

# 보일러 튜브군의 음향공진 회피를 위한 음향배플의 위치에 따른 FEM 음향모드해석

FEM acoustic modal analysis due to location of acoustic baffles to avoid  
acoustic resonance in the tube bank of boiler for power plant

안성종† · 주영호\* · 김철홍\*

Sung Jong Ahn, Young Ho Ju and Cheol Hong Kim

**Key Words :** Acoustic resonance(음향 공진), Acoustic modal analysis (음향 모드 해석), Vortex shedding frequency (와류 주파수), Acoustic Baffle (음향 배플), Boiler (보일러)

## ABSTRACT

A flow induced mechanical vibration and acoustic resonance should be considered at design stage because they are mainly occurred in the tube bank of boiler. Acoustic resonance is occurred when the vortex shedding frequency of tube bank coincides with the acoustic natural frequency of the cavity. Effective solution to avoid acoustic resonance is installing acoustic baffles in the tube banks parallelly inside of the flow cavity. Thus, location and number of acoustic baffles should be exactly calculated to eliminate the acoustic resonance. This paper presents case study of acoustic resonance due to inappropriate number and location of acoustic baffles. Measured frequency and mode in the study is verified by FEM acoustic modal analysis. The number and location of acoustic baffles to avoid acoustic resonance are calculated by using FEM acoustic modal analysis.

## 1. 서 론

발전용 보일러에는 열교환을 하기 위해 많은 튜브군이 설치되어 있다. 설치된 튜브내부에는 액체상태의 물이나 증기와 같은 저온상태의 유체가 흐르고 튜브외부에는 고온상태의 연소가스가 흐르게 되어 튜브내부 유체에 열을 공급하게 되며 열전달 효율을 증가시키기 위해 튜브배열, 튜브형상 등을 정하게 된다. 튜브와 수직방향으로 지나가는 연소가스는 튜브를 지나면서 튜브주변으로 와류(vortex)를 유발하게 된다. 튜브군에 생기는 와류는 와류주파수(vortex shedding frequency)를 가지며, 이러한 와류주파수와 보일러 내부의 공간(cavity)의 음향 고유 주파수(acoustic natural frequency)와 일치하면 음향 공진(acoustic resonance)이 발생한다.<sup>(1)</sup>

음향공진은 다양한 튜브형태와 배열을 가진 여러가지 열교환기에서 광범위하게 나타나는 현상이며, 이러한 공진은 보일러 구조물에 큰 진동과 소음을 발생시켜 구조적인 파손이 일어나거나 과도한 소음 문제를 발생시킨다.<sup>(1),(6),(7),(8)</sup> 본 연구에서는 음향 공진 이론 모델과 보일러 튜브군에서 와류주파수로 인하여 발생한 음향 공진 사례와 해당 사례에 대하여 음향 모드 해석을 수행하였고 음향 공진 회피를 위한 수정된 모델에 대하여 음향 모드 해석을 수행하여 공진 회피 가능성을 검토하였다.

## 2. 음향공진 이론모델

### 2.1 와류주파수

원형의 튜브표면을 유동하는 유체는 튜브표면에서 발생하는 유동박리(separation)로 인하여 와류 현상이 발생하며 이때 발생하는 와류 주파수는 다음과 같다.<sup>(1)</sup>

† 교신저자; 두산중공업 기술연구원

E-mail : seongjong.ahn@doosan.com

Tel : 042-712-2116, Fax : 042-712-2119

\* 두산중공업 기술연구원

$$f_{vs} = \frac{SV}{D}, [\text{Hz}] \quad (1)$$

여기서,

S: Strohaul number, 무차원상수

V: 유체 속도[mm/s]

D: 튜브 직경 [mm]

## 2.2 공간의 음향 고유주파수 계산

튜브군에서 발생하는 음향고유주파수는 매질 (medium)에서의 음속(speed of sound)에 비례하고 유체가 지나가는 공간의 폭에 반비례한다. 밀폐된 공간에서의 음향고유주파수는 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>(2)</sup>.

$$f_{ijk} = \frac{c}{2} \left( \frac{i^2}{L_x^2} + \frac{j^2}{L_y^2} + \frac{k^2}{L_z^2} \right), [\text{Hz}] \quad (2)$$

와류 현상은 튜브 축방향과 수직하고 유동방향과 수직한 방향으로 발생하여 움직이고 음향공진은 이와 동일한 방향으로 움직인다. 따라서 식 (2)는 식 (3)과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$f_n = \frac{nC}{2W}, [\text{Hz}] \quad (3)$$

여기서,

$n$ : 1, 2, 3,...

W: 공간(cavity) 폭 [mm]

C: 음속,  $C = \sqrt{\gamma_g RT}$ , [mm/s]

( $\gamma_g$ : 기체의 비열비, R: 기체상수 T: 온도 [K])

## 2.3 댐핑 파라미터 (damping parameter)

음향공진 발생 가능성은 와류 주파수뿐 아니라, 댐핑 파라미터에 의한 판별이 가능하다.

$$\psi = \frac{R}{S} \left( 1 - \left( \frac{1}{X_L} \right) \right)^2 \frac{1}{X_T} \quad (4)$$

여기서,

R: Reynolds Number

S: Strouhal Number

$X_L$ : 종방향 튜브 간격비

$X_T$ : 횡방향 튜브 간격비

Chen and Young에 의하면, 댐핑 계수인  $\psi$ 가

2000이상일 경우에는 음향공진이 발생하며, 4000 이상일 경우에는 강한 공진이 발생한다.<sup>(3,4)</sup>

## 3. 보일러 이상 진동 및 소음 사례

보일러 시운전 중, 100% 부하에서 전열부 (convection cage)에서 이상 진동 및 소음이 발생하였으며, 이러한 이상 진동 및 소음은 soot blowing전에는 모두 기준치 이하로 양호하였으나, soot blowing 후에는 진동 및 소음 모두 기준치 이상으로 측정되었다.

Soot blowing은 튜브 관군에 붙어 있는 이물질을 제거하는 작업으로 효율적인 열 교환을 위해 수행된다. Soot blowing 후 튜브 관군에 붙어있는 이물질이 제거 되면서 튜브 관군에 의한 와류 주파수가 변하기 때문에 이상 소음 / 진동이 발생한다.

Fig. 1는 진동 및 소음 측정 지점을 나타내고 있다.

측정은 진동 및 소음에 대하여 측정하였으며 진동 측정 위치는 RH II 부터 아래로 a, b, c 이며 소음 측정 위치는 RH I 부터 아래로 1, 2, 3, 4 이다.

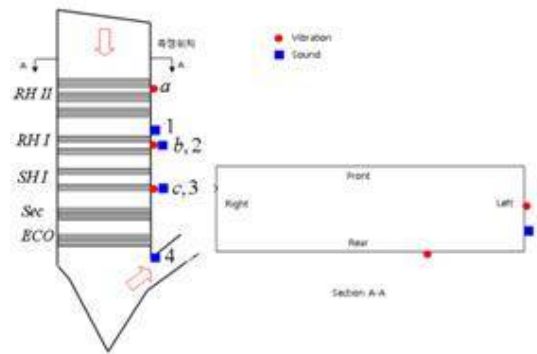


Fig. 1 Schematic of measurement points

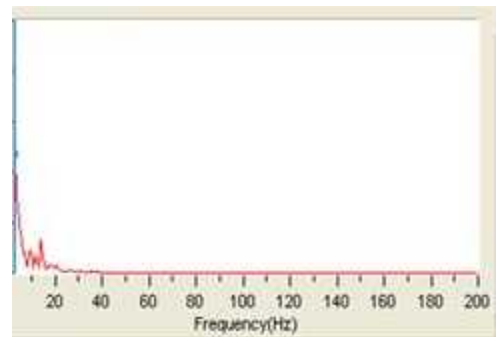


Fig. 2 Vibration spectrum at full load before soot blowing

Soot blowing 전 100% 부하까지 진동치는  $100 \mu\text{m}$ , pk-pk 이하였으며 주파수 분석 결과 지배 주파수가 나타나지 않았다. Fig. 2 는 Soot blowing 전 100% 부하에서 측정위치 a에서 왼쪽 벽면에서 진동 측정 값이며, 그래프에서 알 수 있듯이 지배 주파수가 없음을 알 수 있다. 이러한 현상은 다른 위치 (b, c) 에서 동일하게 측정되었다.

Soot blowing 후 95% 부하에서 이상 진동과 소음이 발생하였으며 95% 부하에서는 최대 진동치가  $100 \mu\text{m}$ , pk-pk 이상 발생하였으며 지배 주파수는 40.5 Hz였다. 100% 부하에서도 동일하게 최대 진동치가  $100 \mu\text{m}$ , pk-pk 이상 발생하였으며 지배주파수는 41.5 Hz 였다.

Fig. 3은 Soot blowing 후 100% 부하에서 측정위치 a에서 왼쪽 벽면에서 진동 측정 값이며, 그래프에서 알 수 있듯이 약 40 Hz 부근에서 지배주파수가 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 다른 위치 (b, c) 에서 동일하게 측정되었다.

Fig.4는 Soot blowing 후 2번 위치에서 소음 측정 값으로 진동과 동일한 스펙트럼을 보이며, 가장 큰 소음 값은 4번 위치에서 발생하였다.

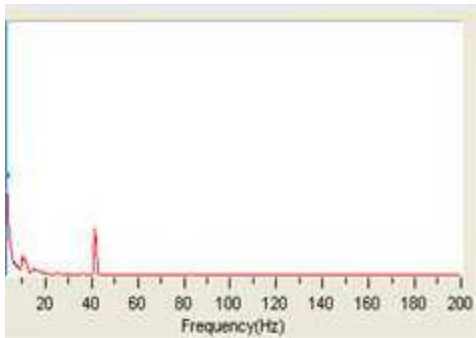


Fig. 3 Vibration spectrum at full load after soot blowing

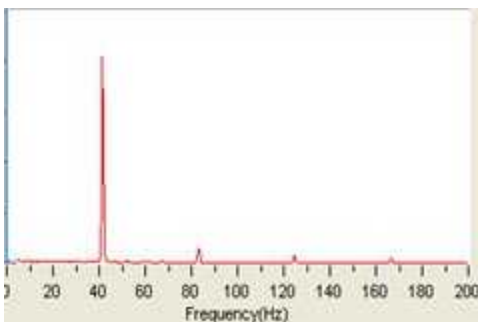


Fig. 4 Sound spectrum at full load after soot blowing

#### 4.1 와류주파수(vortex shedding frequency) 계산

식(1)을 활용하면 다음과 같이 와류 주파수를 계산할 수 있으며, 각 보일러 위치에 따른 와류 주파수는 다음과 같다. 해당 주파수는 100% 부하일 경우 계산된 주파수이다.

Table 1 Vortex shedding frequency

	RH II-1	RH II-2	RH II-3	RH I-1	RH I-2
Vortex shedding frequency (Hz)	51.6	48.7	45.8	74.5	62.7
	SH I-1	SH I-2	Sec. ECO-1	Sec. ECO-1	
Vortex shedding frequency (Hz)	44.5	43.7	67.2	63.3	

#### 4.2 FEM 음향 모드 해석

음향 배플 (acoustic baffle)은 강제로 고정 조건을 부여함으로써 밀폐 공간(cavity)의 고유주파수를 변화시킨다. 일반적으로 공간의 음향 고유주파수를 구하는 식(2), (3)의 경우 배플의 효과인 강제 고정 조건을 고려되지 않았기 때문에 배플을 효과적으로 고려하기 위하여 FEM 해석 Tool인 ANSYS Workbench를 활용하여 음향 모드 해석을 수행하였다.

FEM 해석은 최대 진동치가 발생하는 보일러의 SH-I 위치의 공간을 모델링 하였으며 배플 부분은 매질이 없는 것으로 모델링 하였다. Table. 2는 100% 부하에서의 FEM 해석 결과 고유주파수 값이며, 표에서 알 수 있듯이 3차 모드 고유 주파수 값은 41.5 Hz로 실제 측정 주파수와 비슷한 값을 가진다.

Fig. 5는 해당 모드에서 모드 형상을 나타내고 있다.

Table 2 FEM analysis result of SH-I

Mode	Acoustic natural frequency (Hz)
1	29.1
2	29.1
3	41.5
4	56.2
5	57.5

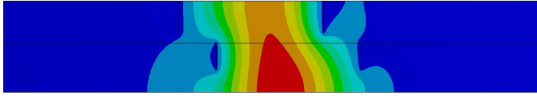


Fig. 5 The 3<sup>rd</sup> acoustic mode shape of SH

Table 1에서 SH-I 위치에서 와류 주파수가 약 44 Hz 이며, 이는 SH-I 위치의 음향 고유 주파수와 20% 이내에 있으며 음향 공진이 발생함을 알 수 있다.<sup>(5)</sup>

음향 공진이 발생하는 경우 음향 공진을 회피하는 방법은 다음과 같은 방법을 사용한다.

(1) 와류주파수 변화

→ 유체 속도나 튜브 직경을 변경

(2) 음향 배플을 이용한 공간의 음향고유주파수 변화

→ 공간에 강제 고정 조건 부여를 통한 음향고유주파수 증가

일반적으로 (1)의 방법은 보일러 성능 영향을 끼치기 때문에 보편적인 (2)의 방법으로 수행한다.

현재 보일러는 음향 배플이 설치된 상태이지만 이는 실 운전을 고려하지 않고 공진 회피 설계가 이루어진 것으로 판단되면 음향 배플의 위치 수정을 고려하였다.

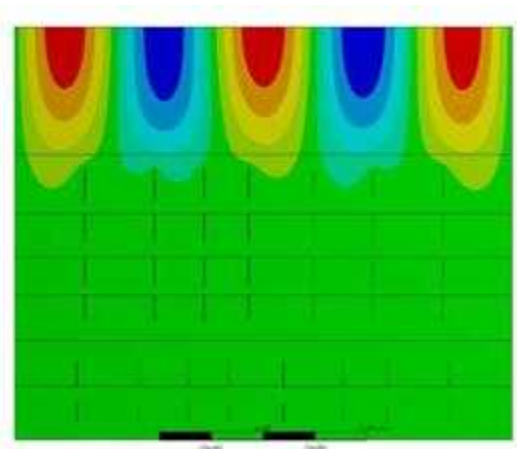


Fig. 6 Acoustic mode shape of full model



Fig. 7 The 1<sup>st</sup> acoustic mode shape of modified SH

### 4.3 댐핑 파라미터를 통한 공진 평가

식 (4)를 활용하여 95%와 100% 부하에서의 댐핑 계수 값을 구한 결과 Fig. 1에서 SH-I 과 Sec. ECO 위치에서 댐핑 계수가 2000 이상을 보임에 따라 해당 위치가 공진의 가능성이 있음을 확인하였다.

수정된 모델에서 동일한 방법으로 SH-I 와 Sec. ECO 위치에 대하여 댐핑 계수를 구한 결과 2000 이하 값을 갖는 것을 확인하였다

### 5. 결론

본 연구에서는 보일러에서 발생하는 음향 공진사례와 일반적으로 공진을 회피하는 방법으로 사용되는 음향 배플의 효과를 해석적으로 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 보일러에서 발생한 과도한 진동과 소음의 원인은 SH-I 위치 등의 관관을 지나는 유동에 의한 와류주파수와 SH-I 의 음향고유주파수의 일치로 인한 음향공진임을 알 수 있었다.

(2) 배플의 영향을 정확하게 해석하기 위하여 FEM 음향 모달 해석을 수행하였고, 해석 결과 SH-I 위치의 음향 고유주파수가 와류주파수와 거의 일치함을 확인하였다.

(3) 수정된 모델에 대해서 음향 모달 해석을 수행하였고 그 결과 1차 음향 고유 주파수와 와류 주파수와 20% 이상 여유가 있음을 확인하였다.

### 참고 문헌

(1) Blevins, R.D., 1979, Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Van Nostrand Reinhold, New York

(2) Kinsler L.E., 2000, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc., New York

(3) Chen. Y. N and Young. W.C, 1974, The Orbital movement and the damping of the fluid-elastic vibration of tube banks due to vortex formation part 3: damping capability of tube bank against vortex-excited sonic vibration in the fluid column, ASME journal of Engineering for Industry, pp.1072-1075.

(4) Chen Y.N., 1968, Flow-Induced and Noise in tube bank Heat Exchangers due to von karman streets, Journal of Engineering for Industry, Vol.90, pp. 134-146

(5) Fitz-Hugh, J.S, 1973, Flow Induced and Noise in tube bank Heat Exchanger, Harwell, UK

(6) C.H. Kim, K.B. Bang, Y.H. Ju and H.H. Byun, 2000, A Case Study on the vibration and noise by acoustic resonance in the tube bank of a boiler of 75 MW power plant, Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference, pp.150-155

(7) K.B. Bang and C.H. Kim, 2004, Acoustic resonance by Inserting Anti-noise Baffle in the Tube Bank of Boiler of a Large Fossil Power Plant, Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference, pp.178-183

(8) C.H. Kim and Y.H. Ju, 2003, A Study on the Vibration Phenomena of the Duct-fan Systems in Fossil Fueled Boilers: Inlet Vortex Induced Excessive Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, no. 3, pp.194-201