

## 배열회수 보일러 구조물의 피로수명 평가를 위한 유동해석

김진범<sup>†</sup> · 김철호\*

서울과학기술대학교 에너지시스템공학과 대학원, \*서울과학기술대학교 기계자동차공학과  
(2020년 7월 27일 접수, 2020년 9월 10일 수정, 2020년 9월 14일 채택)

## The CFD Analysis for the Fatigue Life Evaluation of HRSG Structure

Jinbeom Kim<sup>†</sup> · Chulho Kim\*

Graduated School of Energy System Engineering, Seoul National Univ. of Science and  
Technology,

\*Department of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National Univ. of Science and  
Technology

(Received 27 July 2020, Revised 10 September 2020, Accepted 14 September 2020)

### 요 약

배열회수보일러는 가스터빈의 고온의 배기가스 에너지를 이용하여 증기를 발생시키는데 고속의 배기 가스에 의해 유체유발진동이 발생하여 다수의 구조물 파손이 발생한다. 구조물의 파손을 예측하기 위한 피로수명 평가는 유체유발 진동으로 발생하는 진동분석을 통해 PSD(Power Spectral Density)을 도출해야 하지만, 가스터빈의 배기가스 유동 형태가 매우 빠르고 복잡하여 발생하는 진동을 이론, 실험적으로 도출되는 것은 매우 어렵다. 하지만 LES(Large Eddy Simulation) 적용을 통해 구조물의 위치에 따라 진동 특성을 파악할 수 있는 방법을 정립하였고, 이러한 진동 특성을 구조 해석에 적용하면 구조물 피로수명 평가에 활용할 수 있다.

**주요어** : 배열회수보일러, 가스터빈, 유체유발진동, LES, PSD, 피로 수명 평가

Abstract - Heat recovery steam generator(HRSG) generate steam using the high-temperature exhaust energy of gas turbines. Structures of HRSG are damaged by flow induced vibration of flue gas in some cases. In order to evaluate fatigue life to predict damage to a structure, a vibration analysis caused from flue gas should be used to derive the Power Spectral Density(PSD). However, it is very difficult to experimentally derive the vibrations generated by the exhaust gas form of gas turbines, which is very fast and complex. It was able to establish a way to identify vibration characteristics depending on the location of the structure by using high computing resources, large eddy simulation (LES). Random vibration analysis through these vibration characteristics(PSD) can evaluate the fatigue life of a structure.

**Key words** : heat recovery steam generator(HRSG), gas turbine, flow induced vibration, LES, PSD, fatigue life evaluation

### 1. 서 론

배열회수보일러(Heat Recovery Steam Generator, HRSG)는 가스터빈의 후단에 설치되어 가스터빈의

고온 가스로부터 에너지를 회수하여 증기를 만드는 장치이다. 가스터빈의 배기가스는 배열회수 보일러의 전면 덕트를 통과하여 열을 회수하는 영역으로 유입된다. 배기가스의 열회수를 위해 배열회수보일러 내부는 대부분 수많은 전열관으로 이루어졌다. 이러한 전열관은 배열회수보일러의 구조를 이루는 프레임에 마치 커튼처럼 달려있으며, 또한 전열관

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Tel : +82-2-970-6347 E-mail : cfd@naver.com

군의 진동을 방지하고 구조적 안전성을 위해 전열관관을 고정시키는 범퍼가 부착되어 있다. 그런데 일부 대형 가스터빈의 배기가스는 최대 유속이 약 200m/s 이상에 달해 범퍼뿐만 아니라 보일러내의 기기를 손상시킨다.[1] 이것은 유속에 의한 직접적인 손상뿐만 아니라 범퍼의 진동을 유발하는 것으로 알려졌다. 최근 대형 가스터빈을 사용하는 일부 발전소의 배열회수보일러 내 범퍼 파손 사례가 다수 발생을 하였으며 보수에 따른 시간과 비용이 증가되고 있는 상황이다. 또한 근래에 들어 설계자들이 재료의 한계 영역까지 사용하게 되어 구조물들이 더욱 가벼워지고 유연해져 진동하기 쉬워짐에 따라 그 중요성이 점차적으로 증가되고 있는 실정이다.

따라서 배열회수보일러 범퍼의 파손 원인을 분석하여 정확히 파악할 수 있다면 배열회수보일러 구조물의 개선을 유도할 수 있게 된다. 이를 위해 유동의 정하중과 진동하중을 정밀하게 예측하고 진단하는 기술이 필요하나 고속의 가스터빈은 높은 난류강도를 갖는 선회성 고속 유동으로 터빈의 하단에 설치된 디퓨저를 거치며 더욱 복잡한 유동 패턴을 지니게 된다. 따라서 실험으로 유체유발 진동을 측정하는 것은 매우 비효율적이고 어렵다.

이러한 복잡한 유동의 패턴이 범퍼와 전열관관을 지나가면서 볼텍스 유발 유동으로 시간에 따른 다양한 변화가 관측된다.[2][3] 그러나 배열회수보일러의 유동해석에 일반적으로 사용되는 시간평균 해석 기술(Reynolds Averaged Navier-Stokes equations, RANS)로는 비정상 구조진동 가진력 계산에 적절하지 못하다.[4]

수치적으로 유체유발진동으로 발생하는 주파수 예측에 대한 연구가 진행되어왔는데 복잡한 형상의 로드 번들(rod bundles) 등에서 RANS, DNS, LES의 수치해석 방법과 실험적인 방법으로 유체유발진동 주파수를 측정 한 뒤 비교를 한 연구가 있었는데, 동일한 격자를 사용했음에도 RANS의 경우 주파수 해상도가 낮으며 상대적으로 LES를 적용한 해석이 실험과 매우 유사한 결과를 얻었다. [5][6]

다만 본 연구에서 사용된 가스터빈의 배기가스의 경우, 위의 연구들과는 달리 규모가 크고 가스터빈의 배출가스가 매우 빠르며 선회성 유동으로 이전의 연구들과 비교해 더욱 복잡하며 해석이 어렵다. 또한 고속의 유동이 구조물에 부딪히며 유속이 낮아져 구조물의 주변에서 층류가 형성되고, 압력이 증가하며 이후 다시 발달하는 유동 형태의 경우에는 LES 해석이 매우 유리하다. [7]

따라서 본 연구에서는 구조물주변의 비정상 상태 유동과 이에 따른 진동을 예측하기 위해 가스터빈출구에서부터 배열회수보일러 내부의 유동장을 시간

과 공간에 대해 상세한 해석이 가능한 LES(Large Eddy Simulation) 기법을 활용해 PSD(Power Spectral Density) 특성을 도출하여 구조물의 구조 진정성 평가에 사용할 수 있도록 방법을 정립하고자 한다.

## 2. 배열회수보일러 내부의 수치해석 방법

유체로부터 구조물에 주어지는 힘을 통하여 구조물과 유동은 서로 연계되어 있다. 유체력은 구조물을 변형시키고, 구조물이 변형됨에 따라 유동에 대한 상대적인 방향이 달라져 유체력 또한 변하게 된다. 대부분의 경우, 예를 들어 전력선의 경우와 같이 유체력은 구조물의 방향과 상대속도에 따라 결정된다. 즉 유체가 구조물에 힘을 가하는 것과 같이 구조물도 유체에 같은 크기의 방향이 반대인 반력을 유체에 가한다. 따라서 구조로부터 주어지는 힘은 후류의 와류(Vorticity)와 동조될 수 있으며 이때 대변위(Large-amplitude) 진동을 유발하게 된다.

하지만 배열회수 보일러와 같은 구조물의 경우 대부분의 내부 구조물들은 강건한 몽푃한(bluff) 형상을 하고 있으며 구조물의 형상이 거의 변형되지 않는다. 따라서 본 해석은 유체에 의해 구조물의 형상이 변형되어 구조물 주변의 격자가 실시간으로 변형되는 방법(2-Way Coupling)을 사용하지 않아도 된다. 따라서 가스터빈의 배기가스 형상(Velocity Profile)을 정확히 알고 있으면 구조물 주변에서의 발생하는 유체유발진동의 특성과약을 할 수 있으며 유동해석만 진행하면 되므로 상대적으로 적은 계산 비용(cost of computing resource)으로 해석이 가능하다.

그리고 배열회수보일러 내부의 최고 유속은 마하수가 0.3이상이며, 내부 전열관관에 의해 배기가스의 밀도가 위치에 따라 변하게 되어 압축성 유동으로 간주할 수 있다. 따라서 본 연구에 사용된 지배방정식을 단일 상태 유동에 대해 벡터형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V W dV + \oint [F - G] \cdot dA = \int_V HdV \quad (1)$$

여기서 각 항에 대한 정의는 다음과 같다.

$$W = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, \quad G = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, \quad G = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{Bmatrix}$$

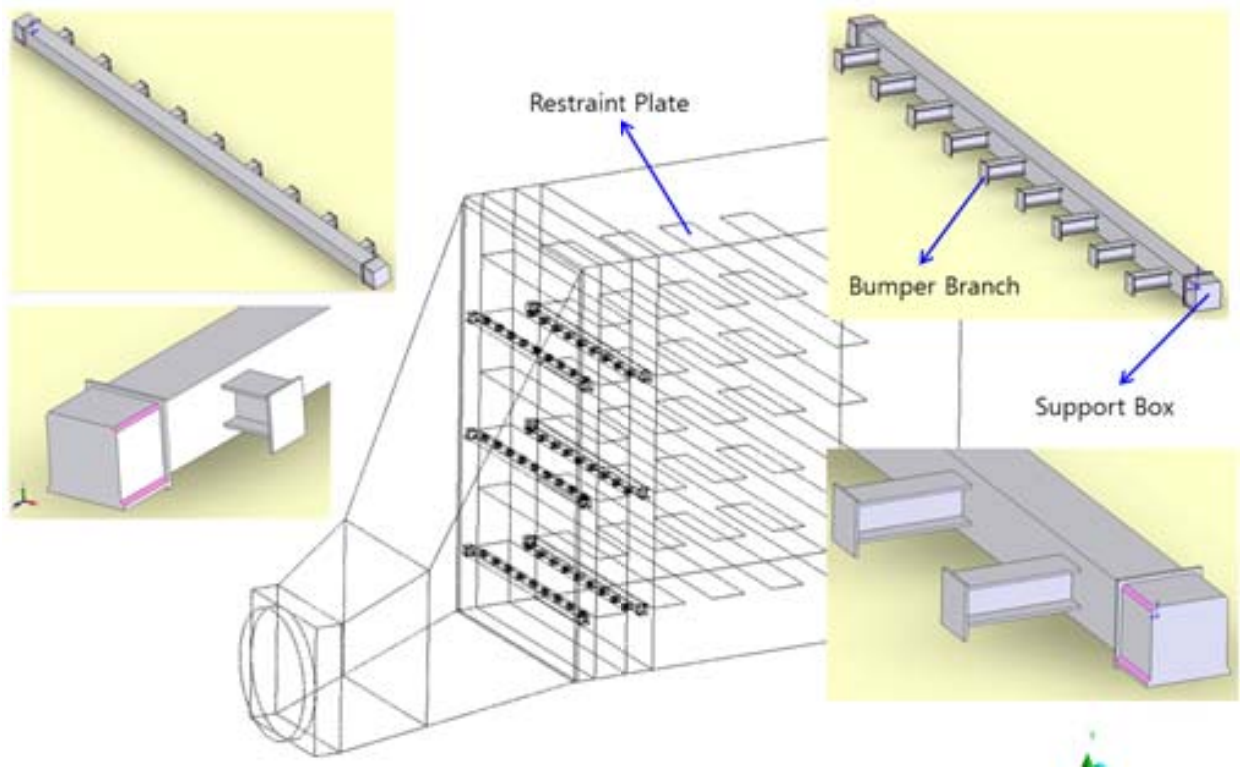


Fig. 1. HRSG & bumper modeling for flow analysis

- $V$  : Arbitrary control volume
- $dA$  : Differential surface area
- $\rho$  : Density
- $u, v, w$  : Velocity
- $E$  : Total energy
- $H$  : Total enthalpy
- $\tau$  : Viscous stress tensor
- $q$  : Heat flux

각 유동 특성 해석에 사용된 상용 코드는 FLUENT 이며, 정상상태의 정하중 해석에는 약 530만개, 비정상 LES 해석에는 약 1850만개 이상의 격자를 생성하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 정상상태 유동 특성

배열회수보일러 내부 범퍼에 대한 유동의 정하중을 적용해보기 위한 가스터빈 배기가스가 보일러 내부에 유입되는 시점부터 정상상태의 유동해석을 수행하였다. 이 정상상태 해석은 정하중 값인 표면에서의 필요한 압력 데이터를 구하기 위한 과정이다.

유동해석 결과는 구조해석 데이터로 사용되기 때문에 기본 모델링에서의 좌표점의 위치가 서로 일치

해야 한다. 따라서 유동해석용 모델의 형상을 단순화해서는 안되고 구조해석용 모델의 형상을 그대로 사용해야 한다. 이 때 유동해석용 모델은 범퍼 구조물의 돌출부 등을 포함하는 상세한 형상의 모델링이 필요하며, 이러한 모델을 해석하기 위한 격자는 배열회수보일러 내부 유동해석에 필요했던 격자수보다 2~3배 이상의 많은 격자수를 필요로 한다.

Fig. 2는 정상상태 유동해석을 위한 격자를 보여주고 있는데, 전체 격자수는 약 530만 개이지만 범퍼 주변의 격자수는 460만 개로 대부분 범퍼 주변에 격자가 조밀하게 생성되었음을 알 수 있다. 이는 관심 영역이 앞서 기술한 것처럼 범퍼 주변을 매우 상세하게 모델링 하였기 때문이다.

입구유속 조건은 가스터빈 제작사로부터 받은 데이터를 사용한 것이다. Fig. 3(a)는 전체적인 입구 유동조건은 총알(Bullet)처럼 생긴 형태로 중심에서 가장 빠르며 반지름 방향으로 유속이 낮아지는 형태이다. 중심의 최고 유속은 약 230m/s이며 시계방향으로 강한 선회성 유동임을 알 수 있다.

입구유속 조건을 이용하여 유동해석을 수행한 유동형태를 보면, Fig. 3(b)와 같이 입구 중앙부 유속이 매우 빠르기 때문에, 집중된 운동량은 분산이 이루어지기 어려워 입구 덕트 바닥에 먼저 부딪힌 후 유동은 덕트 하부를 따라 이동하게 된다. 이후 배기

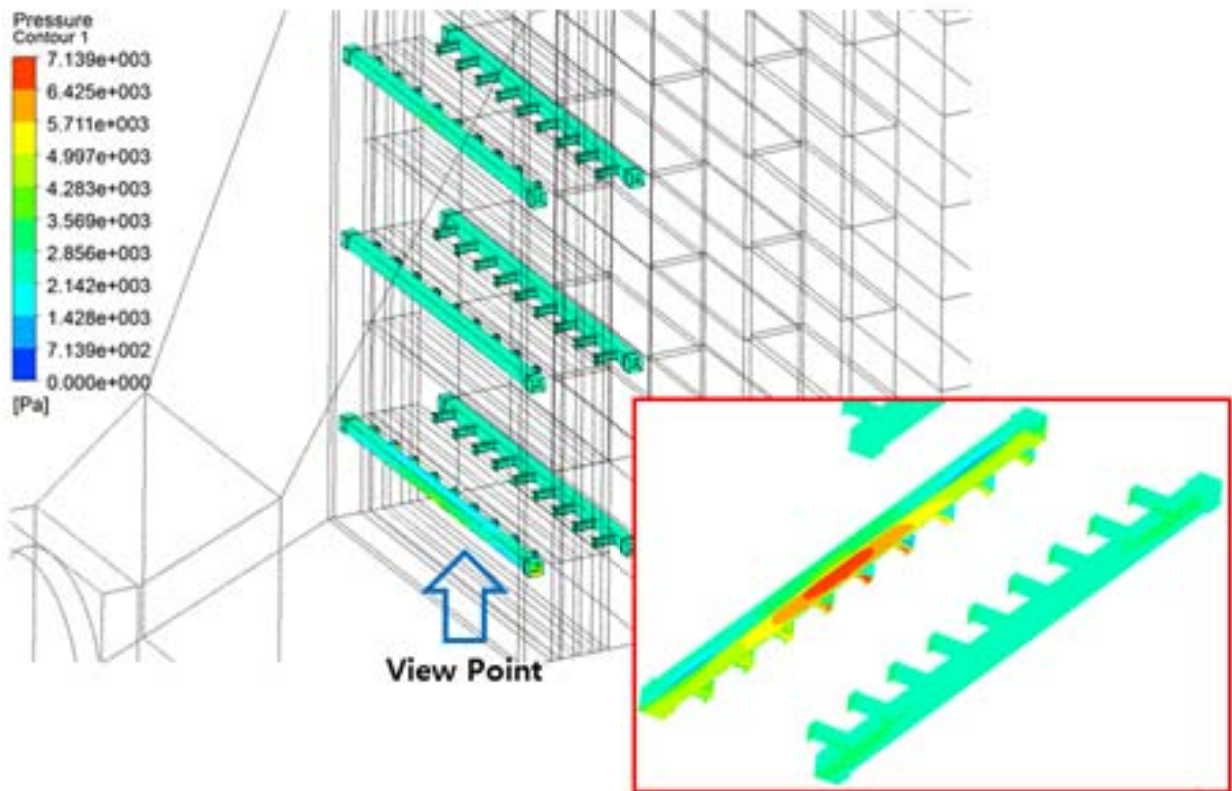


Fig. 4. Static pressure contours on bumper of HRSG

가스는 첫 번째 전열면에 부딪히고 일부는 전열면 내부로 흐르고 나머지 배기가스는 전열면을 타고 상부로 올라가게 되며 이 때 범퍼와 강하게 충돌한다.

Fig. 4는 덕트 내부에 위치한 범퍼 표면에서의 정압 분포를 나타내고 있는데 전단부 하단에 위치한 범퍼에서 가장 높은 정압 분포를 보이고 있다. 하지만 정상상태 해석결과 압력분포는 범퍼와 배열회수 보일러 벽면간의 용접부위에 파손을 일으킬 수 있을 정도로 큰 하중이 아님을 구조 건전성 평가를 통해 알 수 있었다. 따라서 비정상 해석을 통한 유체유발진동으로 발생하는 피로 응력 해석을 통해 확인해야 한다. 유체유발진동의 특성을 파악하는 방법은 다음 절에서 나타내었다.

### 3-2. LES난류 해석을 이용한 유동 및 진동 특성

일반적으로 상용 프로그램에 적용되고 있는 난류 모델은 RANS이며 매우 강건한(Robust) 해석이 가능해서 산업현장에 널리 사용된다.[4] 하지만 이러한 난류 모델은 시간 평균 기법을 사용했으므로 본 연구에 필요한 난류에 의한 불규칙 주파수를 얻어내는 것은 적합하지 않다고 앞에서 살펴보았다. 즉 시간에 따른 불규칙(Random) 주파수는 계속해서 생성되고 소멸되는 에디(eddy)의 에너지 흐름인

데 이것을 시간 평균으로 모델링을 하면 시간에 따른 이러한 변화를 알 수 없으며, 본 과제에서는 RANS 모델은 적절하지 않은 것을 의미한다.

그리고 LES 난류 해석을 위해서는 매우 조밀한 격자수를 사용하는 것이 일반적이지만, 박리지점(Separation point)이 명확한 경우에는 그보다 더 낮은 수를 사용해도 된다.[8] 즉 이때는 에디 영역 중에서 큰 영역에 의해 난류진동이 발생한다는 가정이 앞서야 한다. 본 연구에서는 배열회수보일러 범퍼의 경우 박리지점이 명확하므로 기존 형상 관심 부위에 격자를 더 밀집시켜 1850만개의 격자를 사용하였으며, 가스터빈 배기가스의 유속이 매우 다양하므로 약 1~31까지의  $y^+$ 를 갖는다.

이것은 비록 격자의 밀집도를 낮추었다고 하더라도 보일러 내의 범퍼 길이가 약 11m로 상당히 큰 구조물이므로 많은 격자수가 필요하다는 것을 의미한다. 이렇게 생성된 전체 격자수는 전체 해석영역의 경우 약 1850만개이며 이 중 전단면 하단의 범퍼 주변에만 약 1500만개 정도 사용되었다.

여기서 범퍼의 파손이 유체유발진동에 의한 파손인지 가스터빈으로부터 발생한 블레이드통과 진동수(Blade Passing Frequency, BPF)인지 확인을 할 필요가 있다. 일반적으로 “BPF = 초당 회전수 ×

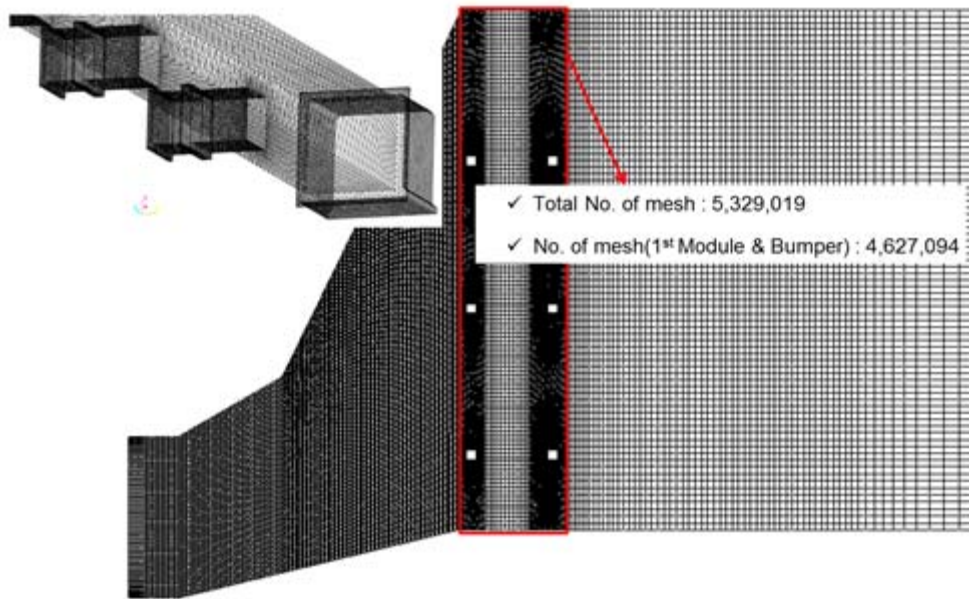


Fig. 2. Mesh for CFD analysis of HRSG & bumper

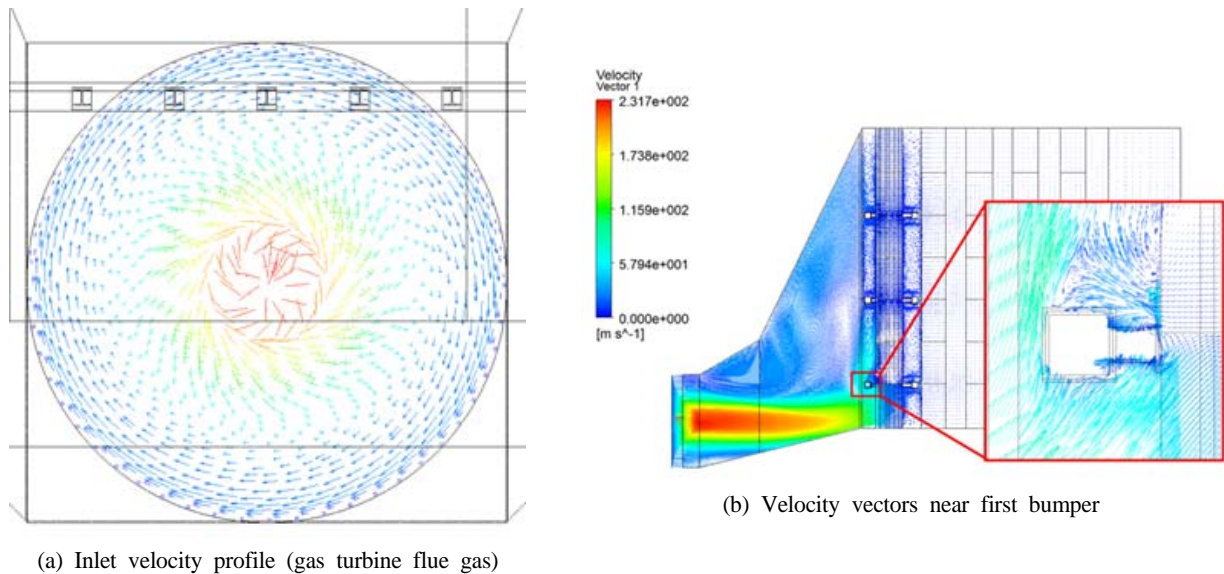


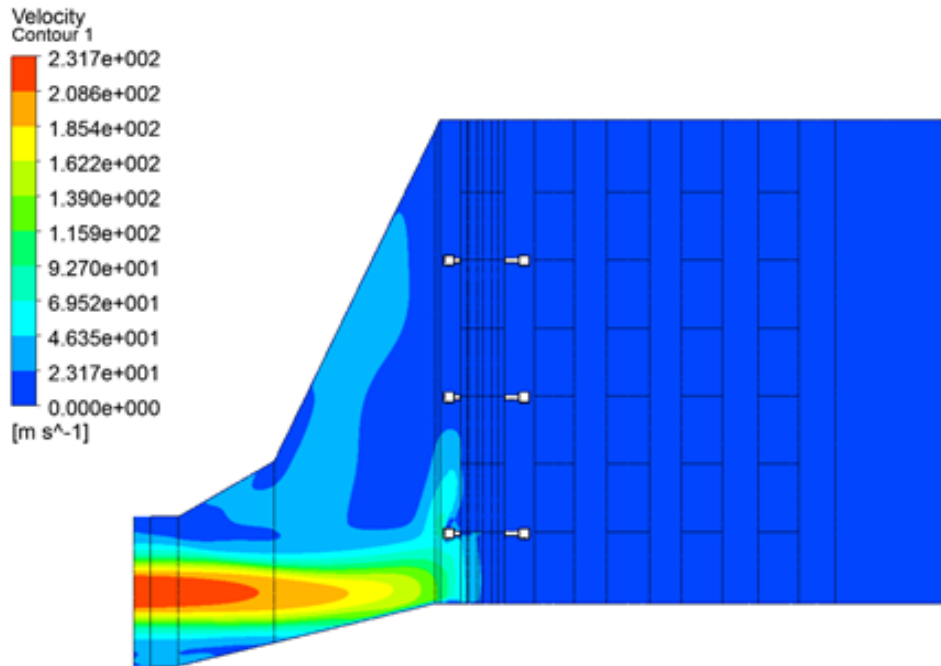
Fig. 3. Velocity Vectors on analysis area of HRSG

Blade의 수”로 나타낼 수 있으며, 이 값의 주파수는 상당히 고주파 영역으로써 모드(mode) 해석을 통해 도출된 범퍼의 고유진동수(Natural Frequency)와 상당히 동떨어져 있음을 알 수 있어서, 범퍼를 지나 치면서 발생하는 유체유발진동에 의한 파손임을 합리적으로 의심할 수 있었고 해석이 정확히 이루어지면 구조물의 파손을 예측되리라 판단할 수 있다.

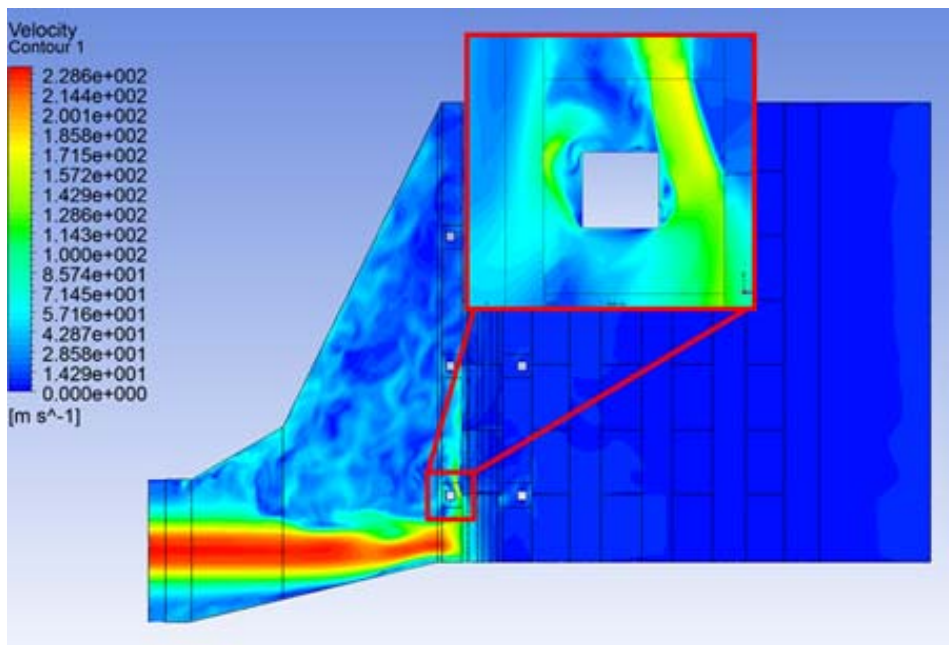
Fig. 5(a)는 비정상 RANS(Unsteady RANS, URANS)를 이용하여 배열회수보일러 유동해석을 수행한 결

과이며 속도분포를 나타내고 있다. 유속의 진행방향과 범퍼 주변의 유속 분포를 잘 나타내고 있지만 본 연구에서 수행하는 전단면 하부의 범퍼 주변부에서의 볼텍스(Vortex) 현상은 관찰하기 힘들다. 반면에 Fig. 5(b)는 범퍼 주변에서 박리점이 관찰되며 상층부 주변 유동이 하부 유동의 패턴에 영향을 주고 있음을 알 수 있어서 더욱 사실적으로 해석이 된 것으로 볼 수 있다.

가스터빈으로부터 배출된 고속의 배기가스가 첫



(a) URANS analyzed velocity contours



(b) LES analyzed velocity contours

**Fig. 5.** Velocity contours near bumper on HRSG

번째 전열면에 강하게 부딪히고 있음을 알 수 있으며 전열면과 범퍼 사이의 좁은 영역을 통과하고 박리점이 생기면서 압력이 낮아지고 있음을 알 수 있다. 유속 선도를 보면 범퍼 주변에서 유동의 방향에 따라 박리가 발생하며 이후 불안정한 거동을 하고 있음을 알 수 있다. 이는 기존의 여러 사이트의

파손 사례에서 나타나듯이 전단부 하단에 위치한 범퍼의 용접부에서 크랙이 발견되는 현상과 관련이 있는 것으로 판단된다.

보일러 내부 유동은 중심부에서 Reynolds Number가  $10^7$  이상 되므로 Super Critical 영역에 해당되며 박리점에서 규칙적으로 볼텍스가 발생을 하며

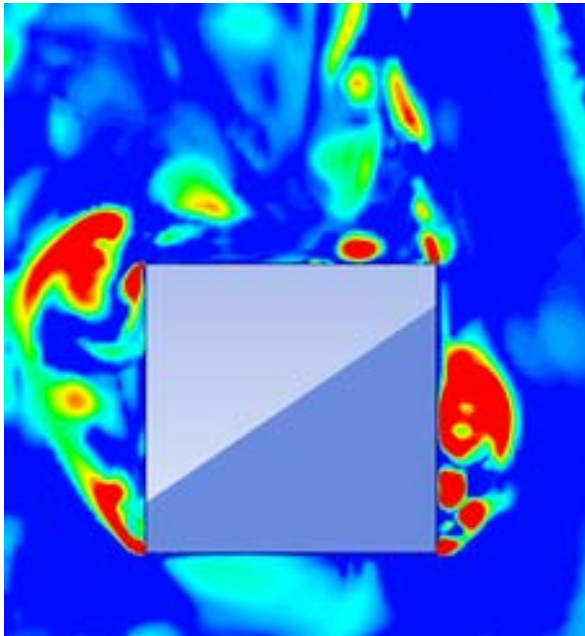


Fig. 6. Vorticities contours(Vortex strength) around bumper

구조물에 압력의 변화를 주게 된다.

Fig. 6은 박리점에서 발생한 볼텍스의 강도를 보여주고 있다. 박리점이 명확히 보이며 볼텍스가 생성되고, 끊어지며 복잡한 진동이 생기고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 구조물의 진동을 발생시키며, 이 진동값을 일반화한 값인 PSD로 진동에 의한 피로수명 평가를 진행할 수 있다.

비정상 해석 모델에서는 일반적으로 커플링된 구조해석과 동일한 현상이 필요없이, 유동에 따른 진동수의 특성을 계산하면 되므로 돌출부가 제외되었으며, Fig. 7에 표시된 바와 같이 범퍼 길이를 따라 300 mm 간격으로 위치한 총 37개의 Section에 대하여 그림 2.6.4에 표시된 4 개의 Edge(Front, Rear, Top, Bottom)에서 각각의 평균압력의 이력을 추출하였다.

대표적인 단면인 중간 단면(X=0)에서의 Front, Rear, Top, Bottom Edge에서 Fig. 8과 같이 각각의 평균압력을 유동 해석 결과로부터 추출하여 Fig. 9에 시간이력으로 나타내었다.

이렇게 추출한 압력의 수평, 수직에 대한 압력값을 다음 식과 같이 FFT(Fast Fourier Transform) 변환을 통하여 그림 2.6.1과 같은 시간 신호(time signal)를 그

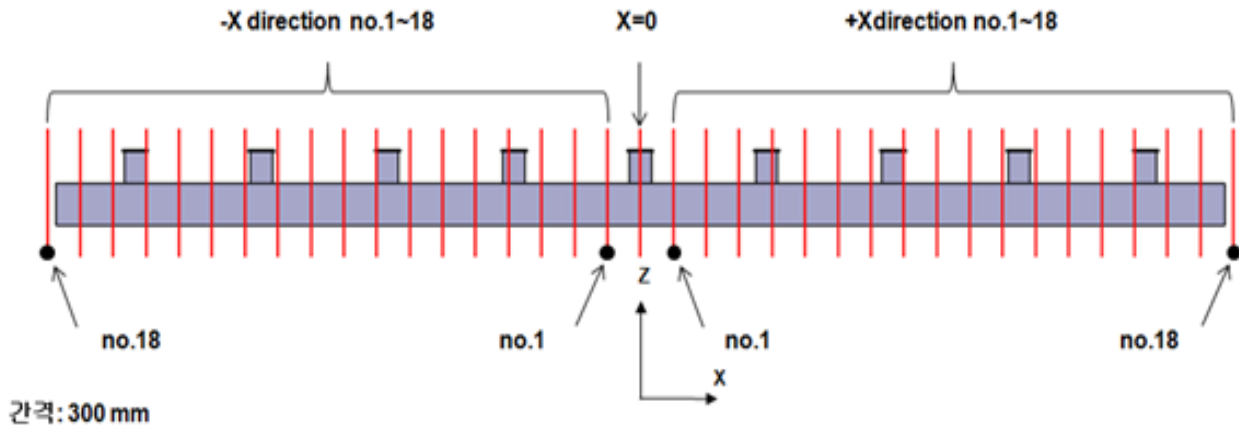


Fig. 7. Location of sections for monitoring pressure

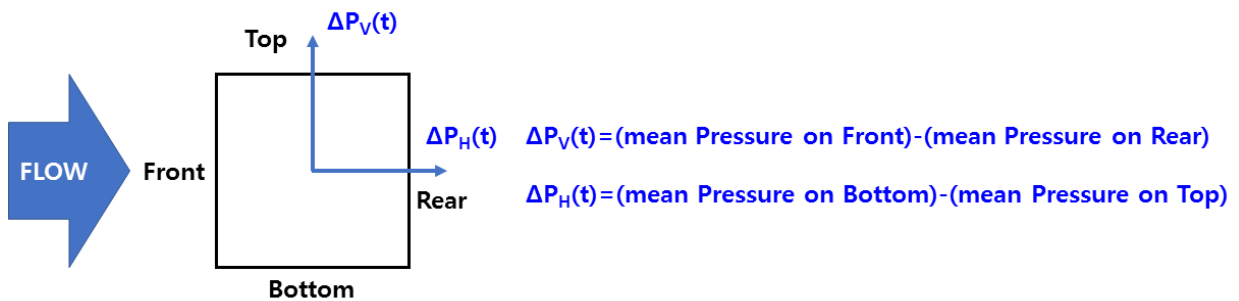
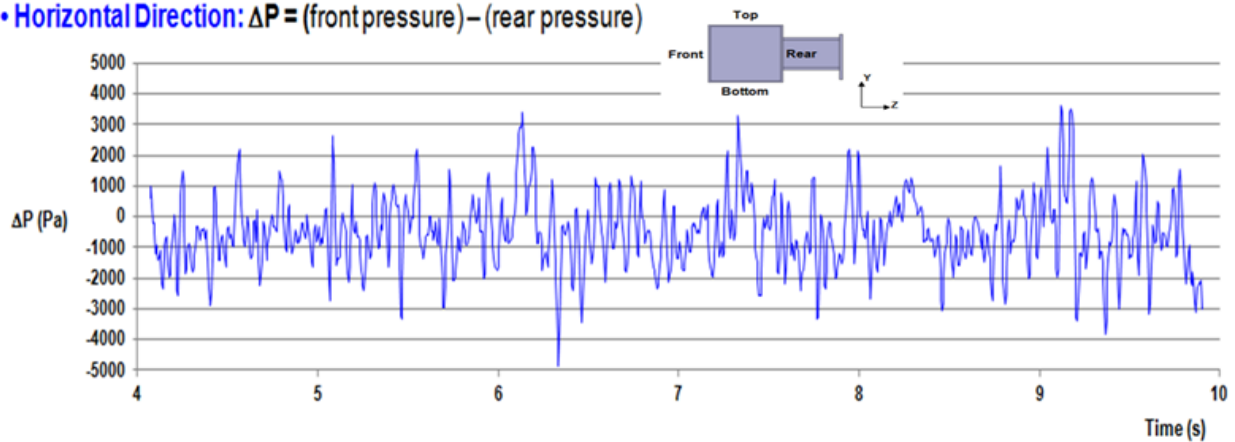


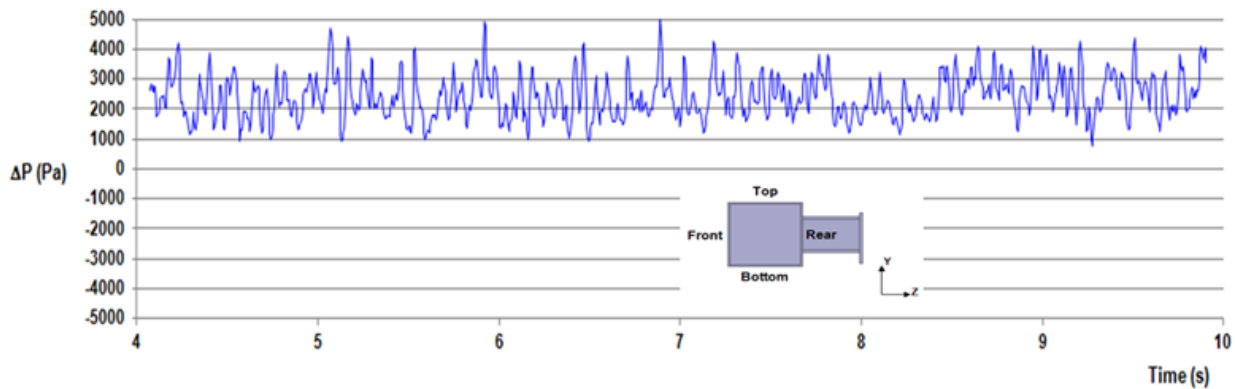
Fig. 8. Pressure difference on applied sections due to flow induced vibration

• Horizontal Direction:  $\Delta P = (\text{front pressure}) - (\text{rear pressure})$



(a) Pressure frequency on horizontal direction

• Vertical Direction:  $\Delta P = (\text{bottom pressure}) - (\text{top pressure})$



(b) Pressure frequency on vertical direction

Fig. 9. Time history of difference of mean pressures ( $X=0$ )

림 2.6.2와 같은 주파수 스펙트럼(frequency spectrum)으로 변환할 수 있다.

$$p(t) \rightarrow \text{FFT} \rightarrow P(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p(t) e^{-j2\pi k i / N}, \quad (N = \text{no. of time signal data})$$

$p(t)$ : time signal,  $P(k)$ : frequency spectrum (2)

그리고 PSD는 다음 식과 같이 추출한다.

$$S_{PP}(k) = \frac{1}{T} P^*(k) P(k), \quad P(k) = P_R + jP_I$$

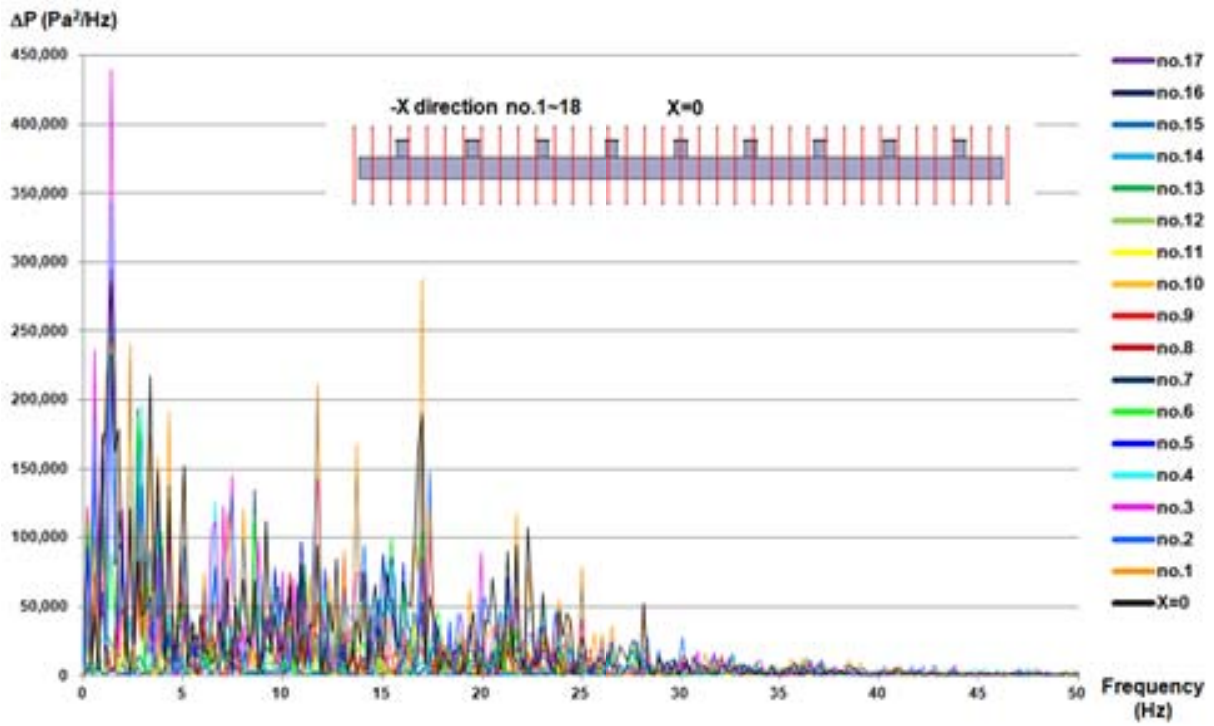
$T$ : Time record length (3)

변환식을 통해 Fig. 9의 시간에 따른 압력값은 수평 진동에 대한 PSD는 Fig. 10과 같이, 수직에 대한 진동은 Fig. 11로 나타낼 수 있다. 이로써 유체 유발진동에 의한 구조물의 피로수명평가를 PSD 데이터를 구할 수 있게 되었다.

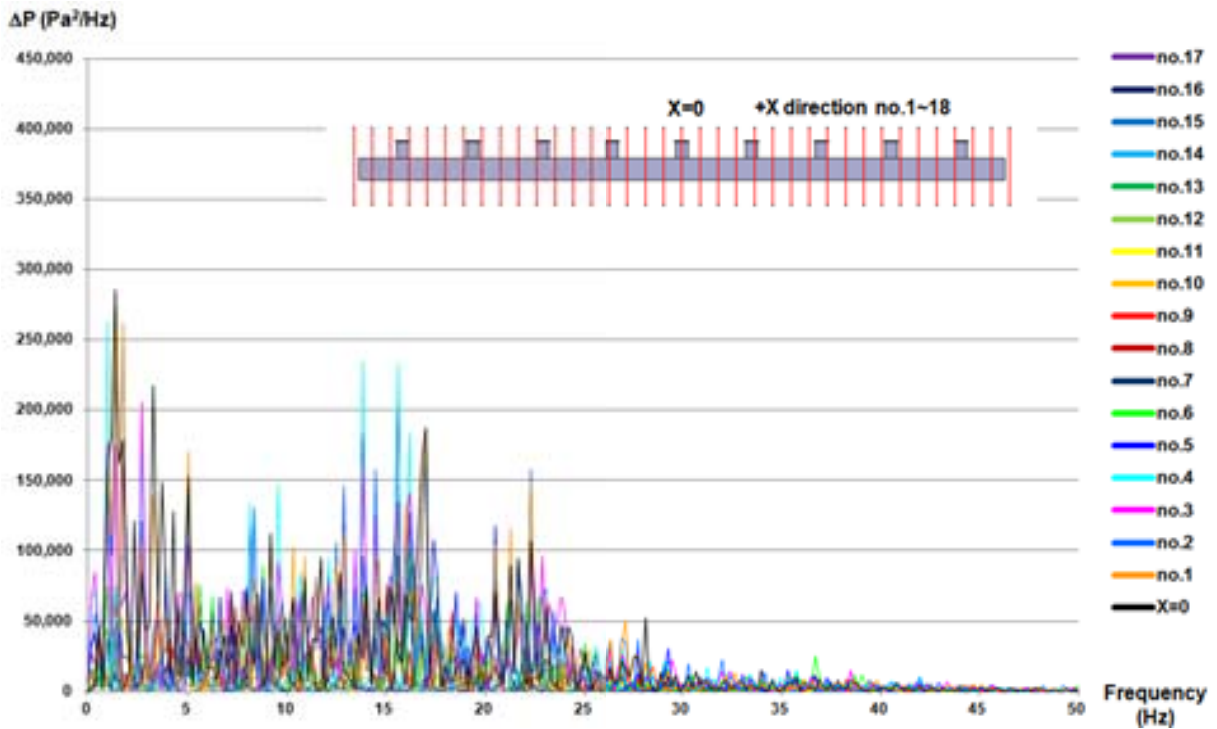
## 4. 결론

배열회수보일러의 제조사와 관계없이 특정 가스 터빈을 사용한 복합화력발전소의 보일러 구조물과 전열관군을 지지하는 범퍼 용접부의 파손사례가 발생을 하였고 이의 원인을 분석하기 위해서 유체유발진동에 의한 주파수 특성(PSD)이 필요하다. 기존의 이론적, 해석적, 실험적인 연구에서는 비교적 균일하고 특정한 속도에서 진동수를 파악할 수 있지만 실제 그 데이터는 너무 단순하여 배열회수보일러의 피로수명평가에 적용할 수 없었다. 하지만 본 연구에서는 가스터빈의 후류와 같은 다양한 유속과 복잡한 선회성 고속유동에 대해 주파수 특성을 얻어낼 수 있었고 실제 범퍼의 피로수명 평가에 사용되어 피로수명 평가에 이용하였다. 지금까지 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.



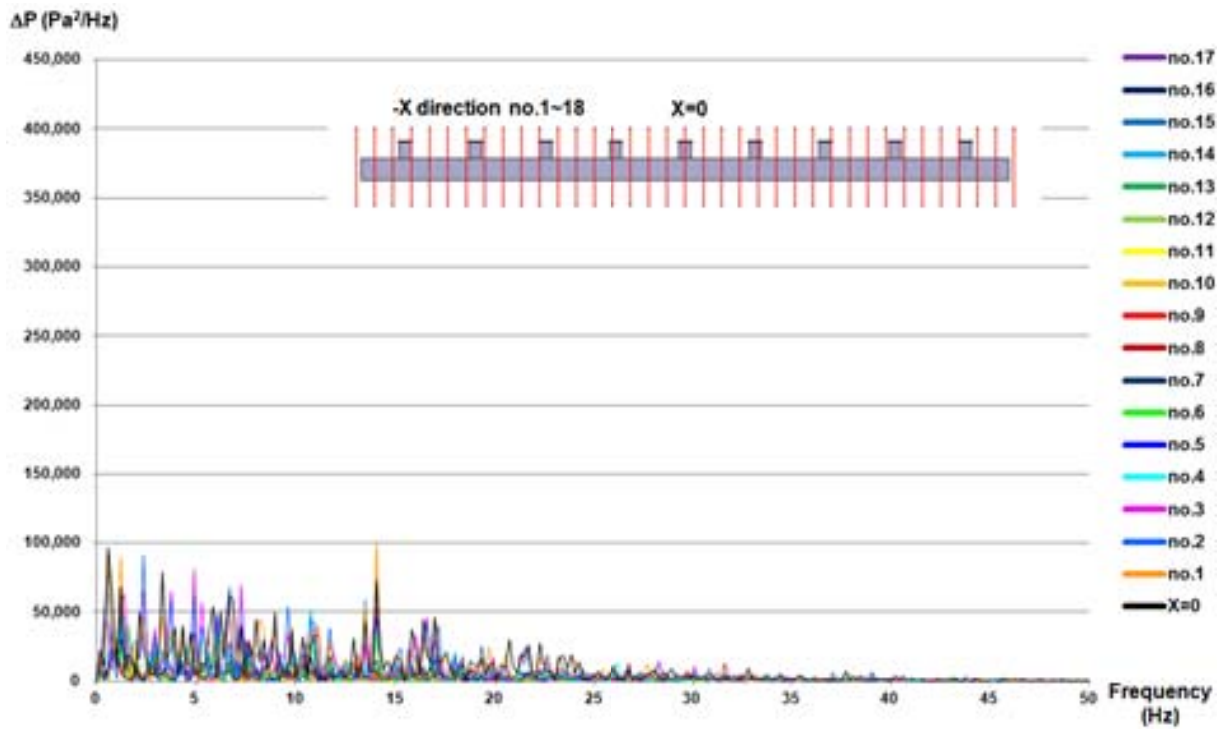


(a) PSD graph in horizontal direction (From X=0 to -X direction)

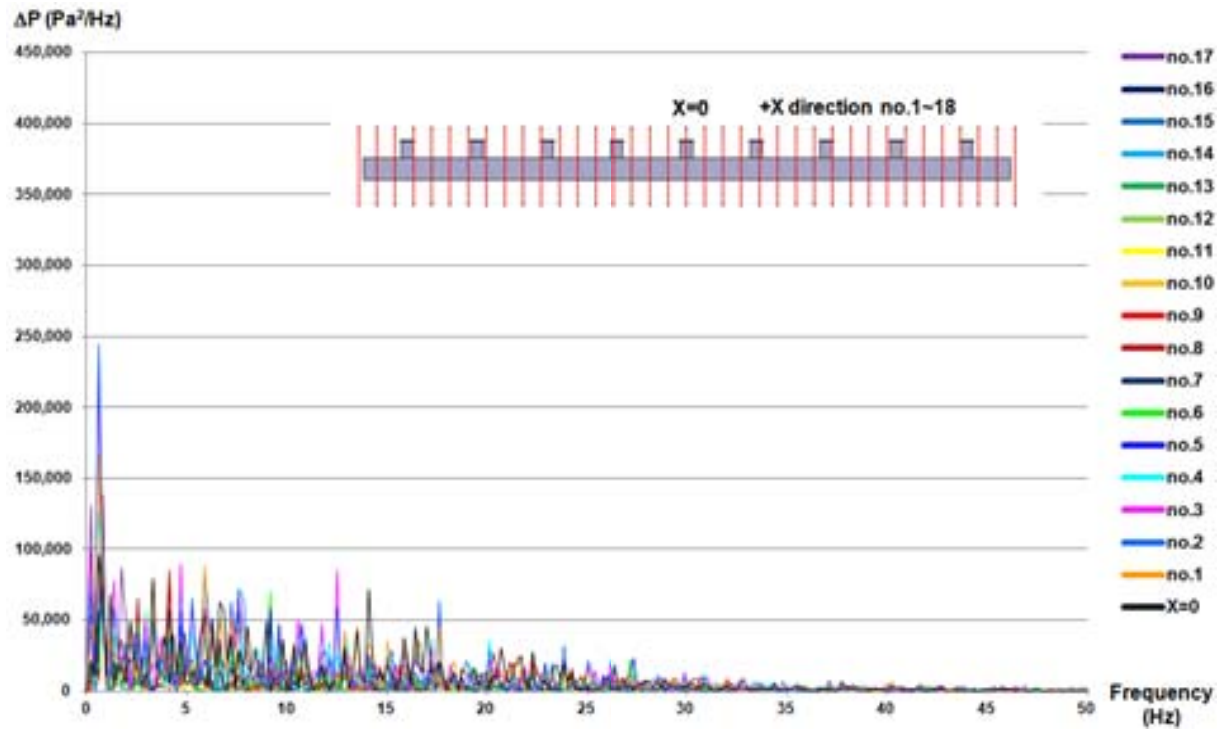


(b) PSD graph in horizontal direction (From X=0 to +X direction)

**Fig. 10.** PSD graph in horizontal direction



(a) PSD graph in vertical direction (From X=0 to -X direction)



(b) PSD graph in vertical direction (From X=0 to +X direction)

Fig. 11. PSD graph in vertical direction

1) 복잡한 유동장에서의 진동특성을 파악하는데 시간평균 난류모델인 RANS로는 해석적 접근이 어려우며, 진동 가진력을 예측할 수 있는 LES해석이 필요하다. 또한 이를 통해 시간에 따른 압력/힘의 변화를 계산하여 피로수명 해석에 사용될 수 있는 데이터를 추출할 수 있다.

2) 규모가 크고 강건한 구조물의 경우, 구조물의 형상이 변경되어 구조물 주변의 격자가 실시간으로 변형되는 방법(2-Way Coupling)을 사용하지 않아도 된다.

3) 박리점이 명확한 곳에서의 난류모델 사용 시 비교적 적은 수의 격자 사용을 통해서도 구조물의 상대적으로 높은 주파수 영역에서의 유체유발진동 특성 파악이 가능하다.

이렇게 얻어진 데이터로 구조물의 모드해석과 피로 해석 결과(약 0.5년 후 파손)는 실제 현장에서 발생하는 파손 시기(1년 이내 파손)와 비교적 정확히 일치하였다. 이를 통해 배열회수보일러의 단면 형상, 용접부 및 경계조건의 변경을 통해 설계에 적용 가능한 범퍼의 구조 개선 모델을 제시하고 제품의 신뢰성을 확보하였다. 또한 유체유발진동이 존재하는 다양한 환경에서의 구조물의 건전성을 평가하는 유동-구조 연계 기술을 정립하였다.

본 연구를 통해 정립된 방법은 유체유발진동에 의한 진동이 주로 발생하는 발전소에서 스팀의 이동 계통 및 스팀터빈의 피로해석에 적용하여 구조물의 파손원인 분석 및 건전성 향상에 이용되고 있다.

## References

1. Ha, J.S., 2015, A study on the characteristics of lift fluctuation power spectral density on a fin tube in the heat recovery steam generator, *J. of Energy Eng.* Vol. 24, No. 4, pp. 211-216
2. Kim, J., 2014, The CFD analysis about flow induced vibration for the life prediction of HRSG bumper, *Proceedings of KSFM 2014*
3. Kim, J., 2015, The CFD analysis for the fatigue life evaluation of HRSG bumper, *Conference on the 70th Anniversary of the KSME*, pp. 1280-1285
4. J.C. Tannehill, D.A. Anderson, R.H. Pletcher, "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Second Edition, pp.285-321
5. Luo, X.Y., 2004, LES modelling of flow in a simple airway model, *Medical Engineering & Physics*, Vol. 26, pp. 403-413
6. Gaitonde, U., 2008, Quality criteria for large eddy simulation, Manchester University, Ph. D. Dissertation (in UK), pp. 6-26
7. Chandra, L., 2010, Unsteady RANS and LES analyses of hooper's hydraulics experiment in a tight lattice bare rod-bundle, 8th Int. Topical Meeting on NUTHOS, pp. 1-13
8. Ruprecht, A., 2003, Very large eddy simulation for the prediction of unsteady vortex motion, *Conference on Modelling Fluid Flow(CMFF'03)*