



ORIGINAL PAPER

원저

수평 흐름형 미생물 연료전지에서 수리학적 체류시간이 전력수율에 미치는 영향

이채영[†], 박수희, 우정희*, 유규선**, 정재우***, 송영채*

수원대학교 토목공학과, 한국해양대학교 환경공학과*, 전주대학교 토목환경공학과**, 경남과학기술대학교 환경공학과***
(2011년 3월 10일 접수, 2011년 3월 23일 수정, 2011년 3월 26일 채택)

The Effect of Hydraulic Retention Time on The Power Density in a Horizontal Flow Microbial Fuel Cell

Chae-Young Lee[†], Su-Hee Park, Jeong-Hei Woo*, Kyu-Seon Yoo**, Jea-Woo Jeong***, Youn-Chae Song*

Department of Civil Engineering, The University of Suwon, Department of Environmental Engineering, Korea Maritime University*, Department of Civil and Environmental Engineering, Jeonju University**, Department of Environmental Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology***

ABSTRACT

This study was conducted to investigate the effect of hydraulic retention time(HRT) on the power density in a horizontal flow microbial fuel cell(MFC) reactor. When HRTs were 15min, 30min, 60min and 180min, maximum power densities were 24.7 mW/m², 27.3 mW/m², 22.8 mW/m² and 17.2 mW/m², respectively. The highest power density was obtained at HRT of 30min. It was 59% improvement when compared to the power density at an HRT of 180min. When HRT was increased, COD removal rate increased whereas the coulombic efficiency remained constant. The result shows that the optimal performance of the horizontal flow MFC reactor could be achieved at HRT of 30min.

Keywords : Horizontal flow, Hydraulic retention time, Microbial fuel cell, Power density

초 록

본 연구에서는 수평 흐름형 미생물 연료전지를 이용하여 수리학적 체류시간에 따른 전력수율을 평가하였다. 수리학적 체류시간 15분, 30분, 60분 및 180분의 경우 전력수율은 각각 24.7 mW/m², 27.3 mW/m², 22.8 mW/m² 및 17.2 mW/m²으로 나타났다. 수리학적 체류시간을 30분으로 유지하는 경우 전력수율이 가장 높게 나타났으며 수리학적 체류시간 180분과 비교시 전력수율이 최대 59% 증가하였다. COD 제거율은 수리학적 체류시간 증가에 따라 높아지는 경향을 보였으나 쿨롱효율은 일정한 값을 유지하였다. 이와 같은 결과를 통해 수리학적 체류시간을 30분으로 유지하는 경우 수평 흐름형 미생물

[†]Corresponding author : chaeyoung@suwon.ac.kr

연료전지성능을 최대로 발휘할 수 있다.

핵심용어 : 수평흐름, 수리학적 체류시간, 미생물 연료전지, 전력수율

1. 서론

미생물 연료전지(microbial fuel cell, MFC)는 유기성 오염물을 전기에너지로 전환이 가능한 것으로 알려져 있다¹⁾. 최근 폐기물로부터 에너지 생산에 대한 관심이 높아지면서 미생물 연료전지에 대한 관심 또한 높아지고 있다²⁾. 초기 미생물 연료전지에 대한 연구는 낮은 전력수율과 미생물과 전극사이 전자 전달과정에 필요한 화학적 매개체를 필요로 하였다. 화학적 매개체의 경우 대부분 가격이 비싸고 비지속성으로 인해 지속적인 첨가가 필요하다³⁾. 그러나 화학적 매개체를 필요로 하지 않는 철환원 균인 *Shewanella putrefaciens*가 발견됨에 따라 미생물 연료전지에 대한 연구가 활발해지고 있다⁴⁾. 최근 몇 년간 미생물 연료전지는 전력수율 분야에서 큰 성과를 이루어 왔으나 실생활에 적용하기 위해서는 전력수율 뿐만 아니라 규모 확대가 가능하며 경제적인 재료 생산에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 한다.

미생물 연료전지의 성능에 영향을 줄 수 있는 요인들은 크게 세 가지로 i) 산화전극에서의 유기물 산화능, ii) 환원 전극에서의 환원능, iii) 산화전극과 환원전극 사이의 활발한 양이온의 이동 등이 있다. 그 중 산화전극에서 유기물의 산화능을 높이기 위해서는 산화전극의 미생물막 형성이 중요하다. 미생물막 형성에 영향을 주는 인자들은 온도, pH, 유체의 속도 등과 관련이 있는 것으로 알려져 있다⁵⁾. 환원전극의 환원능을 높이기 위해 촉매를 사용하는데 촉매 중에서도 백금은 성능이 가장 뛰어나다. 하지만 값 비싼 백금을 촉매로 사용할 경우 경제성이 떨어져 현장 적용이 어렵다. 양이온 교환 막으로 널리 쓰이고 있는 Nafion membrane 또한 값비싼 재료로 경제성을 떨어뜨리는 요인 중 하나이다. 또한 최근 연구들에 따르면 반응조의 형상이 중요한 요소인

것으로 알려지고 있다⁶⁾. 따라서 미생물 연료전지의 현장적용을 위해서는 재료의 개선과 더불어 현장적용에 적합한 형상과 반응조 최적 운전 조건에 대한 연구가 필요하다. 많은 연구자들이 수리학적 체류시간(hydraulic retention time, HRT)과 COD(chemical oxygen demand) 제거율 및 전력수율에 대한 연구를 수행하였으며 Feng 등(2010)의 경우 최적의 수리학적 체류시간은 150~210분으로 나타났으며 Li 등(2008)은 930분, Lorenzo 등(2009)은 90분으로 나타났다⁷⁻⁹⁾. 앞선 연구결과에 따르면 수리학적 체류시간은 반응조 형상에 따라 COD 제거율과 전력수율에 영향을 미치는 운전 조건 중 하나인 것으로 나타났으나 수평 흐름형 미생물 연료전지에 대한 연구는 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 높은 전력수율과 규모 확대가 용이한 수평 흐름형 미생물 연료전지를 사용하여 수리학적 체류시간이 COD 제거율과 전력수율에 미치는 영향을 평가하였다.

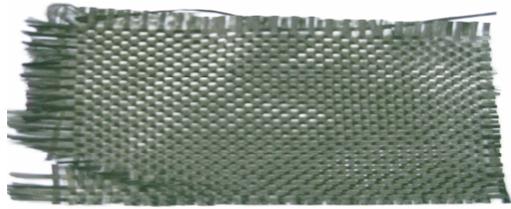
2. 실험재료 및 방법

2.1 미생물 연료전지 재료

본 연구에서 사용된 미생물 연료전지는 Song 등(2010)이 제시한 형태의 반응조를 사용하였다¹⁰⁾. 수평 흐름형 미생물 연료전지(25cm × 8cm × 2cm)의 구성 재료는 [Fig. 1]에 제시하였다. 양극의 경우 값비싼 백금촉매 대신 스테인레스와 탄소나노튜브(carbon nano tube, CNT)를 이용한 경제적인 전극을 사용하였으며 음극의 경우 비표면적이 넓은 흑연섬유를 전극으로 사용하였다. 음극의 집전체로는 전기전도성이 높고 부식성이 낮은 스테인레스를 사용하였으며 분리막으로는 값비싼 양이온 교환막 대신 부직포를 이용함으로써 경제성을 높였다.



(a) 반응조 및 CNT 양극전극.



(b) 흑연 섬유 음극전극.



(c) 집전제 스테인레스.

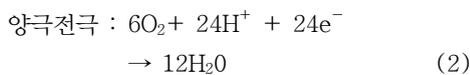
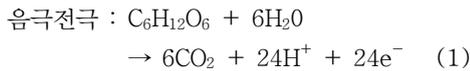


(d) 분리막 부직포.

[Fig. 1] 수평흐름형 미생물 연료전지 재료.

2.2 미생물 연료전지 운전

본 실험에서 사용된 식종슬러지는 S시 하수처리장의 혐기성 소화 슬러지를 이용하였다. 미생물 연료전지에 사용된 기질은 포도당을 이용하였다. 사용되어진 합성폐수의 성상은 [Table 1]과 같으며 미네랄과 비타민은 Lovley 등(1986)과 Balch 등(1979)의 방법에 따라 제조하였다^{11),12)}. 미생물 연료전지 운전은 온도가 30°C로 유지되는 항온실에서 수행되었으며 외부저항은 50Ω으로 하였고 기질의 pH는 7.2로 유지하여 실험을 수행하였다. 미생물 연료전지 운전시 음극전극과 양극전극에서 일어나는 반응은 식 (1)과 (2)와 같다.



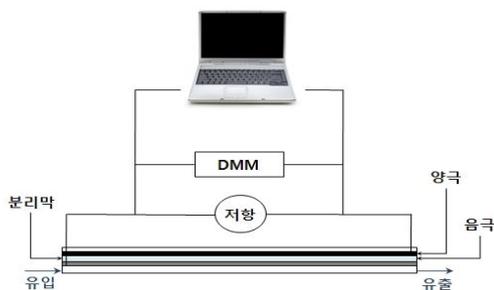
2.3 분석방법

[Fig. 2]에 제시된 것과 같이 전압은 미생물

[Table 1] 합성폐수 성상

Parameters	g/L
Glucose	0.94
NH ₄ Cl	0.31
KCl	0.13
NaHCO ₃	16.2
Mineral	12.5(mL/L)
Vitamin	12.5(mL/L)

연료전지에 연결되어진 DMM(Digital MultiMeter, KEITHLEY)을 통해 측정되었으며 측정된 값은 DMM과 연결된 컴퓨터에 실시간으로 기록되었다. 외부저항은 불림저항을 사용하여 조절할 수 있게 하였으며 저항측정기를 통해 외부저항을 측정하였다. 전류는 외부저항과 측정 전압으로부터 식 $I=V/R$ 을 통해 계산되었다. 전력 또한 계산된 전류값과 측정된 전압값으로부터 식 $P=IV$ 를 통해 계산되었다. COD는 Standard Methods (closed reflux method; APHA, 2005)에 준하여 실험을 수행하였다¹³⁾.



[Fig. 2] 미생물 연료전지 운전 모식도.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 수리학적 체류시간에 따른 전력수율

본 실험에서는 수리학적 체류시간에 따른 미생물 연료전지의 전력수율을 평가하기 위해 수리학적 체류시간을 15분, 30분, 60분 및 180분으로 하여 반응조 안정화 이후 분극 실험을 수행하였다. 분극실험 결과 [Fig. 3]에 나타난 것과 같이 체류시간이 15분인 경우 최대전력수율이 24.7 mW/m²으로 나타났으며 30분인 경우 27.3 mW/m², 60분인 경우 22.8 mW/m², 180분인 경우 17.2 mW/m²으로 나타났다. 실험 결과 체류시간이 증가함에 따라 전력수율은 감소하는 경향을 보였다. 일정한 반응조 부피 내에서 체류시간이 증가함에 따라 유량은 감소하게 되는데 Li 등 (2009)에 따르면 유량이 감소함에 따라 내부저항이 증가하는 것으로 보고되었다⁶⁾. 또한 Li 등 (2008)에 따르면 수리학적 체류시간이 짧아짐에 따라 기질강도가 높아지고 결과적으로 미생물에 의해 소비되는 기질소모량이 높아짐으로써 전력수율이 증가한다고 보고되었다⁸⁾. 따라서 미생물 연료전지의 수리학적 체류시간이 짧아지면 반응조의 내부저항이 낮아지고 미생물의 기질소모량이 늘어남에 따라 미생물 연료전지의 효율은 증가하는 것으로 판단된다.

3.2 수리학적 체류시간에 따른 COD제거율

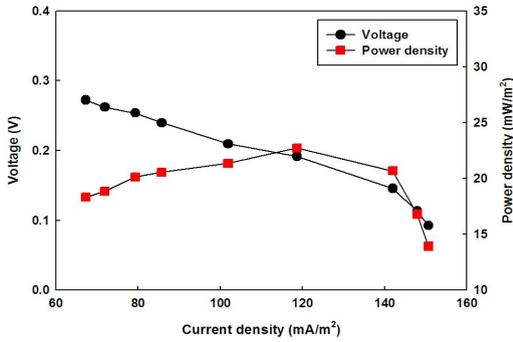
수리학적 체류시간에 따른 COD 제거율을 [Fig. 4]에 나타내었다. COD 제거율은 수리학적

체류시간이 15분, 30분, 60분 및 180분일 때 각각 6.7%, 14.0%, 29.2% 및 54.0%로 나타나 수리학적 체류시간이 길어질수록 COD 제거율이 높아지는 경향을 보였다. 이 때 쿨롱효율 (coulombic efficiency, CE)은 각각 2.7%, 3.1%, 3.2% 및 3.1%로 나타났다. [Fig. 5]에 수리학적 체류시간에 따른 쿨롱효율과 전력수율을 나타내었다. 수리학적 체류시간이 30분일 때 전력수율이 27.3 mW/m²으로 가장 높게 나타났으며 이때 쿨롱효율은 3.1%로 나타났다. 결과적으로 효과적인 수평 흐름형 미생물 연료전지 운영을 위한 최적의 수리학적 체류시간은 30분인 것으로 판단되어 진다.

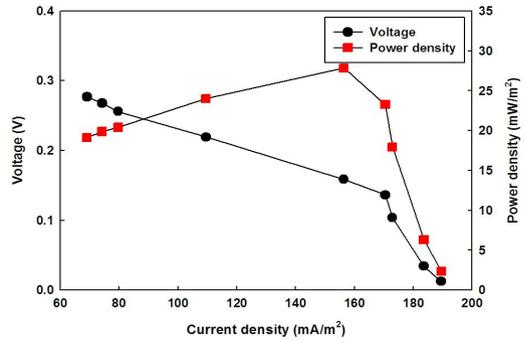
4. 결론

본 연구는 수평 흐름형 미생물 연료전지의 효율을 향상시키기 위해 반응조 운전 최적의 수리학적 체류시간을 도출하는데 목적이 있으며, 그 결과는 다음과 같다.

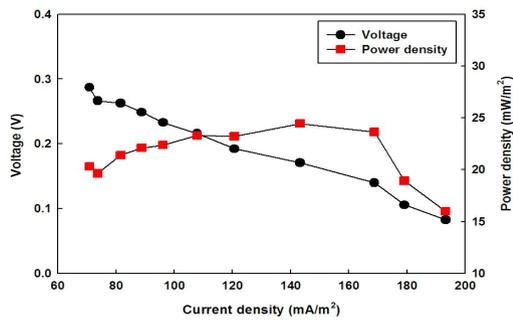
1. 수평 흐름형 미생물 연료전지 반응조 내 수리학적 체류시간이 짧아질수록 유체의 흐름이 빨라지고 내부저항이 감소하여 미생물 연료전지의 최대 59%의 전력수율을 향상시키는 효과가 나타났다.
2. 수평 흐름형 미생물 연료전지에서 수리학적 체류시간은 30분으로 운전할 경우 최대 전력 수율이 27.3 mW/m²으로 가장 높게 나타났으며, 쿨롱효율은 수리학적 체류시간에 따른 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다. 따라서 체류시간을 30분으로 유지하였을 때 수평 흐름형 미생물 연료전지의 효과적인 운전이 가능할 것으로 판단된다.
3. 반응조 내 수리학적 체류시간이 길어질수록 COD 제거율은 증가하는 경향을 나타냈다. 따라서 수리학적 체류시간이 30분의 반응조를 적층함으로써 전력수율을 향상시킴과 동시에 COD제거율 또한 증가시킬 수 있을 것으로 판단됨에 따라 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.



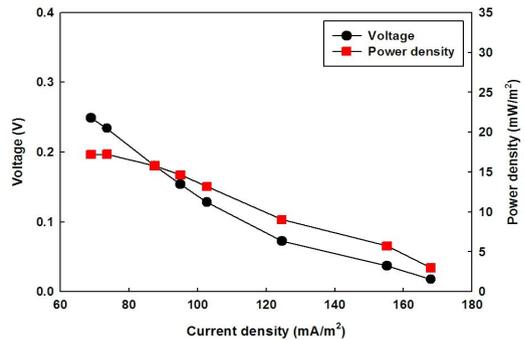
(a) 수리학적 체류시간 15분.



(b) 수리학적 체류시간 30분.

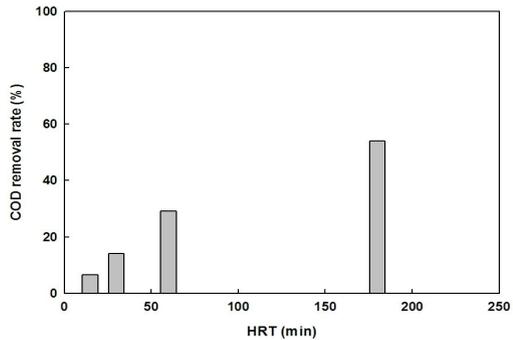


(c) 수리학적 체류시간 60분.

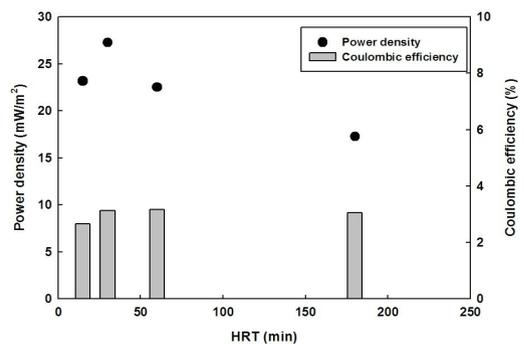


(d) 수리학적 체류시간 180분.

[Fig. 3] 수리학적 체류시간에 따른 분극곡선.



[Fig. 4] 수리학적 체류시간에 따른 COD 제거율.



[Fig. 5] 수리학적 체류시간에 따른 전력수율 및 쿨롱효율.

사사

본 연구는 지식경제부가 주관하고 에너지기술

평가원이 시행하는 신재생에너지기술개발사업 (2009T100100383)으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Ouitrakul, S., Sriyudthsak, M., Charojrochkul, S., and Kakizono, T., "Impedance analysis of bio-fuel cell electrodes", *Biosensors and Bioelectronics*, 23, pp. 721~727 (2007).
2. Mohan, S. V., Raghavulu, S. V., Peri, D., and Sarma, P. N., "Integrated function of microbial fuel cell(MFC) as bio electrochemical treatment system associated with bioelectricity generation under higher substrate load", *Biosensors and Bioelectronics*, 24, pp. 2021~2027 (2009).
3. Logan, B. E., "Scaling up microbial fuel cells and other bioelectrochemical systems", *Microbiol Biotechnol*, 85, pp. 1665~1671 (2010).
4. 송영채, 우정희, 유규선, "미생물연료전지의 재료 : 전극 및 분리막, 집전체", *대한환경공학회지*, 31, pp. 693~704 (2009).
5. Donlan, R. M., Pipes, W. O., and Yohe, T. L., "Biofilm formation on cast iron substrate in water distribution systems", *Water Research*, 28, pp. 1497~1503 (1994).
6. Li, Z., Zhang, X., Zeng, Y., and Lei, L., "Electricity production by an overflow-type wetted-wall microbial fuel cell", *Bioresource Technology*, 100, pp. 2551~2555 (2009).
7. Feng, Y., Lee, H., Wang, X., Liu, Y., and He, W., "Continuous electricity generation by a graphite granule baffled air-cathode microbial fuel cell", *Bioresource Technology*, 101, pp. 632~638 (2010).
8. Li, Z. L., Yao, L., Kong, L., and Liu, H., "Electricity generation using a baffled microbial fuel cell convenient for stacking" *Bioresource Technology*, 99, pp. 1650~1655 (2008).
9. Lorenzo, M. D., Curtis, T. P., Head, I. M., and Scott, K., "A single-chamber microbial fuel cell as a biosensor for wastewaters", *Water Research*, 43, pp. 3145~3154 (2009).
10. Song, Y. C., Yoo, K. S., and Lee, S. K., "Surface floating, air cathode, microbial fuel cell with horizontal flow for continuous power production from wastewater", *Journal of Power Sources*, 195, pp. 6478~6482 (2010).
11. Lovley, D. R., and Phillips, E. J. P., "Organic matter mineralization with reduction of ferric iron in anaerobic sediments", *Applied and Environmental Microbiology*, 51, pp. 683~689 (1986).
12. Balch, W. E., Fox, G. E., Magrum, L. J., Woese, C. R., and Wolfe, R. S., "Methanogens: reevaluation of unique biological group", *Microbiological Reviews*, 43, pp. 260~296 (1979).
13. APHA-AWWA-WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th edition, American Public Health Association, pp. 5 16~17 (2005). 