

발전용 보일러의 후부 전열면 소음진동 저감에 관한 사례 연구

A Case Study on The Reduction and Examination for Noise and Vibration of Backpass Heat Surface in the Power Plant Boiler

Gyoung-soon Lee*, Tae-Hoon Lee**, Seung-Jae Moon**, and Jae-Heon Lee**

Key Words : boiler, back-pass heat surface, natural frequency, resonance, tube bundle cavity

Abstract

The boiler structure is determined by combustion characteristics and construction costs in the combustion chamber of a large commercial boiler. The heat transfer in boiler is composed of the radiation and the convection. The convective heat transfer has happened to back-pass heating surface. The combustion gas sequentially passes through the reheater tube, 1st economizer tube, and 2nd economizer tube.

In case of being lowered in boiler height, we have to install additional tube bundle in back-pass heating surface for increasing the heat transfer of boiler, which causes the noise and vibration from combustion gas.

When the combustion gas passes through the back-pass tube bundle in specified load of commercial boiler, this paper analyzes the acoustic characteristics between vortex-shedding frequency and natural frequency in tube bundle cavity.

The case study reduce the resonance by changing natural frequency characteristics of tube-bundle cavity using a way to install ant-noise baffle in the direction of combustion gas flow.

1. 서론

전력 생산에 사용하고 있는 대형, 대용량 보일러 연소실은 연소특성 및 건설비용에 따라 보일러 구조를 다르게 하고 있다. 보일러 연소실은 전열면의 형상 및 열 흡수율 등을 고려하여 복사영역 및 대류영역 등의 열전달 방법을 결정하며, 대류 열전달은 보일러 후부 전열면에서 대부분 발생하고, 일반적으로 후부 전열면의 구성은 재열기 관군과 절탄기 제2관, 절탄기 제1관군의 순서로 배치한다.

공기와 연료의 연소반응 후에 생성된 연소가스 및 분진은 보일러에서 파울링, 슬래깅, 전열면 열 흡수 방해, 연소가스에 의한 보일러 소음 진동 등의 다양한 문제를 야기하고 있으며, 특히 보일러 건설할 때 결정되는 보일러 높이에 따라 높이가 낮을 경우 보일러 일정 성능 유지 및 증기발생량 향상을 위해 전열면에 전열관군을 촘촘히 설치하게 되고, 이로 인해 튜브 구조물에 의한 소음 진동을 발생시킬 가능성이 증가한다. 소음에 의해 발생하는 진동은 기계적 진동과 달리 기계 부품의 직접 손상을 발생시키는 경우는 드물지만 계속된 소음 진동은 기기나 구조물을 손상시킬 수 있는 변수가 될 수 있으며, 대형 대용량 보일러에서는 정상 운전 중 전열관 및 구조물 등이 고온의 연소열에 의해 가열된 상태이기 때문에 소음 진동에 의한 가진으로 인해 전열관 파일 및 용접부 균열, Buckstay 뒤틀림 등의 원인을 제공한다.

본 논문에서는 상업 운전중인 용량 800MW급 대형 보일러를 기본 모델로 선정하였으며, 특정부하에서 연소가스가 보일러 Backpass 전열관군을 통과할 때 발생하는 소음 진동에 대해 Vortex Shedding Frequency와 전열관군의 고유 주파수 음향 특성 및 상관관계를 알아보고, 연소가스 흐름 방향으로 Anti-Noise Baffle을 설치하여 소음진동에 의한 공진현상을 저감시킨 사례에 관한 것이다.

2. 보일러 모델 및 소음 진동 측정

2.1 보일러 모델

대상 보일러 모델은 800MW급 화력발전용 석탄 보일러는 초임계압, 관류형 Corner Firing 보일러로서 기저부하를 담당하고 있다. 특히, 발전소 열소비율 및 열효율을 향상시키기 위해 246kg/cm²의 주증기 압력과 566℃의 주증기 온도를 사용하고 보일러 모델의 특성 및 전열관 구조는 표 1과 Fig. 1에 도시하였다.

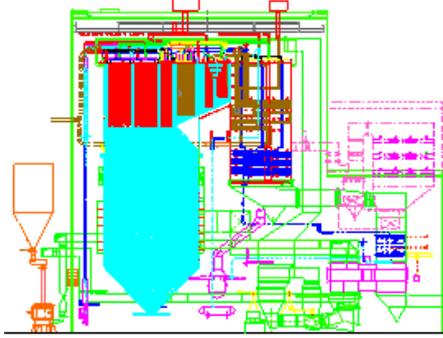
Table 1 Boiler Characteristic and Performance

구분	제원
형식	초임계압, 관류형보일러
사용 연료	역청탄
버너 타입	Low NOx Tangential Firing Sys
주/재열증기압력	255kg/cm ² / 41.8kg/cm ²
주/재열증기온도	566℃/ 566℃
통풍 방식	평행통풍
출력	800MW

* 한국남동발전, dlrudtns@kosep.co.kr

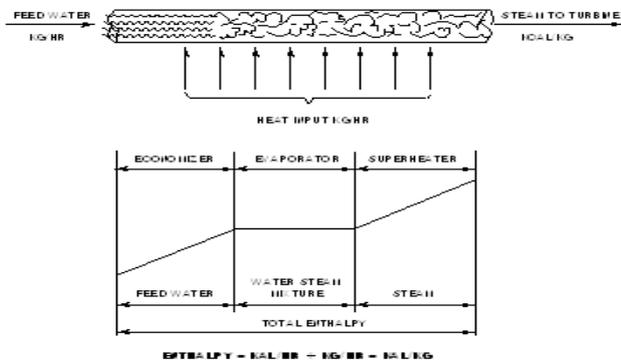
** 한양대학교 대학원 기계공학과

Fig. 1 Boiler Model Layout



관류형 보일러는 Fig. 2에서와 같이 전열관의 한쪽에서 급수를 공급하여 절탄기, 증발관, 과열기를 통과하면서 열교환을 하고, 순차적으로 가열, 증발, 과열되어 관의 출구에서 과열 증기가 발생하도록 하였다. 즉, 고압 보일러 설계상 최대의 문제점인 물순환을 증발관 유입수량과 증발량의 비를 1로 하였다. 관류 보일러는 증발관 내에서 유동이 강력하고 확실하여 증발관 직경을 작게 할 수 있으므로 고압증기 발생에 적합하며, 증기압이 임계압에 가까워짐에 따라 제작이 어렵고, 값이 비싼 기수드럼이 없으므로 두껍고 큰 용기가 불필요하여 초기 투자비도 저렴해진다. 관류 보일러의 보유 수량이 적어 기동 및 정지시간이 짧아 신속한 기동/정지가 요구되는 보일러에는 적합하나 부하변동에 대한 여유도가 적어 급수량과 연소량이 정확하게 일치해야 한다.

Fig. 2 Simple Diagram of One-Through Boiler



보일러 설비에는 연소후 발생하는 연소 분진으로부터 튜브군의 열교환을 저하 현상을 방지하기 위하여 제매설비가 설치하여 분진 블로잉을 실시하고 있으며 보일러 BackPass에서 부하 650MW에서 750MW까지 사이에서 연소가스 흐름에 의한 튜브군의 진동 발생 하였다.

2.2 모델 진동 및 소음 측정

모델의 Backpass부의 튜브군 배열은 연소흐름 방향으로 재열기 상부 튜브군, 재열기 하부 튜브군, 절탄기 제2군, 절탄기 제 1군으로 구성되어 있으며, Fig. 3에 도시 하였다. 보일러 부하에 따라 진동 및 소음을 측정하기 위하여 보일러 절탄기 제2군(ECON2)의 Buckstay에 가속도계 센서를 오른쪽 측면과 후부 측에 각각 2개씩 부착하였고, 보일러 소음은 절탄기 제2군 우측 외벽에서 부하별로 음압을 측정하였다. 특히, 부하 750MW에서 공진이 발생할 때 음향 고유모드를 분석하기 위해서 절탄기 제2

군 Backpass 후부 외벽을 따라서 등간격으로 음압을 측정 하였고, 진동 측정 위치는 표 2와 같으며, 소음 측정은 높이 57m에서 절탄기 제2군의 오른쪽 측면에서 측정 하였다.

Fig. 3 The Arrangement of Tube and Sensor

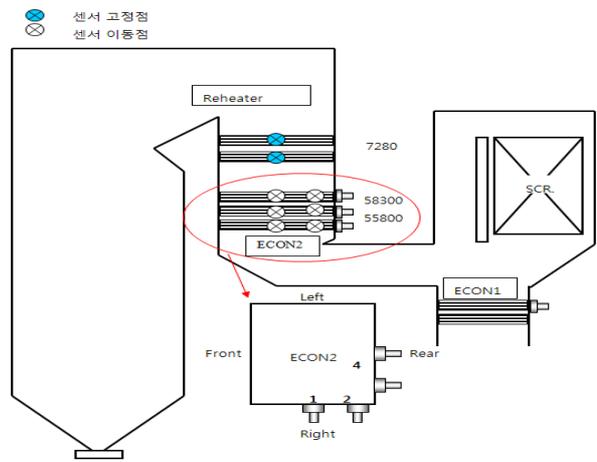


Table 2 The Location of Vibration Measurement

Load (MW)	위치		높이 (mm)	측정 포인트	
				오른쪽	후면부
600	재열기	상부	72800	1	-
		하부	67300	1	-
700	절탄기 제2군	상부	58300	2	2
		중부	55800	2	2
750		하부	53850	2	2

진동 측정 결과 부하 600MW에서는 탁월 주파수가 발생하지 않았으나, 650MW 이상에서는 37.5Hz에서 탁월 주파수가 발생하면서 진동이 크게 증가하였고, 부하 증가에 따라 탁월 주파수는 일정한 상태에서 진동 크기는 최대 490µm P-P까지 증가 하였다. Fig. 4은 부하별 진동 측정 데이터로 진동이 가장 심한 절탄기 제2군 중앙의 측정값을 도시 하였으며, Fig. 5~8의 주파수 스펙트럼에서 알 수 있듯이 탁월 주파수에 해당하는 성분의 진동 크기가 모델의 전체 진동의 대부분을 차지하고 있다.

Fig. 4 The Vibration Value as load

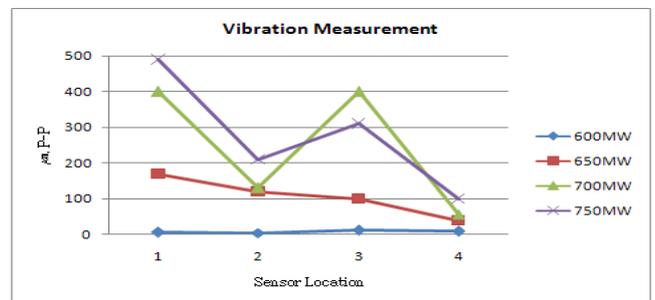


Fig. 5 Load 600MW

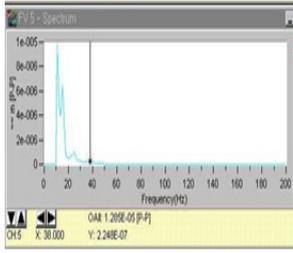


Fig. 6 Load 650MW

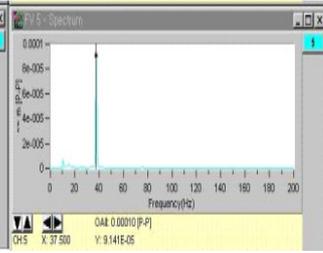


Fig. 7 Load 700MW

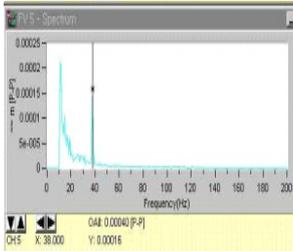
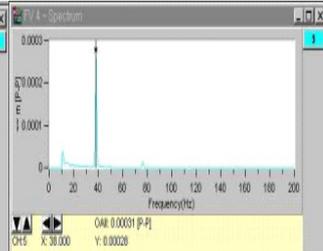


Fig. 8 Load 750MW



소음 측정 결과 부하 600MW에서는 하모닉 성분이 나타나지 않았으나, 부하 650MW이상에서는 37.5Hz 근처에서는 배수에 해당하는 하모닉 성분이 뚜렷하게 나타나면서 부하에 따라 소음 크기가 증가 하였으며, 부하 변동에 따른 연소공기량 증가에 변화로 사료되면 Fig. 9~12는 절탄기 제2군의 모델 오른쪽에서 측정된 소음 특성을 도시하였다.

Fig. 9 Load 600MW

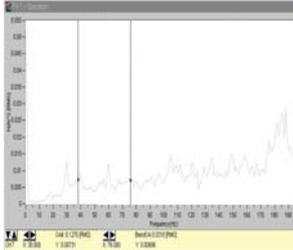


Fig. 10 Load 650MW

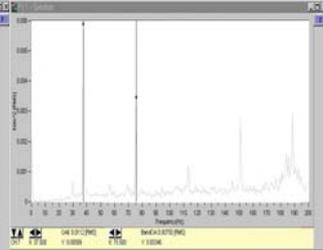


Fig. 11 Load 700MW

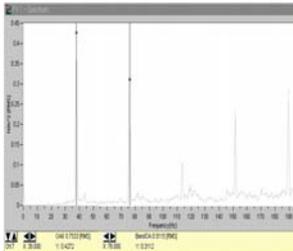
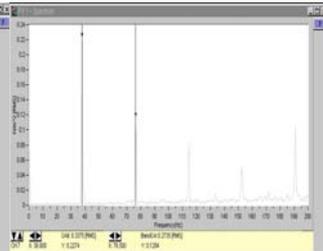


Fig. 12 Load 750MW



3. 보일러 진동 및 소음 고찰

3.1 연소가스 흐름에 따른 보일러 공진 매카니즘

일반적으로 대형 상업 발전소의 연소 반응후 분진은 연소가스 흐름과 함께 튜브 전열관군에서 와류로 인해 주기적인 소음 진동 현상이 발생한다. 이는 음향 공진을 발생하는 주 가진원으로서 Vortex Shedding Frequency는 Strouhal 수 S 와 유속 V , 튜브관경 D 에 의해서 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고,

$$f_{vs} = \frac{SV}{D} \quad (1)$$

음향 고유 진동수는 식 (2)와 같으며, Vortex Shedding Frequency와 고유 진동수가 일치할 경우 과도한 진동과 소음으로 인해 공진 현상을 발생시키고 있다.

$$f_n = \frac{nC}{2W} \quad (2)$$

여기서 n 는 음향 모드이고, C 는 음속이며, W 는 Cavity 폭을 나타낸다. 특히, 공진현상은 전열관의 횡방향 음향 고유진동수와 Vortex Shedding에 의한 가진 주파수가 근접할 경우 “Lock-In” 현상과 더불어 발생하며, “Lock-In” 현상은 가진 주파수와 음향 고유 진동수와 정확하게 일치할 때만 발생하는 것이 아니라 두 주파수 간의 차이가 일정 범위 내에 근접하게 되면 음향 고유 진동수에 구속되게 된다.

전열관군이 위치한 Cavity 내에 유동이 흐를 때 수많은 음향 모드가 존재하며, 음향공진이 일어날 가능성은 식 (3)과 (4)에 의해 판별 평가한다.

$$f_a = f_{vs} \pm 20\% \quad (3)$$

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

여기서 ψ 는 Damping Parameter이고, R 은 레이놀즈수, S 는 Strouhal Number, X_L 은 종방향 튜브 간격비, X_T 은 횡방향 튜브 간격비를 나타낸다.

3.2 진동 및 소음 분석

보일러 진동 및 소음 측정을 위해서 Backpass 전열관군의 튜브 채원은 표 3와 같고, 보일러 연소에 필요한 탄은 대동탄을 기준으로 연소가스 속도와 온도를 실제 측정하였으며 표 4와 같다.

Table 3 The Parameter for Resonance Possibility

변수	재열기	절탄기 제2군	절탄기 제2군
D	63.5mm	50.8mm	50.8mm
$P_L(X_L)$	114mm(1.8)	102mm(2.01)	102mm(2.01)
$P_T(X_T)$	168mm(2.65)	112mm(2.2)	112mm(2.2)
S	0.22	0.22	0.22
W	19,488mm	19,488mm	16,040mm

Table 4 The Gas Velocity and Temperature

튜브군		Gas Velocity(m/s)	Gas Temp.(°C)
재열기	입구	11.44	721
	출구	11.4	517
절탄기 제2군	입구	11.4	517
	출구	9.27	358
절탄기 제1군	입구	12.15	356
	출구	11.1	318

표 3과 4으로부터 부하 650MW에서 음향 공진 가능성에 대해 평가한 결과를 다음 표 5와 같다. 절탄기 제2군 출구에서 Vortex Shedding Frequency는 40.2Hz이고, 3차 음향 고유진동수가 37.2Hz로써 가진 주파수에 대해 20% 이내 이다. 그러므로 이론적 계산 결과와 진동 및 소음 측정 결과 값을 통해 모델 Backpass부의 진동과 소음 원인은 절탄기 제2군의 전열관군에

서 발생하는 음향 공진에 의해 발생하는 것을 알 수 있다. 650MW에서 탁월 주파수는 37.5Hz 였으나 750MW에서는 38Hz로 증가하였고, 이는 연소가스 온도가 358℃에서 376℃로 약 18℃도 증가로 인한 온도의 영향과 부하 증가에 따른 연소 총량 증가에 따른 영향으로 판단된다.

Table 5 The Calculation of Acoustic Resonance(650MW)

튜브군		f_{vs}	ψ	f_{a1}	f_{a2}	f_{a3}	f_{a4}
재열기	입구	39.6	2000	15.4	30.7	46.1	61.5
	출구	39.5	2924	13.8	27.6	41.4	55.2
절단기 제2군	입구	49.4	3604	13.8	27.6	41.4	55.2
	출구	40.2	4297	12.4	24.8	37.2	49.6
절단기 제1군	입구	52.6	5563	40.0	80.0	119.9	159.8
	출구	48.1	5756	38.8	77.6	116.4	155.2

※ 강조문자는 음향공진 주파수 분리여유가 20%이내

부하 650MW에서 발생한 음향공진 주파수는 부하가 증가함에 따라 계속 발생하고 있으며, 750MW 부하에서도 그 상태가 유지 되었다. 이와 같은 결과는 650MW에서 750MW까지 부하가 증가할 때 Vortex Shedding Frequency와 음향 고유 주파수가 Lock-in 현상을 일으키기 때문이며, 탁월 주파수는 거의 변하지 않았고 전열관군의 Vortex Shedding에 의한 음향학적 에너지가 증가하여 진동과 소음이 증가한 것으로 판단된다. Fig. 13~15는 절단기 제2군에서 발생한 Overall 진동값과 소음을 부하별로 도시한 것이다.

Fig. 13 The Overall Vibration Value(Center)

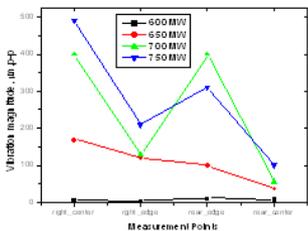


Fig. 14 The Overall Vibration Value(Lower)

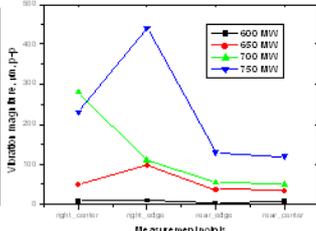
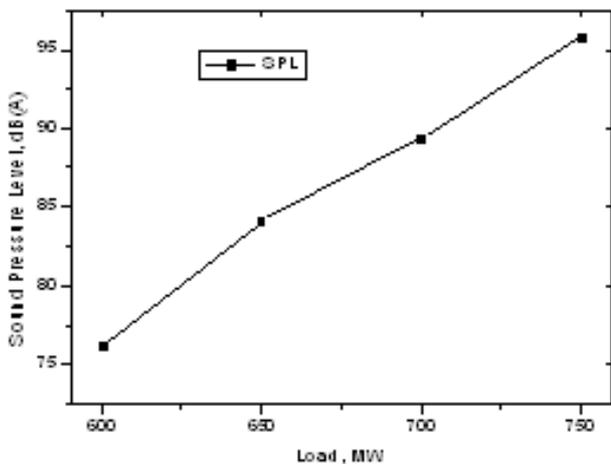


Fig. 15 The Noise Value(2ry ECO. Lower)

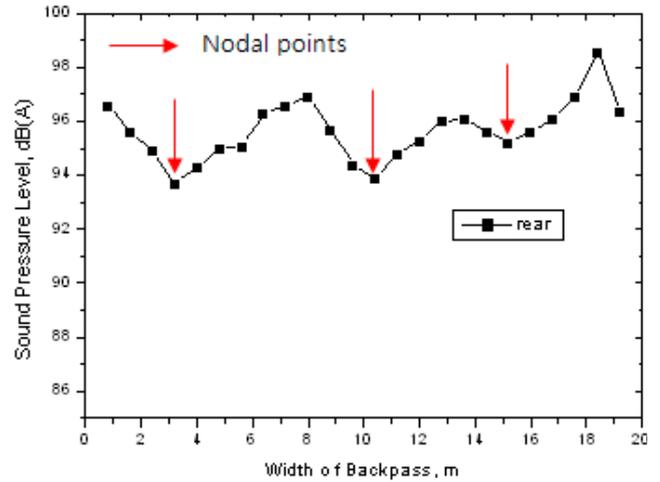


4. 모델 재설계

4.1 음향 공진 저감 방법

보일러의 음향 공진을 감소시키는 방법으로 전열관 사이에 Anti-Noise Baffle을 사용하는 것이 가장 포괄적이고 일반화된 방법으로 전열관군에서 발생하는 Cavity의 음향 고유주파수를 증가시킴으로서 음향 공진을 감소시킬 수 있다. 선정된 보일러 모델의 Backpass 절단기 제2군에서 음향 공진이 발생하고 있음을 이론적 고찰과 실제 측정을 통해 이미 확인 하였다. Fig. 16은 보일러 Backpass의 절단기 제2군의 후부 측에서 횡 방향으로 소음을 측정된 것으로 화살표는 음압에 의한 압력변동이 없는 3개의 노달점을 나타내고 있으며, 3차 음향 공진이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 16 Sound Pressure Level at 2ry Eco.



이와 같은 음향 공진 현상을 방지하기 위해서 Fig. 17과 같이 5개의 Anti-Noise Baffle을 전열관군에 하고, 설치 위치는 표 6과 같다. 3차 음향 모드에서 공진에 대해 4개의 Anti-Noise Baffle을 설치할 경우 부하 750MW에서 절단기 제2군의 가진 주파수는 58.3Hz이므로 음향 고유 주파수는 72.9Hz 이상이 되어야 하나, 설치한 전열관군의 1st 음향 고유주파수가 69.1Hz가 되어 750MW에서는 음향 공진 현상이 계속 발생할 가능성이 있다. 그러므로 5개의 Anti-Noise Baffle을 설치하여 1st 음향 고유주파수를 77.1Hz까지 상승시킴으로서 가진 주파수보다 24.4% 떨어지게 되어 Lock-In 현상이 발생하지 않아 음향 공진 조건을 벗어날 수 있다.

Fig. 17 The Installation Position of Baffles

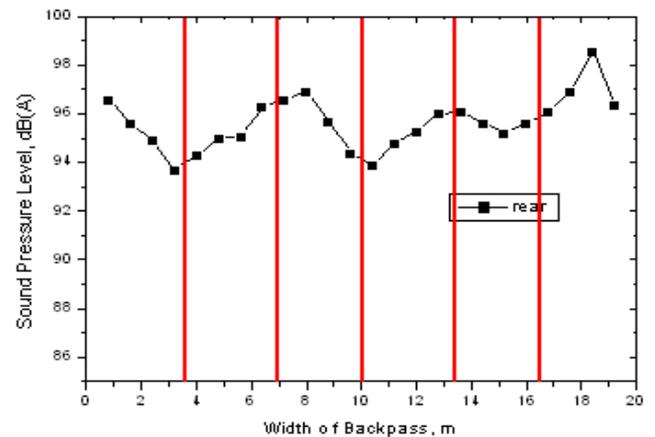


Table 6 The Horizontal Location of Baffles

NO	The Location of Baffle
1st Baffle	3.5 M
2nd Baffle	7 M
3rd Baffle	10 M
4th Baffle	13.5 M
5th Baffle	16.5 M

4.2 모델 적용 및 결과

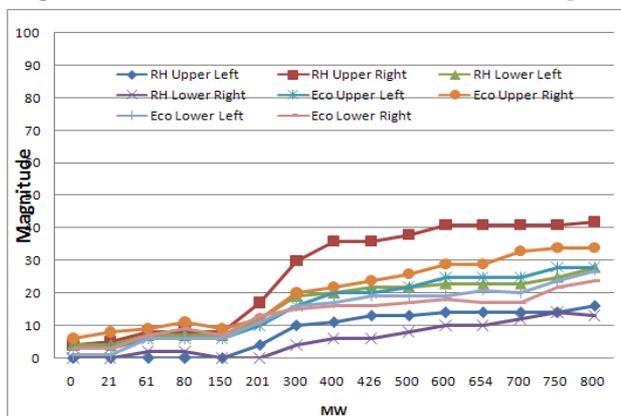
보일러 모델에 발생하고 있는 소음 공진 현상을 저감시킬 수 있는 가능성을 확인하였고, 소음 공진 현상을 저감시키기 위해 제안된 5개의 Anti-Noise Baffle을 Fig. 18과 제작하였으며, 특히, Baffle을 Cavity 방향으로 튜브 피치의 2배 이상인 30cm를 연장시켜 보일러 실제 모델에 설치하여 진동을 측정하였다. 진동 측정 방법은 보일러 튜브 누설을 감시하는 장치로서 보일러 노내에서 발생된 음파가 수냉벽에 전달되고, 수냉벽 멤브레인에 부착되어 있는 프로브로부터 계측 하였다.

Fig. 18 The Figure of Baffle Installation



Fig. 19는 현 보일러 모델에 Anti-Noise Baffle을 장착한 후 보일러를 부하 0에서 800MW까지 상승시키면서 보일러 Backpass의 소음 공진 현상을 나타낸다.

Fig. 19 The Vibration Value of Boiler Backpass



고 부하일 때 보일러 Backpass부에서 발생한 소음 진동 현상이 감소하였고, 특히, 650MW 이상에서 보일러 모델의 진동 현상이 감소하였다. 출력이

800MW일 때 진동 측정 값은 다소 상승하였으나, 이는 보일러 운전에 필요한 연소용 공기공급이 많아짐에 따라 연소가스 유량 증가와 연료 증가로 인한 연소 반응후 연소 속도 증가로 인한 것으로 사료된다.

5. 결론

이제까지 보일러 모델의 소음 진동에 관해 이론적 해석과 현장 측정을 통해 문제점을 확인 하였고, 이를 개선하기 위해 Cavity에 의한 음향 고유진동수를 변경시키기 위해 Anti-Noise Baffle 방법을 이용하여 실제 모델에 설치하여 소음 진동 현상을 저감시킬 수 있었으며, 이와 같은 과정을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 보일러를 운전할 때 부하 650MW에서 750MW에 걸쳐 발생하는 소음과 진동의 원인은 전열관군을 지나가는 유동의 관군 내의 Vortex Shedding Frequency와 관군을 구성하는 Cavity의 음향고유주파수의 일치로 인한 음향공진으로 사료된다.
2. 진동 및 소음측정결과, 공진 발생시 진동의 탁월 주파수는 38Hz 이고, 소음 주파수 또한 38Hz로서 이 값의 배수인 조화성분이 나타났다.
3. 보일러 Backpass의 과열기, 절탄기 제2군, 절탄기 제1군에 대한 음향공진가능성 검토결과, 절탄기 제2군에서 3차의 음향고유주파수에 해당하는 음향 공진이 발생함을 알 수 있었고, 따라서, 이를 회피하기 위하여 절탄기 제2군의 전열관군에 대해 Anti-Noise Baffle을 5개를 횡 방향으로 설치하였다.
4. Anti-Noise Baffle 설치했을 때 관군 사이의 Cavity방향으로 Baffle을 튜브 피치의 2배 이상인 30 Cm로 연장시킴으로써 Cavity에서 발생할 수 있는 음향공진 가능성 저감 시켰다.
5. 보일러 모델에 Baffle 설치 후 실제 상업 운전 중 소음 진동 저감 효과를 파악한 결과 보일러 모델의 진동 현상이 상당히 저감됨을 알 수 있었다. 본 연구에서는 실제 상업운전을 하는 대형, 대용량 보일러의 공진 문제점을 해결 하였고, 유사사례가 발생했을 때 해결을 위한 방법의 모델로 제시할 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] 한국남동발전, 영흥화력 1, 2호기 운전지침서, (2003)
 [2] 한국남동발전, 영흥화력 1, 2호기 보일러 운전 매뉴얼, (2003)
 [3] ASME Paper No.64-Pwr-10, Elimination of destructive, Self Excited vibrations in large, gas and oil fired utility units(L.J.Cohan, W.J.Deane, Sepe.27-Oct.1.1964)
 [4] Reporting boiler vibration(CE Technical Service Manual)

[5] 유체역학(손병진저 Page 643-645)

[6] Standard Handbook for Mechanical engineers(8th edition, Page 11-69~11-70, 3-47~3-56)