

## 전열관군에서 양력 변동의 PSD 특성 연구

하지수<sup>\*</sup>, 이부윤<sup>1</sup>

<sup>1</sup>계명대학교 기계자동차공학과

### A Study on the Characteristics of Lift Fluctuation Power Spectral Density in a Heat Exchanger Tube Array

Ji-Soo Ha<sup>\*</sup>, Boo-Youn Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University

**요약** 배열회수 보일러의 전열관군은 외부에 가스터빈에서 나온 고온의 배기가스가 흐르게 된다. 이러한 유체의 흐름으로 인해 전열관군에서 시간변화에 따라 양력의 변동이 발생하는데 이에 따라 유동 유발 진동이 발생한다. 이러한 진동이 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,  $fU/U$ 의 함수로 실험적 결과들이 도출되어 있다. 본 연구는 열교환기 전열관군에서 유동 유발 진동에 관한 기존의 실험적 연구들의 결과를 전산유체해석을 통해 검증하고 배열회수 보일러의 전열관군의 유동 유발 진동 특성에 적용하기 위한 기반을 마련하는 것을 목적으로 한다. 이러한 것을 위해 기존 연구에서 실험에 사용한 전열관군에서 비정상 상태 유동해석을 수행하여 전열관군에서의 양력 변화 특성을 살펴보았다. 또한 전열관군에서 양력 변동 특성으로부터 유동 유발 진동에 따른 PSD 특성 결과를 도출하여 기존의 연구들과 비교를 통해 전열관군에서의 PSD 특성을 정립하였다.

**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 to establish the characteristics of flow induced vibration in the tube array for the structural safe operation of the heat exchanger. Several researches for the flow induced vibration of typical heat exchangers had 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 circular cylinder tube array and calculated with the unsteady laminar flow for the tube array. The characteristics of lift fluctuation over the cylinder tube array was investigated. The derived nondimensional PSD was compared with the results of the previous experimental researches and the characteristics of lift PSD for circular cylinder tube array was established from the present CFD study.

**Keywords** : heat exchanger, circular cylinder, flow induced vibration, power spectral density, strouhal number, unsteady laminar flow, FFT

### 1. 서론

복합화력 발전에서 배열을 회수하여 전기를 생산하는

배열회수 보일러는 확대 덕트를 지나 수많은 전열관군으로 구성된 열교환기에서 배열을 회수하여 전열관군 내의 보일러수를 증기로 변환하여 스팀터빈을 구동한다. 배열

<sup>\*</sup>Corresponding Author : Ji-Soo Ha(Keimyung Univ.)

Tel: +82-10-9512-1556 email: jisooaha@kmu.ac.kr

Received July 13, 2015

Revised September 24, 2015

Accepted October 8, 2015

Published October 31, 2015

회수 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.

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 Blevins[1]가 실험 연구에서 사용한 전열관군 형상에서 비정상 상태 유동해석을 수행하여 원관에서의 양력 변동 특성을 살펴보기로 한다. 또한 원관에서 양력 변동 특성으로부터 유동 유발 진동에 따른 PSD 특성 결과를 도출하여 기존의 연구들과 비교를 통해 전열관군에서의 양력 변동에 대한 PSD 특성을 정립하기로 한다.

## 2. 수치해석 방법

배열회수 보일러의 전열관군에서 발생하는 유체유발 진동을 규명하기 위해 전열관군에서 양력 변동 특성을 전산유체 해석을 통해 살펴보고 기존의 실험 연구들의 결과와 비교 검증하여 전열관군에서 PSD 특성을 정립하는 것이 본 연구의 목적이라고 서론에서 언급하였다. Fig. 1에 본 연구에서 전산 유체 유동 해석에 사용한 전열관군 형상과 격자 구성을 나타내었다.

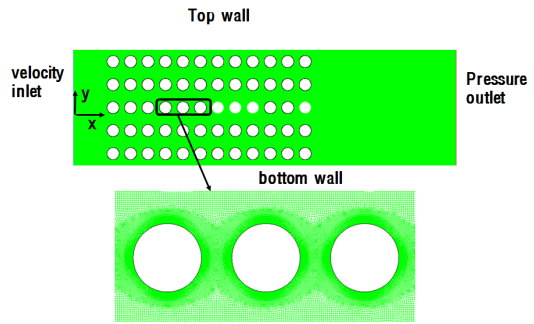


Fig. 1. Configuration of a circular cylinder tube array mesh and its boundary types for CFD analysis.

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  $2.5 \times 10^4$ 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.

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

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[5]을 채택한 상용 열유체 전산해석 프로그램인 Fluent 프로그램을 이용하였고 유동장은 약 40만개의 격자로 구성하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 전열관군에서 층류 비정상 유동장 특성

서론에서 언급한 바대로 전열관군에서 층류 비정상 상태 유동은 많은 연구가 이루어져 있다. 층류일 경우 단일 원관의 후류에는 잘 알려진 Karmann 와류가 주기적으로 흐르게 되는데 본 연구에서는 전열관군이므로 원관 사이에서 단일 원관에서 볼 수 있는 Karmann 와류는 관찰되지 않는다. Fig. 2에 유동장에서 시간 변화에 따른 속도 분포를 나타내었다. Fig. 3에서 원관 표면에서 시간에 따른 양력 변화를 분석할 예정인데 이의 결과를 보면 유체 유발 진동 주파수는 약 39Hz이며 이로서 주기는 약 0.0256sec이다. 한 주기 동안의 속도 분포 변화를 4단계로 나누어 Fig. 2에 나타내었다.

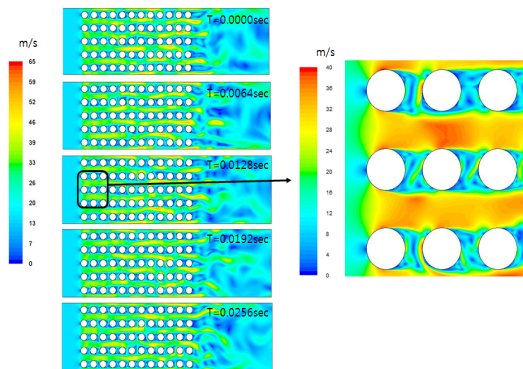


Fig. 2. Velocity magnitude contour at several time steps.

속도 분포에서 보여주는 결과는 전열관군이 유동 통로를 만들어 그 사이로 유동이 흐른 형태로 됨을 관찰할 수 있다. 원관과 원관 사이에는 유동의 박리 영역을 관찰할 수 있고 이 영역에서는 낮은 속도 분포를 보여 주고 있다.

본 연구의 비정상 상태 유동해석에서 시간 간격은 0.0001sec로 하였고 약 0.7sec까지 해석하였다. 몇 가지 위치의 원관 표면에서 양력 변동 성분의 시간의 따른 변

화를 Fig. 3에 나타내었다. 양력변동 성분의 분간을 위해 두 개의 그래프로 나타내었는데 첫 번째 그래프에는 3번째 행의 전열관군 중에 1, 2 번째 열의 원관, 그리고 두 번째 그래프에는 6, 12번째 열의 원관 표면에서 양력 변동을 나타내었다. Fig. 3에 나타낸 것과 같이 양력 변동 성분의 시간에 따른 변화는 거의 사인이나 코사인 곡선과 같은 형태를 보여주고 있다.

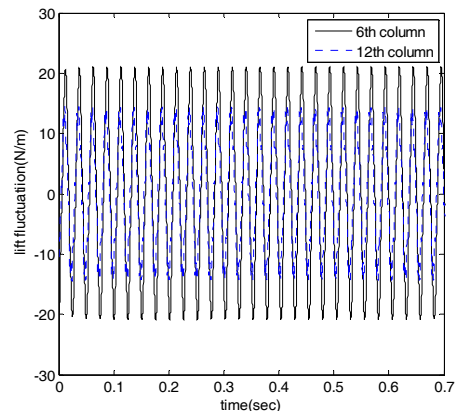
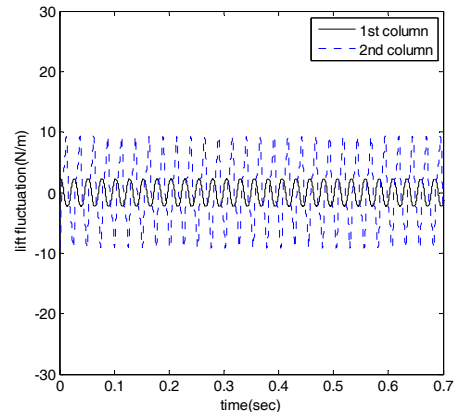


Fig. 3. Time history of lift fluctuation at several circular cylinder column locations.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 1 번째 열의 원관에서 양력 변동 진폭은 2 번째 열의 양력 변동 진폭 보다 작고 6 번째 진폭이 12번째 원관의 양력 변동 진폭 보다 크다. 주기는 네 경우 모두 거의 비슷한 것을 관찰할 수 있다. 12개 열 각각의 양력 변동의 진폭 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

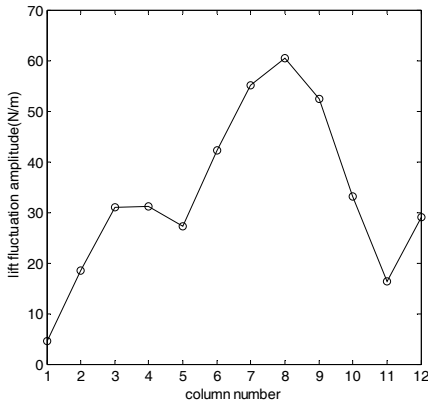


Fig. 4. Lift fluctuation amplitudes along circular cylinder column number.

Fig. 4를 보면 양력 변동의 진폭은 전열관군의 앞부분에서는 작고 뒤로 갈수록 증가하다가 8번 열에서 가장 최대로 나타나고 그 이후에는 감소하는 경향을 보여 주고 있다. 이는 전열관군의 앞부분에서는 최대속도가 전열관군의 전단에서 흘러 들어오는 평균속도와 유사하게 유지 되다가 전열관군 내로 들어오면 전열관군이 유동 채널 역할을 하여 평균속도는 변하지 않지만 최대속도가 증가하여 양력 변동 진폭이 이에 따라 증가하는 것으로 유추된다. 8번 열의 후류에는 다시 전열관군에서 벗어나는 영역이 12번 이후에 인접해 있어서 이의 영향을 받는 것으로 판단된다.

### 3.2 전열관군 유동 유발 진동 특성

앞 절에서 살펴본 바, 전열관군에서 양력의 시간에 따른 변동은 전열관군 열의 위치에 따라 진폭은 달라지지만 주파수는 거의 비슷한 것을 관찰할 수 있었다. 몇 개의 전열관군 열의 위치에 대한 주파수 분석은 양력 변동에 대한 FFT(Fast Fourier Transform)으로 분석하는데 이에 대한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5를 살펴보면 전열관군 열의 위치에 관계없이 주된 주파수는 약 39Hz임을 알 수 있다. 난류 유동이면 주된 주파수 외에 여러 주파수의 와동(eddy)에 의해 FFT의 분포가 Fig. 5와 같이 나타나지 않고 주된 주파수와 함께 여러 주파수로 분포될 것으로 판단된다.

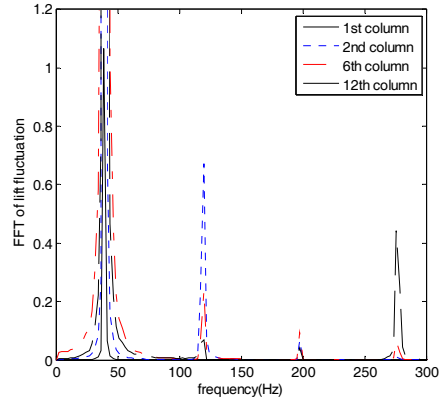


Fig. 5. Fast Fourier Transform of lift fluctuations at several circular cylinder column locations.

전열관군에서 유동 유발 진동은 서론에서 살펴보았듯이 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.

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

$\Phi$  : 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. 3의 양력 변동 데이터를 이용하여 구한 결과와 기존의 실험 연구 결과들과 비교한 것을 Fig. 6에 나타내었다.

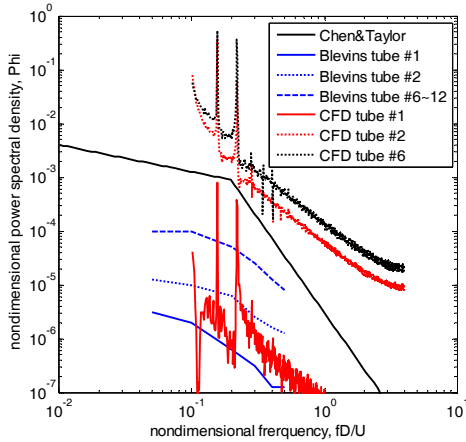


Fig. 6. Comparison of nondimensional PSD with the present CFD result and Chen&Taylor, Blevins's experimental result.

Fig. 6에는 Chen<sup>(3)</sup>과 Taylor<sup>(2)</sup>의 실험 결과를 정리하여 Axisa<sup>(4)</sup>가 도출한 실험식인 아래 식 (6)을 이용하였으며 그래프에서는 Chen & Taylor의 결과로 표시되어 있다.

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

(6)

그리고 Blevins<sup>(1)</sup>가 실험에서 사용한 12개 열 원관 중에서 1번, 2번, 6~12번 열의 양력 변동 PSD도 함께 나타내었다. Fig. 6에서 CFD tube #1, 2, 6이 본 연구에서 CFD 해석을 통해 도출한 결과이다. Fig. 6을 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 결과를 보면 1번째 열의 PSD 결과는 Blevins[1]의 1번 열의 결과와 유사하게 나타남을 알 수 있고 2번째 열의 결과는 본 연구의 결과와 Blevins[1]의 결과가 차이를 보여주고 있다. 본 연구의 결과를 보면 2번 열 이후부터는 Axisa[4]가 정리한 Chen[3]과 Taylor[2]의 실험 결과와 유사하게 나타남을 알 수 있다. 이는 2번째 이후부터는 단관을 이용한 실험 결과와 유사하게 나타난다는 것을 보여주고 있다. 이로부터 전열관군에서 유동 유발 진동에 관한 기존 실험 연

구들은 대부분 층류 유동 영역에서 실험이 이루어졌으며 전열관군에서 실험한 결과와 본 연구에서의 CFD 해석 결과는 무차원 PSD 결과가 잘 일치하게 도출 되는 것을 알 수 있다.

## 4. 결론

지금까지 전열관군에서 유동 유발 진동에 대하여 기존의 실험 연구들과 본 연구에의 전열관군에서 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) 전열관군에서 층류 비정상 유동장 특성

본 연구에서의 전열관군 형상과 유동 속도 조건은 기존 실험 연구인 Blevins[1]가 사용한 원관 직경 및 배열과 유동 속도를 사용하였으며 비정상 상태 해석 결과 양력 변동의 시간에 따른 변화는 전열관군 열 위치에 따라 진폭은 전열관군 가운데에서 가장 크게 나타나면서 전방과 후류에서 변화가 있지만 삼각함수 형태의 변화는 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있었다.

### 2) 전열관군 유동 유발 진동 특성

본 연구의 유동 해석을 통한 양력 변동의 FFT 결과로부터 전열관군 열 위치에 관계 없이 주된 주파수는 약 39Hz이며 주기는 0.0256sec임을 알 수 있었다. 전열관군에서 유동 유발 진동 특성은 기존의 실험 연구들에서 무차원 PSD 특성 곡선을 도출하였다. 본 연구에서는 전열관군에서 CFD 해석을 통해 무차원 PSD를 도출하였으며 기존의 실험 연구들과 비교한 결과 전열관군 1번째에서는 Blevins[1]의 실험 결과와 잘 일치하고 그 이후에는 Axisa[4]가 정리한 실험식에 잘 일치한 결과가 도출되었음을 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. 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*, 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.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3242682>
- [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.

---

#### 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

---

#### 이 부 윤(Boo-Youn Lee)

[정회원]



- 1984년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과(공학석사)
- 1991년 8월 : 한국과학기술원 기계공학과(공학박사)
- 1984년 3월 ~ 1998년 2월 : 두산중공업 기술연구원 팀장
- 1998년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 기계자동차공학과 교수

<관심분야>

최적설계, 구조설계, 전산응력해석 등