

# 초임계압 보일러 연소로의 진동안정성 평가기법 연구

## Vibration Stability Analysis of Furnace System in Supercritical Boiler

권혁민†‡ · 조치훈\* · 김희원\* · 주원호\*

Hyuk-Min Kwon, Chi-Hoon Cho, Heui-Won Kim and Won-Ho Joo

**Key Words** : 초임계압 보일러, 연소로, 음향해석, CFD, 진동해석

### ABSTRACT

최근 경제적인 연비와 효율적인 가동성, 배기가스 감소의 이유로 초임계압 보일러가 각광받고 있다. 하지만 보일러 연소로는 용접된 튜브로 구성되어 있기 때문에 연소 시 내부압력에 의해 발생하는 진동에 취약하여 이에 대한 진동안정성 평가가 필요하다.

본 논문에서는 CFD 기법을 기반으로 수행한 변동압력 해석과 단순화한 모델을 이용한 진동해석을 통하여 보일러 운전 시의 진동안정성 평가를 수행하였다. 변동압력해석은 정상상태 CFD 해석을 수행하고, 이를 이용한 음향모드 해석과 비정상상태 CFD 해석에서 변동압력을 추출하고, 음향모드 해석 결과와 주파수 성분을 비교하여 검증하였으며 이를 진동해석 모델에 기진력으로 적용하여 보일러 연소로의 진동해석을 수행하였다. 진동해석 모델은 동특성을 고려한 등가물성치를 이용하여 연소로의 복잡한 구조를 단순화하였으며 buckstay 등의 방진구조를 구현하여 보일러의 진동안정성을 평가하는 기법을 정립하였다. 해석결과, 보일러 운전조건에서 비정상상태 CFD 해석을 통해 구한 변동압력과 진동해석을 통해 얻은 가속도 응답은 안정적 수준인 것으로 확인하였다. 이는 향후 유사한 보일러 안정성 평가에 적용이 가능하고, buckstay 등 보일러의 방진 구조 설계 및 평가에도 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 1. 서 론

최근 경제적인 연비와 효율적인 가동성, 배기가스 감소의 이유로 많은 플랜트 공사에 초임계압 보일러가 설치되고 있다. 초임계압 보일러는 일반 아임계압 보일러에 비해 임계압 (225.75kg/cm<sup>2</sup>) 이상의 고압, 고온의 연소가스가 내부에서 발생되어 연소로를 기진하게 된다. 이 때문에 초임계압 보일러 작동 시, 연소로에 진동문제가 발생할 가능성이 크며 이를 방지하기 위하여 buckstay 등의 방진구조 역할이 중요하다. 또한 연소로는 수백 개의 튜브가 용접되어 있는

구조로 내부 변동압력에 취약하므로 진동안정성 평가가 필요하다.

본 연구에서는 초임계압 보일러의 진동안정성 평가를 위해 Figure 1 과 같이 크게 변동압력 해석과 진동해석 두 부분으로 나누어 해석절차를 정립하였다. 이를 바탕으로 700MW 초임계압 보일러에 대한 진동안정성 평가결과를 소개하였다.

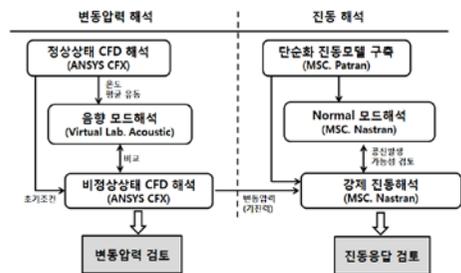


Figure 1. Flow chart of Analysis

† 교신저자, ‡ 발표자, 권혁민, 현대중공업

E-mail : kwonhyukmin@hhi.co.kr

Tel:(052)203-6465, Fax (052)250-9570

\* 현대중공업

## 2. CFD 를 이용한 변동압력 해석

정상상태 CFD 해석은 음향모드해석에 필요한 온도, 평균유동 속도 등의 초기조건을 얻기 위하여 수행하였다. 열교환용 튜브 (Superheater, Reheater, Economizer)는 평판으로 단순화하였으며 각각의 mesh size 는 Figure 2 와 같이 해석범위에 따라 다른 크기로 설정하였다. 그리고 버너가 위치한 연소로 하단에서의 FEGT(Flue Exit Gas Temperature)와 CFD 해석에서의 온도를 비교하여 결과의 정확성을 검증하였다.

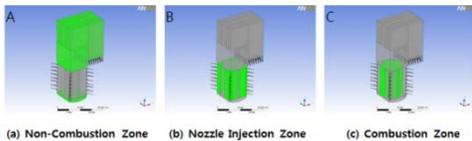


Figure 2. Mesh blocks for CFD

음향모드해석은 연소로 내부 공간의 음향 모드를 규명하기 위해 수행하였다. 정상상태 CFD 해석에서 얻은 온도, 평균유동 속도 등의 초기조건을 이용하여 음향모드해석을 수행하였고 첫 번째와 두 번째의 음향모드는 각각 2.4Hz 와 6.7Hz 로 Figure 3 에 각각 나타내었다.

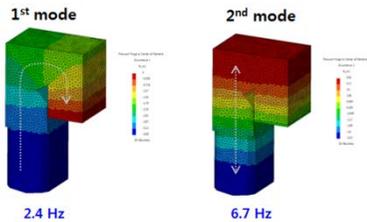


Figure 3. Acoustic Mode of Furnace

비정상상태 CFD 해석은 보일러 연소로 내부의 변동압력을 얻기 위하여 수행하였다. 해석 S/W 는 ANSYS CFX 를 사용 하였으며 0.005 초의 시간간격으로 해석을 수행하였다. Figure 4 는 변동압력을 추출한 보일러 위치를 나타내고 있으며 Figure 5 는 Height 2 (연소로 버너의 위치)에서 시간에 따른 변동압력과 주파수 분석 결과를 나타낸다. 이를 통해 변동압력의 폭이 안정된 수준을 유지함을 알 수 있고 주파수 분석 결과, 2.4Hz 와 7Hz 에서 응답이 높다는 것은 변동압력이 보일러의 음향모드를 가진 했다는 것을 의미한다. 그러나 이는 저주파 영역이므로 공명에 의한 소음문제는 없을 것으로 판단되었다.

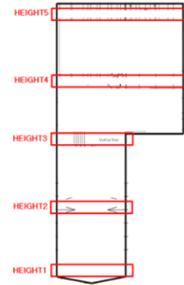


Figure 4. Pressure Measurement Position

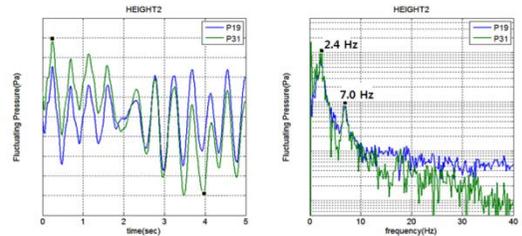


Figure 5. Results of Transient CFD Analysis

## 3. 진동 해석

초임계압 보일러 연소로는 Figure 6(a)와 같이 수백 개의 튜브들이 용접되어 있는 구조로 되어있다. 하지만 실제형상 모델을 그대로 사용하여 해석을 수행하기에는 연산시간이 과도하게 소요되기 때문에 Figure 6(b)와 같이 단순화 평판을 개발하여 대신 사용하였다. 단순화 평판의 물성치를 방향에 따라 다른 값을 가지는 ‘직교 이방성 물성치 (orthotropic)’라 가정하고 실제형상 모델의 고유진동수와 비교하며 물성치 (탄성계수, 전단계수) 조절하는 과정을 수행하였다.

그 결과 Figure 7 과 같이 단순화 평판의 진동특성 (고유모드, 고유주파수)이 실제형상 모델과 동일해졌음을 알 수 있다.

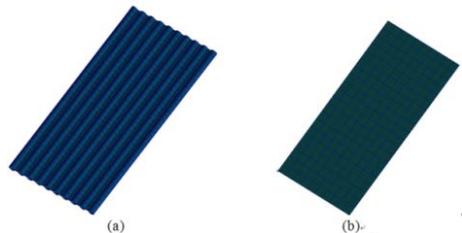


Figure 6. Fine model and Simplified model

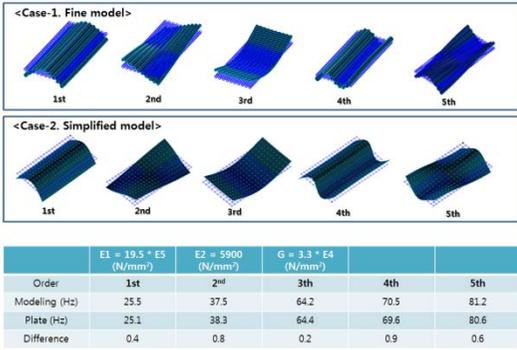


Figure 7. Property Adjusting Process

초임계압 보일러에는 보일러를 지지하기 위해 상단 부에 설치되는 hanger rod 와 보일러의 병진운동을 제한하기 위한 boiler stopper 그리고 연소로의 국부진동을 제어하기 위한 buckstay 가 있다. 이 경계조건들은 보일러의 진동특성에 영향을 미치기 때문에 해당위치에 강성이 올바르게 구현되어야 한다. 특히 buckstay 는 내부 변동압력으로부터 연소로를 지지하기 위한 방진 구조물이기 때문에 그 개수와 위치가 중요하다. Table 1 에 각 경계조건을 구현한 기법을 설명하였으며 각 경계 조건들이 구현된 최종 진동해석모델을 Figure 8 에 나타내었다.

Table 1. Description of Boundary Condition

경계조건	구현 기법
Hanger rod	탄성계수, 면적, 길이를 이용한 $k=EA/L$ 를 통해 강성계산
Boiler stopper	주어진 설계 강성 값을 이용
Buckstay	하나의 buckstay 에 단위 힘이 가하여 변형량을 구한 후, $f=kx$ 통해 강성계산

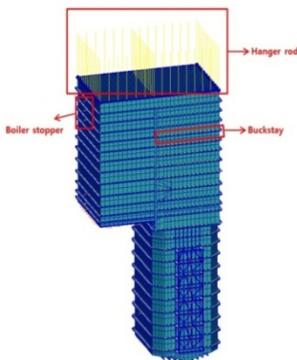


Figure 8. Vibration Model of Boiler

위 해석 모델을 바탕으로 고유진동해석을 수행하여 보일러 구조의 고유모드 및 고유진동수를 파악하고 해석 모델의 건전성을 검증하였다. 연소로 각 면의 튜브 크기와 간격이 다르기 때문에 고유진동수는 각 면에서 다르게 나타났으며 변동압력 기진 주파수와와의 공진 문제는 없는 것으로 판단되었다.

또한 강제진동해석을 통해 보일러의 각 면(Figure 8 참조)에 대하여 변동압력에 의한 진동 응답 수준을 평가하였으며 모든 관심 위치에서의 진동응답이 10mm/s (rms) 이하로 안정된 수준임을 확인하였다. 참고로 진동 응답에 대한 주파수 분석 결과 2.4Hz 에서 높은 응답이 나타났는데 이는 기진력의 주파수와 일치한다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 초임계압 보일러의 진동안정성 평가를 위하여 먼저 정상상태 및 비정상상태 CFD 해석을 통해 연소로 내부의 변동압력을 구하는 절차를 구축하였다. 또한 보일러 연소로에 대해 직교 이방성 물성치를 적용한 등가 모델과 해석 정도를 높이기 위한 경계 조건 구현 방법도 제시하였다.

구축된 기법을 이용하여 700 MW 초임계압 보일러에 대해 진동 안전성을 평가한 결과, 공진 또는 강제진동에 의한 진동 문제는 발생하지 않은 것으로 판단되었다.

향후 정립된 기법은 유사 보일러에 진동 안정성 검증 및 방진 설계에 적용 가능할 것으로 기대한다.