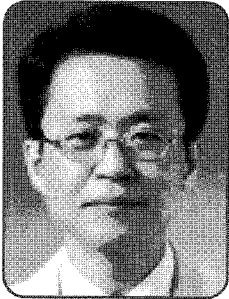


열공급 보일러 버너의 저 녹스형 변경과 공기에열기 튜브군의 과도소음 현상



한전전력연구원
엔지니어링센터
기계설비진단팀
책임연구원/공학박사 김연환
Tel : (042)865-7556

1. 서론

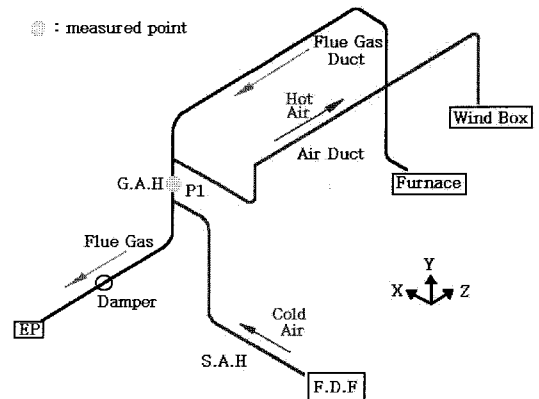
보일러에서 배출되는 고온의 연소가스가 열교환기의 실린더형 튜브 군에 수직 방향으로 흘러갈 때 유동이 여기(flow excitation)되어 와류(vortex shedding)가 발생된다. 배가스의 흐름에서 튜브에 의한 저항으로 유동이 불안정해지고, 튜브 후류 쪽에 와류가 생성되기 때문이다. 이때 주기적인 흐름의 여기로 인한 주파수를 “vortex shedding frequency”라 부르고 덕트 및 튜브의 고유진동수와 일치할 때 큰 변위를 유발시켜 덕트 및 튜브가 파손될 수도 있으며, 이를 기계적 진동이라 한다. 또, 열 교환기 튜브 군에서는 와류로 발생한 주파수와 덕트내 유동 직각 방향의 정재파(standing wave)가 갖는 음향주파수(acoustic frequency)가 일치할 때 음향 공명현상이 발생하여 큰 소음을 발생하는데 이를 음향진동(acoustic vibration)이라고 한다.

본 논문은 도심에 위치한 열 병합 복합 화력에서 열 난방 보일러의 일반형 버너를 저 녹스(Nox)형 버너로 교체한 후 일상 운전부하 영역에서 배가스 덕트에 설치되어 있는 공기에열기(Gas Air Heat Exchanger ; G. A. H)에서의 고 소음 음향 증폭현상에 대하여 그 메커니즘의 규명 및 소음 대책 사례에 관하여 기술한다.

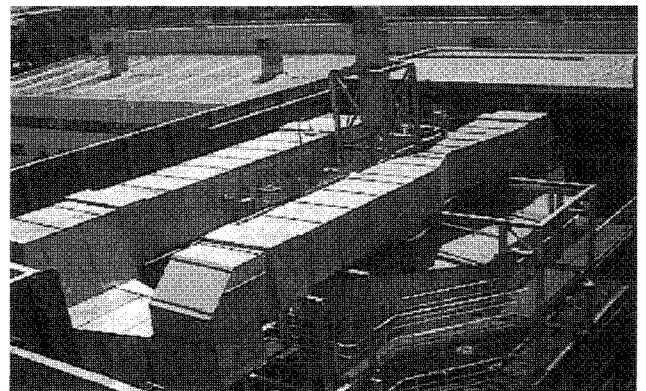
2. 설비현황

[그림 1]은 보일러의 연소용 공기 및 배가스의 덕트 시스템의 레이아웃이다. 연소가스 공기에열기(Gas Air

Heat Exchanger ; G. A. H)는 Tubular type으로서 덕트내부에 있는 튜브직경은 48.6mm, 깊이(depth) 2,114mm, 18열의 2단으로 튜브내부로 연소용 공기가 지나가고 튜브 밖으로는 연소가스(Flue Gas)를 보내 열 손실을 최소화시키는 역할을 한다. 고온부 튜브군의 T (Transverse pitch)는 70mm 41행, L (Longitudinal pitch)은 70mm이며 저온부 튜브군은 T(Transverse pitch)는 100mm 41행, L(Longitudinal pitch)은 70mm이다.



(a) 공기 및 연소가스 덕트의 레이아웃

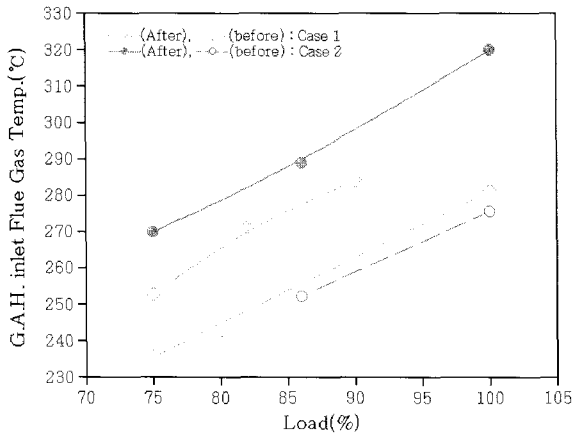


(b) 공기 및 연소가스 덕트의 상부사진

[그림 1] 보일러 덕트의 레이아웃 및 모습

[그림 2]는 공기에열기를 지나는 연소가스 운도에 대한 개조공사 전·후의 운전 데이터를 비교한 것으로 공기에열기에서의 열 낙차가 개조공사 전에 비하여 Case 1은 18%, Case 2는 16.5% 정도 커졌으며 ΔP (gas

pressure loss)도 증가된 것으로 나타나 공기예열기에서 가스의 유속이 빨라졌다. 특히, Case 2는 Case 1보다 저 녹스 버너 교체 전·후의 온도차가 심화된 상태를 나타내었다. 보일러 출구 연소가스 온도가 증대되면 동일 질량유량에 대하여 체적유량이 증가되어 와류 주파수가 높아지고 공명 영역으로 접근하는 효과를 나타낸다. 따라서 보일러 출구의 연소가스 온도 증가 등을 연소실험 등을 통하여 적절하게 조절 가능한 지 등에 대한 조사가 필요하다.



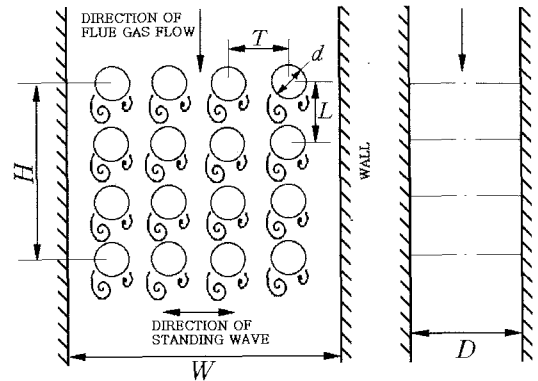
[그림 2] 공기예열기 입구측 배가스 온도비교

3. 설계검토

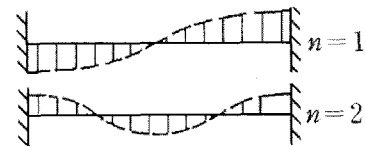
3.1. 음향 진동(Acoustic Vibration) 현상

[그림 3(a)]에서 보는 바와 같이 튜브 군을 지나는 연

소가스는 와류를 형성하고 이 와류는 일정한 주파수를 갖는다. 이 주파수를 f_v (vortex shedding frequency)라 하고, 이 주파수가 유동장 속의 정재파 주파수 f_s (standing wave frequency)와 공명을 하면 [그림 3(b)]과 같이 양벽사이에서 횡파를 형성한다. [표 1]은 공기예열기에 대한 제원이다.



(a) In-line 튜브군의 와류 및 주요 변수



(b) Transverse 방향의 정재파 형태

[그림 3] In-line 튜브군의 정재파

유동장내의 정재파는 연소가스의 조건(온도, 압력, 연소기체의 조성 등)에 따라 변하며 튜브군을 가진하는 와류주파수는 유속에 따라 변화한다. 만약, 양 주파수가 근접하거나 일치되면 공명이 발생하여 과도한 소음이

[표 1] 공기예열기 고온부 튜브군 사양

W(mm)	D(mm)	H(mm)	튜브(mm)	T(mm)	L(mm)	St. No.
2,900	2,114	1,700	48.6	70	70	0.31

[표 2] 공기예열기 고온부 튜브군에서의 변수

항 목				정재파(Hz)			와류 (Hz)	퍼펫 (Hz)	Chen No
				W		D			
				1차	2차	1차			
Case 1	교체전	上	100%	77.2	154.4	106.0	152.8	134.2	8249
		中	90%	77.4	154.8	106.2	148.1	130.1	9199
	교체후	中	90%	73.4	146.7	100.7			
		中	75%	72.4	144.8	99.4	101.2	88.9	6335
Case 2	교체전	上	100%	76.8	153.6	105.4	127.5	112.1	7546
		上	86%	77.8	155.6	106.2	126.9	111.5	7890
	교체후	中	86%	73.7	147.4	101.1			
		中	100%	75.9	151.8	104.1	148.5	130.6	9275
		中	75%	72.8	145.6	99.8	102.2	89.8	6417

유발된다. [표 2]는 저 녹스 버너 교체 전·후 부하별 정재파의 주파수, 와류 주파수(f_v)와 퍼펫(Buffeting)에 대한 계산 결과를 보여준다. 퍼펫(Buffeting)은 튜브군 사이에 유속이 빨라지면 발생하는 가진력의 일종으로써 퍼펫주파수가 와류주파수의 20% 이내로 접근할 경우 와류발생이 지속되거나 강화되는 것으로 알려져 있다.

Case 1의 경우에는 94%부하에서 발생한 와류주파수와 [그림 3(a)]의 “W”방향의 2차 정재파 주파수([표 2] 참조)와 공명범위에 있는 것으로 해석된다. Case 2는 75%부하에서 와류주파수와 [그림 3(a)]의 “D”방향의 1차 정재파([표 2] 참조)의 공명과 100%부하에서는 와류주파수와 “W”방향의 2차 정재파 주파수와 공명이 나타난다.

[표 2]에서 상은 고온부 튜브군의 상부를 의미하고中は 고온부와 저온부 튜브군의 중간부위를 의미한다. 특히, Chen No가 2000을 넘는 경우 공명 현상이 발생할 수 있는 조건이다. 즉 대상 공기예열기의 음향 공명 현상은 상부 고온 튜브군의 중·하부에서 나타나기 쉬운 것으로 분석된다.

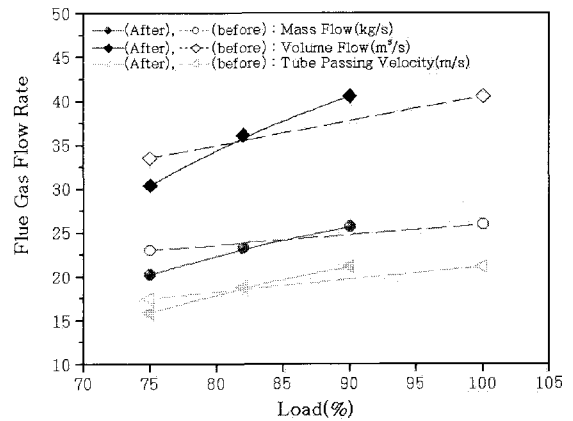
3.2. 배가스 유량의 영향 검토

[그림 4]는 연소가스의 운전조건에 따른 공기예열기에서의 연소가스의 유량(flow rate)를 비교한 것으로 설계 검토하면 G.A.H, 튜브 군 통과속도는 100%부하에서 >21m/s으로 계산된다.

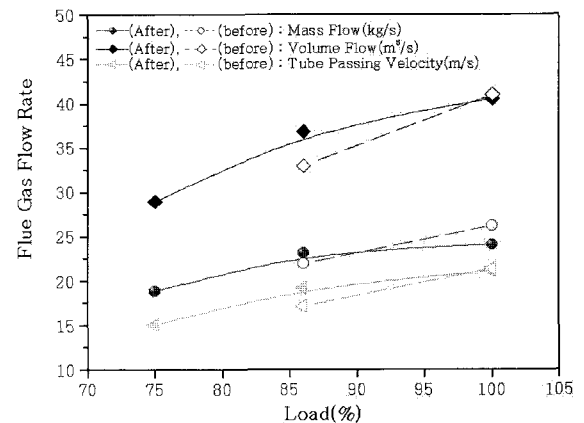
[그림 4]에서 보면 저 녹스 버너의 교체 전·후의 운전 경향이 Case 1, 2에서 서로 다른 경향을 나타낸다. [그림 4(a)]의 Case 1은 배가스 유량이 85%이하 부하에서는 저 녹스 버너 교체 전보다 작으나 85%부하 이후는 증가되어 튜브 통과 속도가 교체 전보다 증가된 상태로 나타난다. 이것은 94%부하에서 공명이 시작한 것과 연관성이 있다. 저 녹스 버너의 교체 전과 비교하면 체적유량(Volume Flow rate)이 설계치를 초과하는 지점이 질량유량(Mass Flow rate)이 설계치를 초과하는 지점보다 저 부하로 이동하여 발생하였다. 이는 저 녹스 버너 교체 후 보일러 출구 연소가스 온도가 상승함에 따라 공기예열기에서 여력이 작아진 데 소음 증폭 원인을 찾을 수 있다.

[그림 4(b)]에서 보면 2호기는 90%이하 부하대에서 저 녹스 버너 교체 전에 비해 질량유량이 증가된 상태에서 운전되고 있으나 그 이후 부하대에서는 질량유량이 감소되는 경향을 보인다. 이는 Case 2가 Case 1보다 공명현상이 덜 심한 이유이다. 또한, [표 1] 및 [그림 2]에서 보면 Case 1보다 Case 2의 보일러 출구 배가

스 온도를 더 높게 운영하고 있으며 저 녹스 버너 교체 전보다 교체 후의 체적유량과 튜브통과 유속이 증가되어 운전되었다.



(a) Case 1



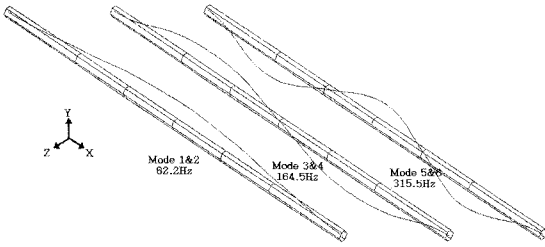
(b) Case 2

[그림 4] 저 녹스 버너 교체 전·후 공기예열기의 연소가스 유량 비교

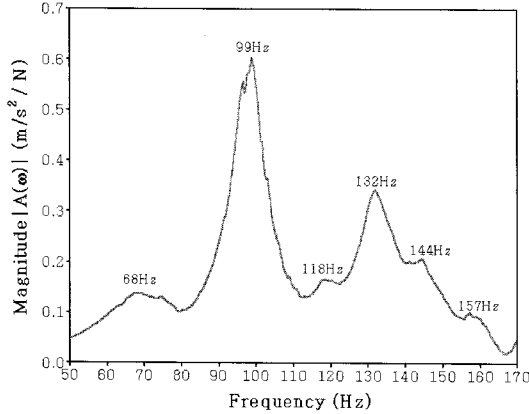
3.3. 기계적 고유진동수 검토

현장의 공기예열기에서 고 소음현상이 발생할 때 또한 예열기 덕트의 벽면이 심하게 떨리는 현상이 함께 나타나고 있어 f_v 와 덕트 및 튜브의 구조적인 고유진동수의 공진 가능성을 분석하였다.

튜브의 경우는 유한요소해석을 통하여 고유진동수를 평가하였으며 공기예열기 벽의 경우는 임팩트 가진 시험을 수행하여 결과를 얻었다. 튜브의 재질은 STBH35이며 [표 2]에서 언급한 것처럼 외경이 ψ 48.6이고 길이가 2,114mm로서 두께가 3.2mm인 Tubular Type이다. 양단고정의 경계조건을 고려하여 해석된 결과는 [그림 5]와 같다. 1, 2차 모드 경우 62.2Hz로 [표 4]에 계산된 f_v 와 20%이상 이격되어 있어 와류 및 난류 강도에 의한 튜브 군 자체의 기계적 피로 파손의 가능성은 적은 편으로 분석된다.



[그림 5] 공기에열기 튜브의 고유진동 모드 해석 결과



[그림 6] 공기에열기 본체 덕트 벽면의 고유진동 응답 스펙트럼

[그림 6]은 [그림 1]의 공기에열기 벽면인 P1 지점에 대한 고유진동수 시험 결과를 보여준다. 고유진동수는 68Hz, 99Hz, 118Hz, 132Hz, 144Hz, 157Hz 등이며 정상운전 시 P2지점의 덕트온도([표 1] 참고)는 최소 250~300℃로써 G.A.H.벽면의 탄성계수는 정지 시에 비하여 $10^5 \sim 2 \times 10^5$ psi 정도 저하되어 벽면의 고유진동수가 와류주파수와 공진범위에 놓일 가능성이 크다. [표 3]에서 보는 바와 같이 Case 1의 경우는 90%이후 부하 대에서 144Hz, 157Hz와 공진범위에 위치할 수 있으며 Case 2는 75%부하에서 99Hz 또는 118Hz와 공진범위에 위치하는 것으로 분석된다.

4. 진단

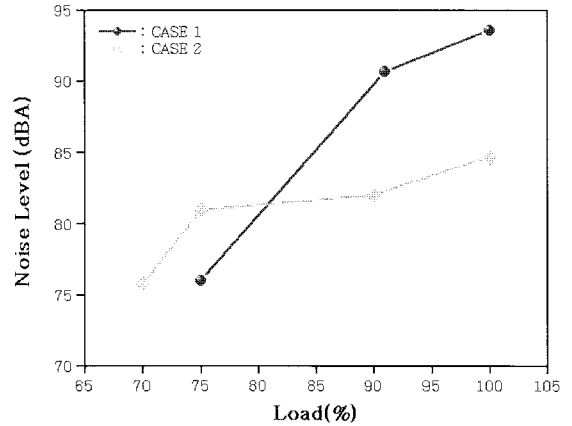
저 녹스 버너 교체 후 공기에열기 부위에서 발생되고 있는 공명소음에 대한 원인규명을 위하여 상기의 설계 검토와 더불어 소음 및 공명 맥동과 진동 진단을 수행한다. 다음은 해당발전소 열 공급 보일러에 대한 시험 결과이다. 음향 소음의 부하별 추이를 시험한다. 그 증가되는 부하는 Case 1은 94%를 중심으로 75%와 100% 부하에서 수행하였고 Case 2는 70%, 75%, 90%, 100% 부하의 소음추이를 조사하였다.

4.1. 소음 추이

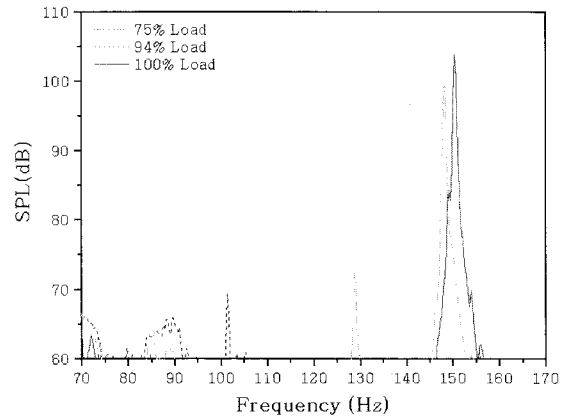
[그림 7]에서 보는 바와 같이 Case 1 및 Case 2 모두

공명이 발생하는 시점부터 소음레벨이 증가하였으며 Case 1은 94%이후 부하에서 갑작스럽게 소음이 증폭하는 반면 Case 2는 75% 부하에서부터 소음이 증가하였다.

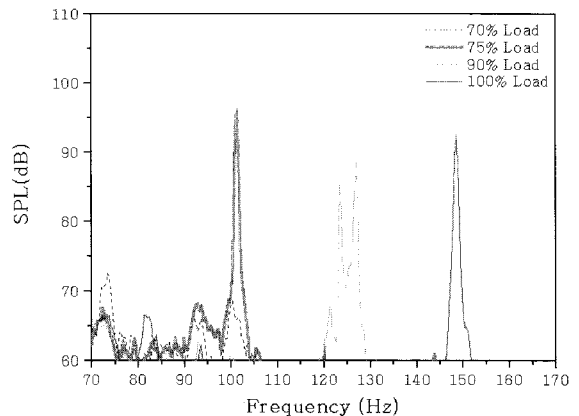
[그림 8(a)]에서 주 소음주파수는 튜브군을 지나는 유속이 변경되어 100%부하에서는 150.3Hz이며 부하에 따라 변경되었다. Case 1의 경우 94%이상에서 소음 증가시 나타나는 와류주파수 148.1~150.3Hz 가 튜브열의 정재파와 음향 공명 범위에 위치하였다.



[그림 7] 공기에열기의 소음레벨(dBA) 비교



(a) 경우 1 (Case I)의 부하별 소음특성



(b) 경우 2 (Case II)의 부하별 소음 스펙트럼

[그림 8] 공기에열기의 부하별 소음추이

[그림 8(b)]에서 보면 Case 2는 75%부하에서 큰 음향 공명소음이 발생되었으며 유량증가와 함께 외류 주파수가 고주파수 영역으로 이동하며 90%부하이후에서는 저하되다가 100%부하에서 다시 증가되는 경향을 나타낸다. 100%부하의 경우 Case 2는 Case 1에 비하여 동일부하에서 유량이 작아 음향 공명 강도가 낮은 결과를 보였다.

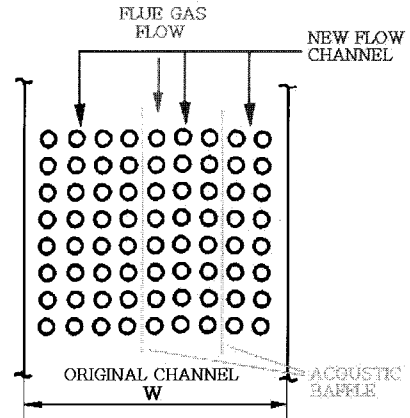
5. 음향 진동 대책

공기에열기 벽면의 떨림 현상과 과도한 소음현상은 시스템이 와류형성에 대한 충분한 감쇠력을 갖지 못하고 정재파와 튜브군의 와류주파수와가 일치될 경우 음향공명을 피할 수 없다. 따라서, [그림 9]는 공기에열기의 음향진동 대책은 파장의 1/2보다 작은 튜브군 사이 및 파장의 1/4보다 작은 튜브 군 사이에 [그림 9]와 같이 소음진동 방지용 베플(acoustic baffle)판을 설치하여 f_s 와 f_v 의 일치 가능성을 회피하는 방법을 적용하였다.

6. 결론

열 전용보일러의 저 녹스 버너 교체 후 연소가스 공기에열기에 발생하는 음향 공명 소음 현상에 대한 원인 규명 및 대책 결과는 다음과 같다.

- 대상 열공급 보일러의 공기에열기에서 나타난 음향진동은 덕트내 튜브군에서 가스 유속이 설계 임

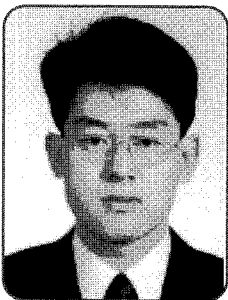


[그림 9] 공기에열기의 소음진동 대책

계유속을 초과하여 운용함으로써 공명소음이 쉽게 발생되었다.

- 일상버너에서는 전부하 영역에서 공기에열기의 음향증폭 현상이 나타나지 않았다.
- 저녹스 버너 교체 후 보일러의 연소 특성 변경으로 보일러 출구 온도 및 가스 유량이 증가됨으로써 공기에열기 튜브군 정재파 영역으로 접근하여 음향공명현상을 유발하였다.
- 고소음 회피를 위하여 튜브 군 사이에 정재파의 반파장 및 1/4 파장보다 작은 위치에 소음진동 방지 베플 플레이트를 수직으로 설치하는 소음제어방법으로 증폭현상을 회피하였다.

한국지역난방공사 화성지사 화학시험실 KOLAS 공인시험기관 인정



한국지역난방공사
화성지사 운영부
환경과장 김병훈
Tel : (031)8003-1626

I. 국제공인시험인증제도

목 적

국제기준(ISO)에 정해진 기준에 따라 조직, 품질시스템(업무절차 등), 시설 및 환경조건, 기술인력 등에 대하여 시험·검사·교정기관 등을 평가하여 생산하는 시험결과의 공신력을 인정하여, 시험기관 성적서를 국제상호인정하는 제도