J}$ 를 갖는 Maxwell 방정식으로부터 얻어진다. 자기 벡터 포텐셜  $\vec{A}$ 는 식 (1), (2)로 정의된다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} \quad (2)$$

패러데이 법칙과 자기 벡터 포텐셜의 정의로부터 식(3)으로 표현되는 전계특성식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial(\nabla \times \vec{A})}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (4)$$

도체에 유도되는 와전류는  $\vec{J}_e = \sigma \vec{E}$ 로 표현 가능하므로 식 (3)은 식(5)로 다시 쓸 수 있다. E는 전계이고,  $\sigma$ 는 전기전도도이다.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (5)$$

### 2.3 와전류 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서 Ansoft Maxwell 2D 프로그램을 활용하여

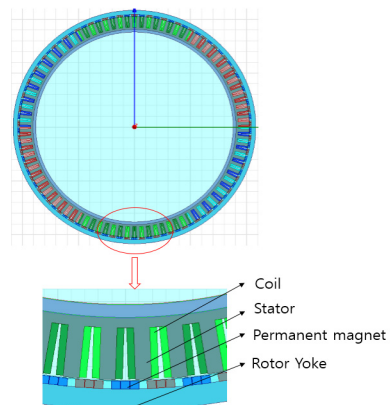


그림 2 발전기 설계된 모델

Fig. 2 Designed PMSG Model

유한요소 해석 시뮬레이션을 수행하였다. 해석 조건은 무부하 운전일 때와 정격 운전 일 때 발생하는 와전류 손실을 분석하였다. 정격속도는 17rpm, 정격 주파수 13.88Hz, 정격 전류 2,300Arms이고 그림 2는 발전기 설계도면을 나타낸다.

와전류 발생 억제를 위해 3분할한 자석 모델의 해석 결과는 무부하 조건에서 와전류손실이 27.42kW이고, 정격부하에서는 50.21kW로 나타났다.

### 3. 발전기 Rotor Yoke의 철손

#### 3.1 철손 해석이론

철손  $P_v$ 는 시간적으로 변하는 자계에 의해 철심내부에서의 자구가 변화할 때 발생하는 에너지 손실에 의한 히스테리시스 손실  $P_h$ , 와전류 손실  $P_c$ , 이상 와전류 손실분  $P_e$ 로 구분된다.

$$P_v = P_h + P_c + P_e \tag{6}$$

$$= K_h f (B_m)^2 + K_c f^2 (B_m)^2 + K_e f^{1.5} (B_m)^{1.5}$$

여기서  $P_h$ 는 히스테리시스손실,  $P_c$ 는 와전류 손실,  $P_e$ 는 이상와전류 손실이며  $K_h$ 는 히스테리시스 손실상수,  $K_c$ 는 와전류손실 상수,  $K_e$ 는 이상와전류 손실상수를 말한다.

그림 3은 구상흑연주철로 설계된 로터 요크의 자기적 특성을 측정하기 위한 시편과 시험 장비를 나타내며, 측정된 결과 BH 곡선은 그림 4와 같고, 주파수에 따른 철손은 그림 5와 같이 나타난다.

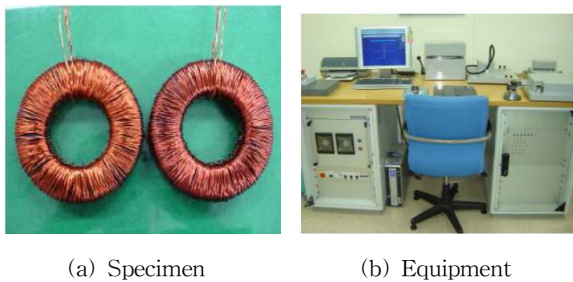


그림 3 B-H 실험  
Fig. 3 B-H Test

그림 4에서 로터 요크는 자계(H)에 따라 자속밀도(B)가 1.2T에서 급격히 포화되기 시작하므로 1.2T 이하가 되도록 설계하는 것이 필요하며, 그림 5는 사용 주파수에 따른 구상흑연 주철의 손실 값을 측정된 것으로 주파수가 증가하면 손실이 증가한다.

#### 3.2 철손 시뮬레이션 및 결과

Ansoft Maxwell 2D 프로그램을 활용하여 유한요소 해석 시뮬레이션을 수행하였으며, 해석 조건은 무부하 운전일 때

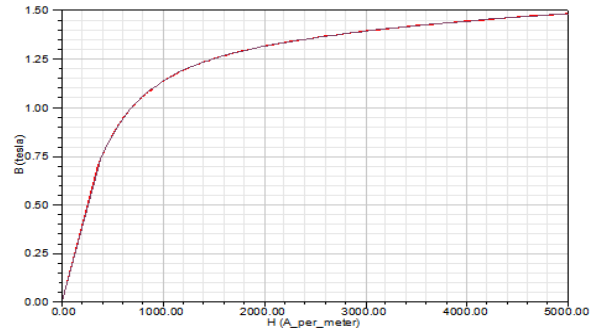


그림 4 로터 요크 B-H 곡선  
Fig. 4 B-H Curve for Rotor Yoke

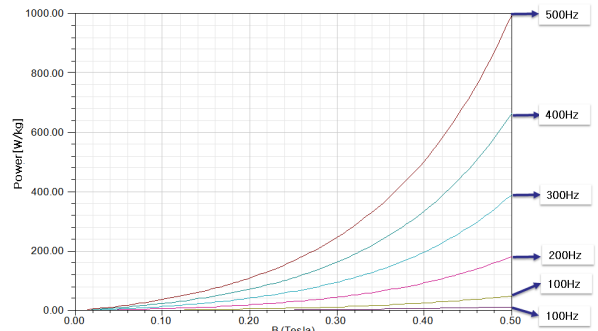
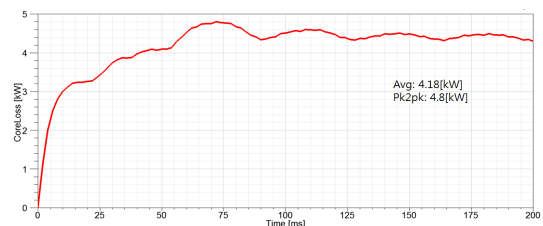
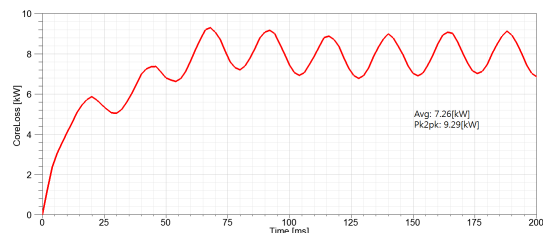


그림 5 로터 요크의 주파수에 따른 철손 특성  
Fig. 5 Iron loss characteristics according to frequency for Rotor Yoke

와 정격 운전 일 때의 철손을 분석하였다. 이때의 정격속도는 17rpm, 정격 주파수 13.88Hz, 정격 전류 2,300Arms이다. 시뮬레이션 결과는 그림 6과 같다.



(a) Iron loss for no load operation



(b) Iron loss for load operation

그림 6 철손 해석 결과  
Fig. 6 The analysis result of iron loss

무부하 조건에서 Rotor yoke에 생기는 철손은 4.2kW이며, 정격운전에서는 7.3kW이다. 그림 7은 정격운전에서 철손 분포도를 나타낸 것이다.

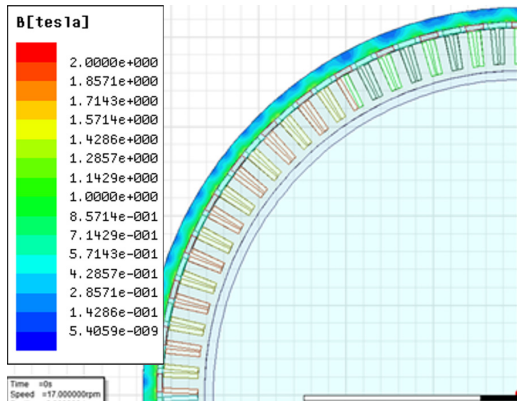


그림 7 부하시 로터요크의 철손 분포  
Fig. 7 Iron loss distribution of Rotor Yoke in load operation

#### 4. 발전기 열 발생

발전기에서 생성된 와전류 및 Rotor 철손은 열로 변환된다. 본 연구의 발전기는 그림 8과 같이 외전형으로 Rotor가 외측에서 회전하며 직접 대기와 접촉하여 방열하는 구조이고 내부의 Stator에 수냉식 냉각구조를 가지고 있다.

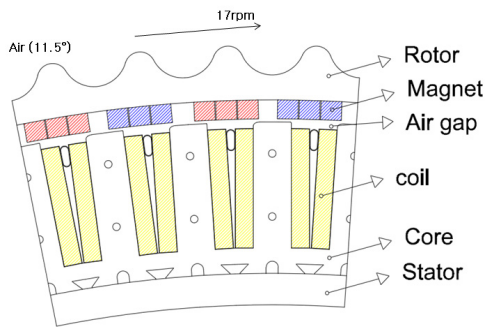


그림 8 발전기의 작동부  
Fig. 8 Active Part of Generator

회전자(로터) 냉각 효율의 관점에서 볼 때 종래의 대형 발전기가 내부 회전 로터 방식이어서 로터 냉각이 어렵고, 따라서 로터에 부착된 마그넷이 쉽게 고온이 되어 탈자화되는 단점을 방지하는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서 외부에서 회전하는 로터의 열발생 근원인 영구자석 와전류를 포함한 철손이 열로 변환된 후 Rotor를 통해 대기로 방출되는 열과 발전기 내부로 전달되는 비율을 분석하였다. 특히, Stator 내부로 전달되는 열은 발전기의 효율과 수명을 단축시키는 큰 영향을 주기 때문에 발전기 설계시 반드시 고려해야 할 중요한 요인이다. 그러나 발전기 내부의 공극을 통한 대류현상과 복사에 의한 방열량을 실험으로 계측하거나

이론적으로 추정하기가 어렵다.

본 연구에서 발전기의 방열상태를 해석하기 위해서 Maxwell 2D로 해석한 무부하시 이 정격속도의 와전류손 및 로터 철손이 모두 열로 변환된다고 가정한다. 실험을 통하여 무부하 정격속도로 발전기를 운전하여 로터 외측의 온도를 측정하고 외부로 전달되는 열전달을 분석한다, 이로 인해 Stator 내부로 전달되는 열전달을 추정할 수 있다. 제작된 MG(Motor-Generator)세트는 그림 9와 같이 2개의 발전기를 제작하여 하나는 모터로 다른 하나는 발전기로 동작시켜 시험하였다. 모터의 속도제어는 2MW 용량의 인버터를 사용하여 정격속도로 운전하였다.



그림 9 모터-발전기 테스트 세트  
Fig. 9 MG Test Set

#### 4.1 열전달 해석이론

자석에서 발생한 열은 열전도율이 높은 로터 요크로의 많은 열전달이 예상되지만 공극 5mm를 통한 Stator 방향으로의 복사와 대류 열전달도 예상할 수 있다. 각 부분에 대한 열전달 계수는 표 4와 같다.

표 4 열전달 계수

Table 4 The coefficient of heat transfer

| Section    | Coefficient of heat transfer   |
|------------|--------------------------------|
| Rotor Yoke | Heat conductivity 36.29 W/m·K  |
| Air        | Heat conductivity 0.0277 W/m·K |
| Magnet     | Emmissivity $\epsilon=0.05$    |

전도에 의한 열전달 효율은 식 (7)에 의해 지배되고, 복사에 의한 열전달 효율은 식 (8)에 의해 지배된다.

$$\alpha_{cd} = K \cdot \frac{dT}{dy} \Big|_{y=0} \quad (7)$$

$$\alpha_{rd} = \epsilon\sigma \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2} \quad (8)$$

여기서  $\alpha$ 는 열전달 효율, K는 열전도도, T는 온도, y는 거리이다.  $\epsilon$ 는 방사율이며  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수이다. 대류에 의한 열전달 효율은 식(9)에 의해 지배된다.

$$\alpha_{CV} = \frac{k \frac{dT}{dy}|_{y=0}}{T_1 - T_2} \quad (9)$$

그리고 로터 요크의 표면 온도 상승시 외부로 방출되는 열전달은 대류현상으로 Newton의 냉각법칙 식(10)을 따른다.

$$\dot{\theta} = \alpha_{cV} A (T_1 - T_2) \quad (10)$$

여기서  $\dot{\theta}$  [W]는 단위시간당 방출 열량이고, A는 열방출 면적이다.

17rpm으로 회전하는 로터 표면의 대류 현상을 난류유동으로 적용하면, 표면에서의 온도구배를 의미하는 Nusselt수는

$$Nu = 0.037 R_e^{4/5} P_r^{1/3} \quad (11)$$

이다. 여기서  $Re = \frac{UX}{\nu}$ 는 Reynolds 수이며,  $P_r = \frac{\mu C_p}{K} = \frac{\nu}{\alpha}$ 는 Prandtl 수를 말한다.

U, X,  $\nu$ 는 각각 기체의 속도, 방열부의 길이, 기체의 동점성(kinematic viscosity)을 나타낸다. 그리고  $\mu$ ,  $C_p$ ,  $\alpha$ 는 각각 역학적점성 (dynamic viscosity), 비열, 열확산계수를 나타낸다. 한편, Nu수는 열경계층 이론에 의해 다음과 같이 식(12)로 정의한다.

$$Nu = \alpha_{CV} \cdot X / K \quad (12)$$

#### 4.2 Rotor 온도측정

로터가 정격속도 17rpm으로 운전시 로터의 표면에는 온도 측정용 Pt100 $\Omega$  센서 2개를 부착하여 측정하였다. 그리고, 실험에 사용된 발전기의 Rotor 사양은 다음의 표 5과 같다.

표 5 로터의 사양

Table 5 Specifications of Rotor

| Item                             | Specifications      |
|----------------------------------|---------------------|
| Rotor Diameter                   | 4.33 m              |
| Velocity of Rotor Surface, U     | 3.85 m/sec          |
| Length of Rotor Circumference, L | 17 m                |
| Area of Convection               | 25.8 m <sup>2</sup> |

로터 표면은 방열 효율을 위해 요철 구조로 되어있으며, 마루부와 골부에 각각 한 개씩 총 2개의 Pt100 센서를 설치하여 약 3시간에 걸쳐 측정하였다. 외부 온도는 11.5 $^{\circ}$ C이며, 로터 표면은 80 $^{\circ}$ C까지 상승하였다. 온도측정 결과 2개의 센서 데이터는 유사한 경향을 보였고, 그 결과는 그림 10에 나타내고 있다.

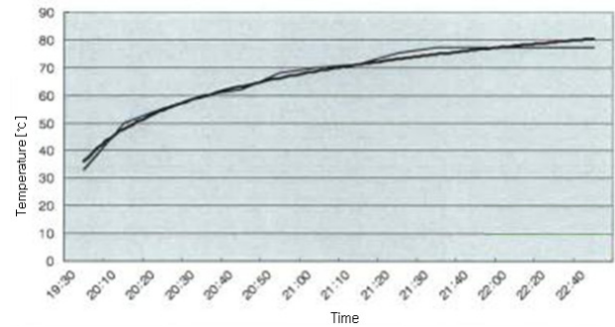


그림 10 로터 요크의 온도 변화  
Fig. 10 Temperature of Rotor Yoke

공기의 물성치는 온도에 따라 다르므로 기준 온도는 막온도(film temperature)를 기준으로 다음과 같다.

막온도  $T_f = \frac{T_1 + T_2}{2}$  이다. 이때의 공기 물성치는 표 6과 같다.

표 6 공기의 열 특성

Table 6 Thermal Properties of Air

| Item                | Thermal Property                        |
|---------------------|---|
| Film Temperature    | 319 $^{\circ}$ K                        |
| Kinematic Viscosity | $17.8 \times 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s |
| Heat Conductivity   | $27.7 \times 10^{-3}$ W/m $\cdot$ K     |
| Prandtl Number      | 0.704                                   |

표 6에서 언급된 물성치를 적용하여 열전달에 적용된 Parameter 및 로터 표면을 통한 외부로의 대류 열전달은 표 7과 같다. 표 7에서 열전달 16.97 kW는 로터의 표면으로부터 외부 대기로 방출되는 열량을 나타내고 있다.

표 7 열전달량

Table 7 Value of Heat Transfer

| Item  | Value                          |
|---|--------------------------------|
| Reynolds Number                             | $3.677 \times 10^6$            |
| Nusselt Number                              | 5885.6                         |
| Heat Transfer Coefficient ( $\alpha_{CV}$ ) | 9.6 W/m <sup>2</sup> $\cdot$ K |
| Heat Transfer                               | 16.97 kW                       |

#### 4.3 결과 분석

앞에서 언급한 Maxwell 2D로 해석한 무부하 및 정격부하에서의 영구자석의 와전류 손실과 Rotor Yoke의 철손은 표 8과 같이 해석되었다. 표 8에서 보면 정격부하시의 총 손실은 57.5kW로 무부하시 대비 약 82%가 증가를 보여주고 있다. 그리고 로터의 손실중에는 자석의 와전류 손실이 약 87%로 많은 비중을 차지함을 알 수 있다.

표 8 로터 손실

Table 8 Loss of Rotor

| Section                  | No Load           | Load              |
|--------------------------|-------------------|-------------------|
| Magnet Eddy Current Loss | 27.4kW<br>(86.7%) | 50.2kW<br>(87.3%) |
| Iron Loss of Rotor Yoke  | 4.2kW<br>(13.3%)  | 7.3kW<br>(12.7%)  |
| Total Loss of Rotor      | 31.6kW            | 57.5kW            |

표 9와 같이 자석의 와전류 및 로터 철손에 의한 손실 중 약 54%가 로터의 표면을 통해 외부로 열방출되며, 약 46%가 공극을 통해 발전기 내부로 전달됨을 확인할 수 있었다. 또한, 로터 표면으로부터 방출되는 열전달 효율계수  $\alpha_{CV}$  는  $9.6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 가 됨을 알 수 있었다.

표 9 열전달 경로

Table 9 Path of Heat Transfer

|                                 |          |       |
|---------------------------------|----------|-------|
| Heat Transfer via Rotor Surface | 16.97 kW | 53.7% |
| Heat Transfer via Air Gap       | 14.63 kW | 46.3% |

## 5. 결 론

본 논문에서는 영구자석의 와전류 손실 및 로터의 철손을 2차원 유한 요소법을 이용하여 구하고, 실험적으로 로터의 온도를 측정함으로써 열전달의 경향을 분석하였다.

자계해석을 통한 로터의 총 손실이 무부하시 31.6kW, 정격부하시 57.5kW임을 확인할 수 있었으며, 정격부하시의 손실은 무부하시 대비 약 82% 증가하였고, 이는 발전기 정격 출력 2,000kW의 약 2.9% 임을 확인할 수 있었다. 그리고, 로터의 손실은 자석의 와전류 손실이 대부분으로 약 87% 차지함을 알 수 있었다. 따라서 로터의 손실을 줄이기 위해서는 자석의 와전류 손실을 줄이는 연구방향이 매우 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

한편 로터에서 발생한 손실로 로터 표면을 통해 외부로 방출되는 열전달은 약 54% 이고, 46%의 열은 공극을 통해 발전기 내부 Stator로 전달됨을 확인하였다. 따라서 발전기 냉각시스템 설계시 Stator 냉각 용량 외에도 로터로부터 전달되는 46%의 열용량을 고려한 냉각시스템 설계가 되어야 함을 알 수 있다.

또한, 로터 표면으로부터 방출되는 열전달 효율계수  $\alpha_{CV}$  가  $9.6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 가 됨을 확인할 수 있었다. 따라서 로터 표면을 통한 열전달의 비율을 높이기 위해서, 방열 효율이 높은 구조로 로터 표면을 연구하여 열전달 효율계수  $\alpha_{CV}$ 를 향상 시킬 필요가 있다.

향후 연구는 자석의 와전류 손실을 낮추기 위해 추가적인 자석 분할에 대한 해석이 필요하며, 발전기 내부 온도 측정을 통한 열전달의 분석이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 목포대학교 스마트그리드연구소 지원과 “산업통상자원부”, “한국산업기술진흥원”, “호남지역사업평가원”의 “광역경제권 선도산업 육성사업”으로 수행된 연구결과입니다.

## References

- [1] Y. Chen, P. Pillay, A. Khan, “PM Wind Generator Topologies”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 6, pp. 1619 - 1626 November. 2005
- [2] H. Polinder, M. J. Hoeijmakers, “Eddy-Current Losses in the Segmented Surface-Mounted Magnets of a PM Machine”, IEEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 146, No. 3, pp. 261-266, May 1999
- [3] Sang Yub Lee, Hyun Kyo Jung, “Eddy Current Loss Analysis in the Rotor of Surface-Mounted Permanent Magnet Brushless Machine”, Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 20 No. 4, pp. 138-140, April, 2012.
- [4] Yasuaki Aoyama, Koji Miyata, Ken Ohashi, “Simulation and Experiments on Eddy Current in Nd-Fe-B magnet”, IEEE Transaction on Magnetic, Vol. 41, No. 10, pp. 3790-3792, October, 2005.
- [5] Jang Young Choi, Ji Hwan Choi, Seok Myeong Jang, Han Wook Cho, Sung, Ho Lee, “Eddy-Current Loss Analysis in Rotor of Surface-Mounted Permanent Magnet Machines Using Analytical Method” The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 61, No. 8, pp. 1115~1122, September, 2012.
- [6] Hiroaki Toda, Zhenping Xia, Jiabin Wang, “Rotor Eddy-Current Loss in Permanent Magnet Brushless Machines”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 4, July, 2004.
- [7] Nannan Zhao, Z.Q.Zhu, Weiguo Liu, “Rotor Eddy Current Loss Calculation and Thermal Analysis of Permanent Magnet Motor and Generator”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, No. 10, October, 2011.

저 자 소 개



**최 만수(Man Soo Choi)**

1985년 한양대 기계공학과 졸업(학사), 1987년 동 대학원 정밀기계공학과 졸업(석사), 2010년~2014년 목포대 대학원 신재생에너지공학협동과정(공학박사), 1987년~2002년 삼성전자, 삼성중공업 수석연구원, 2003년~2012년 (주)디엠에스 상무이사, 현재 한양대학교 산학협력단 R&D센터 교수



**장 영 학(Young Hag Chang)**

1981년 전남대학교 공대 계측공학과 졸업, 1984년 전남대학교 대학원 전기공학과(석사), 1991년 전남대학교 대학원 전기공학과(공학박사), 1991년 ~ 현재 목포대학교 제어로봇공학과 교수



**박 태 식(Tae Sik Park)**

1996년 고려대 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2000년~2005년 삼성전자 책임연구원, 2005년~2013년 특허청 사무관, 2010년~2011년 미국 University of Michigan Researching fellow, 2013년~현재 국립목포대학교 전기공학과 조교수



**정 문 선(Moon Seon Jeong)**

2009년 목포대 전기공학과 졸업, 2011년 목포대 대학원 전기공학과 졸업(공학 석사), 2011년~2014년 목포대 대학원 전기공학과 박사 졸업(공학 박사), 2014~ 현재 목포대학교 스마트그리드연구소 연구전임교수



**문 채 주(Chae Joo Moon)**

1983년 및 1994년 전남대학교 계측공학과(공학사), 대학원 전기공학과(공학석사, 공학박사), 1997년~현재 목포대학교 공과대학 전기공학과 교수, 2011~2012 전력전자학회 부회장, 현재 목포대학교 스마트그리드연구소장 겸 풍력시험센터장  
1986~1997 한국전력기술책임연구원