

## 열교환 단일 원관의 유동 유발 진동 특성에 관한 연구

하지수\*<sup>†</sup> · 이부윤\* · 심성훈\*\*

계명대학교 기계자동차공학과\*, 한국기계연구원\*\*

(2015년 6월 22일 접수, 2015년 9월 14일 수정, 2015년 9월 18일 채택)

### A study on the flow induced vibration on a heat exchanger circular cylinder

Ji Soo Ha<sup>†</sup>\*, Boo Youn Lee\*, Sung Hun Shim\*\*

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University\*,  
Korea Institute of Machinery and Materials\*\*

(Received 22 June 2015, Revised 14 September 2015, Accepted 18 September 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 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 열교환기 전열관군에서 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 양력 변화 특성을 살펴보았다. 또한 원관에서 양력 변동 특성으로부터 유동 유발 진동에 따른 PSD 특성 결과를 도출하여 기존의 연구들과 비교를 통해 원관 주위의 PSD 특성을 정립하였다.

**주요어** : 열교환기, 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 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 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 PSD over a single circular cylinder was established from the present CFD study.

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

<sup>†</sup>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. 서론

배열회수 보일러는 복합 화력발전에서 가스터빈과 발전기를 연결하여 전기를 생산하고 가스터빈에서 나오는 고온의 배기가스 열을 회수하여 증기를 만들어 이것으로 증기터빈을 구동시켜 다시 전기를 생산하는데 이용한다. 배열회수 보일러에서 고온의 배기가스의 열을 회수하는 곳은 배열회수 보일러의 확대 덕트를 지나 수많은 전열관군으로 구성된 열교환기에서 이루어진다. 이곳에서 배열을 회수하여 전열관군 내의 보일러수를 증기로 변환하여 스팀터빈을 구동한다.

배열회수 보일러의 전열관군은 외부에 고온의 배기가스가 흐르게 된다. 이러한 유체의 흐름으로 인해 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<sup>(1)</sup>는 10행, 12열의 전열관군에서 각 열에서의 원관 표면에 압력센서를 부착하여 시간 변화에 따른 압력을 측정하여 유동 유발 진동 특성을 연구하였다. Taylor<sup>(2)</sup>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<sup>(3)</sup>은 사각배열의 원관에서 유동 유발 진동 특성을 연구하였고 Axisa<sup>(4)</sup>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.

본 연구는 열교환기 전열관군에서 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 양력 변화 특성을 살펴보기로 한다. 또한 원관에서 양력 변동 특성으로부터 유동 유발 진동에 따른 PSD 특성 결과를 도출하여 기존의 연구들과 비교를 통해 원관 주위의 PSD 특성을 정립하기로 한다.

## 2. 수치해석 방법

배열회수 보일러의 전열관군에서 발생하는 유체유발 진동을 규명하기 위해 단일 원관에서 유체유발 진동을 전산유체 해석을 통해 살펴보고 기존의 실험 연구들의 결과와 비교 검증하여 원관 주위의 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<sup>(1)</sup>의 실험에서 사용한 직경과 동일하게 25mm이다. 유동장의 입구 유속은 15m/s로 하였고 이는 Blevins<sup>(1)</sup>가 사용한 입구 유속 범위 내에 있는 입구 유속이다.

상온의 공기가 25mm의 원관을 15m/s로 흐를 때 Re수는  $2.5 \times 10^4$ 이다. 원관 주위 유동에서 층류와 난류를 구분하는 임계 Re수는  $3.5 \times 10^5$ 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.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

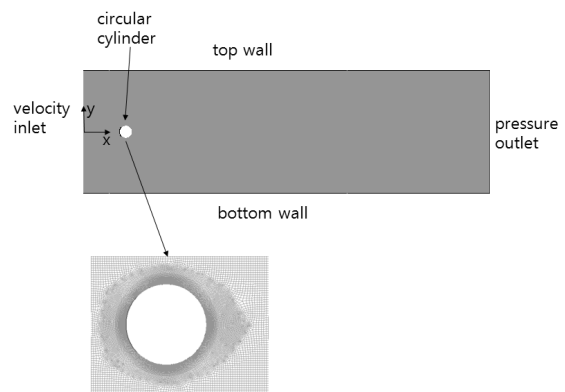


Fig. 1. Configuration of a circular cylinder tube mesh and its boundary types for CFD analysis.

운동량 방정식은 비정상 상태이므로 시간 변화를 포함하여 다음과 같다.

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

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

각 경우의 유동 특성 해석을 위해 사용한 프로그램은 SIMPLE 알고리즘<sup>(5)</sup>을 채택한 상용 열유체 전산해석 프로그램인 Fluent 프로그램을 이용하였고 유동장은 약 40만개의 격자로 구성하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 단일 원관 주위의 층류 비정상 상태 유동장 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 분포와 압력 분포 결과에서도 관찰할 수 있다. Fig. 2에 유동장에서 시간 변화에 따른 속도 분포와 압력 분포 변화를 나타내었다. Fig. 3에서 원관 표면에서 시간에 따른 양력 변화를 분석할 예정인데 이의 결과를 보면 Kar-

mann 와류의 주파수는 약 124Hz이며 이로서 주기는 약 0.008sec이다. 한 주기 동안의 속도와 전압 분포 변화를 4단계로 나누어 Fig. 2에 나타내었다. 속도 분포와 압력 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 양력 변동 성분의 시간의 따른 변화와 이에 대한 FFT(Fast Fourier Transform) 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)에 나타낸 것과 같이 양력 변동 성분의 시간에 따른 변화는 거의 사인이나 코사인 곡선과 같은 형태를 보여주고 있다. 이 양력 변동 성분에 대한 FFT는 Fig. 3(b)에 나타내었는데 주된 주파수는 약 124Hz임을 알 수 있다. 난류 유동이면 주된 주파수 외에 여러 주파수의 와동(eddy)에 의해 FFT의 분포가 Fig. 3(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

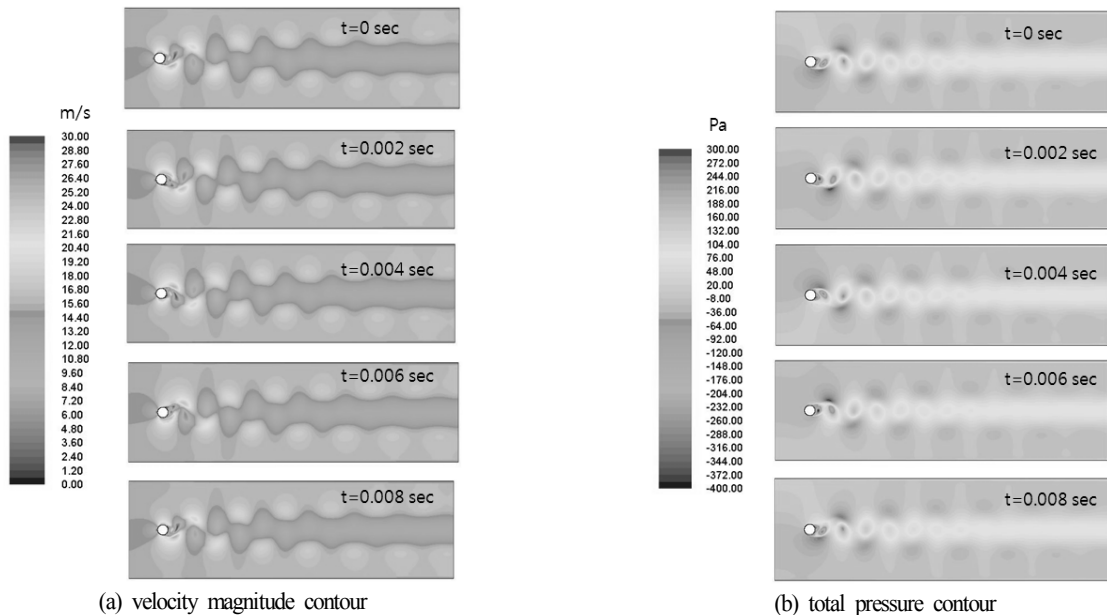


Fig. 2. Velocity magnitude and total pressure contour at several time steps.

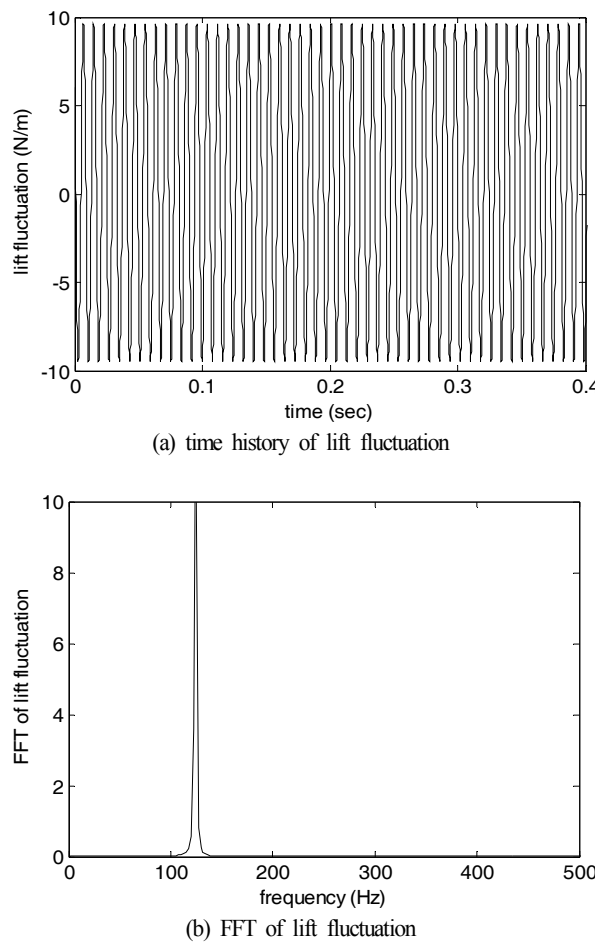


Fig. 3. Time history of lift fluctuation and its FFT over a circular cylinder.

원관에서 유동 유발 진동(Flow Induced Vibration)을 야기하게 되는데 이에 대한 분석은 다음절에서 구체적으로 살펴보기로 한다.

### 3.2. 단일 원관 유동 유발 진동 특성

전열관군에서 유동 유발 진동은 서론에서 살펴보았듯이 많은 실험적 연구들이 있어 왔다. 대표적인 것이 Blevins<sup>(1)</sup>의 연구이며 Taylor<sup>(2)</sup>와 Chen<sup>(3)</sup>의 연구를 검증하며 유동 유발 진동에 대한 무차원 PSD(Power Spectrum Density) 함수를 정리한 연구가 Axisa<sup>(4)</sup>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

$\Phi$  : Nondimensional power spectral density function  
 $S_F$  : PSD of lift fluctuation per unit length  
 $\rho$  : 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,  $\Delta t$ 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.

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

위에서 정의한 무차원 PSD를 Fig. 3(a)의 양력 변동 데이터를 이용하여 구한 결과와 기존의 실험 연구 결과들과 비교한 것을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에는 Chen<sup>(3)</sup>과 Taylor<sup>(2)</sup>의 실험 결과를 정리하여 Axisa<sup>(4)</sup>가 도출한 실험식인 아래 식 (6)을 이용하였다. 그리고 Blevins<sup>(1)</sup>가 실험에서 사용한 12개 열 원관에서의 양력 변동 PSD도 함께 나타내었다. Fig. 4에서 single CFD가 본 연구에서 CFD 해석을 통해 도출한 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. 본 연구의 CFD 해석 결과는 Strouhal 수  $fD/U > 0.2$  이상에서 Axisa<sup>(4)</sup>가 종합 정리한 무차원 PSD 식(6)에 근접한 결과를 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 거의 일치하게 도출 되는 것을 알 수 있다.

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

Fig. 3에서 살펴보면 원관 표면에서 양력 변동의 시간에 따른 변화는 거의 사인 또는 코사인 곡선과 유사한 경향을 보여주고 있다. 따라서 양력 변동을 CFD 해석에서 구한 진폭  $L_{amp}$ 는 9.8N/m로 하고 주파수는  $f=124\text{Hz}$ 로 하여 시간에 따른 양력 변동  $L'(t)$ 를 다음 식과 같이 모사하기로 한다.

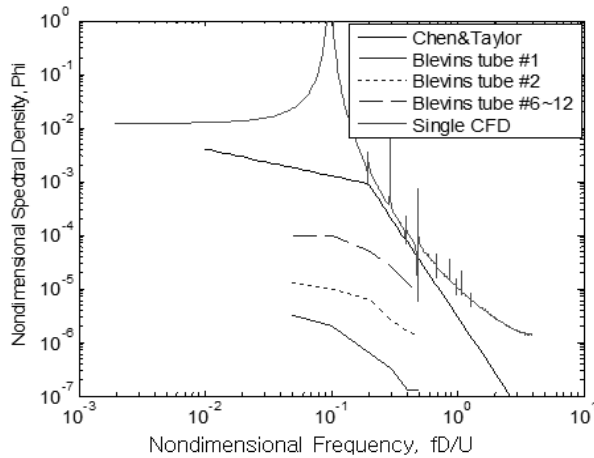


Fig. 4. Comparison of nondimensional PSD with the present CFD analysis result and the other experimental results.

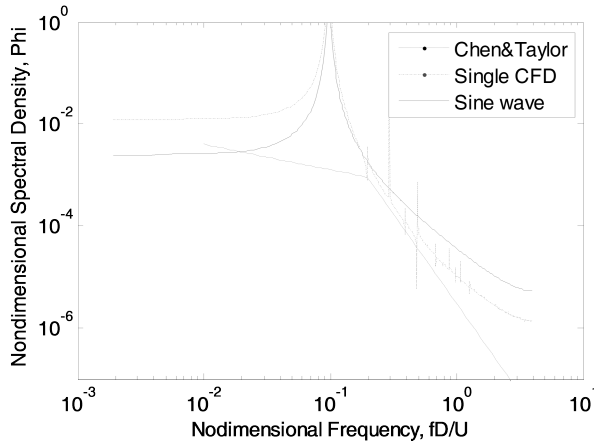


Fig. 5. Comparison of nondimensional PSD with the sine wave lift fluctuation, the present CFD result and Chen&Taylor experimental result.

$$L'(t) = L_{amp} \sin(2\pi ft) \tag{7}$$

위 식을 이용하여 양력의 시간에 따른 변동에 대한 데이터를 CFD 해석 결과에서 구한 데이터만큼 만들어서 PSD를 구하여 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5를 살펴보면  $fd/U < 0.2$  영역에서 원관의 CFD 해석 결과로 도출한 PSD 결과 보다 Axisa가 도출한 실험식인 (6)식에 더 근접하는 것을 알 수 있고  $fd/U > 0.2$  영역에서는 CFD 해석 결과가 조금 더 식 (6)에 근접한 것을 알 수 있다. 그렇지만 Axisa가 정리한 범위의 오차 내에는 충분히 들어가는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 전열관군에서 유동 유발 진동에 따른 PSD는 실험 또는 CFD 해석을 통해서 도출하는 것 보다

양력의 시간 변동 진폭과 와류 이탈 주파수를 알면 이것으로부터 양력의 시간 변동 데이터를 사인곡선으로 모사하여 구함으로써 적합한 결과를 도출할 수 있을 수 있다.

#### 4. 결론

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

##### 1) 단일 원관 주위 유동에서 층류 비정상 유동 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 주된 주파수는 약 124Hz이며 주기는 0.008sec임을 알 수 있었다. 또한 FFT를 통한 주파수 분석 결과로부터 주된 주파수의 와동 이탈(Vortex shedding)이 관찰되고 그 외의 주파수에서는 거의 일어나지 않음을 알 수 있었다.

##### 2) 단일 원관 유동 유발 진동 특성

전열관군에서 유동 유발 진동 특성은 기존의 실험 연구들에서 무차원 PSD 특성 곡선을 도출하였다. 본 연구에서는 단일 원관에서 CFD 해석을 통해 무차원 PSD를 도출하였으며 기존의 실험 연구들과 비교한 결과 Axisa(4)가 정리한 실험식에 잘 일치한 결과가 도출되었음을 알 수 있었다. 또한 양력 변동의 시간에 따른 변화를 관찰한 결과 이것이 거의 사인 곡선에 근접함을 파악하였고 CFD 해석 결과에서 도출된 진폭과 주파수를 이용하여 양력 변동을 사인 곡선으로 모사한 결과도 PSD에 관한 실험식과 거의 유사한 결과를 보여주었음을 알 수 있었다. 이로써 전열관군에서 유동 유발 진동은 양력 변동에 대하여 적합한 진폭과 주파수를 이용한 사인곡선으로 모사하면 실험식과 비교적 일치하는 PSD 결과를 도출할 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. 6<sup>th</sup> 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. 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*", 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).