

## 기-고 유동층에서 Gaussian 분포 입자군의 표준편차에 따른 유출 특성

장현태<sup>1</sup>, 차왕석<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한서대학교 화학공학과, <sup>2</sup>군산대학교 토목·환경공학부

### The Characteristics of Elutriation with Gaussian Particle Size Distributions in a gas-solid fluidized bed

Hyun Tae Jang<sup>1</sup> and Wang Seog Cha<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Hanseo University

<sup>2</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Kunsan Nat'l University

**요약** 기-고 유동층에서 다입자경 입자의 입자분포 변화에 따른 비산유출 특성을 연구하였다. 다입자경 입자분포는 Gaussian 분포를 사용하여 실험을 수행하였다. 최소유동화속도에 대한 유속비와 Gaussian 입자분포의 표준편차에 따른 비산유출상수를 구하였으며, 이때 조업시간에 따른 압력요동의 특성치를 구하였다. 측정된 유동층의 압력요동 특성치로부터 압력요동의 표준편차, 평균압력, Power spectrum density function, 주진동수 등을 계산하였다.

입자분포군에 따라서 유출입자의 입자분포 및 압력요동 특성치는 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며 이러한 결과로부터 압력요동 특성치로부터 유출특성의 해석이 가능함을 알 수 있었다.

**Abstract** The elutriation characteristics of particle size distribution were investigated in a gas-solid fluidized bed. Experiments were carried out with the multi-sized particles of Gaussian distributions.

The elutriation rate constant obtained from the experiment was correlated with the standard deviation of particle size and the dimensionless group of the velocity ratio. The standard deviation of pressure fluctuation, mean pressure, major frequency and power spectrum density function were calculated by pressure fluctuation properties. Size distribution of elutriated particles and pressure fluctuations were measured for the particle size distribution of particle system depended largely on the size distribution. Characteristics of fluidization and elutriation were greatly influenced by the particle size distribution and these characteristics could be interpreted with pressure fluctuation properties.

**Key Words** : Elutriation, Pressure Fluctuation Properties, Fluidized Bed, Particle Size Distributions.

### 1. 서론

유동층반응기는 고체를 다루는 다른 장치에 비하여 많은 장점을 가지고 있다. 반응기 내에서 고체가 액체와 같이 거동하므로 연속조업이 가능하고, 열 및 물질전달의 우수성으로 인하여 현재 많은 분야에서 반응기로 사용하고 있으며, 새로운 적용을 위한 시도가 이루어지고 있다. 이러한 유동층반응기에서 성능에 영향을 주는 인자는 혼합과 유출이며, 유출은 유동층반응기에서 고체 반응물의

층외부 손실을 야기하고, 층내물질의 양, 조성 그리고 층하부 배출까지도 변화시켜 유동층의 공업적 이용 및 안정한 조업에 큰 변수로 작용한다.

유동층에서 미세입자의 유출을 각 단계별로 살펴보면 층 표면에서 기포의 파괴에 의한 층상부로의 분출(project)현상이 먼저 일어나고, 그다음 분출된 입자가 기체의 공탁속도 이하의 종말속도를 갖는 입자의 대부분은 freeboard로 상승하게 되고, 공탁속도 이상의 종말속도를 갖는 입자는 대부분 다시 유동층으로 되돌아오게 된다.

\*교신저자 : 차왕석(wscha@kunsan.ac.kr)

접수일 09년 07월 29일

수정일 09년 10월 08일

게재확정일 09년 11월 12일

이때 분출시 큰 모멘텀 에너지를 갖고 있던 입자들은 freeboard를 통하여 유출이 일어나고 적은 에너지를 갖고 있던 입자는 대부분 다시 유동층으로 돌아오게 된다.

이와 같이 입자유출에 영향을 주는 인자들로는 최소유동화속도, 공극률, 층높이, 공탑속도, 등[1-5]이 있고, 각 인자들에 대한 영향을 많은 연구자들은 회분식계에서 실험을 수행하여 각 인자들에 대한 유출의 영향을 다양한 무차원군을 사용하여 수식화하였다[6,7]. 그러나 회분식계에서의 실험은 시간에 따라 층내의 조성이 변하므로 항상 비정상상태에서 조업이 이루어지고 있으므로 실제 정상상태에서 조업되는 연속계에 적용하기는 어려운 상태이다.

본 실험에서는 산업에서 이용되고 있는 유동층에서 사용되는 모래를 이용하여 동일한 평균입경을 갖는 Gaussain 분포의 표준편차가 0.1~0.8인 경우에 대하여 회분식에서 유속, 초기유동화 물질의 입자분포를 변화시키면서 층내 특성, 유출속도, 유출입자의 평균크기 및 분포 등을 구하여 이를 압력요동 특성과 상호 연관시켜 유동층반응기의 공정해석에 필요한 기초자료를 제시하고자 하였다.

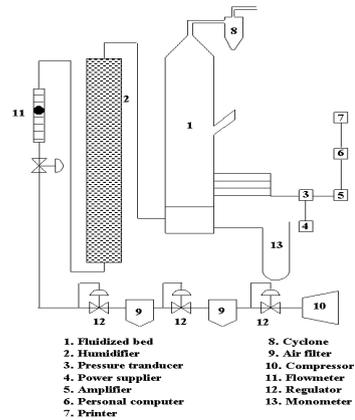
## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

공기압축기를 이용하여 유동층에 공기를 공급하였으며, 유동층 기벽과 입자간의 정전기 현상을 줄이기 위하여 유입공기의 상대습도가 50%를 유지하도록 증습기를 설치하였다. 유동층은 층내 현상을 관찰할 수 있는 내경 0.109m, 높이 1.8m의 아크릴관으로 제작하였고, 기체분산판은 지름이 1mm인 구멍이 345개 뚫린 개공비가 3%인 다공판을 사용하였다. 외벽에는 압력전달기(pressure transducer, PT) 측정관의 측정위치를 변경할 수 있도록 외경 0.01m, 길이 0.01m 아크릴관을 사용하여 분산판으로부터 0.025m 간격으로 4개의 측정관을 설치하였다.

측정부는 압력요동을 측정할 수 있는 압력전달기(Valcom Co. LTD., model VPRN, 1 psi)와 측정된 압력요동 신호를 통계처리할 수 있는 컴퓨터 부분으로 구성되어 있다. 압력전달기의 측정관은 유동층내 중앙에 위치하도록 하였으며, 외경 4 mm, 길이 0.4 m의 stainless steel관을 사용하였다.

또한 층상부에는 싸이클론을 설치하여 유출입자를 포집하였다. 싸이클론의 통과 후 필터를 설치한 결과 본 연구에서 사용된 입자는 비교적 큰 입자로서 싸이클론에서 대부분이 포집되었다.



[그림 1] 유동화 및 압력요동특성치 측정장치

### 2.2 실험방법

실험은 유동층내의 L/D가 1 인 상태에서 수행하였으며, Gaussain 분포의 동일한 평균입경에 대하여 Gaussain 분포의 표준편차를 조절하여 각 입자크기별로 혼합하였다. 입도분포는 식(1)과 같이 계산하였다. 각 입자크기 분포별로 혼합한 층물질을 유동층에 채우고 정해진 유속에서 유동화시킨 후 압력전달기를 이용하여 압력요동신호를 연속적으로 측정하였다. 이때 싸이클론에서 포집되는 입자를 1분 간격으로 채취하여 이를 체분석하여 입자경별 유출율과 전체 유출율을 측정하여 유출상수를 구하였다. 이와 같은 방법으로 각각의 유속에 대하여 Gaussain 분포의 표준편차별로 실험을 수행하였다. 또한 유출실험은 높은 유속에서 낮은 유속으로 점차 유속을 변경시켜가며 실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

또한 유동층에서 압력요동신호의 측정시간 간격은 sample theorem을 이용하여 10ms로 하였으며, sampling 갯수는 1024개로 하였다. 본 실험에서 분석에 사용한 압력요동의 통계적 처리는 아래와 같다. 압력요동의 표준편차 variance는 positive square root인 표준편차로 data signal의 intensity를 의미하며 식(2)와 같이 표현된다. 또한 식(3)을 이용하여 평균압력을 구하였다[8].

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(r-\bar{r})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

$$S.D. = \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (X(t) - \mu_x)^2 dt\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

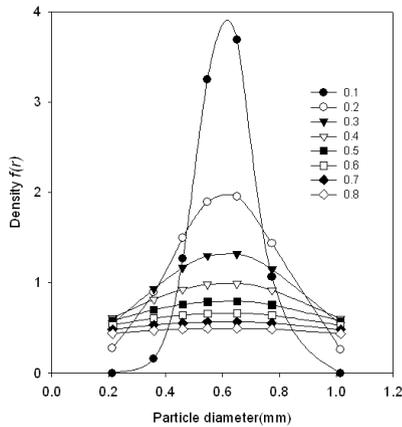
$$\mu_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt \quad (3)$$

[표 1] 실험조건

Operating variables	Operating conditions
Aspect ratio(L/D)	1
Gas Velocity(m/sec)	1.43, 1.82, 2.09
Particle Size(mm)	1.016, 0.774, 0.651, 0.215
Mean Particle Size(mm)	0.612
Standard Deviation of Gaussain Distribution	0.1 - 0.8

### 2.3 시료

본 실험에 사용한 시료는 시멘트 몰탈 압축강도 시험용 모래인 주문진 표준사( $\rho_p=2620 \text{ kg/m}^3$ )이 사용되었고, Geldart의 분류로 Group B에 속한다. 밀도는  $2,620\text{kg/m}^3$ , 구형도( $\phi$ )는 0.67이다. 사용된 시료의 입도분포는 그림 2에 나타내었다. 따라서 표 1에 나타난 7개의 입자경 입자를 그림 2의 분율로 혼합하여 동일한 평균입경을 만들었다.



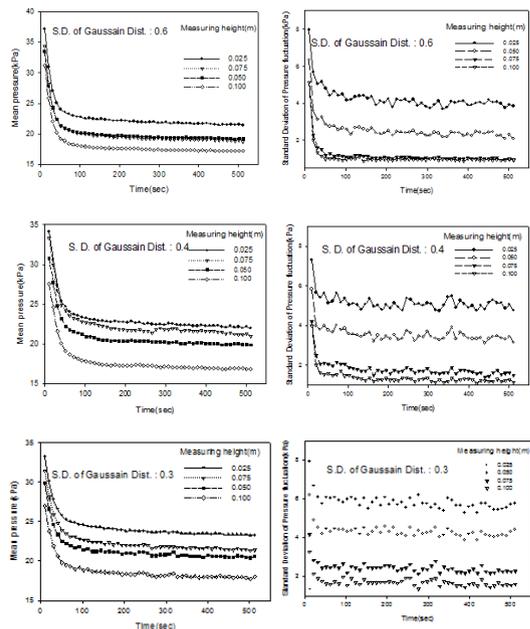
[그림 2] Gaussain 분포의 표준편차에 따른 입자분포

## 3. 결과 및 고찰

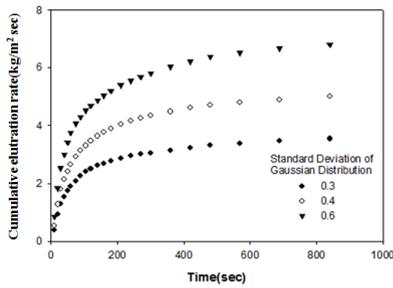
### 3.1 압력요동 특성치 변화

Gaussain 분포의 입자군에 대하여 동일한 평균입경을 유지한 상태에서 Gaussain 분포의 표준편차를 변화시키며 압력요동 특성치를 시간에 따라 측정하여 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 압력요동의 표준편차와 평균압력은 측정된 압력요동 특성치를 식(2), (3)으로 계산하였다. 유동층에서 압력요동의 표준편차는 기포의 크기, 양 및

빈도에 크게 영향을 받으며, 기포가 미치는 영향에 대하여는 많은 연구가 발표되었다[9]. 기포는 유동층내의 가장 중요한 인자인 혼합 및 유출에 영향을 미치게 된다 [10]. 또한 기포는  $U_0-U_{mf}$ ,  $U_0/U_{mf}$ , 공극율( $\epsilon$ )에 의하여 형상이 결정된다. 따라서 층내의 입자군에 의한 변화를 압력요동의 표준편차로 해석하고자 유동화 시간에 따른 압력요동의 표준편차를 그림 3에 나타내었다. 그림 3은 동일한 유속에서 Gaussain분포의 표준편차가 0.3에서 0.6까지 변화된 상태이다. Gaussain분포 표준편차가 큰 경우 평균입경은 같으나 미세입자의 양이 많으므로 인하여 유출이 크게 나타나며 이로 인해 유출에 의한 변화가 0.6인 경우 가장 큰 변화를 나타내고 있다. 또한 평균압력의 변화 경향도 유출을 변화와 동일하게 나타나고 있다. 이는 그림 4의 각 경우에 대한 유출율의 증가에 따른 평균압력의 변화율이 증가하고, 압력요동의 표준편차 변화율도 증가함을 알 수 있다. 이러한 감소의 원인은 미세입자에 의하여 치밀도가 상승된 상태에서 기포의 크기와 빈도가 커지게 되나, 미세입자의 유출이 일어남에 따라 층내 치밀도가 감소되고 희박상을 통한 흐름이 증가되므로 인하여 압력요동의 표준편차가 감소되고, 치밀도의 감소에 따라 압력강하가 감소되어 일어나는 현상으로 사료된다.

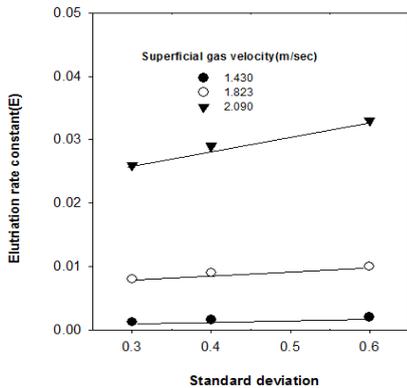


[그림 3] Gaussain분포 표준편차에 따른 유동층 층높이별 압력요동의 표준편차와 평균압력(공탐속도 1.823 m/sec)



[그림 4] Gaussain분포 표준편차에 따른 미세 입자 유출율 (공탑속도  $U_0=1.43$  m/sec)

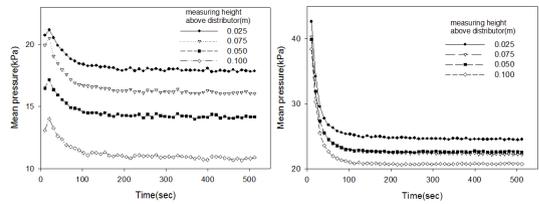
그림 5는 유속에 따른 각 입자군의 유출상수를 나타낸 그림으로 1.43m/sec의 공탑속도에서는 입자군에 따른 유출 상수의 차이가 크게 나타나지 않는 반면 2.09m/sec에서는 확연한 차이를 나타내고 있다. 1.43m/sec의 공탑속도는 최소유동화속도의 6배에 해당되고 유출 가능 입자의 종말속도 이상의 유속이다. Gaussain 분포입자군의 미세입자 분율은 큰 차이를 나타내고 있으나 유출이 거의 동일하게 나타나는 것은 입자간의 유효 밀도의 증대로 인한 것으로 해석될 수 있다. 즉, 치밀도의 증가에 따라 유출율이 제어될 수 있음을 나타낸다.



[그림 5] Gaussain 분포 표준편차에 따른 유출상수(E)

이러한 현상은 그림 6의 운전시간에 따른 평균압력변화에서 알 수 있다. 1.43 m/sec의 경우 평균압력의 변화 곡선은 시간이 증가함에 따라 증가하고 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 조업 개시 후 축방향 혼합도의 증진에 의하여 압력이 증가한 후 미세입자의 유출에 의한 충물질의 감소가 나타나는 것으로 사료된다. 반면에 상대적으로 높은 유속인 경우 증가 없이 감소하는 경향만이 나타난다. 이는 조업과 동시에 많은 양의 유출이 발생하고 있음을 나타낸다. 따라서 층내의 혼합도에 대한 측정이 평균

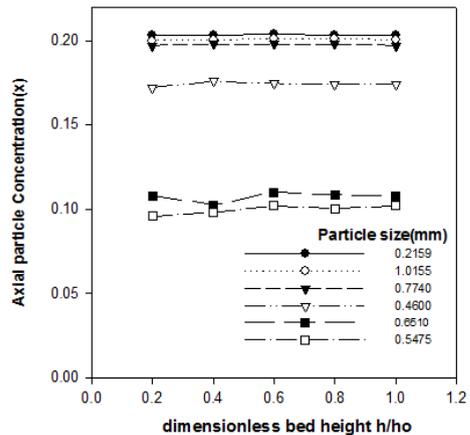
압력의 변화로부터 관측될 수 있으며, 평균압력의 변화로부터 유출율의 변화를 측정할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 혼합도에 대한 결과를 측정하기 위하여 다단으로 이루어진 유동층을 제작하여 축방향 혼합도를 측정하여 그림 7에 나타내었다. 그림 7은 유동층이 조업을 하는 도중에 순간적으로 유동화공기 공급을 차단시켜 유동층내의 축방향 분포가 유지된 상태에서 조업을 중단시켜 얻은 결과이다. 층하부에서 층상부까지 유사한 입도분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.



(가)  $U_0=1.43$  m/sec (나)  $U_0=2.09$  m/sec

[그림 6] 층높이에 따른 평균압력(Gaussain분포 표준편차 ; 0.3)

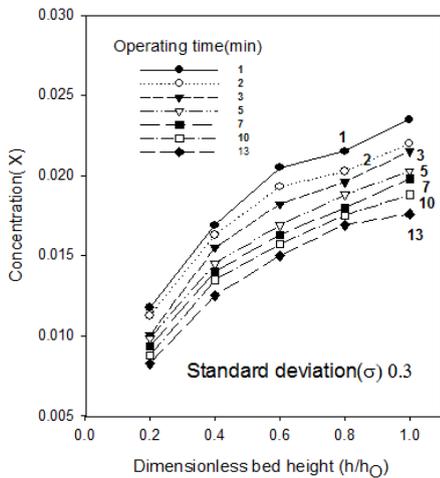
이는 유동층의 분리현상(Segregation)이 나타나지 않고 있음을 의미하며[11, 12, 13, 14], 일반적으로 완전한 혼합이 이루어지고 있음을 의미한다. 또한 해당 유속에서 종말속도인 입자가 완전히 유출되지 않음을 알 수 있다.



[그림 7] 유동층 높이에 따른 축방향 입자분포

따라서 시간에 따른 축방향 층내 미세입자의 분포를 1분 간격으로 구하여 그림 8에 나타내었다. 조업시간에 따른 축방향 미세입자의 분포는 동일한 입도분포의 시료를 층내에 충전한 후 조업시작 후 원하는 시간에 유동화공기의 공급을 순간적으로 정지시킨 후 분산판으로부터 축방향 높이에 따라 다단층을 분리하여 얻은 시료를 제

분석하여 얻은 결과이다. 초기에는 1분 간격의 축방향분포와 이후 2-3분간격으로 측정된 미세입자의 분포를 나타낸 것이다. 미세입자의 경우 상대적으로 작은 부력과 기포 후류의 운반에 의한 효과로 인하여 층상부에 많은 양이 분포됨을 알 수 있으며, 유류의 진행으로 인하여 점차 감소되고 있음을 알 수 있었다. 체류시간의 조절에 의하여 미세입자의 층내 체류시간의 증대를 얻을 수 있는 조업조건에 대한 제시가 가능함을 알 수 있었다.



[그림 8] 유동층내의 운전시간에 따른 축방향 미세 입자분포

#### 4. 결론

회분식 유동층에서 평균입자경이 동일하며, 다입자경 Gaussain분포의 표준편차가 다른 입자 유출특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

미세입자의 유출에 의하여 층내 평균압력의 급격한 감소가 일어남을 알 수 있었으며, 이 결과로부터 층높이에 따른 평균압력으로부터 유출율을 측정할 수 있었다.

미세입자의 유출에 의하여 층내 치밀도가 감소되며 희박상 통과유량이 증가되므로 인하여 기포의 빈도와 크기가 감소되므로 압력요동의 표준편차가 감소됨을 알 수 있었다. 따라서 압력요동의 표준편차의 변화로부터 층내 유출현상을 관측할 수 있음을 알 수 있었다.

사용기호

$D$	: 유동층 직경	m
$L$	: 유동화매질 층높이	m
$r$	: 입자경	m

$\bar{r}$	: 평균입자경	m
$U$	: 공탑속도	m/s
$U_{mf}$	: 최소유동화속도	m/s
$\mu_x$	: 평균압력	kPa
$S.D.$	: 압력요동의 표준편차	
$T$	: 관측시간	sec
$t$	: 시간	sec
$\sigma$	: 표준편차	

#### 참고문헌

- Chen, T. P. and Saxena, S. C., "A theory of solids projection from a fluidized bed surface as a first step in the analysis of entrainment processes", *Proc. Second Eng. Foundation Conference*, Cambridge University Press, 151-156, 1978.
- Tanaka, I., Shinohara, H., Hirose, H., Tanaka, Y., "Elutriation of fines from fluidized bed", *J. of Chem. Eng. of Japan*, 5(1), 51-61, 1972.
- Saxena, S. C. and Jadav, S., "A two dimensional gas fluidized bed for hydrodynamic and elutriation studies", *Powder Technol.*, 36, 61-70, 1983.
- Geldart, D., "the effect of particle size and size distribution on the behaviour of gas fluidised beds", *Powder Technol.*, 6, 201-215, 1972.
- Choi, J. H., Son, J. E. and Kim, S. D., "Solid entrainment in fluidized bed combustors", *J. of Chem. Eng. of Japan*, 22(6), 597-606, 1989
- Wen, C. Y. and Chen, L. H., "Fluidized bed freeboard phenomena elutriation and elutriation", *AIChE J.*, 28(1), 117-128, 1982.
- Hazlett, J. D. and Bergougnou, M. A., "Influence of bubble size distribution at the bed surface on entrainment profiles", *Powder Technol.*, 70, 99-107, 1992.
- Bendart, J. S. and Piersol, "Random Data", John Wiley, New York, 1971.
- Rowe P. N. and Yacono C. X. R., "The bubbling behaviour of fine powders when fluidised", *Chemical Engineering Science*, 31(12), 1179-1192, 1976.
- Abdulrahim Ahmad Alzahrani and Noor Wali, M. M., "A study of pressure drop fluctuations in a gas-solids fluidized bed", *Powder Technol.*, 76, 185-189, 1993.
- Chiba, S., T. Chiba, A. W. Nienow and H. Kobayashi, "The minimum Fluidization Velocity, Bed Expansion and Pressure-Drop Profile of Binary Particle Mixtures",

- Powder Technol, 22, 225-269, 1979.
12. Nienow, A. W., P. N. Rowe and L. Y. L. Cheung, "A Quantitative Analysis of the Mixing of Two Segregating Powders of Different Density in a Gas-Fluidised Bed", *PowderTechnol.*, 20, 89-97, 1978.
  13. Rice, R. W. and J. F. Brainovich, Jr, "Mixing/Segregation in Two-and Three-Dimensional Fluidized Beds : Binary Systems of Equidensity Spherical Particles", *AIChEJ.*, 32(1), 7-15, 1986.
  14. Formisani B., Girimonte R. and Longo T., The fluidization pattern of density-segregation binary mixture, *Chem. Eng. Res and Des.*, 86, 344-348, 2008.

---

**장 현 태(Hyun-Tae Jang)**

[정회원]



- 1986년 2월 : 고려대학교 화학공학과(공학사)
- 1991년 8월 : 고려대학교 화학공학과(공학석사)
- 1996년 2월 : 고려대학교 화학공학과(공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학과 교수

<관심분야>

흡착, 유동층반응

---

**차 왕 석(Wang-Seog Cha)**

[정회원]



- 1981년 8월 : 고려대학교 화학공학과(공학사)
- 1985년 2월 : 고려대학교 화학공학과(공학석사)
- 1993년 8월 : 고려대학교 화학공학과(공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 토목환경공학부 교수

<관심분야>

폐기물 가스화 및 열분해