

ORIGINAL ARTICLE

식물-미생물전기화학 기반의 미활용 에너지 회수 기초 연구

유재철 · 신춘환^{1)*}

부산대학교 사회환경시스템 공학과, ¹⁾동서대학교 에너지환경 공학과

Basic Study for Harvesting Unused Energy based on Plant-Microbial Electrochemical Technology

Jaecheul Yu, Choon Hwan Shin^{1)*}

Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

¹⁾Department of Energy & Environmental Engineering, Dongseo University, Busan 47011, Korea

Abstract

In this study, we evaluated the energy production from plant-microbial fuel cells using representative indoor plants, such as *Scindapsus aureus* and *Clatha minor*. The maximum power density of microbial fuel cell (MFC) using *S. aureus* (3.36 mW/m²) was about 2 times higher than that of the MFC using *C. minor* (1.43 mW/m²). It was confirmed that energy recovery is possible using plant-MFCs without fuel. However, further research is needed to improve the performance of plant-MFCs. Nevertheless, plant-MFCs have proved their potential as a novel energy source to overcome the limitations of the conventional renewable energy sources such as wind power and solar cells, and could be employed to a power source for the sensor in charge of the fourth industrial revolution.

Key words : Plant, Microbial fuel cell, Renewable energy, *Scindapsus aureus*, *Clatha minor*

1. 서론

세계 에너지는 글로벌 경제성장과 함께 꾸준히 증가하여 15년 기준 136억toe를 공급하고 있으며, 화석연료, 원자력, 신재생에너지원이 각각 81.5%, 4.9%, 13.6%를 차지하고 있다(KEA, 2018). 하지만, 지구온난화 및 화석연료 고갈에 따른 에너지 부족에 대한 글로벌 위기에 직면하고 있으며, 많은 국가에서는 에너지 대책 마련에 주력하고 있다. 국내에서도 기후변화 적응 및 에너지 자

립전락을 위해 온실가스 감축, 탈석유에너지 자립강화와 기후변화 적응 전략 강화의 정책방향을 수립하여 수행해 오고 있다(KEA, 2018).

에너지 하베스팅(Energy Harvesting)은 주변에서 버려지는 미소량의 물리적, 화학적, 전기적 미활용 에너지를 수집하여 이용 가능한 전기 또는 에너지 등으로 수집하여 이용하는 기술로서, 미국 등의 선진국에서는 미활용 미량에너지를 수집 활용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Priya and Daniel, 2009).

Received 5 December, 2018; Revised 18 January, 2019;

Accepted 8 February, 2019

*Corresponding author: Choon Hwan Shin, Department of Energy & Environmental Engineering, Dongseo University, Busan 47011, Korea

Phone: +82-51-320-1787

E-mail: 6116shin@gdsu.dongseo.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

최근에서, 미생물을 촉매로 이용하여, 유/무기물의 산화환원반응을 통해서 전기 및 유용물질을 회수할 수 있는 미생물연료전지가 관심을 받아왔으며, 하수처리, 수소생산, 해수담수화 등 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다(Chue et al., 2012; Yu et al., 2012; Logan et al., 2015). 일반적으로 미생물연료전지는 산화전극부와 환원전극부로 구성되어 있으며, 분리막으로 구분되어 있다. 산화전극부에서는 미생물에 의하여 유기물의 산화반응이 일어나고, 전자와 수소이온이 발생한다. 전자와 수소이온은 각각 외부도선과 분리막을 통해서 환원전극부로 이동하게 된다. 환원전극부로 이동한 전자와 수소이온은 산소 등과 같은 전자수용체와 최종환원반응을 수행하게 된다. 이러한 일련의 연속반응을 통해서, 전기 또는 유용물질을 회수할 수 있다(Oh et al., 2010; Rabaey and Rozendal, 2010).

특히, 식물의 광합성의 결과로 생성되는 유기물을 이용하여, 전기를 생산할 수 있는 식물-미생물연료전지도 많은 관심을 받고 있다(Rosenbaum et al., 2010; Deng et al., 2012). 부레옥잠(Mohan et al., 2011), 우산식물(Klaisongkram, 2014), 공심채(Liu et al., 2013), 호밀풀(Habibul et al., 2016), 벼(Kaku et al., 2008; Bombelli et al., 2013; Kouzuma et al., 2013; Arends et al., 2014), 벼과식물(Helder et al., 2010; Trimmers et al., 2010; Chiranjeevi et al., 2012), 부들 등을 이용해서 5.9 - 225 mW/m² 전력밀도를 생산한다고 보고하고 있다. 하지만, 국내에서는 벼과식물을 이용한 연구(Ahn et al., 2014)를 제외하고는 보고된 사례가 없다.

따라서, 본 연구에서는 벼과식물 이외에 국내에서 쉽게 재배할 수 있는 실내용 식물을 이용하여 미활용에너지 회수 가능성을 평가하고자 하였으며 이러한 결과를 미생물 전기화학 기술개발 및 미래 에너지 자원 확보를 위한 기초 자료로 제공하고자 한다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 식물 선정

본 연구에서는 국내에서 쉽게 구할 수 있고, 유지관리가 쉬운 습지 식물중에서 동의나물(학명: *Clathra minor* NAKAI)과 스킨답서스(학명: *Scindapsus aureus*)의 2종을 선정하였다. 동의나물은 전국적으로 분포하고 있으며, 습지나 물가에 나는 미나리아재비과에 속하는 여러해살이 식물로서 흰 수염뿌리를 많이 가지고 있다. 스킨답서스는 천남성과에 속하는 반음지 식물로 밝은 실내에서 잘 자라며, 수경재배도 가능하다.

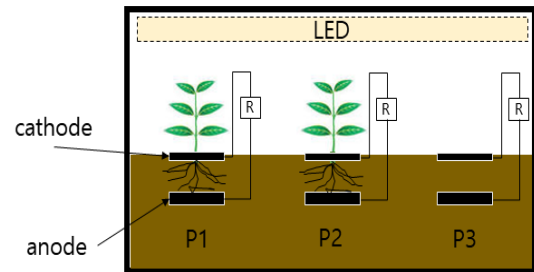


Fig. 1. Diagram of plant-microbial fuel cell (P-MFC) used in this study; R: external resistance.

2.2. 식물-미생물연료전지 구축 및 운전 조건

본 연구에서 사용된 미생물전기화학 장치는 LED 조명(450~660 nm)이 설치된 직사각형태의 반응기(690 mm × 620 mm × 360 mm) (Fig.1) 에서 약 10 cm 정도 될 수 있도록 흙을 쌓고, 식물을 식중하였다(Table 1). 산화전극으로는 흑연펠트(Graphite felt)(GF-20-5F, Nippon Carbon, Japan)(50 × 50 mm)를 이용하였으며, 환원전극으로는 백금으로 코팅된 탄소천(Carbon cloth) (SGL Group Carbon, Co., Germany)(50 × 50 mm)을 사용하였다. 산화전극은 토양 표면에서 3 cm 아래에 두었으며, 환원전극은 대기중에 노출될 수 있도록 하였다.

Table 1. Operating conditions of plant-Microbial fuel cell (P-MFC) in this study

P-MFC	P1	P2	P3
Plant	<i>C. minor</i>	<i>S. aureus</i>	No
Anode	Graphite felt	Graphite felt	Graphite felt
Cathode	Carbon cloth	Carbon cloth	Carbon cloth

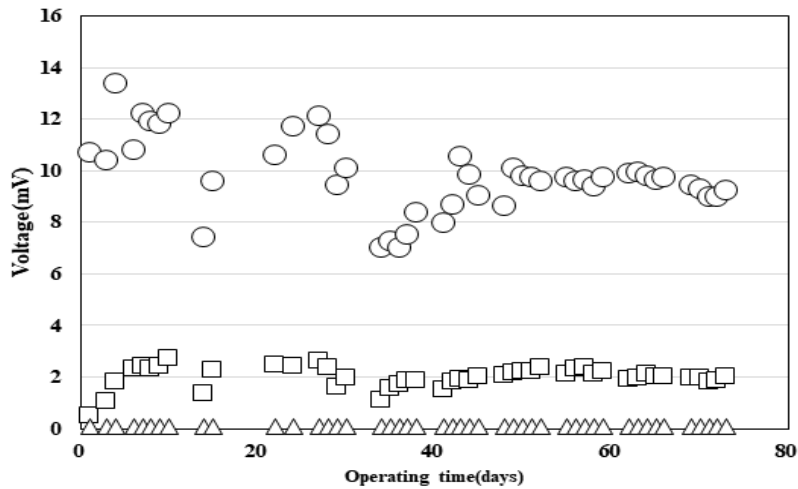


Fig. 2. Voltage generation of P1(MFC using *C. minor*, □) and P2(MFC using *S. aureus*, ○); △: control(MFC without plant).

대조군으로 식물이 없는 조건에서 전극을 설치하여 연결하였다. 산화전극과 환원전극은 외부저항 100Ω으로 연결하였으며, 상온에서 운전되었다.

2.3. 전기발생량 측정 및 계산

전압계를 이용하여, 매일 1회씩 전압발생량(mV)을 측정하였다. 최대전력밀도값(mW/m²)을 구하기 위하여, 외부저항을 1000~5Ω으로 변화하면서 전압 및 전류값을 측정하였다. 또한 에너지 회수율을 계산하기 위하여 아래 수식을 사용하였다. pH, 전기전도도, 및 습도는 각각 pH 및 전기전도계와 습도계를 이용하여 측정하였다.

$$E_r = \frac{\text{전력밀도} \times \text{산화전극부 면적}}{A_s \times \text{잎면적} \times P_e \times R_p \times R_a}$$

E^r: 에너지 회수율

P^e: 광합성 효율(4-6%)

R^p: 광합성으로 뿌리에 저장되는 탄수화물의 비율

R^a: 미생물이 이용 가능한 유기물 비율(20%)

A^s: 연평균 태양에너지 이용량(170 W/m²)

3. 결과 및 고찰

3.1. 전압발생량 변화

외부저항 100Ω에서 동의나물을 이용하는 P1의 전압

발생량은 약 1.98±0.6 mV의 전압발생량을 보였으며, 스킨답서스를 이용한 P2의 전압발생량은 약 7.91±5.9 mV으로 약 5배정도 높게 나타났다(Fig. 2). 또한, 식물이 없는 대조군에서는 0.1 mV의 이하의 전기가 발생하는 결과로부터 식물의 광합성으로 발생하는 유기물이 전기 생산에 이용된 것으로 판단이 가능하다. 이러한 판단의 근거는 동일한 전극을 사용하였기 때문에, 식물에 따라서 이용할 수 있는 기질의 차이 때문인 것에서 찾을 수 있다. 선행연구에서도 스킨답서스를 이용한 MFC의 최대 전압 발생량은 약 0.6 V으로, 용혈수를 이용하는 MFC의 최대 전압발생량(0.4 V)보다 약 50% 이상 높게 나타났는데, 이는 식물뿌리 미생물의 기질 이용도와 미생물의 농도 차이로 인해서 식물에 따라서 전압발생량의 차이가 발생할 수 있다고 보고하였다(Sarma and Mohanty, 2018). 본 연구에서도 식물종류에 따른 미생물의 기질 이용도 및 농도차이 때문에 전압발생량의 차이가 발생한 것으로 사료된다.

3.2. 전력밀도 및 에너지 회수율

전압-전류곡선을 통해서 P1과 P2의 최대전력밀도와 내부저항을 구하였다 (Fig. 3). P1과 P2의 내부저항은 약 220 Ω으로 유사하게 나타났으나, 열린회로의 전압값은 P2(0.98 mV)가 P1(0.68 mV)보다 약 40%이상 높게 나타났다. 또한, P1의 최대전력밀도는 약 1.43 mW/m²

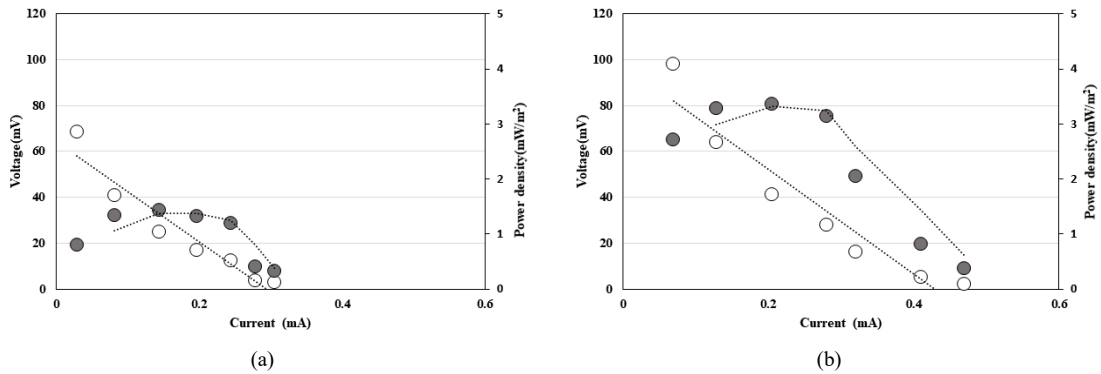


Fig. 3. Power density (●) and voltage-current (○) curves of P1(MFC using *C. minor*)(a) and P2(MFC using *S. aureus*)(b).

(전극면적기준)으로 나타났으며, P2의 최대전력밀도는 약 3.36 mW/m²으로 P1보다 2배 이상 높게 나타났다. 또한 낮은 전력밀도로 인하여 에너지 회수율도 1%이하로 낮게 나타났다.

P1과 P2의 최대전력밀도값은, 벼를 이용하는 미생물 연료전지의 최대전력밀도 값(7.3 mW/m²) (Ahn et al., 2014)과 스킨답서스를 이용하는 미생물연료전지의 최대 전력밀도 (15 mW/m²) (Sama and Mohanty, 2018)보다 상대적으로 낮게 나타났다. 특히, 스킨답서스를 이용한 미생물연료전지의 경우, 추가적으로 탄소원이 공급되었으며(COD 167-176 mg/L), 초음파 처리를 통해 전극 표면이 개질된 전극을 사용하였기 때문에 전력밀도가 높게 나온 것으로 사료된다. 본 연구의 경우, 식물이 없는 조건(22 mg/L)에 비해 COD 농도는 33-55 mg/L 이하로 높게 나타났지만, 선행연구(Sama and Mohanty, 2018)에서 보고된 COD 농도보다 상대적으로 매우 낮았기 때문에, 전력밀도값도 낮게 발생한 것으로 사료된다.

3.3. 식물-미생물전기화학 기술에 대한 적용

3.3.1. 식물-미생물연료전지의 상용화

국내의 경우, 국립농업과학원에서 국내최초로 벼를 이용한 식물-미생물연료전지 연구를 수행한 보고는 있으나 (Anh et al., 2014), 국내에서는 비교적 관련 연구가 활발히 진행되지 않고 있다. 반면, 세계 최초로 식물-미생물연료전지 기술을 발전한 네덜란드의 경우, P-MFC를 주로 연구하는 Plane-e Co. (<http://www.plant-e.com>)에서는 P-MFC를 공원내 조명장치로 적용하거나, 하천변에 부유형태로 설치하여 수질정화 및 하천조명전원으로 활용

하기도 하였다. 이외에도 소형 P-MFC를 가정용 및 교육용으로 판매하고 있으며, 고속도로 논, 숲, 습지 등을 이용하여 전기를 대량 생산하는 연구를 진행하고 있다. 하지만, 식물-미생물연료전지의 상용화를 위해서 안정적인 전기에너지 회수 가능성이 확보되어야 하며, 전극의 안정성과 내구성이 장기간 유지될 수 있는 재료의 개발이 필요하다.

3.3.2. 환경적 영향 평가

연료 없이도 전기에너지 생산이 가능한 식물-미생물 연료전지는 식물이나 환경조건에 따라서 발생하는 전력량은 차이가 있을 수 있지만, 현재 식물재배면적 m²당 약 0.4 W의 전력이 발생하고 있으며, 앞으로 3.2 W/m² 이상까지 향상될 수 있을 것으로 기대하고 있다(Helder, 2010). 비록, 식물-미생물연료전지에서 발생하는 전력발생량은 기존의 풍력(5-7.7 W/m²)이나 태양광(4.5-7.5 W/m²)보다 상대적으로 낮은 수준이지만(Ahn et al., 2014), 에너지 생산시 소음이 발생하지 않고, 기상조건에 큰 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. 또한, 식물 성장에도 전혀 영향이 없기 때문에 기존의 신재생에너지원이 가지고 있는 문제점을 극복할 수 있는 새로운 에너지원이 될 수 있을 것이다. 또한, 이론상 식물이 있는 곳이라면 어디든 설치가 가능하기 때문에, 4차 산업혁명을 책임지고 있는 센서의 전력원으로도 충분히 활용이 가능할 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구는 국내에서 쉽게 볼 수 있는 실내 식물을 대상

으로 전기에너지 회수 기초 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

가. 외부저항 100Ω에서 동의나물을 이용하는 미생물 연료전지(P1)의 전압발생량(1.98±0.6 mV)에 비해 스킨답서스를 이용하는 미생물연료전지(P2)의 전압발생량(7.91±5.9 mV)은 약 5배정도 높게 나타났다. 반면에 식물이 없는 대조군에서는 0.1 mV의 이하의 전기가 발생하였기 때문에 식물의 광합성으로 발생하는 유기물이 전기 생산에 이용된다는 사실을 확인 할 수 있었다.

나. P1과 P2의 내부저항은 약 220 Ω으로 유사하게 나타났다. 열린회로의 전압 값은 P2(0.98 mV)가 P1(0.68 mV)보다 약 40%이상 높게 나타났으며 P1의 최대전력밀도는 약 1.43 mW/m²(전극면적기준), P2의 최대전력밀도는 약 3.36 mW/m²으로 높게 나타났다. 하지만, 상대적으로 낮은 전력밀도로 인하여 에너지 회수율도 1%이하로 낮게 나타났으며, 이를 개선하기 위한 추가적인 연구가 필요하겠다.

다. 식물-미생물연료전지에 의한 에너지 생산시 소음이 발생하지 않고 기상조건에 큰 영향을 받지 않는다는 장점이 있으며 식물 성장에도 악영향을 끼치지 않을 뿐만 아니라 이론상 식물이 있는 곳이라면 어디든 설치 가능하기 때문에 에너지원으로 충분히 활용이 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 및 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2015R1C1A1A01054204 및 2018R1D1A1B07046741).

REFERENCES

- Ahn, J. H., Jeong, W. S., Choi, M. Y., Kim, B. Y., Song, J., Weon, H. Y., 2014, Phylogenetic diversity of dominant bacterial and archaeal communities in plant-microbial fuel cells using rice plants, *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24(12), 1707-1718.
- Arends, J. B., Speeckaert, J., Bolndeel, E., De Vriese, J., Boeckx, P., Verstraete, W., Rabaey, K., Boon N., 2014, Greenhouse gas emissions from rice microcosms amended with a plant microbial fuel cell, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98, 3205-3217.
- Bombelli, P., Dennis, R. J., Felder, F., Cooper, M. B., Iyer, D. M. R., Royles, J., Harrison, S. T., Smith, A. G., Harrison, C. J., Howe, C. J., 2016, Electrical output of bryophyte microbial fuel cell systems is sufficient to power a radio or an environmental sensor, *Royal Society Open Science*, 3(10), 160249
- Chiranjeevi, P., Mohanakrishna, G., Mohan, S. V., 2012, Rhizosphere mediated electrogenesis with the function of anode placement for harnessing bioenergy through CO₂ sequestration, *Bioresource Technology*, 124, 364-370.
- Chun, J. E., Yu, J. C., Park, Y. H., Seon, J. Y., Cho, C. J., Lee, T. H., 2012, Acceleration of biological denitrification by using bioelectrochemical reactor, *Journal of the Environmental Sciences*, 20(8), 989-996.
- Deng, H., Chen, Z., Zhao, F., 2012, Energy from plants and microorganisms: Progress in plant-microbial fuel cells, *ChemSusChem*, 5, 1006-1011.
- Habibul, N., Hu, Y., Wang, Y. K., Chen, W., Yu, H. Q., Sheng, G. P., 2016, Bioelectrochemical chromium(VI) removal in plant-microbial fuel cells, *Environmental Science and Technology*, 50, 3882-3889.
- Helder, M., 2012, Design criteria for the plant-microbial fuel cell, PhD. thesis, Wageningen University, Netherlands.
- Helder, M., Strik, D. P., Hamelers, H. V., Kuhn, A. J., Block, C., Buisman, C. J., 2010, Concurrent bioelectricity and biomass production in three plant-microbial fuel cells using *Spartina anglica*, *Arundinella annala* and *Arundo donax*, *Bioresource Technology*, 101, 3541-3547.
- Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., Watanabe, K., 2008, Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79, 43-49.
- Klaisongkram, N., Holasut, K., 2015, Electricity generation of Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) using *Cyperus Involucratus* R, *KKU Engineering Journal*, 42, 117-124.
- Korea Energy Agency(KEA), 2018, 2018 Korea Energy Agency Handbook.
- Kouzuma, A., Kasai, T., Nakagawa, G., Yamamuro, A.,

- Abe, T., Watanabe, K., 2013, Comparative metagenomics of anode-associated microbiomes developed in rice paddy-field microbial fuel cells, *PLoS One*, 8, e77443
- Liu, S., Song, H., Li, X., Yang, F., 2013, Power generation enhancement by utilizing plant photosynthate in microbial fuel cell coupled constructed wetland system, *International Journal of Photoenergy*, 1-10.
- Logan, B. E., Wallack, M. J., Kim, K., He, W., Feng, Y., Saikaly, P. E., 2015, Assessment of microbial fuel cell configurations and power densities. *Environmental Science & Technology Letters*, 2(8), 206-214.
- Mohan, S.V., Mohanakrishna, G., Chiranjeevi, P., 2011, Sustainable power generation from floating macrophytes based ecological microenvironment through embedded fuel cells along with simultaneous wastewater treatment, *Bioresource Technology*, 102(14), 7036-7042.
- Nitisoravut, R., Regmi, R., 2017, Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 81-89.
- Oh, S. T., Kim, J. R., Premier, G. C., Lee, T. H., Kim, C., Sloan, W. T., 2010, Sustainable wastewater treatment: how might microbial fuel cells contribute. *Biotechnology Advances*, 28(6), 871-881.
- Priya, S., Daniel, J. I. (ed). 2009, *Energy harvesting technologies*, New York: Springer.
- Rabaey, K., Rozendal, R. A., 2010, Microbial electrosynthesis-revising the electrical route for microbial production, *Nature Reviews Microbiology*, 8(10), 706-717.
- Rosenbaum, M., He, Z., Angenent, L. T., 2010, Light energy to bioelectricity: Photosynthetic microbial fuel cells, *Current Opinion in Biotechnology*, 21(3), 259-264.
- Sarma, P. J., Mohanty, K., 2018, *Epipremnum aureum* and *Dracaena braunii* as indoor plants for enhanced bioelectricity generation in a plant microbial fuel cell with electrochemically modified carbon fiber brush anode, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 126(3), 404-410.
- Trimmers, R. A., Strik, D. O., Hamelers, H. V., Buisman, C. J., 2010, Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 86, 973-981.
- Yu, J., Seon, J., Park, Y., Cho, S., Lee, T., 2012, Electricity generation and microbial community in a submerged-exchangeable microbial fuel cell system for low-strength domestic wastewater treatment. *Bioresource technology*, 117, 172-179.

• 유재철, 부산대학교 사회환경시스템공학과 연구교수
yjcall0715@pusan.ac.kr
• 신춘환, 동서대학교 에너지환경공학과 교수
6116shin@gdsu.dongseo.ac.kr