

영상기법을 이용한 수직상향 기포유동에 관한 연구

서 동 표[†] · 오 울 권^{*}

(원고접수일 : 2003년 2월 10일, 심사완료일 : 2003년 5월 21일)

A Study on the Vertical upward Bubble Flow using Image Processing Technique

Dong-Pyo Seo[†] · Yool-Kwon Oh^{*}

Key words : Bubble Rise Velocity(기포상승속도), Gas Volume Fraction(기체체적률), Free Surface(자유표면), Electro-Conductivity Probe(전기전도도프로브)

Abstract

In the present study, the characteristics of upward bubble flow were experimentally investigated in a liquid bath. The velocity of upward bubble flow was calculated for two different experimental conditions : 1) bubble flow without kinetic energy 2) bubble flow with kinetic energy. Bubble flow without kinetic energy starts to undergo the effect of buoyancy 10cm away from the nozzle. Whereas, kinetic energy is dominant before 30 cm away from the nozzle in bubble flow, but after this point, kinetic energy and inertial force are applied on bubble flow at the same time. In addition, as the flow rate increases, the maximum velocity point moves to the nozzle. The velocity profiles near free surface is extremely irregular due to surface flow. Gas volume fraction is high near the nozzle due to gas concentration, but decreases with the increasement of axial position. Gas volume fraction does not vary after the axial position, $z=60$ in spite of the increasement of flow.

1. 서 론

액체가 채워진 래들(Ladle) 형상의 용기내에 기체를 주입하여 형성되는 기-액(Bubble-liquid) 기동에 관한 많은 연구들이 있다. 대부분의 연구들이 실험에 의존하고 있으며 그 연구를 분류해보면

기체주입으로 인해 발생하는 액상영역에서의 순환에 관한 연구와 기포와 액체가 함께 공존하는 2상(Two phase)의 기액기동에서의 특성을 연구하는 것으로 대표된다.

많은 연구자들은 다양한 실험적 접근방법으로 기포의 속도나 기포빈도수, 기체체적률 등을 전기

[†] 책임저자(조선대학교 대학원 정밀기계공학과) E-mail : pyo4021@hanmail.net, T : 062)230-7014

^{*} 조선대학교 기전공학과(ygoh@mail.chosun.ac.kr)

전도 프로브를 이용하여 연구하였다.

Castillejos와 Brimacombe는 기포의 특성들을 측정하기 위해 전기전도도프로브를 이용하였고 특히 기포의 상승속도를 측정하기위해 마이크로컴퓨터와 결합된 2-요소 전기전도 프로브를 이용하였다.⁽¹⁾⁽²⁾

Track 등은 기포의 신호들을 가시적으로 확인할 수 있도록 오실로스코프를 사용하였으며 연속적으로 발생하는 신호의 지연시간으로부터 기포의 상승속도를 구하는 2-위치 신호법(Two-state signal method)을 이용하였다.⁽³⁾

Serizawa 등도 역시 정교한 기구와 2-위치 신호법을 사용하여 기포의 속도를 측정하였다. 그들은 이 방법에서 센서는 선행기포를 감지하는 동안 도달하는 후속기포에 의해 영향을 받으며 그로 인해 센서가 감지하는 기포의 시간이 분명히 지연되는 것을 고려하여 기포의 평균속도를 산발적으로 나타나는 신호들로부터 구하였다.⁽⁴⁾

Oryall 등에 의하면 기포의 집중도는 기둥의 축방향에서 보다 횡방향에서 훨씬 급격하게 감소하였으며 그 프로파일은 Gaussian함수로 잘 나타내어지고 기둥을 중심으로 대칭성을 보이고 있다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 기체체적률을 측정하기 위해서 전기전도도프로브와 오실로스코프를 이용하였으며 상승속도를 측정하기 위해서는 고속 CCD카메라를 이용한 영상기법을 이용하였다.

기포의 국부 기체체적률과 순간상승속도는 기포의 특성을 분석하는데 매우 중요한 인자로서 기체 주입시스템에 관하여 유용한 정보를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 조건

공기-물 기체주입시스템에서 기포의 특성을 분석하기 위해 Fig. 1과 같이 모델실험장치를 구성하였으며 전기전도도프로브와 오실로스코프를 이용하여 기체 체적률을 추적하였고 기포의 상승속도를 측정하기 위하여 Fig.2와 같이 고속 CCD카메라를 장치하였다.

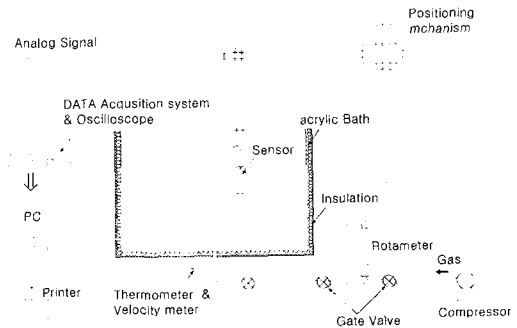


Fig. 1 Schematic diagram of experimental facility to measure gas volume fraction.

실험장치에서 시험부는 높이와 직경이 각각 300mm인 투명 아크릴로 제작하였으며 가시화를 목적으로 원통형 외곽에 같은 재질로 사각의 아크릴을 설치하였다. 용기 내에는 작동유체인 물을 높이 200mm까지 채우고 용기 바닥 중앙에 노즐을 설치하여 압축기로부터 공급받은 공기가 액체 내로 주입되도록 하였다. 파이프 내의 공기압을 0.5기압(게이지압)으로 일정하게 유지하고 공기압의 맥동으로 인한 유량변화를 최소화하기 위해 공기압조정유닛을 설치하였다. 또한 기포의 특성을 분석하기 위해 전기전도도프로브를 제작하여 액상에 5[V]의 전기를 흐르게하여 오실로스코프를 통해서 기포의 전기적신호를 캡처하여 기체체적률을 분석하였다. 실험은 축방향으로 10mm 간격으로 180mm까지, 반경방향으로 2mm 간격으로 측정하였다.

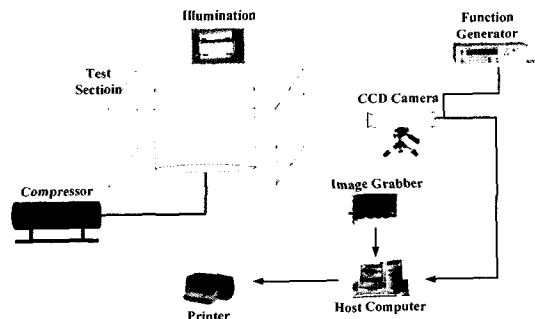


Fig. 2 Schematic diagram of experimental facility to measure bubble rise velocity.

고속 CCD카메라(XC-HR300)는 1초에 55프레임을 촬영되도록 세팅되었으며 프레임간의 균일한 시간간격을 위해서 신호발생기(Function generator)를 이용하여 5[V], 55[Hz]의 신호를 공급하였다. 액상내에서 상승하는 기포의 이미지를 저장할 수 있도록 프로그래밍하였고 저장된 이미지를 분석하여 기포의 상승속도를 구하였다.

기포의 특성을 추적하기 위하여 Table 1과 같은 조건으로 실험하였으며 기포의 상승속도는 우선 운동에너지를 거의 주지 않는 상태에서 오직 부력에 의해서만 상승하는 상태에서 실험한 다음 운동에너지를 가하여 실험하여 기포의 속도 및 형상을 분석하였다. 실험은 노즐 부근(Part I), 중간 부분(Part II), 자유표면 부근(Part III)으로 3-부분으로 나누어서 촬영하였으며 각 부분에서의 순간 상승속도를 구하였다.

Table 1 Experimental conditions for the flow variables measurements.

Case	Nozzle Dia. [mm]	Vessel Dia. [mm]	Bath Depth [mm]	Gas flow [m ³ /s]
I	1.00	300	200	0
II	1.00	300	200	0.6283×10 ⁻⁴
III	1.00	300	200	1.2566×10 ⁻⁴

3. 결과 및 고찰

Fig.3은 운동에너지를 주지 않는 상태에서 상승하는 대표적인 기포의 형상들을 보여주고 있다.

(a)는 기포가 아주 작을 경우의 구형기포로 이

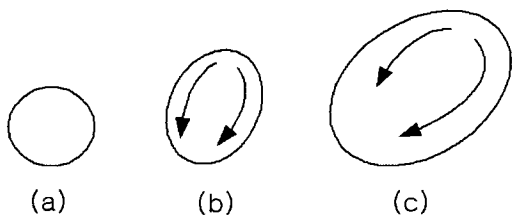


Fig. 3 Typical shape of bubbles.

형상은 기포 표면에 작용하는 힘에 의해 결정된다. 이와 같은 작은 구형기포의 경우 상승속도는 마찰력에 의해서만 영향을 받고 기포가 커짐에 따라 형상은 (b)와 같이 약간찌그러지게 되며 부력에 의해 상승하게 되고 속도는 증가하게 된다. 그리고 액상의 항력의 영향으로 기포는 타원형으로 찌그러지고 그 형상이 불규칙적으로 변화하게 된다. 기포가 상승할수록 기포는 더욱 납작해지고 납작해질수록 많은 저항을 받게 되므로 상승속도는 감소하게 된다. 따라서 기포의 상승속도는 형상에 많은 영향을 받음을 알 수 있다.^[6]

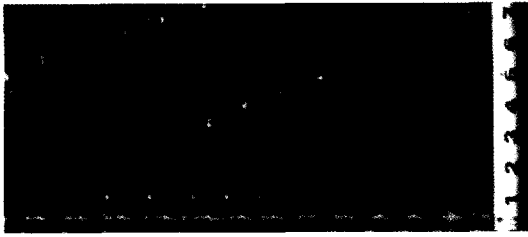
운동에너지를 거의 주지 않는 상태에서 기포는 노즐로부터 약 30mm이내에서 급격하게 팽창하며 Fig.4는 운동에너지를 거의 주지 않은 경우의 팽창한 후의 기포 형상을 보여주고 있다. 이 기포는 상승하면서 형상은 불규칙적으로 변하게 되고 기포가 붕괴되는 경우도 있다. 기포가 붕괴되는 현상은 주로 팽창한 후인 30mm부근에서 나타나게 된다. Fig.4의 타원 기포의 크기는 장축과 단축이 각각 0.9cm와 0.6cm이다.



Fig. 4 Bubble size without kinetic energy.

Fig.5의 (a)는 운동에너지를 거의 주지 않는 상태에서 부력에 의해서만 상승하는 Case I의 경우이며 (b)와 (c)는 Case II와 Case III에서 기포가 상승하는 형상을 보여주고 있다. (a)는 노즐에서부터 약 7[cm]는 22.58cm/s의 속도로 상승하고 Case II와 Case III에서는 32.11cm/s와 42.68cm/s의 속도로 상승하였다.

고속 CCD카메라를 이용하여 저장한 위의 사진들을 통해서 구간별 기포의 순간속도를 구할 수 있다.



(a) Case I



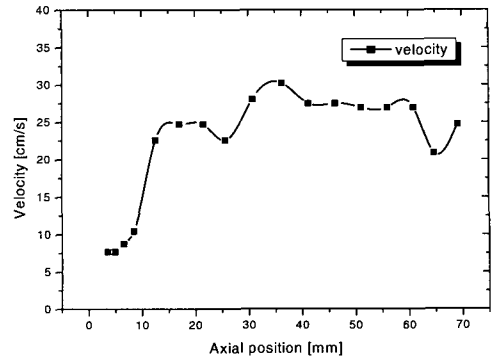
(b) Case II



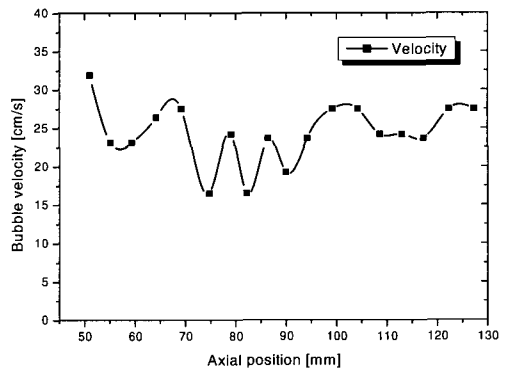
(c) Case III

Fig. 5 Bubble rise velocity in the different conditions.

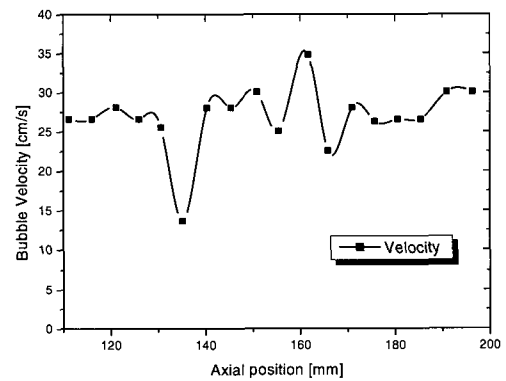
Fig. 6은 운동에너지를 거의 주지 않은 상태에서 축방향의 위치에 따른 기포의 순간속도를 보여주고 있다. 외력이 없는 부력에 의해 상승하는 기포의 순간상승속도를 살펴보면 축방향으로 10mm이내에는 7~10cm/s이고 이 부분에는 아직 부력에 의한 영향이 적은 부분이다. 기포가 상승하면서 노즐로부터 10cm 이상에서부터 25~30cm/s까지 상승하는 것을 볼 수 있다. 이것은 부력의 영향으로 상승속도가 증가하는 것을 볼 수 있으며 최고 순간속도 35cm/s까지 분포하고 있다. Fig. 6의 (a)~(c)를 보면 기포의 순간 상승속도가 증감하는 부분이 존재하는데 이는 기포의 형상변화에 따른 액상의 항력과 마찰력으로 설명될 수 있을 것이다.



(a) Part I



(b) Part II



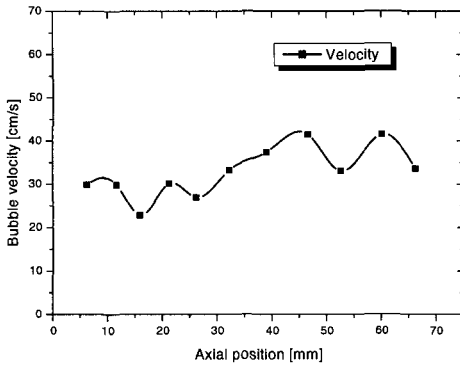
(c) Part III

Fig. 6 Bubble rise velocity in the case I.

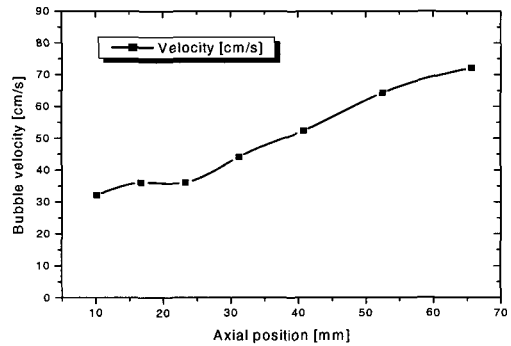
Fig.7은 Case II의 경우에서 기포의 상승속도를 보여주고 있다. Fig. 7의 (a)는 노즐출구에서 상승속도는 약 30cm/s이며 축방향으로 30mm 이상에서부터 상승속도가 증가하는 것을 볼 수 있다.

기포는 노즐 부근에서는 초기에 가해진 운동에너지에 의해서만 영향을 받지만 그 이상이 되면 운동에너지에 액상영역에서 발생하는 와류에 의해서 속도가 증가하는 것으로 판단된다.

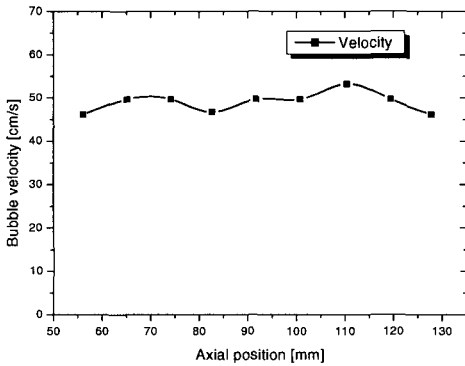
Fig.7의 (c)에서 보는 바와같이 자유표면 부근에서는 표면유동의 영향으로 상승속도가 불규칙하게 변하는 것을 알 수 있다. Case II의 경우 축방향으로 110cm에서 50cm/s로 최고속도에 도달하는 것을 알 수 있다.



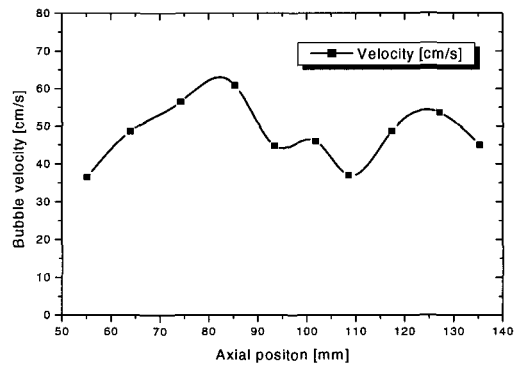
(a) Part I



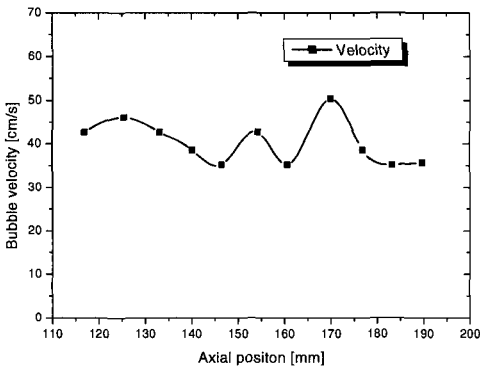
(a) Part I



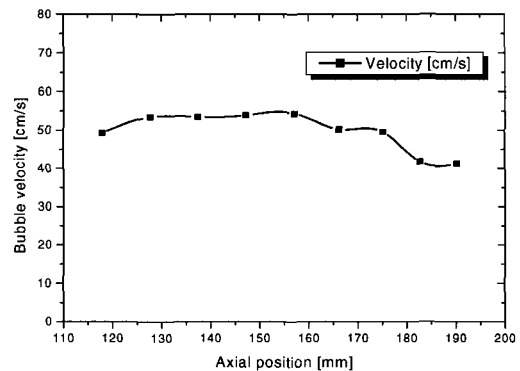
(b) Part II



(b) Part II



(c) Part III



(c) Part III

Fig. 7 Bubble rise velocity in the Case II.

Fig. 8 Bubble rise velocity in the Case III.

Fig.8은 CaseⅢ에서의 상승속도를 축방향 위치별로 보여주고 있다. 노즐 출구부분에서 속도는 Case Ⅱ와 마찬가지로 약 30cm/s이나 액상의 관성력의 영향을 받는 축방향으로 30mm인 지점에서부터 그 속도는 계속 증가하다가 85cm지점에서 최고속도 58cm/s에 도달한 순간속도는 증감의 반복과 함께 40~50cm/s의 범위내에 있게 되는 것을 볼 수 있다. 순간 상승속도는 역시 자유표면 근처에서는 표면유동의 영향으로 감소하는 것을 알 수 있다.

Case Ⅱ와 CaseⅢ을 비교해보면 유량이 증가하면서 최고속도에 도달하는 거리가 짧아졌으며 이는 기체유량이 증가하면 기포의 크기가 더 커지게 되고 따라서 부력의 영향을 많이 받을 것이고 또, 액상영역에서의 와류가 커져 기포의 상승에 더 많은 영향을 주기 때문이라고 판단된다. 또한, 주로 기체의 운동에너지에 의해서 상승하는 노즐출구에서 보다 액상에서의 와류에 의한 영향이 가해지는 지점에서 속도가 더 크다는 것을 알 수 있다.

기포가 노즐을 통해서 액상 내로 주입될 때 기포는 축방향으로 약 30cm 떨어진 부분에서 부력과 액상영역의 와류 영향이 나타나는 것을 알 수 있으며 자유표면 부근에 도달하면 표면유동의 영향으로 순간속도는 줄어드는 것을 알 수 있다.

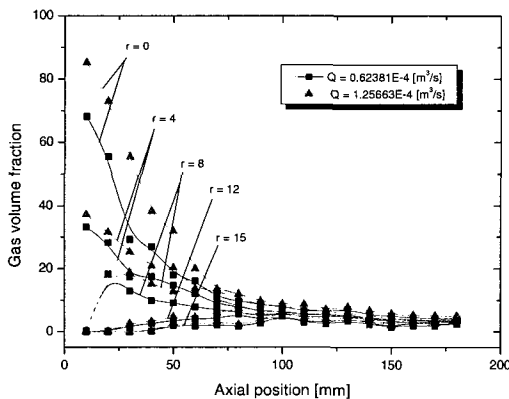


Fig. 9 Axial profiles of the gas volume fraction at differential point for case Ⅱ and case Ⅲ.

Fig. 9는 Case Ⅱ와 Case Ⅲ에서의 기체 체적률을 나타내고 있다. 기체체적률은 노즐 출구로

부터 가까운 곳에서 기체가 집중되기 때문에 높게 나타나고 있지만 축방향과 반경방향으로 거리가 증가할수록 일정한 형태를 나타내고 있다.

유량 변화에 따른 기체체적률 변화를 살펴보면 유량이 증가하면 기체체적률도 증가하나 노즐로부터 축방향으로 약 60mm이상에서는 유량이 증가하더라도 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

노즐 출구부근에서는 기포가 집중되어 있지만 노즐로부터 멀어질수록 기포는 붕괴되고 반경방향으로 퍼지기 때문에 축방향의 위치가 약 60mm이상에서 기체체적률의 변화량이 거의 일정하였다.

4. 결 론

물이 채워진 원통형 용기의 바닥 중앙에서 공기를 주입하여 기포의 유동실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 기포에 운동 에너지가 가해지지 않는 경우 기포는 10cm이상에서부터 부력 영향을 받아 상승하며 기포는 노즐로부터 이탈하여 30mm이내에서 급격하게 팽창하고 팽창후의 기포의 크기는 장축과 단축이 각각 0.9cm와 0.6cm의 타원형을 이루었다.

2. 운동에너지가 가해진 경우 노즐출구에서 기포는 운동에너지에 의해 상승하지만 축방향으로 멀어질수록 액상의 와류의 영향으로 상승속도는 증가하는 것을 알 수 있다.

3. 유량증가에 따른 기포의 속도 특성을 살펴보면 기포가 도달하는 최고 상승속도는 유량이 증가하면서 거리가 짧아졌으며 자유표면 부근에서는 표면유동의 영향으로 속도의 증감이 불규칙적이었다.

4. 기체체적률 분포는 노즐 출구 부근에서 기포가 집중되어 있으므로 기체체적률은 크게 나타난다. 유량이 증가함에 따라 기체체적률은 증가하지만 축방향으로부터 60mm부근에서는 기체체적률의 변화량이 거의 유사하게 나타난다.

참고문헌

[1] A. H. Castillejos, and J. K. Brimacombe, "Measurement of Physical Characteristics of Bubbles in Gas-Liquid plumes: Part I. An Improved Electroresistivity probe Technique," Metallurgical Transactions B, Vol. 18B, pp. 649-658, 1987.

[2] A. H. Castillejos, and J. K. Brimacombe, "Measurement of Physical Characteristics of Bubbles in Gas-Liquid plumes: Part II. Local Properties of Turbulent Air-Water Plumes in vertically Injected Jets," Metallurgical Transactions B, Vol. 18B, pp. 659-971. 1987.

[3] K. H. Tacke, and H. G. Schubert, and D. J. Weber and Klaus Schwerdtfeger, "Characteristics of Round Vertical Gas Bubble Jets" Metallurgical Transactions B, Vol. 16B, pp. 263-275, 1985

[4] A. Serizawa, I. Kataoka, and I. Michiyoshi, "Turbulence structure of air-water bubble flow", Int. J. Multiphase Flow Vol 2, pp. 235-246, 1975.

[5] G. N. Oryall, and J. K. Brimacombe., "The Physical Behavior of Gas Jet Injected Horizontally into Liquid Metal," Met. Trans, B, Vol. 7B, pp. 391-403, 1976

[6] Franz Oeters, "Metallurgie der stahlherstellung", Verlag Stahleisen mbH Berlin, Germany., 1989

저 자 소 개



서동표 (徐東杓)

1971년 10월 3일생. 1995년 조선대학교 정밀기계공학과 졸업(학사). 1997년 조선대학교 정밀기계공학과 졸업(석사)
현재 조선대학교 대학원 정밀기계공학과



오울권 (吳栗權)

1949년 9월 9일생. 1972년 조선대학교 기계공학과 졸업(학사). 1991년 경희대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사).
현재 조선대학교 기전공학과 교수