

Electromagnetic Characteristic and Heat Transfer Analysis of Large Scale Synchronous Generator Considering Cooling Air

Do-Yun Kwon, Chang-Woo Kim, and Jang-Young Choi*

Department of Electrical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

Min-soo Lim

Unsion Wind Power R&D Center, Daejeon 34113, Korea

(Received 13 August 2019, Received in final form 28 August 2019, Accepted 28 August 2019)

This paper deals with the heat transfer analysis through the electromagnetic-thermal coupling analysis of large scale synchronous generator. The synchronous generator is a wound field synchronous generator, and the operation characteristic curve is derived through electromagnetic analysis. Through this, the synchronous generator is classified into the heating limitation region by the armature winding, the field winding, and the stator end region. Next, for the analysis of the main heat source of generator, the losses incurred at the rated output within the heat limit region were calculated. Core loss was derived by using finite element method and copper loss was calculated by using the copper loss equation. Finally, the characteristics of the generator based on the air-cooled system were analyzed by the convection heat coefficients through the electromagnetic-thermal coupling analysis. Convection heat coefficients were considered both natural convection and forced convection, and confirmed the thermal analysis according to the convection coefficient, generator saturation temperature, and thermal strain analysis.

Keywords : wound field synchronous generator, operation characteristic curve, electromagnetic-thermal coupling, thermal analysis, FEM

냉각층이 고려된 대용량 동기 발전기의 전자기 특성 해석 및 열전달 해석

권도윤 · 김창우 · 최장영*

충남대학교 전기공학과, 대전시 유성구 대학로 99, 34134

임민수

유니슨 풍력연구소, 대전시 유성구 가정북로, 34113

(2019년 8월 13일 받음, 2019년 8월 28일 최종수정본 받음, 2019년 8월 28일 게재확정)

본 논문은 냉각층을 고려하여 대용량 동기 발전기의 전자기 특성 해석 및 전자기-열 연성 해석을 통한 열전달 해석에 대해서 다룬다. 동기 발전기는 권선형 동기 발전기로, 발전기의 운전특성곡선을 전자기 해석을 통하여 도출하였고, 이를 통해 고정자 권선, 회전자 권선, 고정자 단부에 의한 열적제한 구간으로 분류하였다. 다음으로 발전기의 주요 열원 분석을 위해 열적제한 구간 내에서 정격 출력 시 발생하는 손실을 계산해주었다. 유한요소해석법을 이용하여 철손을 도출하고 동손식을 이용하여 동손을 계산하였다. 마지막으로 공랭식으로 가정한 본 발전기의 전자기-열 연성 해석을 통하여 대류 열전달 계수에 따른 특성 해석을 수행하였다. 대류 열전달 계수는 자연대류와 강제대류를 모두 고려해주어 대류계수에 따른 열전달 해석과 이를 통한 발전기 포화 온도 및 열변형량 해석을 확인하였다.

주제어 : 권선형 동기 발전기, 운전특성곡선, 전자기-열 연성 해석, 열해석, 유한요소 해석법

I. 서 론

2015년 파리 기후 변화 협정에 따른 온실가스의 자발적 감축 의무를 이행하기 위해 세계적으로 신·재생 에너지 보급·확대 정책이 시행되고 있다. 세계적으로 신·재생에너지 발전량은 2008년 대비 2배 이상 증가하였고, 계속해서 증가하고 있는 추세이다[1]. 신·재생 에너지 발전량 증가는 동·하계 전력 피크 시 전력생산에 기여를 하여 최대수요(피크)를 낮출 수 있어, 전력 예비율을 증가 시킨다[2]. 실제 국내 전력 위기는 총 전력 소비량에 비해 총 전력생산량이 부족해서가 아닌 동·하계 전력피크 시 전력예비율 감소로 발생한다. 급전성이 보장된 수력, 화력, 원자력 발전은 변동성이 있는 풍력, 태양광, 조력에 비해 피크 기여율이 높아, 대용량 전력 발전 설비의 대안으로 주목 받는다[3]. 그 중 신·재생 에너지인 수력발전은 세계적으로 차지하는 비중이 52.9%로 여느 발전설비보다 큰 비중을 차지하고 있다[1]. 해외 수력발전산업의 성장세와 잠재력은 매우 높은 편으로, 이에 발맞추어 국내 수력발전 용량의 증대를 도모해야 한다. 현재 국내 수력기술은 소하천이나 기존의 시설물을 이용하여 초기 투자비용의 절감과 환경훼손을 최소화 하고, 국내 업체에 수행이 가능할 정도로 적정 수준에 도달하였으나[4], 중·대수력 기술은 해외 선진업체의 기술에 여전히 의존하고 있는 실정이다. 따라서 국내시장 점유율 확대 및 해외시장 진출을 위해 새로운 국내 원천기술 확보와 대체품 개발이 필요하다. 수력 발전에 사용되는 발전기는 크게 유도발전기와 동기발전기로 나뉘는데, 대용량 발전에서는 지속 증가의 한계 및 희토류 가격 상승 문제로 인

해, 영구자석 대신 권선형 동기 발전기의 설계 및 제작이 이루어지고 있다[5]. 또한 권선형 동기 발전기는 계자전류를 통해 주 자속을 조절하여 용량과 부하변동에 따른 정격전압을 유지할 수 있어 운전특성 변화에 대응할 수 있다는 장점으로 인해 대용량 발전기에 적합하다[6]. 하지만 대용량 발전기는 전력 생산 시 매우 큰 전자기 손실이 발생하고 이는 발전기의 온도를 상승시키는 주요한 열원이 된다[7]. 발전기의 전자기 손실은 주로 철심 및 권선에서 발생하여 발열을 일으킨다. 과도한 발열은 발전효율 감소와 권선 절연 파괴를 일으키고, 이는 곧 기기의 수명 단축으로 이어진다[8]. 따라서 발전기의 주 열원에 대한 파악과 이에 대한 열 해석이 선행되어 적절한 대류계수를 갖는 냉각환경 구축이 필요하다[9].

따라서 본 논문에서는 정격역률 0.9에서 유효전력 100 MW 용량을 가지는 권선형 동기 발전기를 진상운전을 고려하여 전자기 특성해석을 통해 운전특성곡선을 산정하였고, 운전특성곡선을 통하여 고정자 권선, 회전자 권선, 고정자 단부에 관한 열적제한 구간으로 분류하였다. 이후 열적제한구간에서 운전 시 발생하는 주 손실인, 권선에서 발생하는 동손을 수식적으로 계산하고, 고정자 철심에서 발생하는 철손을 요크, 치, 슈로 영역을 나누어 해석을 진행하였다. 앞서 구한 손실을 이용하여 3D 모델 발전기의 발열을 계산하여 자연대류계수 및 강제대류계수에 따른 열전달 해석 및 열응력 해석을 수행하였고, 이를 통해 발열 부위에 따른 대용량 권선형 동기 발전기에 적절한 대류계수를 갖는 대류형 냉각장치를 확인하였다. 본 해석 과정의 전자기-열 연성 해석에 대한 플로우 차트를 Fig. 1에 나타내었다.

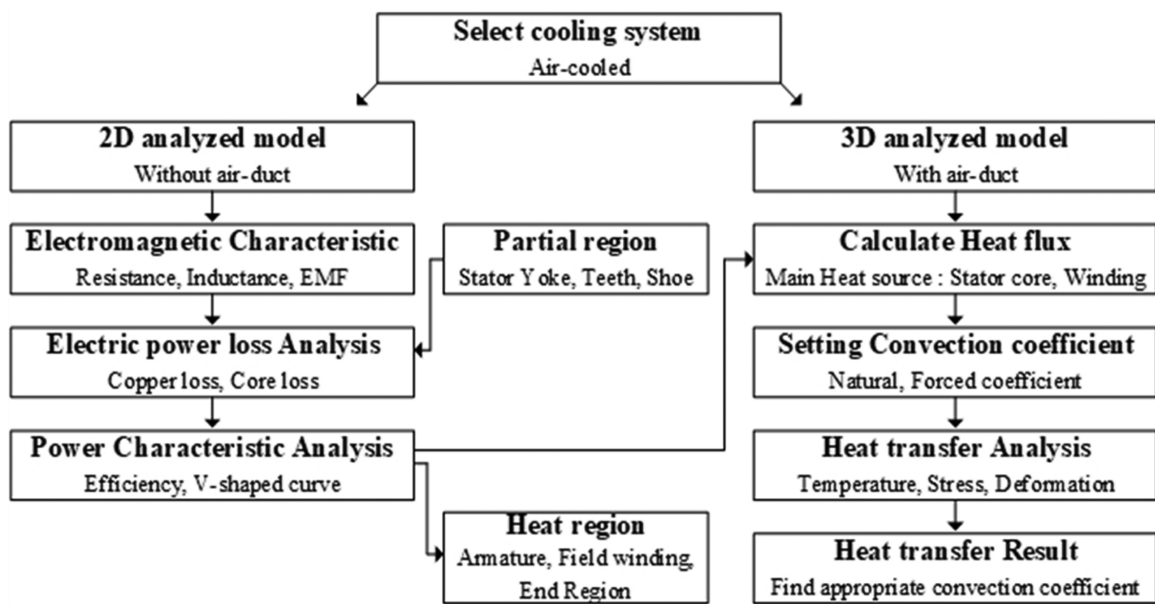


Fig. 1. Flow chart of the electromagnetic-thermal coupling calculation.

II. 동기 발전기의 전자기 해석

1. 동기 발전기 해석 모델 및 구조

Fig. 2는 40극 330슬롯 형상을 가지는 권선형 동기발전기의 구조를 나타낸다. 권선형 동기 발전기는 샤프트, 회전자, 고정자로 이루어져 있으며, 철심 재질의 회전자 슬롯에 감긴 코일에 DC 전류를 인가시켜 전자석을 만들어 주고, 터빈 회전에 의한 회전자 회전으로 고정자 권선에 전압을 유도시킨다. Fig. 3은 고정자 및 회전자에 냉각층(air-duct)를 적층시킨 공랭식 냉각장치로 가정된 발전기의 2D 및 3D 단면도이다. 냉각된 공기는 고정자 및 회전자에 일정한 크기로 적층된 냉각층으로 유입되어 진다. 유입된 공기는 냉각층 내부로 순환되어 철심과 권선의 온도를 저감시켜, 전자기 손실 감소 및 과도한 발열을 방지 시켜 준다. 본 논문에서 사용되는 권선형 동기 발전기는 40극 330슬롯 구조의 정격역률 0.9에서 100 MW의 출력과 180 rpm의 정격속도를 가진다. 2D 해석 시 냉각층을 제외한 회전자 및 고정자의 전자기적 해석이 필요하므로, 냉각층을 제외한 적층길이 2,120 mm로 2D 해석을 진행하였다. 하지만 권선의 경우 축 방향 길이는 2,588 mm로 더 길고, end-turn에 의한 저항 및 인덕턴스가 증가하기 때문

Table I. Specification of analysis model.

Parameter	Value	Unit
Pole/Slot	40/330	
Powerfactor	0.9	
Ratedspeed	180	rpm
Output Power	100	MW
Rated Back EMF	16700	V
Rated Current	4150	A
Air-gap	20	mm
Length (withair-duct)	2588	mm
Air-duct	468(12 × 39ea)	mm

에, 이를 고려한 해석을 진행하였다. 이에 따른 발전기의 정격/전원 사양을 Table I에 나타내었다.

2. 발전기 운전특성

20 MVA급 이상의 내연 발전 유닛은 발전기 모델 정수 결정을 위하여 운전특성곡선 시험을 실시해주어야 한다. 운전특성곡선은 계자 전류를 조절하여 유효출력 및 무효출력을 조정하여 단자 전압의 관계를 구하는 시험이다. 운전특성곡선을 통해 계자전류를 조절하여 부하변동에 대응이 가능하고, 이에 따라 부하용량 및 역률에 따른 출력 정격전압을 유지할 수

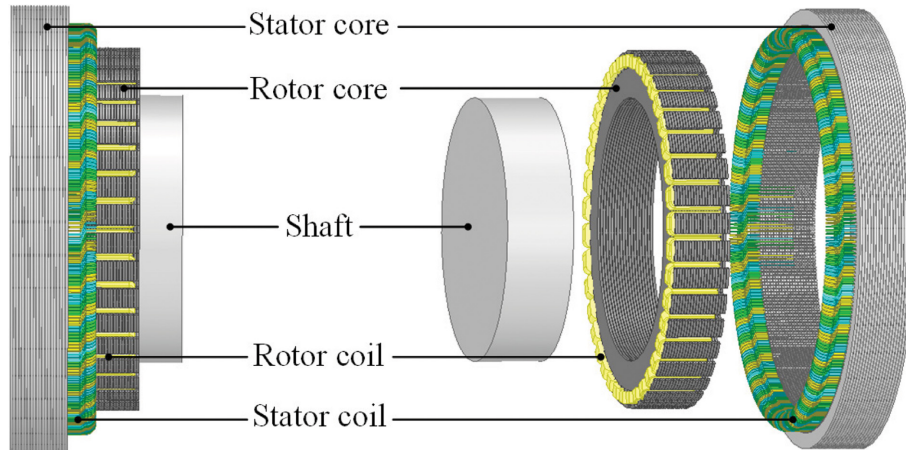


Fig. 2. (Color online) Structure of wound field synchronous generator.

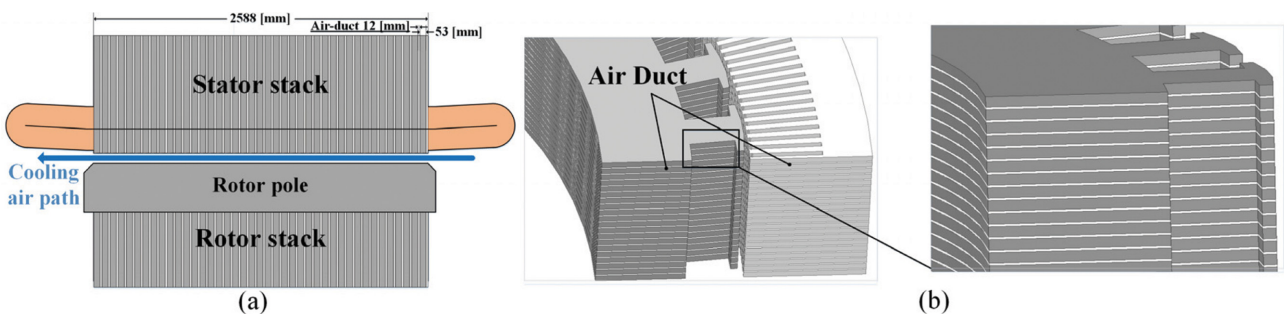


Fig. 3. (Color online) Drawings of generator with air duct stacked on stator and rotor: (a) 2D, (b) 3D.

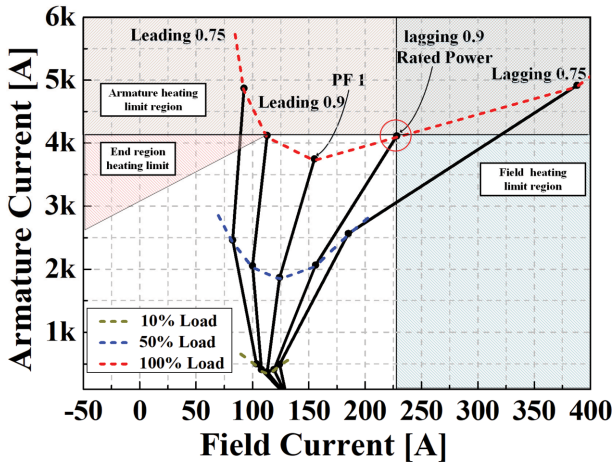


Fig. 4. (Color online) Operation characteristic curve and heat region of analysis model.

있다. 발전기 운전특성곡선은 전동기와 반대로, 지상운전 시 진상운전에 비해 상대적으로 많은 계자전류를 필요로 한다. 지상운전 시 지상부하는 전기자반작용 직축 반작용의 감자현상으로 주 자속의 자속이 떨어뜨리기 때문에 계자전류를 더 필요로 하며, 진상운전 시 전기자반작용 직축 반작용의 증자현상으로 주자속에 자속이 더해져 상대적으로 계자전류를 덜 필요로 한다[10]. 운전특성곡선을 통해 열적제한구간 분류를 수행하였고, Fig. 4에 본 모델의 운전특성곡선 해석 결과를 나타내었다. 열적 제한구간은 전기자 권선에 의한 열적 제한, 회전자 권선에 의한 열적 제한, 전기자 단부철심에 의한 열적 제한으로 나뉜다[11]. 전부하 시 정격 역률에서 출력되는 정격 전류 이상 구간을 고정자 권선의 열적 제한구간이라 부르며, 회전자 권선의 열적 제한구간은 정격출력을 만족하는 계자전류 이상의 구간이다. 또한 실제 발전기에서 운전하지 않는 영역과 고정자 단부 철손 증가로 인한 과도한 발열을 고려하여 진상운전의 제한구간도 선정해주었다. 본 대용량 동기 발전기는 정격 전류인 4,150A_{rms} 이상 구간을 고정자 권선의 열적 제한구간으로 두었으며, 계자전류 228A 이상의 구

간을 회전자 열적 제한구간으로 두었다.

3. 전자기 손실 해석

열 해석을 수행하기 위해서는 열원에 대한 정확한 분석이 선행되어야 한다. 전기 기기에서 전자기 효과에 의한 발열으로는 크게 전류에 의한 동손과 자기장의 변화에 의한 철손으로 분류할 수 있다. 대용량 수차 발전기와 같이 극수가 많고 저속으로 운전되는 권선형 동기 발전기에서의 손실은 철손과 동손이 전체 손실의 대부분을 차지하므로[12], 동손과 철손의 정확한 해석이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 열적 제한구간 내에서 정격 사양 운전을 통해 전자기 손실인 철손과 동손만 고려하였다.

3.1 동손

동손은 권선에 의해 발생하는 전자기 손실로서 권선의 저항과 권선을 흐르는 상전류의 제곱에 비례한다. 일반적인 3상 동기발전기의 동손은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_{copper} = 3I_a^2 R_a \quad (2)$$

여기서 I_a 는 상전류, R_a 는 상저항을 나타내며, 수식 앞의 3은 3상에 의해 나타나는 숫자이다. 권선형 동기 발전기는 고정자 권선뿐만 아니라 회전자 권선에서의 동손도 함께 고려 해주어야 하는데, 본 모델의 고정자 권선 및 회전자 권선의 동손을 계산하기 위해 축방향 길이와 슬롯피치, 단절각의 거리 계산을 통해 한 상 권선의 전체 길이를 구하고 단면적, 전류와 저항률의 관계식을 이용하였다. 코일의 전개도와 계산식을 식(3)과 Fig. 5에 나타내었다.

$$R_{ph} = N_{ph} \rho_c \frac{l_{sw}}{A_c N_{sn}} \quad (3)$$

여기서 N_{ph} 는 상당턴수, ρ_c 는 저항률, l_{sw} 는 코일 한 턴의 길이, A_c 는 코일 단면적, N_{sn} 은 소선기다수를 의미한다. Table II에 고정자와 회전자 권선에 발생하는 손실과 단위 질량당

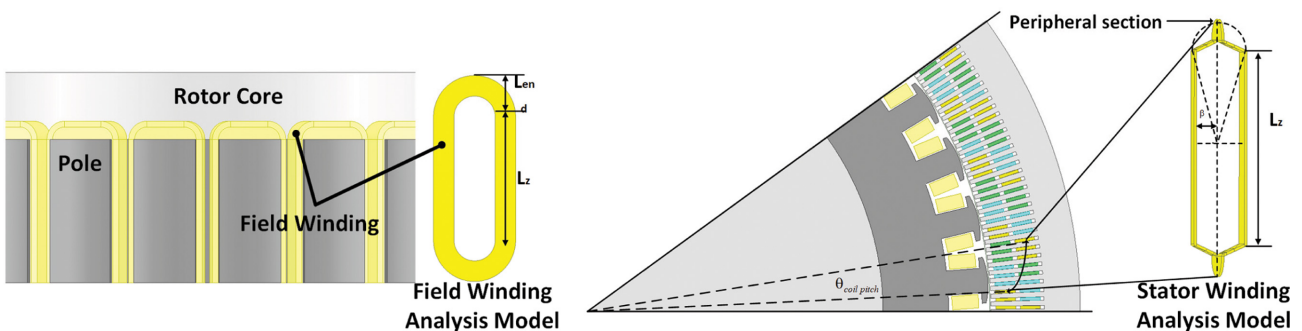


Fig. 5. (Color online) Winding structure of wound field and armature.

Table II. Analysis results of stator and rotor copper loss.

	Loss [megW]	Volume [m ³]	Density[kg/m ³]	Mass [kg]	W/kg
Coil(Stator)	0.0830	3.3147	8933	29610	02.8031
Coil(Rotor)	0.5861	3.0581	8933	27318	21.4500

손실을 나타내었다.

3.2 철손

철손을 예측하기 위해 제조사에서 제공하는 철심 데이터로부터 각 주파수별 철손을 도시화하고, 이를 Steinmetz 방정식을 이용하여 curve fitting 함으로써 주파수에 따른 각 계수들을 예측하였다. 철손의 해석적 예측에 있어 각 계수들의 예측이 중요한데, 이는 철심의 재질, 주파수에 따라 그 크기가 비선형적으로 변하게 된다. 철손은 와류손과 히스테리시스손, 이상와전류 손실의 합으로 이뤄져 있는데 일반적으로 아래 식 (4)와 같이 표현된다.

$$P_c = P_e + P_h + P_a = k_e f^2 B^2 + k_h f B^n + k_a f^{1.5} B^{1.5} \quad (4)$$

k_e, k_h, k_a 는 각각 와전류, 히스테리시스 손실, 이상와전류 손실의 계수이며 f 는 발전기의 회전속도에 따른 자계의 주파수, B 는 영구자석에 의한 철심의 자속밀도, n 은 Steinmetz 상수이다. 회전자 철심에서 발생하는 철손은 고정자 철심에서 발생하는 철손에 비하여 손실에 미치는 영향이 미비하므로 고려하지 않았으며[13], 고정자 철심에서 발생하는 철손을 3가지 영역으로 세분화하여 열원 분석을 진행하였다. Fig. 6에 세분화된 고정자 영역과 각 영역의 정상상태에 도달한 철손 파형

을 나타내었고, Table III에 100 MW 정격출력 조건에서 정상상태에 도달 했을 때 발생하는 철손과 단위 질량당 손실을 나타내었다.

III. 동기 발전기의 열 전달 해석 및 변형량 해석

철손, 동손 및 코일에 의한 와전류손의 전자기 손실은 열 에너지로 변환되고, 발생된 열은 전도, 대류, 그리고 복사를 통해 대기로 전달되는데 물체 내에 온도 변화에 따라 조직 변형이 일어나 구조 조직의 팽창 및 수축이 일어난다. 과도한 발열은 권선의 절연파괴 및 발전효율감소를 발생시키고, 구조 조직의 변형으로 인해 전자기적으로 불평형 상태가 되어 진동 및 소음이 심해진다[14]. 이러한 이유로 발전기에는 온도상승에 따라 적절한 냉각시스템을 이용하여 효율적인 냉각을 통해 과도한 발열을 방지해야 한다. 본 논문에서는 냉각층을 적층시킨 공랭식 냉각장치로 가정하였으며, 공랭식 설계 시 중요한 설계 지표인 대류 열전달 계수를 자연대류계수 (6~30 W/m²)와 강제대류계수(30~300 W/m²)로 분류하여 대류 계수에 따른 열전달 해석을 진행하였다. 해석 진행 과정은 Ansys-Workbench를 이용하여 전자기-열 연성 해석을 수행하였다.

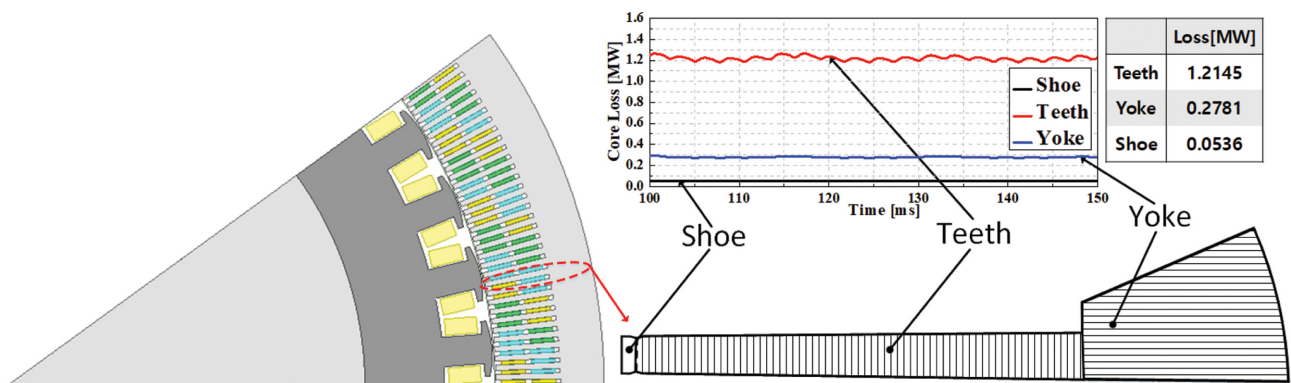


Fig. 6. (Color online) Analysis positions of stator for core loss.

Table III. Analysis results of core loss.

	Loss [megW]	Volume [m ³]	Density [kg/m ³]	Mass [kg]	W/kg
Shoe	0.0536	0.5214	7700	4014.8	13.35
Teeth	1.2145	17.5274	7700	134961	9
Yoke	0.2781	23.7117	7700	182580	1.5231

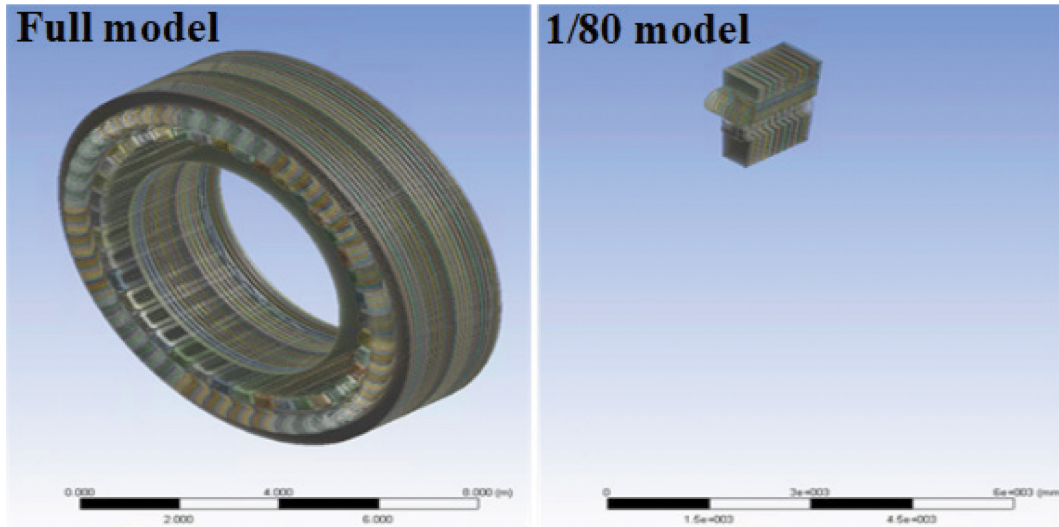


Fig. 7. (Color online) Drawings of full and partial generator.

Table VI. Material property of analysis model.

Parameter	Thermalconductivity (W/m ² °C)	Density (kg/m ³)	Young's Moduli (GPa)	Poisson's ratio	Thermalexpansioncoefficient
Copper	360	8,933	115	0.345	1.65e-6
Electrical steel	23	7,770	200	0.3	1.4e-6

Table V. Heat flux of heat source.

Parameter	Density (kg/m ³)	Mass (kg)	Heat flux (W/kg)	Total heat flux (W, fullmodel)	Total heat flux (W, 1/80model)
Shoe	7,700	4,015	13.350	53,598	670
Teeth	7,700	164,961	9	1,484,649	18,558
Yoke	7,700	182,580	1.523	278,088	3,476
Coil stator	8,933	27,318	2.803	76,575	957
Coil Rotor	8,933	29,610	21.450	635,135	7,939

1. 열해석 경계조건

본 발전기는 고정자와 회전자 철심에 축방향으로 각 40장씩 적층되며, 여기에 반경방향으로 동일한 코일이 40unit씩 감기게 된다. 따라서 발전기의 형상이 축대칭, 전후대칭이므로 해석의 효율을 위해 반경방향을 1/40(9°) 간격으로 분할, 축방향으로 1/2(전후) 분할하여 해석을 진행 하였다. 발전기의 전체 모델과 부분 모델을 Fig. 7에 나타내었다. 발전기를 구성하는 철심과 권선의 재질은 각각 Table IV에 물성치를 나타내었다. 열해석을 위한 경계조건으로 축계와 접하는 부분에는 상온(22 °C)을 부여했다. 슈, 치, 요크, 고정자 및 회전자 권선 각부에는 전자기 해석결과에서 계산된 각 부분의 발열량을 1/80 부분모델에 맞춰 부여했다. 이때 1/80 부분모델임을 고려하여 분할되는 면을 제외한 나머지 표면에 발열량을 균등하게 분배했다. 발전기 각부 발열량은 Table V와 같다.

2. 열해석 결과

대류형 냉각장치 열분포는 아래와 같은 뉴턴의 냉각방정식에 의해 구할 수 있다.

$$Q = hA(T - T_{\infty}) \tag{5}$$

여기서 Q 는 열유량, h 는 공기의 대류 열전달 계수, A 는 열전달 면적, T 는 물체의 온도, T_{∞} 는 주위 공기의 온도이다. 대류 계수별 각부 열해석 그래프를 Fig. 8에 나타내었다. 대류 열전달 계수가 증가함은 냉각 효율 증가를 의미하며, 각 부에서 발생하는 온도가 감소함을 확인 할 수 있다. 또한 모든 대류계수에서 동일하게 슈, 치 중앙부 끝단과 회전자 권선 중앙부에서 높은 열이 발생했으며, 치와 회전자 권선 나머지 부분은 그 다음으로 높은 수준을 나타냈다. 고정자 권선과 요크에서는 상대적으로 낮은 수준의 열이 발생했으며 고정자에서는 상온에 가까운 수준의 열분포를 보였다. 대류계수별 발

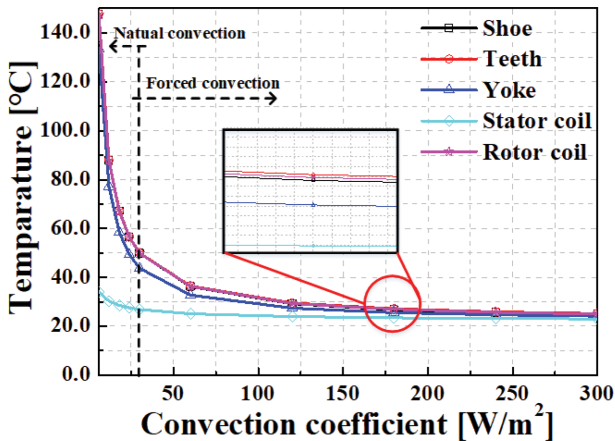


Fig. 8. (Color online) Temperature graph according to convection coefficient.

열 수준은 최저 수준의 자연대류인 경우 최대 147.59 °C를 보였으며, 최고 수준의 강제대류인 경우 최저 22.996 °C로 상온과 비슷한 결과를 보이며, 발전기 열분포는 Fig. 9를 통해 확인할 수 있다.

3. 열응력 해석 경계조건

열해석에서 얻어진 발열분포를 사용해 열응력해석을 수행하였다. 열응력은 온도가 변화한 경우 재료의 늘어남 또는 수축을 저지하기 때문에 생기는 응력이다. 열응력해석에는 열해석에서 요구되지 않는 구속조건이 추가로 필요하므로 회전자와 고정자부, 분할 모델의 단면 각각에 구속을 부여했다. 회전자와 회전축 연결부는 fixed support로 설정했으며 고정자와 발전기 케이스 연결부는 축방향과 접선방향을 구속하고 열팽창을 고려해 반경방향은 구속하지 않았다. 반경방향, 축방

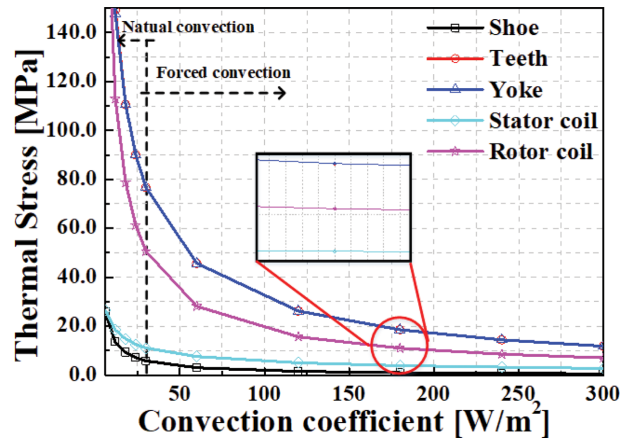


Fig. 10. (Color online) Thermal Stress graph according to convection coefficient.

향 분할부는 대칭성을 고려해 frictionless 구속을 부여했다.

4. 열응력 해석 결과

대류계수별 열응력해석그래프를 Fig. 10에 나타내었다. 열응력은 식(6)을 통해 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = E\alpha\Delta T \quad (6)$$

여기서 E 는 탄성계수, α 는 열팽창계수, ΔT 는 최종온도와 초기온도의 온도차이로서 온도변화량을 나타낸다. 모든 대류계수에서 동일하게 케이스와 접하는 요크 바깥쪽 부위에서 가장 높은 값이 발생했으며 요크와 연결되는 치 부분에서도 유사한 수준의 응력이 나타났다. 회전자 권선에서는 그 다음으로 높은 수준의 응력이 나타났으며 슈와 고정자 권선에서 가장 낮은 수준의 응력이 나타났다. 대류계수별 응력은 최저 수

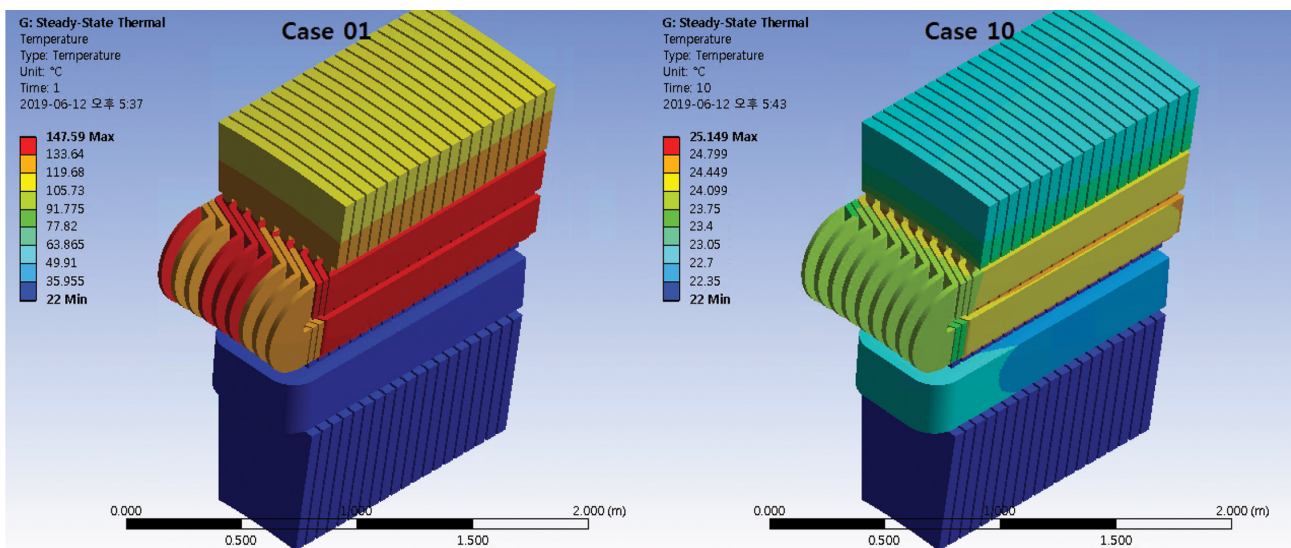


Fig. 9. (Color online) Generator heat distribution (case 01: 6 W/m², case 10: 300 W/m²).

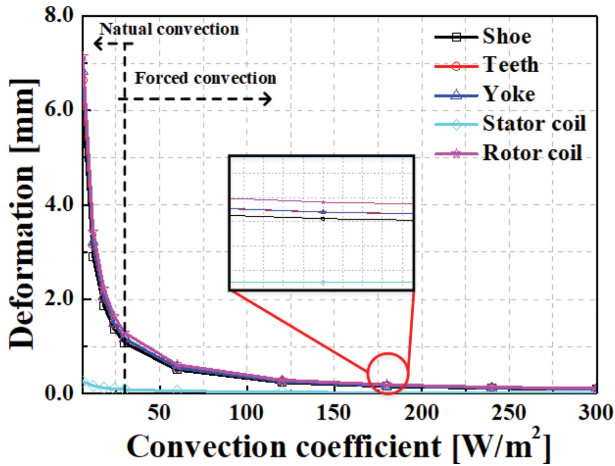


Fig. 11. (Color online) Deformation graph according to convection coefficient.

준의 자연 대류인 경우 최대 325.13 MPa을 보였으며, 최고 수준의 강제 대류조건에서는 11.775 MPa의 응력 수준을 보였다. 열변형량은 식(7)을 통해 나타낼 수 있고, 대류계수별 열변형량그래프를 Fig. 11에 나타내었다.

$$\delta = l \times \alpha \Delta T \quad (7)$$

여기서 l 은 변형 전의 길이이다. 모든 대류계수에서 동일하게 회전자 권선에서 가장 큰 변형이 발생했으며, 요크와 치, 슈 상부도 유사한 수준을 보였다. 고정자 권선에서는 변형이 거의 나타나지 않았다. 대류계수별 변형량은 최저 수준의 자연대류인 경우 최대 7.1394 mm를 보였으며, 최고 수준의 강제 대류조건에서는 최대 0.11129 mm의 변형량을 보이며, 발전기 변형량은 Fig. 12에 나타내었다.

V. 결 론

본 논문에서는 냉각층이 고려된 100 MW급 대용량 권선형 동기 발전기를 유한요소해석법을 사용하여 전자기-열 연성 특성해석을 수행하였다. 먼저 발전기의 전자기 특성 해석을 통해 본 발전기의 운전특성곡선을 도출하였다. 진상운전을 포함한 부하 해석을 진행하였고, 운전특성곡선을 통해 고정자 권선, 회전자 권선, 고정자 단부에 의한 열적제한 구간을 분류하였다. 열적제한 조건 내에서 전자기 손실 부위를 요크, 슈, 치와 고정자 및 회전자 권선으로 세분화하여, 전자기 손실을 해석하였다. 각 부위의 손실을 발열량으로 환산하여 부분모델에 맞춰 부여해주어 열 전달 해석을 수행하였다. 냉각시스템은 공랭식으로 가정하여, 대류계수별 열 전달 해석을 진행하였다. 대류계수별 열 전달해석 수행 결과 발열분포는 회전자 권선과 슈, 치에서 가장 높게 나타나며 최저 수준의 자연대류에서는 147°C에 이를 것으로 계산되었다. 실제 발전기 운용 시에는 팬에 의한 공기 순환 냉각 방식이 이루어질 것으로 예상되며, 이 경우 최저 수준의 강제대류를 가정하더라도 발열 수준은 36°C 수준에 불과할 것으로 보인다. 열에 의한 변형 또한 공기 순환 냉각 방식을 고려하였을 경우, 최대 1.3 mm 가량 변형이 발생할 것으로 예상된다. 열응력 해석결과 요크와 치 이음부에서 가장 높은 응력이 발생하지만, 실제 운용 시 공기 순환 냉각 방식으로 인한 응력 저감과 브레이크 등을 통해 케이스와 연결되는 구조가 될 것으로 예상되어, 최대 열응력이 77 MPa를 넘지 않을 것으로 보인다. 본 논문에서 연구한 결과를 바탕으로 대용량 권선형 동기 발전기에 적절한 대류형 냉각장치 선정과 발전기 설계 시 활용될 것으로 사료된다.

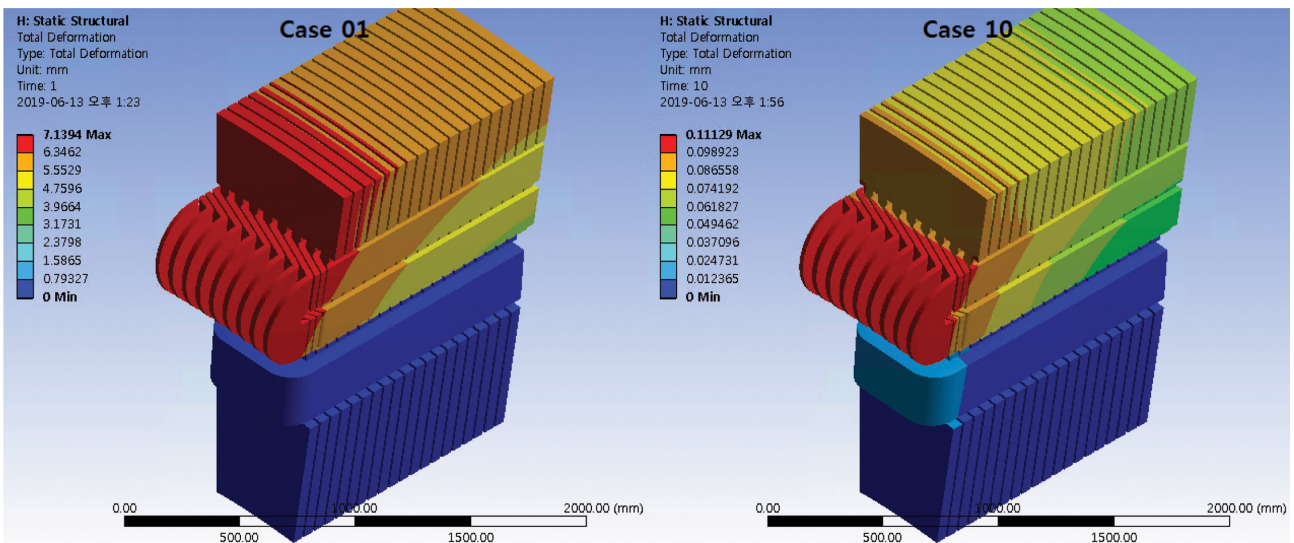


Fig. 12. (Color online) Generator deformation distribution. (case 01: 6 W/m², case 10: 300 W/m²).

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20183010025420).

References

- [1] IRENA, Renewable Capacity Statistics 2018.3 (2018).
- [2] J. H. Han, Doctoral Dissertation, Seoul National University (2010).
- [3] J. H. Lee, K. M. Park, and J. G. Park, KIEE Trans. **67**, 1415 (2018).
- [4] S. Kato, N. Hoshi, and K. Oguchi, IEEE Ind. Appl. **9**, 32 (2003).
- [5] H. Liu, L. Xu, M. Shangguan, and W. N. Fu, IEEE Trans. Magn. **48**, 4650 (2012).
- [6] O. A. C. Hoes, L. J. J. Meijer, R. J. van der ent, and N. C. van de Giesen, PLOS ONE, Fed. (2017).
- [7] X. Fan, D. Li, R. Qu, C. Wang, and H. Fang, IEE Trans. Ind. Electorn., Early Access (2019).
- [8] N. E. Nilsson and J. Mercurio, IEEE Trans. on Power Delivery **1**, 9 (1994).
- [9] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller, and C. Mejuto, IEEE Trans. Ind. Electron **56**, 434 (2009).
- [10] P. Kundur, Electric Machinery Fundamental, McGraw-Hill (1994).
- [11] D. S. Lee, Doctoral Dissertation, Sungkyunkwan University (2016).
- [12] S. M. Jang, K. J. Ko, and J. Y. Choi, KIEE **60**, 52 (2011).
- [13] J. Li, J. Fu, and P. Zhang, International Conf. Electrical Machines and Systems (2010).
- [14] N. Bianchi and S. Bolognani, IEEE Trans. Ind. **38**, 1259 (2002).