

이방성을 고려한 회전기기 고정자 코어의 동적 모델링 Dynamic Modeling of the Stator Core of the Electrical Machine Using Orthotropic Characteristics

김희원* · 이수목** · 김관영** · 배종국**

Heui-Won Kim, Soo-Mok Lee, Kwan-Young Kim, Jong-Gug Bae

Key Words : stator core(고정자 코어), impact test(충격실험), isotropic(등방성) orthotropic(이방성), natural frequency(고유진동수), vibration mode(진동모드), cylindrical coordinate(원통형 좌표계), frequency response function(주파수 응답함수)

ABSTRACT

The experimental modal testing has been carried out for the stator of a generator to confirm the vibrational mode shapes and the corresponding natural frequencies. The model of the stator for the vibration analysis was developed and a series of vibration analyses was carried out. And the properties of the solid element were updated to reduce the differences of the natural frequencies between the measured and the analysed. In the vibration analyses, the axial, radial and circumferential properties of the solid element were separately varied to take into account the orthotropic effect of the laminated structure and to match the primary modes of the stator core which were extracted from the modal testing. After several attempts to match the measured natural frequencies and mode shapes, the properties of the stator model were determined. Comparison of the vibration analyses results based on the determined properties showed fairly good coincidence with the measured data.

1. 서 론

전동기나 발전기와 같은 전기기계(electrical machine)의 고정자 코어는 얇은 적층판과 권선으로 복잡하게 구성되어 있어 진동 해석 모델링 구축이 난해하지만 발전기 전체 구조물의 동특성 파악을 위해서는 진동해석 수행 시에 반드시 고려되어야 하는 부품이다. 일반적으로 고정자 코어의 진동해석은 기진력에 의한 공진을 예방하여 진동의 수준을 감소시키기 위해 수행되지만 고정자 코어의 형상과 적층판의 조립 방법 등으로 인하여 고정자 코어 모델링의 물성치를 등방성(isotropic)으로 고려해서는 고정자 코어의 동특성을 정확하게 파악할 수 없다.

본 논문에서는 충격실험을 통하여 발전기 고정자 코어의 고유진동수와 해당 진동 모드를 추출하고, 발전기의 구조

진동해석을 위한 고정자 코어의 모델링 및 이방성(orthotropic)을 고려한 고정자 코어의 진동해석 기법에 대하여 기술하였다.

2. 진동충격실험

2.1 실험 장치

실험에 사용한 고정자 코어는 당사에서 개발중인 1420 KVA급 발전기에 설치되는 것으로 Fig. 1에 실험을 위해 크레인에 권양된 고정자 코어의 모습을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 고정자 코어의 내부에 지그를 설치하여 크레인으로 권양하여 고정자 코어에 자유구속조건을 부가하도록 하였으며 충격 해머로 타격하여 3방향 가속도계로서 진동응답을 계측하였다. 진동응답은 총 54개의 지점에서 계측하였으며 16채널 주파수 분석기를 이용하여 진동분석을 수행하였다. Fig. 2에 개략적인 실험 장치도를 도시하였다.

* 현대중공업 선박해양연구소
E-mail : khw@hhi.co.kr
Tel : (052) 230-7401, Fax : (052) 230-5495

** 현대중공업 선박해양연구소

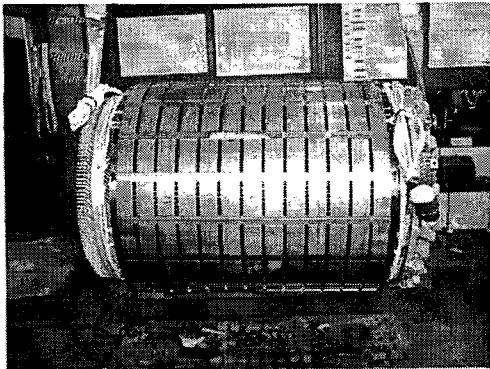


Fig. 1 View of the stator core

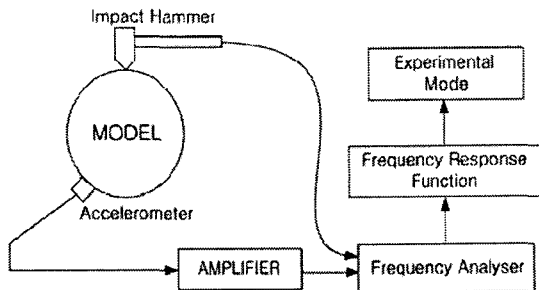


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental set-up

2.2 실험 결과

고정자 코어의 고유진동수와 해당 진동 모드를 확인하기 위하여 ME'scope VES 프로그램을 사용하여 분석하였다. 고정자 코어의 대표적인 지점에 대한 주파수 응답함수 (Frequency response function : FRF)를 Fig. 3에 나타내었으며, 분석된 여러 가지 진동 모드 중에서 대표적인 고정자 코어의 진동 모드를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 고정자 코어의 반경 방향으로 찌그러지는 모양의 진동모드가 175.3 Hz에서 가장 먼저 나타났으며, 비틀림 모드가 331.0 Hz, 굽힘 모드가 455.2 Hz에서 나타났다.

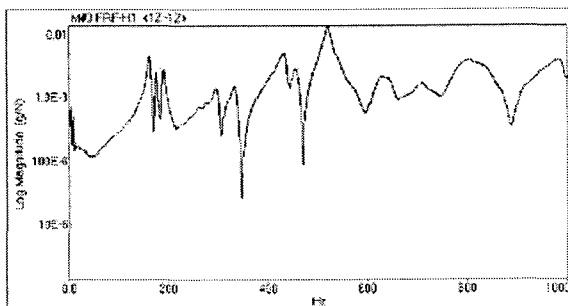


Fig. 3 Frequency response function of the stator core

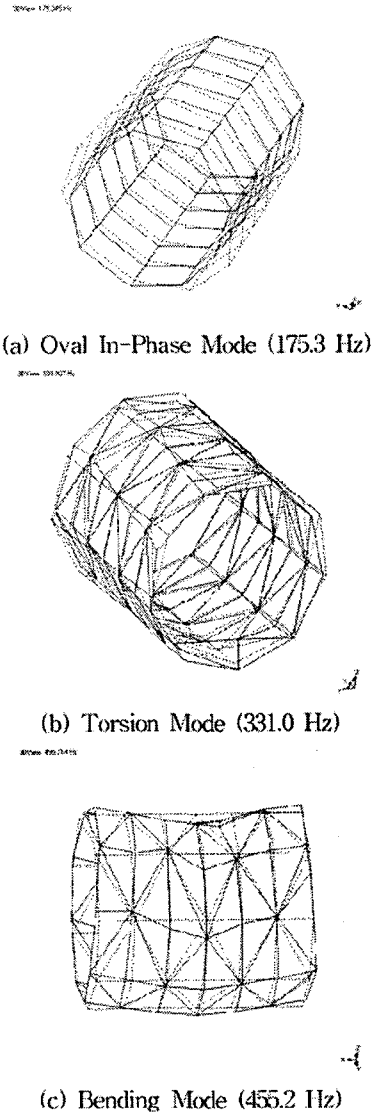


Fig. 4 Typical mode shapes and natural frequencies of experimental results

이상의 3 가지 진동 모드 이외에도 Fig. 4의 (a)의 Oval In-Phase 모드와 유사하게 고정자 코어의 길이 방향에 따라 찌그러짐의 방향이 반대가 되는 진동 모드와 그것의 고차 모드, 찌그러지는 단면의 모양이 삼각형인 진동모드, 전단 변형의 모드 등이 나타났다.

3. 진동 해석 및 결과 비교

발전기 고정자 코어의 고유진동수와 진동모드 등의 동특성을 파악하고, 실험 결과에 근접한 고유진동수와 진동모드를 얻기 위하여 일련의 진동해석을 수행하였다. 진동해석을 위한 모델링은 MSC/PATRAN을 사용하였으며 총 2016

개의 절점과 1404개의 입체요소(solid element)로 구성되었다. 고정자 코어의 조립 형상을 고려하여 반경방향으로 3개의 요소로 모델링하였으며, 모델의 가장 내부에 위치하는 요소는 권선이 설치되는 부분으로서 다른 부분의 요소보다 중량이 작기 때문에 밀도 값을 조정하였다. 모델의 좌표계는 이방성의 물성치 부과를 위하여 원통 좌표계(cylindrical coordinate)를 사용하였으며 만들어진 고정자 코어의 진동해석 모델을 Fig. 5에 나타내었다.

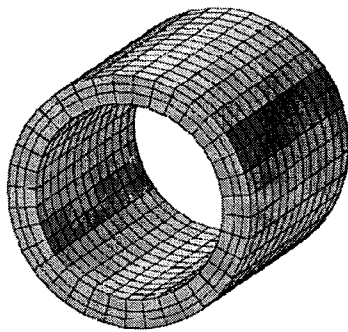


Fig. 5 Analysis model of the stator core

고정자 코어의 진동해석은 고정자 코어의 구조 및 조립 형상으로 인하여 고정자 코어는 방향에 따라 각각 다른 성질을 가지고 있기 때문에 고정자 코어를 이방성으로 처리하여야 한다. 고정자 코어의 각 방향에 따른 물성치는 Roivainen[1] 등이 수행한 결과를 참조하여 초기 값을 설정하였다. 해석에 사용한 초기의 물성치는 다음과 같다.

$$E_r = 0.64 \text{ GPa}, E_\theta = 20.0 \text{ GPa}, E_z = 7.0 \text{ GPa}$$

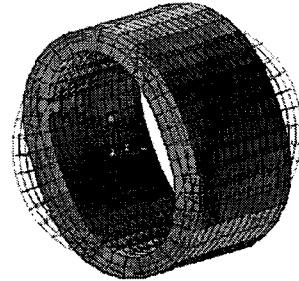
$$G_{r\theta} = 80.8 \text{ GPa}, G_{\theta z} = 2.0 \text{ GPa}, G_{zr} = 10.0 \text{ GPa}$$

$$\nu_{r\theta} = 0.1, \nu_{\theta z} = 0.16, \nu_{zr} = 0.6$$

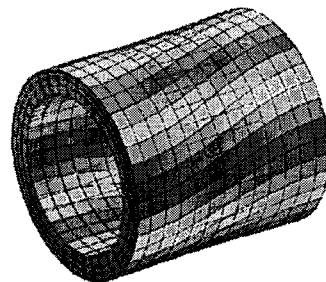
여기서 E 는 인장탄성계수, G 는 전단탄성계수, ν 는 프와송비이다.

초기 설정한 물성치를 이용하여 진동해석을 수행하여 계산된 진동모드와 고유진동수를 Fig. 6에 도시하였으며 실험에서 측정한 값들과 비교하였다. 여기에서 진동 대상모드는 역시 Fig. 4의 고정자 코어 대표 모드로 선정된 Oval In-Phase 모드와 비틀림 모드, 그리고 굽힘 모드이다. 초기 물성치에 대하여 계산된 고유진동수와 측정한 값과의 차이가 최소화되는 물성치를 구하기 위하여 먼저 각 진동모드의 고유진동수에 영향을 크게 미치는 물성치를 파악하였다. 9개의 각 물성치의 변화에 대한 각 진동모드의 고유진동수의 변화를 관찰한 결과, Oval In-Phase 모드에 대해서는 E_θ , 비틀림 모드에 대해서는 $G_{\theta z}$, 그리고 굽힘 모드에 대해서는

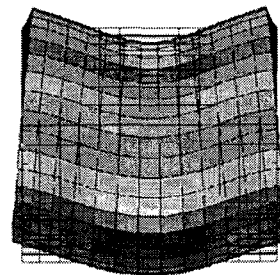
E_z 가 가장 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다. 물성치 변화에 따른 모드 별 고유진동수 변화를 Fig. 7에 나타내었다.



(a) Oval In-Phase Mode (174.2 Hz)



(b) Torsion Mode (330.7 Hz)



(c) Bending Mode (445.9 Hz)

Fig. 6 Typical mode shapes and natural frequencies of the analysis results

3가지의 대표적인 진동모드에 가장 큰 영향을 주는 E_θ , $G_{\theta z}$, E_z 의 변화에 대한 고유진동수의 변화를 계산하여 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Variation of the natural frequencies with the change of the material properties(Unit:Hz)

모드	Oval 모드 (f ₁)	비틀림 모드 (f ₂)	굽힘 모드 (f ₃)
계측값	175.3	331.0	455.2
초기치	155.8397	317.0864	403.0695
E_θ 2% 증가	157.2653	317.0864	403.4810
E_z 2% 증가	155.8447	317.0864	404.3996
$G_{\theta z}$ 2% 증가	155.8415	320.2020	405.3307

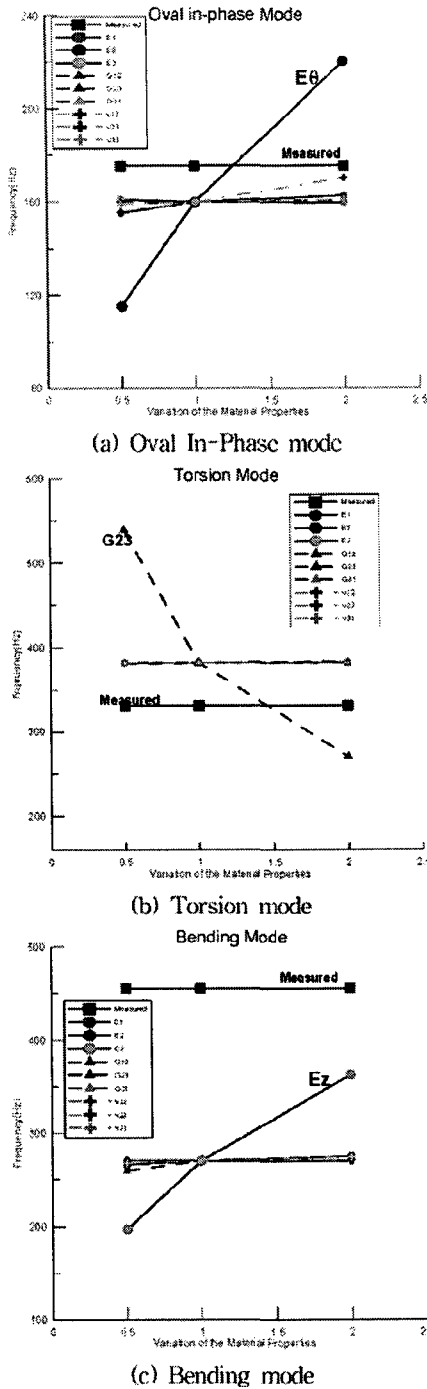


Fig. 7 Variation of the natural frequencies with the change of material properties

E_{θ} , E_z , G_{bz} 의 3가지 변수에 대한 고유진동수의 민감도와 예측된 고유진동수와의 차이를 최소화하기 위한 변수의 증분은 아래의 관계식을 이용하여 결정하였다.

$$f'_i = f_i + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial f_i}{\partial d_j} \cdot \Delta d_j, \quad i=1,3$$

$$\Delta d_j = \left[\sum_{i=1}^3 \frac{\partial f_i}{\partial d_j} \right]^{-1} (f'_i - f_i)$$

여기서 f'_i 는 예측된 고유진동수, f_i 는 해석 고유진동수, 그리고 Δd_j 는 요구되는 물성치의 변화량이다.

이 수식을 이용하여 계산한 물성치의 변화량을 초기 물성치에 반영하여 해석을 다시 수행한 후 계산된 고유진동수를 예측 고유진동수와 비교하였다. 그리고 해석과 예측 고유진동수의 차이가 설정된 허용치를 만족할 때까지 반복 해석하여 다음과 같은 최종 물성치를 선정하였으며, 그 때의 각 진동모드의 고유진동수를 계산하였다.

Table 2 Determined material properties

물성치	조건	초기 설정	최종 설정	등방성재료
E_{θ}		20.0 GPa	25.81 GPa	210 GPa
E_z		7.0 GPa	12.40 GPa	210 GPa
G_{bz}		2.0 GPa	2.18 GPa	80 GPa

Table 3 Comparison of the natural frequencies(Unit:Hz)

조건 \ 모드	Oval 모드 (f_1)	비틀림 모드 (f_2)	굽힘 모드 (f_3)
계측값	175.3	331.0	455.2
초기치	155.99	317.09	403.07
최종치	175.26	330.99	453.78

이상의 결과에서 발전기의 고정자 코어는 그 물성치가 각 방향에 따라 큰 차이를 보이는 이방성의 성질을 가지고 있음을 알 수 있다. 그리고 인장탄성계수와 전단탄성계수는 등방성 재료의 물성치보다 훨씬 작은 값을 가지는 것을 알 수 있다.

4. 결론

발전기 고정자 코어에 대한 충격실험을 수행하여 고정자 코어의 고유진동수와 해당 진동모드를 확인하였고, 이방성을 고려한 고정자 코어의 모델링 및 일련의 진동해석을 수행하였으며 그 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 적층된 발전기 고정자 코어는 고정자 코어의 구조 및 조립 형상에 의하여 각 방향의 물성치가 서로 다른 이방성의 성질을 가지고 있다.
- 2) 고정자 코어의 진동해석에 사용되는 인장 및 전단

탄성계수는 등방성 재료의 물성치보다 대체적으로 매우 작은 값을 가지고 있다.

참 고 문 헌

- (1) Janne Roivainen, Kari Kantola and Paul Kinge, "Structural Modelling of an Induction Machine Stator", Proceedings of ICSV, 2002.
- (2) R. S. Girgis and S. P. Verma, "Method for Accurate Determination of Resonant Frequencies and Vibration Behaviour of Stators of Electrical Machines", IEE Proceedings Part B : Electric Power Application 128(1), Jan. 1981, pp. 1~11.
- (3) Me'scope VES Operating Manual Ver. 2.0, Vibrant Technology, Inc., 2000
- (4) MSC/NASTRAN 2001 Quick Reference Guide, MSC Software, 2001.