

미생물 연료전지와 유사 생물학적 전기화학시스템 실험의 필수 분석 기법 및 관련 데이터 측정에 대한 미니리뷰

작성자: DICER IP

1. 서론

전기화학적 미생물의 활성 연구는 그 산술적 연구 개수와 다양성이 지난 100 년간 급격하게 증가하였다. 최초의 연구는 Potter 등에 의해 현재 영국의 뉴캐슬 대학에서 약 100 여년전에 수행되었다. Potter 등은 다음의 그림 1 에서와 같이 매우 단순한 시스템을 사용하였는데, 유기성 기질을 제공하여 배양 시 발생하는 전기화학적 포텐셜이 미생물들 사이에서 서로 다르다는 것을 보였다. 그는 이스트(yeast) 혹은 효모균인 *Saccharomyces Cerevisiae* 와 나중에 *Escherichia Coli* 로 명명된 *Bacillus Coli* 에 의해 생성되는 포텐셜을 관측하였고 이는 모두 기질의 발효과정 중에 관찰 되었다. 또 실험에 사용된 다른 세 가지 종의 미생물에서는 특별한 기전력(electromotive force)의 관찰은 수행되지 않았는데 이들 미생물은 모두 사용된 기질 내에서 성장하지 못하였음을 보였다. 미생물의 발효성장은 기질과 pH 및 다른 변화도에 의해 열역학적 포텐셜을 생성하여 기전력의 생산으로 이어지지만 일반적으로 전류의 생성까지는 미치지 못한다. 이는 곧 오늘날 외부의 전자 셔틀이나 매개체의 사용 없이 상당량의 전류밀도를 생성할 수 있는 미생물이 왜 큰 관심을 받는가를 잘 설명한다.

최초의 연구가 보고 된 이후 Thomson Reuters 의 Web of Science 기준으로 생물학적 전기화학시스템 분야에 대해 약 3000 편 이상의 논문이 쓰여진 것으로 파악되는데, 대부분이 MFC 분야에 대한 논문으로 보인다. 이에 따라 이러한 다양한 실험을 전문적으로 수행하기 위한 분석 장비들 역시 급격하게 발달해 왔다. 단순한 회로와 재료를 사용했던 초기 Potter 의 연구 대비 현대의 생물학적

전기화학실험은 다양한 전자장비를 사용하여 데이터를 획득하는데, 낮은 임피던스 전압측정을 위한 멀티미터(multimeter) 혹은 전기화학적 거동특성 분석을 위한 포텐쇼스탯(potentiostat) 등이 그 좋은 예이다 (그림 1).

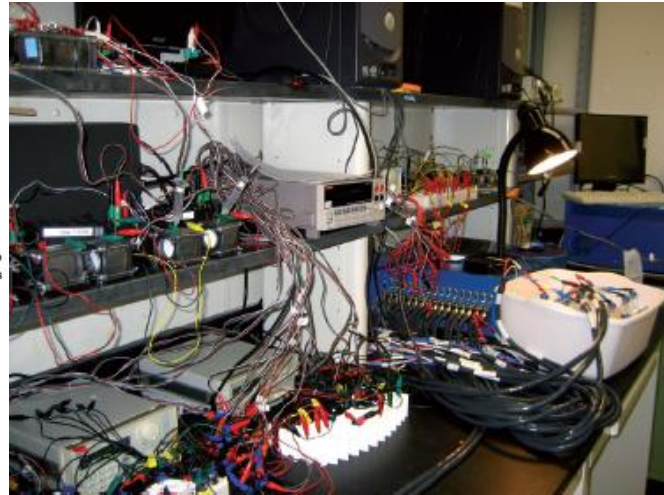
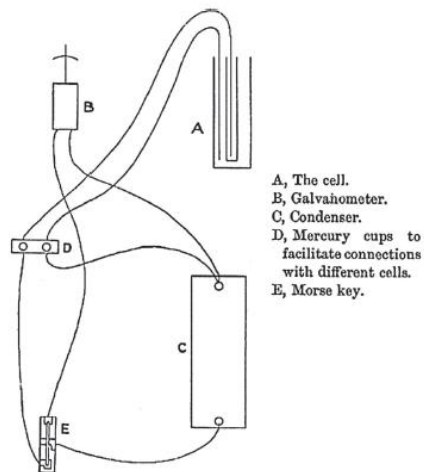


그림 1 과거 와 현대적인 생물학적 전기화학시스템의 비교. 좌: Potter 등의 실험 회로도 (반응조 생략됨). 우: 데이터 기록장치, 다중채널 포텐쇼스탯 및 다양한 형태의 미생물연료전지를 포함한 현대적인 전기화학시스템 실험 장비 (원저자의 실험실 사진).

MFC 혹은 다른 생물학적 전기화학 시스템에 대한 실험은 다른 과학적 실험과 동일하게 신중한 계획, 적절한 제어방안 및 철저한 데이터 분석을 요한다. 다학제간의 융합연구가 필요한 MFC 실험은 때때로 실험계획의 확립 혹은 전기화학적 측정에 있어 최소 기준을 갖추는 것이 어려운 경우가 많다. 일 예로 폐수처리 연구는 주로 파일럿 혹은 실험 규모 반응조에서 연구되어야 하므로 별도의 제어장치 구축에 엄청난 비용이 소요되어 연구가 어려워진다. 또한 전기 화학자들은 화학반응 혹은 전극의 성능을 perchloric acid 와 같은 수용액을 이용하여 그 메커니즘을 이해하고자 하며 해당 화학 반응에 적합한 빠른 스캔속도(scan rate)를 선택한다. 하지만 carbonate 혹은 phosphate 버퍼를 활용하여 중성의 pH 조건에서 반응이 진행되는 생물학적 시스템을 이해하는데에는 적합하지 않을 수 있다. 따라서 MFC 나 생물학적 전기화학시스템(BES)의 전극 물질, 미생물 그리고 전류 생산에 영향을 미치는 다른 인자들을 연구하고자 한다면 보다 적합한 조건에서 데이터를 획득해야 복잡한 시스템의 상호작용을 보다 잘 이해할 수 있다. 결국 신중한 실험계획과 데이터의 보고는 복잡한

시스템의 운전 결과를 보다 쉽게 이해하는 데에 필수적이며 오해의 소지를 없앨 수 있는 확실한 방법이다. 따라서 MFC 뿐 만 아니라 모든 종류의 생물학적 전기화학시스템에 적용될 수 있는 다음의 데이터 분석 및 보고 방법에 대한 조언들을 유용하게 활용할 것을 권장한다.

2. 실험계획

a. 시스템 동형배양 (Replicate reactors)

어떠한 실험이든지 대상 시스템의 변화를 측정하기 위해서는 적어도 두 개 이상의 동형배양을 수행하는 것이 바람직하다. 이는 MFC 연구에 있어서는 더더욱 그러한데 그 이유는 동형배양 반응조 간 큰 변화가 초래 될 가능성이 높기 때문이다. 동일한 식종균이 같은 반응조에서도 서로 다른 초기 전력생산을 보일 수 있음에도 불구하고, 그 동안 많은 MFC 연구가 단일 반응조로 수행되어 온 것이 사실이고 세 개 혹은 그 이상의 동형배양을 수행한 경우는 많지 않았다. 종종 4 개 이상의 동형배양이 필요하다는 주장이 제기되기도 하지만, 세 개의 동형배양 반응조 간의 차가 통계적으로 크지 않다는 결과가 보고 된 바도 있다. 따라서 그 결과값이 통계적으로 유의한 차이를 주지 않는다고 할 때 두 개의 동형배양 반응조 운전도 충분 한 것으로 판단된다. 하지만 동형배양 없이 단일 반응조로 수행된 실험이라면 측정 가능한 변화의 정도 혹은 동등한 성능을 입증할 방법이 없으므로 두 개 이상의 동형배양 수행은 필요충분 조건이 된다.

b. 정상상태조건, 적절한 제어방법 및 benchmarking 방법

닫힌 회로의 MFC 구성은 연속운전 시 안정적인 전류생산이 필수적이다. 일반적인 반 연속식 Fed-Batch 시스템에서는 기질 소모에 의해 시스템의 전류가 특정 수준 이하로 강하 되었을 경우에 내부 용액을 교환하게 되는데, 교환 후에도 전력 생산이 동일한 수준으로 재현 가능하여야 한다. 이러한 재현성을 충족하지 못할 경우 그 시스템은 안정적인 전력생산을 위한 충분한 적응 시간을 갖지 못한 것으로 판단하여야 한다. 생물학적 성장은 MFC 가 열린 회로 상태에서도 발생되며 생화학적 산소요구량(COD)의 변화는 전류의 발생 없이도 가능하다. 물론 그 변화의 정도는 시스템의 종류, 식종균 및 기질에 따라 다르다.

따라서 폐수 내의 COD 제거효율 측정이나 MFC 내의 미생물 군집을 연구 함에 있어서는 열린 회로로 운전되는 대조구 실험이 필수적이다.

금속의 부식은 산화전극에서의 galvanic 전류의 생산을 초래할 수 있다. 이는 특히 스테인리스 스틸이나 구리를 산화전극으로 사용하는 경우에 문제가 된다. 특히 구리는 미생물에 대한 독성과 같은 부가적인 문제점을 수반한다. 실제로 한 연구에서 40 W/m^2 의 높은 전력밀도가 보고된 바 있기도 한데 이러한 경우는 반드시 비 생물학적 대조구(abiotic control)를 활용하여 발생된 전력생산량을 정확하게 보정 하여야 한다. 또한, 금속이 부식하면서 전체 표면적이 증가하게 되는 경우도 발생할 수가 있다. 따라서 산화전극의 비활성화(열처리 등)를 수행하여 산화전극이 부식된 후의 비 생물학적 전류 생산의 부족분을 보정할 수 있도록 해야 한다.

새로운 전극을 설계하거나 새로운 재료를 도입하는 경우 전통적으로 사용해온 재료와 함께 시스템 성능을 평가하는 것이 중요하며, 전기화학적 성능을 종합적으로 평가하는 것 역시 중요하다. 예를 들면, 새로운 환원전극 촉매를 탄소섬유에 부착하여 사용하는 시험의 경우 일반적으로 사용하는 백금(Pt)촉매를 적용한 환원전극과 단계적으로 비교 평가 하여야 하며, 단순히 비 생물학적 대조구나 다르게 변형된 형태의 전극과 비교하는 것은 불충분 하다. 앞서 언급한 benchmarking 방법의 적용만이 올바른 환원전극 성능의 평가를 가능하게 할 것이다.

c. 기질 (배양액)

MFC 실험에 있어 발생하는 전력의 양은 사용된 기질의 절대적인 양에 비례하여 변화한다. 대체로 아세트산으로부터 생성된 전력이 가장 높고 다른 폐수를 활용하는 경우 아세트산 대비 대체로 낮으며 사용된 폐수에 따라 변화가 심하다. 따라서 아세트산이나 글루코오스(glucose)를 사용하는 기질을 합성 폐수로 표기하는 것은 지양하여야 한다. 특히 전도도가 5 mS/cm 이상인 경우나 높은 버퍼를 함유하는 경우는 더더욱 유의 하여야 하고, 기질의 주요 성분을 반드시 나타내 주어야 한다. 또한 폐수를 희석하여 농도의 영향을 살펴려는 경우 기질농도에 대한 전도도의 상관관계로 인한 성능변화를 방지하기 위하여 전도도를 보정하여 유지해 줄 필요가 있다.

아세트산 및 다른 순수 화합물에 의한 쿨롬효율(Coulombic efficiencies, CEs)은 일반적으로 폐수의 CE 보다 매우 높게 나타난다. 그러한 이유 중 하나는 반 연속식 운전에서의 cycle time 때문이다. 산소는 대체로 환원전극, 이음새/격막(septa), 개스킷(gasket) 등을 통해 반응조 내로 침투하게 되므로 긴 시스템의 운전시간은 보다 많은 양의 산소의 침투를 의미한다. 그런데, 빠르게 분해되는 아세테이트를 이용한 운전 시간은 일반 폐수를 사용하는 경우 보다 상대적으로 짧기 때문에 산소에 노출되는 시간 역시 짧다. 아세테이트를 이용하는 실험에서 다양한 외부저항에 따라 CE 를 측정해본 결과 CE 와 cycle time 이 반비례하는 것이 보고된 바 있다. 낮은 전류밀도에서 cycle time 에 따라 CE 가 약 35-40%, 높은 전류밀도에서는 65-70%까지 이를 수 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 회로상의 저항을 줄이면 전류가 증가하게 되고 cycle time 은 감소하게 된다. 따라서 fed-batch cycle time 동안 침투되는 산소의 양 또한 줄어들게 된다. 미생물의 군집 또한 전류밀도와 cycle time 에 따라 변화하게 되는데 이는 전기생성미생물에 의한 전자전달 이외의 다른 공정들 즉, 발효공정, 메탄생성 공정 및 호기성 미생물 성장 등이 반응조 내로 들어온 산소의 양과 함수 관계에 있기 때문이다. 따라서 낮은 CE 를 보이는 MFC 에서의 미생물 군집분석시 침투된 산소에 의한 다른 미생물들의 생물학적 반응으로 인해 제대로 전기생성미생물의 분포를 알아내기 힘들게 된다. 이러한 사실은 기 보고된 낮은 CE 를 보인 미생물 군집 연구들이 최근에 아세테이트 혹은 글루코오스로 수행된 연구 결과 대비 훨씬 더 다양한 미생물 군집을 보이는 현상으로 잘 설명될 수 있다.

d. 환원전극액(catholyte)

Ferricyanide 혹은 permanganate 와 같은 전자수용체를 사용하는 MFC 실험은 비실용적인 문제로 인해 특별한 경우를 제외하고는 지양되어야 한다. 물론 산화전극에서 특별한 미생물의 배양을 위한 목적이거나 특정 재료의 거동 특성평가를 위해서는 유용하게 활용 가능할 것으로 본다. 하지만 이러한 화학물질은 산소가 환원전극에 활용되는 경우와 비교할 때 비현실적인 상황의 화학적 포텐셜을 시스템에 인가하는 경우가 발생한다. 그 이유는 전극이 가까이 밀착되어있는 MFC 에서와 같이 실제로 산소가 산화전극 반응조로 침투하여 전력 생산에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 이렇게 환원전극의 상대적인 사이즈와 사용된 재료가 산화전극에서의 전류생성을 저해할 수 있기 때문에 전기화학적

시험에서 이러한 부분이 반드시 고려되어야 한다. 용액의 전도도 역시 환원전극의 성능에 영향을 미칠 수 있으므로 전기화학적 시험에 있어 사용된 완충액(buffer)와 염도(salinity)를 고려하는 것은 중요하다.

3. 시스템 상태에 대한 데이터 보고방법

a. 전력밀도

전력은 적어도 두 가지의 방법으로 보고되어야 하는데 사용된 전극 혹은 멤브레인 면적 당 전력과 전체 반응조 부피당 전력 이렇게 두 가지 이다. 초기 연구에서 전력은 산화전극의 면적당 전력으로 나타내는 경우가 많았는데, 그 이유는 산화전극이 전력생산을 제한 하는 것으로 가정하였기 때문이다. 현재는 두 개의 반응조로 구성된 MFC 의 산화전극과 환원전극 사이의 멤브레인 혹은 단일 반응조 시스템의 환원전극이 최대 전력 농도를 제한하는 인자로 알려져 있으므로 전력을 멤브레인이나 전극면적 당 최대전력으로 표기하는 것이 적절하다. 사용된 산화전극의 면적은 한쪽 면 혹은 양쪽 면의 면적으로 나타낼 수 있는 데 이는 전극의 활용에 따라 다를 수 있다. Air cathode 의 경우 한쪽 면에만 촉매를 입혀 사용하므로 주의가 필요하다. 때때로 산화전극 혹은 환원전극의 부피 혹은 두 개의 반응조 중 하나의 부피당 전력으로 전력을 표기하기도 한다. 비록 이러한 부피의 활용은 반응조 내의 용액 부피를 기준으로 한 성능을 나타내지만, 환경공학에서 일반적으로는 전체 반응조 부피를 활용하기도 하므로 생물학적 전기화학시스템에서는 전체 반응조 부피를 활용하는 것 또한 올바른 방법으로 사료된다.

b. 전극의 비표면적

반응조의 성능에 영향을 미치는 가장 중요한 인자 중 하나는 전극의 표면적이다. MFC 의 상용화를 위한 부피당 최대 전력 혹은 최대 전류 획득을 위해서는 전극 표면적의 집적이 필요하다. 모듈화를 위한 설계를 가정할 경우 전극쌍의 두께가 전극의 집적화를 정의할 수 있다(그림 2). 그림에서 보듯이 전체 전극의 표면적은 클 수 있으나 일반적으로 전력은 하나의 전극당의 전력으로 표준화 된다. 예를 들면, 한 쌍의 산화 및 환원전극이 각각 1 m^2 의 표면적을 가지고 1 m^3 의 반응조 부피를 가진다면, 전극밀도는 $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 이 된다. 만일 1

m^2 의 환원전극이 10 cm의 두께를 필요로 하면 전극의 비표면적은 $10 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 이된다(그림 2). 전극밀도가 클수록 보고되는 부피당 전력밀도가 높게 보고될 가능성이 운전 조건에 따라 존재하게 되는데 이는 전극의 표면적당 전력밀도가 부피당 전력밀도와 비슷한 경우에 해당한다. 일 예로, 두 개의 반응조 MFC가 산화전극에 22.5 cm^2 의 양면 면적을 가질 때 양면 면적당 전력생산량이 $0.039 \text{ W}/\text{m}^2$ 이고 부피당 전력생산량이 $0.18 \text{ W}/\text{m}^3$ 이면 총 부피당 면적이 $4.5 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (양면) 혹은 $2.3 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (단면) 이 된다.

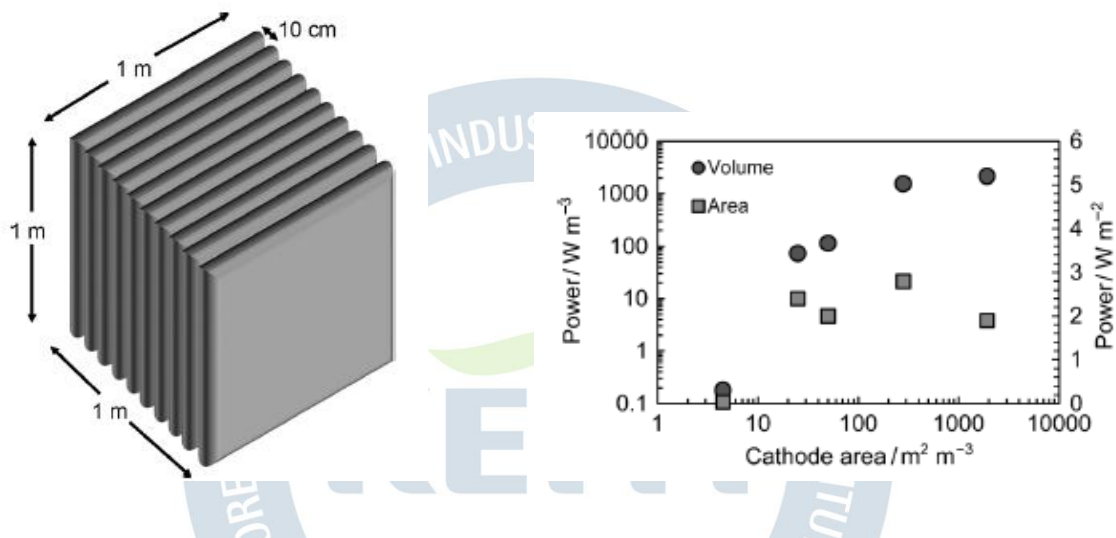


그림 2 모듈의 집적의 예. 하나의 산화전극-환원전극 두께는 10cm이며 그 비표면적은 약 $10 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (하나의 단면적은 1 m^2)

단일 반응조 디자인은 큰 환원전극조와 멤브레인에 대한 필요성을 제거하여 일반적으로 높은 부피당 전력밀도를 보이는데 이는 air cathode의 향상된 성능 때문이다. 한 단일 반응조 MFC가 그래파이트 섬유 브러쉬 산화전극을 사용하고 $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 의 환원전극 비표면적을 갖는다고 할 때 전력은 $2.4 \text{ W}/\text{m}^2$ 혹은 $73 \text{ W}/\text{m}^3$ 으로 증가하게 된다. 만일 평평한 산화전극을 사용하면 $2.0 \text{ W}/\text{m}^2$ 혹은 $115 \text{ W}/\text{m}^3$ (비표면적 $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$)를 나타낸다. 즉, 전극의 비표면적을 증가시키는 경우 매우 높은 전력밀도 획득이 가능하게 된다. Fan 등은 $1.55 \text{ kW}/\text{m}^3$ ($2.77 \text{ W}/\text{m}^2$)의 전력밀도를 보고하였는데 사용된 반응조 부피가 2.5 ml로 매우 작았고 그때의 환원전극 비표면이 $280 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 이었다. 반면 Nevin 등은 더 작은

반응조(0.336ml)를 사용하여 $1920 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 에 달하는 비표면적을 이용함으로써 $2.15 \text{ kW}/\text{m}^3$ ($1.9 \text{ W}/\text{m}^2$)의 전력밀도를 획득하였다. 결국 그림 3에서 보듯이 부피당 생산전력은 환원전극의 비표면적에 비례하여 증가하는 반면, 환원전극 면적당 전력생산은 상대적으로 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 한편, 이렇게 높은 전극 비표면적의 MFC가 실폐수를 기질로 활용하는 경우 clogging 문제 때문에 문제가 될 수 있음을 유의 하여야 할 것이다. 이는 Trickling filters가 약 $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 이하의 플라스틱 미디어 비표면적을 활용하는 경우에 정상 가동이 가능하고 그 이상의 비표면적에서 바이오필름 형성에 의한 심한 clogging 문제에 봉착하게 되는 경우와 흡사할 것이기 때문이다.

c. 수용액 화학

용액의 전도도는 전력 생산에 영향을 미치므로 항상 보고되어야 한다. 만일 한 폐수가 증류수에 희석 되었을 경우 그 전도도 보정을 위해 염분을 투입하여 일정하게 유지하여야 한다. 사용된 폐수가 물로 희석되었을 경우 전력은 폐수의 COD에 선형으로 비례하지만, 전도도의 보정이 이루어졌을 경우 Monod 식에 의한 동역학적 거동과 유사한 전력 변화 곡선이 나타난다는 점을 유의해야 한다. 더불어 pH의 변화 역시 폐수의 처리 전후에 대하여 보고 되어야 하는데 낮은 pH는 대체로 전력 생산을 제한 하는 것으로 알려져 있다.

d. 미생물

MFC 연구에서 바이오필름은 다양한 분석기법에 의해 평가될 수 있다. 최근의 리뷰는 16S rRNA gene clone library가 특정 박테리아의 우점도와 전력의 생산이 일정한 상관관계에 있어 다른 종류의 미생물들 간 기질 및 폐수의 생분해와 관련된 시너지 효과에 대한 정보를 제공할 수 있다고 보고하였다. 16S rRNA를 finger printing 하여 미생물 군집간의 차이를 보여주는 Denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE)는 바이오필름 내에서 다른 미생물들 간의 우점도를 나타내는 데에는 대체로 비효과적으로 알려져있다. Pyrosequencing은 일반적으로 clone library 분석과 일관된 결과를 보여주며, 더불어 미생물 군집 구성 멤버에 대한 보다 깊은 고찰이 가능하게 한다. 다만 전류의 생산에 있어 상대적으로 우점도가 낮은 미생물이 어떠한 역할을 하는지는 명확하게 규명하기 어렵다고 보는 견해가 있다. 몇몇 전기생산미생물은 바이오필름의 분석에

나타나지 않을 수 있다. 예를 들면, 한 *Shewanella* 종은 clone library 에서 확인 되지 않았지만 같은 MFC 에서 isolation 되었고 상대적으로 우점도가 높았던 미생물보다 더 높은 전력 생산이 가능했다고 보고된 사례가 있다.

순수균주배양은 전기생산 미생물 연구에 매우 중요한 역할을 할 수 있다. 하지만 실험 종료 후 배양균의 오염에 대한 부분은 유전자 분석, 현미경 혹은 agar plate 등의 방법으로 철저히 살펴야 한다. 반면, 혼합균주에 의한 전력생산은 한 MFC 에서 다른 MFC 로 순차적인 전이에 의해 향상될 수 있다. 물론 이 방법은 전력생산이 증가 할 때까지 혹은 유사한 미생물 군집이 발현될 때까지 상대적으로 오랜 시간이 소요된다는 단점이 있다. 하지만 이 방법은 동일 기질과 배양액을 사용하는 경우에만 적합한 활용 방법으로 판단된다. 얼마나 많은 양의 바이오매스가 주입되어야 하는가 그리고 어떻게 MFC 운전을 시작해야 혼합균주 혹은 순수균주에 유리한 방법인가에 대해서는 보다 표준화 된 가이드라인에 대한 지속적 연구가 필요한 실정이다.

4. 분극화 데이터 및 전기화학적 시험

a. 분극화 데이터(Polarization Data)

Polarization 데이터를 획득하는 방법은 다양하다. 그 방법은 시간에 따라 저항을 변화시키는 방법, 선형스weep전압전류법(linear sweep voltametry, LSV) 및 전류차단(current interrupt)법 등이 있다. 한 cycle time 이내에 저항을 변화 시켜가며 각 저항에 대한 전류 혹은 전력을 측정하는 경우 이를 위한 충분한 시간을 허용하여야 한다. 그렇지 않으면 일반적으로 정상상태 대비 과대평가 되어 높게 나타나는 경향이 발생된다. 적절한 허용 시간은 각 저항에서 약 20-30 분이며 더 긴 시간도 무방하다. 하지만 이 시간 동안 기질의 농도가 급격하게 변화하지 않아야 할 것이다. 여러 cycle 에 대해서 수행하는 경우 동일한 저항에 대해 일관성 있는 데이터를 보여줘야 함은 당연하다. Polarization 데이터가 LSV 에 의해 구해지는 경우 0.1 mV/s 정도의 매우 낮은 스캔속도(scan rate)가 사용되어야 한다. 1 mV/s 에 수행하는 경우 0.1 mV/s 대비 약 80% 이상 과대 평가되는 경우가 보고된 바 있음을 유의해야 한다. 한편, 전류차단법은 MFC 에 일반적으로 사용되지는 않는 것으로 나타났다.

b. 기준전극(Reference electrode)

기준전극의 활용은 전극 혹은 새로운 전극물질의 성능 평가에 매우 중요하며 산화전극의 포텐셜이 변하지 않음을 확실하게 보여줄 수 있어야 한다. 그 경우에만 새로운 환원전극재료에 의한 반응조의 성능변화 경향을 고찰 할 수 있게 된다. 물론 그 새로운 전극물질은 표준 three-electrode 를 활용한 LSV 혹은 cyclic voltammetry(CV) 와 같은 전기화학적 시험을 수행 하여야 한다. 한편, 기준전극을 활용하는 경우 표준수소전극에 대한 보정 혹은 적절한 변환인자의 제공이 필요하다. 기준전극은 사용되는 전극에 최대한 가까이 설치되어야 하며 지속적으로 보정을 수행해야 한다. 특히 공극이 많은 전극을 사용하는 경우는 주의를 요하는데, 그래파이트 섬유전극과 같은 경우 오랜 기간의 운전동안 산화전극의 포텐셜이 점차 변화하는 것으로 알려져 있기 때문이다. 보고된 바에 의하면 비슷한 경우의 실험에서 환원전극의 포텐셜이 14 개월 동안 완벽하게 재현되었다는 것으로 미루어 볼 때 사실상 산화전극의 포텐셜이 변하는 것이 아니라 기준전극의 포텐셜이 변화한다는 점을 이해할 필요가 있다.

c. Power overshoot

두 가지의 다른 power overshoot 현상이 전력밀도 곡선에서 관찰되었는데 M 형 과 D 형의 전력곡선으로 나타난다. M 형 overshoot 은 최대전력이 과대평가 되는 경우인데 이 경우는 매우 낮은 LSV 를 적용하거나 고정된 저항에서 오랜 기간 운전하는 것으로 보정이 가능하다. D 형 overshoot 은 여러 연구에서 자주 관찰 되었으나 원인 설명이 가능하지는 않은 것으로 판단되며, 여러 cycle 을 이용한 측정방법이 LSV 나 단일 cycle 측정방법보다 유리할 것으로만 추측한다. Polarization 데이터는 두 방향의 최대 전력피크를 충분히 보여주는 전력밀도 곡선을 보여주어야 한다. 혹시 언급된 overshoot 현상을 보여주는 데이터가 있다면 임의로 제거하여서는 안되며 이는 쉽게 파악 가능하다. 더불어 전력밀도 곡선이 명확하게 최대치에 도달하지 못하는 경우 최대 전력의 과소평가는 불가피하다.

5. 추가 관찰사항

새로운 MFC 실험을 설계하는 경우 고려해야 하는 많은 인자들이 존재하는데 이는 식종균, 배양액, 재료부터 반응조의 수와 운전시간 등이 그것이다. 관련 기술의 진보에 따라 보다 더 많은 분석기법들이 다양한 실험에서 여러 연구자들에 의해 인정 받으면서 표준화 되고 있다. 하지만 아직도 몇몇 문제들에 대해서는 여전히 동의가 부족한 형편이다. 향후 실용화를 위한 이러한 기술의 발전을 도모하는 연구에 있어서는 현실적인 적용을 위한 분석 조건을 크게 강조해야 할 것이다. 예를 들면 값비싼 재료를 활용하거나 폐수에 phosphate 버퍼를 추가하는 방법 등은 지양되어야 한다. 결국 궁극적으로 실험실에서 현장의 실제 플랜트로의 점진적인 발전이 강조되어야 한다는 것은 자명하다. 이에 따라 두 개의 반응조를 활용하는 H 형 반응조 실험은 이제 실패수 실험에 적용이 부적합하다고 판단된다. 다만, 순수균주나 새로운 전극재료에 집중하는 보다 기초적인 연구에만 한정적으로 유용할 것이며, 그 실험에서 도출된 결과는 반응조 조건이 그 성능에 영향을 미치는 실용화를 위한 실험조건으로 고려되지는 못할 것이다.

저널의 리뷰어는 신뢰성 높은 연구의 출판물 양산을 위한 중요한 역할을 수행한다. 따라서 사실에 입각한 충분한 과학적 데이터 검증을 바탕으로 하여야 하며 실수를 용납해서는 안될 것이다. 과학적/공학적 성과의 수준을 높이는 것은 어떤 분야에서나 필수적이다 하지만 때때로 생물학적 전기화학시스템과 같은 융합학문분야에서는 어려운 이야기가 될 수도 있다. 따라서 적절한 실험방법을 통해 분석된 결과를 충분히 수집하고 통계적 분석을 통해 이 분야의 거시적인 발전을 도모하는 것이 중요하다. 통계적 접근법은 가당치 않거나 재현성이 현저히 떨어지는 결과의 출판을 줄일 수 있을 것으로 판단한다. 생물학적 전기화학시스템 분야가 성숙해 가면서 보다 더 많은 분석기법과 연구 조건이 제안될 것이고 연구자들의 평가를 거쳐 표준화 될 것으로 생각한다. 하지만 아직 완전한 표준화에 이르지 못한 현재의 MFC 연구를 평가함에 있어서는 보다 많은 주의를 기울여야 한다. 결국, 심도 있는 토론과 토의를 거친 연구자들의 동의는 보다 신뢰성 높은 MFC 연구를 보장할 것이며 다방면의 실용화를 가능케 할 것으로 본다.