

발전용 보일러 후부 전열면 소음진동 저감에 관한 연구

이 경 순, 이 태 구*, 문 승 재**, 이 재 현**†

한양대학교 대학원 파워엔지니어링공학과, *한양대학교 대학원 기계공학과, **한양대학교 기계공학과

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

Gyong-Soon Lee, Tae-Gu Lee*, Seung-Jae Moon**, Jae-Heon Lee**†

Department of Power Engineering, Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

**School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received April 30, 2008; revised June 19, 2008; accepted September 7, 2008)

ABSTRACT : The resonance of boiler is caused by exciting force in the gas path and it generates the vibration by the harmony of boiler's dimensional factor. According to trending toward the boiler of increasing capacity and a bigger size, it has a problem of the vibration at back-pass heating surfaces. We can predict such vibrations as comparison between vortex frequency and gas column's natural frequency. We can't rely on the method for the past decades because of changing parameters, such as an allowable error, gas temperature, gas velocity, Strouhal number. We can reduce the vibration to use the seasoning effect and change the operating condition in coal fired boiler but it's not essential solution. When the vibration occurred in the model boiler, we must measure the acoustic pressure and frequency of places for considering the means. So far, we confirmed the problem from field measures and theoretical analysis about the acoustic vibration of boiler. We installed anti-acoustic baffle in a existing boiler to change the acoustic natural frequency at the cavity, which results in reducing the acoustic vibration. The first, we prove that the acoustic resonance is caused by harmonizing vortex shedding frequency of tube heat surface with acoustic natural frequency of cavity in the range of 650~750 MW loads. The second, the acoustic resonance at the back-pass heating surface has the third order of acoustic natural frequency at the second economizer. We install five anti-acoustic baffles at the second economizer to reducing the resonance. We confirm considerably reducing the acoustic vibration of boiler during the commercial boiler.

Key words : Natural frequency (고유주파수), Acoustic resonance (음향공진), Standing wave (정상파)

1. 서론

전력생산에 사용되는 화력발전보일러는 터빈에서

요구하는 고온, 고압의 과열증기를 생산하는 핵심설비로서 연료를 연소시켜 급수를 과열증기로 변환시키는 대형 열교환기이다. 보일러를 건설할 때 결정되는 높이는 최근 들어 비용을 절감하기 위하여 높이를 낮추는 추세이다. 보일러의 성능향상과 증기의 발생량을 증가시키기 위하여 전열면을 촘촘히 설치함으로써 구조물에 의한 소음, 진동의 발생 가능성이 증가하고 있다.

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2220-0425; fax: +82-2-2220-4425

E-mail address: jhlee@hanyang.ac.kr

연소가스 유동에 따른 보일러에서의 소음진동은 연소가스가 튜브에 대하여 수직방향으로 흘러갈 때, 연소가스가 가진되어 주기적인 와류가 발생한다. 이는 연소가스가 튜브에 저항을 받음으로서 흐름이 불안정해지고, 튜브후류에서 와류가 생성되기 때문이다. 튜브후류에 발생하는 주기적인 흐름을 와류생성 주파수라고 한다. 와류생성주파수와 구조물이 갖고 있는 고유주파수가 일치할 때 큰 변위가 발생하는데 이를 기계적 진동이라 하며, 보일러, 철판, 연돌과 같은 철 구조물 설계에서 반드시 고려되어야 한다.

또한 연소가스의 흐름으로 발생하는 와류생성주파수와 보일러에서 연소가스 흐름의 직각방향 정상파가 갖는 주파수가 일치할 때, 음향공진이 발생되어 큰 소음을 일으키는데 이를 소음진동이라고 한다. 소음진동은 기계적 진동과 달리 구조물에 직접적인 손상을 발생시키는 위험은 없을지라도 장기간 발생한다면 근무자는 인내하기 힘들 것이다. 또한 대형보일러와 구조물은 고온의 연소열에 의해 가열된 상태이기 때문에 소음진동에 의한 가진으로 인하여 보일러 튜브 파열, 구조물의 뒤틀림 등이 발생할 수 있다.

보일러튜브를 설치, 유지정비하기 위하여 설치된 공동은 연소가스가 지나가면서 와류가 발생되어 공진이 발생하기도 하지만, 항상 그렇지는 않다. 보일러에서 소음, 진동이 발생하면 공동을 가로질러 배플을 설치함으로써 해결할 수 있다. 즉 구조물이 갖고 있는 고유주파수를 변화시키기 위하여 배플의 수량, 위치 등을 결정하여야 한다. 그러나 부적합한 설치는 고유진동수가 다른 형태로 변하여 더 큰 문제를 유발할 수도 있다.

따라서 본 연구에서는 상업운전중인 초임계압, 관류형 석탄화력 보일러를 모델로, 특정부하에서 발생하는 소음진동 원인을 규명하고 해결책을 제시함으로써 향후 건설되는 대용량 보일러의 공진문제를 해결하였다.

2. 연구모델

2.1 소음진동 발생 개요

발전기출력 650 MW에서 주증기 온도를 높이고자 Soot blowing을 실시한 후 출력 증발과정에서 보일러 후부전열면에서 소음이 발생하여 출력을 감발하였으나, 출력 650 MW에서 750 MW에 걸쳐 소음(110 dB(A)) 및 진동(최대 116 μ m)이 발생하였다.

1차 공진은 출력 550 MW에서 신화탄(중국)에서

Table 1 The history of sonic vibration.

| 출력 | 탄종 | 공진발생 유무 | 비고 |
|--------|-----|---------|--------------|
| 650 MW | 대동탄 | - | Soot blowing |
| 720 MW | 대동탄 | 발생 | |
| 550 MW | 대동탄 | 멈춤 | |
| 680 MW | 대동탄 | 발생 | |
| 720 MW | 대동탄 | 발생 | 119 dB(A) |
| 600 MW | 대동탄 | 발생 | 105 dB(A) |
| 570 MW | 대동탄 | 멈춤 | 77 dB(A) |
| 650 MW | 산서탄 | 발생 | 108 dB(A) |
| 600 MW | 산서탄 | 멈춤 | 77 dB(A) |

대동탄(중국)으로 탄을 변경 후 소음이 발생하였으나, 다시 신화탄으로 변경되었을 때 소음은 소멸되었다. 소음진동은 연소가스 조성, 온도 등에 따라 영향을 받는데, 탄이 변경되어 소멸됨에 따라 탄에 의한 영향으로 추정하였다.

2차 소음은 1차 소음이 발생하지 2주정도 지나서 대동탄 연소중 보일러 후부전열면을 Soot blowing 한 후 소음이 발생하였다. 소음발생 이후 Soot blowing을 중지하였으며, 탄을 바꾸어 보았으나, 600 MW이상에서 소음은 계속 발생하였다. 공진발생 이력은 Table 1에 나타내었다.

2.2 연구모델

대상 보일러 모델은 부하추종 기능을 겸비한 기저 부하용 유연탄(역청탄) 화력발전용으로 신속한 기동정지 및 높은 부하변동율, 안정된 저부하운전, 기동손실의 최소화, 높은 열효율, 수명유지를 위한 열응력 감소, 고도의 제어기술 적용 등의 특성을 가지고 있다. 보일러는 평형통풍, 초임계압, 터빈 바이패스계통 및 정격출력의 30%에서 90% 부하까지 변압운전방식을 채택하여 효율을 높이고 우수한 동특성 및 신속한 부하 추종성을 가지며, Table 2는 주요규격을 나타내었다.

3. 소음 및 진동측정

3.1 측정방법

모델 보일러의 진동을 측정하고자 1차 재열기, 2차 절탄기의 Buck-stay에 가속도센서를 오른쪽 측면과 후부에 각각 2개씩 부착하였다. 센서에서 발생하는 신호를 증폭하기 위하여 Charge Amp 4-Ch

Table 2 The boiler specification.

| 구 분 | 제 원 |
|------------|--|
| 형 식 | 초임계압, 관류형, 1단 재열, 평형통풍 Two pass type 기저부하용 |
| 최대연속 증발량 | 2,415 T/H |
| 주증기 압력/온도 | 255 Kg/cm ² , 569℃ |
| 재열증기 압력/온도 | 41.8 Kg/cm ² , 569℃ |
| 효율 | 90.14 % |
| 보일러 크기 | 노 (W×D) : 19,500 × 19,500(MM) 폭 : 44,800(MM) 높이 : 89,900(MM) |
| 미분기 | 형식 : Bowl Mill, Dynamic Classifier |
| 석탄버너 | LNTFS(Low Nox Tangential Firing) 수량 : 24/unit |
| Nox 저감방식 | 연료와 공기분리연소 & O/F Port이용 |

Table 3 The location of vibration and sound pressure measurement.

| 구 분 | 위 치 | | 높이 (mm) | 측정 포인트 | |
|-----|--------|----|---------|--------|-----|
| | | | | 오른쪽 | 후면부 |
| 진동 | 1차 재열기 | 상부 | 72,800 | 1 | - |
| | | 하부 | 67,300 | 1 | - |
| | 2차 절탄기 | 상부 | 58,300 | 2 | 2 |
| | | 중양 | 55,800 | 2 | 2 |
| 소음 | 2차 절탄기 | 하부 | 53,850 | 2 | 2 |
| | | | 57,000 | 1 | - |

1대, 1-Ch 2대를 설치하였다. 소음측정은 2차 절탄기 우측 외벽에서 측정하였으며, 주파수 분석을 위하여 측정신호를 신호분석기에 전송하는 Front End, 분석용 컴퓨터, 진동소음분석 소프트웨어가 장착된 FFT Analyzer를 사용하였다. 특히, 공진이 발생할 때 음향모드를 분석하기 위해서 2차 절탄기 보일러후부 외벽을 따라 일정한 간격으로 음압을 측정하였다. 진동 측정위치는 Table 3 및 Fig. 1과 같으며, 소음측정은 높이 57 m에서 2차 절탄기의 오른쪽 측면에서 측정하였다.

3.2 측정결과

측정결과에 의하면 부하 600 MW에서 탁월주파수는 없었으며, 650 MW에서 탁월주파수가 37.5 Hz로 나타났다. 출력이 증가함에 따라 탁월주파수는 38.0 Hz에서 일정하게 유지되었다. 진동크기는 1차

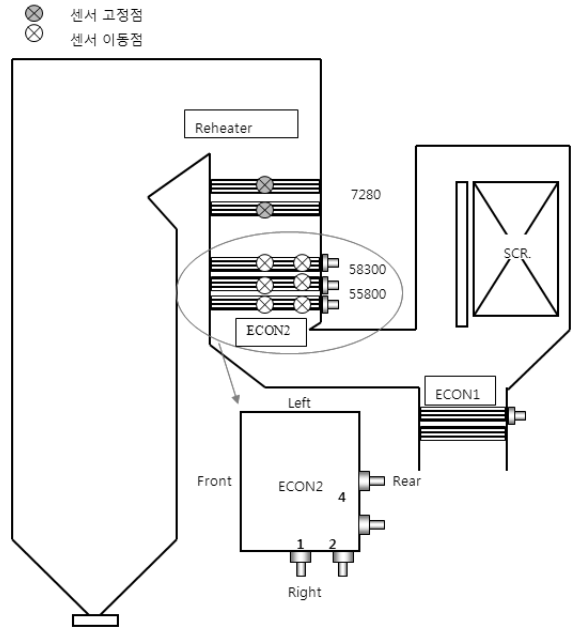


Fig. 1 The arrangement of tube and sensor location.

Table 4 The comparisons dominant frequency changed with loads

| 출 력 | 진동 탁월주파수 | 소음 탁월주파수 |
|-------|----------|----------|
| 600MW | - | - |
| 650MW | 37.5 | 37.5 |
| 700MW | 38.0 | 38.0 |
| 750MW | 38.0 | 38.0 |

재열기, 2차 절탄기 중간에서 모두 증가하였으며, 최대 490 μm, P-P까지 증가함을 알 수 있다. 주파수 스펙트럼에서 탁월주파수에 해당하는 성분의 진동크기가 전체 진동 크기의 대부분을 차지하였다.

소음측정 스펙트럼 자료를 살펴보면, 부하 650 MW에서 37.5 Hz의 배수에 해당하는 조화성분이 나타났다. 부하가 증가됨에 따라 탁월주파수는 거의 일정한 상태로(약 0.5 Hz 증가) 유지되었으며, 소음 크기는 최대 95.8 dB(A)까지 증가하였다.

부하 650 MW에서 발생한 음향고유주파수는 부하가 증가함에 따라 계속 발생하고 있으며, 부하 750 MW에서도 그 상태가 유지 되었다. 이와 같은 결과는 650 MW에서 750 MW까지 부하가 증가할 때 와류생성주파수와 음향 고유주파수가 Lock-in 현상을 일으키기 때문이며, 탁월주파수는 거의 변하지

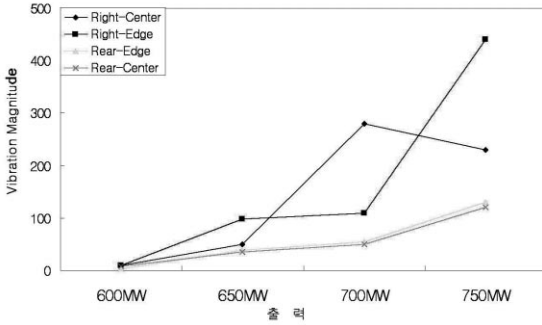


Fig. 2 The overall vibration magnitude at the center.

않았다. 전열면에서 발생하는 와류에 의한 음향학적 에너지가 증가하여 진동과 소음이 증가한 것으로 판단된다. Table 4 및 Fig. 2에 출력에 따른 진동, 소음의 탁월주파수를 표시하였다.

따라서 이와 같은 진동, 소음분석을 통해 상기의 현상은 전열면을 형성하는 공동의 음향 고유주파수와 전열면을 지나가는 연소가스에 의한 와류생성주파수가 일치되어 발생하는 음향공진의 전형적인 현상으로 판단되었다.

4. 소음진동 저감 개선

4.1 공진 저감설비 적용

일반적으로 부식에 대한 취약 온도는 초임계 온도보다 아임계에서 부식이 더 심하므로, 실험 용기에 초임계 압력조건에서 온도를 아임계 온도인 300℃, 340℃의 폐수에 304SS, 316SS, AL6XN, Hastelloy C-276, Inconel-625, MAT21, Titanium Gr.5의 시편을 각각 2주, 4주 동안 침지 시험을 수행한 후 각 합금의 무게감소를 측정하는 한편 이로부터 각 합금의 부식속도(miles per year : mpy)를 계산하였다. 이때 침지시험 후 시편의 무게가 증가하면 양(+)의 무게감소 및 음(-)의 부식속도를 보이며, 무게가 감소하면 음의 무게감소 및 양의 부식속도 나타난다. Table 1은 각 시편을 동일조건에서 침지 시험을 수행한 후 무게감소 및 부식속도(mpy)를 나타낸 것으로, 304SS와 Titanium Gr.5를 제외한 다른 재료들은 침지 시험동안 발생한 재료의 용해반응으로 인하여 무게가 감소한 반면 304SS와 Titanium Gr.5는 약간의 무게증가가 관찰되었는데, 이 무게증가는 침지시험동안 시편표면에 산화막이 형성되기 때문으로 사료된다.

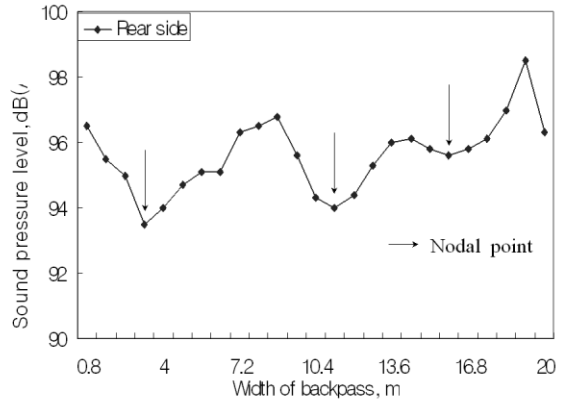


Fig. 3 The sound pressure level at secondary economizer.

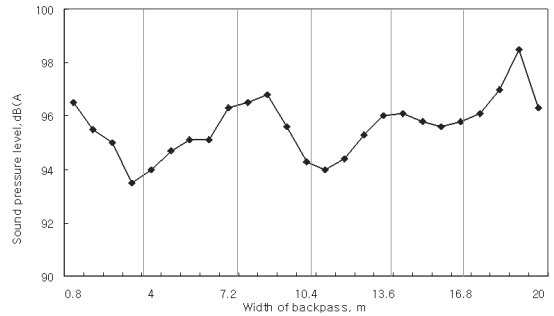


Fig. 4 The installation position of baffles.



Fig. 5 The figure of baffle installation.

4.2 개선효과

Fig. 6은 2차 절탄기에 Anti-Acoustic 배플을 설치하고 난 후 보일러 출력을 0 MW에서 80 MW까지 출력을 상승시키면서 보일러 후부 전열면에서의 음압은 보일러튜브 누설측정 장치를 활용하여 측정 한 자료이다. 보일러 출력이 증가함에 따라 음압의

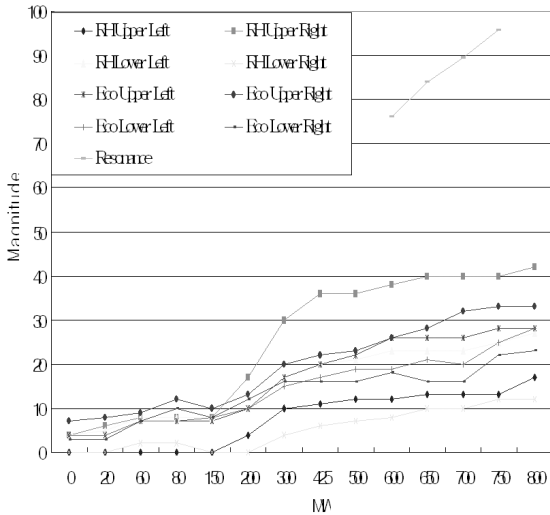


Fig. 6 The sound pressure magnitude of boiler back-pass.

크기는 전체적으로 증가하는 추세를 보이고 있으나, 전 출력범위에서 완만하게 증가하고 있다. 이는 보일러 운전에 필요한 연소용 공기가 많아짐에 따라 연소가스 유량 증가로 인한 연소가스 속도증가에 기인한 것으로 사료된다. 1차 재열기 상부에서 음압의 크기는 42.0 dB(A)로서 다른 부분보다 다소 높은 값을 나타내고 있으나, 이는 Anti-Acoustic 배플을 설치한 2차 절탄기와 거리가 가장 멀어 배플에 의한 소음저감 효과는 미미한 것으로 판단된다.

음향공진이 발생하였던 출력 750 MW에서 2차 절탄기 소음의 크기는 95.8 dB(A)이었으나, Anti-Acoustic을 설치 후 2차 절탄기상부에서는 32 dB(A)로 약 54 dB(A)가량 감소됨을 확인하였다. 이는 Anti-Acoustic 배플을 설치함으로써 고유주파수가 변경되어 공진이 발생되지 않은 것으로 판단된다.

보일러에서 발생하는 소음진동을 해결하기 위해서는 연소가스 흐름에 의하여 발생하는 와류생성주파수와 구조물의 갖는 음향 고유주파수를 비교함으로써 최적의 Anti-Acoustic 배플 수량과 위치를 선정할 수 있다. 또한 현장에서 실측한 탁월주파수 (37.5 Hz)와 3차 음향 고유주파수(37.2 Hz)의 차이가 미미함을 알 수 있었다. 따라서 보일러에서 발생하는 소음, 진동을 감쇄시키는 방법으로 와류생성 고유주파수와 구조물의 고유주파수를 검토, 적용하는 것이 타당함을 알 수 있었다.

5. 결론

보일러는 언제나 가진력이 존재하기 때문에 쉽게 공진이 일어날 수 있는 구조이다. 최근 들어 보일러 크기는 점점 증가하고 있어 후부전열면에서 소음진동은 지속적으로 발생하고 있다. 이러한 소음진동은 연소가스 흐름에 의하여 발생하는 와류생성주파수와 구조물의 고유주파수를 비교함으로써 예측이 가능하다. 하지만 지금까지는 설계조건과 운전조건 즉, 가스온도, 가스속도, 가스조성, Strouhal number의 변화 때문에 설계조건을 기준으로 적용하는 것은 어느 정도 제한이 있었다.

석탄전소보일러는 가스, 유류전소 보일러에서 다르게 Seasoning, 파울링 및 운전조건 변화 즉, 석탄의 변경에 따른 연소가스 조성변화 등으로 소음진동을 감쇄시킬 수 있으나, 이러한 방법은 근본적인 조치가 아니다. 모델 보일러의 소음진동은 현장에서 측정한 결과와 주파수 분석을 통하여 2차 절탄기에서 음향공진이 발생하고 있는 것을 확인하였다. 이러한 음향공진을 해결하기 위하여 2차 절탄기 전열면에 Anti-Acoustic 배플을 설치함으로써, 음향 고유주파수가 변경되어 소음을 저감하였다. 이와 같은 과정을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 보일러 부하 650 MW에서 750 MW에 걸쳐 발생하는 소음진동 원인은 전열면을 지나가는 연소가스의 흐름에 의하여 발생하는 와류생성주파수와 전열면을 구성하는 공동의 고유주파수가 일치됨으로서 생기는 음향공진이었다.
- 2) 음향공진은 와류생성주파수와 음향 고유주파수의 비교 및 현장 실측을 통하여 2차 절탄기 전열면에서 3차 모드형태로 발생하고 있는 것을 알 수 있었다. 이를 회피하기 2차 절탄기의 전열면에 5개의 Anti-Acoustic 배플을 횡 방향으로 설치함으로써 보일러 출력 750 MW에서 소음의 크기가 54 dB(A)가량 감소됨을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

1. Cohan, L.J., Deane, W.J., Self Excited Vibrations in Large, gas and Oil Fired Utility Units, ASME Paper No. 64-PWR-10, Elimination of destructive, Sep. 27-Oct.1 (1964).
2. Chen, S.S., Guidelines for the Instability

- Flow Velocity of Tube Arrays in Crossflow, J. Sound Vib., Vol. 93(1984), pp. 439-455.
3. Fitz-hugh, J.S., Flow Induced Vibration in Heat Exchangers, Proc. UKAEA/NPL International Symposium on Vibration Problems in Industry, Keswick, England, Paper 427, (1973), pp. 1-17.
 4. Owen, P.R., Buffeting Excitation of Boiler Tube Vibration, Journal of Mechanical Engineering Science Vol.7 (1965), pp. 431-439.
 5. E.Konstantinids, S.Balaban, M.Yianneskis, Relationship between Vortex Shedding Lock-On and Heat Transfer Implication Tube Bundle in Cross flow.
 6. Chen. t Exchanger Due to Von Karman Street, Tran. of the ASME, Journal of Engineering for Industray, Vol, 90 (1968), pp.134-136.
 7. Standard Handbook for Mechanical engineers, 8th edition, pp. 11-69~11-70, 3-47~3-56.
 8. S.Takagi., N. Tokugawa., Observation and control of separation from bluff bodies.
 9. P.W Bearman, A.J. Wadcock., The Interaction between a Pair of Circular Cylinders Normal to a System. Journal of fluid mechanism.
 10. H.G. D. Goyder., Flow Induced Vibration and Noise in Heat Exchanger Tube Bundles, 12th International heat transfer conference, Grenoble France 2002.
 11. Heat Transfer and Flow Structures around Circular Cylinders in Cross flow, Ertan, Buyruk.
 12. Chen, Y.N., Flow-Induced Vibration and Noise in Tube-Bank Heat Exchangers Due to Von Karman Streets, Trans. ASME, J. Eng. Ind.