

500MW 급 대형 발전기 권선단부의 전자기력과 동특성 해석

김철홍*, 주영호**

Analysis of Vibration and Electromagnetic Forces on a Generator End-winding for 500 MW Fossil Power Plant

Cheol Hong Kim and Young Ho Ju

Key Words : Generator End-Winding(발전기 권선단부), 3-D Electromagnetic Field Analysis(3 차원 전자장 해석), Electromagnetic Force(전자기력), Modal Analysis(모드해석)

ABSTRACT

Electromagnetic forces generate vibrations in the end-winding of large generators. A finite element analysis using a commercial S/W is performed to calculate electromagnetic force of end-winding in two pole generator for 500 MW fossil power plant. Also, this paper presents analytical and experimental modal analysis results of generator end-winding. Using validated FE model, 3D electromagnetic model which computes the forces on the end-winding is coupled with a 3D mechanical model which calculates the dynamic displacement and stress under electromagnetic forces. These results will be used to evaluate reliability of end-winding and applied to update model.

1. 서론

최근의 발전기는 발전소 신뢰성 개선, 보다 높은 정격(定格)을 위한 구매자의 요구 사항의 증가와 전력에너지 소비의 증가 등으로 향상된 유용성과 신뢰성을 가진 발전기의 개발과 설계가 절실히 요구되는 실정이다.

발전기의 효율과 성능에 대한 유지와 신뢰성 확보를 위하여 power density 에 밀접한 영향을 주는 고정자(stator)와 rotor heating, magnetic circuit design, electromagnetically induced winding forces, rotor mechanical design 등에 대한 개발에 중점을 두고 있다. 이 중에서 발전기 고정자에서 발생하는 전자기장에 의한 고정자와 권선단부의 전자기력에 기인한 진동은 설계시 매우 중요한 설계 변수이다. 전자기력에 의한 권선단부와 각 요소들에 대한 진동 응답은 실제 운전 중의 발전기의 건전성(integrity)과 신뢰성 확보를 위한 매우 중요한 요인이다.

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 상호작용 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 보수의 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 부분의 기계적 동특성을 충분히 검토하여야 한다.^(1,2)

본 연구에서는 대형 화력 발전용 발전기 고정자의 전자기력의 규명과 권선단부의 동특성을 파악하고자 한다. 발전기 권선단부에 발생하는 전자기력에 의한 진동 현상을 규명하기 위해 유한요소법을 이용한 3 차원 전자장 해석으로 전자기력을 규명하였다. 또한 강제진동해석을 위해 권선단부의 유한요소해석을 이용한 진동해석 및 FE 모델의 검

* 정회원 두산중공업(주) 기술연구원

** 두산중공업(주) 기술연구원

증을 위해 실험모드해석을 수행하였다.

2. 전자장 해석

전자장 문제에서 지배방정식을 도출하기 위해 필요한 맥스웰(Maxwell)방정식 및 보조방정식은 다음과 같이 주어진다^(3,4).

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

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

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

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

여기서 각 기호의 의미는 다음과 같다.

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

\vec{J} : 전류밀도 (current density) [A/m²]

\vec{B} : 자속밀도 (flux density) [Wb/m²]

μ_0 : 진공 중의 투자율 [H/m]

\vec{M} : 자화량 (magnetization) [A/m]

χ : 자화율 (susceptibility)

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

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

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

전자기장 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. 1에 본 연구의 3차원 전자장 해석에 사용된 당사에서 제작한 500 MW급 양극 발전기 고정자 권선단부의 단면을 나타내었다. 발전기 권선단부의 각 권선은 나선형 구조로서 각각 42개의 상부권선(top bar)과 하부권선(bottom bar)으로 이루어져 있다. 각 권선은 약 25~30개의 구리소선 가닥으로 구성되어 있다. 또한, 열팽창 및 진동에 견디기 위한 각종 지지대와 냉각 통로들로 구성되어 있다. 이와 같이 구조적 복잡성으로 실제 전자장 해석시 많은 어려움을 내포하고 있다. 특히, 기계 구조 해석과는 달리 전자장 해석은 해석 하고자 하는 대상뿐

만 아니라, 해석 대상이 위치한 자유 공간(free space)까지 모델링해야 한다. 더욱이, 전자장 해석으로부터 얻은 결과를 쉽게 기계적 해석에 이용할 수 있도록 모델링하기 위해서는, 이들 전기적 및 기계적 모델의 상호 연계가 가능하면서 동시에 양쪽 모두에서 물리적으로 타당한 결과를 얻을 수 있는 단순화된 모델을 추구하여야 한다. 이러한 점을 동시에 만족시키기 위해서는 3차원 solid 모델링이 아닌, 단순화된 beam 요소를 이용하여 모델링하였다. Beam 요소를 이용한 모델링은 위에서 언급한 구조적 복잡성에 따른 모델링에서의 요소 수 증가, 전자장 해석에서의 전기적 특성 데이터 입력 그리고 전기적 모델과 기계적 모델간의 상호 연성 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 ring으로 둘러 싸여 있으므로 전자장 해석시 발전기 로터는 모델링을 생략하였다. 이외에 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 발전기 정격출력(500 MW)에 대해 3차원 전자장 해석을 수행하였다. 이 때의 고정자 권선단부에 유기되는 전기적 특성 데이터(부하시 정상상태에서 각 권선의 3상 전류, 전압, 위상 등)은 설계 데이터를 사용하였다.

발전기 권선단부의 전자장 해석에 사용된 소프트웨어는 ANSYS/EMAG 이고, 권선단부 사용된 요소는 권선의 전기적 특성 데이터를 쉽게 입력하고 기계적 모델의 beam 요소로 쉽게 변환할 수 있는 current source 요소를 사용하였다. 그리고 권선 이외의 공기에 대해서는 solid으로 모델링하였다.

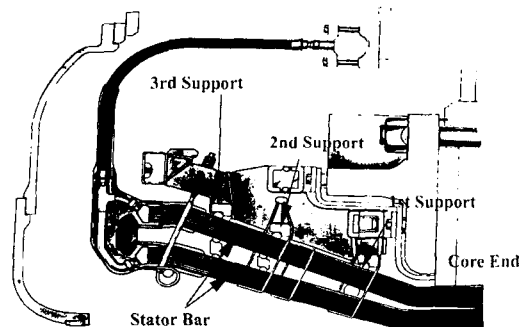


Fig.1 Typical transverse cross-section of end-winding

권선 및 공기모델에 사용한 요소수는 각각 4038, 5592 개이고, 각 모델에 사용된 절점 수는 4200, 6330 개이다. 이와 같이 구성된 유한요소 모델을 Fig. 2에 나타내었다.

일반적으로 발전기 제작시 발전기 효율 향상을 위해 고정자 코어 끝단에 고정자 코어에서 발생되는 자속이 누설되지 않도록 flux shield를 설치한다. 그러므로, 3차원 전자장 해석시, 적용된 경계조건은 코어 끝단으로 자속이 통과하지 못하는 자속평행조건을 적용하였다.

Fig. 3는 정상 상태 전부하에 대해 3차원 전자장 해석으로부터 얻은 권선단부에서 발생된 자속밀도를 나타낸 것이다. Fig. 3의 관찰에 의하면 거의 모든 자속밀도는 권선 근처에 집중하고 있다. 자속 밀도는 단위 면적당 통과하는 자속 수를 말하는 것으로 권선단부 중심부에서 자속밀도는 약 0.19 T로 가장 크다.

고정자 권선단부는 권선의 전류와 권선의 자기력에 의해 진동수 120 Hz의 전자기력을 받는다. 이들 전자기력은 고정자 권선부를 구성하는 전체 부품들에 걸쳐 주기적인 응력을 야기시켜 발전기

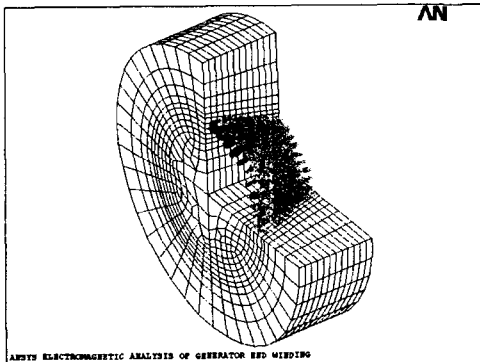


Fig. 2 3-D FE model of end-winding and air space

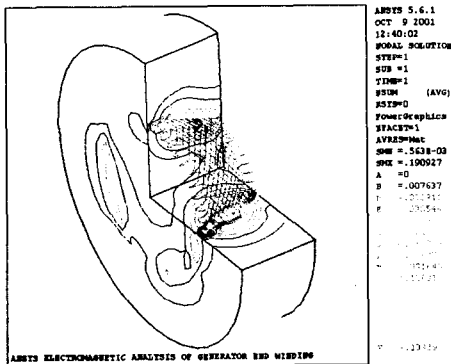
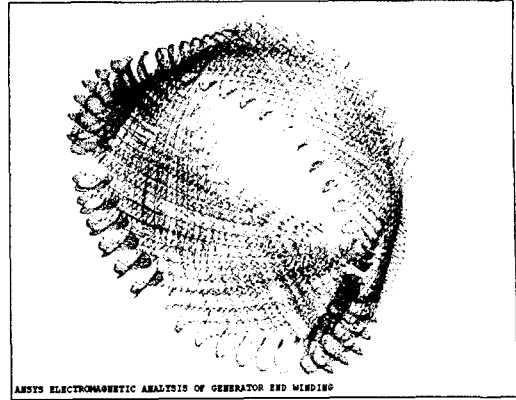
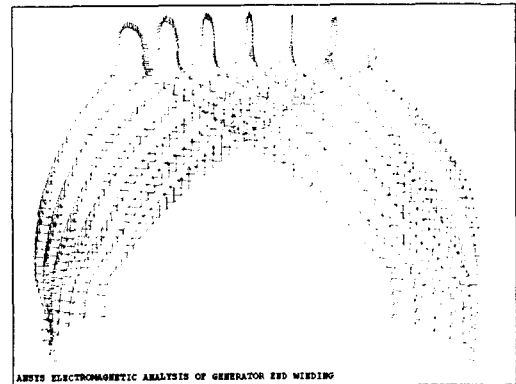


Fig. 3 Magnetic flux density



(a) Electromagnetic forces on total stator



(b) Electromagnetic forces on one stator pole

Fig. 4 Electromagnetic forces of end-winding

고정자 권선의 내구성에 영향을 미친다. 따라서 전자기력에 의한 구조물의 동적 거동을 파악하기 위해서는 정확한 전자기력의 계산은 매우 중요하다. 일반적으로 어떤 공간 내에 위치한 권선이 전자장 (magnetic field)에 위치할 때, 권선이 받은 전자기력은 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 density이다. 식(8)는 Laplace's law에 의해 다음과 같이 유도할 수 있다.

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

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

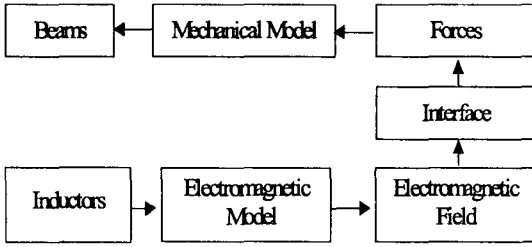


Fig. 5 Interface procedure of the electromagnetic and mechanical model

Fig. 4 에 식(9)을 이용하여 계산한 고정자 권선단부에서 받는 전자기력을 나타내었다.

한편, 전자기력에 의한 진동해석시 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 전자기장 해석 결과를 기계적 해석 모델로 변환시키는 절차를 나타내었다. 전자기장 해석의 인덕턴스권선모델은 기계적 모델의 beam 권선으로 변환시켰다. 또한 이와 함께 전자기장 해석에서 얻은 전자기력을 진동해석시에 사용할 기계적 모델의 가진력으로 사용하도록 하였다.

3. 권선단부의 동특성 해석 및 실험

발전기 권선단부의 모드해석은 상용 유한요소해석 S/W 인 ANSYS 를 사용하였으며, 사용된 요소는 3D Structural beam 요소이다.

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 유리강화복합재질이다. 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 유한요소모델에 대한 타당성을 검증하기 위해 제작하고 있던 500 MW 용 발전기 고정자 권선단부에 대하여 충격 가진에 의한 모드시험을 수행하였다. 발전기 고정자 권선단부는 거의 원통 형상에 가까운 원뿔형이기 때문에 진동모드는 원주 방향 모드가 주로 나타나므로 반경방향에 대하여 모드시험을 수행하였다. 모두 42 개의 권선으로 이루어진 권선단부에 대하여 한 권선단부에 대해서는 축방향으로 7 개 지점, 원주방향으로 12 개 권선에 대해 가진점을 옮기면

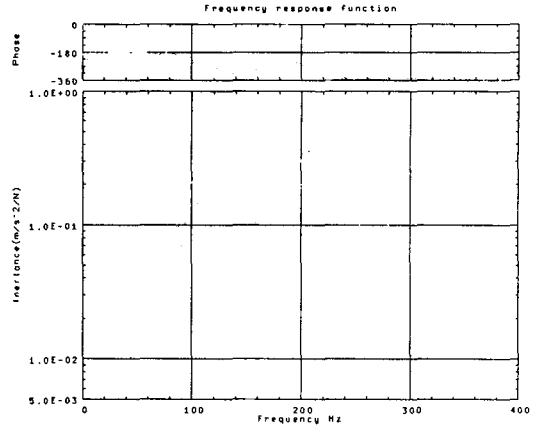


Fig. 6 Comparison of the measured and synthesized FRF of the end-winding

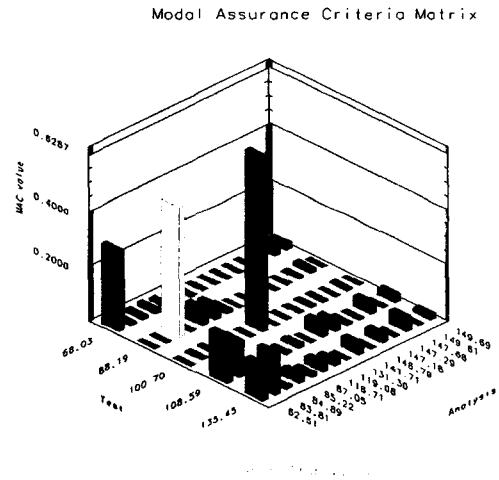


Fig. 7 Modal assurance criteria

서 한 점에서 응답을 측정하였다. 이렇게 한 점이 가속도계를 부착하고 84 개 지점으로 옮겨 가면 가진하여 총 84 개의 주파수응답함수를 얻었다. 이들 주파수응답함수로부터 모드해석 상용 소프트웨어 (I-DEAS Test)를 이용하여 고유진동수 및 고유모드를 추정하였다. 여기서, 모드매개변수를 추정하기 위해 사용한 추정법은 Frequency Polyreference 이다. Fig. 6 에 발전기 권선단부의 어느 한 지점에서 측정한 주파수응답함수와 추정된 모드매개변수로부터 합성한 주파수응답함수를 나타내었다.

유한요소해석과 실험을 통한 구한 모드 벡터 사이의 상관성 정도를 알아보기 위해 MAC(Modal Assurance Criteria)을 사용하였다. i 번째 실험모드 벡터 ϕ_{ei} 와 j 번째 유한요소 해석 모드 벡터 ϕ_{nj} 사이의 MAC 값은 다음과 같이 정의된다.

$$MAC_{ij} = \frac{|\phi_{ei}^* \cdot \phi_{nj}|^2}{(\phi_{ei}^* \cdot \phi_{ei})(\phi_{nj}^* \cdot \phi_{nj})} \quad (10)$$

여기서, 첨자 *는 모드 벡터의 복소 공액 전치를 나타낸다. 고유진동수에 대한 MAC 행렬을 Fig. 7에 나타내었다. MAC 행렬로부터 의미있는 모드에 대하여 Fig. 8, 9, 10에 이들 모드 형상을 각각 나타내었다. Fig. 8의 관찰로부터 해석 결과와 실험 결과 모두 원주 방향으로 4개의 절점(n=2)을 가지고 있는 전형적인 원통형 셀의 fundamental 모드임을 알 수 있다. 또한, Fig. 9, 10는 각각 n=3,4을 갖는 원통형 셀 모드임을 알 수 있다. 이와 같이 해석결과를 실험결과와 비교해 보면 2차 모드까지는 비교적 잘 일치함을 볼 수 있는 반면, 고차 모드인 3차 경우에는 진동수가 약 18%의 차이를 보인다.

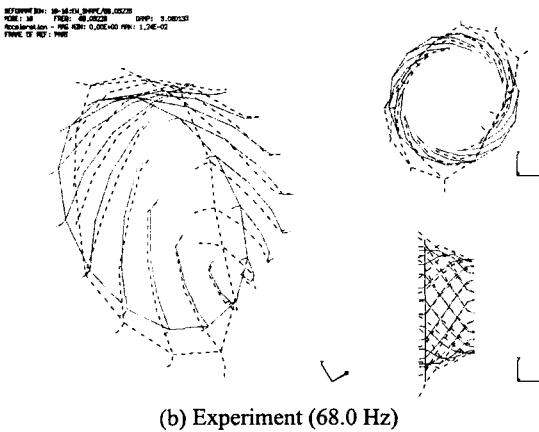
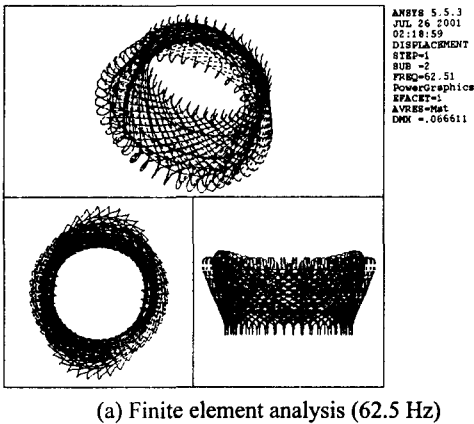


Fig. 8 Comparison of the analysis and experiment

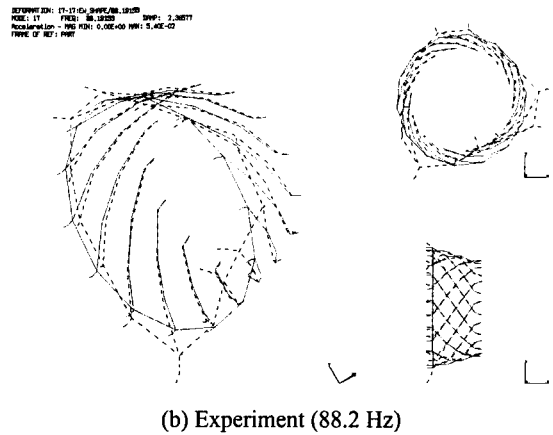
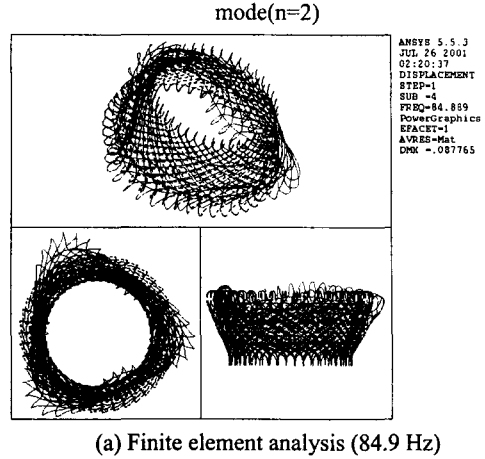


Fig. 9 Comparison of the analysis and experiment mode(n=3)

이것은 여러 복합재질로 이루어진 권선단부의 등가물성치 추정에서의 오차, 근사화된 유한요소 모델에 의한 오차 그리고 실험조건 등의 원인에 기인한 것으로 추측된다.

4. 결론

본 연구에서는 발전소용 대형 500 MW 용 발전기 권선단부의 진동을 야기시키는 전자기력의 규명 및 권선단부의 동특성을 파악하였다. 유한요소법을 이용하여 권선단부에 대해 3차원 전자장 해석을 수행하여 전자기력을 구하였다. 또한 전자기력에 의한 발전기 권선단부의 진동특성을 규명하기 위해 권선단부에 대한 수치적 및 실험적 모드해석을 수행하였다. 이렇게 얻은 결과는 전자기력을 고려한 고정자의 진동 변위와 응력을 산출하는 데 이

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) A. E., Fitzgerald, C., Kingsley, Jr., and S. D., Umans, 1992, *Electric Machinery*, S/E SI units, McGraw-Hill, Inc.
- (6) *ANSYS Electromagnetic field Analysis Guide*, Release 5.4, 1997, ANSYS Inc.
- (7) *SDRC Inc., 1997, I-DEAS Modal Analysis Users Guide*

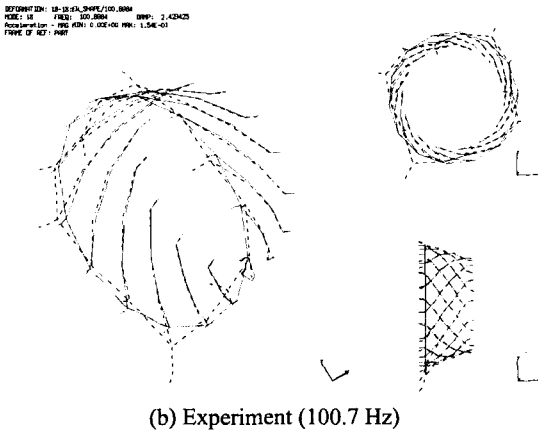
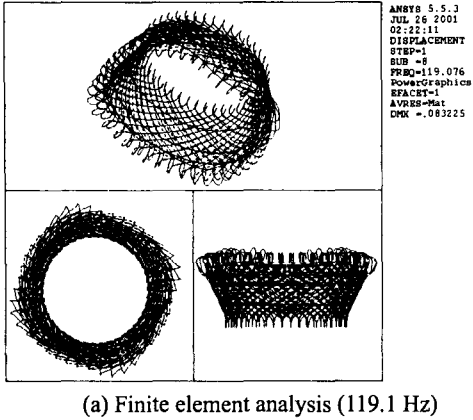


Fig. 10 Comparison of the analysis and experiment mode(n=4)

용될 것이며, 이를 통해 설계검증 및 해석 설계 변수를 도출함으로써 보다 향상된 유용성과 신뢰성을 가진 발전기 개발과 발전기 사고의 신속한 원인규명 및 유지보수의 자료로 이용할 수 있다. 향후, 이러한 해석 결과를 검증하기 위해 발전기 권선단부에 대한 전기적 특성 데이터 측정이 필요하다.