

< 논 문 >

화력 발전용 발전기 고정자 프레임의 모드매개변수 규명

Modal Parameter Identification of a Generator Stator Frame for Fossil Power Plants

김 철 홍* · 류 석 주* · 박 종 포*

Cheol Hong Kim, Seok Ju Ryu and Jong-Po Park

(1999년 2월 6일 접수 : 1999년 5월 7일 심사완료)

Key Words : Modal Parameter(모드 매개변수), Generator(발전기), Stator Frame(고정자 프레임), Two-Pole Rotor(2극 회전자), Fossil Power Plant(화력발전소), Frequency margin(주파수 분리여유)

ABSTRACT

This paper presents numerical and experimental results of modal parameter identification in a generator stator frame for 500 MW fossil power plants. A commercial finite element analysis S/W was employed for modal analysis. The generator is excited by alternating electromagnetic forces, mainly of 120 Hz in 60 Hz machines, due to magnetic field and electric current in windings. It is necessary to verify that the stator frame has adequate frequency margin from the excitation frequency to avoid possible resonance when operating. Thus, frequency margin required for the stator frame is established using the numerical and experimental results. The results show that the stator frame meets the frequency-margin requirements. Also, results of modal analysis for design modification in order to reduce weights of the stator frame without deteriorating vibration characteristics are presented.

1. 서 론

발전용 대형 발전기는 회전자(로터)와 고정자로 구성되고, 고정자는 지지구조물인 프레임(frame)과 그 내부에 규소 강판으로 적층된 코어(core)로 나누어진다. 코어는 전자기적인 힘에 의해 가진 될 뿐만 아니라, 자기장과 전류로 인한 권선의 손실로 발생하는 열을 받는다. 고정자 프레임은 이와 같은 코어를 구조적으로 지지하고 냉각 매체인 공기나 가스 등의 통로를 제공한다. 발전기 고정자 프레임은 내

부의 가스 흐름을 원활히 유지하는데 필요한 공간 확보와 전자기력, 지진이나 전기적인 단락에 의한 힘 등에 견딜 수 있도록 정적 및 동적 해석을 통해 설계된다.

발전기의 주된 진동은 로터와 고정자 사이의 동적인 교번 전자기력에 기인한다. 이 힘은 고정자 코어를 가진하고 코어와 프레임 사이의 버팀대(suspension)를 통하여 프레임에 전달된다^(1~2). 일반적으로 60 Hz의 전력을 생산하는 화력발전소에서 N과 S의 양 극을 갖는 발전기 로터의 정격 회전수는 3600 rpm이다. 회전하는 로터의 양 극에서 발생하고 회전수의 2배에 해당하는 주파수를 갖는 전자기력은 고정자에 원주방향으로 4절점을 갖는 형태의

* 정회원, 한국중공업(주) 기술연구원

진동을 유발한다. 120 Hz 전자기 가진력에 의한 프레임의 공진을 방지하기 위해서는 프레임의 4절점 형태의 모드가 이 전자기력 주파수와 충분한 분리 여유를 갖도록 설계되어야 한다.

상대적으로 작은 용량의 2극 발전기 고정자 프레임은 가장 저차의 4절점 고유 모드의 주파수가 전자기력 주파수 보다 높도록 설계되고 하드 프레임(hard frame)이라 부른다. 그러나 대용량 발전기용 고정자 하드 프레임은 큰 직경, 두꺼운 리브(rib), 격판(section plate) 및 보어링(bore ring) 등으로 이루어진 구조를 가지기 때문에 무겁고 크게 되어 높은 제작 비용, 선적이나 설치 등의 문제를 야기시키므로 보다 경량화된 소프트 프레임(soft frame)으로 설계 된다. 이 소프트 프레임의 가장 저차 4절점 진동 모드의 주파수는 전자기력 주파수보다 낮게 설계 된다. 따라서 발전기 고정자 프레임을 설계할 경우에 반드시 고정자 프레임에 대한 모드 매개변수에 대한 충분한 데이터를 확보하여야 한다.

본 논문에서는 500 MW 화력 발전용 발전기 고정자의 소프트 프레임의 모드 매개변수를 수치해석과 모드 시험을 통하여 규명하였다. 또한, 고정자 프레임의 경량화를 위한 일환으로 설계변수인 격판 두께를 변화시키면서 관심있는 고유진동수의 변화를 관찰하였다. 이 결과를 바탕으로 운전 중 120 Hz의 전자기 가진력과 고정자 프레임과의 공진 회피 설계를 위하여 설계시 필요한 주파수 분리 여유를 제시하였다.

2. 수치 모드 해석

Fig. 1과 2는 당사에서 제작 중인 발전기 고정자 프레임의 구조와 유한요소 모델을 각각 보여 주고 있다. 프레임의 모델링은 상용 I-DEAS 소프트웨어를 사용하였고, 수치 모드 해석은 ANSYS를 이용하였다.

기본적으로 프레임은 보강을 위하여 내부에 용접된 환형 리브를 갖는 원형 셀의 형태를 가진다. 각 리브의 모서리에는 두꺼운 판으로 된 보어링이 용접되어 버팀대와 더불어 코어를 지지하고 있다. 각 리브에는 축방향으로 공기 튜브들이 지나가고, 프레임의 바깥쪽에는 냉각기 박스와 단자 박스가 대칭으로 붙어 있다. 프레임의 반경에 대한 두께비(R/h)가 100.1 (1902/19, 단위: mm)로서 얇은 실린더형 셀로 근사화할 수 있기 때문에 유한요소 모델에서 셀요소를 사용하였고, 리브와 보어링, 냉각기 박스, 단

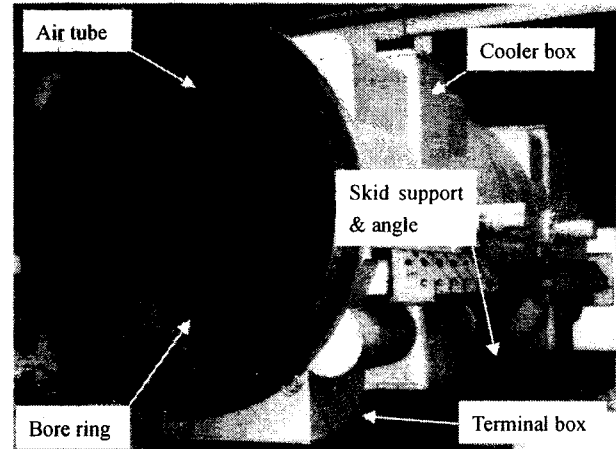


Fig. 1 500 MW generator stator frame

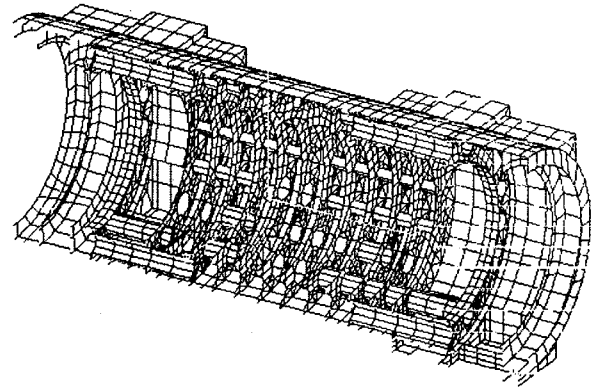


Fig. 2 Finite element model

자 박스와 공기 튜브의 모델링에도 역시 셀 요소를 사용하였다. 그리고, 지지대(skid support)와 이에 부착된 형강(angle)은 3차원 보 요소를 사용하였다. 사용된 요소들은 각각 4개의 절점과 3개의 절점을 가진 탄성 셀 요소와 탄성 보 요소이며 각 절점에서 6자유도를 가진다. 전체 요소 수는 7,512개이고 자유도는 36,654 이다.

사용된 프레임 재료의 영 계수(E)는 206 GPa, 밀도(ρ)는 7834 kg/m³, 포아송비(ν)는 0.3으로 하였다.

본 연구에서는 국부(local) 진동 모드 보다는 실린더 셀의 4절점 진동 모드에 관심이 있기 때문에 Guyan 축약법을 통하여 수치해의 자유도를 줄였다. Master DOF는 실제 실험에서 센서의 위치를 고려하여 원주방향으로 8점과 축방향으로 19점을 선택하고 자유도는 각 절점에서 원주방향으로 정의하였다.

실제 실험시 경계조건으로는 고정자 프레임의 단자 박스와 지지대에 연결된 형강에 각각 각목으로 4점 지지되는 조건이지만 본 해석에서는 이를 soft mounting으로 가정하여 경계조건을 자유 경계단 (free-free)로 하였다.

3. 실험 모드 해석

발전기 고정자 프레임의 진동 특성을 실험적으로 규명하기 위하여, 제작하고 있던 500 MW용 고정자 프레임에 대하여 충격 가진에 의한 모드 시험을 수행하였다. 길이 9 m, 직경 3 m인 500 MW 고정자 프레임은 공장 내에 콘크리트 바닥에 놓인 각목 위에 수직 4점 지지된 상태이다. 프레임은 원통형상이기 때문에 그 진동 모드는 원주 방향 모드(circumferential mode)와 축방향 모드(axial mode)가 동시에 나타난다. 원주형의 진동 모드에는 반경 방향과 접선 방향의 운동이 동시에 나타나고, 반경 방향에 비해 접선 방향의 진폭이 상대적으로 매우 작다. 이러한 관점에서 측정은 상대적으로 진폭이 큰 반경 방향에 대하여 수행되었다. 원주 방향으로 8개 지점, 축 방향으로 6개 지점을 응답점으로 선택하여 Fig. 3과 같이 총 48점에 가속도계를 부착하고 프레임 측면에 있는 응답점 중 한 점을 반경 방향으로 충격 가진하여, 총 48개의 주파수 응답 함수를 구하였다. 이들 주파수 응답 함수로부터 모드 해석 상용 소프트웨어(CADA-PC와 I-DEAS Test)를 이용하여 고유 진동수 및 고유 모드를 추정하였다. 여기서 관심있는 주파수 구간은 0~200 Hz로 하였다. 모드 매개변수를 구하기 위해 사용한 추정법은 LSCE

(Least Square Complex Exponential) 및 LSFD (Least Square Frequency Domain)이다.

4. 결 과

일반적으로 원통형 셀 구조물의 진동 모드는 원주 방향의 파수(wave number, n)와 축방향 반파수(half wave number, m)로써 나타낼 수 있다^(4~6). 고정자 프레임은 전자기력으로 가진된 코어의 진동에 의해 재차 가진되므로 프레임 역시 원주 방향으로 4-절점 형태의 진동을 하게 된다. 본 연구는 120 Hz 가진력에 의한 4절점 진동 형태의 공진을 피하기 위하여 원주방향으로 4절점 모드 형상을 가진 처음 3개의 진동 모드에 관심을 두었다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 실험으로부터 얻은 주파수 응답 함수에는 200 Hz이하에 많은 피크가 존재함을 알 수 있는데, 이는 고정자 프레임은 정확하게 실린더형 셀이 아니고 많은 구성품으로 이루어져 있기 때문에 4절점 원주방향 진동모드와 더불어 많은 국부 모드들이 나타나기 때문이다. 이 중에서 주파수 79.5 Hz의 모드는 셀 모드와는 관계없는 4절점 보(beam) 모드였다.

실험치는 Fig. 5(a) 및 (b)에서 볼 수 있듯이 MIF(modal indicator function)와 SD(stability diagram)에 의해 추정된 주파수 응답 함수로부터 얻었다. MIF는 다음과 같이 정의된다⁽⁸⁾.

$$MIF = \frac{\sum(|\operatorname{Re}(H)| |H|)}{\sum |H|^2} \quad (1)$$

여기서, H 는 주파수 응답 함수를 나타낸다. 식 (1)은 공진과 반공진(anti-resonance)에서의 H 의 실

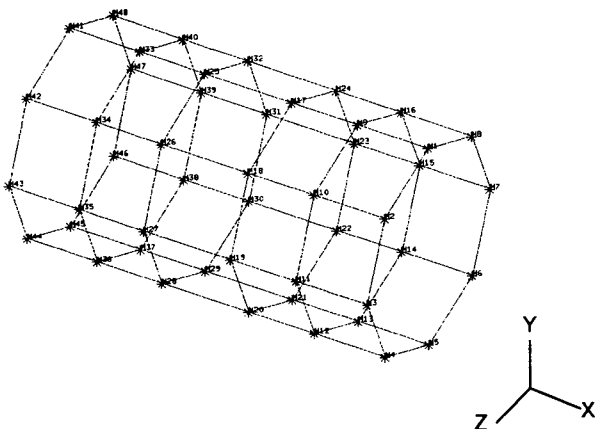


Fig. 3 Measurement points for experiment

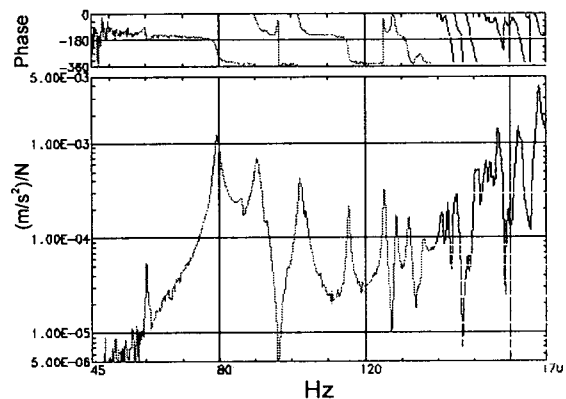
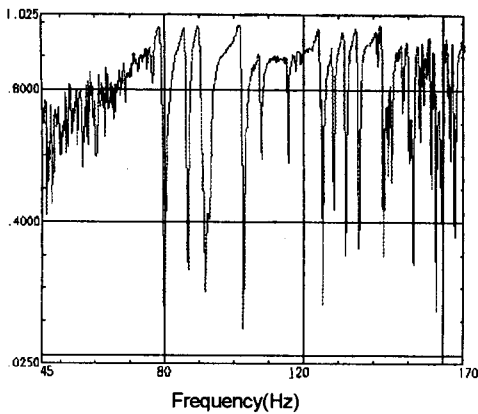
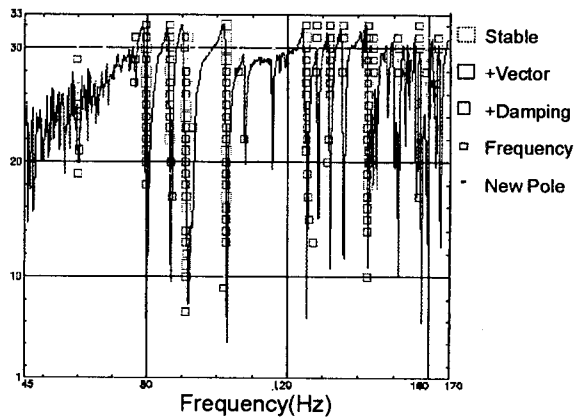


Fig. 4 Measured frequency response function



(a) Modal indicator function



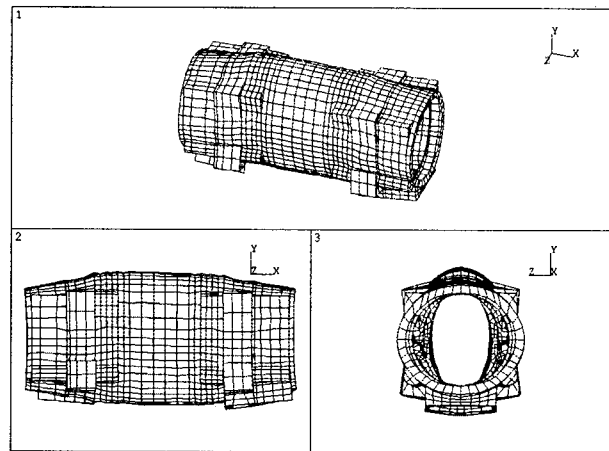
(b) Stability diagram

Fig. 5 Modal indication function and stability diagram

수부의 값이 각각 0과 1에 근접하며, 0에 가까운 주파수에서 정규 고유 모드가 존재한다는 것을 의미한다. 또한, SD는 추정된 모드 매개변수가 얼마나 신뢰성 있는가를 보여 주는 그래프이다. 이와같은 방법을 이용하여 실험에서 구한 주파수 응답 함수로부터 6개의 고유진동수를 선택하였다.

수치해석과 실험을 통해 구한 모드 벡터 사이의 상관성 정도를 알아보기 위하여 MAC(Modal Assurance Criteria) 을 사용하였다⁽⁹⁾. i 번째 실험 모드 벡터 ϕ_{ei} 와 j 번째 수치 해석 모드 벡터 ϕ_{nj} 사이의 MAC값은 다음과 같이 정의된다.

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



(a) Finite element analysis (94.9 Hz)

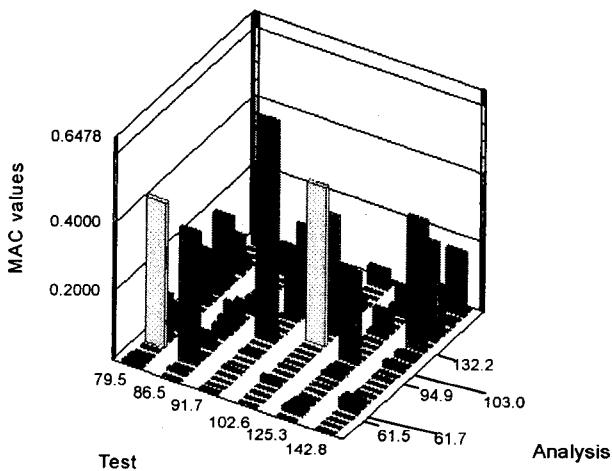
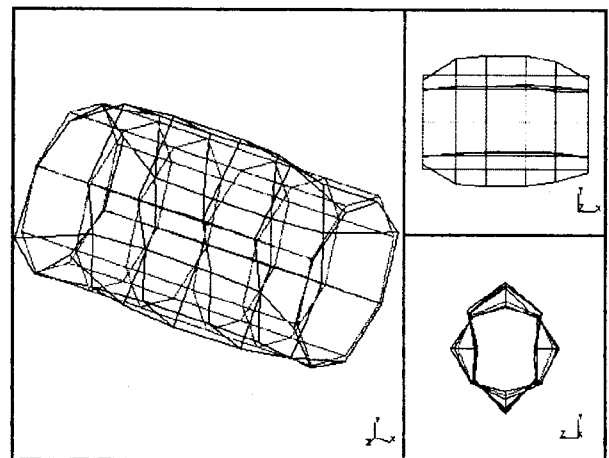


Fig. 6 Modal assurance criteria



(b) Experiment (91.7 Hz)

Fig. 7 1st significant mode ($n=2, m=1$)

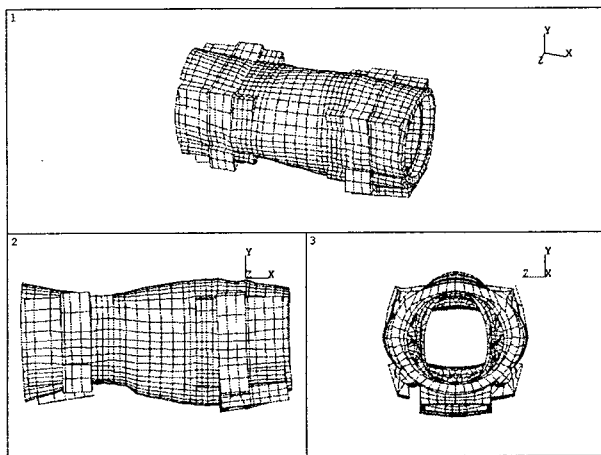
여기서, 첨자 *는 모드 벡터의 복소 공액 전치를 나타낸다. 고유진동수에 대한 MAC 행렬을 Fig. 6에 나타내었다. MAC 행렬로부터 의미있는 모드는 11번째 (94.9 Hz), 13번째 (103.0 Hz), 17번째 (132.2 Hz)의 수치해석 모드였으며, 이 모드와 관련된 실험 모드는 각각 3번째 (91.7 Hz), 4번째 (102.6 Hz), 6번째 (142.8 Hz)이다. Fig. 7, 8과 9는 이들 모드 형상을 각각 보여준다.

Fig. 7(a) 및 (b)는 수치해석과 실험으로 구한 고유진동수가 각각 95.0 Hz와 90.5 Hz인 모드 형상을 보여주며, 이는 원주 방향으로 4개의 절점을 가지고 ($n=2$) 축방향으로 셀의 1차 모드 ($m=1$)에 해당하는 원통형 셀의 fundamental (2,1) 모드임을 알 수 있다. 또한, 프레임의 축 중심선에서 동일한 반경 및 각도를 가지는 점들이 동위상으로 진동하는

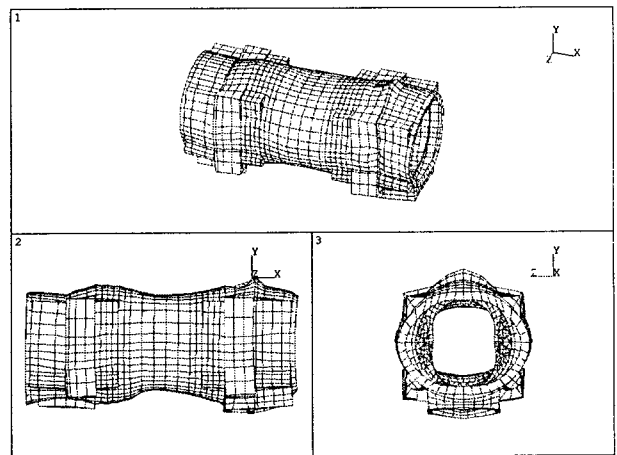
것을 볼 수 있다. 실험 결과의 경우 축방향의 모드 진폭이 축 중심선에 대해서 대칭을 이루지 않으며 4개 지지점 부근에서 원주방향의 모드는 완벽한 4절을 이루지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 프레임의 실험에서 사용된 4개의 지지점의 영향 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8(a) 및 (b)는 수치 해석과 실험으로 구한 고유진동수가 각각 103.0 Hz와 102.6 Hz인 모드 형상을 나타내며, 이는 원주 방향으로 4개의 절점을 가지고 ($n=2$) 셀의 2차 축방향 모드 ($m=2$)인 2차 (2,2) 모드이다. 앞의 1차 모드에 대한 결과에 비해 상대적으로 원주방향의 모드 형상이 4개 지지점의 영향을 적게 받는 것을 알 수 있으며 수치해석 결과와 비교해 보면 잘 일치함을 알 수 있다.

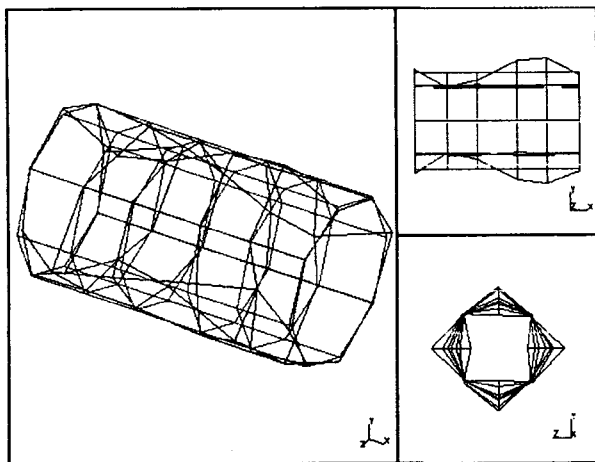
Fig. 9(a) 및 (b)는 수치 해석과 실험으로 구한



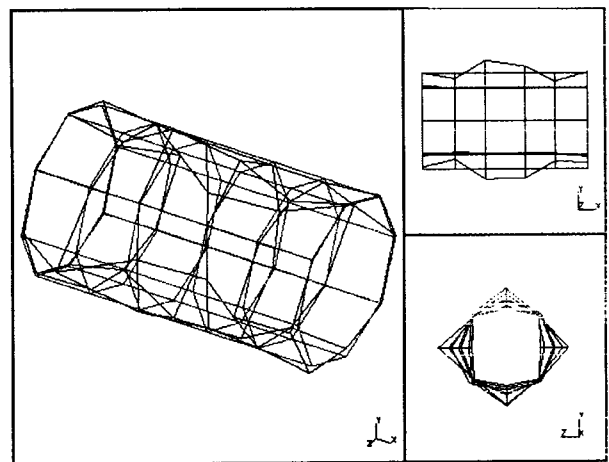
(a) Finite element analysis (103.0 Hz)



(a) Finite element analysis (132.2 Hz)



(b) Experiment (102.6 Hz)



(b) Experiment (142.8 Hz)

Fig. 8 2nd significant mode ($n=2, m=2$)

Fig. 9 3rd significant mode ($n=2, m=3$)

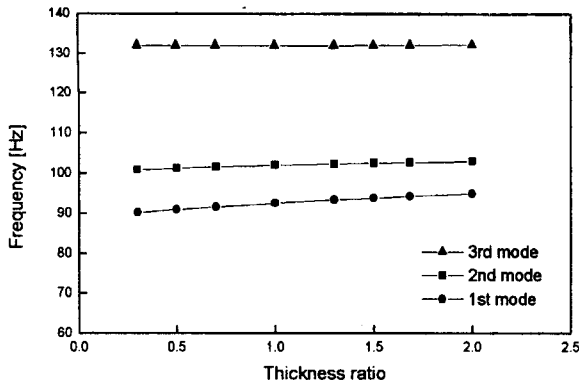


Fig. 10 Natural frequencies vs. thickness ratios

고유진동수가 각각 132.3 Hz와 142.8 Hz인 모드 형상을 나타내며, 이는 원주 방향으로 4개의 절점을 가지고 ($n=2$) 축방향으로 셸의 3차 모드 ($m=3$)인 3차 (2,3) 모드이다. 앞의 저차 모드들의 경우는 해석 결과와 실험 결과가 비교적 잘 일치함을 볼 수 있는데 반해 고차 모드인 3차 진동수의 경우에는 진동수가 약 8%의 차이를 보인다. 이것은 근사화된 유한요소 모델이나 실험 조건 등의 원인에 기인한 것으로 추측된다.

발전기 고정자 내에 코어를 지지하기 위한 키바(key-bar)와 코어 등의 구조물을 발전기 프레임 내부에 설치된 최종 출하 상태의 발전기 프레임의 고유진동수를 모드 시험으로 측정한 결과, 1차 및 2차 원주방향 4절점 주파수는 약 6 Hz 정도 감소하였고, 3차 원주 방향 4 절점 모드는 견고한 코어 등의 영향으로 나타나지 않았다. 이 3 차 모드가 나타나도 모드 기여도는 거의 무시할 수 있는 수준이므로 고정자 프레임 동특성 설계시 고려하지 않기로 하였다. 이상의 결과를 토대로 양극 발전기의 소프트 프레임의 경우 아래와 같은 주파수 분리여유를 설정하여 설계에 반영키로 하였다.

- (a) 실험에 의한 고유진동수: 5 %
- (b) 해석에 의한 고유진동수: 10 %

주파수 분리 여유는 다음과 같이 계산한다.

$$\%margin = 100 \times |f_n - f_m| / f_m \quad (3)$$

여기서 f_n 은 소프트 프레임의 1차 또는 2차 4 절점 고유 진동수, f_m 은 양극 발전기의 전자기 가진력의 주파수(120 Hz)를 나타낸다. 식 (3)으로 구한 주파수 분리 여유는 실험에 의한 1차 및 2차 고유모드의 경우 각각 25 % 및 15 %, 해석에 의한 고유모드의 경우 각각 21 % 및 14 %이므로, 모두 설계요구 조

건을 만족함을 알 수 있다.

고정자 프레임 경량화를 위한 설계 변경의 일환으로 여러 설계 변수 중에서 리브의 두께를 변화시키기에 따른 소프트 프레임의 고유진동수를 관찰하였다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 두께비(t/t_{ref} , $t_{ref}=19$ mm)를 0.3에서 2.0까지 변화시킬 때, 1차 4절점 고유진동수가 가장 큰 영향을 받으며 상대적으로 고차인 3차 진동수는 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있고, 모두 주파수 분리여유 조건을 만족함을 알 수 있다.

5. 결 론

대형 발전소용 500 MW 발전기 고정자의 소프트 프레임에 대해 유한요소 해석과 실험으로 모드 시험을 수행하여 원주방향 4절점을 갖는 진동 모드를 구하였다. 해석과 실험을 통하여 구한 1차 및 2차 4절점 고유모드와 120 Hz의 가진력과의 주파수 분리여유 설계조건을 설정하였고, 실험에 사용된 고정자 프레임은 설계조건을 모두 만족함을 보였다. 고정자 프레임 경량화를 위한 설계변경의 일환으로 리브 두께 변화에 따른 모드해석을 통해 프레임의 4 절점 고유모드를 구한 결과 모두 주파수 분리여유를 만족함을 보였다. 본 연구를 기초로 하여 향후 발전기에 작용하는 전자기력의 규명과 정격 운전 상태에서 프레임과 코어로 구성된 고정자의 진동해석을 통해서 진동 응답의 최대 진폭을 계산할 수 있다.

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, March 21~24.
- (2) Penniman, A. L. Jr., and Taylor, H. D., 1941, "Suppression of Magnetic Vibration and Noise of Two-Pole Turbine Generators", AIEE winter convention, Philadelphia, Jan. 27-31, pp. 41~39.
- (3) Richardson, P., 1966, "Stator Vibration in Large Two-Pole Generators", IEEE Winter Power Meeting, New York, No. 31 CP 66-50.
- (4) Leissa, A. W., 1993, Vibration of Shells, 한국소음진동공학회지/제 9 권 제 3 호, 1999년/575

- NASA SP-280.
- (5) Soedel, W., 1983, Vibrations of Shells and Plate, Marcel Dekker, Inc.
 - (6) Markus, S., 1988, The Mechanics of Vibration of Cylindrical Shells, Elsevier, Amsterdam.
 - (7) Swanson Analysis Inc., 1992, ANSYS Users Manual: Volume III.
 - (8) SDRC Inc., 1997, I-DEAS Modal Analysis Users Guide
 - (9) Friswell, M. I., and Mottershead, J. E., 1995, Finite Element Model Updating in Structural Dynamics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
 - (10) 한국중공업(주), 1998, 발전기 고정자 프레임 진동 해석, 연구보고서.