

배열회수 보일러 단일 힌튜브의 양력 변동 PSD 특성 연구

하지수[†] · 이부윤 · 심성훈*

계명대학교 기계자동차공학과, *한국기계연구원

(2015년 10월 24일 접수, 2015년 12월 8일 수정, 2015년 12월 8일 채택)

A Study on the Characteristics of Lift Fluctuation Power Spectral Density on a Fin Tube in the Heat Recovery Steam Generator

Ji Soo Ha[†], Boo Youn Lee, Sung Hun Shim*

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University,

*Korea Institute of Machinery and Materials

(Received 24 October 2015, Revised 8 December 2015, Accepted 8 December 2015)

요 약

배열회수 보일러의 전열관군은 외부에 고온의 배기가스가 흐르면서 유동 유발 진동을 야기 시키며 배열회수 보일러의 전열관군에서 파손을 야기할 수 있어서 열교환기의 구조적 안정성을 위해 열교환기의 전열관군에서 유동 유발 진동 특성을 규명할 필요가 있다. 일반적인 열교환기 전열관군에서 유동 유발 진동에 관한 실험적 연구는 기존에 많이 진행되어 오고 있으며 단일 원관이나 전열관군의 원관들에서 유동 유발 진동에 대한 무차원 PSD (Power Spectral Density) 함수를 무차원 주파수인 Strouhal 수, fD/U 의 함수로 도출된 실험적 결과들이 도출되어 있다. 본 연구는 배열회수 보일러에 사용하는 힌튜브 전열관군에서 유동 유발 진동 특성을 규명하는 것을 목적으로 한다. 이러한 것을 위해 단일 힌튜브 원관에서 비정상 상태 유동해석을 수행하여 주기적인 와동 발생 특성과 힌튜브 원관에서의 양력 변화 특성을 살펴보았다. 또한 힌튜브 원관에서 양력 변동 특성으로부터 유동 유발 진동에 따른 PSD 특성 결과를 도출하여 기존에 단순 원관에서 이루어졌던 연구들과 비교를 통해 힌튜브 원관 주위의 PSD 특성을 정립하였다.

주요어 : 열교환기, 힌튜브 원관, 유동 유발 진동, PSD, Karmann 와류, 비정상 층류유동, FFT

Abstract - Heat exchanger tube array in a heat recovery steam generator is exposed to the hot exhaust gas flow and it could cause the flow induced vibration, which could damage the heat exchanger tube array. It is needed for the structural safe operation of the heat exchanger to establish the characteristics of flow induced vibration in the tube array. The researches for the flow induced vibration of typical heat exchangers have been conducted by using single circular tube or circular tube array and the nondimensional PSD(Power Spectral Density) function with the Strouhal number, fD/U , had been derived by experimental method. From the present study, the basis for the application of flow induced vibration to the heat recovery steam generator tube array would be prepared. For the previous mentioned purpose, the present CFD analysis introduced a single fin tube and calculated with the unsteady laminar flow over the single fin tube. The characteristics of vortex shedding and lift fluctuation over the fin tube was investigated. The derived nondimensional PSD was compared with the results of the previous experimental researches and the characteristics of lift PSD over a single fin tube was established from the present CFD study.

Key words : heat exchanger, fin tube circular cylinder, flow induced vibration, power spectral density, Karmann vortex, unsteady laminar flow, FFT

[†]To whom corresponding should be addressed.

Department of Mechanical and Automotive Engineering,
Keimyung University
Tel : 053-580-5919 E-mail : jisooa@kmu.ac.kr

1. 서 론

복합화력 발전에서 배열을 회수하여 전기를 생산하는 배열회수 보일러는 확대 덕트를 지나 수많은 전열관군으로 구성된 열교환기에서 배열을 회수하여 전열관군 내의 보일러수를 증기로 변환하여 스팀터빈을 구동한다. 배열회수 보일러의 전열관군은 외부에 고온의 배기가스가 흐르게 된다. 이러한 유체의 흐름으로 인해 전열관군에서 시간변화에 따라 양력의 변동이 발생하는데 이에 따라 유동 유발 진동이 발생한다. 유동 유발 진동은 배열회수 보일러의 전열관군에서 파손을 야기할 수 있어서 열교환기의 구조적 안정성을 위해 열교환기의 전열관군에서 유동 유발 진동의 정도에 대한 규명이 필요하다. 일반적인 열교환기 전열관군에서 유동 유발 진동에 관한 연구는 기존에 많이 진행되어 오고 있다. Blevins⁽¹⁾는 10행, 12열의 전열관군에서 각 열에서의 원관 표면에 압력센서를 부착하여 시간 변화에 따른 압력을 측정하여 유동 유발 진동 특성을 연구하였다. Taylor⁽²⁾는 하나의 원관과 인접한 곳에 반 원관을 좌우에 각각 한 개씩 설치하고 유체는 물을 사용하여 원관에 작용하는 힘을 측정하여 원관의 유동 유발 진동을 측정하여 특성을 분석하였다. Chen⁽³⁾은 사각배열의 원관에서 유동 유발 진동 특성을 연구하였고 Axisa⁽⁴⁾는 여러 관련 논문의 유동 유발 진동 특성 실험 결과들에 대하여 검증 실험을 통해 유동 유발 진동에 대한 일반화된 PSD(Power Spectral Density) 함수를 정리하였다.

지금까지의 연구들은 원관 주위에 발생하는 유동 유발 진동 특성에 대하여 진행되어 왔다. 배열회수 보일러의 전열관군은 표면이 매끄러운 원관이 아니라 전열 효율을 증가하기 위해 흰튜브를 사용한다. 본 연구는 배열회수 보일러에서 사용하고 있는 흰튜브 주위의 비정상 상태 유동 특성을 살펴보고 배열회수 보일러의 전열관군의 유동 유발 진동 특성에 적용하기 위한 기반을 마련하는 것을 목적으로 한다. 이러한 것을 위해 단일 흰튜브 원관에서 비정상 상태 유동해석을 수행하여 주기적인 와동 발생 특성과 원관에서의 양력 변화 특성을 살펴보기로 한다. 또한 흰튜브 원관에서 양력 변동 특성으로부터 유동 유발 진동에 따른 PSD 특성 결과를 도출하여 기존에 원관 주위의 유동 유발 진동 연구들과 비교를 통해 흰튜브 원관 주위의 PSD 특성을 정립하기로 한다.

2. 수치해석 방법

배열회수 보일러의 전열관군에서 발생하는 유체유발 진동을 규명하기 위해 흰튜브 단일 원관에서 유체유발 진동을 전산유체 해석을 통해 살펴보고 기존의 실험 연구들의 결과와 비교 검증하여 흰튜브 원관 주위의 PSD 특성을 정립하는 것이 본 연구의 목적이라고 서론에서 언급하였다. Fig. 1에 본 연구에서 전산유체 유동해석에 사용한 흰튜브 단일 원관 형상과 격자 구성을 나타내었다.

Fig. 1의 위쪽 그림에서 보는 바와 같이 흰튜브의 안쪽 직경(d)은 38.1mm이고 흰의 높이(h)는 10mm이다. 그래서 흰튜브의 바깥쪽 직경(D)은 58.1mm이다. 흰의 한 피치 간격(s)는 8mm이고 흰의 두께(ft)는 1mm이다. 안쪽 원관의 표면 한 피치 표면 길이는 7mm이다. 그림의 중간에서 보는바와 같이 왼쪽은 입구속도경계이고 오른쪽은 출구로 설정하였다. 그리고 상하는 모두 대칭면으로 간주하였다. 흰튜브 원관 주위의 유동을 자세히 계산하기 위해 Fig. 1의 아래 그림에서처럼 흰튜브 원관 주위에는 상대적으로 많은 격자를 생성하였다. 아래 그림 오른쪽에는 유동 입구 방향에서 바라본 흰과 흰사이 영역의 유동장의 격자 형상과 흰 형상을 나타내었다. 흰튜브 원관 주위를 흐르는 유체는 공기를 이용하였으며 입구 유속은 배열회수 보일러에서 전열관군에서 일반적인 유속인 5m/s로 설정하였고 공기의 밀도는 배열회수 보일러 전열관군에 흐르는 배기가스의 밀도에 상응하는 값인 0.4kg/m^3 으로 하였다.

흰튜브 직경 평균(48.1mm), 공기 유속(5m/s), 밀도 (0.4kg/m^3), 점성계수($1.789 \times 10^{-5}\text{kg/ms}$)를 기준으로

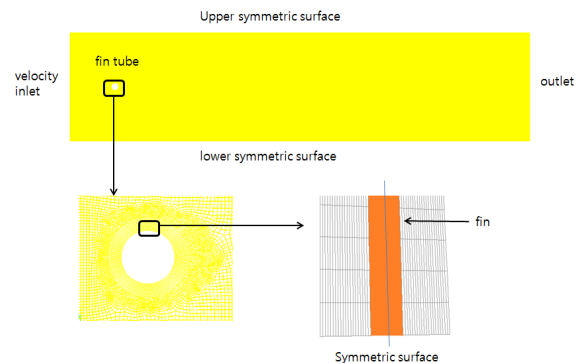


Fig. 1. Configuration of a fin tube mesh and its boundary types for CFD analysis.

한 Re수는 5.38×10^3 이다. 원관 주위 유동에서 층류와 난류를 구분하는 임계 Re수는 3.5×10^5 이므로 본 연구의 흰튜브 원관 형상과 입구유속은 난류 영역이 아니라 층류로 간주할 수 있다. 따라서 본 연구의 유동 지배방정식은 3차원 비정상상태 연속방정식, 운동량 방정식으로 아래와 같이 구성할 수 있다.

밀도 변화가 없으므로 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식은 비정상 상태이므로 시간 변화를 포함하여 다음과 같다.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \tag{2}$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \tag{3}$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \tag{4}$$

각 경우의 유동 특성 해석을 위해 사용한 프로그램은 SIMPLE 알고리즘⁽⁵⁾을 채택한 상용 열유체 전산 해석 프로그램인 Fluent 프로그램을 이용하였고 유동장은 약 530만개의 격자로 구성하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 단일 흰튜브 주위의 층류 비정상 상태 유동장 특성

층류일 경우 원관의 후류에는 잘 알려진 Karmann 와류가 주기적으로 흐르게 되는데 본 연구에서의 흰튜브 단일 원관에서 속도 분포 결과에서도 관찰할 수 있다. Fig. 2에 흰튜브 주위의 유동장에서 시간 변화

에 따른 속도 분포 변화를 나타내었다. Fig. 4에서 흰튜브 원관 표면에서 시간에 따른 양력 변화를 분석할 예정인데 이의 결과를 보면 Karmann 와류의 주파수는 약 18.56Hz이며 이로서 주기는 약 0.054sec이다. 한 주기 동안의 속도 분포 변화를 4단계로 나누어 Fig. 2에 나타내었다. 속도 분포에서 보여주는 결과는 잘 알려진 전형적인 와동 이탈(Vortex shedding)을 보여주고 있다. 즉 원관 상부에서 자라기 시작한 와류는 점점 커지다가 원관에서 떨어져 나가고 그 와중에 하부에서 새로운 와류가 생성되어 상부와 같은 형태의 와류 이탈을 반복적으로 보여주고 있다.

Fig. 2에서는 흰튜브 주위의 유동 형태를 자세히 볼 수 없어서 Fig. 3에 흰튜브 주위에서 유동을 자세히 관찰하기 위해 유선과 흰 사이에서의 속도 분포를 나타내었다. Fig. 3의 유선을 살펴보면 흰 사이의 공간으로 유동이 흘러가는 것을 관찰할 수 있으며 흰이 없는 원관 주위 유동처럼 흰 튜브 후류 측에 유동 박리가 일어나는 것을 관찰할 수 있다. 흰 사이 공간의 속도 분포를 보면(Fig. 3의 오른쪽 그림) 흰 사이 공간에서 벽면 효과에 의해 벽면 부근에서 속도가 줄어들지만 사이 공간에도 유동이 적절히 흐르는 것을 관찰할 수 있다. 단순한 원관 주위 유동이 아니라 흰이 있을 경우에 이러한 유동 특성으로 양력 변동이 어떻게

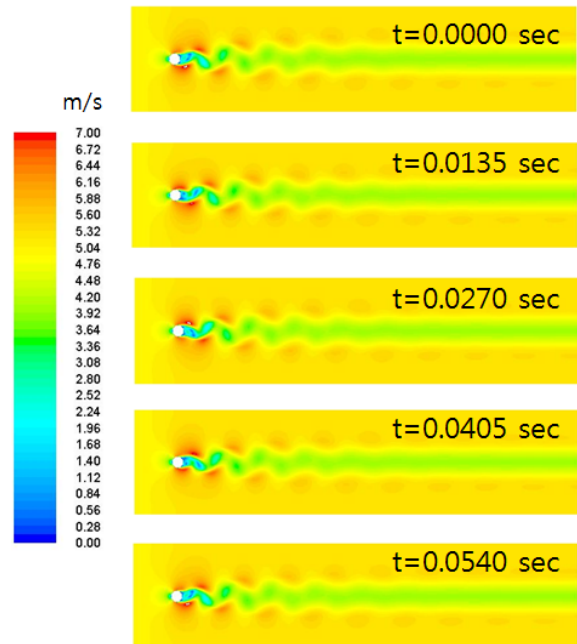


Fig. 2. Velocity magnitude contour at several time steps.

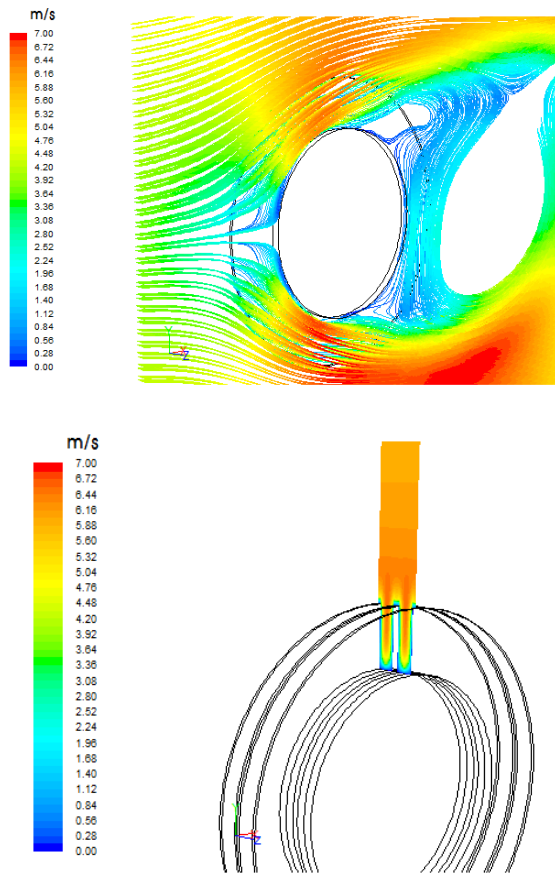


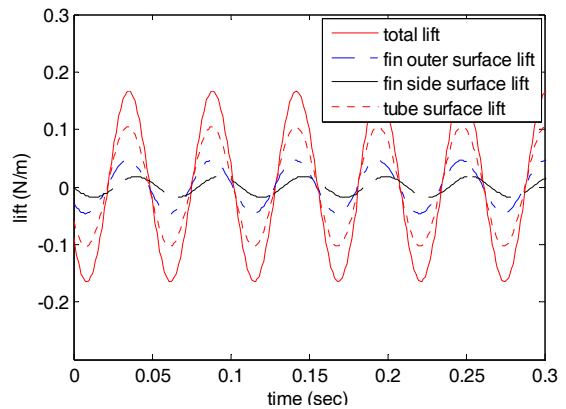
Fig. 3. Streamlines and velocity contour near the fin tube.

나타나고 흰 튜브에서 튜브 표면, 흰 측면 표면, 흰 외부 표면 각각에서의 양력 변동 특성과 이에 따른 PSD 특성이 어떻게 나타나는지를 다음 절에서 살펴보기로 한다.

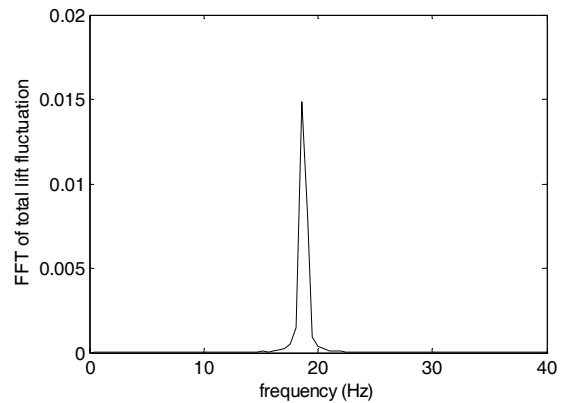
3-2. 단일 흰튜브에서 양력 변동에 따른 PSD 특성

앞 절에서 살펴 본 것과 같이 흰 튜브에서도 단순 원관과 같이 층류에서 주기적인 Karmann 와류가 상하에서 반복적으로 발생하는 것을 확인하였다. 단순 원관과 달리 흰튜브는 원관에 흰이 부착되어 원관 표면과 흰 측면 및 흰 외부 표면에서 압력 변동에 따른 양력 변화가 일어난다. 본 연구의 비정상 상태 유동 해석에서 시간 간격은 0.001sec로 하였고 약 2sec까지 해석하였다. 흰튜브 원관 표면, 흰 측면 및 흰 외부 표면에서 양력 변동 성분의 시간의 따른 변화와 양력 합력에 대한 FFT(Fast Fourier Transform) 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4(a)에 나타낸 것과 같이 양력 변동 성분의 시



(a) time history of lift fluctuation



(b) FFT of lift fluctuation

Fig. 4. Time history of lift fluctuation and its FFT over a circular cylinder.

간에 따른 변화는 거의 삼각함수 곡선과 같은 형태를 보여주고 있다. 각 부분의 진폭을 비교해 보면, 흰튜브 표면의 진폭은 0.2058N/m, 흰튜브 측면은 0.0356N/m, 흰튜브 외부 표면은 0.0914N/m이며 양력 변동 합력의 진폭은 0.3268N/m로 나타났다. 이는 양력 변동 합력을 기준으로 하면 각각 63%, 10%, 27%이다. 흰튜브의 한 피치에서 유체에 노출된 표면적 비율은 각각 20.7%, 74.8%, 4.5%이다. 면적비는 흰튜브의 측면이 가장 넓는데 양력 변동의 진폭이 가장 작은 이유는 흰 측면의 수직 방향은 양력 방향이 아니고 흰튜브 표면과 흰 외부 표면의 수직 방향이 양력 방향이므로 흰 측면의 양력 변동이 상대적으로 작게 나타나는 것으로 판단된다. 흰튜브와 흰 외부 표면의 면적을 비교해 보면 흰튜브 표면이 흰 외부 표면보다 약 4.5배 큰데 양력 변동 진폭은 2.3배 큰 것으로 나타났다. 흰튜브 외부 표면적이 4.5배 작지만 외부 표면의 직경이 흰튜브 표면의 직경 보다 1.5배 큰 것을 감안 하면

양력 변동 진폭비가 4.5배가 아니라 2.3배로 작아지는 것을 이해될 것으로 생각된다.

각각의 양력 변동 성분은 거의 같은 주파수로 변화하고 있는 것을 관찰할 수 있는데 따라서 이에 대한 FFT는 대표적으로 양력 변동의 합력에 대한 것으로 Fig. 4(b)에 나타내었다. Fig. 4를 보면 주된 주파수는 약 18.56Hz임을 알 수 있다. 난류 유동이면 주된 주파수 외에 여러 주파수의 와동(eddy)에 의해 FFT의 분포가 Fig. 4(b)와 같이 나타나지 않고 주된 주파수와 함께 여러 주파수로 분포될 것으로 판단된다.

본 연구에서의 유동 조건은 층류이기 때문에 주된 주파수의 와동 이탈(Vortex shedding)이 관찰되고 그 외의 주파수에서는 거의 일어나지 않음을 알 수 있다. 이러한 비정상상태 유동 특성으로 말미암은 양력 변동이 원관에서 유동 유발 진동(Flow Induced Vibration)을 야기하게 되는데 이에 대한 분석을 구체적으로 살펴보기로 한다.

전열관군에서 유동 유발 진동은 서론에서 살펴본 것처럼 많은 실험적 연구들이 있어 왔다. 대표적인 것이 Blevins⁽¹⁾의 연구이며 Taylor⁽²⁾와 Chen⁽³⁾의 연구를 검증하며 유동 유발 진동에 대한 무차원 PSD (Power Spectrum Density) 함수를 정리한 연구가 Axisa⁽⁴⁾에 의해 이루어 졌다. 이러한 실험적 연구에서 도출한 무차원 PSD함수는 다음과 같이 정의하였다.

$$\Phi(fD/U) = \frac{S_F}{\left(\frac{1}{2}\rho U^2 D\right) \frac{D}{U}} \quad (5)$$

여기서

Φ : Nondimensional power spectral density function

S_F : PSD of lift fluctuation per unit length

ρ : fluid density

U : Average cross flow velocity through the minimum gap between tubes

f : frequency

여기서 무차원 PSD 함수는 Strouhal 수, fD/U 의 함수임을 알 수 있다. 양력 변동의 PSD S_F 는 n 을 양력 변동 시간 데이터 개수, Δt 를 데이터 취득 시간 간격, 양력 변동을 $L'(t)$ 라고 하면 $L'(t)$ 의 FFT를 구하여 이것을 $L'_F(f)$ 라고 하면 아래 식으로 구할 수 있다.

$$S_F(f) = 2 \left| \frac{L'_F(f)}{\sqrt{n/\Delta t}} \right|^2 \quad (6)$$

위에서 정의한 무차원 PSD를 Fig. 4(a)의 양력 변동 합력 데이터를 이용하여 구한 결과와 기존의 실험 연구 결과들과 비교한 것을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 5에는 흰튜브가 아닌 일반 원형 관에서 유동 유발 진동 실험 연구인 Chen⁽³⁾과 Taylor⁽²⁾의 실험 결과를 정리하여 Axisa⁽⁴⁾가 도출한 실험식인 아래 식 (6)을 이용하였다. 그리고 Blevins⁽¹⁾가 실험에서 사용한 12개 열 원관에서 양력 변동 PSD도 함께 나타내었다.

$$\Phi(fD/U) = \begin{cases} 4 \times 10^{-4} (fD/U)^{-0.5} & 0.01 \leq fD/U \leq 0.2 \\ 3 \times 10^{-6} (fD/U)^{-3.5} & 0.2 \leq fD/U \leq 3.0 \end{cases} \quad (7)$$

Fig. 5에서 fin tube CFD가 본 연구에서 CFD 해석을 통해 도출한 결과이다. Fig. 5를 살펴보면 Blevins의 실험 결과는 다른 연구자들의 실험 결과와 다소 차이가 있는 것을 알 수 있다. 특히 1과 2열에서는 타 연구들과 차이가 많이 나며 6~12열인 후류 전열관군에서는 다른 연구 결과와 유사한 결과가 나오는 것을 관찰할 수 있다. 본 연구의 CFD 해석 결과는 Axisa⁽⁴⁾가 종합 정리한 무차원 PSD 식(6)에 근접한 결과를 보여 주고 있다. 이로부터 단순 원형관이 아닌 흰튜브에서도 단순 원형관에서의 양력 변동에 따른 PSD 특성과 거의 유사한 결과가 나타남을 알 수 있다. 이로부터 흰튜브에서의 PSD 특성은 흰

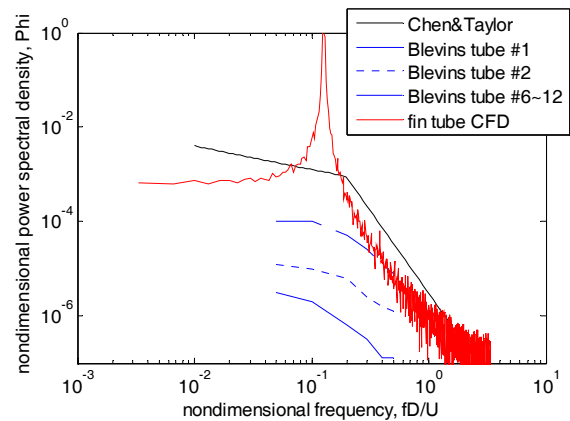


Fig. 5. Comparison of nondimensional PSD with the present CFD analysis result and the other experimental results.

튜브의 적절한 직경 선정, 무차원 주파수, 무차원 PSD를 이용하여 단순 원관의 PSD 특성으로 부터 예측할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

지금까지 전열관군에서 유동 유발 진동에 대하여 기존의 실험 연구들과 본 연구에의 흰튜브 단일 원관에서 CFD 해석을 통한 결과를 비교함으로써 기존의 실험 연구들에서 도출한 양력 변동에 따른 PSD 특성과 흰튜브 단일 원관에서의 PSD 특성을 비교하였으며 이에 대한 연구 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 흰튜브 원관 주위 유동에서 층류 비정상 유동특성 본 연구에서의 흰튜브 단일 원관 형상과 유동 속도 조건은 일반적인 배열회수 보일러에 사용하고 있는 형상과 유동 속도, 밀도, 점성계수를 사용하였으며 비정상 상태 해석 결과 단일 원관의 층류 유동에서 나타나는 전형적인 Karmann 와류 이탈을 본 연구의 흰튜브 단일 원관에서도 관찰할 수 있었다. 또한 흰튜브의 흰 사이 공간에도 유동이 적절히 잘 흐르는 것을 관찰할 수 있었다.

2) 단일 흰튜브에서 유동 유발 진동 ruf특성 본 연구에서 흰튜브 원관 표면, 흰 측면 및 흰 외부 표면에서 양력 변동 성분의 시간의 따른 변화를 살펴본 결과 모두 다 거의 삼각함수와 같은 주기적인 변동을 관찰할 수 있었고 흰튜브 표면의 진폭은 0.2058N/m, 흰튜브 측면은 0.0356N/m, 흰튜브 외부 표면은 0.0914N/m이며 양력 변동 합력의 진폭은 0.3268N/m로 나타났다. 이는 양력 변동 합력을 기준으로 하면 각각 63%, 10%, 27%로 나타났다. 이로부터 흰튜브 표면의 양력 변화가 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 양력 변동의 주된 주파수는 약 18.56Hz임을 알 수 있었다. 단순 원관에 관한 기존의 실험 연구들에서 도출한 PSD 특성과 본 연구의 흰튜브에서 PSD 특성을 비교한 결과 거의 유사한 특성이 도출되는 것을 확인할 수 있었다. 이로부터 흰튜브에서도 적절한 흰튜브 직경을 토대로 한 무차원 주파수, 무차원 PSD를 이용하면 흰튜브에서의 PSD 특성을 단순 원관에서의 PSD로부터 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 한국기계연구원 주요사업의 지원에 의한 연구 결과입니다.

References

1. R.D. Blevins, R. J. Gibert and B. Villard, "Experiment on vibration of heat exchanger tube arrays in cross-flow", Trans. 6th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Paper B6/9, (1981).
2. C. Taylor, M.J. Pettigrew, F. Axisa and B. Villard, "Experimental determination of single and two-phase cross flow induced forces on tube rows", Flow Induced Vibration, PVP Vol. 104, 31-39, (1986).
3. S.S. Chen and J.A. Jendrzejczyk, "Fluid excitation forces acting on square tube array", Journal of Fluids Engineering, Vol. 109/415, (1987).
4. F. Axisa, J. Antunes, B. Villard and M. Wullschlegel, "Random excitation of heat exchanger tubes by cross-flows", Int. ASME Winter Symposium on Low-Induced Vibrations and Noise, CEA-CONF-9744, (1988).
5. S.V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", 126-131, (1980)
6. K.B. Lee, B.W. Kim, J.S. Yang, M.K. Kim and S.S. Jang, "A study on flow-induced vibration of tube array in uniform cross flow (I)", Transactions of the KSME B, Vol. 117, No. 5, 924-932, (1992).