

# 단일 원관에서 전방류의 주기적인 속도 변동에 따른 유동 특성에 관한 연구

하지수  
계명대학교 기계자동차공학과

## A Study on Flow Characteristic due to the Periodic Velocity Fluctuation of Upstream at Single Tube

Ji-Soo Ha

1Department of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University

**요약** 열교환기에서 유동 유발 진동은 배관의 파손을 유발할 수 있어서 열교환기의 구조 안정성을 위해 유동 유발 진동 특성을 규명할 필요가 있다. 본 연구는 단일 원관에서 입구의 유속이 일정한 경우와 주기적인 변동이 있는 경우에 대하여 시간에 따라 원관 주위에서 와류의 생성, 발달 및 분리 특성을 비교 분석하고 양력과 항력의 시간 변화 특성과 PSD 특성을 살펴본다. 단일 원관에서 전방류의 주기적인 속도 변동에 따른 유동 특성을 규명하였다. 일정 입구 유속의 경우는 잘 알려진 칼만 와류 분포를 보여 주었으며 원관의 상하에서 교대로 와류가 발생, 성장, 분리하는 것을 관찰할 수 있었다. 주기적인 입구 유속의 경우는 원관의 상하에서 동시에 와류가 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 일정 입구 유속의 경우는 양력의 PSD 크기가 항력에 비해 약 500배 컸으며 주파수는 31.15 Hz이며 항력은 2배인 62.3 Hz로 나타났다. 주기적인 입구 유속의 경우는 양력의 PSD가 항력보다 약 500배 컸으며 주파수는 입구 유속의 주파수와 동일하게 15.57 Hz이며 양력의 주파수는 일정 입구 유속과 같은 칼만 와류 주파수인 31.15 Hz로 나타났다.

**Abstract** The flow-induced vibration in a heat exchanger may cause the damage to piping. Therefore, it is necessary to establish the flow induced vibration characteristics for the structural stability of a heat exchanger. The purpose of this study was to compare the generation, development, and separation characteristics of a vortex around a circular tube with respect to time when the flow velocity of the inlet was fluctuating constantly and periodically. The time characteristics of lift and drag and the PSD characteristics were also investigated. In the case of a constant inlet flow velocity, the well-known Kalman vorticity distribution was shown. The vortex generation, growth, and separation were also observed alternately at the upper and lower sides of the tube. In the case of periodic inlet flow velocity, the vortex occurred simultaneously in the upper and lower sides of the tube. In the case of constant inlet flow velocity, the magnitude of the lift PSD was 500 times larger than that of drag. The frequency was 31.15 Hz and that of drag was doubled at 62.3 Hz. In case of a periodic inlet flow velocity, the PSD of the drag was approximately 500 times larger than that of lift. The frequency was 15.57 Hz, which was the same as the inlet-flow velocity frequency. In addition, the frequency of lift was 31.15 Hz, which was the same Karman vortex frequency.

**Keywords** : Flow Induced Vibration, Lift, Drag, Power Spectral Density, Periodic Inlet Velocity, Karman Vortex

### 1. 서론

열교환기는 고온의 유체와 저온의 유체 사이의 열전

달을 통해 고온의 유체를 냉각시키거나 저온의 유체의 온도를 상승시키는 역할을 한다. 이러한 열교환기는 석탄 화력발전소, 배열회수보일러 등의 발전설비와 냉장

\*Corresponding Author : Ji-Soo Ha(Keimyung Univ.)

Tel: +82-53-580-1556 email: jisooaha@kmu.ac.kr

Received February 8, 2019

Revised March 12, 2019

Accepted April 5, 2019

Published April 30, 2019

고, 에어컨 등의 냉동 공조 설비 등의 에너지 설비에 중요한 여러 기기에 사용되고 있다. 열교환기는 주로 원형의 관으로 된 전열관군으로 이루어져 있고 전열관군은 외부에 고온의 배기가스가 흐르게 된다. 유체가 전열관군을 지나면서 전열관군에서 시간변화에 따라 양력의 변동이 발생하는데 이에 따라 유동 유발 진동이 발생한다. 유동 유발 진동은 열교환기의 전열관군에서 파손을 야기할 수 있어서 열교환기의 구조적 안정성을 위해 열교환기의 전열관군에서 유동 유발 진동에 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. 최근에는 J.S. Ha[7,8]에 의해 양력 변동에 따른 전열관군에서 CFD 해석을 통한 PSD 특성에 관한 연구도 진행되었다.

지금까지의 연구에서는 단일 원관에서나 전열관군에서 양력의 PSD를 분석하여 유동 유발 진동 특성을 규명하였다. 본 연구에서는 지금까지의 연구들과서와 같이 단일 원관의 전방에서 일정한 속도로 유입되는 경우의 유동 특성과 유동 유발 진동 특성을 재현하고 이와 함께 원관의 전방에서 주기적인 속도 변동이 있는 경우에 일정한 입구 속도의 유동 특성과 비교 분석을 통해 입구 유동이 주기적인 속도 변동이 있을 때의 유동 특성과 유동 유발 진동 특성을 규명하는 것을 목적으로 수행하였다.

## 2. 수치해석 방법

단일 원관에서 주기적인 입구 속도 변동에 따른 유동 특성과 유동 유발 진동 특성을 전산유체 해석을 통해 살펴보기로 한다. Fig. 1에 본 연구에서 전산 유체 유동 해

석에 사용한 단일 원관 형상과 원관 부근의 격자 구성을 나타내었다.

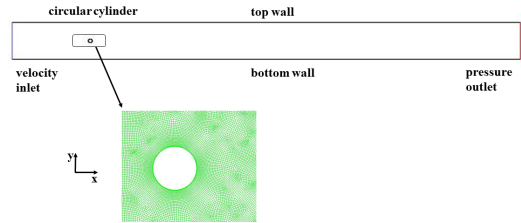


Fig. 1. Configuration of a circular cylinder tube mesh and its boundary types for CFD analysis.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 왼쪽은 입구 속도 경계이고 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 50.8 mm이다. 이 직경은 석탄 화력발전소의 절탄기에 사용하고 있는 원관의 직경이다. 입구에서 일정한 속도일 때의 속도는 7.63 m/s이고 주기적인 속도 변화가 있을 때의 속도 경계 조건은 아래 식과 같이 변하게 설정하였다.

$$V_{inlet} = V_o + 0.5 V_o \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

위 식에서  $V_o$ 는 일정한 입구 속도 값인 7.63 m/s이며  $f$ 는 일정한 입구 속도의 원관에서 유동 유발 진동에 따른 유체의 진동 주파수의 0.5배 값을 이용하였다. 본 연구의 원관에서 일정한 입구 속도의 원관에서 유체의 진동 주파수는 31.15 Hz이며 따라서 그 값의 1/2인 15.75 Hz를 이용하였다. 본 연구의 비정상상태 해석에서 시간 간격은 0.001 sec로 해석을 진행하였다.

상온의 공기가 50.8 mm의 원관을 7.63 m/s로 흐를 때 Re수는  $2.64 \times 10^4$ 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.

본 연구에서는 단일 원관에서 열전달 현상을 배제하고 비정상상태 유체유동에 대한 것에 국한하여 밀도 변화가 없으므로 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

운동량 방정식은 비정상 상태이므로 시간 변화를 포함하여 다음과 같다.

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

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

위 식에서  $x$ ,  $y$ 는 축방향 좌표와 수직방향 좌표이고  $u$ ,  $v$ 는 축방향 속도, 수직방향 속도이다. 그리고  $\rho$ 는 밀도,  $p$ 는 압력이다.

각 경우의 유동 특성 해석을 위해 사용한 프로그램은 SIMPLE 알고리즘[5]을 채택한 상용 열유체 전산해석 프로그램인 Fluent 프로그램을 이용하였고 유동장은 약 100만개의 격자로 구성하였다.

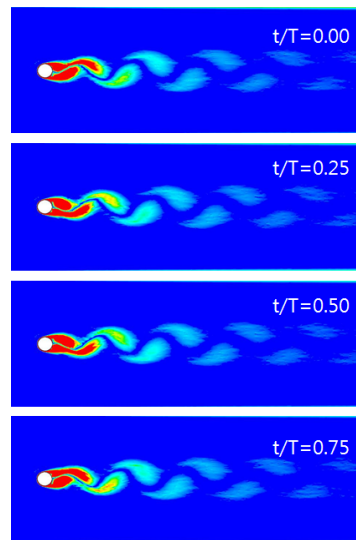
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 입구 유속 변화에 따른 원관 후류 유동 특성

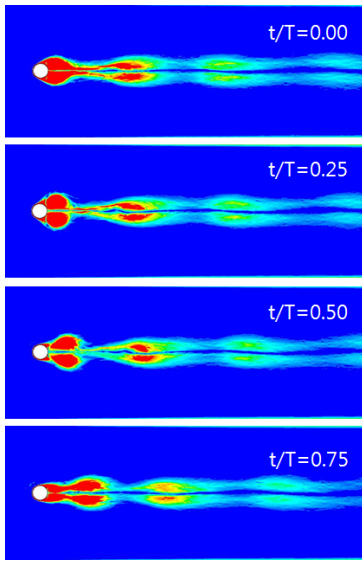
Fig. 2에 입구 유동이 일정 유속일 때와 주기적 변화가 있을 때의 한 주기 동안( $T$ : 주기)에 와류의 분포 변화를 나타내었다. Fig. 2(a)는 지금까지 많은 연구자들에 의해 연구가 되었던 일정한 입구 유속에서의 와류 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)의 첫 번째 그림에서 원관의 위쪽에서 와류가 발생하기 시작하고 아래쪽에서는 이미 발생한 와류가 원관에서 떨어져 나가고 있는 것을 관찰할 수 있다. 두 번째 그림에서는 첫 번째에서 발달해 가는 것을 알 수 있고 세 번째 그림에서는 아래에서 와류가 생성되어 발달해 가는 것을 관찰할 수 있다. 네 번째 그림은 두 번째 그림의 상하 대칭 형태를 관찰할 수 있다. 이러한 시간에 따른 와류 변화 유동 특성은 잘 알려진 칼만 와류(Karman vortex)이다. 이렇게 변하는 와류가 주기적으로 시간에 따라 변하는 것으로 유동 유발 진동이 발생하게 된다.

Fig. 2(b)에 입구 유속이 식 (1)과 같이 시간에 따라 변할 때의 한 주기 동안의 와류 분포 변화를 나타내었다. 입구 유속의 주기적 변화에서 주기적 변화의 속도 크기를 평균 속도인 7.63 m/s의 1/2로 설정하였고 일정 입구 유속에서의 칼만 와류 주파수는 31.15 Hz의 1/2인 15.75 Hz로 설정하였다. 변화 속도 크기를 여러 가지로 할 수 있고 변화 속도 주파수를 여러 가지로 할 수 있지만 본 연구에서는 각각 모두 일정 입구 유속에서 설정한 속도 크기의 1/2, 칼만 와류 주파수의 1/2로 설정하여 분석하였다. 향후의 연구에서 속도 크기와 주파수를 변화하여 특성을 분석할 예정이다.

Fig. 2(b)를 살펴보면 일정한 입구 유속의 경우에는 칼만 와류가 원관의 상하에서 교대로 와류가 발생하여 원관에서 떨어져 나가는 현상과 달리 와류가 원관의 상하에서 동시에 발생하여 후류로 떨어져 가는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 2(b)의 첫 번째 그림에서는 원관의 후류에서 와류가 발생하는 것을 볼 수 있고 두 번째 그림에서는 와류의 크기가 가장 크게 성장하였고 세 번째 그림에서는 성장된 와류가 원관에서 떨어져 가는 것을 관찰할 수 있다. 네 번째 그림은 와류가 완전히 떨어져 나가고 새로운 와류가 발생하는 것을 알 수 있다. 이것이 다시 첫 번째 그림으로 변화하고 이러한 것이 반복되게 된다. 입구 유속이 주기적인 변화가 있을 때는 상하 교대로 와류가 발생하는 것이 없어지고 상하 대칭의 와류가 발생하는 것이 가장 특징적인 현상으로 볼 수 있다.



(a) constant inlet velocity



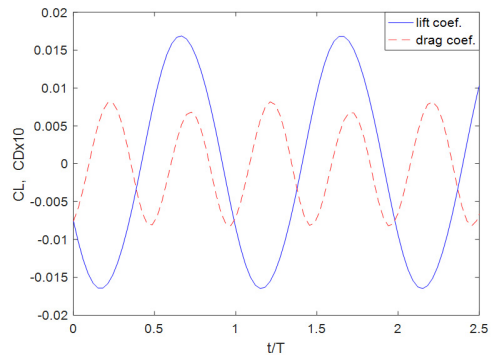
(b) periodic inlet velocity

Fig. 2. Vorticity contours at several time steps for (a) constant inlet velocity and (b) periodic inlet velocity.

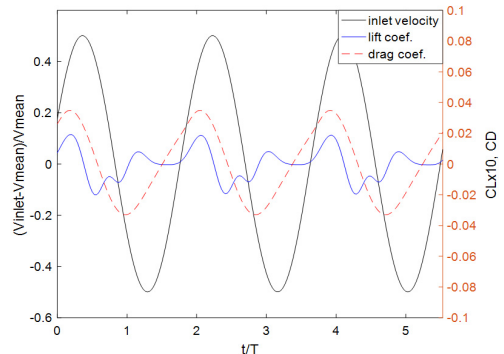
### 3.2 입구 유속 변화에 따른 양력과 항력의 PSD 특성

앞 절에서 입구 유속이 일정한 경우와 주기적으로 변하는 경우에 한 주기 동안의 와류 분포 변화를 살펴보면서 유동 특성을 관찰하였다. 이 절에서는 이런 두 가지 유동에 대하여 양력과 항력의 시간에 따른 변화와 PSD(power spectral density)특성을 살펴보고 이에 따른 유동 유발 진동 특성을 살펴보기로 한다. Fig. 3에 양력계수와 항력계수의 몇 개의 주기 동안의 시간에 따른 변화를 나타내었다. Fig. 3(a)에 일정 입구 유속의 경우의 양력계수와 항력계수 변화를 나타내었는데 양력계수의 진폭 크기가 항력계수의 진폭 크기보다 약 20배 크게 나타났다. 그리고 주파수는 항력이 양력보다 2배 크게 나타났다. 이러한 이유는 일정한 입구 유속의 경우는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 칼만 와류가 원관의 상하에서 교대로 발생하여 성장해 갔었다. 와류가 상하에서 교대로 발생할 때 이 와류에 따른 양력의 변화는 크게 나타나지만 항력의 변화는 크게 나타나지 않는 것으로 이해할 수 있다. 또한 와류가 상하 교대로 발생함에 따라 양력은 상하 교대로 한 번 끝날 때까지의 주기로 변하지만 항력은 상하 교대로 와류가 발생하여도 같은 방향의 힘이 작용하므로 상이나 하 위치의 와류가 발생하고 끝날 때가 한 주기로 되기 때문에 주파수는 2배로 나타나게 된다.

Fig. 3(b)에는 시간에 따른 변화를 입구 유속 변화, 양력계수 변화, 항력계수 변화를 함께 나타내었다. 입구 유속 변화는 세 주기 동안을 나타내었다. 진폭은 일정 입구 유속의 1/2 크기이다. 파란 실선은 양력계수를 나타내었는데 큰 주기는 입구 유속 변화와 같은 경향을 나타내고 있으며 한 주기 안에 더 큰 주파수의 변동이 있음을 관찰할 수 있다. 양력의 진폭을 살펴보면 항력 보다 1/20 배로 작게 나타났다. 이것은 일정 입구 유속일 때의 진폭의 경향과 반대로 나타났다. 이는 Fig. 2(b)에서 관찰할 수 있듯이 주기적인 입구 유속의 경우에는 와류가 상하 교대로 발생하여 발달해 가는 것이 아니라 상하 동시에 발생하여 발달하기 때문에 양력계수의 진폭은 작게 나타는 것으로 이해할 수 있다. 주파수 특성은 Fig. 4의 PSD 특성에서 고찰하기로 한다. 항력의 진폭은 일정 입구 유속의 진폭 보다 약 40배 크게 나타났다. 이는 항력 방향으로 속도의 변동이 크게 일어나기 때문에 이것의 영향을 크게 받는 것으로 이해할 수 있다. 주파수는 입구 유속의 변화와 거의 유사하게 나타나고 있다.



(a) constant inlet velocity



(b) Periodic inlet velocity

Fig. 3. Time history of inlet velocity, lift and drag coefficient fluctuations for (a) constant inlet velocity and (b) periodic inlet velocity.

주기적인 입구 유속의 변화에 따른 원관에서 유동 유발 진동 특성을 분석하기 위해 양력과 항력의 무차원 PSD를 도출하여 분석하기로 한다. 양력의 무차원 PSD는 다음과 같이 정의되며 항력의 무차원 PSD는 아래의 식에서 양력 대신 항력으로 대체하면 된다.

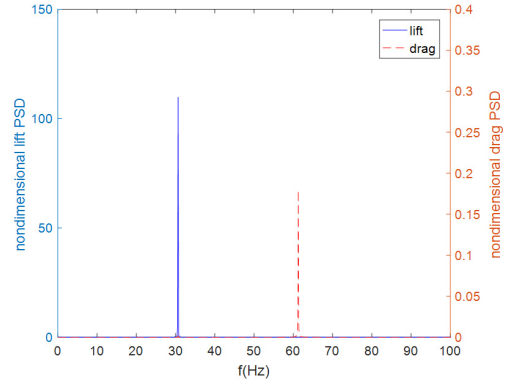
$$\Phi = \frac{S_F}{\left(\frac{1}{2}\rho V^2 D\right) \frac{D}{V}} \quad (5)$$

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

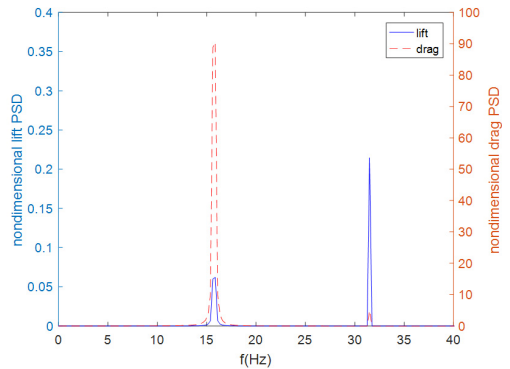
- $\Phi$  : Nondimensional lift power spectral density function
- $S_F$ : PSD of lift fluctuation
- $\rho$  : fluid density
- $V$ : Mean cross flow velocity
- $L_F$ : Lift
- $L'_F$ : Lift fluctuation,  $L_F - L_{Fmean}$
- $f$  : frequency
- $n$  : No. of lift data
- $\Delta t$ : sampling time

Fig. 4에 양력과 항력의 무차원 PSD 특성을 나타내었다. Fig. 4(a)는 일정 입구 속도의 경우인데 양력의 무차원 PSD를 보면 31.15 Hz에서 가장 큰 값을 가지며 다른 곳은 거의 0에 가까운 값이다. 이 주파수로 칼만 와류가 상하로 교대로 발생하는 것을 알 수 있다. 항력의 무차원 PSD는 양력의 2배인 주파수 62.30 Hz에서 가장 큰 값이다. 그리고 그 값의 크기는 양력의 것 보다 약 1/500배로 작은 값이다. 이러한 결과는 이미 Fig. 3(a)를 분석하면서 예측하였던 결과이다.

Fig. 4(b)에는 주기적인 입구 속도 변화의 경우의 무차원 PSD 결과이다. 양력의 PSD를 살펴보면 주기적인 속도 변동 주파수보다 일정 입구 속도에서의 칼만 와류에 의한 주파수인 31.15 Hz에서 상대적으로 큰 값의 무차원 PSD 값이 나타났으며 이는 양력의 경우는 원관 고유의 칼만 와류가 상대적으로 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러나 그 크기는 항력에 비해 약 1/500배의 값으로 작은 값이다. 항력의 경우는 주기적인 입구 속도 주파수(15.57 Hz)에 크게 영향을 받고 PSD의 크기도 일정 입구 속도일 때 보다 500배 큰 값을 알 수 있다.



(a) constant inlet velocity



(b) periodic inlet velocity

Fig. 4. Nondimensional PSD of lift and drag for (a) constant inlet velocity and (b) periodic inlet velocity.

## 4. 결론

열교환기 단일 원관에서 일정 입구 유속의 경우와 주기적인 속도 변동이 있는 경우에 대하여 시간에 따른 와류 분포 특성과 양력과 항력의 PSD 특성을 살펴보았으며 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 일정 입구 유속의 경우에 한 주기 동안의 시간 변화에 따른 와류 분포 변화는 잘 알려진 칼만 와류 분포 변화로 재현되었으며 원관의 상하에서 교대로 와류가 생성되어 떨어져 나가는 것을 관찰할 수 있었다. 주기적인 입구 유속 변동의 경우에는 원관의 상하에서 동시에 와류가 생성, 발달되어 떨어져 나가는 것을 관찰할 수 있었다.
- (2) 시간에 따른 양력과 항력의 변화와 PSD 특성을 살펴보았으며 일정 입구 유속의 경우는 양력의

PSD 최대값이 항력의 최대값보다 약 500배 크게 나타났으며 양력의 주파수는 31.15 Hz이고 항력은 2배인 62.3 Hz로 나타났다. 주기적인 입구 유속의 경우는 양력의 PSD 최대값이 항력의 최대값보다 약 1/500배 작게 나타났으며 양력의 주파수는 일정 입구 유속과 같은 31.15 Hz가 주된 주파수이며 항력의 경우는 주기적인 입구 유속의 주파수인 15.57 Hz에 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다.

## References

- [1] R.D. Blevins, et al., "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, et al., "Experimental determination of single and two-phase cross flow induced forces on tube rows", *Flow Induced Vibration*, PVP Vol. 104, pp. 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, et al., "Random excitation of heat exchanger tubes by cross-flows", *Int. ASME Winter Symposium on Low-Induced Vibrations and Noise*, CEA-CONF-9744, 1984.
- [5] S.V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", pp. 126-131, 1980.
- [6] K.B. Lee, et al., "A study on flow-induced vibration of tube array in uniform cross flow ( I )", *Transactions of the KSME B*, Vol. 117, No. 5, pp 924-932, 1982.
- [7] J.S. Ha, B.Y. Lee, "A study on the characteristics of lift fluctuation power spectral density in a heat exchanger tube array", *J. of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 16, No. 10, pp 6641-6646, 2015.
- [8] J.S. Ha, et al., "A study on the flow induced vibration on a heat exchanger circular cylinder", *J. of Energy Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 109-114, 2015.

하 지 수(Ji-Soo Ha)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한국과학기술원 (공학박사)
- 1991년 3월 ~ 2007년 2월 : 현대중공업(주) 산업기술연구소 수석연구원
- 2007년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 기계자동차공학과 교수

<관심분야>

연소공학, 열유체전산해석