

저생 미생물 연료전지(BMFC)의 성능에 미치는 발효 유기물 첨가 효과

이미화 · 양설화 · 김영숙* · 추천호* · 박권필†

순천대학교 화학공학과
57922 전남 순천시 매곡동 315
*(주)ETIS

10122 경기도 김포시 고천읍 풍곡리 431-1
(2022년 2월 4일 접수, 2022년 5월 25일 수정본 접수, 2022년 6월 20일 채택)

Effect of Adding Fermented Organic Matter on the Performance of Benthic Microbial Fuel Cell (BMFC)

Mi-Hwa Lee, Seol-Hwa Yang, Young-Sook Kim*, Cheun-Ho Chu* and Kwonpil Park†

Department of Chemical Engineering, Suncheon National University, 315 Maegok-dong, Suncheon, Jeonnam, 57922, Korea

*ETIS Co, Punggok-ri, Gochon-eup, Gimpo-si, Gyeonggi-Do, 10122, Korea

(Received 4 February 2022; Received in revised from 25 May 2022; Accepted 20 June 2022)

요 약

저생 미생물 연료전지(BMFC)는 바다나 호수의 뼤 속에서 저생 미생물이 유기물을 분해하면서 발생시키는 전기를 이용하는 친환경적인 에너지 변환장치이다. 본 연구에서는 갯벌에 유입되는 생활 폐수가 저생 미생물 연료전지 성능에 어떤 영향을 주는지 파악하고자, 음식물에 들어가는 유기물들을 발효시켜 갯벌과 혼합해서 BMFC 성능을 비교검토 하였다. 박력분과 비타민(B₂, B₆, B₁₂, C, D, E)이 많이 함유된 음식물을 발효시켜 첨가함으로써 BMFC 성능을 49% 향상시켰다. 발효 유기물의 양이 증가할수록 최고 출력밀도가 증가하였고, 25~29일 발효시킨 발효 유기물이 BMFC에 최적임을 보였다.

Abstract – A benthic microbial fuel cell (BMFC) is an eco-friendly energy conversion device that uses electricity generated by benthic microorganisms decomposing organic matter in the mud of the sea or lake. In this study, in order to understand how domestic wastewater flowing into tidal flats affects the performance of BMFC. BMFC performance was compared and reviewed by fermenting organic substances in food and mixing them with tidal flats. Performance of the BMFC was improved by 49% by adding fermented food rich in vitamins (B₂, B₆, B₁₂, C, D, E) and soft flour. The maximum power density increased as the amount of fermented organic matter increased, and it was shown that the fermented organic matter fermented during 25~29 days was optimal for BMFC.

Key words: BMFC, Performance, Organic matter, Fermenting, Vitamins

1. 서 론

지속 가능한 자원으로서 중요성이 더해가는 수자원의 오염은 전 세계적으로 심각한 문제로 부각되고 있다[1]. 수중의 침전물은 오염물의 흡수원(sink)이자 잠재적으로 장기간에 걸쳐 오염물을 배출하는 배출원(source)이 된다. 따라서 수중 퇴적물의 정화는 수질 환경개선의 핵심적인 연결 고리라고 할 수 있다.

수중 퇴적물 처리 방법으로 물리화학적 방법은 준설(dredging),

오존화(ozonation) 및 전기 화학적 분해법 등이 있는데 고비용과 고 에너지 소비 때문에 광범위하게 적용하기 어려운 점이 문제이다 [2,3]. 물리화학적 방법에 비하여, 미생물의 대사 활성에 기초한 생물학적 정화 방법이 저비용 및 높은 효율성 때문에 많이 연구 개발 되고 있고[4,5], 생물학적 정화 방법 중 하나로서 수중의 퇴적물을 이용하는 저생 미생물 연료전지(Benthic Microbial Fuel Cell, BMFC)가 최근에 많은 관심을 끌고 있다. BMFC는 미생물 연료전지(Microbial Fuel Cell, MFC)의 일종으로, MFC의 연료원인 anode가 수중의 퇴적물인 것이 BMFC라고 할 수 있다. MFC는 고분자전해질 연료전지(Polymer Electrode Membrane Fuel Cell, PEMFC)와 모두 동일한데, 다른 점 하나는 anode에 수소를 공급하는 대신 미생물과 유기물을 공급하여 전기를 발생시키는 에너지 변환장치이다. MFC는 미생물이 유기물을 분해하면서 전자와 프로톤을

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: parkkp@sunchon.ac.kr

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.

생성해 PEMFC의 백금 촉매 역할을 하는 것이다. 미생물이 유기물을 산화시킬 때 발생하는 전자는 미생물 세포막에 존재하는 일련의 전자전달계를 경유하면서 ATP(Adenosine Tri-Phosphate) 형태의 에너지를 생산하게 되고, 전자전달계를 빠져 나온 전자는 최종 전자수용체(Terminal Electron Acceptor, TEA)를 환원시키면서 대사 작용이 완성된다[5]. 일부 미생물은 전자를 체 외에 존재하는 금속산화물 같은 TEA로 이동시킬 수 있다. 이런 미생물은 전자방출균(exoelectrogen)이라 하며, 이 미생물이 MFC에서 촉매로 사용된다. 이 과정에서 MFC는 오폐수 등의 유기물을 분해하면서 폐수처리도 하는 친환경 공정이라고 할 수 있다[6]. BMFC의 anode 재질로 graphite[7], stainless steel[8], carbon cloth[9], modify carbon[10]가 연구되었다. 성능을 향상시키기 위해 백금담지 cathode 전극[11,12], fouling을 방지하기 위한 bio film cathode[13,14], metal oxide composite[15] 등이 많이 연구되었다. 본 연구에서는 anode와 cathode 전극 모두에 비교적 저가이고 갯벌에 적합한 carbon cloth를 사용했다.

본 연구에서는 갯벌에 유입되는 생활 폐수가 BMFC 성능에 어떤 영향을 주는지 파악하고자, 음식물에 들어가는 유기물들(박력분과 비타민 B₂, B₆, B₁₂, C, D, E가 다량 함유된 음식물들)을 발효시켜 갯벌과 혼합해서 BMFC 성능을 비교검토 하였다.

2. 실험

Anode와 cathode 전극은 모두 carbon cloth(Toyobo Co, XF30A, Japan)를 사용했다. 염분에 의한 부식 방지를 위해 은선을 리드선으로 전극과 연결하였다. 갯벌(Sediment) 시료와 해수는 순천만 해변과 순천시 별량면 학산리에서 채취하여 냉장 상태로 운반하고 냉장 보관하면서 실험을 진행하였다. 시료는 체에 걸러서 갯벌을 제외한 고형 물질은 걸러내고 실험했다. 전 논문[12]의 BMFC와 같이, 반응기의 밑바닥에 anode 전극을 깔고 갯벌 시료는 반응기의 6 cm 높이까지 채웠고, 뿔 위에 거즈를 깔고 물을 추가해 반응기 바닥에서 수면까지 총 높이는 9 cm였다. Cathode 전극을 수면 위에 놓고 그 위에 버블러를 위치시킨 후 충분한 양의 공기를 공급하였다. 색도 저항을 이용하여 시간별로 저항의 변화에 따른 전압을 측정하여

Table 1. Composition of waste food and major vitamin components contained in each food

Waste Food	Main Vitamin	Content (wt%)
Spinach	B ₂	5.9
Banana	B ₆	5.9
Milk	B ₁₂	5.9
Lemon	C	5.9
Peanut	D	5.9
Dried squid	E	5.9
Beef Extract	B ₆	5.9
Soft flour	B ₂	58.7

전류와 출력밀도를 계산하였다.

해수의 밀물/썰물(조수, Tide) 현상이 BMFC에 미치는 영향을 확인하기 위해 12시간마다 cathode 위 해수를 제거하고 채우는 실험을 반복하면서 BMFC 성능을 측정하였다.

Table 1과 같이 글루텐 성분이 소량 들어간 박력분과 비타민 B₂, B₆, B₁₂, C, D, E가 다량 함유된 음식물을 분쇄 후 혼합하여, 상온에서 호기성 조건으로 상온에서 발효시켰다. 일정 시간 발효한 발효 유기물을 갯벌과 혼합해 BMFC에 넣고 BMFC 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 조수 효과 및 비타민 첨가 효과

해변의 갯벌에 밀물/썰물이 반복되는 효과가 BMFC에 어떻게 작용하는지 확인하기 위한 실험으로, cathode 위까지 해수가 차 있을 때(flood, 밀물)와 cathode 위 해수가 제거되었을 때(ebb, 썰물) 성능을 측정하였다. Fig. 1에 나타난 전류-출력(I-P) 곡선에서 볼 수 있듯이 밀물일 때보다 썰물일 때 BMFC 성능이 더 높다. 건조가 되면서 호기성 균의 활성이 높아진 효과와 고분자 연료전지처럼 공기가 cathode에 접근하기가 용이해서 산소의 환원반응 속도가 향상되었기 때문이라고 생각한다[14].

갯벌에 유입되는 유기물에 의해 BMFC의 성능이 향상될 수 있는지 검토하기 위해 실험한 결과를 Fig. 2에 나타냈다. 유기물로 밀가루 중 글루텐 함량이 적은 박력분(soft flour)을 갯벌에 4.0 wt% 첨

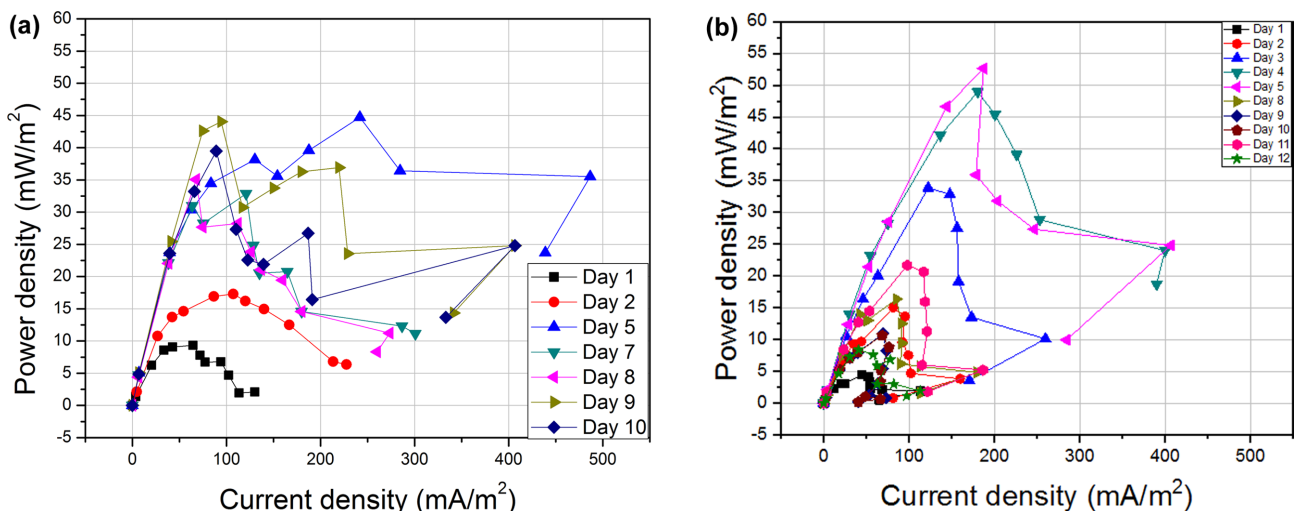


Fig. 1. Comparison of I-P curve of BMFC during a) flood b) ebb.

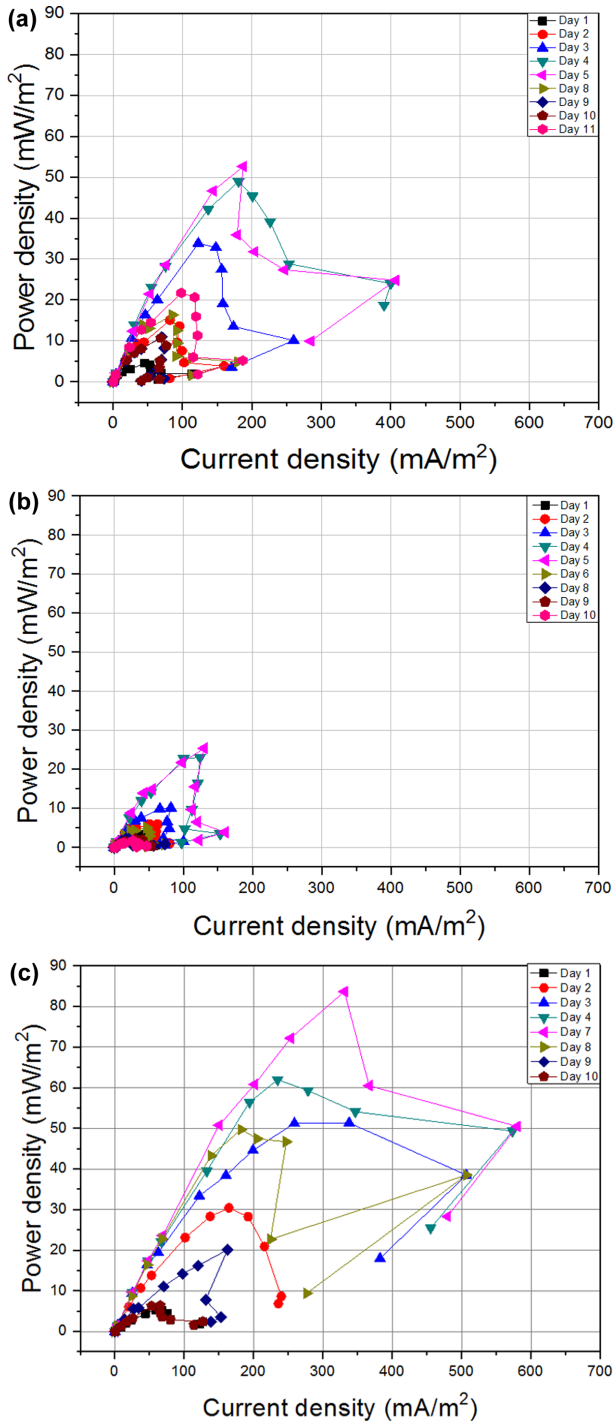


Fig. 2. Comparison of I-P curve of BMFC with a) mud only b) 4% soft flour c) 4% soft flour + Vitamins.

가했다. 최고 출력밀도를 비교했을 때 박력분을 첨가함으로써 5일 후 최고 출력밀도가 57 mW/m^2 에서 25 mW/m^2 으로 감소했다. H^+ 이온을 발생시킬 수 있는 유기물을 첨가했지만 BMFC 성능이 오히려 감소해서 미생물의 활성을 향상시켜 줄 성분이 필요해서 복합 비타민(B_2 , B_6 , B_{12} , C, D, E)을 추가했다. 그 결과 3일만에 최고 출력밀도가 50 mW/m^2 이상이 되었고, 7일에 85 mW/m^2 의 최고 출력밀도를 얻음으로써 갯벌만 있는 BMFC보다 성능을 49% 향상시킬 수 있었다.

3-2. 발효 유기물 첨가 효과

BMFC의 성능향상을 위해 비타민의 필요성을 확인한 후 복합 비타민을 대신할 음식물을 Table 1와 같이 선택하여 분쇄 후 혼합해 발효시켰다. 비타민을 대신할 음식물이나 박력분은 생활 폐수로부터 올 수 있는 성분들이므로 폐음식물이 해변 갯벌에 유입되었을 때 BMFC가 전기에너지를 생산하면서 폐 유기물을 제거하는 친환경적인 에너지 변환 공정이 될 수 있다. Fig. 3에 비타민과 발효된 유기물이 첨가되었을 때 BMFC I-V를 비교했다. 발효 유기물이 첨가되었을 때 8일차에 전류밀도가 $1,600 \text{ mA/m}^2$ 까지 발생해 비타민의 700 mA/m^2 보다 2배 이상 증가했다. 최고 출력밀도를 비교하면 복합 비타민과 발효 유기물 각각 70 , 300 mW/m^2 으로 발효 유기물이 4배 이상 높은 값을 보였다. 발효 유기물에 포함된 비타민뿐만 아니라 다른 성분들도 BMFC 구동에 영향을 준 결과라고 판단된다. 발효 유기물의 양을 변화시키며 발효 유기물의 효과를 실험하여 Fig. 4에 나타냈다. 발효 유기물의 양을 3.0~6.6 wt% 범위에서 실험했을 때, 발효 유기물의 양이 증가할수록 최고 출력밀도가 증가함을 보이고 있다(Fig. 4(b)). 전기에너지를 발생시키는 기간도 28일에서 40일로 발효 유기물양이 증가하면서 길어졌다. 누적된 전기 에너지를 합산했을 때 1,588 J에서 3,725 J로 발효 유기물 양 증가에 따라 증가함을 보였다. 40 g(3.0 wt%)을 제외하고 최고 개회로 전압(Open Circuit

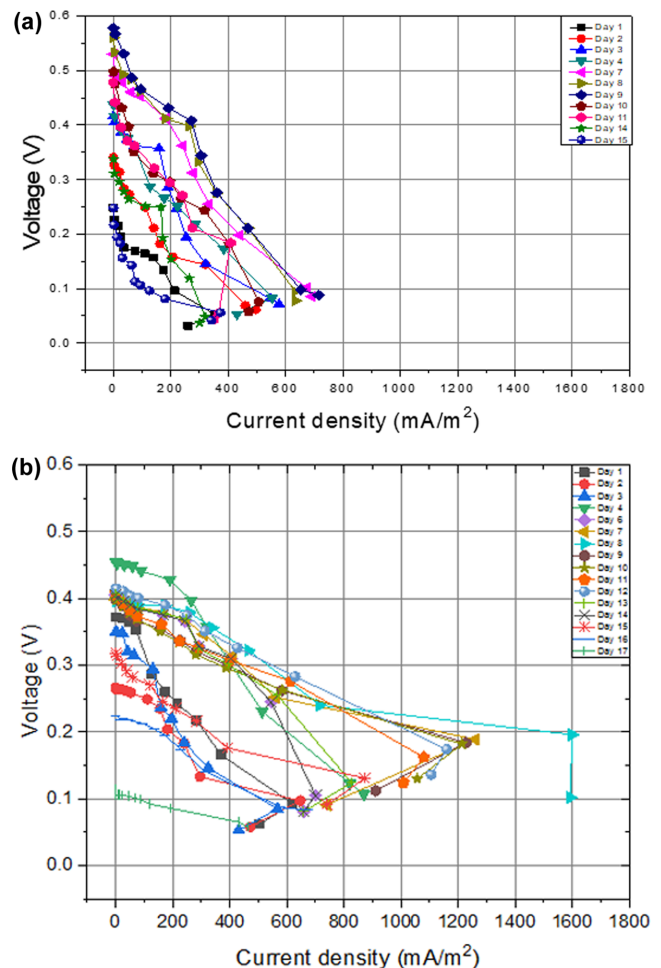


Fig. 3. Comparison of I-V curve of BMFC with a) complex vitamins b) fermented waste foods.

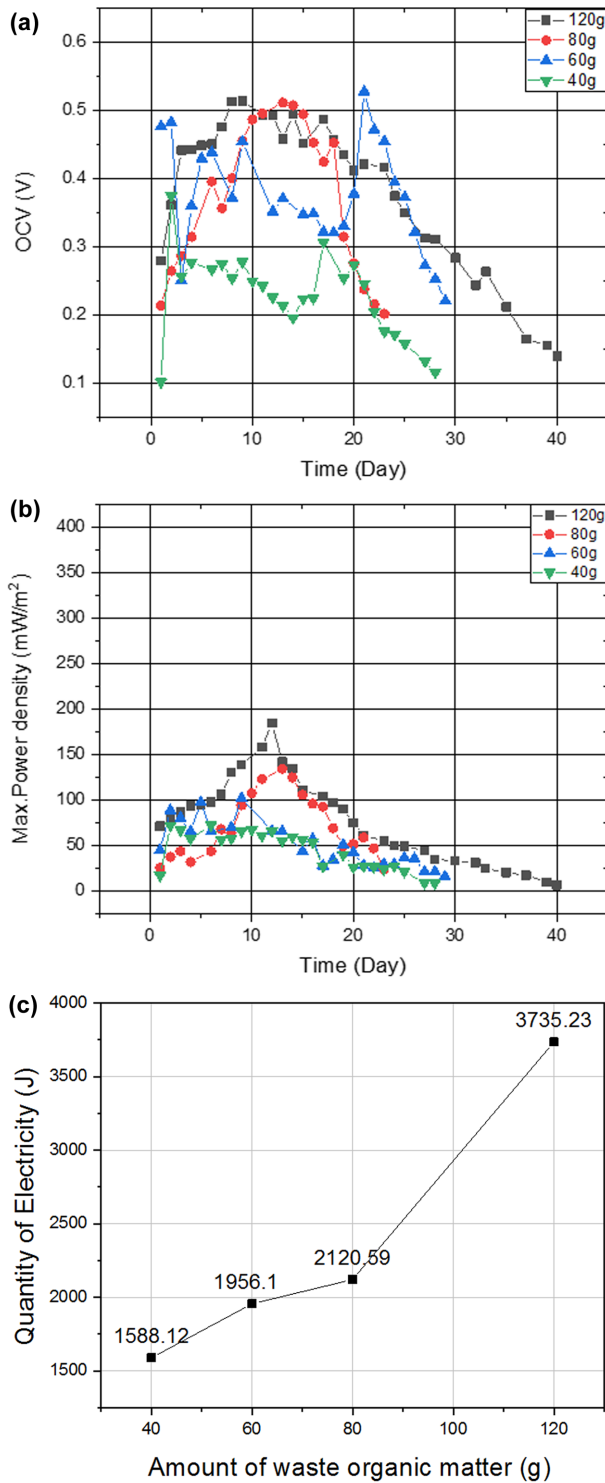


Fig. 4. Effect of fermented foods amount on the BMFC performance a) OCV b) maximum power density c) total electric energy.

Voltage, OCV)는 비슷하며, OCV가 0.2 V까지 유지되는 기간은 발효 유기물 양이 증가할수록 길어졌다(Fig. 4(c)). 박력분과 음식물의 비율 고정시키고 발효 유기물 전체 양을 변화시킨 것인데, 발생된 전기량이 증가한 것은 발효 유기물 내에 비타민뿐만 아니라 포함된 유기물, 미네랄 등이 H^+ 이온 생성에 기여했기 때문이라고 판단한다.

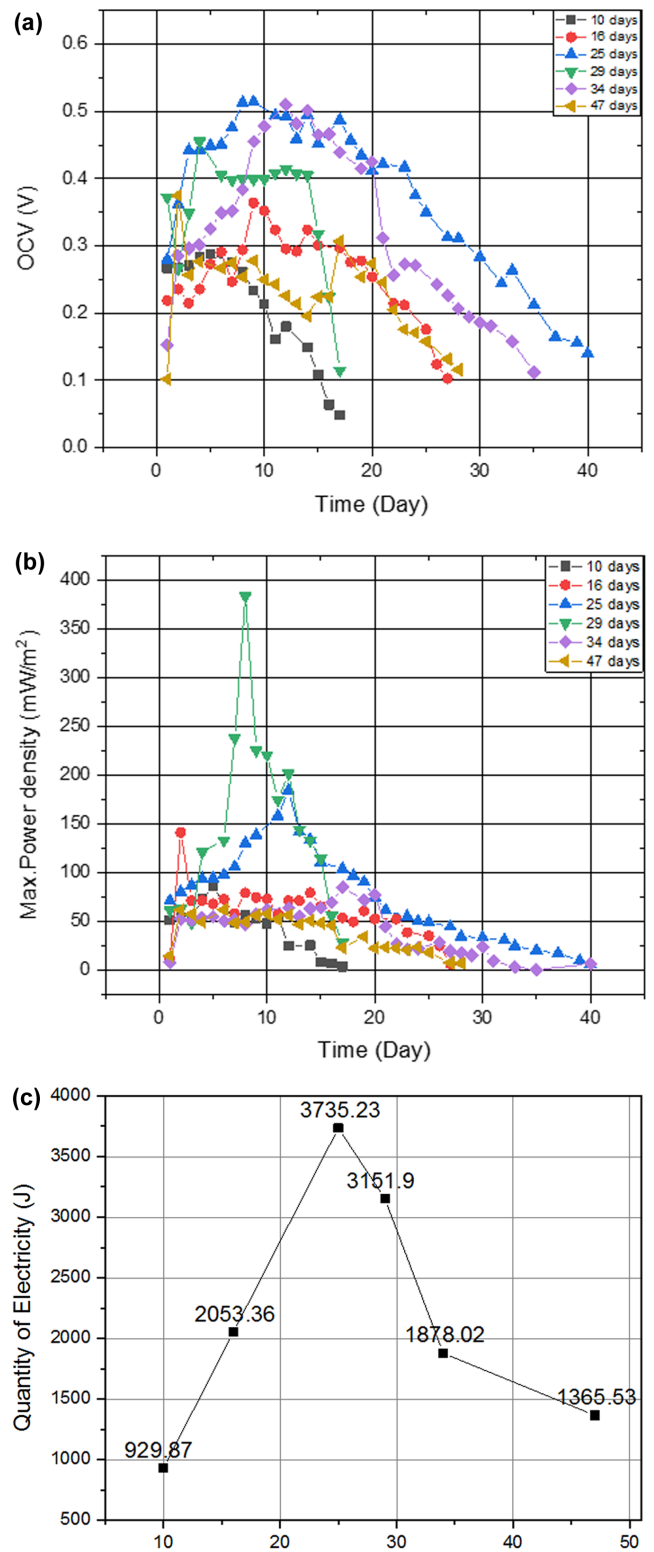


Fig. 5. Effect of fermenting time on the BMFC performance a) OCV b) maximum power density c) total electric energy.

3-3. 유기물 발효기간 및 냉동 보관 영향

음식물 폐기물은 깃벌에 유입되는 과정에 발효되는데, BMFC 성능에 미치는 발효 기간을 파악하기 위한 실험을 진행하였다. 발효

기간이 다른 발효 유기물을 BMFC에 투입 후 I-V 성능을 측정하여 성능을 비교한 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 25~34일 발효시킨 유기물의 최고 OCV가 0.5 V 정도로 높은 값을 보였다. 29일 발효시킨

유기물의 최고 출력밀도가 380 mW/m^2 까지 상승해 제일 높았다. 25일 발효시킨 유기물은 최고 출력밀도가 200 mW/m^2 정도이지만 BMFC 구동 기간이 40일로 최장기간이어서 전기발생량이 3,735 J로 최고 값을 보였다(Fig. 5(c)). 최고 출력밀도와 총 전기에너지 발생량을 고려했을 때, 25~29일 발효시킨 유기물이 BMFC에 최적임을 확인했다. 발효에 의해 고분자 유기물이 저분자화되는 시간이 필요하지만 장시간이 되면 비타민 등 성분이 파괴되어 최적 발효시간이 있는 것으로 생각한다.

25~29일 발효시킨 폐유기물이 최적이므로 남은 폐유기물을 더 이상 발효시키지 않고 일정 기간 냉동 보관 후 BMFC에 투입한 후 측정한 성능 변화를 Fig. 6에 비교하였다. 냉동 보관하였을 때 OCV와 최고 출력밀도 그리고 총 전기에너지 생성량이 모두 감소함을 보였다. 최고 출력밀도를 비교했을 때 냉동 보관 폐유기물을 첨가하면 갯벌만 있을 때보다 높지만 박력분에 비타민을 첨가했을 때와 유사했다. 냉동 보관과정에서 비타민등 주요 성분 파괴 및 음식물의 입자크기 변화로 인한 BMFC 성능 감소로 판단한다. 기온이 영하로 감소하는 경우에는 냉동 보관과 유사한 조건이어서 BMFC 성능이 감소할 것으로 예상된다.

4. 결 론

갯벌에 유입되는 생활 폐수가 저생 미생물 연료전지(BMFC) 성능에 어떤 영향을 주는지 파악하고자, 음식물에 들어가는 유기물들을 발효시켜 갯벌과 혼합해서 BMFC 성능을 비교검토 하였다.

처음에 발효시키지 않은 유기물(박력분)을 첨가했지만 BMFC 성능이 오히려 감소해서, 미생물의 활성을 향상시켜줄 성분으로 복합 비타민을 추가했다. 그 결과 최고 출력밀도가 7일차에 85 mW/m^2 이 되어 갯벌만 있는 BMFC보다 성능이 49% 향상되었다. 비타민을 대신할 음식물이나 박력분은 생활 폐수로부터 올 수 있는 성분들이므로 음식물쓰레기들이 해변 갯벌에 유입되었을 때 BMFC에 의해 전기에너지를 생산하면서 폐유기물을 제거하는 친환경적인 에너지 변환 공정이라고 할 수 있다. 발효 유기물이 첨가되었을 때 복합비타민보다 전류밀도가 2배 이상 증가했고, 최고 출력밀도를 비교하면 복합 비타민과 발효 유기물 각각 70, 300 mW/m^2 으로 발효 유기물이 4배 이상 높은 값을 보였다.

발효 유기물의 양을 3.0~6.6 wt% 범위에서 실험했을 때, 폐유기물의 양이 증가할수록 최고 출력밀도가 증가하였다. 최고 출력밀도와 총 전기에너지 발생량을 고려했을 때, 25~29일 발효시킨 발효 유기물이 BMFC에 최적임을 확인했다. 발효에 의해 고분자 유기물이 저분자화되는 시간이 필요하지만 장시간이 되면 비타민 등 성분이 파괴되어 최적 발효시간이 있는 것으로 생각한다. 그리고 밀물일 때보다 썰물일 때 BMFC 성능이 더 높았고, 발효 유기물을 냉동 보관 후 BMFC에 첨가하면 냉동 보관한 과정에서 비타민등 주요 성분 파괴 및 음식물의 입자크기 변화로 인한 BMFC 성능 감소가 있었다.

감 사

이 논문은 2021년 순천대학교 학술연구비(과제번호 2021-0229) 공모과제로 연구되었음.

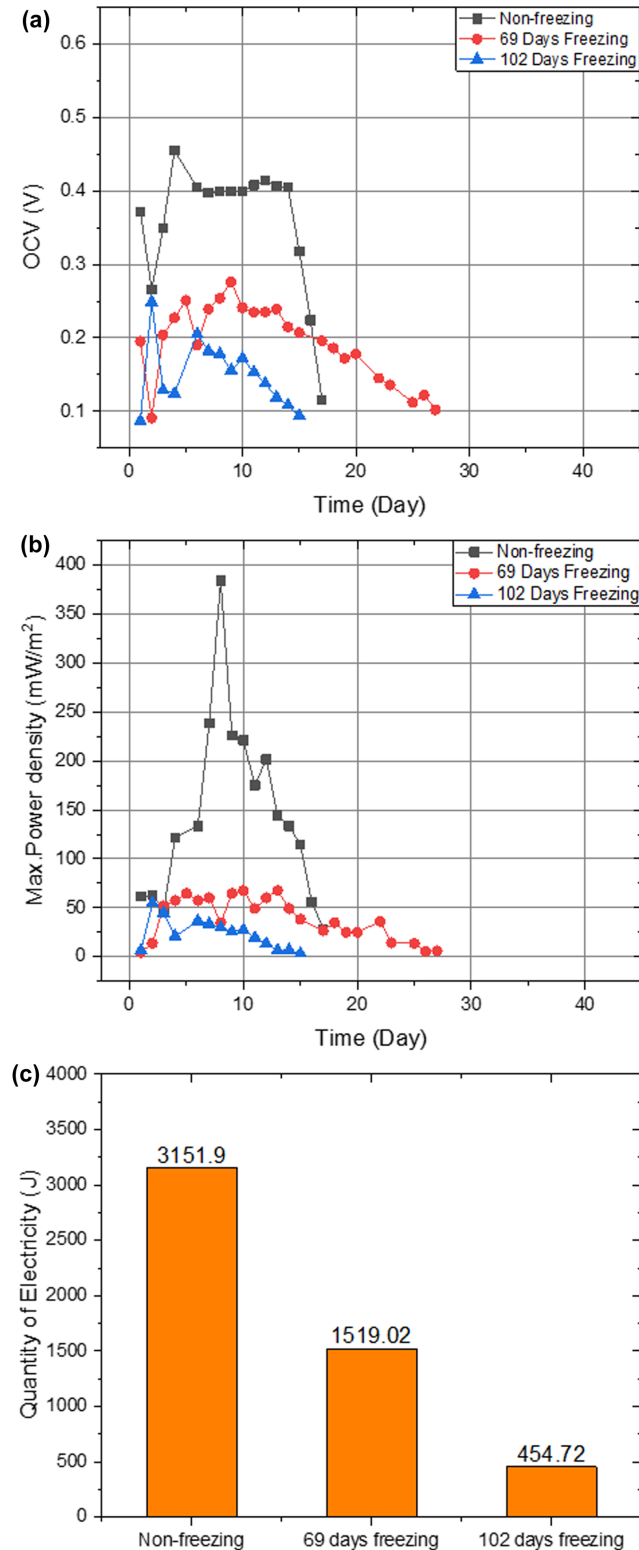


Fig. 6. Effect of cold storage time of fermented foods on the BMFC performance a) OCV b) maximum power density c) total electric energy.

References

1. Grey, D., Garrick, D., Blackmore, D., Kelman, J., Muller, M. and Sadoff, C., "Water Security in One Blue Planet: Twenty-first Century Policy Challenges for Science," *Philos. Transact. A Math. Phys. Eng. Sci.*, **371**, 1-10(2013).
2. Hashim, M. A., Mukhopadhyay S., Sahu J. N. and Sengupta B., "Remediation Technologies for Heavy Metal Contaminated Ground-water," *J. Environ. Manag.*, **92**(10), 2355-2388(2011).
3. Yeung, A. T., "Milestone Developments, Myths, and Future Directions of Electrokinetic Remediation," *Sep. Purif. Technol.*, **79**(2), 124-132(2011).
4. Pandey, B. and Fulekar, M. H., "Bioremediation Technology: A New Horizon for Environmental Clean-up," *Biol. Med.*, **4**(1), 51-59(2012).
5. Nester, E. W., Anderson, D. G., Roberts, C. E., Pearsall, N. N. and Nester, M. T., "Microbiology: A Human Perspective," 7th Edn., McGraw-Hill, New York, (2011).
6. Fatin, S. F., Mohd, R., Asim, A. Y. and Mohamad, N. M. I., "Electricity Generation and Heavy Metal Remediation by Utilizing Yam (*Dioscorea alata*) Waste in Benthic Microbial Fuel Cells (BMFCs)," *Biochemical Engineering J.*, **172**, 108067(2021).
7. Lowy, D. A., Tender, L. M., Zeikus, J. G., Park, D. H. and Lovley, D. R., "Harvesting Energy from the Marine Sediment-water Interface II: Kinetic Activity of Anode Materials," *Biosens. Bioelectron.*, **21**(11), 2058-2063(2006).
8. Reimers, C. E., Tender, L. M., Fertig, S. and Wang, W., "Harvesting Energy from the Marine Sediment-water Interface," *Environ. Sci. Technol.*, **35**(1), 192-195(2001).
9. Dumas, C., Mollica, A., Feron, D., Basseguy, R., Etcheverry, L. and Bergel, A., "Marine Microbial Fuel Cell: Use of Stainless Steel Electrodes as Anode and Cathode Materials," *Electrochim. Acta*, **53**(2), 468-473(2007).
10. Rezaei, F., Richard, T. L., Brennan, R. A. and Logan, B. E., "Substrate-enhanced Microbial Fuel Cells for Improved Remote Power Generation from Sediment-based Systems," *Environ. Sci. Technol.*, **41**(11), 4053-4058(2007).
11. Cheng, S., Liu, H. and Logan, B. E., "Power Densities Using Different Cathode Catalysts (Pt and CoTMPP) and Polymer Binders (Nafion and PTFE) in Single Chamber Microbial Fuel Cells," *Environ. Sci. Technol.*, **40**(1), 364-369(2006).
12. Oh, S. H., Kwag, H. W., Lee, Y. J., Kim, Y. S., Chu, C. H. and Park, K. P., "Variation of Performance with Operation Condition of Benthic Microbial Fuel Cells," *Korean Chem. Eng. Res.*, **57**(2), 172-176(2019).
13. Karra, U., Huang, G., Umaz, R., Tenaglier, C., Wang, L. and Li, B., "Stability Characterization and Modeling of Robust Distributed Benthic Microbial Fuel Cell (DBMFC) System," *Bioresour. Technol.*, **144**, 477-484(2013).
14. Cristiani, P., Carvalho, M. L., Guerrini, E., Daghighi, M., Santoro, C. and Li, B., "Cathodic and Anodic Biofilms in Single Chamber Microbial Fuel Cells," *Biogeochemistry*, **92**, 6-13(2013).
15. Om, P. A., Mungray, S., Chongdar, S., Kumar, K. A. and Kumar M., "Performance of Polypyrrole Coated Metal Oxide Composite Electrodes for Benthic Microbial Fuel Cell (BMFC)," *J. of Environmental Chemical Engineering*, **8**, 102757(2020).
16. Lee, H., Kim, T. H., Sim, W. J., Kim, S. H., Ahn, B. K., Lim, T. W. and Park, K. P., "Pinhole Formation in PEMFC Membrane After Electrochemical Degradation and Wet/dry Cycling Test," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(2), 487-491(2011).

Authors

Mi-Hwa Lee: Researcher, Fuel Cell Test and Evaluation Center, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea; buksulee2@naver.com

Seol-Hwa Yang: Bachelor's, Department of Chemical Engineering, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea; tjfghk0624@naver.com

Young-Sook Kim: Laboratory chief, ETIS Co. Ltd, Gimpo 10122 Korea; kysna@etis.re.kr

Cheun-Ho Chu: President, ETIS Co. Ltd, Gimpo 10122 Korea; cch1005@etis.re.kr

Kwonpil Park: Professor, Department of Chemical Engineering, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea; parkkp@scnu.ac.kr