

벤투리 노즐 제원에 따른 마이크로버블 발생 특성 평가

임지영¹, 김현식², 박수영³, 김진한^{*}

¹인천대학교 건설환경공학과, ²인천대학교 도시환경공학부, ³(주)에스비이앤이

Evaluation of characteristics for microbubble generation according to venturi nozzle specification

Ji-Young Lim¹, Hyun-Sik Kim², Soo-Young Park³, Jin-Han Kim^{*}

¹Dept. of Civil & Environmental Engineering, Incheon National University

²School of Urban and Environmental Engineering, Incheon National University

³Sbe& Co., Ltd.

요약 본 연구는 lab-scale로 제작된 가압식 마이크로버블 발생장치의 버블크기 분포를 분석하여 장치의 최적 운전조건을 검토하고 벤투리 노즐 제원에 따른 마이크로버블 발생 특성을 확인하였다. 실험결과, 실험실 규모의 가압식 마이크로버블 발생장치의 운전조건은 공기 주입율 0.3 LPM, 가압탱크압력 3 bar, 벤투리 노즐을 수조와 직접 연결 하였을 때, 상대적으로 우수한 성능을 나타내었다. 벤투리 노즐 제원을 달리한 마이크로버블 발생 특성에서는 노즐의 제원에 따른 버블크기 분포에 미치는 영향은 낮지만, 버블 발생의 성능적 측면에서는 노즐의 목 직경이 3-4 mm 일 때, D_{50} 이 54.98 - 61.19 μm (D3L15, D4L15), 50 μm 이하의 버블 분율은 각각 0.326, 0.345(D3L15, D4L15)로 상대적으로 우수함을 확인하였으며, 노즐 목 길이의 경우 목 길이가 20 mm인 노즐의 D_{50} 이 49.40 - 54.98 μm , 50 μm 이하의 버블 분율은 0.447로서, 마이크로버블을 비교적 안정적으로 발생시키는 것을 확인 할 수 있었다.

Abstract This research was performed to review operating parameters, optimum condition and check characteristic of microbubble generation for using bubble size distribution according to venturi specification. Optimum operating condition have airflow rate 0.3 LPM, 3 bar (pressure tank) and connecting nozzle directly (without valve), it is advantageous to generate microbubble. In case of characteristic of microbubble generation according to venturi specification, effect that nozzle specification affects bubble size distribution is low impact. But considering performance aspects, when using nozzle that throat diameter 3-4 mm, D_{50} are 54.98 - 61.19 μm (D3L15, D4L15), fraction of bubble less than 50 μm are 0.326, 0.345. And it is superior to others. Besides, D_{50} and fraction of bubble less than 50 μm of throat length 20 mm are 49.40 - 54.98 μm , 0.447, respectively. And nozzle that throat length 20 mm is relatively tendency to generate microbubble stably.

Keywords : Bubble size distribution, Microbubble, Pressurized type microbubble generator, Venturi nozzle

1. 서론

가압방식 마이크로버블 발생 장치의 마이크로버블 발생 원리는 기본적으로 기-액 접촉과 가압탱크에 의하여 기체가 용존되고 용존된 기체가 압력차에 의하여 다시 수중에 마이크로버블이 발생되는 원리이다[1]. 마이크로

버블 발생장치의 개발 이후 20여년간 마이크로버블 발생에 영향을 미치는 운전인자 및 장치에 대하여 다양한 연구 결과가 발표되었다. 마이크로버블의 크기는 노즐 전후의 압력차와 형상에 가장 큰 영향을 받으며[2], 가압탱크의 압력상승에 따라 작아진다[3]. 또한, 버블크기 분포는 가압탱크내 압력, 온도, pH, 노즐 유형, 표면장력

본 논문은 중소기업청 기술혁신개발사업 과제번호 S2176531로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jin-Han Kim(Incheon National Univ.)

Tel: +82-32-835-8745 email: jinhan@inu.ac.kr

Received June 12, 2015

Revised (1st August 31, 2015, 2nd September 8, 2015)

Accepted September 11, 2015

Published September 30, 2015

등에 의해 결정된다고 알려져 있다[4]. 이 외에도 마이크로버블을 형성하는데 가장 밀접한 영향을 미치는 장치는 공기포화장치와 마이크로버블 발생노즐이라는 연구 결과가 있다[5]. 마이크로버블 발생과 마이크로버블의 크기에 영향을 미치는 인자들에 관한 선행연구는 많지만, 마이크로버블 발생에 사용되는 노즐의 형상이나 제원에 따른 마이크로버블의 발생 특성 및 노즐 특성에 대하여 평가한 연구는 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구는 lab-scale 규모의 가압식 마이크로버블 발생장치를 이용하여 마이크로버블 발생을 위한 최적 운전조건을 검토하고, 벤튜리 노즐 제원에 따른 마이크로버블 발생 특성을 확인하고자 수행하였다.

2. 본론

2.1 실험 장치

버블크기 분포 분석을 위해 실험에 사용된 입도분석기(BT-9300S, K1 Co., Ltd.)의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of particle size analyzer

Measuring range	0.1 μm -716 μm
Sampling method	Semiautomatic circulation and dispersion system
Repeatability	<1%(CRM D ₅₀)
Reproducibility	<1%(CRM D ₅₀)
Analysis theory	Mie scattering theory

* CRM : Certificated Reference Material

실험장치 개요도 및 실제 실험에 사용된 실험장치를 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 나타내었다.

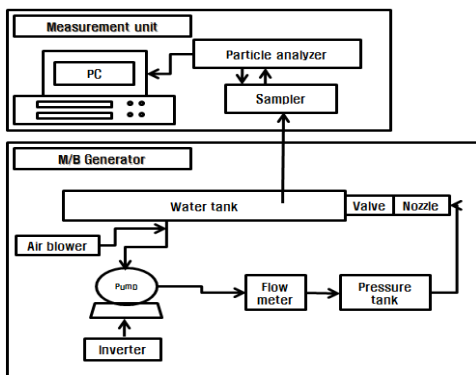


Fig. 1. Schematic diagram of the experiment



Fig. 2. Photograph of experimental equipment

입도분석기는 분석기, 샘플러 두 부분으로 분리되어 있으며, 분석기는 버블크기 분포 측정과 측정된 데이터를 PC에 전송하는 역할을 하며, 샘플러는 수조내 샘플을 유입시키는 역할을 한다. 본 연구에서는 샘플러의 유입관 길이를 버블의 “몽침 현상”[6]을 최소화하기 위하여 끈고, 짧게 제작하였다[7]. 수조의 크기는 51.15 L이며, 공기는 펌프의 흡입관에 직접 연결하여 공급하도록 하고, 펌프는 인버터를 통하여 제어하였다. 실험에 사용된 벤튜리 노즐의 형상은 Fig. 3과 같으며, 노즐의 목 직경과(D)과 길이(L)에 따라 각 노즐을 DxLy라 지칭하였다.

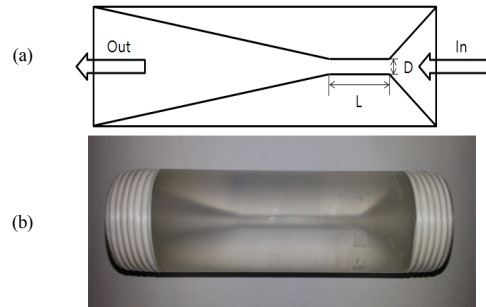


Fig. 3. Picture of venturi nozzle

(a) Venturi nozzle shape (b) Used venturi nozzle

2.2 실험 방법

본 연구에서는 마이크로버블 발생 운전조건 선정과 벤튜리 노즐 제원에 따른 특성 평가로 실험을 나누어 진행하였으며, 수돗물을 사용하였다. 마이크로버블 발생 운전조건을 선정하는 실험에서는 공기 주입율, 가압탱크 압력, 노즐 후단부 밸브 설치 유무 등의 최적 조건을 선정하기 위하여 노즐 D2L0를 설치하여 0.3 및 0.6 LPM의 공기 주입율과 2, 3, 4, 5 bar의 압력조건을 설정하여 실험을 진행하였다. 또한 도출된 최적 운전조건에서 벤튜리 노즐 제원에 따른 버블크기 분포를 측정하였다. 한

편, 정확한 마이크로버블의 크기를 측정하기 위하여, 버블 크기 분포 측정 시 수돗물에 포함된 입자에 대한 보정이 필요하므로 실험 전 수돗물 입도 분포를 측정하여 blank로 사용하고, 버블 크기 분포 측정 결과 각 구간에 대하여 보정하였다. 즉, 보정한 버블 크기 분포의 각 구간 별 양의 값만을 마이크로버블이 발생되었다고 간주하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 마이크로버블 발생 운전조건의 선정

3.1.1 공기 주입율

적정 공기 주입율 선정을 위한 실험에서는 노즐D2L0를 설치하여 가압탱크압력 2, 3, 4, 5 bar, 밸브가 있는 조건에서 공기 주입율만 각각 0.3 및 0.6 LPM으로 변화시켰다. 실험결과는 D_{50} (누적 분포로 환산하였을 때, 누적 분율이 0.5에서 버블 입자의 크기)과 $50 \mu\text{m}$ 이하 버블의 분율로 해석하였는데, 그 결과를 Fig. 4와 Table 2에 나타내었다.

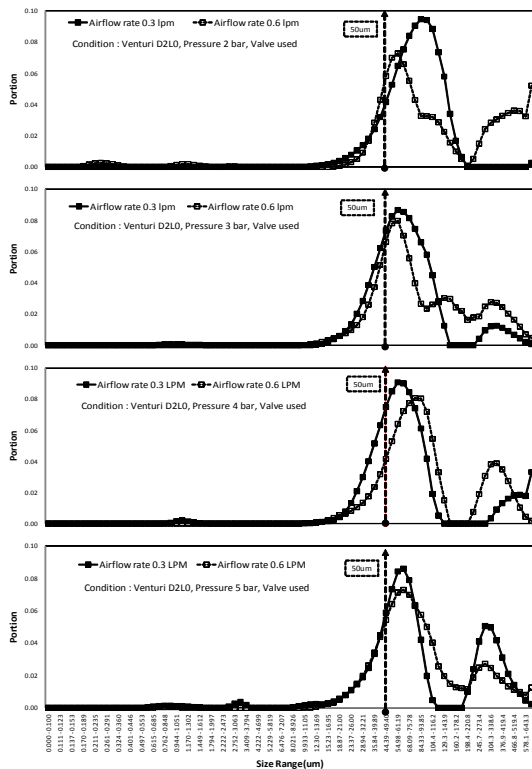


Fig. 4. Bubble size distribution according to airflow rate and pressure

공기주입을 비교시 압력 2 bar를 제외한 나머지 조건에서 공기주입을 0.3 LPM에서 $50 \mu\text{m}$ 이하의 마이크로버블 수가 0.6 LPM 조건보다 분율이 높았으며, D_{50} 에 있어서도 공기주입율이 0.3 LPM 일 때, 버블의 크기가 상대적으로 작게 측정되었다. 또한 lab-scale 규모의 마이크로버블 발생장치의 운전시 공기 주입율 0.6 LPM 이상일 경우에는 펌프의 공회전수가 증가하여 유량 변동이 크거나 지속적으로 감소되어 안정적인 운전이 어려움이 있었다. 따라서, 본 실험에서는 공기 주입율 0.3 LPM이 적절하다고 판단하였다.

Table 2. Results of bubble size distribution by airflow rate and pressure

	2 bar	3 bar	4 bar	5 bar
$D_{50}(\mu\text{m})$ (Airflow rate 0.3 LPM)	75.78	61.19	61.19	68.09
	-	-	-	-
$D_{50}(\mu\text{m})$ (Airflow rate 0.6 LPM)	84.33	68.09	68.09	75.78
	-	-	-	-
Fraction of bubble less than $50 \mu\text{m}$ (Airflow rate 0.3 LPM)	0.165	0.308	0.319	0.250
Fraction of bubble less than $50 \mu\text{m}$ (Airflow rate 0.6 LPM)	0.187	0.250	0.166	0.229

3.1.2 가압탱크압력

최적의 가압탱크압력 선정을 위한 실험에서 노즐 D2L0를 설치하여 공기 주입율을 0.3 LPM으로 설정, 밸브가 있는 조건에서 가압탱크압력만 각각 2, 3, 4, 5 bar로 변화시켜 측정하였다. 버블 크기 분포 분석 결과는 Fig. 4와 Table 2에 정리하였는데, 가압탱크압력 2 bar를 제외한 3, 4, 5 bar에서는 실제로 버블 크기 분포에 큰 변화 없었으며, 3 bar 이상에서 더 이상 버블의 크기가 작아지지 않음을 확인 할 수 있었다. 이는 마이크로버블의 크기는 어떤 특정 압력 이상에서 더 이상 작아지지 않으며, 그 최대 압력이 3.5기압이라고 발표한 선행 연구 결과에서도 확인 할 수 있다[8]. 따라서, 본 연구에서는 경제성을 고려한 적정 가압탱크 운전압력을 3 bar로 설정하였다.

3.1.3 밸브 설치에 따른 영향

노즐의 수리 및 노즐 교체시 수조 내액의 유출을 방지하기 위하여 일반적으로 노즐 후단부에 ball type 또는 gate type의 밸브를 설치하여 사용한다. 그러나 노즐을

통과한 버블들이 밸브의 내부에서 충돌하여 더욱 작아지거나, 버블의 뭉침현상으로 더욱 커질수 있는 가능성이 있다. 따라서, 밸브의 유무에 따른 마이크로버블 발생의 영향을 알아보고자 노즐 D2L0를 설치하고 공기 주입을 0.3 LPM, 가압탱크압력 3, 4, 5 bar로 설정 후 노즐 후단부에 연결된 밸브의 유무를 변수로 하여 버블크기 분포를 측정하였다. 실험결과를 Table 3과 Fig. 5에 나타내었다.

Table 3. Results of bubble size distribution by valve

	3 bar	4 bar	5 bar
D ₅₀ (μ m)	61.19	61.19	68.09
(Valve used)	-	-	-
D ₅₀ (μ m)	68.09	68.09	75.78
(Non-valve)	-	-	-
D ₅₀ (μ m)	104.4	61.19	68.09
(Non-valve)	116.2	68.09	75.78
Fraction of bubble less than 50 μ m (Valve used)	0.308	0.319	0.250
Fraction of bubble less than 50 μ m (Non-valve)	0.117	0.277	0.254

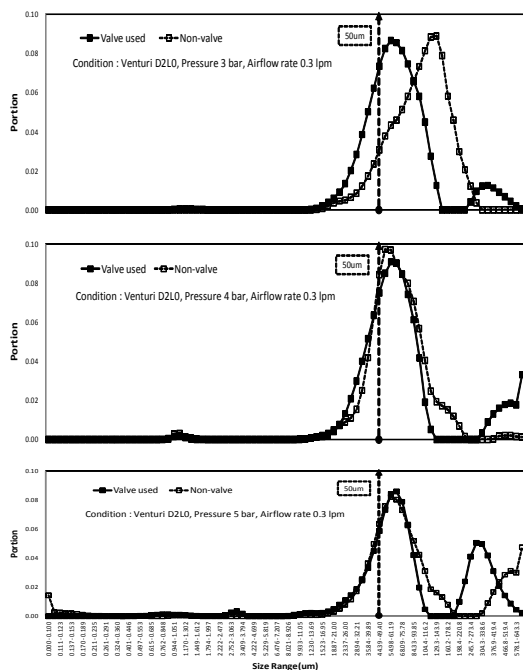


Fig. 5. Bubble size distribution by valve

가압탱크의 압력이 3 bar인 경우를 제외하고 4, 5 bar에서는 밸브 유무에 따라 D₅₀의 변화가 없었으며, 50 μ m 이하의 버블의 분율 또한 유사하였다. 그러나 버블크기

분포를 살펴보면 밸브가 있는 경우 200 μ m 이상의 버블이 다수 관측되었는데, 이는 노즐과 연결된 밸브가 이미 발생된 마이크로버블이 밸브를 통과하고 수조내로 토출되면서 밸브 내부에서 마이크로버블의 “뭉침현상”을 유발하여 버블의 크기가 증가하는데 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 또한, 버블이 토출될 때 출구쪽에서 버블의 크기가 커지면서 버블이 수조 내부에서 순환하지 못하고 바로 상승되는 현상이 관측되었다.

3.2 노즐 제원에 따른 마이크로버블 발생 특성 평가

노즐 제원에 따른 특성 평가를 위하여 사용된 노즐의 제원을 Table 4에 나타내었다. Batch type의 실험에서 최적 운전 조건 선정을 위한 실험의 결과로 도출된 공기 주입을 0.3 LPM, 가압탱크압력 3 bar, 노즐을 직접 수조에 연결하여 실험을 진행하였다.

Table 4. Specification of used venturi nozzle

Nozzle specification	Throat diameter (mm)	Throat length (mm)
D2L0	2	0
D3L0	3	0
D3L15	3	15
D3L20	3	20
D3L30	3	30
D3L50	3	50
D4L0	4	0
D4L15	4	15
D5L15	5	15

3.2.1 노즐 목 직경에 따른 영향

노즐의 목 직경에 따른 버블크기 분포 분석은 노즐 D2L0, D3L0, D4L0로 목 길이 0 mm인 경우와 노즐의 목 길이가 15 mm인 D3L15, D4L15, D5L15로 실험을 진행하였고 그 결과를 Table 5에 요약하였다.

Table 5. Results of bubble size distribution by throat diameter

Nozzle specification	D ₅₀ (μ m)	Fraction of bubble less than 50 μ m
D2L0	104.4 - 116.2	0.117
D3L0	54.98 - 61.19	0.326
D4L0	54.98 - 61.19	0.345
D3L15	54.98 - 61.19	0.383
D4L15	49.40 - 54.98	0.423
D5L15	54.98 - 61.19	0.306

D2L0, D3L0, D4L0 비교 실험의 경우 D2L0를 제외한 D3L0와 D4L0의 버블크기 분포 측정결과 유사한 결과를 보였고, D₅₀과 50 μm 이하 버블의 분율 또한 서로 유사한 경향을 나타내었다. D3L15, D4L15, D5L15 비교 실험의 경우도 모두 버블크기 분포가 유사하며, D₅₀ 또한 서로 유사하나 50 μm 이하 버블의 분율이 D5L15가 D3L15, D4L15와 비교시 상대적으로 낮은 경향을 보이는 것으로 확인되었다. 따라서, D2L0 경우를 제외한 나머지 벤츄리 노즐 목 직경의 크기는 버블크기 분포에 미치는 영향은 상대적으로 낮지만, 노즐의 성능적 측면에서는 벤츄리 노즐 목 직경이 3-4 mm인 경우가 마이크로버블 발생에 최적임을 알 수 있었다.

3.2.2 노즐 목 길이에 따른 영향

노즐의 목 길이에 따른 버블크기 분포 분석은 노즐 D3L0, D3L15, D3L20, D3L30, D3L50으로 노즐을 분류하여 실험을 진행하였으며, 분석 결과를 Table 6에 나타내었다. Table 6에 나타낸 결과를 살펴보면 버블크기 분포는 서로 유사한 경향을 나타냄으로써 노즐 목 길이 증가에 따른 버블크기 분포의 일관성 있는 경향이 없음을 알 수 있었다. 그러나, 노즐의 성능적 측면에서는 노즐 목 길이가 20 mm일 때, 50 μm 이하 버블의 분율이 0.447로 마이크로버블 발생에 최적 조건임을 확인하였다.

Table 6. Results of bubble size distribution by throat length

Nozzle specification	D ₅₀ (μm)	Fraction of bubble less than 50 μm
D3L0	54.98 - 61.19	0.326
D3L15	54.98 - 61.19	0.384
D3L20	49.40 - 54.98	0.447
D3L30	54.98 - 61.19	0.359
D3L50	68.09 - 75.78	0.284

4. 결론

벤츄리 노즐을 이용한 마이크로버블 발생장치의 최적 운전 조건의 검토와 버블크기 분포 분석을 활용한 벤츄리 노즐의 제원별 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 가압탱크의 압력을 증가시켜도 마이크로버블의 크기가 작아지지 않는 “한계압력”은 3 bar임을 확인하였다.

- 2) Lab-scale 실험에서 벤츄리 노즐을 이용한 마이크로버블 발생에 최적 운전조건은 공기 주입율 0.3 LPM, 가압탱크의 압력 3 bar이었다.
- 3) 노즐 후단부에 밸브가 있는 경우 200 μm 이상의 크기가 큰 버블이 측정 되었는데, 이는 발생된 마이크로버블이 노즐과 연결된 밸브를 통과하고 수조 내로 토출되면서 밸브 내부에서 마이크로버블들이 서로 뭉치는데 그 원인이 있는 것으로 판단된다.
- 4) 노즐의 목 직경과 목 길이는 버블크기 분포에 미치는 영향은 적었으나, 노즐 제원에 따른 성능의 차이가 있었다. 본 연구에서 선정된 운전조건 및 사용된 노즐에서 D₅₀과 50 μm 이하 버블 분율만을 고려하였을 때, 마이크로버블 발생에 가장 최적인 노즐 조건은 목 직경 3-4 mm와 목 길이 20 mm인 D3L20인 것으로 판단된다.

References

- [1] R. Parmar, S. K. Majumder, “Microbubble generation and microbubble-aided transport process intensification-A state-of-the-art report”, Chemical Engineering and Processing, 64, pp. 79-97, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2012.12.002>
- [2] American Water Works Association, “Water Quality and Treatment 5th, Edition”, McGraw-Hill Professional, 1999.
- [3] S. Liu, Q. Wang, H. Ma, P. Huang, J. Li, T. Kikuchi, “Effect of micro-bubbles on coagulation flotation process of dyeing wastewater”, Separation and Purification Technology, 71, pp. 337-346, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2009.12.021>
- [4] M. RB, R. MA, “Characterization of micro-bubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by a non-intrusive image analysis system and tracer tests”, Water science & technology, 61(1), pp. 253-262, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2010.784>
- [5] S. C. Park, H. Y. Oh, M. K. Chung, S. L. Song, Y. H. Ahn, “An Effect of the Micro Bubble Formation Depending on the Saturator and the Nozzle in the Dissolved Air Flotation System”, Journal of the Korean Society of Environmental Engineers, 35(12), pp. 929-936, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.4491/KSEE.2013.35.12.929>

- [6] A. M Al Taweel, A. O Idhbeaa, A. Ghanem, "Effect of electrolytes on interphase mass transfer in microbubble-sparged airlift reactors", Chemical Engineering Science, 100, pp. 474-485, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2013.06.013>
- [7] H. J. Park, S. Dockko, "Temperature effect in the precess of DAF as pretreatment of SWRO", Journal of the Korean Society of Water and Wastewater, 26(6), pp. 807-813, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11001/jksww.2012.26.6.807>
- [8] M. Y. Han, Y. H. Park, J. Lee, J. S. Shim, "The Size Characteristics of Microbubbles in DAF According to Pressure Condition", Journal of the Korean Society of Water and Wastewater, 16(2), pp. 177-182, 2002.

임 지 영(Ji-Young Lim)

[준회원]



- 2015년 2월 : 인천대학교 건설환경 공학과 (공학석사)
- 2015년 3월 : 인천대학교 건설환경 공학과 (박사과정)

<관심분야>
물환경, 환경에너지

김 현 식(Hyun-Sik Kim)

[준회원]



- 2010년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 도시환경공학부 환경공학전공

<관심분야>
물환경, 환경에너지

박 수 영(Soo-Young Park)

[정회원]



- 1997년 8월 : 인하대학교 환경공학과 (공학박사)
- 2013년 11월 ~ 현재 : (주)에스비이앤이(전무이사)

<관심분야>
물환경, 환경에너지

김 진 한(Jin-Han Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 인하대학교 화학공학과 (공학박사)
- 1982년 3월 ~ 1985년 5월 : 한국화학연구원 연구원
- 1985년 9월 ~ 2010년 2월 : 인천전문대학 조교수, 부교수, 교수
- 2010년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 도시환경공학부 교수

<관심분야>
물환경, 환경에너지