유로 형상에 따른 선박용 발전기의 냉각 통풍 해석

이동조†·임남혁*·설신수*·김진오**

A analysis of cooling system for generator according to ventilation path

D. J. Lee, Namhyuk Lim, S. S. Seol and J. O. Kim

Key Words: Generator(발전기), 회전자(Rotor), 고정자(Stator), 권선온도(Winding Temperature)

Abstract

To develop more compact and light generators which have high capacity, the most important thing that should be considered is the inner cooling system. Under all circumstances, the temperature of rotor and stator windings must be kept below the maximum temperature of insulation to maintain reliability and prolong durability of the machine. Therefore, the development of more effective cooling system and the exact prediction of windings are essential to produce our unique generator model which is reliable and competitive in international market. In this study, the flow of cooling air and the temperature distribution of winding is analyzed by using computational fluid dynamics. This analysis can lead to optimize the structure of cooling system and predict a local temperature rise.

기호설명

DE : 구동부(Drive side)
NDE : 비구동부(Non-drive side)
ρ : 밀도
u_i : 속도성분
g_i : 중력 가속도 성분
μ_{eff} : 유효 점성 계수
μ : 점성 계수
μ_t : 와 점성 계수
Pr_t : Prandtl Number
k_t : 난류 전도율
p : 압력

† 현대중공업 산업기술연구소 엔진연구실
E-mail : djlee66@hhi.co.kr
TEL : (052)230-3226 FAX : (052)250-9578
* 현대중공업 산업기술연구소 엔진연구실
** 현대중공업 신제품개발실

1. 서 론

소형 및 대용량의 선박용 발전기를 개발하기 위해서 가장 중요하게 고려되어야할 인자가 내부 냉각시스템이다. 발전기 용량을 증가시키면 같은 방열 면적에서 더 많은 열 손실이 발생하게 되므로 발전기 내부의 온도는 상승한다. 이로 인해 발전기는 고온에 견디기 위해 고가의 절연물을 필요로 하며 고온에 의한 절연재의 수명단축은 발전기의 신뢰성에 치명적인 결과를 초래한다. 그러므로 효과적인 통풍냉각기술의 개발과 발전기내 회전자와 고정자 권선 온도분포의 정확한 예측은 신뢰성 및 경쟁력을 갖춘 모델 개발에 필수적이다. 따라서 새로운 모델을 개발하는데 있어 국부적인 온도 상승을 미리 예측함으로써 개발시간을 효과적으로 단축시킬 수 있다.

본 연구에서는 전산유체역학(CFD)을 이용한

내부 유동해석을 통하여 선박용 발전기의 온도분포 예측하였고, 이를 근거로 설계를 개선하였다.

2. 연구 내용

본 연구에서 수행된 내용은 선박용 발전기를 CFD로 해석함으로써 발전기의 통풍냉각 성능을 평가하였다.

2.1 발전기의 구조

발전기는 기본적으로 고정자(stator)에 대해서 회전자(rotor)의 회전에 의해 전기를 생산하며 회

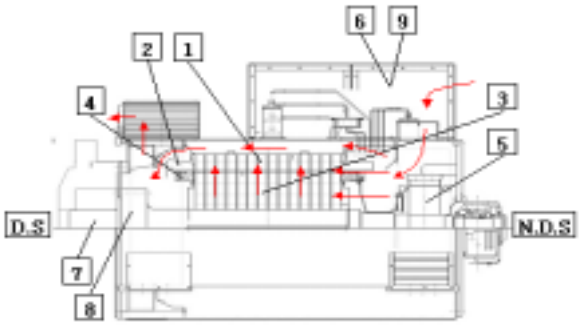

Fig. 1 Structure drawing of generator

전자, 고정자에는 많은 권선(winding)이 감겨있는 구조로 되어 있다. 고정자와 회전자는 전기적 절연을 위해 여러 개의 적층물로 적층(lamination)되어있다. 외형은 Fig. 1과 같고 세부 명칭들은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Detail designation of No. of Figure 1

No.	item	No.	item
1	stator iron	6	rectifier
2	stator end winding	7	shaft
3	rotor iron	8	cooling fan
4	rotor end winding	9	terminal box
5	exciter		

2.2 전산해석 기본방정식

본 연구에서는 발전기 내부의 유동 및 권선온도를 해석하기 위해 상용 CFD 코드인 Fluent를 사용하였다. Fluent를 이용하여 유체 유동 및 온도에 관련한 기본방정식 즉, 유체의 질량보존방정식, 운동량보존방정식, 에너지 보존방정식의 해를 구하였다. 난류 모델로는 표준 $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였으며 텐서(tensor) 표기법을 이용하면 각 보존방정식은 다음과 같은 미분방정식의 형태로 표현할 수 있다.

질량 보존 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0$$

운동량 보존 방정식:

$$\rho u_i\frac{\partial u_j}{\partial x_i}=\rho g_i+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_{eff}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]-\frac{\partial p}{\partial x_i}$$

$$\mu_{eff}=\mu_t+\mu=\frac{C_\mu k^2}{\varepsilon}+\mu$$

난류 운동에너지 k 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right)+G_k+G_b-\rho\varepsilon$$

$$G_k=\mu_t\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

에너지 소산 ε 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i\varepsilon)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right)+C_1\frac{\varepsilon}{k}G_k+(1-C_{3\varepsilon})G_b+C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$G_b=-g_i\frac{\mu_t}{\rho\sigma_h}\frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

여기서, ρ 는 밀도, u_i 는 속도 성분, g_i 는 중력가속도, p는 압력, μ_{eff} 는 유효점성계수, μ_t 는 점성계수, μ 는 의 확산계수, μ_t/σ_k 는 k 의 확산계수, G_k 는 k 의 생성항, μ_t/σ_ε 는 부력에 의한 ε 생성 항이며, 난류모델의 상수항들은 다음과 같다.

$$C_\mu=0.09,\ C_1=1.14,\ C_2=1.92,\ \sigma_k=1.0,\ \sigma_\varepsilon=1.3$$

에너지 보존 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{k_t}{c_p}\frac{\partial H}{\partial x_i}\right)+\tau_{ik}\frac{\partial u_i}{\partial x_k}$$

여기서, k_t 는 난류에 의한 전도율이고, $\left(=\mu_t/\mathrm{Pr}_t\right)$ 는 난류 Prandtl Number 이다.

Pr_t

2.3 전산 해석 조건

개발 모델인 선박용 발전기는 여러 번의 설계 수정 단계를 거치면서 frame의 모양이 Fig. 2와

같이 육각형에서 Fig. 3과 같이 원통형으로 바뀌고 냉각 팬 출구가 scroll 형태로 바뀌었다. 그리고 Fig. 3에서 원통형 frame의 경우 반지름 방향 통풍 channel이 6개(case 2) 및 7개(case 3)로 수정하여 비교하였는데 상세한 모델링은 Fig. 4에 나타내었다. 각 수정된 모델의 전산해석을 통해 수정전과 비교하여 통풍 냉각 측면에서의 장·단점을 살펴보았다. 해석은 다음과 같은 3가지 경우에 대하여 수행하였다.

- Case 1 : Frame 육각형인 모델
- Case 2 : Frame 원통형인 모델, channel 6개
- Case 3 : Frame 원통형, channel 7개

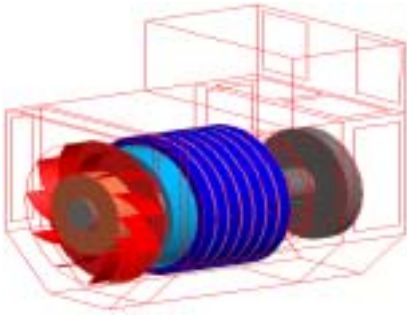

Fig. 2 Analysis cases of generators(hexagonal body) : Case 1

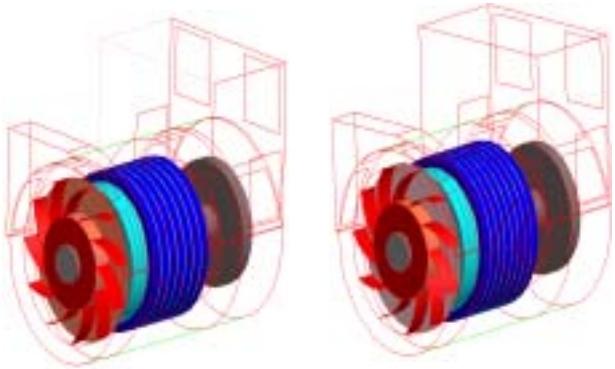

Fig. 3 Analysis cases of generators(cylindrical body) : Case 2, Case3

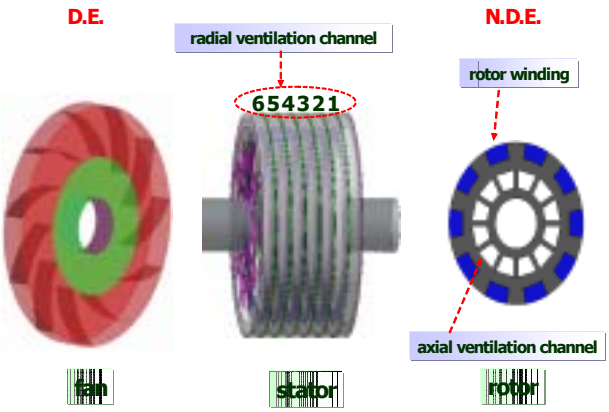

Fig. 4 Detailed geometry of generators

개발 모델 발전기의 특징은 직경이 크고 코어 길이가 짧아지면서 반지름 방향 덕트 수가 6~7개 정도로 적다는 것이다. Fig. 3에서 case 3은 case 2에서 반지름 방향 덕트가 하나 추가되면서 각 덕트의 크기는 10 mm에서 8 mm로 변화되었다. 각 case별 형상 데이터는 Table 2와 같다. 또한 각 case의 모델링은 도면을 근거하여 Fig. 5과 같이 실제와 동일하게 모델링 하였다. 여기서 위치별 흡입 풍량을 알아보기 위해 흡입구를 inlet-top과 inlet-side로 나누어 표시하였다. 해석에 적용된 열 손실값은 모든 case에서 동일하며 Table 2와 같다.

형상을 모델링하고 권선에는 Table 3에 제시한 열 손실값을 적용하였고, 이때 팬이나 축, 회전자, 여자기는 720 rpm의 속도로 회전하도록 경계조건을 주고 입/출구는 pressure-outlet으로 하여 팬에 의해 풍량이 결정된다.

Table 2 Geometry data of cases

Loss	Case 1	Case 2	Case 3
Frame	hexagonal	cylindrical	cylindrical
Size of duct	10mm	10mm	8mm
No. of channel	6	6	7

Table 3 Heat losses of generator

Loss	Loss [W]	Loss [W/m^3]
Stator core	7,717	127,812
Stator winding	15,827	204,789
Rotor winding	17,750	379,371

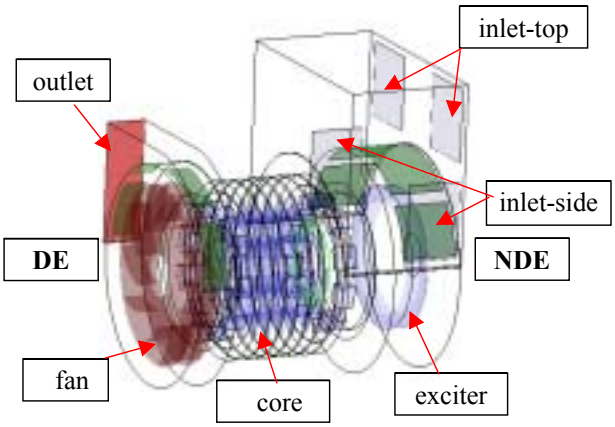

Fig. 5 Modeling of detailed generator geometry

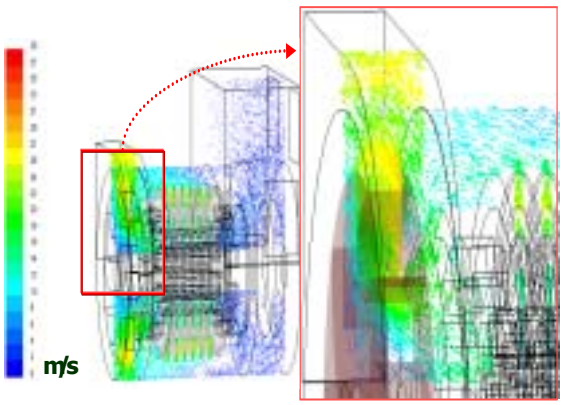

Fig. 6 Velocity vector of case 2

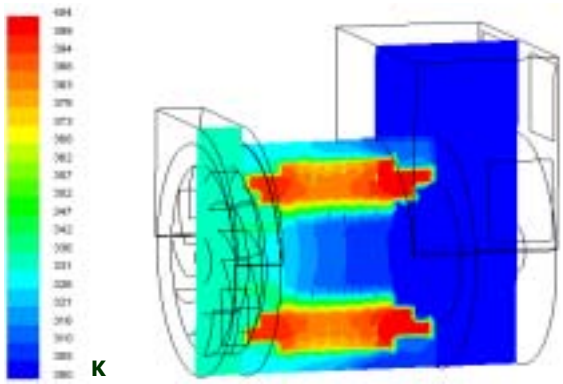

Fig. 7 Temperature distribution of case 2

3. 결과 및 고찰

발전기의 유동 해석 및 온도상승 해석

경계 조건을 적용하여 계산하면 Fig. 6, 7과 같은 속도 벡터 및 온도 분포를 얻을 수 있다. 이러한 속도와 온도 분포는 그 형태가 비슷하기 때문에 case 2에 대한 결과만을 도시하였다.

Fig. 6에서 팬에 의해 유입된 냉각 공기가 고정자 코어 외부의 바이패스와 회전자의 축 방향 덕트와 반지름 방향 덕트로 고르게 분배되어 흐르고 있는 양상을 알 수 있으며 fan 부분을 확대한 그림에서 fan 주위의 유동 분포를 더 자세히 볼 수 있다. Case 2의 경우 총 풍량은 1.22 kg/s이며 회전자로 유입되는 풍량은 0.92 kg/s로 총 풍량의 약 75.4%이다. 이는 기존 모델과 비교해 약 20% 이상 증가한 것으로 코어의 형상이 유동 저항이 적어지는 방향으로 변경되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 7에 축의 중앙 단면에서 온도 분포를 나타내었다. 이 그림에서 냉각 공기가 권선을 냉각하면서 출구 쪽으로 진행함에 따라 온도가 점차 상승하는 양상을 확인 할 수 있다. Case 2의 경우 고정자 권선의 온도상승은 94.2K, 회전자 권선의 온도상승은 92.7K이다.

각 case 별 풍량 분포는 Table 4에 자세히 나타내었다. frame을 단순히 육각형에서 원통형으로 바꾸는 것은 전체 풍량이 1.429 kg/s에서 1.229 kg/s로 줄어들기 때문에 통풍 냉각 측면에서는 유리한 점이 없다. Inlet-top의 경우 풍량이 증가하고 있지만 inlet-side의 경우 더 많은 양의 풍량이 감소하여 전체적으로 풍량이 감소되어 Table 5에서 각 권선의 온도가 약 7K 정도 상승하는 결과를 보이게 된다. 그러나 case 2의 구조로부터 case 3처럼 코어의 반지름 방향 덕트를 하나 추가할 경우에는 경향이 달라진다. Table 4와 5에서 알 수 있듯이 풍량은 약간 증가하며, 각 권선의 온도가 case 1의 수준으로 다시 낮아짐을 알 수 있다. 이는 반지름 방향의 덕트가 추

가되면서 냉각 공기에 더 많은 원심력이 작용하여 통풍 단면적은 작지만 풍량이 증가하고, 코어의 열전달 면적이 증가되었기 때문이다.

Table 4 Flow rate distribution of generators [kg/s]

	Case 1	Case 2	Case 3
Total flow	1.429	1.229	1.234
Inlet top	0.265	0.507	0.511
Inlet side	1.164	0.722	0.723
Flow rotor	1.039 (72.7%)	0.924 (75.2%)	0.93 (75.4%)

Table 5 Winding temperature rise of generators[℃]

		Case 1	Case 2	Case 3
Stator winding	In core	83.3	90.4	82.6
	End-winding (DE)	87.8	95.8	89.1
	End-winding (NDE)	94.6	102.4	95.7
	Avg.	86.8	94.2	86.8
Rotor winding	In core	83.5	90.5	82.8
	End-winding (DE)	87.8	95.6	88.7
	End-winding (NDE)	94.5	101.9	95.1
	Avg.	85.6	92.7	85.3

4. 결 론

본 연구에서는 발전기 내부의 온도상승을 억제하고 통풍냉각을 보다 효율적으로 개선하기 위해 CFD 해석을 수행하여 비교하였다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 코어 반지름 방향 덕트의 크기를 10 mm, 덕트 갯수를 6개로 고정하고 Frame 형상을 육각형에서 원통형으로 바꾸는 경우, 전체 풍량이 줄어 통풍 냉각 측면에서는 장점이 없다.
2. Frame을 육각형에서 원통형으로 변경하고 코어의 반지름 방향 덕트의 크기를 10 mm에서 8 mm로 수정하고 덕트 개수를 6개에서 7개로 수정하여 냉각 성능을 개선하였다.

참고문헌

(1) Sarkar, D., Mukherjee, P.K., Sen, S.K., 1991, "Use of 3-dimensional finite elements for computation of temperature distribution in the stator of an induction motor," *IEE Proceedings-B*, 138, 75-86.

(2) Sarkar, D., Mukherjee, P.K., Sen, S.K., 1993, "Approximate analysis of steady state heat conduction in an induction motor," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 8, pp. 78-84.

(3) Reichert, K., 1969, "The calculation of the temperature distribution in electrical machines with the aid of the finite difference method," *EGZ-A*, 90, pp. 137-142.

(4) William, H.P., Saul, A.T., Brian, P.F., and William, T.V., 1986, "Numerical Recipes: The art of scientific computing," *Cambridge University Press*, New York.

(5) Banerjee, B., Chalapathi, K.V., and Sastri, V.M.K., 1988, "Digital solution of temperature distribution in an electrical machine using network analogy," *Wume und Stoffuertragung*, 23, pp. 137-142.

(6) Imre, L., 1982, "Cooling of electrical motors equipment," M.Szaki Kiad? Budapest, pp. 181-185.

(7) Hutte, 1978, "Elektrische Energietechnik," *Sprunger Verlag Berlin Heidelberg*, New York, pp. 295-295.