

## 풍력발전기 Air Guide 위치별 온도상승 해석

\*한 창우<sup>1)</sup>, 김 현재<sup>2)</sup>, \*\*권 기영<sup>3)</sup>, 이 학성<sup>4)</sup>

### Analysis of Temperature Rise on the Air-Guide's Position of Wind Power Generator

\*ChangWoo Han, HyunJae Kim, \*\*KiYeoung Kweon, HahkSung Lee

**Key words** : Air-Guide(에어가이드), Coil Temperature Rise(권선온도상승), Class F Insulation(F종 절연), Wind Power Generator(풍력발전기), 전산유체역학(Computational fluid dynamics)

**Abstract** : In this paper, the numerical analysis of the model without air-guide was carried out in wind power generator. From numerical results, the temperature rise was not satisfied for the class F insulation and the non-uniformity of temperature distribution was a wide difference in heating elements. To improve these problems, the air-guide was installed in front of the coil head of non-drive end(NDE). The short distance between coil head and air-guide was more effective than long distance in cooling performance. Compared to that of the preliminary design, it was found that the cooling performance of the modification design was improved about 12%.

#### Nomenclature

$\rho$  : air density, kg/m<sup>3</sup>  
 $\Gamma_{\phi, eff}$  : effective diffusion coefficient, kg/m·s  
 $V$  : air velocity, m/s  
 $S$  : source term of the heat property, W/m<sup>3</sup>

#### subscrip

$\phi$  : air velocity, temperature, turbulence kinetic energy, turbulence dissipation energy

### 1. 서론

1970년대 에너지 위기 이후 각 국가에서는 대체 에너지원에 대한 관심이 증가하였다. 또한 현재 사용되고 있는 대부분의 1차 에너지원은 향후 60년 이내에 고갈될 것으로 예상된다. 인류의 과도한 화석 에너지의 사용으로 지구온난화 및 환경문제가 심각하게 대두되는 가운데 이러한 문제들의 대안으로 풍력발전 시스템의 활용이 대두되고 있다.

풍력발전 시스템은 회전날개(blade)에 의해 발생된 회전운동에너지를 전기에너지로 변환시키는 장치로서 기계장치부, 전기장치부, 제어장치부로 구성된다. 회전운동에너지를 전기에너지로 변환하기 위한 장치로 풍력발전기(wind power generator)가 사용되는데 풍력발전기의 운전수명이 기본적으로 20

년 이상으로 매우 길며 운전환경 또한 극한조건으로 열악한 상태이기 때문에 열적 문제에 취약하다. 따라서 풍력발전기 설계 시 냉각성능에 대한 검토가 반드시 필요하다.

당사에서 개발 중인 수출용 50Hz 2MW급 풍력발전기는 기존 개발품(60Hz 2MW급) 대비 중량은 28%, 부피는 18% 정도 경량화 되었기 때문에 풍력발전기 내부에서 열적 문제가 클 것으로 예상된다. 따라서 본 논문에서는 풍력발전기 내부 발열체의 온도가 F종 절연기준을 만족할 수 있도록 수치적인 방법을 사용하여 풍력발전기 내부를 설계하였다.

### 2. 수치해석

발전기의 열적 문제에 있어서 반경방향 뿐만 아니라 축방향으로 열유속성분이 비교적 크고 내부의

- 
- 1) (주)효성 중공업연구소 기반기술팀  
E-mail : cwihan@hyosung.com  
Tel : (055)268-9935 Fax : (055)268-9926
  - 2) (주)효성 중공업연구소 기반기술팀  
E-mail : picoset@hyosung.com  
Tel : (055)268-9936 Fax : (055)268-9926
  - 3) (주)효성 중공업연구소 기반기술팀  
E-mail : kykweon@hyosung.com  
Tel : (055)268-9934 Fax : (055)268-9926
  - 4) (주)효성 중공업연구소  
E-mail : hslee@hyosung.com  
Tel : (031)596-1700 Fax : (031)596-1697

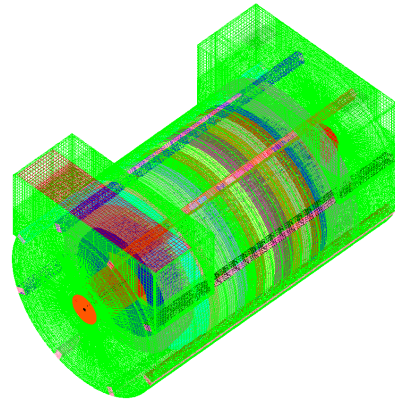
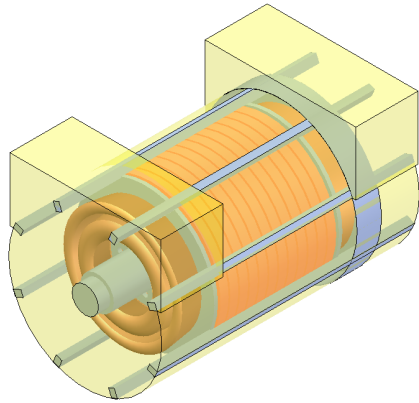


Fig. 1 Schematic design of wind power generator Fig. 2 Grid scheme of the wind power generator

모든 부분과 공기가 열경로(thermal path)를 형성하고 있기 때문에 2차원 해석모델로는 정확한 현상구명이 어렵다.

열해석 방법에는 집중정수법(lumped parameter method)과 분포정수법(distributed parameter method)이 있고, 이 둘을 혼합한 하이브리드법(hybrid method)이 있다. 분포정수법에는 유한요소법이나 유한차분법 등이 있는데 국부적으로 상세한 온도를 알고자 할 때 유용한데 Kang et al.<sup>(1)</sup>과 B.D.J. Maynes et al.<sup>(2)</sup>은 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)을 사용하여 전동기 내부의 열 유동 해석연구를 수행하였다.

본 논문에서는 유한요소법을 사용하여 발전기부의 유동장 및 온도장에 관하여 3차원 전산해석을 수행하였다.

## 2.1 해석모델

풍력발전기는 에너지 변환이 이루어지는 발전기부와 냉각공기의 열교환이 이루어지는 열교환기부로 구성된다. 본 논문의 목적이 발전기부 발열체의 절연기준 평가이기 때문에 이후의 논의에서는 열교환기부에 대한 언급을 배제하였다.

발전기부는 고정자 코어(stator core), 고정자 코일(stator coil), 회전자 코어(rotor core), 회전자 코일(rotor coil), 축(shaft), 프레임(frame)으로 구성되어 있다. 전산해석 수행 시 발전기 내부 온도상승 해석에 영향을 미치지 않는 부분에 대해서는 Fig. 1과 같이 단순화시켜 3차원으로 모델링 하였다.

해석대상인 발전기부는 상용 격자생성 프로그램인 ICM-CFD를 사용하여 총 4,560,000여개의 육면체 제어체적(hexahedral grid)으로 구분하였으며, 해석결과의 정확도를 높이기 위해 Fig. 2에서와 같이 공기(air gap)이나 유동변화가 심한 영역에 대해서는 조밀한 격자를 구성하였다.

## 2.2 지배방정식

발전기부의 온도 및 유동분포를 해석하기 위

해 정상상태 운동량 방정식, 에너지 방정식, 난류 운동에너지 방정식, 그리고 난류운동량 소산율방정식을 적용하였고, 이들 방정식은 식 (1)과 같은 정상상태 Navier-Stokes 방정식으로 표현된다.

$$\text{div}(\rho V\phi - \Gamma_{\phi, \text{eff}} \nabla \phi) = S_{\phi} z \quad (1)$$

여기서  $\rho$ 는 공기밀도( $\text{kg/m}^3$ ),  $\Gamma_{\phi, \text{eff}}$ 는 유효확산계수( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ),  $V$ 는 속도벡터( $\text{m/s}$ ),  $S_{\phi}$ 는 방정식 특성에 기인한 생성항,  $\phi$ 는 각 방향의 속도, 온도, 난류운동에너지, 난류소산에너지 등을 나타낸다.

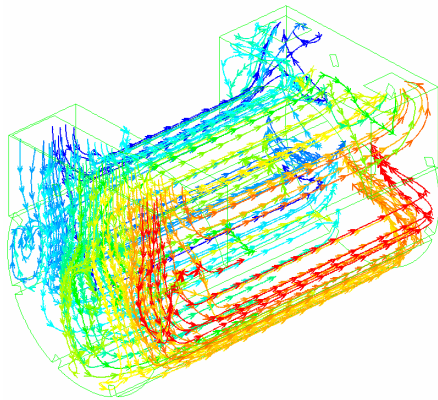
## 2.3 수치해석 방법

2.2절의 식(1)의 방정식을 풀기 위하여 상용 CFD 코드인 Fluent를 사용하였고, 정상상태의 유동장, 온도장을 얻기 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다<sup>(3)</sup>. 발전기 내에서 발생한 난류 유동을 계산하기 위해  $k-\epsilon$  모델을 사용하였고, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지 소산율방정식의 대류항은 1차 정확도의 상류차분도식(upwind-difference scheme), 에너지방정식은 2차 정확도의 상류차분도식으로 대류항을 계산하였다.

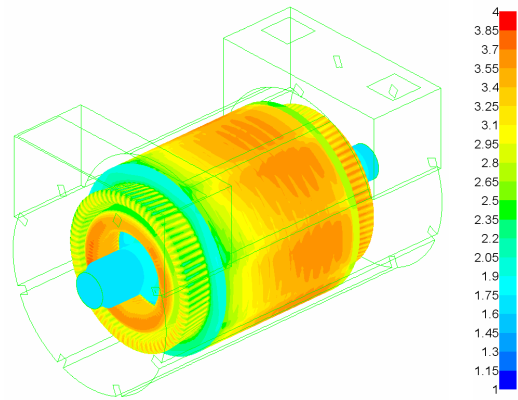
수렴판정 조건으로는 발전기부 내부의 운동량으로 정규화한 각 격자에서 운동량방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지 소산율방정식 유수의 합이  $10^{-6}$  이하, 에너지방정식 유수의 합이  $10^{-9}$  이하일 때로 정하였다. 실제 계산에서는 수렴조건을 만족하기 위하여 약 1,500회 이상의 반복 계산이 필요했다.

Table 1 Heat loss distribution

	Rotor		Stator	
	Coil	Core	Coil	Core
Heat loss [ $\text{W/m}^3$ ]	215,612	61,022	109,445	85,871



(a) Path-line distribution



(b) Dimensionless temperature distribution

Fig. 3 Results of numerical analysis for the preliminary design (without air guide)

## 2.4 경계조건

발전기 내부에서 온도상승의 원인은 철손, 동손, 기계손 등이 있으며 직접적으로 발전기부의 온도를 상승시키는 손실은 철손과 동손이다. 이중 전자계해석을 통해 계산된 동손, 철손, 표류부하손을 단위체적당 발열량으로 변환하여 발전기 내부 열원을 모델링 하였다. 고정자부와 회전자부에서의 발열량은 표 1과 같다.

회전자부(축, 회전자 코일, 회전자 코어, 회전자 압축판)는 Moving wall 조건을 사용하여 1,560 rpm에서의 유동장을 모사하였다. 고정자부와 회전자부의 열전달계수는 재료의 특성에 따라 축방향과 반경방향에 대해 서로 다르게 고려하였으며, 발전기부 외부 프레임의 벽면은 자연대류를 고려한 열전달계수를 사용하였다. 발전기가 극한상황에서 운전되는 것을 모사하기 위해 주위 온도는 40℃로 설정하여 해석을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 초기 설계안

에어가이드가 설치되지 않은 초기 설계안을 바탕으로 발전기부 전체모델에 대해 온도해석을 수행하였다. Fig. 3(a)을 살펴보면 냉각공기는 부하측(drive end, DE) 고정자와 회전을 냉각시키고 고정자부와 프레임 사이의 공극, 고정자부와 회전자부 사이의 공극, 회전자 통풍구(rotor vent hole)를 통과한다. 유동 단면적이 넓은 고정자부와 프레임 사이의 공극으로 대부분의 유동이 형성되고, 고정자부와 회전자부 사이의 공극, 코어 사이의 공극은 좁은 면적으로 인해 유동의 거의 발생하지 않는다. 반부하측(non-drive end, NDE)으로 빠져나온 냉각공기는 코일 헤드(coil head)를 냉각시키지 않고 상부로 유출되기 때문에 Fig. 3(b)에서와 같이 부하측과 반부하측 코일 헤드에서 온도차가 발생한다. 반부하측으로 갈수록 가열된 냉각공기가 발열부를 냉각하기 때문에 반부하측 코어부의 온도가 높아

졌다.

유적선(path-line) 분포에서 반부하측 상부의 공극을 통과한 공기는 상부로 바로 유출되지만 하부의 공극을 통과한 공기는 축의 유동방향으로 인해 재순환영역이 발생한다. 따라서 수정 설계안에서는 냉각공기가 반부하측 코일 헤드를 냉각시킬 수 있도록 유동방향에 변화를 일으킬 수 있는 구조물을 설치하였다.

### 3.2 수정 설계안

이 절은 에어가이드의 설치위치에 따른 고정자부와 회전자부에서 온도변화의 경향성을 평가하는 것이 목적이기 때문에 계산시간을 절약하기 위해 발전기 절반 모델에 대해 대칭경계조건(symmetric boundary)을 적용하여 회전자부의 회전 없이 발전기부 유동장 및 온도장 해석을 수행하였다. Fig. 4의 결과에서 에어가이드가 설치되었을 경우 그렇지 않은 것보다 최소 21%, 최대 29%의 냉각효과가 있는 것으로 나타났다. 반부하측 코일 헤드와 에어가이드의 간격이 좁아질수록 고정자부와 회전자부의 평균 온도가 모두 낮아졌다. 이는 반부하측에서 냉각공기

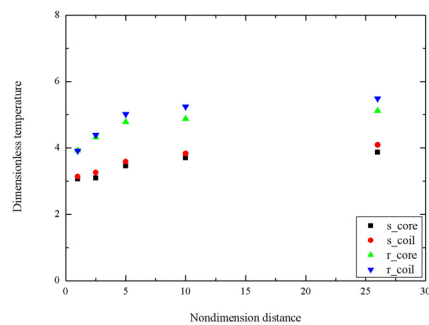


Fig. 4 Variation of average dimensionless temperature for axial distance from the coil head

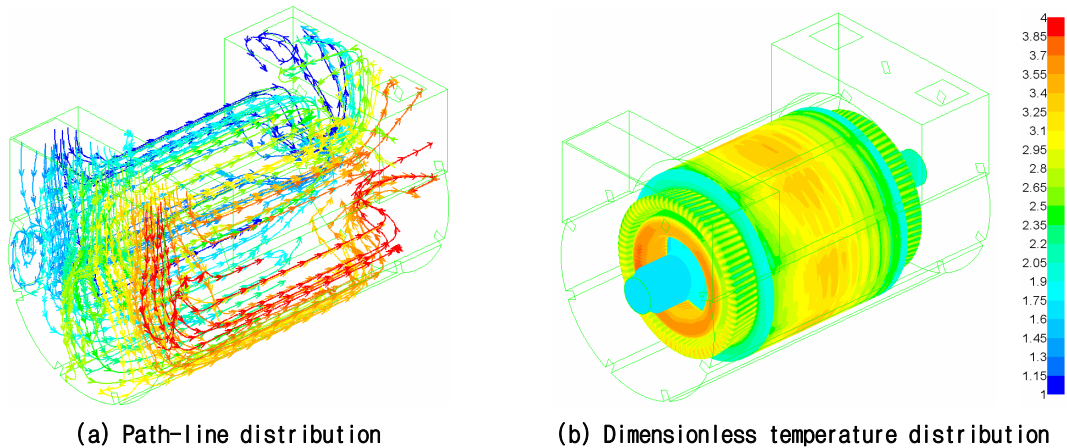


Fig. 5 Results of numerical analysis for the modification design (with air guide 10 mm)

가 에어가이드에 막혀 유동방향이 축의 중심방향으로 형성되면서 반부하측 발열부를 냉각시켰기 때문에 판단된다(Fig. 5(a) Path-line 참조).

### 3.3 초기 설계안과 수정 설계안 비교

발전기부 전체를 해석영역으로 하고, 회전자부의 회전효과를 고려한 Fig. 5의 해석결과를 살펴보면 부하측과 반부하측 발열부의 온도분포가 대칭을 이루고, Fig. 3(b)의 해석결과에 비해 고온부 면적이 감소되어 에어가이드의 설치가 발전기부 온도저감에 효과가 있음을 증명하였다. 그러나 에어가이드가 설치되었더라도 냉각공기의 주유동은 고정자부와 프레임 사이의 공간으로 형성되었기 때문에 회전자부(0~4%)보다 고정자부(11~12%)에서 냉각효과가 큰 것으로 나타났다(Fig. 6 참조). Fig. 5(b)에서 축방향 코어의 중심부에서 온도가 높게 형성되는데 축방향으로의 열전달량에 따라 코어의 두께를 변화시킴으로서 발열부의 온도편차를 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

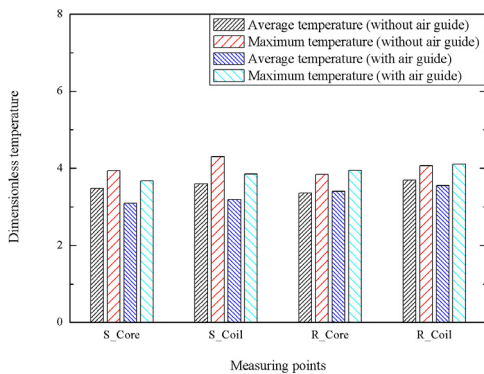


Fig. 6 Comparison of average and maximum dimensionless temperature without/with air guide (10 mm) in the wind power generator

## 4. 결론

본 연구에서는 풍력발전 시스템 발전기부의 유동장 및 온도장에 관하여 3차원 전산해석을 수행하고, 설계변수인 에어가이드의 설치위치에 따른 영향을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 발전기부 반부하측에서 냉각공기가 에어가이드에 막혀 축의 중심방향으로 유동이 형성되고, 이 유동이 반부하측 발열부를 냉각시킨다.

(2) 발전기부 반부하측에 에어가이드를 설치함으로써 회전자부는 0~4%, 고정자부는 11~12%의 냉각효과가 있었다.

(3) 고정자부와 회전자부에서 축방향으로 온도불규형 현상은 축방향으로의 열전달량에 따라 코어의 두께를 변화시킴으로서 해결할 수 있을 것으로 예상된다.

## References

- [1] Kand, S.J., Lee, K.S., Wang, S.M., and Shim, H.K., 2007, "Thermal and flow analysis of outer-rotor type BLDC motor with cooling blades", Journal of KSME, Vol. 31, No. 9, pp. 772-779.
- [2] B.D.J. Maynes, R.J. Kee, C.E. Tindall and R.G. Kenny, 2003, "Simulation of airflow and heat transfer in small alternators using CFD", IEE Proc-Electr. Power Appl., Vol. 150, No. 2, pp.146-152.
- [3] Fluent. Methodology, Fluent Version 6.3.26. Fluent Inc., 2006.