

320MW 화력발전소 가스 보일러 고 진동 현상 규명 Phenomenon Examination on High Vibration of NG Boiler in 320MW Thermal Power Plant

김연환⁺ · 배용채^{**} · 이현^{**} · 김희수^{**} · 이두영^{**}

Yeon-Whan Kim, Yong-Chae Bae, Hyun Lee, Hee-Soo Kim, Doo-Young

Key Words : NG boiler(가스보일러), Combustion-induced oscillation(연소진동), Standing wave(정재파), Pressure pulsation(압력맥동), Resonance Phenomenon(공명현상), High Vibration(고 진동)

ABSTRACT

Large-amplitude, combustion-induced oscillations are observed in most systems involving continuous flow, such as aeroengine afterburners, gas boilers and rocket motors. Strong furnace vibration is typically characterized by the presence of well developed standing waves in the furnace, generating high pressure pulsation and causing structural vibration of the furnace walls. 320MW NG boilers have been experienced high vibration frequently since reconstruction works. Excessive furnace vibration was encountered when a burner air rate is suddenly reduced during load zone changed from 270MW to 300MW. An investigation showed that the primary cause of the vibration was induced by combustion low air flow rate. This paper describes phenomenon examination on strong furnace vibration due to the change of boiler operating conditions.

1. 서 론

화력발전소에서 대형보일러는 고온고압의 과열증기를 생산하는 핵심설비이다. 보일러는 연료를 연소시켜 과열증기로 변환시키는 대형 열교환기로서 버너배치에 따라 대향식과 코너 연소식으로 분류되며 보일러 내부는 연료와 공기의 연소실과 배 가스의 통로가 되는 공간으로 구성된다. 연소실을 포함한 보일러 각 부위는 고온 가스로 채워져 있어 연료 공급계통과 연소공기 공급계통의 불안정성, 화염불안정 등이 발생할 경우 보일러는 과도한 연소진동이 발생한다. 고 진동 문제는 보일러 지지구조물 및 보일러 주변배관에 높은 동용력을 발생시켜 보일러 벽 및 박스데이 등에서 심한 손상이 발생할 수 있다. 국내 대형 발전소용 NG 보일러, 유류 보일러뿐 아니라 유연탄 보일러에서는 이러한 연소 진동 문제 및 와류유발 현상 등의 고 진동 문제를 경험해 왔다. 보일러 본체에서 발생하는 진동은 운전조건에 따른 변수가 많고 복잡한 현상이다. 보일러에서 발생하는 진동은 크게 본체의 연소실에서 나타나는 진동과 튜브군에서 발생하는 와류 진동

현상으로 구분할 수 있다. 전자의 진동현상을 연소진동으로 정의하며 보일러 연소로의 구조에 의해 결정되는 정재파가 화염의 흔들림을 일으키는 불안정 특성 또는 공기공급 시스템 특성 등과 일치하는 공명현상으로써 연소진동이 발생되면 급격한 변동에너지에 의하여 맥동압이 증폭되는 현상이 나타난다.



그림 1. 고 진동으로 손상된 보일러 'rear'측 외벽

화염 전면 부의 불안정, 화염 후류 부의 불안정 또는 버너 상류에 있는 팬, 덕트에 의한 공기 흐름의 불안정 등으로 인하여 연소진동이 발생할 수 있다. 연소진동을 일으키는 유동변동은 화염 전면 부에서 나타나는 흔들림에 의하여 발생

⁺ 한전 전력연구원 수화력발전연구소
E-mail : ywkim@kepri.re.kr
Tel: (042) 855-5426, Fax: (042) 855-5444

^{**} 한전 전력연구원 수화력발전연구소

한다. 열역학적 측면에서 화염의 전면부에서 나타나는 심한 흔들림은 급격한 발열 증가 또는 감소를 수반하는 엔탈피의 점프 또는 다운 등의 변동 에너지를 유발한다. 화염 전면의 흔들림 강도는 유속, 불안정성, 연소속도 등에 의해 흔들림의 크기가 변화하는 것으로 알려져 있다. 보일러 연소로 내부는 난류에 의해 화염이 뒤물리고 화염의 각기 다른 위치에서 열 발생량이 랜덤하고 급격한 변동으로 국소적인 압력 변동이 발생할 수 있으며 열악한 운전 조건에서 보일러 연소로는 불안정한 맥동압 증폭현상으로 고 진동을 동반하게 된다. 그림 1은 연소진동에 의한 고 진동으로 손상이 발생한 보일러 'rear'측 외벽의 모습이며 정면 벽과 좌우 벽에서는 손상된 가루들이 많이 나타나는 형태로 손상이 나타났다.

본 논문에서는 320MW급 석탄보일러를 유류 및 NG 혼소 보일러로 개조 후 반복되어 나타난 고진동 현상의 관적으로 보일러의 연소로 측에서 발생하는 연소진동 현상을 시험하고 특성을 고찰한다.

2. 구조 변경된 보일러 구조 및 운전 현황

대상 보일러는 320MW급 'oil-gas fired water tube boiler'로서 5단 4열의 20개의 버너가 Oil과 NG 혼소가 가능하도록 설계되어 있으며 보통 NG만을 사용한다. 그림2는 대상보일러의 구조와 각 부의 명칭을 보여준다.

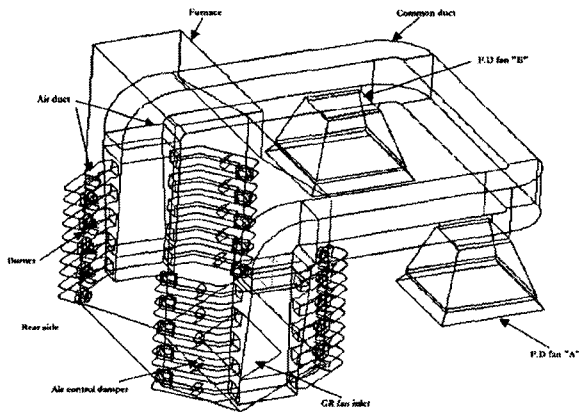


그림 2. 보일러의 구조

송풍 팬이 보일러 우측에 2개 배치되어 있어 공기를 주입하고 있다. Common duct를 지난 공기는 양쪽 윈드박스 입구로 나뉘어 진다. 윈드박스를 각기 지난 공기는 각기 10개씩 총 20개 버너 입구 덕트로 유입되며 버너 입구 덕트에는 수동 조작의 공기 조절용 댐퍼가 설치되어 있어서 각 버너로 공기를 개별 조절하고 있다. 또한 연소로 하부 우측에는 배가스 재순환 팬(GR팬)이 있어서 연소후 배가스 일부를 노 내부로 유입시켜 운전하고 있다. 대상 NG 보일러의 구조는 4코너의 버너가 5층으로 배열되어 연소되는 Corner

firing형태로 되어있다. 개조 전 NG 보일러의 버너 구조는 4코너 4층의 총 16개 버너로 되어 있었으나 개조 공사를 통해 연소로 하부 쪽에 4코너 1층 NG 버너를 추가 부착하여 총 20개의 버너로 개조되었다. 개조전 보일러는 강제 송풍 팬을 나온 공기가 보일러 윈드박스를 지나 하부의 16개 덕트로 공급되는 시스템보일러에는 20개의 버너가 각 코너별 4개와 보일러 상부로 5층으로 총 20개의 버너가 각 코너에 부착되어 부하별로 그림 3과같이 버너에서 연료가 분사되어 화염이 생성되는 코너 연소 형태이다.

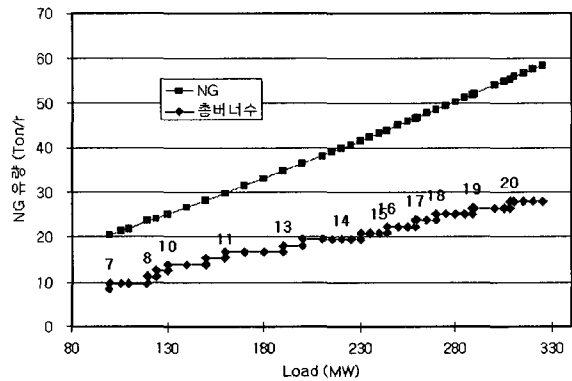


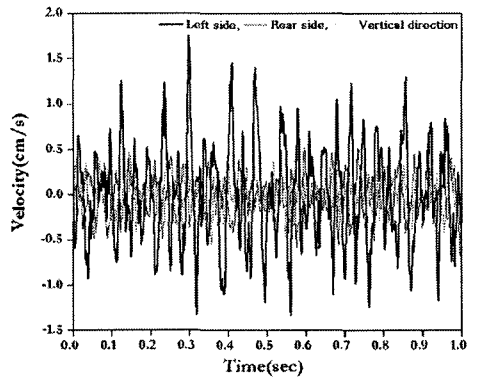
그림 3. 부하에 따른 사용버너수와 총NG유량

3. 보일러 본체의 연소 진동 시험

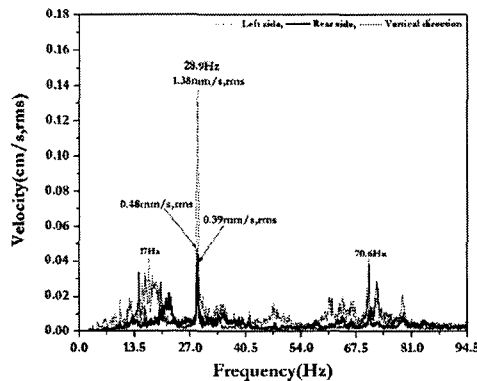
3.1 보일러 본체의 진동 현상

그림 4(a) 및 (b)는 대상 보일러에 대하여 겨울철의 정상 운전 중 보일러 본체 일상적인 진동으로서 28.9Hz가 탁월 주파수이나 여름철에는 28.9Hz와 더불어 68Hz가 탁월 주파수로 나타나는 경향을 보인다.

그림 5(a),(b)는 연소 진동으로 보일러 본체 전체가 떨리면서 나타나는 고진동의 형태로서 겨울철과 같이 장기 정지 후 부하가 270MW에서 300MW부하 영역에서 연소로에 공급되는 공기가 충분하지 않은 조건이 될 때 화염이 불안정해지면서 나타나는 고진동 형태이다. 보일러 공진 발생시 보일러 본체는 탁월 주파수가 28.9Hz에서 27.1Hz로 낮아지면서 조화파 형태로 나타났다. 그림 5(b)는 연소로의 화염이 뿌옇게 되는 시점의 연소 불안정성에 의하여 나타나는 진동으로서 주로 과잉공기가 부족한 시점에 갑작스럽게 화염의 흔들림과 함께 나타났다. 3방향 모두에서 진폭이 커지는 현상을 나타냈으며 'Left side'의 경우는 27.1Hz의 진폭이 28.9Hz의 진폭보다 35배 이상 증가하였다. 이와 같은 현상은 보일러 벽 및 벽스테이에 치명적인 손상을 일으킬 수 있다.

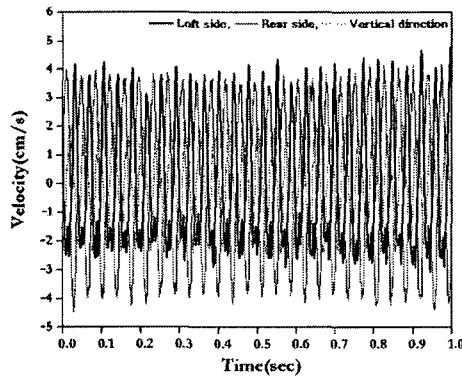


(a) 파형

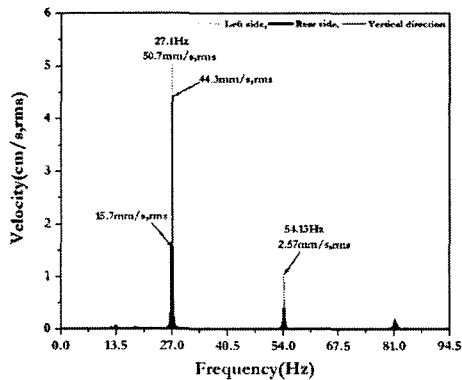


(b) 스펙트럼

그림 4. 정상 본체 진동



(a) 파형



(b) 스펙트럼

그림 5. 겨울철 장기 정지후 연소진동에 의한 본체 고진동

그림 6도 그림 5와 같은 연소 진동이나 주로 여름철 및 일상 운전상태의 연소진동은 270MW~300MW부하 영역에서 연소로에 공급되는 공기가 충분하게 공급치 못하여 나타나는 진동 형태로서 조화파 형태가 아닌 28 ~ 29.3Hz 과 66 ~ 68.1Hz 성분 위주로 증폭현상이 발생하였으나 그림 5에 비하여 레벨이 낮게 나타난다.

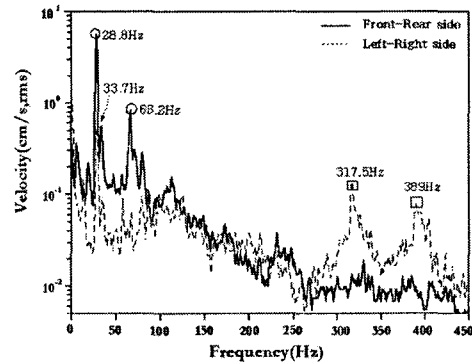


그림 6. 여름철 운전조건 연소진동에 의한 본체 고진동

3.2 보일러 본체의 고유진동수 시험

보일러 본체의 고유진동특성을 규명하고자 보일러 내부의 벽면을 임팩트 해머를 사용하여 가진 시험을 수행하였다. 임팩트 해머는 PCB사의 GK291B50이며 주파수분석기는 DI2200이다. 주파수 가진 범위는 500Hz로 하였으며, 보일러의 터빈 측 벽면과 동쪽 벽면에 대하여 각각 주파수 응답 함수를 구하였다. 시험 시의 보일러 내의 온도는 -3℃이었다. 보일러 본체의 고유진동수를 파악하고 보일러 구조의 동적 해석 모델의 검증 및 연소 진동의 공진 여부를 평가하기 위하여 수행하였다. 고유진동수 시험 결과는 그림 7과 같으며 굵은 실선은 보일러 터빈 측 벽면의 주파수 응답 함수를, 긴 점선은 측면 벽의 주파수 응답 함수를 보여주고 있다. 터빈 측 벽면의 경우는 8.4, 11.3, 15.3, 21.5, 31.6, 33.8, 36.5, 61.9, 75.9Hz 등의 고유진동 수가, 측면 벽의 고유진동수는 9.0, 11.6, 15.0, 18, 22.5, 25.6, 45.9, 73.8Hz으로 나타났다.

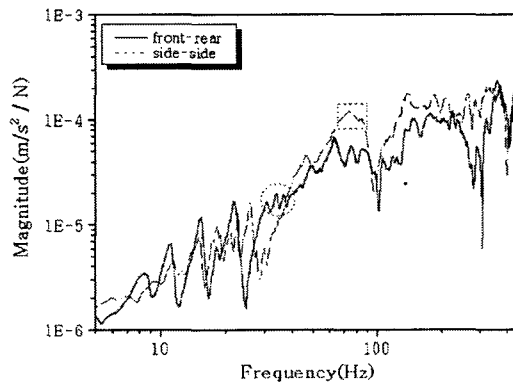


그림 7. 보일러 본체의 고유진동응답

3.3 모달 해석 결과

모달해석 결과는 표1과 같으며 정상상태의 진동은 주로 그림 8(a)과 같은 29Hz에서 35Hz 영역의 모드들이 일상운전 조건에서 보일러 본체의 진동으로 나타난다.

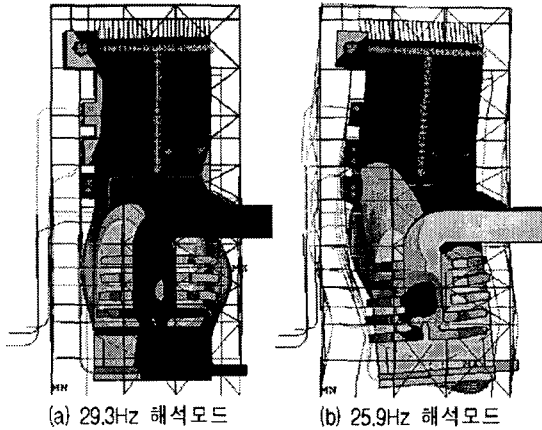


그림 8. 고유진동 모드

표 1. 보일러 해석 및 실험에 의한 고유진동수 결과

고유진동차 수	해석 결과(Hz) (실 운전 조건)		실험 결과(Hz) (-3°C조건)	
	Rear	Left	Rear	Rear
1	1.6	1.6	-	-
2	9.7	9.8	8.4	9.0
3	11.0	11.0	11.3	11.6
4	16.2	16.2	15.3	15.0
5	18.7	18.7	-	18.0
6	-	-	21.5	22.5
7	25.9	25.9	-	25.6
8	29.3	29.3	-	-
9	29.9	29.9	30.6	-
10	31.1	31.1	33.8	-
11	34.4	34.4	36.5	-
12	47.6	47.6	-	45.9
13	64.2	64.2	61.9	-
14	71.5	71.5	75.9	73.8

연소진동은 과잉공기 부족으로 화염이 불안정하여지고 노내 온도가 저하되면서 노내의 정제과가 화염의 흔들림과 일치하여 나타나는 증폭현상이다. 특히 겨울철에 보일러가 장기 정지중 기동하여 운전하여 보일러가 충분히 가열되지 않은 조건의 경우 과잉공기 부족으로 나타나는 진동은 주파수가 여름철보다 더욱 떨어져 그림8(b)의 본체 고유모드와도 일치될 가능성이 커진다. 앞에서 제시된 그림 5는 그림 8(b)처럼 수평방향 및 수직방향에서 변위가 증폭되는 형태이다. 본 진동 모드는 하부 연소로와 상부 배가스통로에서

서로 비틀리는 특징을 나타내어 그림 1과 같이 'rear'측 벽의 손상이 커지는 형태를 나타낸다. 반면 그림 8(a)의 형태는 주로 하절기 및 충분히 보일러의 온도가 올라간 상태에서 나타나는 진동패턴으로 분석된다.

4. 연소진동의 원인 규명

4.1 보일러 본체의 노내 음장 검토

그림 9는 보일러 'Left side'에서 'Right side'방향의 12.1m의 공간에서 나타나는 정제과 형태로서 보일러 측면의 양쪽 벽에서 최대맥동압이 나타난다.

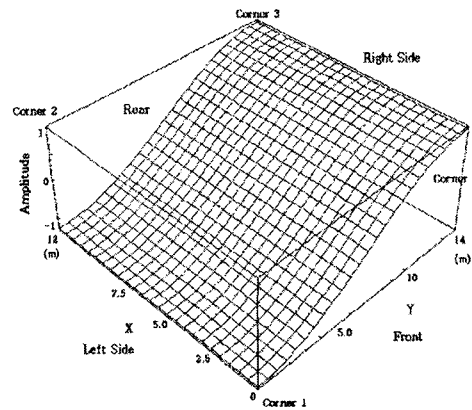


그림 9. 보일러 노 내부의 정제과 음압모드

$$f_s = \frac{C_{eff}}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (1)$$

여기서 l_x, l_y, l_z 은 보일러 본체 노의 길이이고 n_x, n_y, n_z 은 정수이며 C_{eff} 는 노내 유효음속이다.

표 2는 NG 배가스의 열역학적 상수들이다.

표 2. 보일러 노내의 열역학적 상태

매 질	R(J/kmol K)	분자량	비열비	온도(K)	음속(m/s)
NG배가스	8314	27.65	1.31	1750	830
				1475	762

그림 10은 정상운전조건의 보일러 노 내의 온도분포를 보여준다. 보일러의 위치마다 온도분포가 달라 정제과 주파수가 달라질 수 있으나 보일러 본체 상부온도는 2000K가 넘어 연소진동이 발생하는 27Hz ~ 29Hz 주파수의 정제과는 버너가 위치한 5층이하의 보일러 본체 하부에서 나타날 수 있으며 노내온도를 분석한 결과 주로 3층이하 버너 존을 중심으로 나타날 가능성이 큰 것으로 분석되었다. 특히 전체적으로 화염의 흔들림으로 노내 온도가 저하가 확대되어 정제과지역이 넓어지면서 공명현상으로 발전하는 형태로 분석된다.

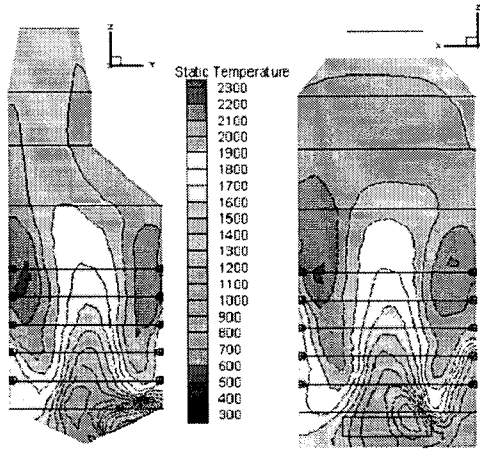


그림 10. 보일러 노 내부의 온도분포

4.2 음장 가진 시험

본 시험은 보일러 정지시 보일러를 벽면을 가격하여 노 내의 음장을 가진하고 B&K의 마이크로폰을 사용하여 음장의 공명 현상을 측정하는 방식으로 수행하였다. 이 때 보일러 노의 온도는 -3°C 이었다. 그림 11은 음장가진 결과로서 점선으로 표시한 지점의 주파수 11.25Hz와 27.5Hz는 연소 진동과 공명 가능성이 있는 것으로 분석된다. 11.25Hz는 측면방향의 1차원 고유진동수로 판단되며 27.5Hz는 보일러 전/후 방향의 1차원 2차 고유진동수로서 보일러의 정상 운전 시 연소로 평균온도를 1750K로 환산하면 11.25Hz는 29Hz, 27.5Hz는 68Hz가 된다. 즉 정상운전 조건에서는 1차 모드로 추정되는 29Hz 근처의 맥동압이 버너존에서 나타날 가능성이 크며 화염이 흔들려 불안정해지면서 온도저하로 정재파가 일상적인 경우는 29Hz로 겨울철 기동조건처럼 온도조건이 충분치 못한 조건에서는 27.1Hz로 저하되어 공명된 것으로 볼 수 있다. 그림 11에서 굵은 실선은 'rear'측 보일러 벽면을 가진 한 경우의 특성이고 얇은 실선은 'left side'측 보일러 벽면을 가진 한 응답이다.

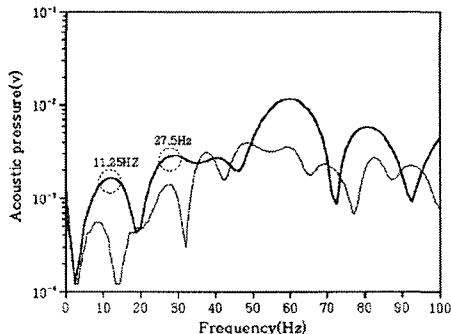
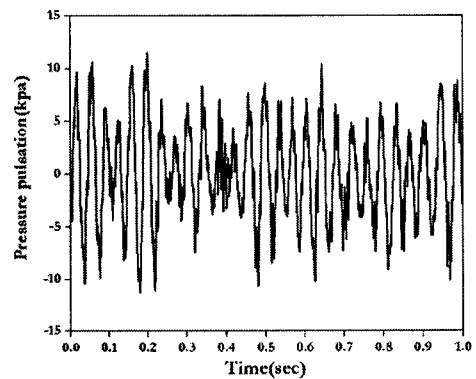


그림 11. 정지 중 연소로의 음장특성

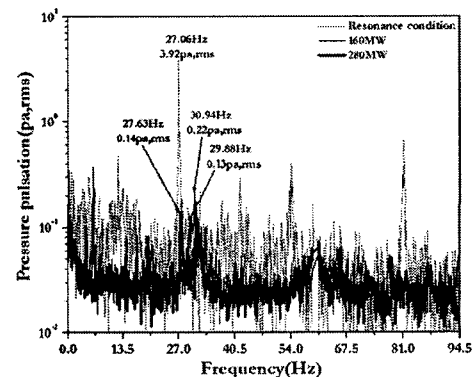
4.3 보일러 노의 맥동압 측정

연소속도가 빠르게 되면 화염 전면 부의 흔들림 강도가

증가하므로 보염판, 임펠러 또는 디퓨저 등을 사용하여 화염 전면 부의 흔들림을 제한하는 방법을 사용할 수 있으나 대 상 보일러의 버너시스템은 고정형으로서 조정여지가 없는 조건이다. 대형 화력 보일러에서의 연소 진동은 보일러 노내의 정재파와 버너 시스템간의 상호 간섭으로 발생하는 현상으로서 고온의 유체 흐름 때문에 정확한 측정이 어려운 면이 많다. 본 연구에서는 동압센서를 적용하여 운전 중 노내에서 발생하는 맥동압의 특성과 보일러 진동을 부하별로 조사하였다. 그림 12(a)는 3층 코너의 버너존에서 측정된 맥동압 파형이며 연소진동이 발생하는 280MW 부하대에서 27Hz의 주파수특성을 보인다. 그림 12(b)는 버너존이 아닌 노 상부에서 배가스 유동지역에서 측정된 것으로서 동일부하에서 한쪽은 연소진동이 발생한 조건이고 한쪽은 연소진동이 없는 조건의 스펙트럼이다. 연소진동이 발생될 때 동일부하의 30.9Hz 및 27.6Hz성분이 27.1Hz로 이동하면서 조화파형대로 공명현상의 강도가 커진다.



(a) 280MW 3층 버너존의 맥동압



(b) 280MW 6층 노 상부의 맥동압

그림 12. 연소로의 압력맥동

정재파의 증폭현상은 과잉공기가 부족한 조건에서 화염의 흔들림과 함께 발생하였다. 화염의 흔들릴 때 주파수 존이 0.5 ~ 3Hz정도 정재파 주파수의 이동 현상은 노내온도가 저하되어 음속이 변경되면서 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

5. 결론

270~300MW에서 자주 나타난 고진동 현상은 보일러내에 희박한 공기 공급조건에서 급격한 화염 흔들림이 발생되어 버너 존의 정재파가 증폭되는 현상으로 진단되었다. 주메커니즘은 부하증가와 함께 새로운 버너가 커지면서 요구되는 공기량을 충족시키지 못하여 화염이 흔들리는 불안정현상과 함께 발생하였다.

정재파가 증폭되는 지점 및 특성은 보일러의 운전조건에 따라 차이를 나타내었으며 연소진동의 증폭도와 본체의 고진동 팬턴이 서로 차이를 나타내었다. 특히 겨울철 장기 정지 후 나타나는 연소진동은 여름철에 비하여 증폭 강도가 커서 심한 손상을 일으킬 위험성이 많다.

근사적인 음장시험 및 고유진동시험 결과를 근거로 버너 착화 연소부의 연소의 근소한 변동이 연소실 음장의 고유주파수와 일치되는 정재파의 증폭현상이 고진동의 원인으로 고찰된다. 특히 증폭된 정재파의 압력맥동파가 연소반응에 피드백 되어 화염을 뿌연게 하는 문제로 노내온도는 저하된다.

참 고 문 헌

- (1) 전력연구원, 2001, LG Power 복합화력 열공급 보일러 덕트의 소음진동 시험 용역 보고서.
- (2) F. L. Eisinger, "Combustion air flow induced furnace vibration in an oil-fired utility boiler-a case study", C416/095, IMechE, 1991, pp427-444.
- (3) C. H. Gilkey, "Recent Experience with Vibration Problems Associated with Fossil Fuel steam Generating Equipments", ASME Journal of Combustion", February 1971, pp31-34.
- (4) 김철홍, 2000, "75MW급 발전용 보일러 관군에서의 음향공진에 의한 진동/소음 사례연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp150-155.
- (5) Cyril M. Harris, Shock and Vibration Handbook, 3rd ed. ch29, McGraw-Hill Book Company, 1988.
- (6) Lawrence E. Kinsler, Fundamentals of Acoustics, 3rd ed. John Wiley & Sons, 1982.