



열교환 단일 원관의 양력과 항력 변동에 따른 PSD 특성 연구

†하지수

계명대학교 기계자동차공학과
(2015년 7월 5일 접수, 2015년 8월 25일 수정, 2015년 8월 26일 채택)

The Power Spectral Density Characteristics of Lift and Drag Fluctuation on a Heat Exchanger Circular Tube

†Ji Soo Ha

Mechanical&Automotive Engineering Dept., Keimyung University, Daegu 1000, Korea
(Received July 5, 2015; Revised August 25, 2015; Accepted August 26, 2015)

요 약

열교환기의 전열관군은 전열관군 외부로 흐르는 유동에 의해 유동 유발 진동이 일어나며 이것으로 말미암아 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 유동 유발 진동에 대한 무차원 PSD(Power Spectral Density) 함수를 무차원 주파수인 Strouhal 수, fU/U 의 함수로 도출된 실험적 결과들이 도출되어 있다. 본 연구는 열교환기 단일 원관에서 유동 유발 진동에 관한 기존의 연구들의 결과를 전산유체해석을 통해 검증하고 배열회수 보일러의 전열관군의 유동 유발 진동 특성에 적용하기 위한 기반을 마련하는 것을 목적으로 한다. 이러한 것을 위해 단일 원관에서 비정상 상태 유동해석을 수행하여 주기적인 와동 발생 특성과 원관에서의 양력과 항력의 변화 특성을 살펴보았다. 또한 원관에서 양력과 항력의 변동 특성으로부터 유동 유발 진동에 따른 PSD 특성 결과를 도출하여 기존의 연구들과 비교를 통해 원관 주위의 PSD 특성을 살펴보았으며 양력과 항력의 진폭과 주파수의 특성을 규명하였다.

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 and the nondimensional PSD(Power Spectral Density) function with the Strouhal number, fD/U , had been derived by experimental method. The present study examined the results of the previous experimental researches for the nondimensional PSD characteristics by CFD analysis and the basis for the application of flow induced vibration to the heat recovery steam generator tube array would be prepared from the present CFD analysis. For the previous mentioned purpose, the present CFD analysis introduced a single circular cylinder and calculated with the unsteady laminar flow over the cylinder. The characteristics of vortex shedding and lift and drag fluctuation over the cylinder was investigated. The derived nondimensional PSD was compared with the results of the previous experimental researches and the characteristics of lift and drag PSD over a single circular cylinder was established from the present CFD study.

Key words : Heat Exchanger, Circular Cylinder, Flow Induced Vibration, Lift Fluctuation, Drag Fluctuation, Power Spectral Density, Karmann Vortex, Unsteady Laminar Flow, FFT

†Corresponding author:jisooaha@kmu.ac.kr
Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

복합 화력발전은 가스터빈과 가스터빈 이후에 나오는 고온의 배열을 회수하여 스팀터빈을 구동하여 발전하는 시스템으로 구성되어 있다. 가스터빈 이후의 고온의 배열을 회수하는 곳은 배열회수 보일러인데 이곳의 주요 구성은 확대 덕트와 이에 이어지는 전열관군으로 되어 있다. 이 곳에서 배열을 회수하여 전열관군 내의 보일러수를 증기로 변환하여 스팀터빈을 구동한다.

배열회수 보일러의 전열관군은 외부에 고온의 배기가스가 흐르게 된다. 이러한 유체의 흐름으로 인해 원관으로 되어 있는 전열관군에서 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 측정 한 후 양력 변동을 이용하여 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. 최근에는 Paul[7]에 의해 전열관군에서 난류유동에 관한 실험과 전산 유체해석 연구를 통해 전열관군의 난류 특성에 관한 연구도 이루어지고 있다.

지금까지의 연구에서는 유동 유발 진동에 대한 PSD를 도출할 때 압력을 측정하여 이를 통하여 양력만을 고려한 PSD를 산출하거나 양력과 항력을 합한 힘을 측정하여 PSD를 구하였다. 원관 주위 유동은 주기적인 와류인 Karmann 와류에 의해 양력도 변동이 생기지만 항력의 변화도 생기게 된다. 따라서 본 연구에서는 우선, 열교환기 전열관군에서 유동 유발 진동에 관한 기존의 연구들의 결과를 전산유체해석을 통해 검증하고 양력과 항력의 시간 변동 특성을 살펴보고 원관 주위의 유동 유발 진동에서 양력과 항력 변화의 PSD 특성이 어떠한지를 규명하는 것을 목적으로 한다. 이러한 것을 위해 단일 원관에서 비정상 상태 유동해석을 수행하여 주기적인 와동 발생

특성과 원관에서의 양력과 항력 변화 특성을 살펴보기로 한다. 또한 원관에서 양력과 항력의 변동 특성으로부터 유동 유발 진동에 따른 PSD 특성 결과를 도출하여 기존의 연구들과 비교를 통해 원관 주위의 PSD 특성을 정립하기로 한다.

II. 수치해석방법

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

Fig. 1에서 보는 바와 같이 왼쪽은 입구속도경계이고 오른쪽은 출구로 설정하였다. 그리고 상하는 모두 벽면으로 간주하였다. 원관 주위의 유동을 자세히 계산하기 위해 Fig. 1에서 보는 바와 같이 원관 주위에는 상대적으로 많은 격자를 생성하였다. 원관 주위를 흐르는 유체는 상온의 공기를 이용하였으며 원관의 직경은 Blevins[1]의 실험에서 사용한 직경과 동일하게 25mm이다. 유동장의 입구 유속은 15m/s로 하였고 이는 Blevins[1]가 사용한 입구 유속 범위 내에 있는 입구 유속이다.

상온의 공기가 25mm의 원관을 15m/s로 흐를 때 Re수는 2.5×10^4 이다. 원관 주위 유동에서 층류와 난류를 구분하는 임계 Re수는 3.5×10^5 이므로 본 연구의 원관 형상과 입구유속은 난류 영역이 아니라 층류로 간주할 수 있다. 따라서 본 연구의 유동 지배방정식은 2차원 비정상상태 연속방정식, 운동량방정식으로 아래와 같이 구성할 수 있다.

밀도 변화가 없으므로 연속방정식은 다음과 같다.

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

운동량 방정식은 비정상 상태이므로 시간 변화를 포함하여 다음과 같다.

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

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

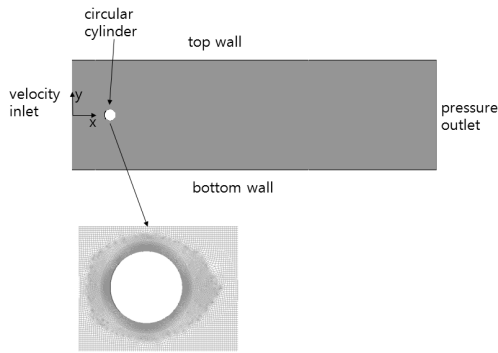


Fig. 1. Configuration of a circular cylinder tube mesh and its boundary types for CFD analysis.

각 경우의 유동 특성 해석을 위해 사용한 프로그램은 SIMPLE 알고리즘[5]을 채택한 상용 열유체 전산해석 프로그램인 Fluent 프로그램을 이용하였고 유동장은 약 40만개의 격자로 구성하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 단일 원관 주위의 양력과 항력의 시간 변화 특성

단일 원관 주위의 층류 비정상 상태 유동은 많은 연구가 이루어져서 유동 특성이 잘 정립되어 있다. 층류일 경우 원관의 후류에는 잘 알려진 Karmann 와류가 주기적으로 흐르게 되는데 본 연구의 속도 분포 결과에서도 관찰할 수 있다. Fig. 2에 유동장에서 시간 변화에 따른 속도 분포 변화를 나타내었다. Fig. 3에서 원관 표면에서 시간에 따른 양력과 항력 변화를 분석할 예정인데 이의 결과를 보면 Karmann 와류의 주파수는 약 124Hz이며 이로서 주기는 약 0.008sec이다. 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.

본 연구의 비정상 상태 유동해석에서 시간 간격은 0.0001sec로 하였고 약 0.4sec까지 해석하였다. 원관 표면에서 양력과 항력 변동 성분의 시간의 따른 변화와 이에 대한 FFT(Fast Fourier Transform) 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)에 나타낸 것과

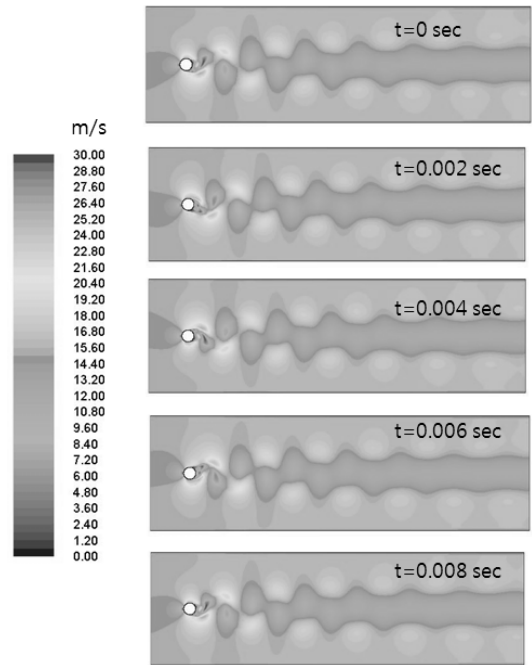


Fig. 2. Velocity magnitude contour at several time steps.

같이 양력과 항력 변동 성분의 시간에 따른 변화는 거의 사인이나 코사인 곡선과 같은 형태를 보여주고 있다. 이 양력과 항력 변동 성분에 대한 FFT는 Fig. 3(b)에 나타내었는데 주된 주파수는 양력의 경우는 124Hz이고 항력의 경우는 양력의 주파수의 2배인 248Hz임을 알 수 있다.

양력의 경우는 원관 상하 양단에서 주기적으로 이탈하는 Karmann 와류가 상하로 한번 씩 번갈아가면서 생성되며 이의 주기가 124Hz이다. 항력의 경우는 상하에서 번갈아가면서 발생하는 와류의 영향이 항력의 변동을 양력보다 2배로 자주 변동하게 만들게 하는 것으로 판단된다. 이렇기 때문에 항력의 변동 주파수는 양력의 2배인 248Hz로 나타나는 이유이다.

양력 변동의 진폭은 9.5N/m이며 항력은 1.3N/m이다. 항력의 진폭은 양력 진폭의 약 14%로 나타났다. 이에 대한 분석은 Fig. 2를 살펴보면 예상할 수 있다. 즉, Fig. 2의 시간 변동에 따른 속도 분포를 보면 양력 변동의 한 주기 동안 원관의 상하 지점에서 속도는 상대적으로 큰 속도에서 작은 속도로 변하는데 이에 따라 베르누이방정식에서 알 수 있듯이 속도 변동의 제곱에 비례하여 압력변동이 발생하기

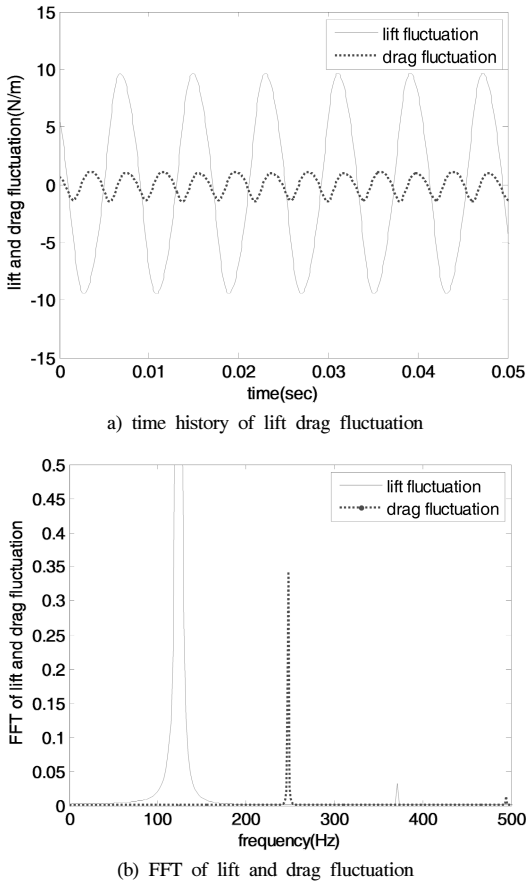


Fig. 3. Time history of lift and drag fluctuation and their FFT over a circular cylinder.

때문에 양력 변동은 상대적으로 크게 변하는 것을 예측할 수 있다.

이에 반하여 항력은 원관의 전방과 후방 표면의 압력차이로 발생하게 되는데 전방의 속도는 정체 영역이기 때문에 속도가 낮으면서 속도의 변동도 크게 발생하지 않는다. 또한 원관의 후방 표면에서는 유동 박리 영역이며 이 곳에서의 속도도 크지 않으면서 속도 변동도 크지 않게 나타나고 있다. 이러한 이유로 양력 변동의 진폭이 항력의 진폭 보다 상대적으로 크게 나타나는 것으로 판단된다.

3.2. 단일 원관에서 양력과 항력의 PSD 특성

전열관군에서 유동 유발 진동은 서론에서 살펴본 것 같이 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.

$$\Phi(fD/U) = \frac{S_F}{\left(\frac{1}{2}\rho U^2 D\right) \frac{D}{U}} \quad (4)$$

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.

$$S_F(f) = 2 \frac{L'_F(f)^2}{\sqrt{n}/\Delta t} \quad (5)$$

위에서 정의한 무차원 PSD를 Fig. 3(a)의 양력 변동 데이터를 이용하여 구한 결과와 기존의 실험 연구 결과들과 비교한 것을 Fig. 4에 나타내었다. 본 연구에서 우선적으로 양력 변동의 PSD와 기존의 실험 연구들과 비교하는 것은 Blevins[1]가 실험적으로 원관 표면에서 압력을 측정하여 양력 성분만으로 PSD 결과를 도출하였기 때문에 양력 변동으로 PSD를 구하여 비교하기로 한다. Fig. 4에는 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 원관에서의 양력 변동 PSD도 함께 나타내었다. Fig. 4에서 single CFD가 본 연구에서 CFD 해석을 통해 도출한 양력 변동 PSD 결과이다. Fig. 4를 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. 이렇게 차이가 나는 이유는 초기 전열관군인 1, 2번열은 그 뒤 전열관군의 존재로 압력변동이 억제되는 효과로 판단되어진다. 본 연구의 CFD 해석 결과는 Strouhal 수 $fD/U > 0.2$ 이상에서 Axisa[4]가 종합 정리한 무차원 PSD 식(6)에 근접한 결과를

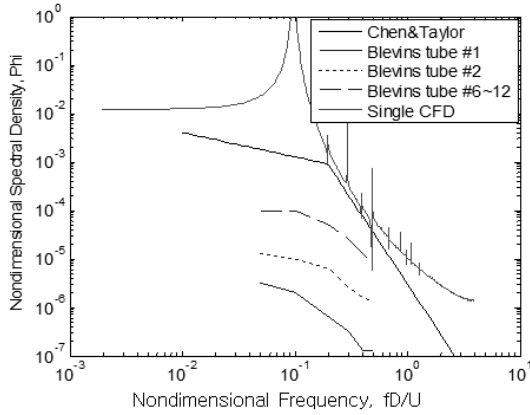


Fig. 4. Comparison of nondimensional PSD with the present CFD analysis result and the other experimental results.

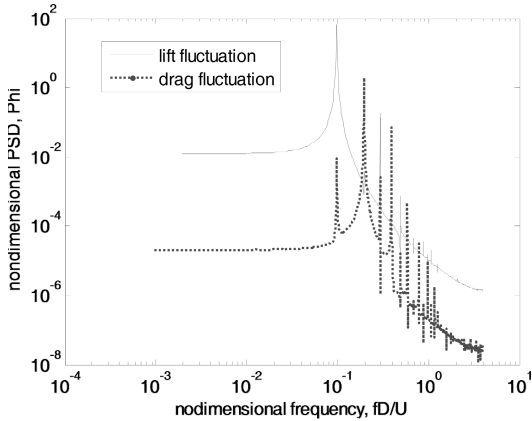


Fig. 5. Comparison of nondimensional PSD derived from the lift fluctuation and drag fluctuation.

보여 주고 있다. 이로부터 전열관군에서 유동 유발 진동에 관한 기존 실험 연구들은 대부분 층류 유동 영역에서 실험이 이루어 졌으며 전열관군에서 실험한 결과와 단관에서의 CFD 해석 결과는 무차원 PSD 결과가 잘 일치하게 도출 되는 것을 알 수 있다.

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

이미 Fig. 3(a)에서 살펴보았듯이 양력 변동의 진

폭은 항력 변동의 진폭 보다 약 7.3배 크다. 이러한 이유는 와류 이탈로 말미암은 압력 변동이 원관의 앞뒤 방향 보다 상하 방향으로 상대적으로 많은 변화를 야기 시키기 때문으로 판단된다. 따라서 원관 주위의 유동 유발 진동은 양력 변동이 주된 역할을 함을 알 수 있었다. 항력 변동의 진폭은 양력 변동의 약 14% 정도의 영향임을 염두에 두기로 한다. Fig. 5에 양력 변동과 항력 변동에 따른 PSD를 함께 나타내었다. 양력 변동의 PSD는 이미 Fig. 4에 나타난 것과 동일한 결과이다. 항력 변동의 PSD 크기는 이미 진폭 크기 비교에서 예측하였듯이 양력 변동의 PSD 보다 작게 나타남을 알 수 있다. PSD에서 결과에서 보여준 $fD/U < 0.1$ 영역에서 일정한 양력 PSD 값은 1.24×10^{-3} 이고 항력 PSD 값은 2.06×10^{-5} 으로 항력의 PSD 값이 양력의 1.66%로 나타났다. 이는 항력 변동의 진폭이 양력 진폭의 14%이며 식 (5)에서 알 수 있듯이 PSD는 진폭의 제곱에 비례하는 것을 감안 하면 14%의 제곱이 1.96%로 나타나는 것으로 항력의 PSD 크기가 양력의 PSD 크기의 1.66%로 나타난 것을 예측 가능하다. $fD/U > 0.1$ 인 영역에서도 양력과 항력의 PSD 크기에 대한 결과는 이와 유사한 것을 예측할 수 있다. 그리고 항력의 PSD 그래프에서 양력의 PSD 보다 피크 부분이 약간 오른쪽으로 이동한 것은 항력의 주파수가 양력의 주파수의 2배이므로 피크가 일어나는 곳도 무차원 주파수의 Strouhal 수의 2배 지점에서 일어나는 것을 예측할 수 있다.

IV. 결론

지금까지 단일 원관에서 양력과 항력의 시간 변동에 따른 유동 특성을 살펴보았으며 기존의 실험 연구들과 본 연구에의 CFD 해석을 통한 결과를 비교함으로써 본 연구의 CFD 해석의 타당성과 단일 원관의 양력과 항력의 시간 변동에 따른 PSD 특성을 분석하여 이에 대한 연구 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 단일 원관 주위의 양력과 항력의 시간 변화 특성
본 연구에서의 단일 원관 형상과 유동 속도 조건은 기존 실험 연구인 Blevins[1]에서 사용한 원관 직경과 유동 속도를 사용하였으며 비정상 상태 해석 결과 층류 유동에서 나타나는 전형적인 Karmann 와류 이탈을 관찰할 수 있었다. 이러한 조건으로 해석한 결과 양력의 주된 주파수는 약 124Hz이며 항력의 주된 주파수는 양력의 2배인 248Hz임을 알 수 있었다. 항력의 주파수가 양력의 2배인 것은 양력의

경우에는 원관의 상하에서 Karmann 와류가 발생하여 상하에 번갈아 가면서 양력의 변화가 생기지만 항력은 상하에서 양력의 변화가 생길 때마다 같은 크기의 항력이 발생하기 때문에 판단되었다. 또한 항력의 진폭은 양력의 진폭의 약 14%로 작게 나타났다.

2) 단일 원관에서 양력과 항력의 PSD 특성

전열관군에서 유동 유발 진동 특성은 기존의 실험 연구들에서 무차원 PSD 특성 곡선을 도출하였다. 본 연구에서는 단일 원관에서 CFD 해석을 통해 양력의 시간변동을 이용하여 무차원 PSD를 도출하였으며 기존의 실험 연구들과 비교한 결과 Axisa⁽⁴⁾가 정립한 실험식에 잘 일치한 결과가 도출되었음을 알 수 있었다. 양력과 항력의 PSD 결과를 비교한 결과, 양력과 항력의 진폭과 주파수에서 분석한 것과 같이 항력의 PSD가 양력의 PSD의 약 1.66%로 나타났으며 피크가 일어나는 곳도 양력과 항력의 주파수가 2배 수 관계로 나타나는 것과 일치하게 나타남을 알 수 있었다.

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*, pp. 31-39, PVP Vol. 104, (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. Wullschleger, "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", pp. 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*, pp 924-932, Vol. 117, No. 5, (1982)
- [7] S.S. Paul, S.J. Ormiston and M.F. Tachi, "Experimental and numerical investigation of turbulent cross-flow in a staggered tube bundle", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, pp 387-414, Vol. 29, (2008)