

# 전열 관군에서 전방류의 주기적인 속도 변동에 따른 유동 특성에 관한 연구

하지수  
계명대학교 기계자동차공학과

## A Study on the Flow Characteristics in Tube Banks due to the Upstream Periodic Velocity Fluctuation

Ji-Soo Ha  
Department of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University

**요약** 전열관군으로 이루어진 열교환기에서 유동에 따른 진동은 전열 관군 배관의 파손을 유발할 수 있어서 열교환기에서 유동 유발 진동 특성을 규명할 필요가 있다. 본 연구는 전열 관군의 원관에서 입구의 유속이 일정한 경우와 주기적인 변동이 있는 경우에 대하여 시간에 따라 전열 관군 원관 1, 10 그리고 마지막 19번 원관에서 와류의 시간 변동 특성을 살펴보고 양력의 시간 변화 특성과 PSD 특성을 분석하여 전열 관군 원관에서 전방류의 주기적인 속도 변동에 따른 유동 특성을 규명하였다. 일정 입구 유속의 경우는 칼만 와류가 후류에 있는 원관의 유동에 영향을 미치고 있고 후류의 전열관군과 전방의 전열관군에서의 와류는 다소 시간적인 차이를 보여주지만 같은 주기의 칼만 와류를 발생하고 있음을 관찰할 수 있었다. 주기적인 입구 유속의 경우는 전열 관군에서 와류가 강한 유동이 흐르다가 유속이 줄어들 때는 와류가 약한 유동이 흐르는 것이 반복됨을 알 수 있다. 일정 입구 유속의 경우는 양력의 PSD로 살펴본 결과 주파수는 37.25Hz이며 19번 원관의 경우는 18.63Hz와 50Hz 근방에서 주파수가 관찰 되었다. 주기적인 입구 유속의 경우는 37.25Hz와 속도 주기인 18.63Hz에서 주된 주파수 특성을 보여주었다. 마지막 원관인 19번 원관은 20Hz에서 50Hz 사이에서 많은 피크 주파수를 관찰할 수 있었다.

**Abstract** Flow induced vibration in a heat exchanger may cause damage to piping. The purpose of this study was to compare the characteristics of vortex shedding behavior through the circular tube banks at several tube locations, No.1, No. 10, and No. 19, with respect to time when the flow velocity of the inlet is constantly and periodically fluctuating.(60) The time characteristics of lift and the PSD characteristics were also investigated. In the case of periodic inlet flow velocity, strong vortex occurred at some time and after that time, a weak vortex was generated through the tube banks simultaneously. In the case of constant inlet flow velocity, the lift fluctuating frequency was 37.25Hz and that at the No. 19 tube was 18.63Hz and near 50Hz. In the case of periodic inlet flow velocity, the lift fluctuating frequency was 37.25Hz and 18.63Hz. The lift fluctuating frequency at No. 19 tube was observed broadly from 20Hz and 50Hz.

**Keywords** : Flow induced vibration, Lift, Tube bank, Power spectral density, Periodic inlet velocity, Karman vortex

---

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

email: jisooaha@kmu.ac.kr

Received December 10, 2019

Accepted April 3, 2020

Revised January 23, 2020

Published April 30, 2020

## 1. 서론

열교환기는 고온의 유체와 저온의 유체 사이의 열전달을 통해 고온의 유체를 냉각시키거나 저온의 유체의 온도를 상승시키는 역할을 한다. 이러한 열교환기는 석탄 화력발전소, 배열회수보일러 등의 발전설비와 냉장고, 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 Axial[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. 전열관군 전방에서 덕트 내의 형상에 따라 유동 박리 등의 원인으로 와류가 발생하여 주기적인 유동이 발생할 수 있는 경우를 가정하여 본 연구에서는 지금까지의 연구들에서와 같이 전열 관군 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

전열 관군 원관에서 주기적인 입구 속도 변동에 따른 유동 특성과 유동 유발 진동 특성을 전산유체 해석을 통해 살펴보기로 한다. Fig. 1에 본 연구에서 전산 유체 유동 해석에 사용한 전열관군 원관 형상과 원관 부근의 격자 구성을 나타내었다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 왼쪽은 입구 속도 경계이고 오른쪽은 출구로 설정하였다. 그리고 상하는 모두 벽면으로 간주하였다. 전열 관군 원관은 5행 19열의 전열 관군으로 구성되어 있다. 전열 관군 원관 주위의 유동을 자세히 계산하기 위해 Fig. 1에서 보는 바와 같이 전열 관군 원관 주위에는 상대적으로 많은 격자를 생성하였다. 전열 관군 원관 주위를 흐르는 유체는 상온의 공기를 이용하였으며 원관의 직경은 50.8mm이다. 이 직경은 석탄 화력발전소의 절탄기에 사용하고 있는 원관의 직경이다. 입구에서 일정한 속도일 때의 속도는 7.63m/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 37.25 Hz이며 따라서 그 값의 1/2인 18.63Hz를 이용하였다. 본 연구의 비정상상태 해석에서 시간 간격은 0.001sec로 해석을 진행하였다.

상온의 공기가 50.8mm의 원관을 7.63m/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 전열 관군 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, y는 축방향 좌표와 수직방향 좌표이고 u, v는 축방향 속도, 수직방향 속도이다. 그리고 ρ는 밀도, p는 압력이다.

각 경우의 유동 특성 해석을 위해 사용한 프로그램은 SIMPLE 알고리즘[5]을 채택한 상용 열유체 전산해석 프로그램인 Fluent ver. 17 프로그램을 이용하였고 유동장은 약 300만개의 격자로 구성하였다.

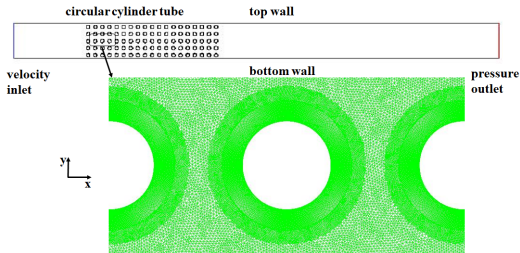


Fig. 1. Configuration of circular cylinder tube bank mesh and its boundary types for CFD analysis.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 입구 유속 변화에 따른 전열관군 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 일정한 입구 유속에서의 와류 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)을 살펴보면 5행 19열의 모든 전열관군 원관 주위에서 발생한 칼만 와류가 후류에 있는 원관의 유동에 영향을 미치고 있고 후류의 전열관군과 전방의 전열관군에서의 와류는 다소 시간적인 차이를 보여주지만 같은 주기의 칼만 와류를 발생하고 있음을 관찰할 있다.

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 7.63m/s의 1/2로 설정하였고 일정 입구 유속에서의 칼만 와류 주파수는 37.25Hz의 1/2인 18.63Hz로 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.

Fig. 2(b)를 살펴보면 일정한 입구 유속의 경우에는 칼만 와류가 전열관군 전체에서 위치에 따라 다소 시간적인 차이가 있지만 거의 일정한 주기로 칼만 와류가 발생하였지만 입구 유속이 시간에 따라 변하는 경우는 Fig. 2(b)에서와 같이 와류가 강한 유동이 흐르다가 유속이 줄어들 때는 와류가 약한 유동이 흐르는 것이 반복됨을 알 수 있다.

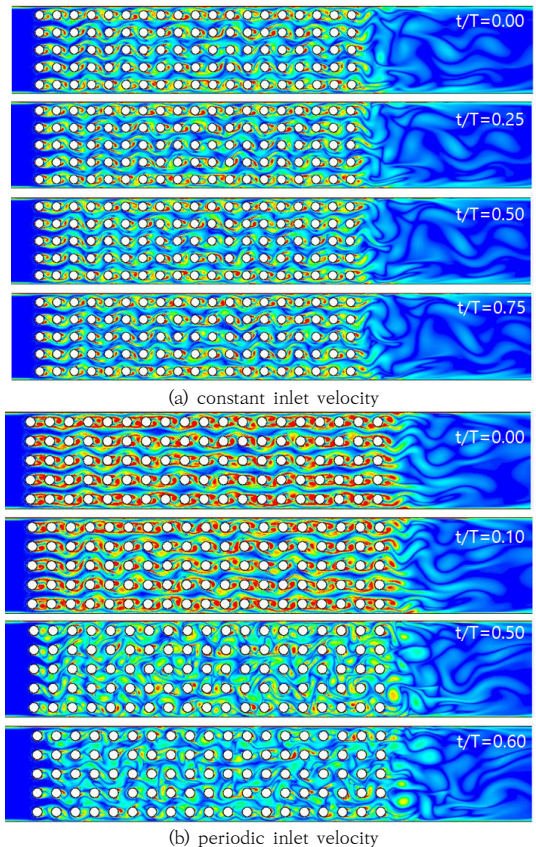


Fig. 2. Vorticity contours at several time steps for (a) constant inlet velocity and (b) periodic inlet velocity.

### 3.2 입구 유속 변화에 따른 양력의 PSD 특성

이 절에서는 입구 유속이 일정한 경우와 주기적으로 변하는 유동에 대하여 양력의 시간에 따른 변화와 PSD(power spectral density)특성을 살펴보고 이에 따른 유동 유발 진동 특성을 살펴보기로 한다. Fig. 3에 가운데 행의 전열관군 원관에서 1번, 10번, 19번 열의 원관에서 양력계수에 대하여 몇 개의 주기 동안의 시간에 따른 변화를 나타내었다. Fig. 3(a)에 일정 입구 유속의 경우의 양력계수 변화를 나타내었는데 1번 열의 양력계수 진폭보다 10번과 19번의 양력계수 진폭이 상대적으로 크게 나타났다. 특히 전열관군의 가운데 열인 10번 열에서 가장 진폭이 크게 나타났다. 1번, 10번 그리고 19번의 양력계수 변화를 보면 앞 절에서 예상한 바와 같이 관군의 열에 따른 위상차가 있음을 관찰할 수 있다. 그러나 전열관군의 원관 위치에 관계없이 주기 또는 주파수는 거의 동일함을 알 수 있다.

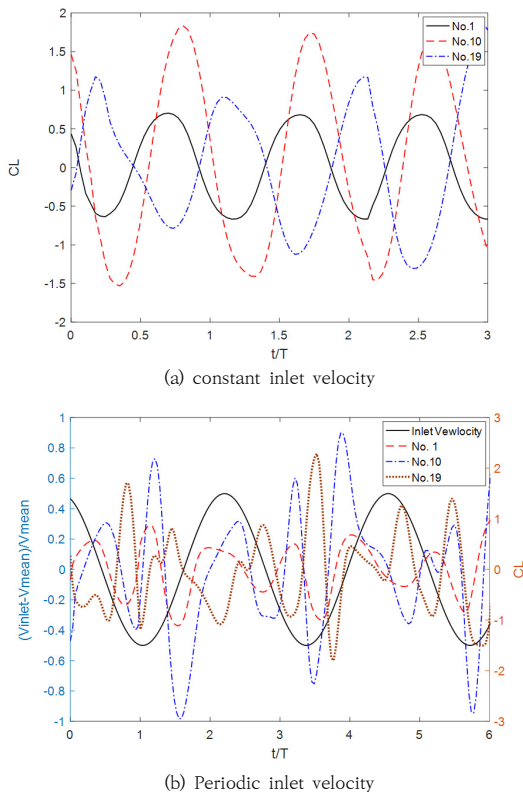


Fig. 3. Time history of inlet velocity, lift coefficient fluctuations for (a) constant inlet velocity and (b) periodic inlet velocity.

Fig. 3(b)에는 시간에 따른 변화를 입구 유속 변화, 양력계수 변화를 함께 나타내었다. 여러 가지 복잡한 그래프로 되어 있지만 우선 기준 그래프는 입구 속도에 대한 시간 변화 그래프이다. 이 그래프의 주파수는 18.63Hz이며 이는 입구 유속이 일정한 경우의 갈만 와류 주파수의 1/2값이다. 1번 원관의 양력계수 변화를 보면 짧은 주기의 유동과 긴 주기의 유동이 공존하고 있음을 알 수 있다. 10번 위치의 원관의 양력계수를 보면 1번이나 19번 보다는 다소 규칙적인 주기의 유동임을 알 수 있다. 1번, 10번, 19번의 양력계수 특징을 보면 앞 절 Fig. 2(b)에서 살펴 본 것과 같이 짧은 주기의 유동과 긴 주기의 유동이 공존함을 관찰할 수 있다.

주기적인 입구 유속의 변화에 따른 전열관군 원관에서 유동 유발 진동 특성을 분석하기 위해 양력의 무차원 PSD를 도출하여 분석하기로 한다. 양력의 무차원 PSD는 다음과 같이 정의할 수 있다.

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

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

$\Phi$  : 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 양력의 무차원 PSD 특성을 나타내었다. 양력계수를 살펴 볼 때와 같이 가운데 행에서 1번, 10번 19번 열의 원관에 대하여 살펴보았다. Fig. 4(a)는 일정 입구 속도의 경우인데 검은 선으로 나타낸 1번 원관에서 양력의 무차원 PSD를 보면 37.25Hz에서 가장 큰 값을 가지며 다른 곳은 거의 0에 가까운 값이다. 10번 원관의 경우 양력의 무차원 PSD를 살펴보면 1번의 주파수 특성과 거의 동일한 경향을 보여 주고 있다. 19번 원관의 PSD 특성을 살펴보면 37.25의 1/2인 18.63Hz에서 약하게 피크가 나타나며 37.25Hz와 그 보다 큰 50Hz 부근에서도 큰 값의 피크가 나타난다. 이는 전열관군의 영향으로 복잡한 유동 유발 진동에 의한 결과로 보인다.

Fig. 4(b)에는 주기적인 입구 속도 변화의 경우의 양

력의 무차원 PSD 결과이다. 1번 원관의 경우에는 속도 변동 주파수인 18.63Hz와 37.25Hz에서 피크를 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 10번 원관의 경우에는 1번 원관과 유사하게 18.63Hz와 37.25Hz에서 큰 피크를 관찰할 수 있지만 다른 위치에서도 약한 피크를 관찰 할 수 있다. 19번 원관의 경우에는 20Hz~50Hz 사이에서 많은 피크 주파수를 관찰할 수 있다. 이로 부터 19번 원관의 경우에는 앞에 있는 원관에서 발달한 여러 가지 위상차를 가지는 다양한 칼만 와류들의 영향을 받아서 나타나는 현상으로 이해할 수 있다.

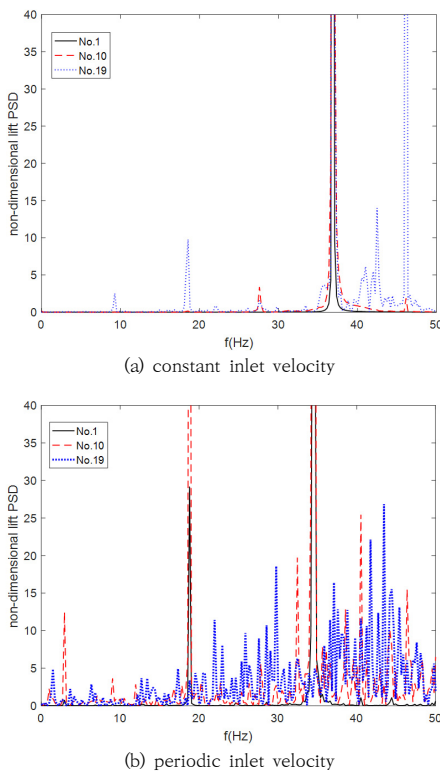


Fig. 4. Nondimensional PSD of lift for (a) constant inlet velocity and (b) periodic inlet velocity.

#### 4. 결론

열교환기 전열관 원관에서 일정 입구 유속의 경우와 주기적인 속도 변동이 있는 경우에 대하여 중심에서 1번, 10번, 19번 원관에서 시간에 따른 와류 분포 특성과 양력의 PSD 특성을 살펴보았으며 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 일정 입구 유속의 경우에 칼만 와류가 후류에 있는 원관의 유동에 영향을 미치고 있고 후류의 전열 관군과 전방의 전열 관군에서의 와류는 다소 시간적인 차이를 보여주지만 같은 주기의 칼만 와류를 발생하고 있음을 관찰할 수 있었다. 주기적인 입구 유속 변동의 경우에는 와류가 강한 유동이 흐르다가 유속이 줄어들 때는 와류가 약한 유동이 흐르는 것이 반복됨을 알 수 있었다.
- (2) 시간에 따른 양력의 변화와 PSD 특성을 살펴보았으며 일정 입구 유속의 경우는 양력의 주된 주파수는 37.25 Hz로 나타났으며 19번 원관은 18.63Hz와 50Hz 부근에서도 주파수 특성이 나타났다. 주기적인 입구 유속의 경우는 37.25Hz와 속도 주기인 18.6Hz에서 주된 주파수 특성을 보여주었다. 마지막 원관인 19번 원관은 20Hz에서 50Hz 사이에서 많은 피크 주파수를 관찰할 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. DOI : <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.10.6641>
- [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. DOI: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2015.24.3.109>

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