

# 대형 화력 발전용 발전기 권선단부의 전자기력에 의한 진동 해석

## Vibration Analysis of the End-winding of Large Generator for Fossil Power Plant under Electromagnetic Excitation

김 철 홍\*·주 영 호\*\*

Cheol Hong Kim and Young Ho Ju

**Key Words** : Generator End-winding(발전기 권선단부), 3-D Electromagnetic Field Analysis(3 차원 전자장 해석), Electromagnetic Forces(전자기력), Modal Analysis(모드해석), Forced Response(강제진동 응답)

### ABSTRACT

This paper presents results of vibration analysis of a end-winding of large generator for fossil power plant. A finite element analysis using a commercial S/W is performed to calculate alternating electromagnetic forces, mainly of 120 Hz in 60 Hz machines, acting on the end-winding, and then to calculate forced response of the end-winding under electromagnetic forces. Also, this paper presents analytical and experimental modal analysis results of generator end-winding to validate FE model. We calculated forced response of end-winding on 120 Hz, double rotating frequency. These results will be used to evaluate structural reliability of end-winding and applied to update model.

### 1. 서 론

발전기 고정자 권선부를 구성하는 여러 기계 부품들을 다음과 같은 힘들에 견디도록 설계하여야 한다. 1) 부하 변동 시의 열의 팽창과 수축에 기인한 열팽창력(thermal expansion force), 2)갑작스러운 단락이나 위상 비동기(synchronizing out of phase)에 의한 불규칙적이고 순간적인 fault force 와 3)고정자 권선의 전류와 권선 내의 자기력의 상호 작용 때문에 생기는 진동수 120 Hz 에 해당하는 running force 등이다. 이와 같은 힘들은 고정자 권선부를 구성하는 전체 부품들에 걸쳐 응력을 야기하기 때문에 발전기 고정자 권선부의 내구성과 운전 중의 파손을 방지, 유지 보수에 최소화를 보장하기 위하여 이들 힘들에 대한 정확한 규명이 필요하다. 특히, 전자기력에 의한 고정자의 동특성 파악은 안전하고 신뢰성 있는 발전기의 설계를 위해 반드시 고려해야 하는 중요한 문제이다. 전자기력에 의한 진동은 전자기적인 부분과 기계적인 부분이 서로 상호작용함으로써 일어나는 문제이기 때문에 전자기적인 원인의 현상 파악과 관련 부분

의 기계적 동특성을 충분히 검토하여야 한다<sup>(1,2)</sup>. 정상상태 운전에서 발전기 고정자 권선에 주로 작용하는 전자기력의 분포는 발전기의 극(pole) 수에 따라 다르다. 주로 화력 발전용으로 사용되는 양극 발전기는 4 개의 절점(nodal point)을 가진 4-nodal 분포를 가지고, 반면 원자력 발전용의 4 극 발전기는 8 개의 절점을 가지는 8-nodal 분포를 나타낸다. 로터의 회전수 3600 rpm 과 두 개의 극에서 발생된 전자기력에 의해 120 Hz 의 전자기력이 발생되고 마찬가지로 1800 rpm 회전수와 4 극 발전기는 120 Hz 의 전자기력을 발생시킨다. 만일 이들 120 Hz 의 전자기력이 발전기 고정자 코어, 권선단 및 각 부품의 고유진동수와 일치할 경우 공진이 발생하여 과도한 진동과 소음을 발생시켜 발전기 전체 기계적 건전성 및 신뢰성에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서는 발전기 권선단부에 대하여 유한요소법을 이용한 3 차원 전자장 해석을 수행하여 전자기력을 규명하고, 규명된 전자기력으로부터 진동해석을 수행하였다. 또한 권선단부의 FE 모델에 대한 검증을 위해 실험모드해석을 수행하였다.

### 2. 전자기력 계산

정자장 문제에서 지배방정식을 도출하기 위해

\* 정회원, 두산중공업(주) 기술연구원  
E-mail : cheolhongkim@doosanheavy.com  
Tel : (055) 278-3713, Fax : (055) 278-8593

\*\* 두산중공업(주) 기술연구원

필요한 맥스웰(Maxwell)방정식 및 보조방정식은 다음과 같이 주어진다<sup>(3,4)</sup>.

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

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

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

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

여기서 각 기호의 의미는 다음과 같다.

$\vec{H}$  : 자기장의 세기(magnetic field intensity) [A/m]

$\vec{J}$  : 전류밀도 (current density) [A/m<sup>2</sup>]

$\vec{B}$  : 자속밀도 (flux density) [Wb/m<sup>2</sup>]

$\mu_0$  : 진공 중의 투자율 [H/m]

$\vec{M}$  : 자화량 (magnetization) [A/m]

$\chi$  : 자화율 (susceptibility)

$\vec{M}_r$  : 잔류 자화량 (remanent magnetization) [A/m]

위 식으로 정자장 문제에 대한 지배방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\nabla \times (\nu \cdot (\nabla \times \vec{A}) - \nu_r \cdot \vec{M}_r) - \vec{J} = 0 \quad (5)$$

정자기장 해석에 사용되는 일반적인 경계조건으로는 다음의 두 가지가 있다.

$$A = 0 \text{ on } \Gamma_0 \text{ (자속 평행 조건)} \quad (6)$$

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0 \text{ on } \Gamma_1 \text{ (자속 수직 조건)} \quad (7)$$

Fig. 1 은 본 연구의 3 차원 전자장 해석에 사용된 당사에서 제작되는 대형 화력발전용의 발전기 고정자 권선단부의 단면을 나타내었다. 발전기 권선단부의 각 권선은 나선형 구조로서 발전 용량에 따라 42 ~ 72 개의 상부권선(top bar)과 하부 권선(bottom bar)으로 이루어져 있다. 각 권선은 약 25~30 개의 구리 소선 가닥으로 구성되어 있다. 또한, 열팽창 및 진동에 견디기 위한 각종 지지대와 냉각 통로들로 구성되어 있다. 이와 같이 구조적 복잡성으로 실제 전자장 해석 시 많은 어려움을 내포하고 있다. 특히, 기계 구조 해석과는 달리 전자장 해석은 해석 하고자 하는 대상뿐만 아니라, 해석 대상이 위치한 자유 공간(free space)까지도

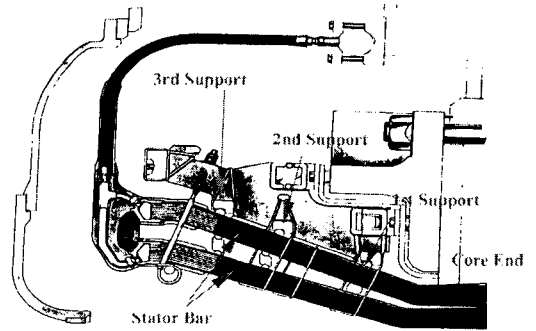


Fig.1 Typical transverse cross-section of end-winding

델링 해야 한다. 더욱이, 전자장 해석으로부터 얻은 결과를 쉽게 기계적 해석에 이용할 수 있도록 모델링하기 위해서는, 이들 전기적 및 기계적 모델의 상호 연계가 가능하면서 동시에 양 쪽 모두에서 물리적으로 타당한 결과를 얻을 수 있는 단순화된 모델을 추구하고자 한다. 이러한 점을 동시에 만족시키기 위해서는 3 차원 solid 모델링이 아닌, 단순화된 beam 요소를 이용하여 모델링 하였다. Beam 요소를 이용한 모델링은 위에서 언급한 구조적 복잡성에 따른 모델링에서의 요소 수 증가, 전자장 해석에서의 전기적 특성 데이터 입력 그리고 전기적 모델과 기계적 모델간의 상호연성 효과의 반영문제 등을 해결할 수 있다.

본 연구의 전자장 해석에 사용된 가정으로는 권선단부 표면에서 발생하는 와전류 효과(eddy current)는 무시하였다. 또한 권선단부에 위치한 로터는 비자성체(non-magnetic material)로 구성된 retain ring 으로 둘러 싸여 있으므로 전자장 해석시 발전기 로터는 모델링을 생략하였다. 이외에

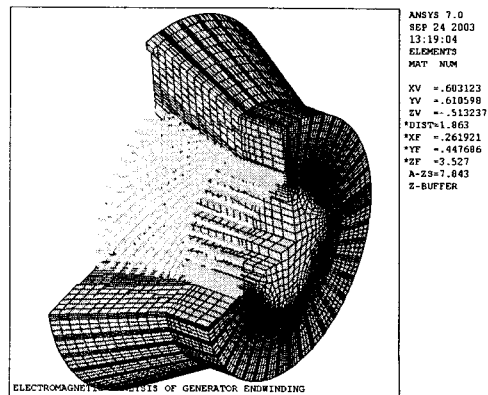


Fig. 2 3-D FE model of end-winding and air space

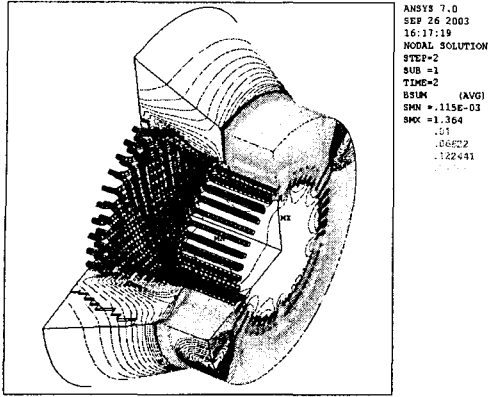


Fig. 3 Magnetic flux density

발전기 고정자 코어 끝단(core end)과 로터 사이의 공극(air gap)에서 발생하는 누설자속(leakage flux)효과는 무시하였다.

본 연구에서는 발전기가 정상상태 전부하(full load) 운전 상태일 경우, 즉, 계자전류를 회전 중인 로터에 인가시키고 전기자 슬롯이 계통에 연결되어 발전기가 정격 출력을 내는 상태를 고려하여 3 차원 전자장 해석을 수행하였다. 이 때의 고정자 권선단부에 유기되는 전기적 특성 데이터(부하시 정상상태에서 각 권선의 3 상 전류, 전압, 위상 등)은 설계 데이터를 사용하였다.

3 차원 전자장 해석을 위해 권선, 고정자 코어 및 공기로 구성된 FE 모델을 Fig. 2 에 나타내었고, 사용한 요소 수와 절점 수는 각각 88,572, 97,045 개로서 ANSYS/EMAG 의 상용 S/W 을 이용하였다.

일반적으로 발전기 제작시 발전기 효율 향상을 위해 고정자 코어 끝단에 고정자 코어에서 발생하는 자속이 누설되지 않도록 flux shield 를 설치한다. 그러므로, 3 차원 전자장 해석시, 적용된 경계조건은 코어 끝단으로 자속이 통과하지 못하는 자속 평행 조건을 적용하였다.

Fig. 3 는 정상 상태 전부하(full load)에 대해 3 차원 전자장 해석으로부터 얻은 권선단부에서 발생된 자속밀도를 나타낸 것으로 거의 모든 자속 밀도는 권선 근처에 집중하고 있다. 자속밀도는 단위 면적당 통과하는 자속 수를 말하는 것으로 고정자 코어부분의 권선 주위에서 자속밀도는 약 1.4T 로 가장 크다.

일반적으로 어떤 공간 내에 위치한 권선이 전

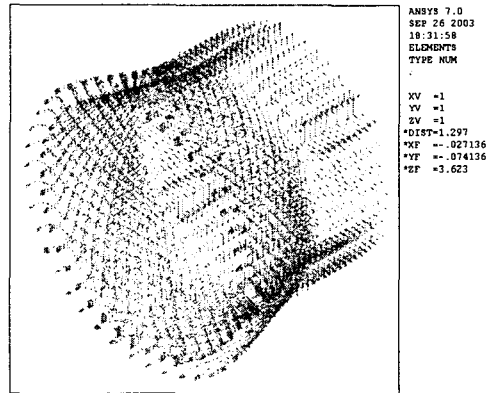
자장(magnetic field)에 위치할 때, 권선이 받은 전자기력은 로렌즈 힘 방정식을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$f = J \times B \quad (8)$$

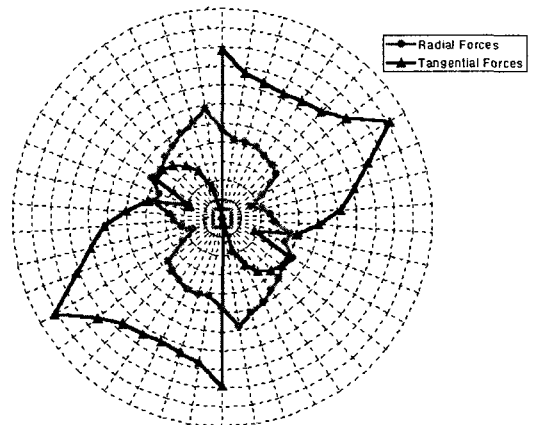
여기서,  $f$  는 volumetric force density,  $J$  는 surface current density,  $B$  는 magnetic flux density 이다. 식(8)는 Laplace's law 에 의해 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$dF = dl \times BI \quad (9)$$

여기서  $dF$  는 길이  $dl$  의 권선에서 받는 전자기력,  $dl$  는 권선의 길이,  $I$  는 권선에 흐르는 전류이다.



(a) Electromagnetic forces on total stator



(b) Distribution of electromagnetic forces on the top bar

Fig. 4 Electromagnetic forces of stator bar

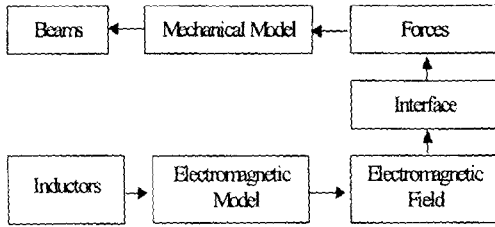


Fig. 5 Interface procedure of the electromagnetic and mechanical model

Fig. 4 에 식(9)을 이용하여 계산한 고정자 권선 단부에서 받는 전자기력을 나타내었는데, 양극 발전기의 전형적인 전자기력 분포인 4-nodal 형태를 이루고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 전자기력이 발전기 권선단부의 4-nodal 모드형과 일치할 경우, 공진이 발생하여 기계적 건전성 및 신뢰성에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 다음 절에서는 전자기력에 의한 권선단부의 진동해석에 대해 다루었다.

한편, 전자기력에 의한 진동 해석시 가장 중요한 문제점은 해석시 사용된 전기적 모델과 기계적 모델의 차이이다. 이를 극복하기 위해서는 해석시 사용된 전기적 모델과 기계적 모델이 서로 연성(coupled)이 가능한 요소를 선택해야 한다. Fig. 5 에 전자장 해석 결과를 기계적 해석 모델로 변환시키는 절차를 나타내었다. 전자장 해석의 인덕턴스 권선모델은 기계적 모델의 beam 권선으로 변환시켰다.

### 3. 권선단부의 진동해석

#### 3.1 진동모드 해석

발전기 권선단부의 모드해석은 상용 유한요소해석 S/W 인 ANSYS 를 사용하였으며, 사용된 요소는 3D Structural beam 요소 및 Solid 요소로서 Fig. 6 에 유한요소 모델을 나타내었다.

발전기 권선은 여러 구리소선을 적층한 복합재질로 이루고 있으며, 권선을 지지하고 있는 지지링(support ring)과 permanent ring 은 유리섬유(glass roving)와 레진(resin)을 고온에서 장시간 동안 몰딩(molding)하여 만든 유리강화 복합재질이다. 권선, 지지링 그리고 permanent ring 은 beam 요소로 모델링하였고, beam 요소에 대한 각 재질의 등가물성치는 각 재질에 대해 진동시험 및 진동해석 결과로부터 얻었다.

한편, 발전기 고정자 권선단부의 유한요소모델

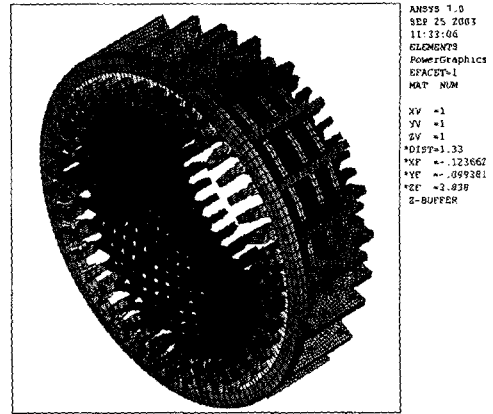
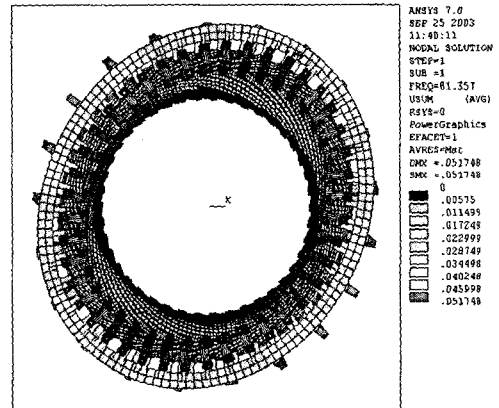
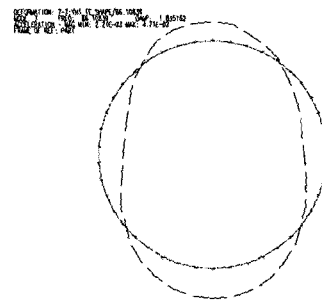


Fig. 6 FE model of end-winding for vibration analysis

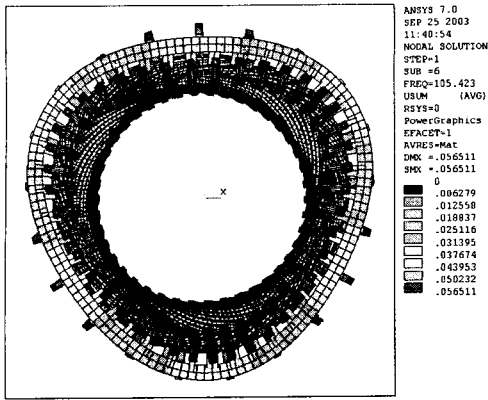


(a) Finite element analysis (81.4 Hz)

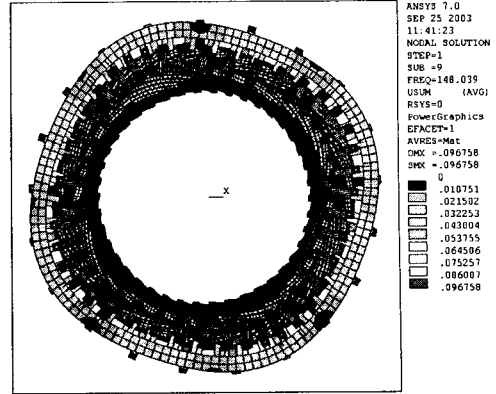


(b) Experiment (86 Hz)

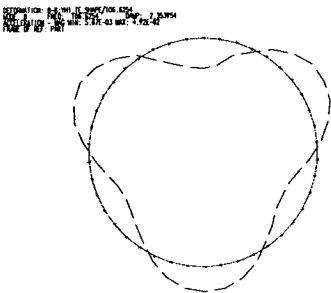
Fig. 7 Comparison of the analysis and experiment mode(n=2)



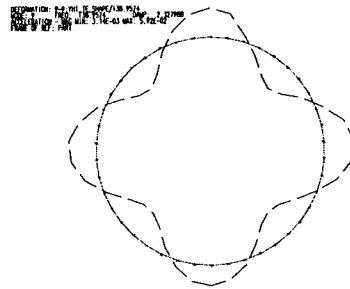
(a) Finite element analysis (105.4 Hz)



(a) Finite element analysis (148.0 Hz)



(b) Experiment (106 Hz)



(b) Experiment (139 Hz)

Fig. 8 Comparison of the analysis and experiment mode (n=3)

Fig. 9 Comparison of the analysis and experiment mode (n=4)

에 대한 타당성을 검증하기 위해 실제 권선단부에 대한 충격 가진에 의한 모드시험을 수행하였다<sup>(5)</sup>. Fig. 7, 8, 9 에 발전기 고정자 권선단부의 진동 해석 결과와 실험 결과를 함께 나타내었다. Fig. 8 는 양극 발전기의 주 가진원 형태로 작용될 수 있는 원주 방향으로 4 개의 절점(n=2)을 가지고 있는 전형적인 원통형 셀의 fundamental 모드임을 알 수 있다. 또한, Fig. 9, 10 는 각각 n=3,4 을 갖는 원통형 셀 모드임을 알 수 있다. 이와 같이 해석결과를 실험결과와 비교해 보면 약 5 % 내외로 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

### 3.2 전자기력에 의한 진동해석

양극 60 Hz용 발전기 로터는 3600 rpm으로 회전하기 때문에 전자기력은 120 Hz의 조화 가진력으로 고정자에 작용하게 된다. 이 때 120Hz

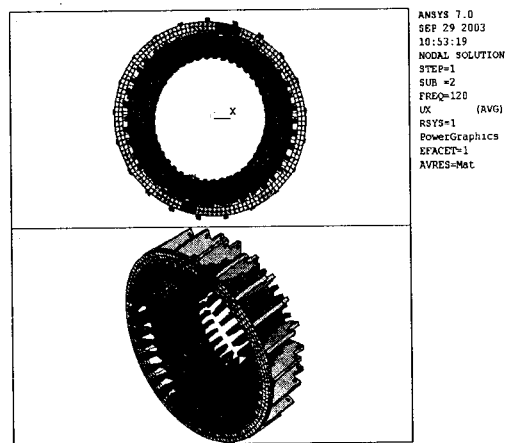


Fig. 10 Deformation of the end-winding due to the Electromagnetic Forces

전자기력에 의해 발생한 동적 응답을 구하기 위해 end-winding 에 대해 강제 진동해석을 수행하였다. 해석 시 사용한 감쇠비는 3 %로 진동모드시험으로부터 얻은 값이다. 진동 해석하여 얻은 동적 거동을 Fig. 10 에 나타내었다. 고정자 권선단부의 진동양상은 원주방향으로 4 절점 모드 형태로 거동하며, 이는 4-nodal 가진원의 형태임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

대형 화력 발전소용 발전기 권선단부에 대해 유한요소법을 이용하여 정상상태 운전 조건에서 3 차원 전자장 해석을 수행하여 전자기력을 규명하였다. 이 전자기력에 의한 권선단부의 동적 응답을 규명하기 위해 권선단부에 대해 진동모드해석 및 강제 진동 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정상상태 운전 조건에서 발전기의 권선단부에 대한 유한요소법을 이용한 3 차원 전자장 해석을 수행하였으며, 해석 결과, 자속밀도는 고정자 코어부분의 권선 주위에서 약 1.4 T 로서 가장 컸다.
- 2) 전자장 해석 결과로부터 로렌쯔 힘 방정식을 이용하여 권선단부에 작용하는 전자기력을 계산하였다. 권선단부에 작용하는 120 Hz 양극발전기의 전자기력의 분포는 4 개의 절점을 갖는 4-nodal 형태로 나타났다.
- 3) 전자기력에 의한 권선단부의 동적 응답을 규명하기 위해 권선단부에 대해 유한요소법을 이용한 진동모드해석을 수행하였고, 유한요소 모델의 타당성을 검증하기 위해 실험적 모드해석을 수행하였다.
- 4) 정상상태 운전조건에서 전자기력에 의한 진동

응답 해석을 수행한 결과, 진동양상은 원주방향으로 4 절점 모드 형태로 나타났고, 이는 4-nodal 가진원의 형태임을 알 수 있었다.

이와 같이 얻은 결과는 발전기 고정자 권선단부의 운전 신뢰성과 기계적 건전성이 확보된 권선단부의 최적 설계 자료로 제공될 것이다. 향후, 이러한 해석 결과를 검증하기 위해 운전 중의 발전기 권선단부에 대한 전기적 특성 데이터 측정 및 진동 측정을 수행할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 전력산업연구개발 사업인 “차세대 화력 발전 주기기 설계 및 제작 기술개발” 과제의 일부로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) R. E., Fenton, N. H., Jones, and M. G., Johnson, 1977, "Reliability and Performance...Dual Challenges in The Design of Turbine Driven Generators," *Canadian Electrical Association Thermal and Nuclear Power Section*, March 21-24
- (2) 김철홍, 주영호, 박종포, 1999, “전자기력에 의한 발전기 고정자 코어의 진동 해석,” 한국소음진동공학회지 제 9 권, 제 4 호, pp. 747~753
- (3) 전자장 수치해석 기법 현황, 1992, 기술보고서 제 3 호, 대한전기학회
- (4) W. H., Hayt, 1989, *Engineering Electromagnetics*, McGraw-Hill, Inc.
- (5) 김철홍, 주영호, 2001, “500MW 급 대형 발전기 권선단부의 전자기력과 동특성 해석,” 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 826 ~ 831
- (6) ANSYS *Electromagnetic field Analysis Guide*, Release 6.0, ANSYS Inc.