

도서지역 적용을 위한 230 kW급 풍력터빈의 발전기 내부 열유동해석

이준용* · 김만복* · 안태경* · 최만수*[†]

Generator Internal Thermal Flow Analysis of 230 kW-class Wind Turbine for Island-area Application

Junyong Lee*, Manbok Kim*, Taekyeong Ahn*, Mansoo Choi*[†]

Key Words : CFD(전산유체역학), Wind Turbine(풍력발전기), Energy Independence Island(에너지자립섬), Air Hole(공기공급홀), Thermal flow Analysis(열유동해석)

ABSTRACT

The remote islands, Off-Grid to main land, rely on diesel generation for their own electricity supply. In order to decrease Carbon gas production, diesel generation should be minimized and renewable energy applications such as wind energy and solar energy should be expanded. In this study, 230 kW class wind turbine was analyzed the internal temperature of generator using the CFD (Computational Fluid Dynamics) for energy independent island. The 230 kW-class Generator internal for thermal flow analysis was analyzed the Electromagnetic Field Analysis and output characteristic used the ANSYS Maxwell program. The best cooling effect is case of 6 Air Holes and The maximum temperature difference of a permanent magnet checked the 6.5°C. The 6 Air Holes case of a permanent magnet maximum temperature is similar with the whole Air Holes case of a permanent magnet maximum temperature. As a result, it was confirmed that the cooling effects of permanent magnets of The 6 Air Holes case and the whole Air Holes case were the same.

1. 서 론

전력계통에서 멀리 떨어진 도서지역은 전력공급을 위해 자체적으로 디젤 발전에 의존하고 있다. 이로 인해 전력생산에 고비용이 들은 물론이고, 환경적 오염도 지속적으로 발생하고 있다. 또한 향후 유가가 상승된다면 지속적인 전력생산비용의 증가가 예상된다. 그러므로 도서지역의 전력생산 방식에 근본적 변화를 주기 위하여 디젤발전을 최소화하고 친환경 에너지인 풍력, 태양광 등 신재생에너지의 적용을 확대하여야 한다. 우리나라의 에너지자립섬에 많이 적용될 것으로 예상되는 200 kW급 풍력터빈의 발전기 내부 열유동해석을 통한 내부 온도특성을 분석하였다. 발전기의 자기장 공간 내에 전도체(Coil 등)를 통과시킴으로써 권선(Coil)에 전기를 발생시키는 원리를 가지고 있으며, 자기장과 권선이 쇠교하

는 영역을 공극(Air gap)이라고 하는데 대부분의 발전기는 공극 및 영구자석(Magnet)의 온도가 많이 상승될 경우 자기장을 형성하는 영구자석은 자력이 약해지거나 자력을 잃게 되는 경우가 발생하므로 공극 부분의 온도 상승을 방지하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구는 공극 부분에 공기를 공급하고 순환시킬 수 있는 공기 유동 발생 구조물과 공기 공급홀(Air Hole)을 적용하여 기존 발전기의 공극 부분 및 영구자석의 온도 상승을 낮추고자 하며 기 설계된 230kW급 발전기 내부 열유동해석을 위해 전자기장 해석 프로그램(ANSYS Maxwell)을 이용하여 전자기장해석 및 출력 특성을 분석하였다.⁽¹⁾ 230kW급 발전기 출력 특성 중 손실 값(동손, 철손)을 반영하여 기존 발전기 내부 열유동 순환 개선을 위한 발전기 내부 로터(Rotor) Vane 개선 및 로터 상단에 위치한 영구자석과 영구자석 사이에 공

* (재)녹색에너지연구원 (Green Energy Institute)

[†] 교신저자, E-mail : mschoi@gei.re.kr

기공급홀을 적용하였으며, 공랭식 공기공급홀 적용 위치에 따른 발전기 내부 발열부품들의 온도 특성을 분석하였다.

2. 발전기 내부 모델 및 해석조건

2.1 열유동해석을 위한 발전기 3D 모델

기존 발전기 내부유동장 및 외부유동장 모델링은 Fig. 1과 같으며, 풍력터빈 발전기의 열유동해석을 위하여 발전기 내부유동장 및 외부유동장을 설계 및 수정하였다. 발전기 외부유동장은 발전기 외경의 2배, 발전기 상하 방향으로 발전기 길이의 2배 이상으로 유동장을 설계 또한 기존 발전기의 형태가 원형의 대칭을 이루고 있으며, 수치해석 시간을 고려하여 발전기의 1/4만 열유동해석의 범위로 선정하였다.

Fig. 2~4는 발전기 내부 발열부품(Rotor Yoke and Magnet, Coil and Stator Lamination) 및 발전기 프레임 3D 모델링 또한 원형의 대칭을 이루고 있어 전체 3D 모델링의 1/4만 해석 범위로 선정하였다.

발전기 공극부 냉각을 위한 공기 유동발생 구조물과 공기공급홀 발전기 내부 열유동 순환 개선을 위한 공랭식 공기공급홀 3D 모델링 기존 발전기 내부 Rotor Yoke의 구조에서 발전기의 구조적 안정성을 위한 직선의 Vane 형태를 Rotor 회전 시 공기 압축으로 인한 공기 순환 면적 확대를 위하여 Fig. 5와 같이 곡선 형태로 설계 하여 내부 공기를 공기공급

홀 방향으로 유도하였다.

또한, Magnet 사이에 내부 열유동 순환을 위한 공랭식 공기공급홀 을 Fig. 6과 같이 Case별 설계하였고 Rotor의 형태가 원형의 대칭을 이루고 있으며, Rotor Yoke의 Vane 형

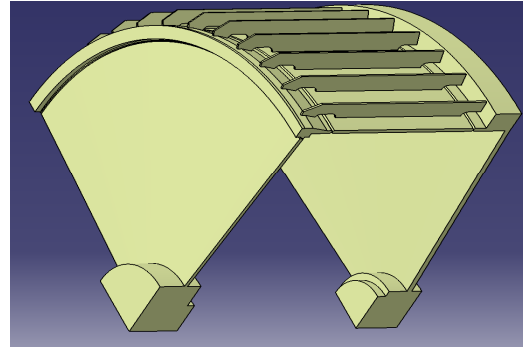


Fig. 2 Generator Frame

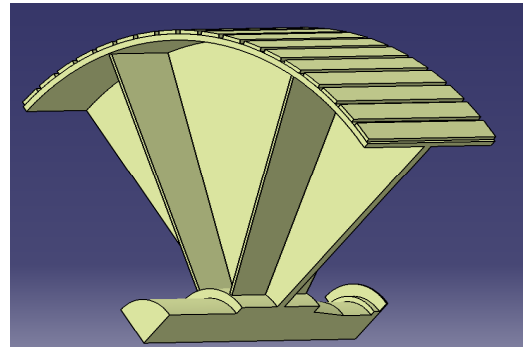


Fig. 3 Rotor Yoke(Original) and Magnet

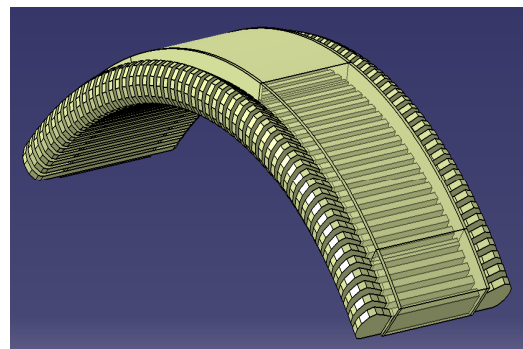
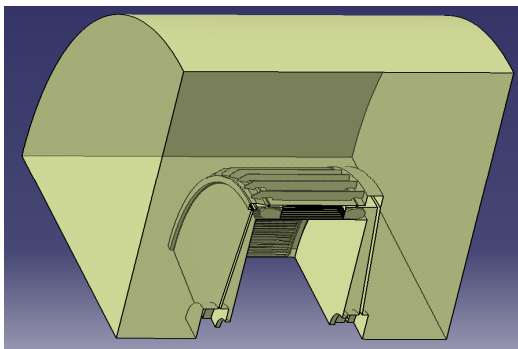
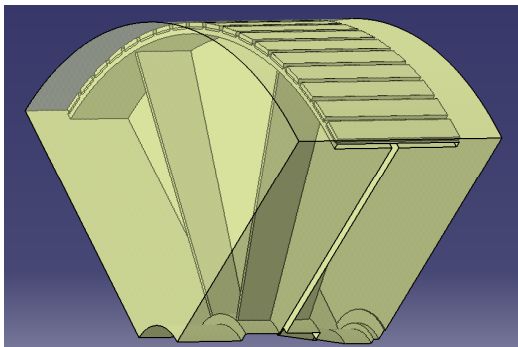


Fig. 4 Coil and Stator Lamination



(a) External Fluid domain



(b) Internal Fluid domain

Fig. 1 Fluid domain

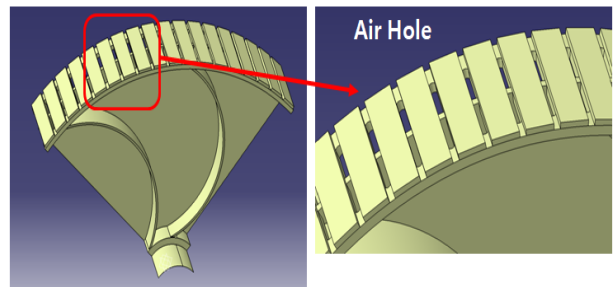


Fig. 5 Air Hole Type Rotor Yoke

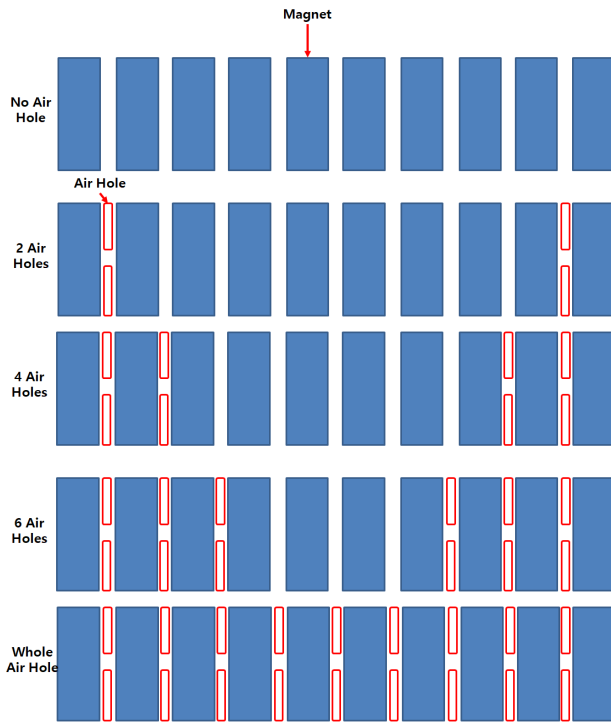


Fig. 6 Air Hole Design Between Magnet

태가 곡선으로 설계에 따라 공기유량이 유입 및 유출 Rotor 부분을 설계함으로써 발전기의 1/4만 열유동해석의 범위로 선정하여 수치해석 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 발전기를 구성하였다.

1/4의 발전기 내부에 권선 54개를 1,667 deg으로 고정자 (Stator Lamination)에 결합 및 배치, 영구자석은 Rotor Yoke tip 부분에 결합 및 배치하였으며, 고정자와 영구자석의 발전기 공극은 4 mm 선정하였다.

2.2 발전기 계산 격자

Table 1 발전기 내부 열유동해석을 수행하기 위하여 구성된 계산격자수이며, 계산의 수렴성 및 결과의 신뢰성을 위하여 Fig. 7과 같이 발전기 내부 발열부품 및 공기공급홀 주위의 격자밀도를 높게 구성하였다.

2.3 발전기 내부 해석조건

발전기의 총 발전은 230kW이며, 발전기의 손실은 전자기 해석을 통해 나온 손실의 결과 값을 Table 2와 같이 선정하여 발열부품별 손실 값을 적용하였다. 총 손실 값은 13,162 W이며, 열유동해석 범위가 발전기의 1/4 이므로 손실 값을 3,290.5 W로 선정하였다. 또한, Fig. 8과 같이 발전기 바깥 쪽 부분에 풍속 10 m/s의 조건, 발전기 내부 Rotor 회전수는 35 min⁻¹ 및 내부 유동장, 외부 유동장, 발열 부품의 초기

Table 1 Total Number of Mesh

Type	Tetra Mesh	
	Node	Elements
Internal Fluid domain (Original)	450,962	2,091,537
External Fluid domain	246,027	1,283,257
Generator Frame	160,371	688,105
Rotor Yoke (Original)	137,954	758,620
Magnet	2,898	15,399
Stator Lamination	379,717	2,079,345
Coil	5,659	31,152
Internal Fluid domain (Air Hole Type)	778,004	3,808,709
Rotor Yoke (Air Hole Type)	466,563	2,227,155

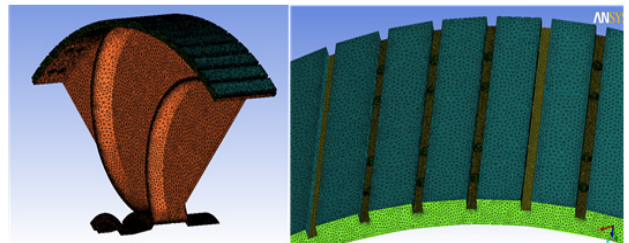


Fig. 7 Grid of Rotor and Air Hole

Table 2 Boundary condition

Boundary condition	ANSYS Maxwell Value (Designed)
	Air Hole Type Rotor Yoke
Reference Pressure	1 atm
Inlet velocity	10 m/s
Turbulence Model	K- ω SST
Rotor Speed	35 min ⁻¹
Initial Temperature of Air and Solid	40 °C
Coil Heat Flow	2,857.5 W(1/4) (Whole Heat Flow : 11,430 W)
Magnet Heat Flow	55 W(1/4) (Whole Heat Flow : 220 W)
Stator Yoke Heat Flow	367.5 W(1/4) (Whole Heat Flow : 1,470 W)
Rotor Yoke	10.5 W(1/4) (Whole Heat Flow : 42 W)
Total loss	3,290.5 W(1/4) (Whole Heat Flow : 13,162 W)

온도는 40°C로 선정하였으며, 회전영역과 고정영역을 동시에 포함하는 유동해석 기법 중 유동데이터를 두 영역에 서로 전달하기 위한 경계 조건으로 GGI기법 중 Frozen Rotor Interface 기법을 적용하였다.

2.4 발전기 내부 해석 결과

발전기 강제대류 열유동해석 결과는 Fig. 9~12과 같이 No Air Hole 케이스에서 Rotor Yoke 최고 온도 110.82℃, 영구자석 최고온도 110.86℃, 권선 최고온도 123.9℃, 고정자 최고온도 122.87℃이며, 발전기 내부 최고온도는 고정자 바깥쪽 부분에서 122.87℃로 확인하였다.

또한, 2 Air Hole 케이스부터 6 Air Hole 케이스까지 공기 공급홀이 증가함에 따라 Rotor Yoke, 영구자석, 권선, 고정자 발열부품들의 온도가 점차적으로 낮아짐을 확인하였다.

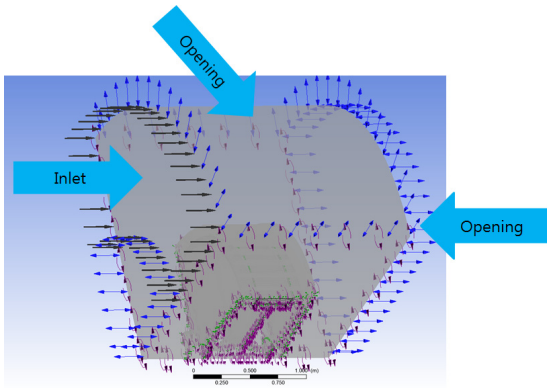


Fig. 8 Boundary condition

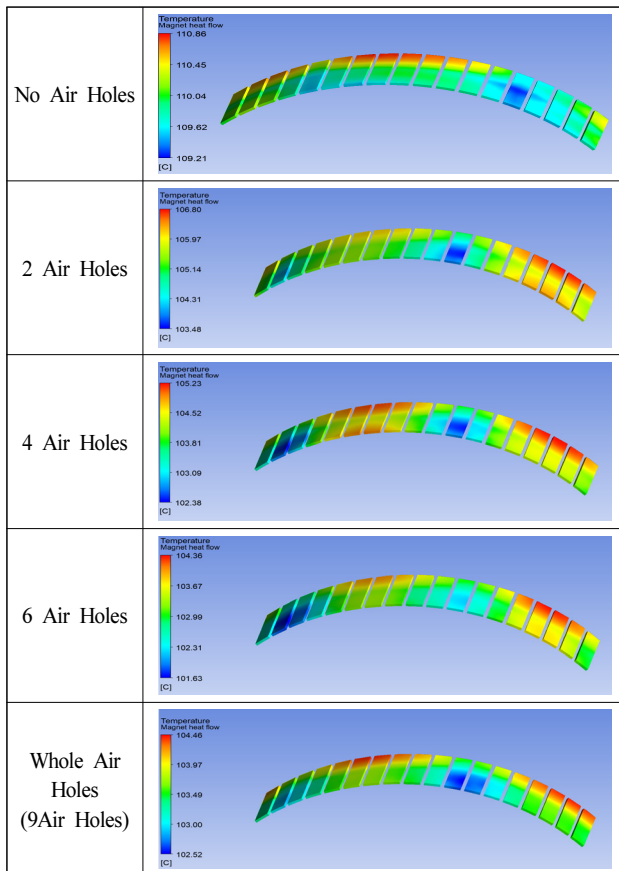


Fig. 9 Temperature Distribution of Magnet

Fig. 9~12에서 공랭식 전체 공기 공급홀(Whole Air Hole) 적용 발전기 내부 온도 분포(Whole New Air Hole) 발전기 강제대류 열유동해석 결과는 Rotor Yoke 최고 온도 104.44℃, 영구자석 최고온도 104.46℃, 권선 최고온도 124.63℃, 고정자 최고온도 123.60℃이며, 발전기 내부 최고온도는 권선 바깥쪽 부분에서 124.63℃로 확인하였다.

공랭식 공기 공급홀 적용 발전기 내부 유선 및 압력 분포를 No Air Hole부터 Whole Air Hole 총 5 케이스로 분류하여 확인 결과 Fig. 13과 같이 공기 유선은 공기 공급홀 부분에서 활발히 활동적이며, Rotor 부분에서는 유동박리를 확인하였다. 또한, 모든 공기 공급홀 케이스에서 공기 유선의 유사함을 확인하였으며, Fig. 14에서 1구역의 공기 공급홀

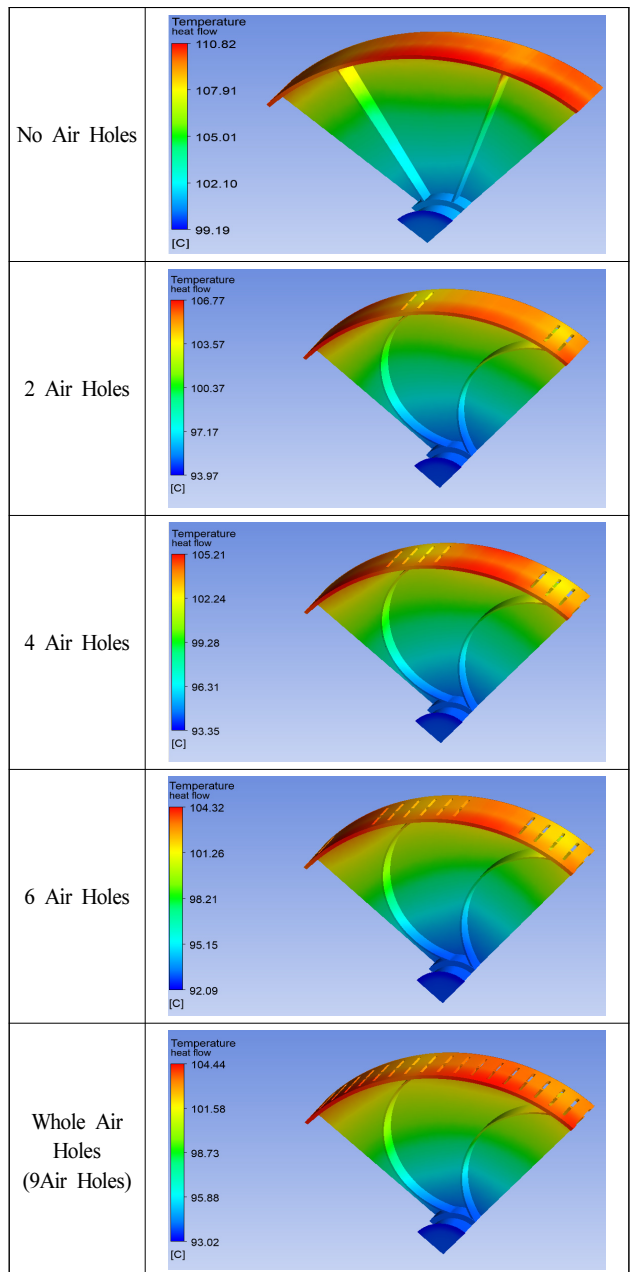


Fig. 10 Temperature Distribution of Rotor Yoke

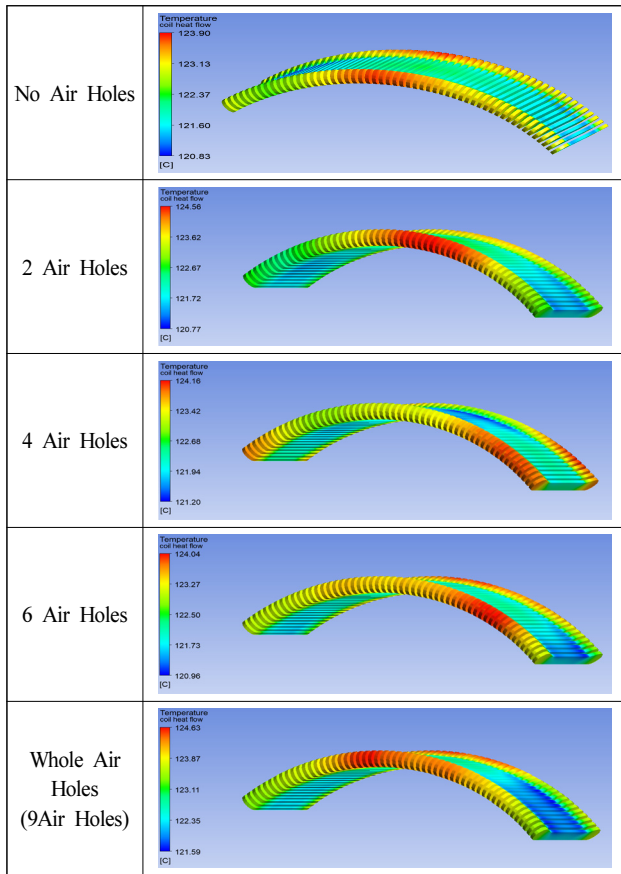


Fig. 11 Temperature Distribution of Coil

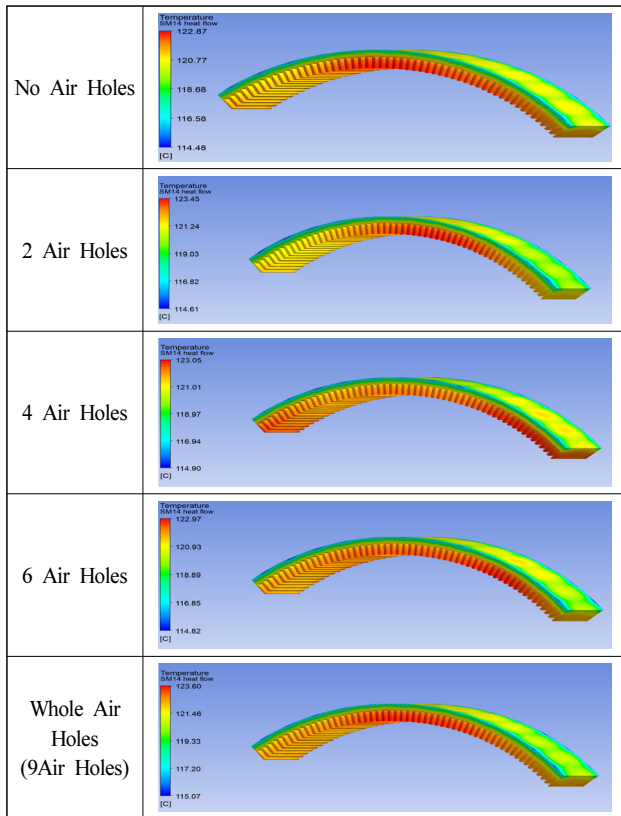


Fig. 12 Temperature Distribution of Stator Lamination

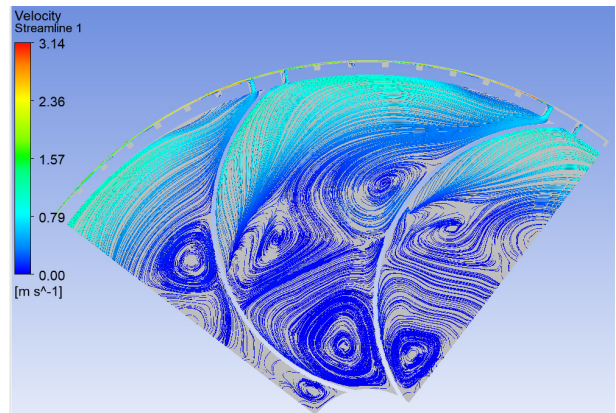


Fig. 13 Streamline at horizontal direction of Air hole (2 Air Holes)

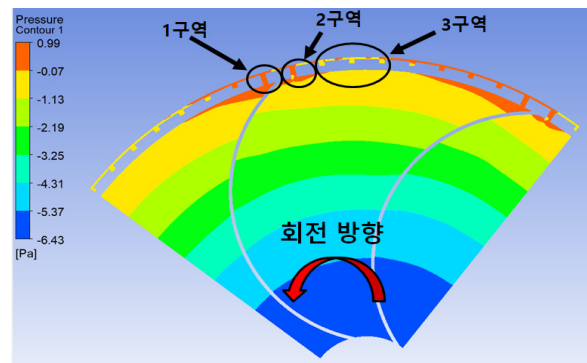


Fig. 14 Pressure at horizontal direction of Air hole (2 Air Holes)

부분에서 압력이 2구역 보다 상대적으로 높게 나타남에 따라서 유동의 흐름이 1구역에서 2구역으로 공기 공급홀을 통해 이동함을 확인하였지만, Rotor의 Vane과 Vane 사이 중앙부분에서 가장 낮은 압력분포를 확인하였다. 또한, Fig. 14의 3구역 부분에는 공기 공급홀 적용을 하지 않았지만 Fig. 15와 16과 같이 압력분포가 낮은 부분(2구역)에 공기 공급홀 적용에 따라 6 Air Hole부터 공기량이 상대적으로 많이 증가함을 확인하였다.

전자기장 해석 프로그램을 이용하여 발전기 내부 손실 값을 적용하여 열유동해석 결과를 Table 3과 같이 정리하였으며, Rotor Yoke 상단 영구자석 사이 공랭식 Whole Air Hole 케이스를 적용한 Rotor Yoke가 기존 No Air Hole 케이스 Rotor Yoke보다 영구자석의 최고 온도를 대략 6.4°C 낮추는 효과를 확인하였고, 효과가 가장 좋은 케이스는 6 Air Holes에서 영구자석의 최고 온도차가 6.5°C로 확인하였다.

또한, Fig. 17과 같이 공기 공급홀이 증가할수록 공기 공급홀을 통과하는 공기량도 증가하지만, 발전기는 밀폐형으로 내부의 순환공기만으로 냉각시키는 구조로서 공극에서 가열된 공기가 순환되는 동안 충분히 냉각 후 다시 공극으로 순환될 때 냉각효과를 가질 수 있다. 이러한 측면에서 볼 때 6 Air Holes 케이스보다 더 많은 공기 공급홀을 만들어 공기

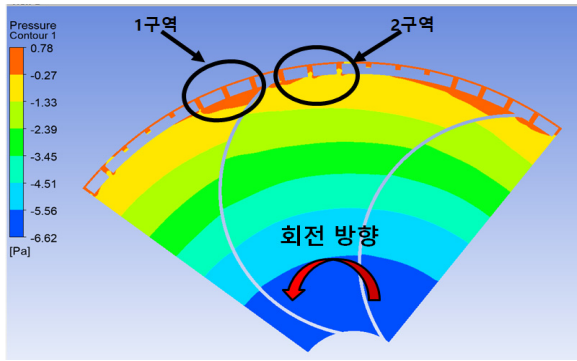


Fig. 15 Pressure at horizontal direction of Air hole(6 Air Holes)

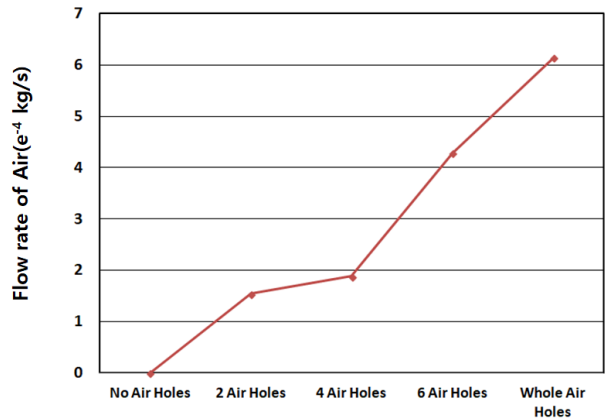


Fig. 17 Flow rate of Air by case

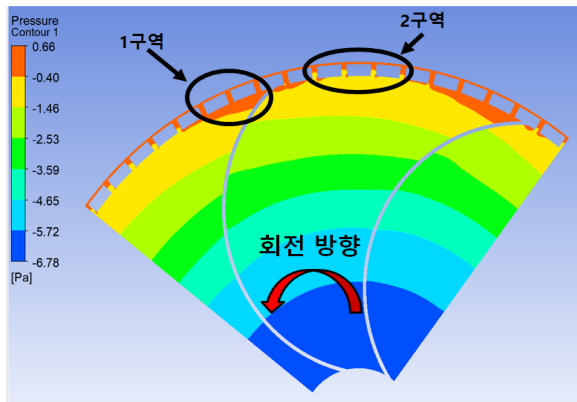


Fig. 16 Pressure at horizontal direction of Air hole (Whole Air Holes)

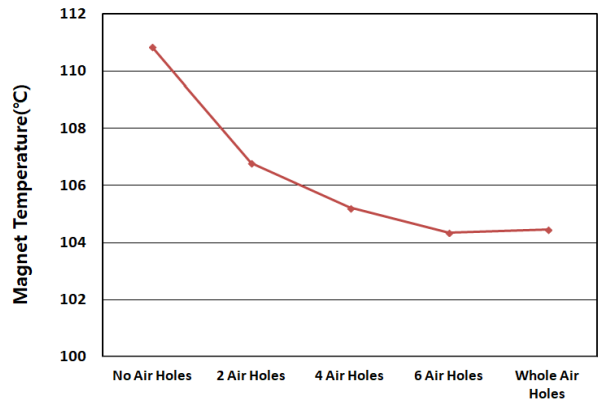


Fig. 18 Magnet Temperature by case

Table 3 Temperature distribution(Initial temperature 40°C)

Type		Temperature distribution			
		Rotor Yoke (°C)	Magnet (°C)	Coil (°C)	Stator Lamination (°C)
No Air Holes	Lowest Temp	99.19	109.21	120.83	114.48
	Highest Temp	110.82	110.86	123.90	122.87
2 Air Holes	Lowest Temp	93.97	103.48	120.77	114.61
	Highest Temp	106.77	106.80	124.56	123.45
4 Air Holes	Lowest Temp	93.35	102.38	121.20	114.90
	Highest Temp	105.21	105.23	124.16	123.05
6 Air Holes	Lowest Temp	92.09	101.63	120.96	114.82
	Highest Temp	104.32	104.36	124.04	122.97
Whole Air Holes (9 Air Holes)	Lowest Temp	93.02	102.52	121.59	115.07
	Highest Temp	104.44	104.46	124.63	123.60

유량을 높여도 순환 공기가 충분히 냉각되지 못하여 냉각 효율이 더 이상 커지지 않고 있다고 판단되며, 영구자석의 온도는 Fig. 18 그래프에서 보이는 바와 같이 Whole Air Holes 케이스와 6 Air Holes 케이스를 비교한 결과 영구자석의 최고온도가 비슷함을 확인하였다.

3. 결 론

발전기 내부 열유동 순환 개선을 위한 발전기 내부 로터 Vane 개선 및 로터 상단 영구자석과 영구자석 사이 공랭식 공기 공급홀 적용 위치에 따른 발전기 발열부품들의 온도 특성을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) No Air Hole 케이스부터 6 Air Hole 케이스까지 공기 공급홀이 증가함에 따라 공기유량 증가하며, Rotor Yoke, 영구자석, 권선, 고정자 발열부품들의 온도는 점차적으로 낮아짐을 확인하였고 냉각효과가 가장 좋은 케이스는 6 Air Holes이며, 영구자석의 최고 온도차가 6.5°C로 확인하였다.
- 2) Whole Air Holes 케이스가 6 Air Holes 케이스보다

더 많은 공기 공급홀을 만들어 공기유량을 높여도 순환 공기가 충분히 냉각되지 못하여 냉각 효율이 더 이상 커지지 않고 있다고 분석되며, Whole Air Holes 케이스와 6 Air Holes 케이스의 영구자석의 온도를 비교한 결과 최고온도가 비슷함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2019 3020020220).

References

- (1) Choi, M. S., Choi, H. W., Lee, C. M., and Choi, H. J., 2020, "Electromagnetic Field Analysis of 230 kW-class Low Wind Speed Medium Wind Turbine for Island-area Application," Korean Society for New and Renewable Energy, Vol. 16, No. 2, pp. 14~19.