

<논 문>

전자기력에 의한 발전기 고정자 코어의 진동 해석

Vibration Analysis of a Generator-Stator Core Under Electromagnetic Excitation

김 철 홍* · 주 영 호** · 박 종 포*

Cheol Hong Kim, Young Ho Ju and Jong-Po Park

(1999년 2월 6일 접수 ; 1999년 5월 7일 심사완료)

Key Words : Generator-Stator Core(발전기 고정자 코어), 2-D Electromagnetic Field Analysis(2차원 전자기장 해석), Electromagnetic Force(전자기력), Modal Analysis(모드해석), Forced Response(강제진동응답)

ABSTRACT

This paper presents results of vibration analysis of a generator-stator core for 500 MW fossil power plant. A finite element analysis using a commercial S/W is performed to estimate alternating electromagnetic forces, mainly of 120 Hz in 60 Hz machines, acting on the core, and then to calculate forced response of the core. Results are compared with design requirements.

1. 서 론

발전용 대형 발전기는 터빈 구동에 의해 회전자기계(rotating magnetic field)에서 생성되는 회전 자속(rotating flux)을 쇄교시킴으로써 교류 전력을 발생시키는 전기 기계이다. Fig. 1에서와 같이 발전기는 본체, 여자 장치 및 보조기기로 구성되며, 발전기 본체는 고정부와 회전부 그리고 보조기기는 냉각 가스 공급 및 조정 장치, 밀봉유 공급 장치와 수냉각 공급 장치로 구성되어 있으며, 여자 장치는 크게 정지형과 회전형으로 나누어진다.

대용량 발전기를 설계하는데 기본적인 설계 변수로는 속도, 주파수와 극 수, 기계 정격, 전기자 전압, 역률(power factor), 단락비(short circuit ratio), 코어 진동 특성, 수소 압력과 전기자 바에 걸리는 힘(bar force) 등이다. 이 변수들을 결정하기 위해 고려되는 사항은 전기, 구조, 냉각 및 소재 부분으로

나누어 볼 수 있다⁽¹⁾.

전기 부분에서는 자속분포와 누설자속에 따른 열 방지 설계, 전류밀도 제한에 의한 최적 설계, 전압 변동율, 주파수 등의 제어 설계, 단락 등의 사고시 발전기 보호를 위한 회로 분석 등이 있다. 구조 부분으로는 진동 해석, 기계적, 전기적 부하에 따른 응력 해석, 구조적 안정성을 위한 최적 설계 등이 있다. 발전기 내부에서 발생하는 열을 제거하기 위한 냉각 기술 부분으로 냉각수 개통의 유체역학적인 해석, 내부 발생열의 냉각에 필요한 열전달 기술, 최적 냉각 계통 설계, 발생 원인별 온도 분포 해석 설계 등이 있다. 마지막으로 소재 및 부품 개발 부분으로 절연 재료 개발, 회전체의 Ni-Cr-Mo-V 합금강 설계, 계측 제어 부품 기능 설계 등이 있다.

발전기 특성상 고유한 특성인 전자기적인 현상으로 인해 설계시 반드시 고려해야 하는 것들은 앞에서 언급한 절연, 냉각 시스템 및 구조적인 건전성 등이 있다. 발전기를 구성하는 여러 기계 부품들은 부하 변동 시의 열 팽창과 수축에 기인한 열팽창력(thermal expansion force), 갑작스러운 단락이나 위상 비동기(synchronizing out of phase)에 의한 불규

* 정희원, 한국중공업(주) 기술연구원

** 한국중공업(주) 기술연구원

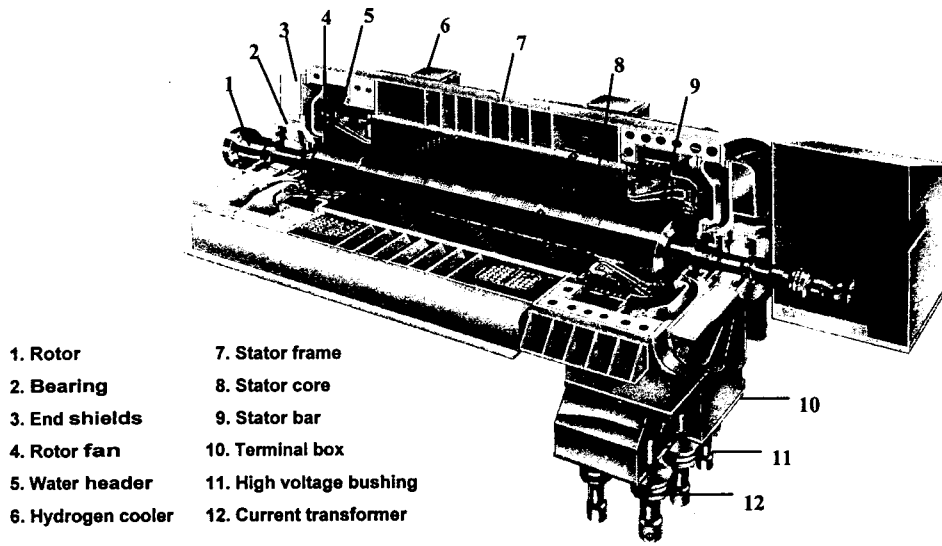


Fig. 1 Generator structure of a 500 MW fossil power plant

최적이고 순간적인 외란이나 단락과 같은 고장에 의한 힘(fault force)과 고정자 권선의 전류와 권선 내의 자기력의 상호작용 때문에 생기는 운전 중에 발생하는 힘(running force) 등에 대한 정확한 규명은 발전기의 내구성과 운전 중의 파손 방지, 유지 보수의 최소화를 위하여 반드시 필요하다. 특히, 전자기력에 의한 발전기의 동특성 규명은 신뢰성 있는 발전기 설계를 위해 반드시 고려해야 하는 중요한 문제이다.

전술한 바와 같이 발전기의 로터와 고정자 사이에서 발생하는 전자장에 기인한 전자기력으로 말미암아 발전기 전체 구조물은 물론 구성품들에서 정적인 변형이 발생하며, 실제 운전 중일 경우에는 로터의 회전으로 인하여 전자장 역시 회전하므로 발전기는 동적인 힘을 주기적으로 받게 된다. 이 전자기력은 2극 발전기 경우에 로터의 정격회전수 3600 rpm의 2배에 해당하는 120 Hz의 가진주파수를 가지게 되고, 발전기 구조물들의 고유진동수는 이 가진주파수에서 일정한 주파수 분리 여유를 갖도록 설계된다.

본 연구에서는 500 MW 화력 발전용 발전기 고정자 코어의 동특성을 규명하기 위하여 상용 S/W를 이용한 코어의 모델링 및 유한요소 해석을 통해 진동 모드 규명, 무부하시 작용하는 전자기력의 규명을 통해서 코어의 정상상태 강제 진동 응답을 구해 설계에 반영하고자 한다.

2. 전자장 해석

2.1 전자장 해석 이론

전자장 문제에서 지배방정식을 도출하기 위해 필요한 맥스웰(Maxwell)방정식 및 보조방정식은 다음과 같이 주어진다⁽²⁾.

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

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\vec{M} = \chi \cdot \vec{H} + \vec{M}_r \quad (4)$$

여기서 \vec{J} 는 전류밀도(current density, [A/m²]), \vec{B} 는 자속밀도(flux density, [Wb/m²]), \vec{M} 은 자화량(magnetization, [A/m])을 나타내고, \vec{H} , μ_0 , χ , \vec{M}_r 은 자기장의 세기(magnetic field intensity, [A/m]), 진공 중의 투자율(permeability of free space, [H/m]), 자화율(susceptibility), 잔류 자화량(remanent magnetization, [A/m])을 각각 나타낸다. 그리고 ∇ 은 구배(gradient)를 뜻한다.

식 (4)를 식 (2)에 대입하면 다음의 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \cdot \vec{H} + \mu_0 \cdot \vec{M}_r \quad (5)$$

(1 + χ)를 자기 비투자율 μ_r 이라 하면, 투자율 μ 는 μ_0 , μ_r 이 된다. 따라서, 식 (5)를 정리하여 \vec{H} 로 나타내면 다음과 같다.

$$\vec{H} = \nu \cdot \vec{B} - \nu_r \cdot \vec{Mr} \quad (6)$$

여기서 $\nu = 1/\mu$, $\nu_r = 1/\mu_r$ 이다.

식 (6)을 식 (1)에 대입하면

$$\nabla \times (\nu \cdot \vec{B} - \nu_r \cdot \vec{Mr}) = J \quad (7)$$

보조변수로 자기벡터포텐셜 \vec{A} 를 아래와 같이 정의한다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (8)$$

그러면, 식 (3)은 다음과 같이 만족된다.

$$\nabla \cdot \vec{B} = \nabla \cdot (\nabla \times \vec{A}) = 0 \quad (9)$$

식 (8)를 식 (7)에 대입하여 정리하면, 지배방정식 (10)을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times (\nu \cdot (\nabla \times \vec{A}) - \nu_r \cdot \vec{Mr}) - \vec{J} = 0 \quad (10)$$

정자기장 해석에 사용되는 일반적인 경계조건으로는 다음의 두 가지가 있는데, 본 연구에서는 발전기 고정자 코어 및 로터의 정자기장 해석에 식 (11)로 주어진 자속평행 조건이 경계 조건으로 사용된다.

$$A = 0 \quad \text{on} \quad \Gamma_0 \quad (\text{자속 평행 조건}) \quad (11)$$

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0 \quad \text{on} \quad \Gamma_1 \quad (\text{자속 수직 조건}) \quad (12)$$

2.2 유한요소법을 이용한 정자기장 해석

(1) 모델링

Fig. 2는 500 MW 용량의 2극 발전기 고정자 코어와 로터의 단면을 보여주고 있고, 해석에 사용된 발전기 사양은 Table 1과 같다.

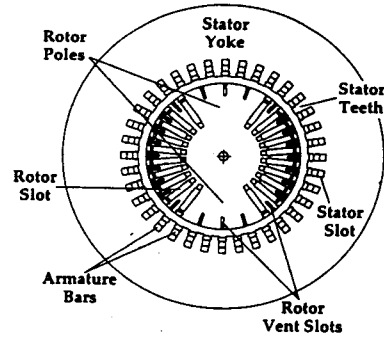


Fig. 2 Typical transverse cross-section of round rotor machine

본 연구에서는 발전기가 무부하 운전시에 회전자인 로터에 축방향으로만 전류가 흐르므로 2차원 문제로 가정하여 해석하였다. 즉, 맥스웰 이론에 따라 전류에 의해 발생하는 자속밀도는 전류의 흐름방향과 수직인 평면 상에서 형성되기 때문이다.

발전기 고정자와 로터의 유한요소 모델에 사용된 요소는 ANSYS에서 제공하는 2차원 사각형 전자장 해석, 구조해석 및 열전달 해석용 PLANE13을 사용하였으며, 요소당 4개의 절점을 가지고 있다. 각 절점 당 5개의 자유도 즉, x, y 방향의 변위(UX, UY), 온도(TEMP), 전압, z방향의 자기벡터 포텐셜 (magnetic vector potential, AZ)로 구성되어 있다. 사용한 요소 수와 절점 수는 각각 8,884 및 9,100개이다. 고정자 코어와 로터 사이에 있는 공극(air gap)에서 자기장이 매우 크게 변하므로 상대적으로 많은 요소를 사용하였다. 이렇게 생성된 유한요소 모델을 Fig. 3에 나타내었다.

일반적으로 자성체에 있어서 자속밀도 B 와 자속세기 H 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$B = \mu H \quad (13)$$

Table 1 Specification of the 500 MW generator

| Parameter | Standard | Parameter | Standard |
|------------------------|----------|--------------------------------|----------|
| Frequency | 60 Hz | Rated speed | 3600 rpm |
| Rated power | 500 MW | Rated voltage | 22 kV |
| Number of poles | 2 | Number of field coils per pole | 8 |
| Number of stator slots | 42 | Number of rotor slots | 32 |
| Stator outer diameter | 2.438 m | Rotor outer diameter | 1.048 m |
| Stator inner diameter | 1.251 m | Field current(No load) | 1784 Amp |

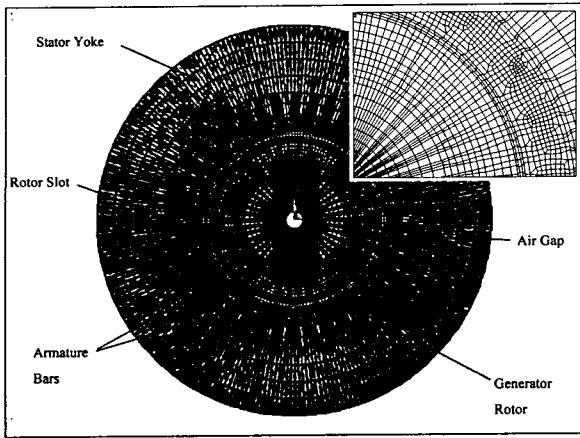
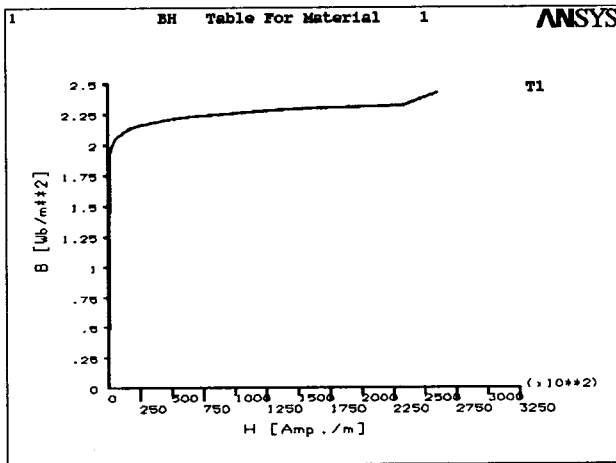
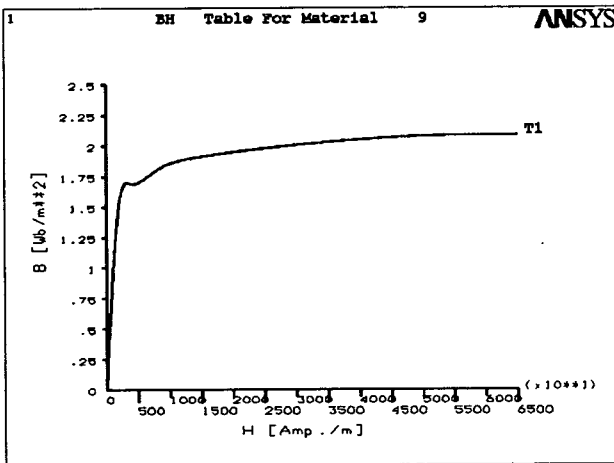


Fig. 3 Mesh generation of stator core and rotor



(a) Stator core



(b) Rotor body

Fig. 4 B-H curves of stator core and rotor body

여기서, μ 는 투자율[H/m]이며, 재료에 따라 고유한 값을 가진다. 투자율은 간단한 함수로 표현할 수 없으므로 표 또는 재료의 자화 곡선(magnetization curve) 형태로 주어진다. 이 곡선은 강자성체의 자기 특성을 이해하는데 중요한 곡선으로서 자속밀도와 자속세기가 어느 구간까지 비례적으로 증가하다가 자속밀도가 증가해도 더 이상 자속세기가 증가하지 않는 자기 포화(magnetic saturation) 현상을 보여준다.

본 연구에서 사용한 고정자 코어와 로터 본체의 자화 곡선을 Fig. 4에 나타내었다. 전자장 해석에 사용된 재료 특성은 공기, 로터 보어(bore)과 같은 자성체가 아닌 부분과 전기자 슬롯(armature slot), 로터 계자 코일(field coil)과 같은 절연되어 있는 부분은 비자성체이므로 공기로 가정하였다.

일반적으로 전류에 의해 발생된 자기장은 투자율이 큰 쪽으로 형성된다. 따라서 로터 계자코일의 전류에 의해 발생하는 자속선(magnetic flux line)은 고정자 단면에 평행하게 형성된다. 그러므로 경계조건은 식 (12)와 같이 자속선이 고정자 단면과 평행하도록 코어의 바깥면에 자기벡터 포텐셜(AZ)을 0으로 하는 자속 평행 조건을 주었다.

무부하시 로터 계자코일에 인가된 전류로부터 계자코일의 면적으로 나눈 전류밀도를 자기여진(magnetic excitation)으로 사용하였다.

$$\text{전류밀도} = \text{Turn 수} \cdot \text{계자 전류} / \text{계자코일 면적} \quad (14)$$

(2) 해석 결과

본 연구에서는 발전기가 무부하 상태일 경우, 즉 계자전류를 회전 중인 로터에 인가시키고 전기자 슬

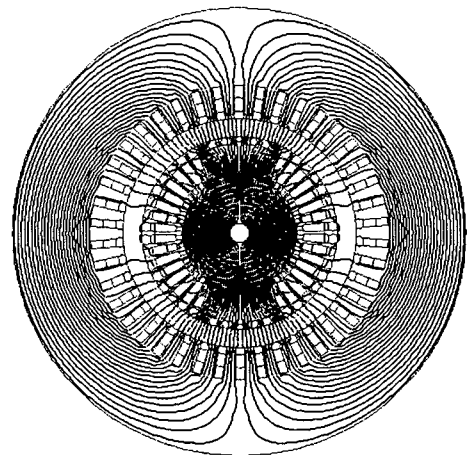


Fig. 5 Distribution of flux per pole

롯을 개방한 경우에 대한 2차원 단면의 정자장 해석을 수행하였다.

Fig. 5는 무부하 상태의 고정자 코어와 로터에서 나타나는 자력선 분포를 보여주는 데, 계자 코일 및 계자슬롯에서는 자력선이 통과하지 못하고, 로터 극(pole)쪽으로 자력선이 모여 계자 코일의 전류에 의해 유기된 전자기력은 거의 대부분이 극에 집중됨을 볼 수 있다.

자속밀도 즉, 단위 면적당 통과하는 자속수의 해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 로터 극의 자속밀도는 약 2.1 T 이고, 고정자 코어의 톱니(tooth)에서는 1.82 T로서 요크(yoke)과 공극에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 계자 코일과 고정자 슬롯은 자력선이 통과하지 못하기 때문에 자속밀도가 낮게 나타남을 알 수 있다. 자속세기는 자속밀도와 반비례 관계에 있기 때문에 대부분의 세기가 공극에 집중됨을 알 수 있으며, 이것은 고정자 코어와 로터의 투자율이 공기에 비해 상대적으로 매우 크기 때문이다.

Table 2는 발전기 설계시 사용되고 있는 종래의 계산치와 해석 결과를 나타내고 있다. 여기서, 해석

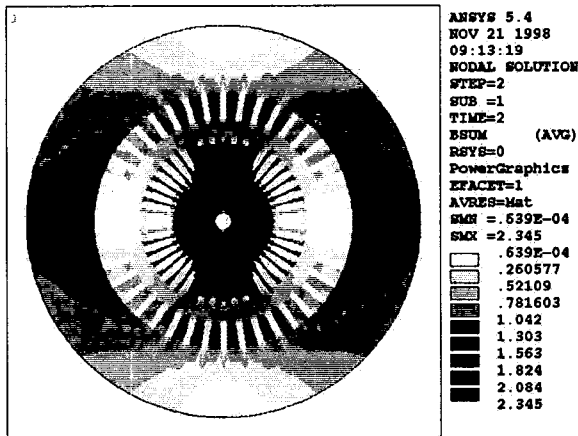


Fig. 6 Magnetic flux density

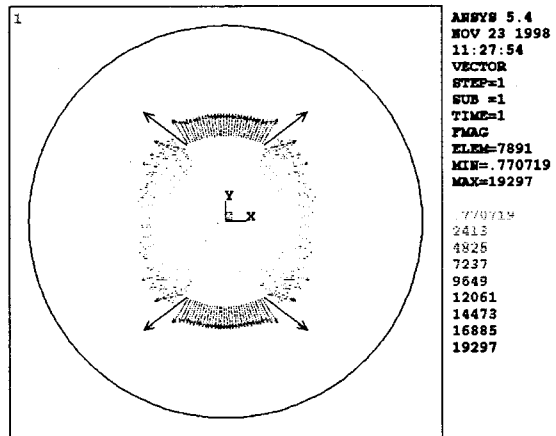
Table 2 Magnetic flux densities

| Location | FEM (Max, T) | Design value (T) |
|--------------------|--------------|------------------|
| Yoke iron | 1.563 | 1.631 |
| Tooth tip | 1.824 | 1.964 |
| Pole lower (Rotor) | 2.084 | 1.909 |
| Shaft | 2.345 | 1.643 |

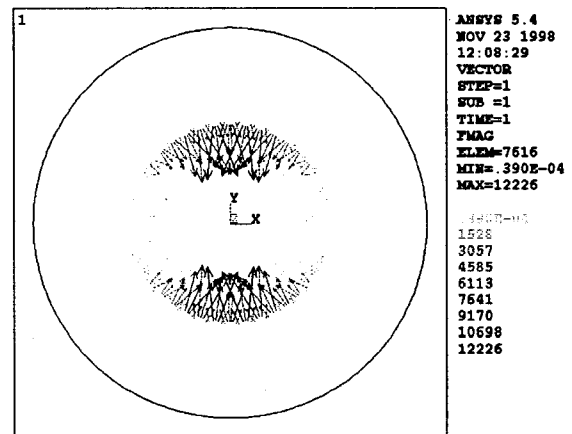
값은 각 위치에서 최대 자속밀도를 나타내고, 설계치는 평균자속밀도를 나타낸 것이다. 요크, 치절(tooth tip) 및 극에서는 비교적 잘 일치하지만 샤프트(shaft)에서는 상대적으로 큰 차이를 보이는데 이는 설계치를 특정 면에 대한 평균값으로 나타냈기 때문이다.

Table 3 Electromagnetic forces per pole by maxwell stress tensor and virtual work method

| | Maxwell stress tensor | | Virtual work | |
|-------------|-----------------------|-----------|--------------|-----------|
| | Fx (kN/m) | Fy (kN/m) | Fx (kN/m) | Fy (kN/m) |
| Rotor body | 168.66 | 262.80 | 164.43 | 228.70 |
| Stator core | 113.54 | 239.52 | 112.17 | 228.14 |



(a) Rotor Body



(b) Stator Body

Fig. 7 Electromagnetic forces of rotor body and core

회전하는 전기기계의 전자기력에 의한 구조해석 및 진동/소음 해석 등은 전자기력과 구조물의 거동과 연관된 문제로서 정확한 전자기력의 계산은 매우 중요하다. 일반적으로 전자기력의 계산 방법은 구하고자 하는 부분의 표면에 대한 적분을 수행하는 맥스웰 응력법(Maxwell stress tensor method)과 두 물체 사이에 변위가 일어날 때 발생하는 에너지의 변화량을 이용하는 가상변위법(virtual work method) 등이 있다. 본 연구에서는 이 두 가지 방법을 이용하여 전자기력을 계산하여 비교한 결과 Table 3과 같이 거의 동일한 결과를 얻었고, Fig. 7은 로터와 고정자 코어의 전자기력을 가상변위법을 이용하여 나타낸 것이다.

3. 진동 해석

3.1 모드 해석

발전기 고정자 코어의 모드해석은 상용 유한요소 해석 S/W인 ANSYS를 사용하였으며, 사용된 요소는 3D Structural SOLID45이고, 이 요소의 자유도는 3자유도(UX, UY, UZ)이다. 사용한 전체 요소수와 절점수는 각각 42,000 및 55,692 개이다. Fig. 8은 해석을 수행하여 얻은 179.12 Hz의 첫 번째 고유진동수와 진동모드를 나타낸 것이다. 관찰에 의하면 원주방향으로 4절점 모드를 가지고 축방향으로 셀의 1차 모드에 해당하는 원통형 셀의 기본 모드(fundamental mode)임을 알 수 있다. 또한, 코어의 축 중심선에서 동일한 반경 및 각도를 가지는 점들이 동위상으로 진동하는 것을 알 수 있다. 1차 모드의 고유진동수는 설계시 적용되고 있는 가진주파수 120 Hz와 약 50 %의 주파수 분리여유를 가지고 있어, 설계 요구치 20 %을 상회함을 알 수 있다. 주파수 분리여유는 다음과 같이 계산된다.

$$\text{frequency margin(\%)} = \frac{|f_n - f_m|}{f_n} \times 100 \quad (15)$$

여기서 f_n 과 f_m 은 각각 고유진동수 및 전자기력의 가진주파수를 각각 나타낸다.

3.2 진동 해석

2극 60 Hz용 발전기 로터는 3600 rpm으로 회전하기 때문에 전자기력은 120 Hz의 조화 가진력으로 고정자에 작용하게 된다. 이 때 120 Hz의 전자기력에 의해 발생된 동적 응답을 구하기 위해 고정자에 대해 강제진동해석을 수행하였다. 3차원 전자장 해석은 많은 해석 시간과 용량을 필요로 하기 때문에 2차원 전자장 해석으로부터 얻은 전자기력이 고정자의 축방향에 따라 균일하게 분포한다고 가정하여 고정자 진동해석을 수행하였다.

해석 시 감쇠비를 1 %으로 하여 진동 해석하여 얻은 동적 거동을 Fig. 9에 나타내었다. 고정자 코어의 진동양상은 원주방향으로 4절점 모드와 축방향으로

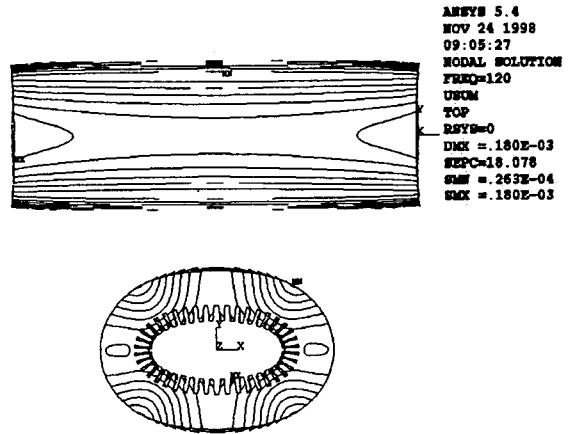


Fig. 9 Dynamic displacement of stator core

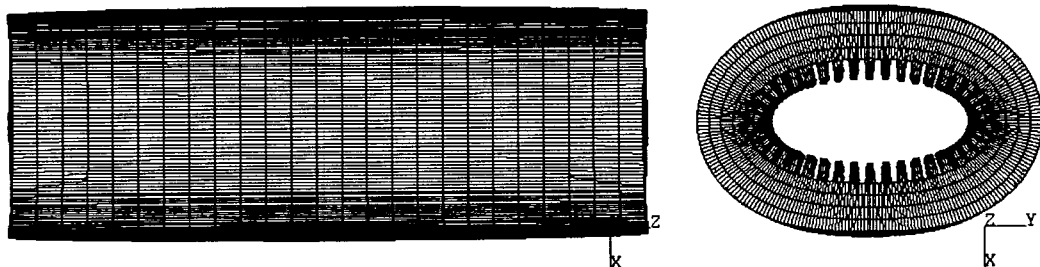


Fig. 8 1st mode shape of stator core(179.12 Hz)

로 셀의 1차 모드 형태로 거동하며, 치절에서 최대 진폭이 0.18 mm로서 설계 계산치인 0.08 mm와 0.1 mm의 차이를 보인다. 감쇠비에 따라 치절에서 응답 진폭의 변화량을 알기 위해 감쇠비 2.5, 5 %에 대해 강제진동해석을 수행한 결과 각각 0.179, 0.175 mm로서 크게 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 고정자 코어의 첫 번째 고유진동수가 179.12 Hz이고 가진력이 120 Hz로서 가진력의 주파수가 고유진동수와 차이가 있어 감쇠비의 변화는 응답의 진폭 변화에 크게 영향을 미치지 않기 때문이다. 따라서 치절에서 해석결과와 설계 계산치의 차이는 2차원 전자장 해석시 코어의 적층 계수(stacking factor), 3차원 효과, 고정자 덕트 효과와 단부 효과(end fringing flux effect) 등의 영향을 고려하지 못해 전자기력이 과대 추정되었기 때문이다.

4. 결 론

대형 발전소용 500 MW용 발전기 고정자에 대해 유한요소법을 이용하여 2차원 전자장 해석을 수행하여 전자기력을 구하였다. 이 전자기력에 의한 고정자의 동적 응답을 규명하기 위해 고정자에 대해 수치 모드해석 및 강제 진동 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 2차원 전자장 해석을 수행하여 자속밀도를 비교한 결과, yoke iron과 tooth tip, pole에서는 비교적 잘 일치하지만 shaft에서는 상대적으로 차이를 보이는데 이는 설계치가 특정 면에 대한 평균값을 나타내기 때문이다.

(2) 해석에 의한 발전기 고정자의 코어의 1차 고유진동수는 179.12 Hz으로 설계시 적용하고 있는 가

진주파수 120 Hz와 약 50 %의 주파수 분리여유를 가지고 있음을 확인하였다. 진동모드는 원주방향으로 4절점 모드와 축방향으로 셀의 1차 모드에 해당하는 원통 셀의 1차 진동모드였다. 전자기력을 고려하여 진동 응답을 구한 결과, tooth tip에서 설계 계산치와 해석치사이에 많은 차이를 보였으며, 이것은 2차원 전자장 해석에 따른 영향으로 전자기력이 과대 추정되었기 때문이다.

(3) 향후 발전기의 stacking factor, 3D effect, stator duct와 end fringing flux effect 등의 영향을 고려한 보다 정확한 전자기력 해석이 필요하다.

참 고 문 헌

- (1) Fenton, R. E., Jones, N. H and Johnson, M. G., 1977, "Reliability and Performance...Dual Challenges in The Design of Turbine Driven Generators", Canadian Electrical Association Thermal and Nuclear Power Section, pp. 21~24.
- (2) 전자장 수치해석 기법 현황, 1992, 기술보고서 제 3 호, 대한전기학회.
- (3) Hayt, W. H., 1989, Engineering Electromagnetics, McGraw-Hill, Inc..
- (4) Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., and Umans, S. D., 1992, Electric Machinery, 5/E SI units, McGraw-Hill, Inc..
- (5) Dawson, R. N. and Miller, R., 1992, Generator Design & Development Engineering, TGE Report 92~37.
- (6) ANSYS Electromagnetic Field Analysis Guide, 1997, Release 5.4, ANSYS Inc..