

지반침하 기인 저압 증기터빈 케이스 진동 저감

Vibration Reduction of a LP Turbine Casing due to Subsidence

신범식*·최연선†

Bum Sik Shin, Yeon Sun Choi

Key Words : LP Turbine Casing(저압 증기터빈), Subsidence(지반침하), 케이스 공진(Casing resonance)

ABSTRACT

The vibration of a LP turbine casing may cause the problems of power generation and the life of its facility. In this study, we carried out on-site measurements of a LP Turbine in order to find the cause of the vibration and conducted experimental and numerical modal analysis of the turbine with its support frame. The measurement and the modal analysis show that the natural frequency of the turbine becomes close to 60 Hz due to the subsidence of the support. The elimination of the subsidence by shimming between the turbine and the support frame gave rise to the reduction of the vibration of the LP turbine case.

1. 서 론

발전용 증기터빈은 증기 압력에 따라 고압과 저압 증기터빈으로 구분되며, 각각의 로터를 회전시켜 발전기를 구동하고 있다. 이때 회전체의 불평형, 러빙 등 다양한 원인에 의한 진동이 발생하여 발전설비의 안정성에 영향을 미친다. 특히 로터를 감싸고 있는 케이스의 경우 로터 베어링을 통해 회전체 진동이 전달되고 있다. 본 연구는 국내 화력발전소 저압증기터빈 케이스 고진동 발생 사례에 대한 진동원인을 분석하고 저감방안을 도출을 목표로 하였다.

터빈 케이스와 같은 구조진동 저감방안에 대한 다양한 연구가 있었다. Forbes⁽¹⁾는 가스터빈 케이스 진동예측을 위해 로터에서 발생하는 진동을 예측하고, 셸모델을 이용하여 진동량을 예측하였다. 이우광⁽²⁾은 터빈-발전기 고진동 원인을 로터의 불평형 질량으로 판단하고, 로터 밸런싱을 통한 진동저감 방

안을 제시하였다. 하현천⁽³⁾은 증기터빈의 러빙(rubbing) 기인 고진동 현상 연구를 통해 열적 불평형으로 인한 블레이드 고정부의 팽창으로 회전부와 고정부 사이 러빙이 증기터빈의 진동원인을 밝혔다.

본 연구에서는 발전소 현장 측정을 통해 저압 증기터빈 케이스 고진동 현상을 분석하고, 터빈 케이스 지지부에 대한 점검을 통해 고진동 원인을 분석하였다. 고진동 현상에 대한 해석을 위해 3차원 실측 도면을 바탕으로 전산해석을 하였다. 전산해석 모델의 타당성 검증을 위해 현장 측정데이터와 비교하였으며, 이를 기반으로 진동저감방안을 도출하였다. 현장실측 및 전산해석을 통해 하부침하에 의한 케이스 동특성 영향을 확인하고, 케이스 하부침하를 보완하여 진동저감 효과를 확인하였다.



Fig. 1 LP turbine casing

† 교신저자; 정회원, 성균관대학교
E-mail : yschoi@yurim.skku.ac.kr
Tel : 031-290-7501, Fax : 031-290-5889

* 성균관대학교

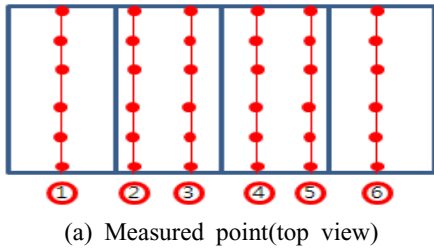
2. 케이스 고진동

2.1 고진동 현상 측정

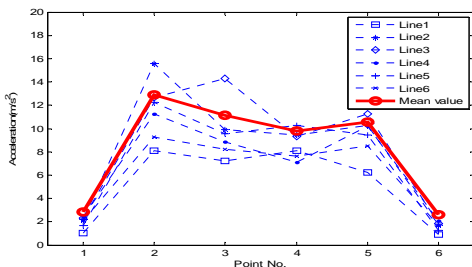
저압증기터빈의 고진동 현상에 대한 원인분석을 위해 진동측정을 하였다. Fig. 2는 고진동이 발생하는 케이스에 대한 현장측정 사진이며, Fig. 3은 진동특성을 분석한 결과이다. Fig. 3(a)와 같이 주요 고진동 위치는 케이스 측면부에서 발생하며, Fig. 3(b)와 같이 비대칭 진동이 발생함을 알 수 있다.



Fig. 2 Vibration measurement at the site



(a) Measured point(top view)



(b) Acceleration(RMS)

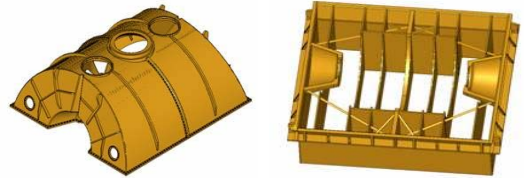
Fig. 3 Vibration response

2.2 터빈 케이스 모드해석

저압 증기터빈에서 발생하는 고진동을 저감시키기 위해 진동원인에 대한 분석이 이루어져야 한다. 이를 위해 터빈케이스에 대한 전산해석모델을 만들고 동특성을 해석하였다. 전산해석을 위해 Fig. 4의 구조물을 3차원으로 실측하였고, 실측 데이터를 바탕으로 Fig. 5와 같이 상용프로그램 SAMCEF⁽⁴⁾를 이용한 전산해석 모델을 만들었다.



Fig. 4 LP Turbine case



(a) upper (b) bottom

Fig. 5 3D CAD model

터빈 케이스에 대한 모드해석 및 모드시험을 하였다. 케이스에 대한 모드시험 시 케이스의 하중을 고려하여 케이스 상단 4개 위치를 고정하여 크레인 으로 자유단 상태를 만들어 충격시험을 하였다. 충격시험 시 케이스 자중에 의하여 크레인 고정부에 경계조건이 발생하고 모드시험 결과에 반영됨에 따라 해석의 타당성 검증 시 모드시험과 동일하게 연결부 4개 위치에 강성조건을 부여하였다. Fig. 6은 케이스를 들어 올린 상태의 사진 및 전산해석 모델이다. 해석결과 Table 1과 같이 충격모드 결과가 해석과 일치함을 확인할 수 있다. 그러나 4차모드 까지로 실제 가진주파수인 60 Hz와는 거리가 있어 공진이 발생함을 설명할 수는 없다.



Fig. 6 Modal analysis model

Table 1 Natural frequency of the lifted upper casing

[unit : Hz]

Mode No.	Experiment	SAMCEF
1	8.5	8.8
2	15	19
3	26	27
4	36	38

이에 자유단 상태의 전산해석 모델을 기반으로 케이스 하단이 고정된 형태로 모드해석을 다시 하였다. Fig. 9는 하부 완전고정 상태의 모드형상이다. 해석결과 1차 고유진동수가 62 Hz로 터빈 회전주파수 60 Hz에 유사함을 알 수 있다. 그러나 2 Hz 차이로 공진을 설명하는데 한계가 있다. 이를 확인하기 위해 하부케이스를 조립한 형태로 모드해석을 하였다. 하부케이스 중간 부위는 고정된 상태이다. 해석결과 Fig. 10과 같이 5차 모드에서 60.9 Hz의 케이스 진동모드가 나타났으며, 이는 상부케이스만을 해석 시 62 Hz의 1차 모드형상과 동일한 형상이다. 이는 하부케이스 적용 시 상부케이스만 해석한 경우에 비해 지지강성이 상대적으로 낮아짐에 따라 고유진동수가 낮아짐을 확인할 수 있으며, 터빈케이스의 지지부 강성이 낮아짐에 따라 고유진동수가 낮아질 수 있다.

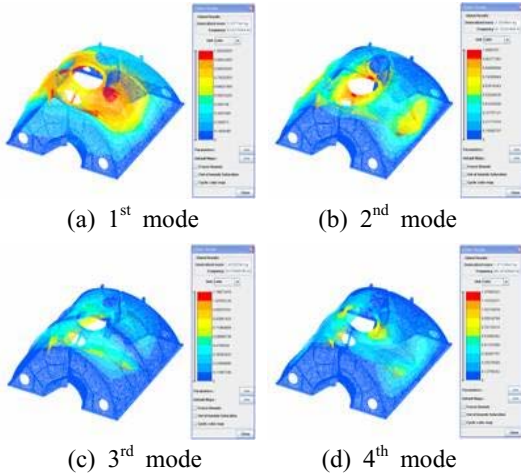


Fig. 9 Mode shape(fixed)

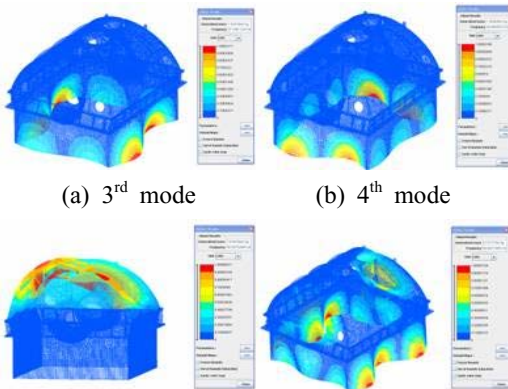


Fig. 10 Mode shape(upper & under)

Table 2 Natural frequency of the casing

[unit : Hz]

Mode No.	Upper casing (fixed)	Upper & Under casing
1	62.0	43.3
2	68.1	52.2
3	72.6	60.9
4	81.5	63.5

2.3 지지강성 영향

지지부 강성에 의한 고유주파수 저하를 확인하기 위해 평판모델을 해석하였다. Fig. 11은 평판모델이다. 식 (1)은 평판방정식에 대한 운동방정식이다. 이때 경계조건은 식 (2)와 같다. 이에 대한 고유진동수는 식 (3)과 같다.



Fig. 11 Plate model

$$D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

$$M_x = -D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)\Big|_{(a,y,t)} = 0 \quad (2)$$

$$V_x = -D\left[\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu)\frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2}\right]\Big|_{(a,y,t)} = -k_1 w(a,y,t) \quad (a=0)$$

$$V_x = -D\left[\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu)\frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2}\right]\Big|_{(a,y,t)} = -k_2 w(a,y,t) \quad (a=l)$$

$$\omega_{nm} = \pi^2 \left(\frac{D}{\rho h}\right)^{0.5} \left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \frac{k_1}{\rho h} + \frac{k_2}{\rho h}\right] \quad (3)$$

해석 시 평판의 설계값은 Table 2와 같다. 해석 시 지지강성을 평판의 강성에 비해 높게 하여 설계한 후 강성을 낮춰가며 모드해석 하였다. 해석결과 Fig. 11과 같이 지지강성이 낮아짐에 따라 고유진동수가 낮게 나타나며, Fig. 12와 같이 비대칭 형상이 나타남을 알 수 있다.

Table 2 Design parameter of rectangular plate

a (m)	b (m)	ρ (km/m ³)	E (GPa)	ν (poisson's ratio)	k (N/m)
0.1	0.1	7200	168	0.33	8×10^7

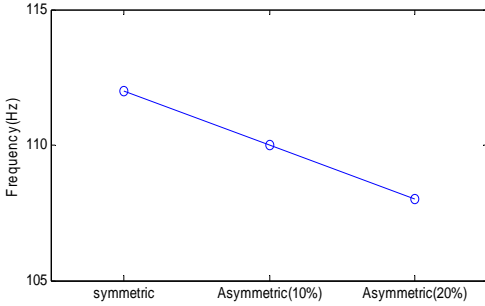


Fig. 11 Effect of the support elasticity

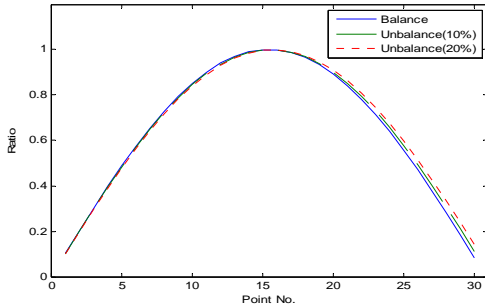


Fig. 12 Mode shape(asymmetry effect)

3. 진동저감 방안

3.1 하부침하 영향

지지부 강성저하 원인을 규명하기 위해 케이스 하부의 침하 상태를 점검하였다. Fig. 13은 케이스 하부 기단부에 대한 처짐량 측정위치이다. 이때 LPA, LPB는 1개의 발전기를 구동하기 위한 2기의 저압터빈이다. 각각의 위치에서 측정결과 Fig. 14와 같이 기단부에 하부침하가 발생했음을 확인할 수 있다.

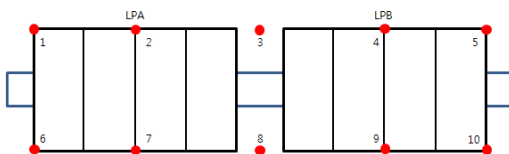


Fig. 13 Measurement point

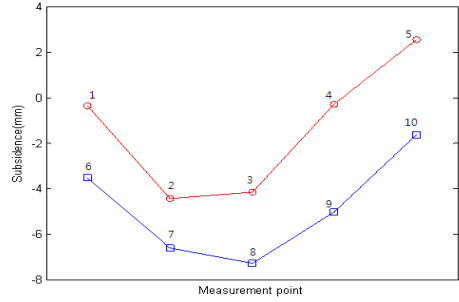


Fig. 14 Subsidence of LP turbine

하부침하의 효과를 알기 위해 Fig. 15과 같이 하부케이스 지지부를 사각틀로 모델링하고, 침하 부분에 단차를 두어 모드해석을 하였다. 해석결과 Fig. 16과 같이 하부침하가 발생했을 때 모드주파수가 낮아지며, 케이스의 고유진동수가 터빈의 회전주파수인 60 Hz에 근접함을 알 수 있다. 모드해석을 통해 확인한 하부침하에 대한 케이스 진동 영향을 확인하기 위해 가진해석을 하였다. 해석 시 하부케이스 및 하부침하를 모델링하기 위해 Fig. 17과 같이 케이스 하부에 3축 지지강성을 모델링 하였다. 가진력은 케이스 하부 연결부에서 측정된 값을 바탕으로 가진하였다.

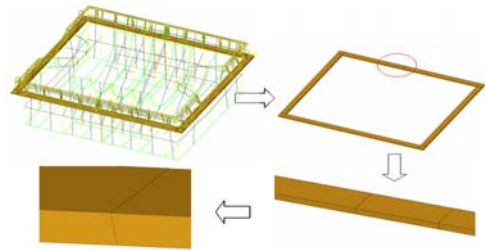


Fig. 15 Modeling of subsidence

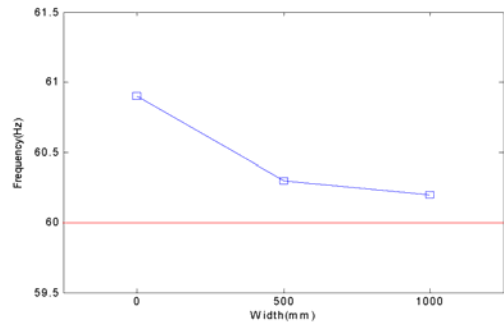


Fig. 16 Effect of the subsidence

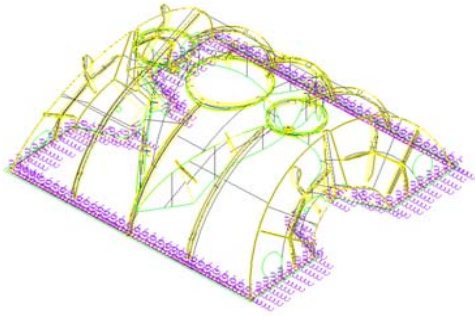


Fig. 17 Ground spring support

해석결과 Fig. 18과 같이 하부침하 발생위치에 대하여 비대칭 진동응답이 나타남을 알 수 있으며, 시험결과와 비교하면 Fig. 19과 같이 해석 경향이 유사함을 알 수 있다. 이에 하부침하를 제거한 상태에 대한 가진해석을 하였다. Fig. 20은 하부침하를 제거하기 전과 제거한 후 효과를 비교한 것이며, 평균 34 % 진동저감 효과가 나타남을 알 수 있다.

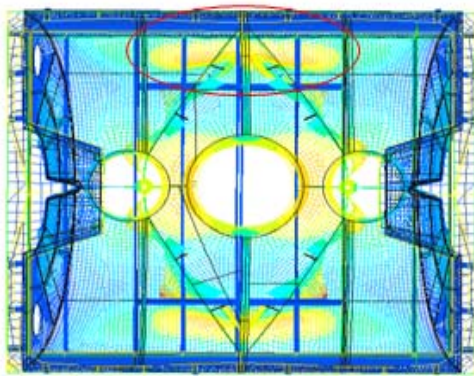


Fig. 18 Vibration shape of LP casing

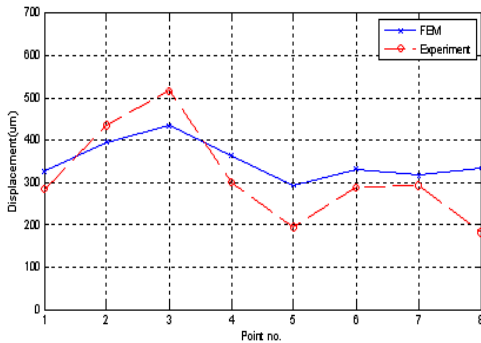


Fig. 19 Experiment and SAMCEF result

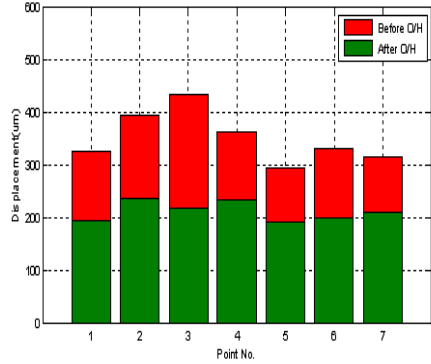


Fig. 20 Effect of the subsidence(SAMCEF)

3.2 하부침하 보강

하부케이스 지반침하 보강을 위해 Fig. 21의 위치에 Fig. 22와 같이 하부케이스와 지반 사이 심(shim)을 삽입하였다. 심 삽입 효과를 확인하기 위해 보강 전후 케이스 진동량을 확인하였다. Fig. 23는 터빈 케이스 진동측정 위치를 나타낸 것으로 24개 위치의 진동변위를 측정하였다. 측정결과 Fig. 24와 같이 각 위치별 진동변위가 작아짐을 알 수 있으며 평균 36 % 진동저감효과가 나타남을 알 수 있다.

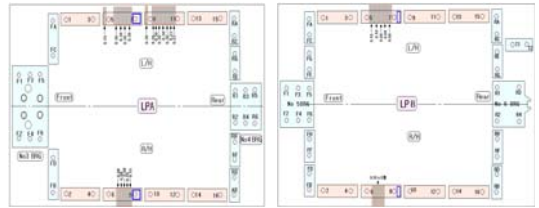


Fig. 21 Subsidence of under-case



Fig. 22 Shim insertion

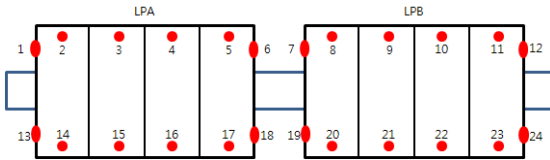


Fig. 23 Measured points

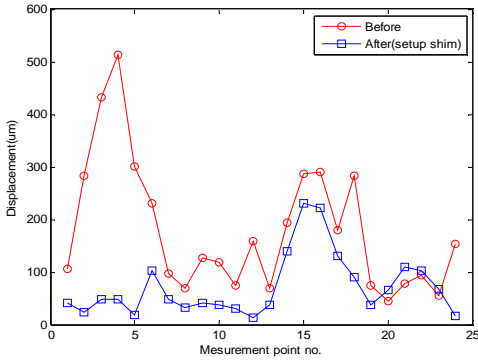


Fig. 24 Effect of the subsidence

4. 결 론

저압 증기터빈 케이스 고진동 현상에 대한 시험 및 전산해석을 통해 다음과 같은 결과를 확인하였다.

- 저압 증기터빈 케이스 고진동 현상은 회전주파수와와의 공진현상이며, 케이스의 기반침하에 의한 지지강성 저하가 주요 원인이다.
- 하부케이스 침하 보강을 통해 진동량을 줄일 수 있으며, 하부침하 보강 시 34 %의 진동저감 효과가 예측었다.
- 예측결과를 바탕으로 증기터빈케이스 하부침하 보강 적용 시 36 % 진동저감 효과가 나타남을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] G.L. Forbes, R.B. Randall, 2007, "Simulated gas turbine casing response to rotor blade pressure excitation," Austranlasian Congress on Applied Mechanics 2007, Vol. 1, No. 2, pp. 223~228.

[2] Lee WooKwang, Ko WooSig, Kim KyeYean, Koo JaeRaeyang, 2007, "Analysis of high vibration in nuclear turbine-generator," KSNVE, Vol. 2, No. 5, pp. 1024~1028.

[3] H. C. Ha, S. P. Choi, 1999, "Vibraion characteristics of steam turbine due to the rubbing," KSPSE, Vol. 3, No. 1, pp. 5~8.

[4] SAMCEF field, SAMTECH. 2011.