

하폐수 처리와 동시에 에너지를 생산하는 미래기술; 미생물연료전지(Microbial Fuel Cell, MFC)



김 병 군 ●●●
K-water연구원 수석연구원
bgkim@kwater.or.kr



김 홍 석 ●●●
K-water연구원 책임연구원
waterkim@kwater.or.kr

1. 서론

20세기를 화석연료의 시대라고 한다면 21세기는 신재생에너지의 시대이다. 21세기 화석연료의 고갈과 기후변화 등의 환경위기를 극복하기 위해서는 에너지와 환경문제를 동시에 해결해야 한다.

우리나라에서도 이러한 국제적인 기조에 발맞추어 에너지 다소비 시설인 하폐수처리시설에 녹색기술을 적용하여 에너지를 절감하고 청정에너지를 생산하는 ‘에너지 자립’을 추진하고 있으며, 특히, 환경부는 2030년까지 하수처리시설 에너지 자립율 50%를 목표로 ‘하수처리시설 에너지 자립화 기본계획’ 추진을 선포한 상태이다.

K-water를 비롯한 많은 연구자들은 최근 이에 대한 해법을 눈에도 보이지 않는 작은 미생물에서

찾으려는 노력을 활발히 경주하고 있다. 미생물은 태양에너지로 광합성을 하여 생명체가 이용할 수 있는 화학에너지(유기물)를 생산하기도 하고, 탄소, 질소, 인, 황 등의 주요 원소를 지구화학적으로 순환시키는 역할도 담당하는 등 지구 생태계에 매우 중요한 기능을 담당한다. 이 외에도 미생물은 한국인이 좋아하는 김치와 같은 발효음식을 만들거나 하수처리장과 같이 오염물질을 제거하는 곳에도 사용된다.

최근에는 미생물을 이용하여 오염물질을 제거하면서 직접 전기를 얻을 수 있음이 밝혀졌다. 이를 ‘미생물연료전지’라 한다. 사실 미생물이 전기를 낸다는 것이 생소할 수 있지만, 모든 생물은 먹이를 소화하는 과정에서 체내에 전기화학적 반응이 일어난다는 사실과 전기뱀장어와 같이 전기를 만드는 생물이 있다는 사실을 보면 그리 놀라운 일도 아니다.

K-water는 MFC연구사업단을 조직하고, 태영건설, 한화건설과 공동연구를 통해 세계최초 “미생물연료전지 기반의 에너지 자립형 수처리 기술” 개발에 주력하고 있다.

2. 세계가 주목하는 미생물연료전지 기술

미생물을 이용하여 전기를 만드는 첫 시도는 이미 1912년 영국 포터교수의 대장균 실험에 의해 이루어졌지만, 발생하는 전류가 극히 작아서 큰 관심을 받

지 못하였다. 1960년대에는 미국 나사에서 우주선에서 발생한 폐기물을 처리하기 위한 방법으로 미생물연료전지를 이용하였으나 낮은 효율 등으로 큰 진전이 없었다. 이후 1980년대에 알렌과 베네토라는 과학자가 미생물과 전극 사이에 전자를 주고받을 수 있는 매개체를 주입하면 보다 효율적으로 전자를 전달하고 높은 전류를 생산한다고 보고함으로써, 미생물연료전지에 대한 기대가 높아졌지만 대부분의 매개체는 독성이 있으며, 지속가능하지 못하고 연속적으로 매개체를 주입해야 하는 문제는 미생물연료전지를 실용적으로 사용하기 어렵게 만들었다.

이러한 한계점은 1999년 국내 KIST 김병홍 박사가 인공적인 매개체 도움없이 미생물이 스스로 전자를 전극으로 전달할 수 있다는 사실을 밝혀냄으로써, 미생물연료전지 기술이 새로운 전기를 맞이하게 되었습니다. 이후 전 세계적으로 미생물연료전지 연구가 폭발적으로 증가하였고, 이에 힘입어 미

생물연료전지는 불과 수 마이크로와트의(μW) 전력만 생산할 수 있었다가 10여 년 만에 수 킬로와트(kW) 수준의 전기를 생산하기에 이르렀으며, 미국 TIME(2009)에서는 미생물연료전지를 ‘최고의 발명품 BEST 50’에 선정하였으며, 영국 Global Water Intelligence(GWI)(2009)에서는 ‘물 시장을 주도할 10대 기술’로 선정하여 기술발전에 높은 가능성을 부여하였다.

3. 미생물연료전지 연구과제 소개

“미생물연료전지 기반의 에너지 자립형 수처리 기술”의 개발 및 상용화를 위해 K-water에서는 MFC 연구사업단을 조직하고, 태영건설, 한화건설과 공동으로 연구를 수행하고 있다.

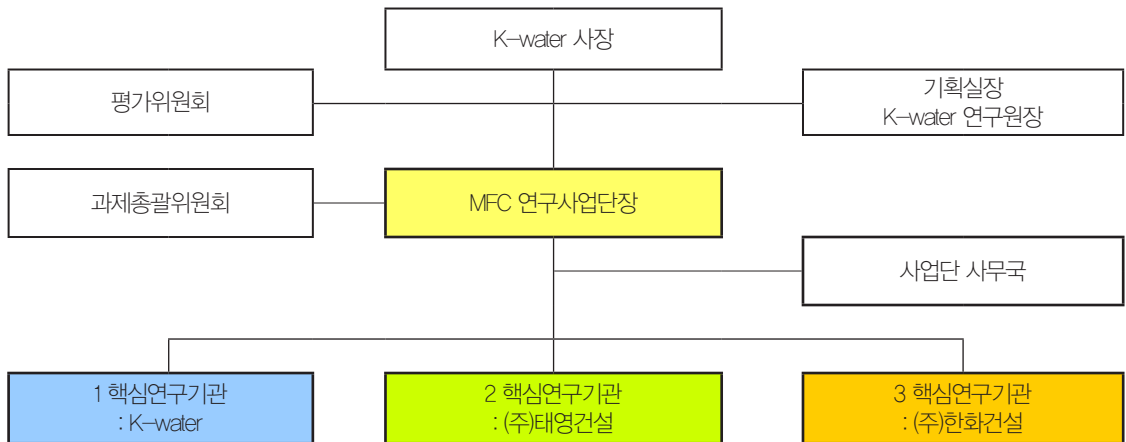


그림 1. MFC연구사업단 조직

MFC연구사업단에 참여하고 있는 3사(K-water, 태영건설, 한화건설)는 각 사별 13.4억원을 공동 투자하여 총 40.2억의 연구비를 조성하여 연구를 수행하며, 총 연구기간은 2011년 9월부터 2016년 12월 까지 5년 4개월간 연구를 수행한다.

연구사업단의 최종목표는 30 m³/d 규모의 미생물연료전지 기반의 에너지 자립형 수처리 공정을 개발하고, 이를 통해서 기존 하폐수 고도처리 공정(A2/O공정: 혐기조-무산소조-호기조로 구성되어 있는 가장 기본이 되는 고도처리 공정)대비 에너지 자립

을 60%(기존공정 대비 에너지를 40%만 사용), 슬러지 저감 및 감량화율 70%(기존 공정대비 슬러지 생산량 30%) 달성을 목표로 한다.

미생물연료전지 기반의 에너지 자립형 수처리 기술은 기존 공정에 비해 미생물연료전지(Microbial

Fuel Cell, MFC), 분리막 생물반응조(Membrane Bioreactor, MBR), 축전식 탈염장치(Capacitive Deionization, CDI)를 주 공정으로 하고, 슬러지 가용화조를 보조 공정으로 구성하고, 표 1에서와 같이 각 사별 세부과제를 추진하고 있다.

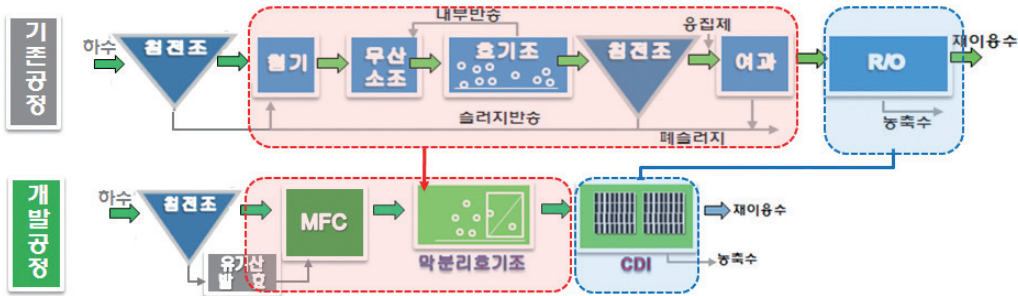


그림 2. 미생물연료전지 기반의 에너지 자립형 수처리 공정 개념도

K-water에서는 ‘K-water형 MFC기술 개발(핵심과제 1)’연구를 수행하고 있다. 우선 미생물연료전지에서 하폐수 중의 유기물을 제거하면서 최대 전력 밀도(단위 산화전극반응조 부피 당 발생 전력; W/m³)를 낼 수 있는 기술을 개발함과 동시에 미생물연료전지가 성공적으로 상용화되기 위한 저가이면서도 효율적인 재료(내부저항 최소, 비표면적 최대, 전기전도도 최대전극, 사영역 최소 반응기 구조 등), 미생물(미생물 대사, 생물막 특성 등), 운전 조건(전위, 이온강도, 하수 성상 등) 등을 최적화할 수 있는 연구를 수행하고 있다.

태양건설에서는 ‘슬러지 감량화 및 유기산생산기술 개발(핵심과제 2)’ 연구를 수행하고 있다. 1차 슬러지의 산발효를 통해 미생물연료전지의 전기발생에 도움이 되는 유용한 유기산 또는 CDI의 농축수 처리에 활용할 수 있는 효과적인 산발효 공정개발이 요구되며, 따라서, 슬러지 가용화율을 높이고, 메탄생성균 활동을 억제하기 위해 pH 5~6.5 조건을 유지하고, HRT를 짧게 함으로써 산발효 효율을 극대화할 수 있는 기술 및 이의 최적화 연구를 수행하고 있

다.

한화건설은 ‘저포기형 MBR과 CDI를 연계한 저에너지 물재생 기술개발(핵심과제 3)’ 연구를 수행하고 있다. 미생물연료전지 후단의 잔존 유기물 제거를 위한 분리막 생물반응조(Membrane Bioreactor; MBR)와 축전식 탈염기술(Capacitive Deionization, CDI)을 이용한 질소, 인 등 용존이온 제거기술을 접목하여, 저에너지 물재생기술 최적화 연구를 수행하고 있다.

MFC연구사업단 Road-map은 그림3과 같다. 핵심연구기관은 연구기간 3차년도까지 핵심 요소기술 개발을 마치고, 4차년도에는 1,000 L/일 파일럿 실험장치를 실제 하폐수를 대상으로 운영하여 실증규모 설계인자를 도출하여 30m³/일 규모의 실증플랜트를 설치, 운영하고자 한다. 테스트 베드는 계룡시와 협의하여 계룡하수처리장에 설치하는 것으로 계획하였다.

5, 6차년도에는 Test-bed 운영을 공동으로 실시하여 생산된 개발성과물로 환경신기술 인/검증을 획

특하고, 향후 에너지 자립형 하폐수처리 시장에 진출할 계획이다.

연구의 성공으로 미생물연료전지 기반의 에너지 자립형 수처리 공정을 국내 하수처리장에 도입한다

면 전기에너지 생산, 폭기비 절감 및 슬러지 처리비용 저감으로 1년에 약 1,860억원의 효과가 발생할 것으로 판단된다(표 2).

표 1. MFC연구사업단 핵심과제 및 세부과제

핵심과제		세부과제
핵심 과제 1	K-water형 MFC기술 개발	고효율 미생물연료전지 실용화기술 개발
		바이오캐소드 기반 질소제거기술 개발
		Test-bed 설계
		Test-bed 운전 및 신기술 인증/검증
핵심 과제 2	슬러지 감량화 및 유기산 생산기술 개발	저비용 고효율 슬러지 가용화기술 개발
		농축수 질소/인 회수 및 제거기술 개발
		Test-bed 설계 및 시공
		Test-bed 운전 및 신기술 인증/검증
핵심 과제 3	저포기형 MBR과 CDI를 연계한 저에너지 물재생 기술개발	저포기형 MBR 공정 최적화기술 개발
		에너지 회수형 축전식 탈염기술 개발
		Test-bed 설계 및 시공
		Test-bed 운전 및 신기술 인증/검증

표 2. 미생물연료전지 기반 수처리 공정 도입효과 분석

가정 항목	국내 중규모 이상 하수처리장 전체에 미생물연료전지 수처리 공정 적용	
1. 총 유입하수량 ^a	65억 m ³ /년	(연간 절감비용)
2. 총 운영관리비 ^a	6,500억원/년	-
3. 전기에너지 생산 ^b	13억 kWh/년	1,000억원/년
4. 슬러지 저감 ^c	1,700,000 m ³ /년	600억원/년
5. 폭기비 절감 ^d	260억원/년	260억원/년
합계		1,860억원/년

a. 환경부 “공공하수처리시설 운영관리 실태조사 결과”자료 인용

b. 전기에너지 생산량 = 유입부하 * 1 kWh/1 kg COD (1 kWh = 76.43원, 한국전력통계)

이론적으로 1kg COD 당 4 kWh의 에너지가 잠재하며, 이 중 25%를 회수한다고 가정

c. 슬러지 저감량 = 연간 슬러지 발생량의 60% 가정 (평균 처리비용 36,200원/m³)

d. 폭기비 절감량 = 연간 전력 소모량 중 송풍기 가동에 약 40%가 소모되며, 이중 30% 이상 절감 가능하다고 가정



그림 3. MFC연구사업단 Road-map

4. 결론

미생물연료전지는 에너지를 가하여 만든 수소를 연료로 사용하는 화학연료전지와 달리 버려지는 유기물(예를 들면, 폐수 내 유기오염물질)을 연료로 사용하기 때문에 대표적인 자원순환기술로 손꼽힌다. 게다가 유기오염물질을 분해함으로써 환경정화, 즉 하폐수처리의 기능도 동시에 수행한다. 수소연료전지, 바이오에탄올, 바이오디젤 등과 같은 다양한 바이오 에너지 기술은 복잡한 연료전환 과정을 거치기 때문에 에너지 손실이 매우 높지만, 미생물연료전지는 미생물을 촉매로 이용하여 유기물로부터 직접 전기를 생산하기 때문에 높은 에너지 회수율을 가진다. 가령 하수처리장으로 유입되는 하수를 미생물연료전지를 이용하여 100% 전기에너지로 전환하면, 기존 하수처리장 유지운영비의 약 3배에 달하는 에너지를 생산할 수 있다. 게다가 미생물연료전지는 공기 중의 산소를 직접 사용할 수 있어서, 하수 처

리장에 적용할 경우 포기에 필요한 막대한 동력비가 전혀 들지 않으며, 미생물연료전지는 기존 하수처리장에 비해 불과 1/10의 잉여슬러지를 배출하므로, 슬러지 처리 및 이에 따른 환경문제도 크게 줄일 수 있다.

미래기술인 미생물연료전지를 실용화하기 위해서는 아직 넘어야 될 많은 연구장벽이 있으나, K-water에서는 태연건설, 한화건설 및 미생물연료전지 연구그룹과의 네트워크를 활용하여 세계최초로 미생물연료전지의 실용화 가능성을 제시할 수 있도록 노력하겠다. 🌊