

(옆면)

(앞면)

8CTAP-
C129744
-02

수
자
원

다
원
화
를

위
한

수
요

맞
춤
형

저
에
너
지

물
재
이
용
기
술

개
발

최
종
보
고
서

(건고덕
14p)

2019
(건고덕13p)
국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

(건고덕
17p)

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(), 비공개()발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서(건고덕 13p)

R&D / 18CTAP-C129744-02

(건고덕31p)

수자원 다원화를 위한 수요 맞춤형 저에너지 물재이용기술 개발 최종보고서

2019. 3. 29.
(건고덕15p)

주관연구기관 / 세종대학교산학협력단
위탁연구기관 / 한국에너지기술연구원
(건고덕 15.5p)

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원
(건고덕 20p)

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘수자원 다원화를 위한 수요 맞춤형 저에너지 물재이용기술 개발’(연구개발 기간 : 2017. 4. 1~ 2018.12.31) 과제의 최종보고서(보완본) 1부를 제출합니다.

2019. 3. 29.

주관연구기관명 : 세종대학교산학협력단 (대표자) 백 성 욱 (인)

위탁연구기관명 : 한국에너지기술연구원 (대표자) 곽 병 성 (인)

주관연구기관책임자: 김 현 철

위탁연구기관책임자: 남 주 연

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C129744-02	해당 단계 연구 기간		단계구분	(해당단계)/ (총단계)
연구사업명	중사업명				
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	수자원 다원화를 위한 수요 맞춤형 저에너지 물재이용기술 개발			
연구책임자	김현철	해당단계 참여연구원 수	총: 6명 내부: 4명 외부: 2명	해당단계 연구비	정부:220,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:220,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 12명 내부: 8명 외부: 4명	총 연구비	정부:370,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:370,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	세종대학교산학협력단 / 물자원연구소			참여기업명: 해당사항 없음	
국제공동연구	상대국명: 해당사항 없음			상대국 연구기관명: 해당사항 없음	
위탁연구	연구기관명: 한국에너지기술연구원			연구책임자: 남주연	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	
-------------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약

○ 생물학적 하수처리에 이은 재이용 방식과 달리 기계적 산소공급 없이 탄소성유
기물질의 제거 가능 ○ 소독부산물발생 없이 미생물을 제거하거나 불활성화 달성
가능한 on-site 소독 기능 ○ 선행연구에서 확보된 광합성생물공정으로부터 산소를
공급하여 전기화학시스템의 성능 향상 ○ 탄소성유기물질의 분해시 발생하는 CO₂를
포집 고정함으로써 carbon-neutralization 실현 ○ 에너지자립도향상 기술로 분산
형 기반의 수자원 다원화를 위한 탄력적 재이용수 생산 공정운용 가능 ○ 미생물대
량증식을 배제하고 응집제 주입이 필요 없어 약품사용 및 슬러지 처리비용 경감

보고서 면수

36

연구의 목적 및 내용	□ 최종목표: 수자원 다원화를 위한 수요 맞춤형 저에너지 물재이용기술(공정개발) - 하수원수를 처리대상으로 기계적 공기공급 없이 탄소성유기물질 안정화 - 탄소성유기물질의 안정화시 발생하는 온실가스의 포집/고정(무배출) - 현장 적용이 가능한 부산물 발생이 없는 안전한 소독공정 구성 - 지속가능한 멤브레인 공정운용 시스템 최적화 기법 수립 - 분산형/저에너지 운용 기반으로 공정의 에너지자립도 향상 □ CO₂-neutral 탄소성유기물질 저감 기술 - BOD 저감효율, 산소발생량, CO₂ 방출/흡수특성 등 하수처리특성 평가 및 공정운영 최적화 - 바이오매스 고정화 기법 최적화 및 고정화에 따른 공정성능 영향 평가 □ Non-byproducts 저에너지 소독/고도산화 기술 - 지표미생물 불활성화 효율 및 특정 난분해성 미량오염물질 분해특성 평가 - 소독/고도산화 목적의 적정 에너지 공급량 산정 및 운전최적화 □ Anti-fouling 재처리수 고액분리 기술 - 멤브레인 운전조건에 따른 고액분리 성능평가 - 운전에 따른 가역적 여과지속성 평가 및 안정성 조사
연구개발성과	□ 계절적/공간적 물부족 피해 예방/최소화 목적으로 대체수자원 확보를 통하여 기존 수자원 활용을 효율화하기 위한 분산형/저에너지 재이용기술 개발 - CO₂-neutral 탄소성유기물질 저감 기술: 재래식 하수처리방식과 달리 기계적 산소공급 없이 탄소성유기물질을 무기화하여 재처리수의 BOD를 저감 - Non-byproducts 저에너지 소독/고도산화 기술: 소독부산물을 생성시키지 않으면서 재이용수의 미생물학적 안전성을 확보하고 난분해성오염물질의 저감유도 - Anti-fouling 재처리수 고액분리 기술: 경제성이 담보된 MF 분리막을 혼합 시스템 형태로 구성하여 부유고형물질을 포함한 일부 용존유기물질의 제거와 수질향상에 기여
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	□ 활용계획 - 원천기술 지재권 관리와 기술이전 추진을 통하여 관련 산업분야로 사업화유도 - 물산업분야에 대한 연구개발과 상용화 및 신산업창출에 기폭역할 - 물순환 도시인프라 구축을 위한 지능형 도시 물 공급 및 물 자립 기술보급 추진 - 저영향개발 기반의 물 공급을 위해 활발히 추진되고 있는 인공녹지와 빗물침투설비 확충 그리고 지하저류시설 구축 등과 병행하여 수자원 다원화 - 특정 바이오매스 활용분야의 친환경 기술보급을 통한 부가가치 창출 □ 기대효과 - 저에너지 CO₂ neutral 물재이용 적정기술 마련으로 처리비용 절감 - 기존 하수처리수 재처리관련 슬러지/농축수 발생 등 환경문제 근원적 해결 - 대체 취수원 확보로 사회갈등요인 해소 및 수처리 비용절감효과 - 물관리 적정기술마련을 통한 하천정화 및 기후변화 대응력 향상
핵심어 (5개 이내)	물재이용 수자원다원화 저에너지 분산형시스템

< SUMMARY >

Purpose & Contents	Organic carbon stabilization and hydrogen peroxide production from various types of synthetic wastewater using electrochemical processes and their on-site applicability coupled with specific biomass for phycoremediation processes was investigated. We designed the proposed experimental plans with scientists at collaborative organizations. Microbial electrochemical technologies use microorganisms to catalyze different electrochemical reactions for generation of electrical power. The technologies take advantage of microbial interaction with solid electron acceptors/donors to convert organic compounds into electricity, which is then used to produce energy and other value-added compounds through electrochemical or electrosynthetic processes. In contrary, phycoremediation with algal biomass is an emerging technology that employs living oxygenic photosynthetic microbes to fix CO₂ and simultaneously remove inorganic nutrients from waste waters without the mediation of heterotrophic microbes. H₂O₂ can be electrochemically generated by oxygen reduction reaction using microbial electrochemical systems. Several studies have shown that it is possible to synthesize H₂O₂. In the proposed work, electrochemical technologies, phycoremediation process, and their combinations were evaluated. In addition to the robust production of H₂O₂ and its on-site applicability coupled with UV irradiation was investigated for wastewater treatment in the context of advanced oxidation process.				
Results	Qualitative and quantitative investigation was conducted on evaluation of the effectiveness and mechanisms of various physicochemical treatments for wastewater reuse. The results from the proposed study was compared to previous reports regarding the capability of destroying both pollutant molecules and pathogen cells in wastewater. Our results indicate that the bioelectrochemical production of H₂O₂ and its application to on-site wastewater treatment is highly feasible as a safe and inexpensive technology to improve the biodegradability of refractory organic matter and attenuate emerging contaminants while reducing energy consumption.				
Expected Contribution	The research outcomes will provide useful information regarding sustainable wastewater management as electrochemical technologies can help transform energy-consuming wastewater treatment processes into energy-efficient and CO₂-neutral processes.				
Keywords	Water reuse	Water resource diversification	Energy efficiency	Decentralized system	

< Contents >

1. Outline of research and development task	1
2. Status of domestic and overseas technology development	3
3. Research scopes and methods	4
4. Achievement of goal and contribution to relevant field	28
5. Usage plan of research and development achievements	34
6. Overseas science and technology information	34
7. Security rating of research and development achievements	34
8. Research facilities and equipments registered in the NTIS	35
9. Implementation of safety measures in laboratories	35
10. Representative research achievements	35
11. Others	36
12. References	36

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	3
3. 연구수행 방법 및 내용	4
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	28
5. 연구개발성과의 활용 계획	34
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	34
7. 연구개발성과의 보안등급	34
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	35
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	35
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	35
11. 기타 사항	36
12. 참고 문헌	36

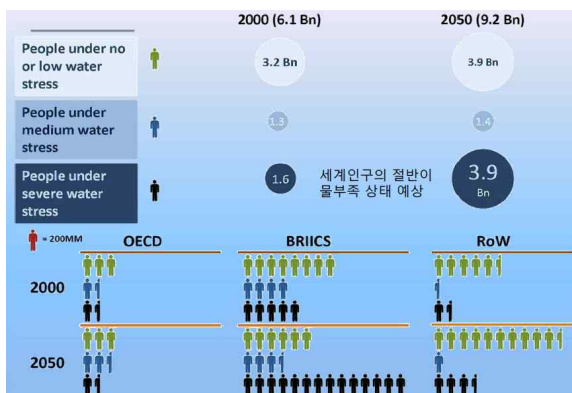
제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

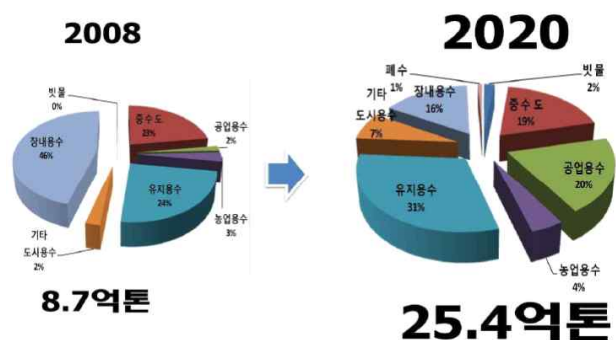
구분	내용
최종 목표	수자원 다원화를 위한 수요 맞춤형 저에너지 물재이용공정 개발
세부 목표	계절적/공간적 물부족 피해 예방/최소화 목적으로 대체수자원 확보를 통하여 기존 수자원 활용을 효율화하기 위한 분산형/저에너지 기술개발을 위해 아래 세부 목표를 설정하였으며, 최종 과제종료 시 TRL간극을 좁혀 향후 시작품기반의 적용성 평가를 위한 연구단계 진입이 가능하도록 지식을 성숙시킴. - 하수원수를 처리대상으로 기계적 공기공급 없이 탄소성유기물질 안정화 - 탄소성유기물질의 안정화시 발생하는 온실가스의 포집/고정 - 현장 적용이 가능한 부산물 발생이 없는 안전한 소독공정 구성 - 지속가능한 멤브레인 공정운용 시스템 최적화 기법 수립 - 분산형/저에너지 운용 기반으로 공정의 에너지자립도 향상

2. 연구개발의 필요성

- 전 세계 대형 석탄 공급기업들 중 1/3이 파산신청을 하는 등 석탄에 이어 향후 석유에 이르기까지 화석연료 사용의 종식을 예고하고 있으며, 2030년 기점으로 현재 화석연료 중심의 에너지 공급체계는 기하급수적인 신재생에너지 대체로 큰 전환점을 맞을 것으로 예측됨.
- 신재생에너지 산업의 급속한 성장은 분산형 구조의 에너지 공급체계를 구축하고 그에 따라 '물' '식량' 등도 현재의 과밀화된 중앙공급 방식에서 벗어난 새로운 형태로의 체제 전환이 가속화 될 것으로 전망됨.
- 기후변화, 물부족, 수자원다원화, 수계변화, 수요자 인식변화 등 다양한 요인으로 물재이용 수요가 폭증하고 있는 반면 현재의 물공급/재이용 전략은 아직까지 비생산적 수자원관리와 대형 하수처리에 의존하고 있어 패러다임 전환이 요구됨.
- 환경부 발표에 따르면 2014년 말 기준 전국 500m³/일 이상 공공하수처리시설 중 564개 시설에서 하수처리수 재이용 물량은 연간 942백만m³ (재이용율 13.5%)으로 대부분 하천유지수로 활용되고 있는 바, 기존 수자원에 대한 의존도를 줄이고 물이용 목적에 따라 보다 안정적이고 값싼 대체용수확보를 위하여 효율적인 물의 재이용전략 수립과 범국가적 활성화방안 마련이 필수적임.
- 국내에서도 재처리수의 용도별 수질기준이(개정 2015. 9) 마련되었으나, 지금까지 재처리공정의 대부분을 차지하는 역삼투막 기반의 하이브리드공정 적용은 해외기술의존도가 높고 무엇보다도 높은 에너지 요구량과 별도 처리를 요하는 난분해성 농축수 발생 등 기후변화 대응력이 향상된 저에너지, 무배출, 탄소저감 실현이 가능한 물재이용 전략과 기술 개발이 매우 미흡한 실정임.
- 전 세계적으로 물 산업 및 바이오소재 응용 기술개발 분야는 큰 잠재력을 가지고 성장해가고 있으며, 탈화석연료/이산화탄소저감 시장 또한 지속적으로 동반성장하고 있는 추세여서 탈화석연료 시대의 도래에 맞춰 분산형 구조의 물재이용 전략과 그에 따른 적정기술 마련과 실용화 전략구축이 절실히 요구됨.



물 부족 시나리오 2050
(OECD, 2011)



공공하수처리수 재이용현황과 전망
(국가하수도정보시스템)

3. 연구개발 범위

가. 1차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관 (세종대학교)
 - 미생물 불활성화 효율 평가
 - 멤브레인 운전조건에 따른 고액분리 성능 평가
- 위탁연구기관 (한국에너지기술연구원)
 - 바이오매스 고정화 기법 최적화
 - 바이오매스 고정화에 따른 공정성능 영향 평가

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관 (세종대학교)
 - On-site 소독제(H_2O_2) 생산량 측정
 - 외부전력 공급량에 따른 미생물 불활성화율 측정
 - 멤브레인 운전범위 및 기준조건 설정
 - 탁도 등 처리수질 분석 및 고액분리효율 측정
 - 성능평가 프로토콜수립
- 위탁연구기관 (한국에너지기술연구원)
 - 고정화 수단 및 바이오매스 종특성에 따른 영향 분석
 - O_2 발생량 및 CO_2 흡수효율 측정
 - 광노출 특성에 따른 영향 평가
 - 실험실 조건에서 성능평가 프로토콜 수립

나. 2차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관 (세종대학교산학협력단)
 - 고도산화 응용기법 연구
 - 소독/고도산화 적정 에너지 공급량 산정
 - 멤브레인 여과 지속가능특성 평가
- 위탁연구기관 (한국에너지기술연구원)
 - 전기화학 반응조 운영 최적화 및 하수처리특성 평가

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관 (세종대학교산학협력단)
 - 생물학적 난분해성 미량유기오염물질 중 지표화학물질 선정
 - H_2O_2 와 UV조사 병용에 따른 지표물질의 거동특성 평가
 - 외부전력공급량 대비 미생물 불활성화 및 지표물질 분해도에 따른 운전최적화
 - 저에너지 H_2O_2 생산 및 운용조건 도출
 - 운전조건에 따른 MF멤브레인 오염제어 특성 분석
 - 가역/비가역오염 특성과 멤브레인의 물리화학적변형 특성 조사
 - 위탁연구기관 (한국에너지기술연구원)
 - 무산소조 전극 고정 미생물에 의한 BOD 저감효율 및 CO_2 방출량 분석
 - 단위셀 내부저항 최소화를 위한 반응조 구조 개발
 - 시스템 효율 개선을 위한 전극 소재 최적화
-

제2장. 국내외 기술 개발 현황

○ 국내 현황

- 2020년 기준 과거 최대가뭄 발생 시 전국적으로 약 4.3억 m^3 의 물부족이 전망되고(수자원장기종합계획, 2011.12), 관련하여 지속가능한 물재이용 활성화를 위해 과거 빗물과 중수도 이용에서 최근 적극적인 하수재이용 추진으로 친환경 대체용수 확보 노력
- 국가적 주요시책 추진에 맞춰 하수재이용 사업은 ‘물 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률’절차에 따라 공공기관을 중심으로 시행
- 용도별 재처리수 수질과 경제성을 고려한 기술 선택이 필수적이나 지자체별 대형 하수처리시설 거점의 획일화된 공정 적용으로 불필요한 에너지/비용/부산물 발생 (역삼투 등 4차 처리 적용시 약 2배 이상의 순수 수처리비용 발생)

○ 국외 현황

- 미국에서는 각 주의 물 재이용수 관련시설에 대한 조사를 실시하여 18개주에서 제출된 498개소의 데이터를 분석한 물 재이용 현황에 따르면 농업용수 및 관개용수로 가장 많이 쓰이고 그 외 대수층함양, 공업용수의 용도 등으로 사용되고 있음.
- 미국의 경우 2007년 기준 U.S. Energy Information Administration에 의해 건설이 계획된 발전소의 81%는 반경 10 마일 이내에 위치한 1-2개소의 공공하수처리시설로부터 충분한 양의 냉각수 확보가 가능하며, 97%의 발전소는 반경 25 마일 이내의 하수처리시설로부터 용수수요량 확보가능.
- 유럽의 재이용수는 264만 m^3 /일로 하수처리수의 약 2.4%가 재이용되었으며, 이 중 약 4% 정도만 공업용수로 사용되는 반면, 수자원의 주 사용용도가 공업용수인 네덜란드 경우 하수 재이용수의 대부분이 공정수, 보일러용수 등의 공업용수와 일부는 하천유지용수로, 폴란드의 경우 재이용수 전량 공업용수로 사용됨.
- 일본의 경우 2005년도 기준 전국 2,068개소 하수 처리장에서 3,750만 m^3 /일의 하수처리수가 발생하고 있고, 약 54만 m^3 /일 (1.5%)이 재이용수로 이용되며, 이 중 공업용수 재이용량은 0.8만 m^3 /일로 조사되어 총 재이용량 대비 1.5%로 낮은 비율을 나타냄.

● 해외 역삼투분리막 공정기반의 하수재이용기술 동향

용도/목적	국가/도시	개요
Municipal wastewater reuse	Katowice, Poland	·Power plant using municipal secondary effluent as feed ·UF+RO treatment for cooling tower makeup water (5,600 m^3 /d) ·Commissioned Jan 1999
Industrial reuse application	Chengdu, China	·Wastewater plant will treat industrial effluent from the refinery and a third of the wastewater, will be reused for cooling (67,000 m^3 /d) ·Ozonation + Biological filtering system + UF + RO
Municipal wastewater for cooling tower	El Segundo, CA, USA	·Power plant using municipal Secondary treated wastewater ·MF + RO (114,000 m^3 /d)
Reclaimed waste water for power plant	Austria	·Using neighboring waste water treatment facility was pumped into the plant ·UF + RO treatment for boiler feed makeup water (981 m^3 /d)

- 대규모 댐건설을 통한 추가적 물자원 확보의 어려움, 가속화되고 있는 오염부하의 증가와 맞물려 점차 다양화 되고 있는 신규미량오염물질의 출현, 계절 및 지역 편중적인 물자원 관리정책 등 용수 공급을 위해 중앙정부 및 지방자치단체가 풀어야할 물자원 이용과 관련한 숙제들이 매우 다양한 형태로 진화해 가고 있는 실정임.

- 우리나라는 1인당 강수량이 세계 평균의 1/6 수준으로 가용물자원이 적은 물 스트레스 국가로 물에 대한 국민적/지역적 요구가 증가하고 있으며, 2012년 기준 수입 농산물과 축산물의 생육 및 가공에 필요한 '가상수'는 약 135억m³ 규모로 앞으로 식량안보 정책을 감안한다면 물을 추가로 확보하는 노력이 절실함.
- 이에 정부차원에서 하수처리수를 막대한 양의 안정적인 대체 용수 공급원으로 간주하고 재이용수의 생산과 활용을 물 부족 스트레스를 완화하기 위한 가장 현실적인 대안의 하나로 간주하고 있는 반면, 중대형규모의 하수처리시설에 연계한 분리막 기반의 획일적인 공정운용으로 비용-효율성과 공정단순화 그리고 탄력적 공정운용 측면에 있어서 한계를 나타냄.
- 전 세계적으로 고도폐수처리와 바이오소재 응용 기술개발 분야는 큰 잠재력을 가지고 성장해가고 있으며, 물 관련 시장 또한 물 재이용 요구의 증가에 따라 지속적으로 동반성장하고 있는 추세이기 때문에 관련 산업분야를 포괄하는 공학기술의 개발과 시스템화 필요성이 크게 대두되고 있음.
- 세계 물 시장이 연평균 5%대의 지속성장이 예상되는데 반하여, 특히 물재이용 분야의 경우 인구증가와 함께 생활양식의 변화에 따른 물소모량 증가로 인해 2007년 대비 2025년 전망치에 따르면 18% 이상의 연평균 증가율로 가장 급성장할 분야로 부각되고 있음.
- 2016년까지 하수처리수 재이용 10대시장은 미국, 중국, 사우디아라비아, 호주, 스페인, 멕시코, UAE, 오만, 페루, 인도의 순이며 미국의 하수처리수 재이용 시장 규모는 약 100억달러에 달하는 것으로 추산됨.

제3장. 연구 수행 방법 및 내용

1. 이론적 · 실험적 방법 및 내용

연구 범위	연구 수행 방법	구체적인 내용
미생물 불활성화 효율 평가	- 다양한 종류의 air cathode가 구비되어 있는 전해반응조에 1~10 mA 범위의 외부전류를 공급하여 반응조로부터 과산화수소 생산성을 평가하고 향후 생물전기화학반응조에 적용할 최적 air cathode를 선정하였으며, 1 mA 및 3 mA 전류공급 조건에 대하여는 미생물 불활성화 특성을 별도로 평가함. - 광합성 생물반응공정을 도입하여 연속 일광조건하에서 aeration 가동 유/무 및 멤브레인 적용 등에 따라 해당 생물반응공정의 <i>E. coli</i> 불활성화 및 멤브레인에 의한 물리적 차단특성을 평가함. - 성능평가를 위하여 소독제노출에 따른 미생물불활성화는 유세포분석기 (CyFlow Cube6, Partec GmbH, Germany)를 이용하여 정량하였으며, 최종 멤브레인 처리수의 대장균군수를 공정시험법 상의 평판계수법을 이용하여 분석함.	- 생물전기화학반응공정에서 실제 구현 가능한 수준의 전류를 자체 설계/제작한 전기분해반응조에 공급/운전함으로써 총 4종의 air cathode (carbon cloth, Pt-coated carbon cloth, granular activated carbon, Pt-coated granular activated carbon)에 대한 소독제 생산성 평가를 실시하여 그 중 과산화수소 생산성이 가장 높게 나타난 소재에 대한 미생물 불활성화 효율을 평가함. - 생물전기화학반응공정으로부터 발생하는 이산화탄소와 미처리된 질소/인 등의 제거를 위해 광합성 생물반응공정을 도입하여 조합시스템을 구성하였으며, 광합성 생물반응공정의 운영에 따른 미생물 불활성화 특성을 평가함.
고도산화 응용기법 연구	- 생물전기화학반응공정으로부터 생산된 과산화수소(H₂O₂)와 자외선 조사를 병용하여 지표미량오염물질의 거동특성을 조사함으로써, 외부전력공급 대비 미생물 불활성화 및 지표물질 제거율에 따른 최적 운전조건을 평가함.	- 문헌고찰 및 선행연구를 수행하여 하여 생물학적 난분해성 지표미량오염물질로서 carbamazepine (CBZ)을 선정함. - CBZ는 종래의 분리막을 이용한 생물학적 하수처리 공정은 물론,

	- 후속 광합성 생물반응공정 운전을 통하여 생물전기화학반응공정으로부터 잔존하는 생물분해 가능한 유기성 탄소와 영양염류 (총질소 및 총인)에 대한 추가 저감효과를 평가함	무산소 내지는 혐기성 조건의 생물전기화학반응공정, 그리고 광합성 생물반응공정으로부터 생물분해에 대한 상당한 저항성이 확인된 바, 이에 본 과업의 고도산화 응용기술의 성능평가를 위한 지표물질로 선정 및 활용함. - H_2O_2 주입 유무에 따라 각각 500, 1000, 2000 mJ/cm^2의 자외선 주입율을 적용하여 H_2O_2 소모율 외에 수질인자를 분석하여 고도산화 응용기법의 적용성을 평가함. - 또한 생물전기화학반응공정으로부터 배출되는 유출수를 모사하여 인공하수를 준비하고, 이때 잔류하는 영양염류와 유기물질의 제거효율을 평가하기 위하여 선행연구를 통해 선별된 광합성 바이오매스를 이용하여 연속 조명 조건하에서 36 시간 동안 처리실험을 반복하여 수행함.
멤브레인 운전조건에 따른 고액분리 성능 평가	- 광합성 생물반응조내 바이오매스 농도에 따른 폐수처리 특성을 조사하고, 또한 멤브레인을 이용한 처리수의 여과시 여과성능 및 플럭스 회복에 미치는 영향을 평가함. - 성능평가를 위하여 멤브레인 여과 전/후 액상시료의 잔류탁도를 탁도계측기 (Hach 2100P)를 이용하여 측정함.	- CO_2(5%, v/v)가 공급되는 생물반응기 내에 220~1050 mg/L 농도범위의 바이오매스를 주입하고 연속조명 하에서 24시간 동안 인공폐수를 처리한 다음 상등액에 대한 멤브레인 여과를 실시하여 여과성능과 플럭스 회복정도 그리고 처리수질을 평가함.
멤브레인 여과지속가능특성 평가	- 광합성 생물반응공정으로부터 바이오매스를 효과적으로 분리하기 위한 멤브레인 적용시 세정 기법에 따른 조건별 멤브레인의 오염제어 특성을 평가함. - 생물공정 유출수 중 용존유기물질에 의한 고유의 가역 및 비가역 멤브레인 오염 특성과 물리화학적 특성분석을 실시함.	- 친수성 및 소수성 분리막을 인공하수를 이용하여 인위적으로 오염시킨 다음 알칼리성 세정액의 pH 9, 10, 11, 12 조건으로 달리하여 각각 최대 48 시간 동안 약품세정을 실시하여 멤브레인 여과성능 개선특성을 평가함. - 이때 오염된 멤브레인에 대하여 청수를 이용한 물리적 세정을 동시에 실시하여 오염의 가역성능을 비교 평가함. - 또한, 알칼리 약품사용을 기반으로 하는 종래의 멤브레인 여과성능 회복기법을 대체하기 위한 광합성 바이오매스 생장특성을 응용한 바이오세정 기법을 고안하여 그 적용성을 비교 평가함. - 이때 전자현미경(SEM)과 적외선분광기술(FT-IR)을 이용하여 멤브레인 표면의 물리화학적 특성을 분석함.
바이오매스 고정화에 따른 공정성능 영향 평가	- 두 종류의 대표적 광합성 생물종을 농도별로 반응조에 주입/배양하여 광흡수/광차폐 특성을 평가함으로써 최적 생물량 밀도를 산정함.	- 기초실험평가를 통하여 광흡수도 기반의 광합성 생물반응공정내 적정 바이오매스 농도를 산정하여 이후 O_2 발생 및 CO_2 흡수 특성평가에 적용함.

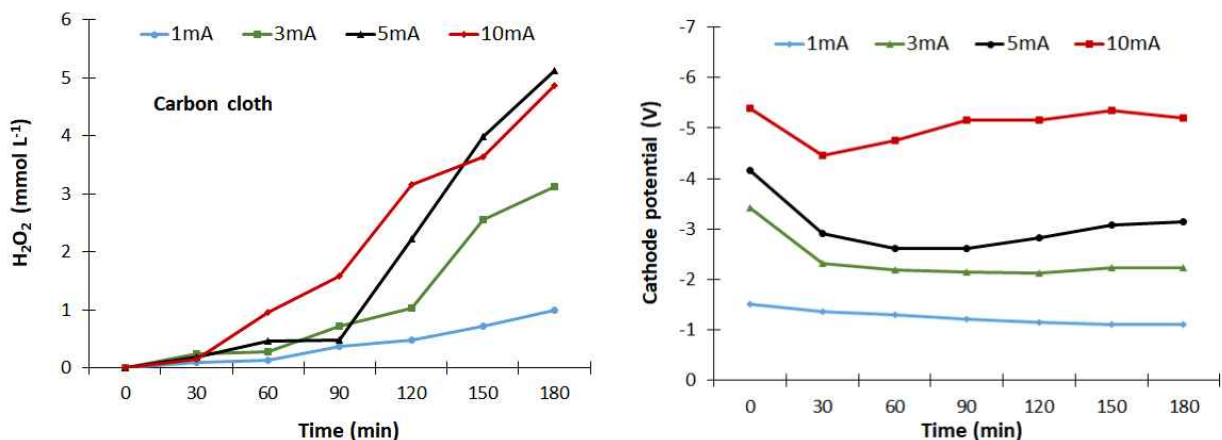
	- 미세조류를 이용하여 이산화탄소 고정과 동시에 전기에너지를 회수할 수 있는 생물전기화학 기술에 대하여 실험 조건 및 반응조 구조에 따른 광조건에서의 전기응답 특성을 조사 위한 기초연구를 수행함.	- 광합성 생물반응조 내 전력회수특성을 평가하기위해 산화전극(graphite felt, 6 mm 두께)과 환원전극(Pt(0.5mg/cm²) coated carbon cloth with PTFE diffusion layers)을 단일 반응조 내 삽입하고 전해질액(BG-11)을 사용하여 다양한 구조 및 환경조건에 대한 전기에너지 회수 특성을 평가함.
전기화학 반응조 운영 최적화 및 하수처리특성 평가	- 산화전극의 전위를 -0.4V 혹은 -0.2V (vs. Ag/AgCl)로 고정하여 H₂O₂ 생산효율 및 에너지 소비율을 평가함. - 전기화학반응조의 내부저항 최소화를 위해 GDL(gas diffusion layer)을 개선하고 전극간 거리를 좁혀 H₂O₂ 생산을 극대화 하고자 함.	- 생물전기화학조의 미생물은 하수처리장의 폭기조의 슬러지를 채취하여 접종하였으며 전기발생이 안정화 된 후 포텐시오스택을 이용하여 전극 전위를 변경하며 셀 성능을 평가함. - 이때 미생물의 기질로서 sodium acetate를 사용하고 버퍼용액으로 bicarbonate buffer를 이용함. - 환원전극의 GDL 개선 실험에서는 다른 porosity를 가진 PE와 PTFE sheet를 환원전극 표면위에 Hot press를 이용하여 부착하고 EIS 분석 및 H₂O₂ 생산 실험을 진행하였음. - 이 때 GDL 종류 외 전극 재료 실험도 병행하여 성능이 좋은 최적의 전극 조합을 찾고자 하였음. - 최적의 전극조합을 이용하여 전극거리를 좁혀 성능을 향상시키는 실험을 진행하였고 이때 시스템의 EIS 분석을 병행하였음.

2. 연구개발 목표 및 결과

세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
Non-byproducts 저에너지 소독/고도산화 기술	미생물 불활성화 효율 평가	- On-site 소독제(H₂O₂) 생산량 측정 - 외부전력 공급량에 따른 미생물 불활성화율 측정	- 1~10 mA 조건에서 3시간 운전시 1~5 mM H₂O₂ 생산가능 - 1~3 mA 조건에서 88~99%의 <i>E. coli</i> 불활성화 달성 - 멤브레인 조합공정운전으로 처리수 중 대장균군 불검출
	고도산화 응용기법 연구	- 저에너지 H₂O₂생산과 UV조사 병용에 따른 난분해성 지표물질 거동분석 및 운전최적화 - 생물전기화학공정의 잔류 유기물질 및 영양염류 저감효율 측정	- 24 h 동안 생물전기화학공정 운전을 통하여 89±2%의 COD가 제거되는 동안 222±11 mg/L-day의 H₂O₂ 생산성 확보 - 10 mg/L 농도의 현장생산 H₂O₂를 포함하는 처리대상 인공하수에 대하여 1000 mJ/cm²의 UV조사량으로 CBZ 불검출 달성 - 생물전기화학반응공정과 연계된 광합성 생물반응공정으로부터 최종 COD 10 mg/L 이하, TN 15 mg/L 이하, TP 0.5 mg/L 이하 처리수질 달성 (참조: BOD/COD = 0.39, Metcalf & Eddy, 2014)

Anti-fouling 재처리수 고액분리 기술	멤브레인 운전조건에 따른 고액분리 성능 평가	- 멤브레인 성능평가 프로토콜 수립 - 멤브레인 운전범위 및 기준조건 설정 - 탁도 등 처리수질 분석 및 고액분리효율 측정	- 광합성 생물반응공정 조합으로 멤브레인 여과성능 개선 및 단순 물리적 세척으로 약 80%의 플럭스 회복 가능 - 광흡수 농도 기준 $0.8 \sim 1.2 \text{ cm}^{-1}$ 범위의 생물반응공정 운전으로 COD 37~39%, TN 49~50%, TP 96~99%, 탁도 65~81% (2 NTU 이하) 제거 달성
	멤브레인 여과지속가능특 성 평가	- 약품세정 조건에 따른 멤브레인 종류별 여과성능회복 측정 - 바이오세정 운용기법 최적화 및 적용성 평가 - 멤브레인 오염 가역 특성 조사 및 진단학적 표면특성 분석	- 오염된 친수성 멤브레인의 경우 pH 9~11 범위의 약품세정 결과 최초 12 h 동안 평균 $81 \pm 5\%$의 여과성능을 회복하였으며, 최초 24 h 동안 $68 \pm 5\%$의 여과성능 회복을 달성한 소수성 멤브레인보다 높은 여과지속가능성을 나타냄. - 광합성 바이오매스 생장에 따른 pH 증가 현상을 응용하여 오염된 친수성 멤브레인의 바이오세정을 실시한 결과 최초 24 h 동안 80% 이상의 여과성능을 회복함. - 광학적 진단을 통한 멤브레인 표면을 분석한 결과 바이오세정 이후 개선된 공극특성을 확인하여 여과성능 실험으로부터 도출된 결과와 일치함
CO ₂ -neutral 탄소성유기물질 저감 기술	바이오매스 고정화에 따른 공정성능 영향 평가	- 고정화 수단 및 바이오매스 종특성에 따른 영향 분석 - O₂ 발생량 및 CO₂ 흡수효율 측정 - 광노출 특성에 따른 영향 평가 - 실험실 조건에서 성능평가 프로토콜 수립	- 바이오매스에 의해 발생된 기포가 직접접촉하지 않도록 환원전극위치를 조정하여야하며 12시간 light/dark 순환주기 및 1000ohm의 조건에서 종특성에 따라 회수전류량은 최대 2배 차이발생 - 광합성 생물종 및 원수 특성에 따라 CO₂ 흡수는 최대 $6.9 \text{ L g-cell}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 그리고 O₂ 발생속도는 최대 $5.8 \text{ L g-cell}^{-1} \text{ day}^{-1}$로 조사됨 - 광합성 생물종(<i>S. quadricauda</i>)을 이용하여 생물반응공정으로부터 $3 \mu\text{W/m}^2$의 전기에너지 회수 - 광노출 조건에서 CO₂ 고정과 동시에 전기에너지 회수가 가능하며, 암반응을 포함하는 연속운전의 경우 상대적으로 더 높은 에너지 회수 가능
	전기화학 반응조 운영 최적화 및 하수처리특성 평가	- 최적의 산화전극 전위에서 에너지 소비율 및 유기물 제거효율 도출 - H₂O₂ 생산 극대화를 위한 전극재료 선정 및 구조 개선을 통한 H₂O₂ 생산 효율 향상 방법 도출	- 생물전기화학조의 산화전극의 전위 -0.4V에서 COD 분해율 $89 \pm 2\%$, CE $96 \pm 2\%$, H₂O₂ 전환율 $71 \pm 2\%$, 에너지소모율 $0.276 \pm 0.007 \text{ kWh/kg H}_2\text{O}_2$ $0.04 \pm 0.02 \text{ kWh/m}^3$ 획득 - 테스트 한 전극 및 GDL 재료 중 carbon cloth(CC)와 PTFE를 이용한 경우 가장 저항이 작았으며 그로인해 MFC(전력생산) 및 MEC(H₂O₂ 생산)에서 모두 ORR 성능이 최대 - 전극간의 사이가 가장 적은 3.5cm cell의 구조에서 ohmic 저항과 charge transfer 저항이 크게 감소하였으며 이로 인해 H₂O₂ 생산량이 2.2 mM 로 최대

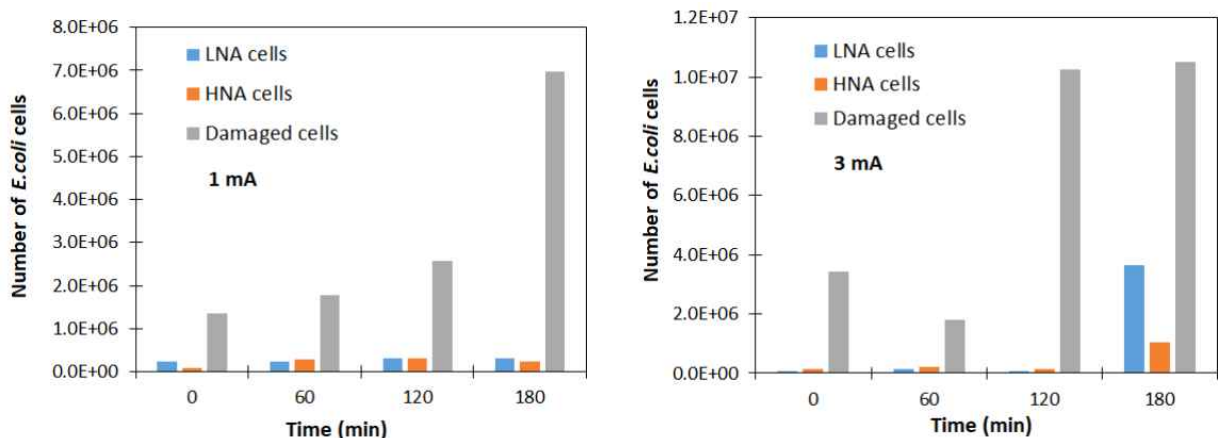
가. Air cathode 종류와 외부전력 공급에 따른 소독제 발생 특성



[그림 1] 전류공급에 따른 과산화수소(H₂O₂) 발생특성(좌) 및 전기분해반응 cathode potential(우).

- 생물전기화학반응으로부터 생산 가능한 전류를 전기분해반응조에 공급/운전함으로써 air cathode 소재 특성에 따른 과산화수소 발생특성과 cathode potential을 평가하였음.
- 총 4종의 air cathode에 대한 성능평가 실험을 실시하여 그 중 과산화수소 생산성이 가장 높게 나타난 carbon cloth에 대한 결과를 상기 [그림 1]에 제시하였으며, 생물전기화학반응으로부터 전력생산을 목표로 과거 사용되어 왔던 나머지 Pt-표면코팅 소재들은 모두 0.05 mM이하로 매우 낮은 생산성을 나타냄.
- 상기 실험 결과를 토대로 자외선 기반의 고도산화기법과 조합 가능한 생물전기화학반응공정을 위해 이하 실험에서 carbon cloth 소재의 air cathode를 선정하여 사용하였음.

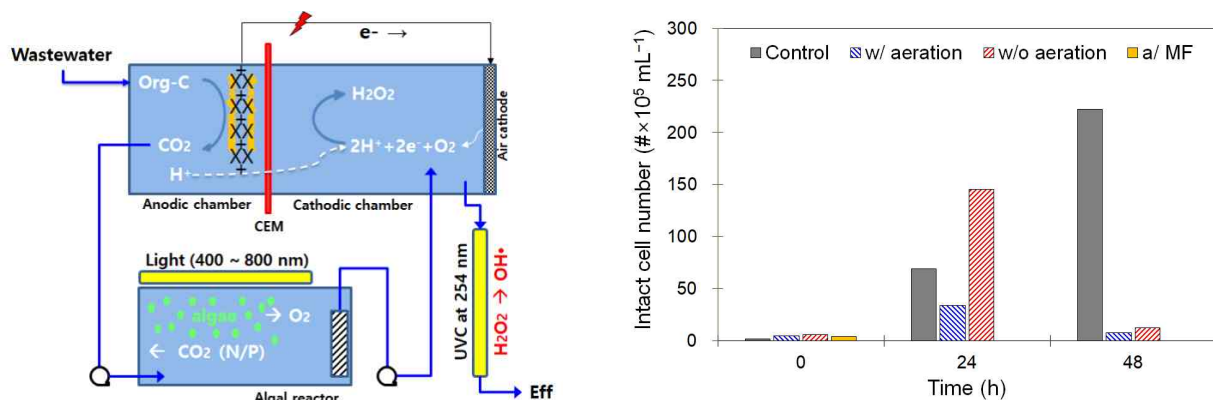
나. 미생물 불활성화 특성



[그림 2] 1 mA(좌) 및 3 mA(우) 전류공급에 따른 *E. coli* 불활성화 특성 평가.

Note: HNA(hybrid nucleic acid): intact and viable cells, LNA(linear nucleic acid): partially damaged and/or inactive cells, and Damaged: non-viable cells.

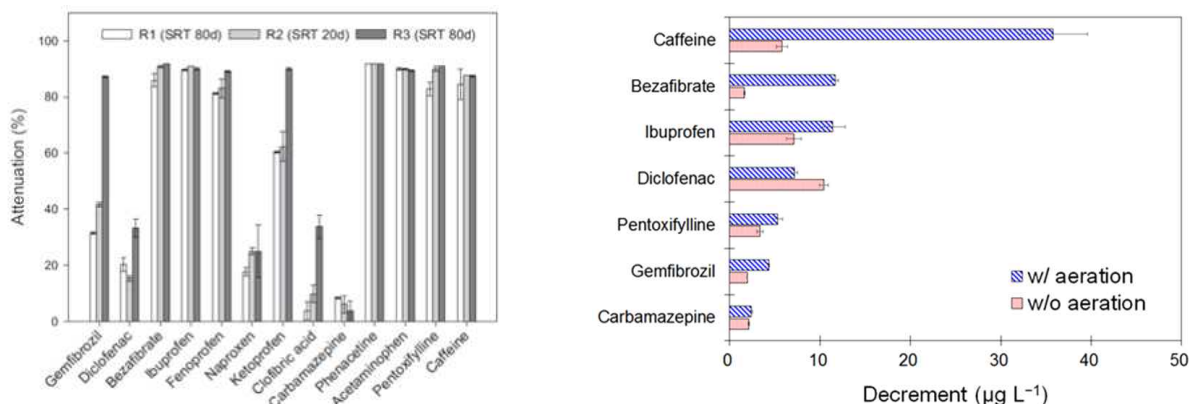
- 실제 생물전기화학반응 시스템 운전시 적용 가능한 cathode potential 범위는 -2.5 V 이하로 보고 되었으며, 이에 해당하는 1 mA와 3 mA 전류공급 조건에서 미생물 불활성화 특성을 평가하였음.
- 전기분해반응조에 1 mA 및 3 mA 전류공급으로 운전시간에 따라 *E. coli*의 88~97% 및 90~99% 범위의 불활성화를 달성함.



[그림 3] 광합성 생물반응공정 조합시스템(좌)으로부터 *E. coli* 불활성화 특성 평가(우).

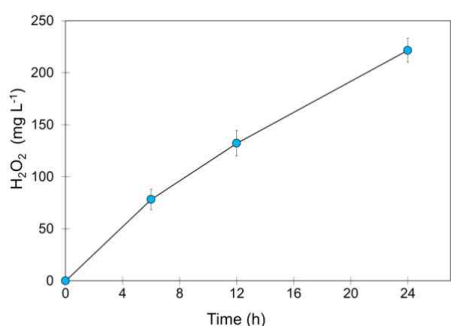
- 생물전기화학반응공정과 광합성생물반응공정의 조합시스템 운전시 (aeration 가동 유/무 및 멤브레인 적용 등) 광합성생물반응공정의 운영방식에 따른 *E. coli* 불활성화 특성을 평가하였음.
- 광합성생물반응공정의 aeration 가동 유무에 상관없이 운전시간에 따라 94~97% 범위의 지표미생물 불활성화가 관측되었으며, 이어서 멤브레인 여과공정운전으로 처리수 중 *E. coli* 불검출 됨.

다. 조합시스템으로부터 난분해성 지표물질의 거동특성 및 운전조건 평가



[그림 4] 재래식 멤브레인 생물반응 공정(좌) 및 광합성 생물반응 공정(우)으로부터 확인된 미량오염물질 carbamazepine (CBZ)의 생물분해 저항특성.

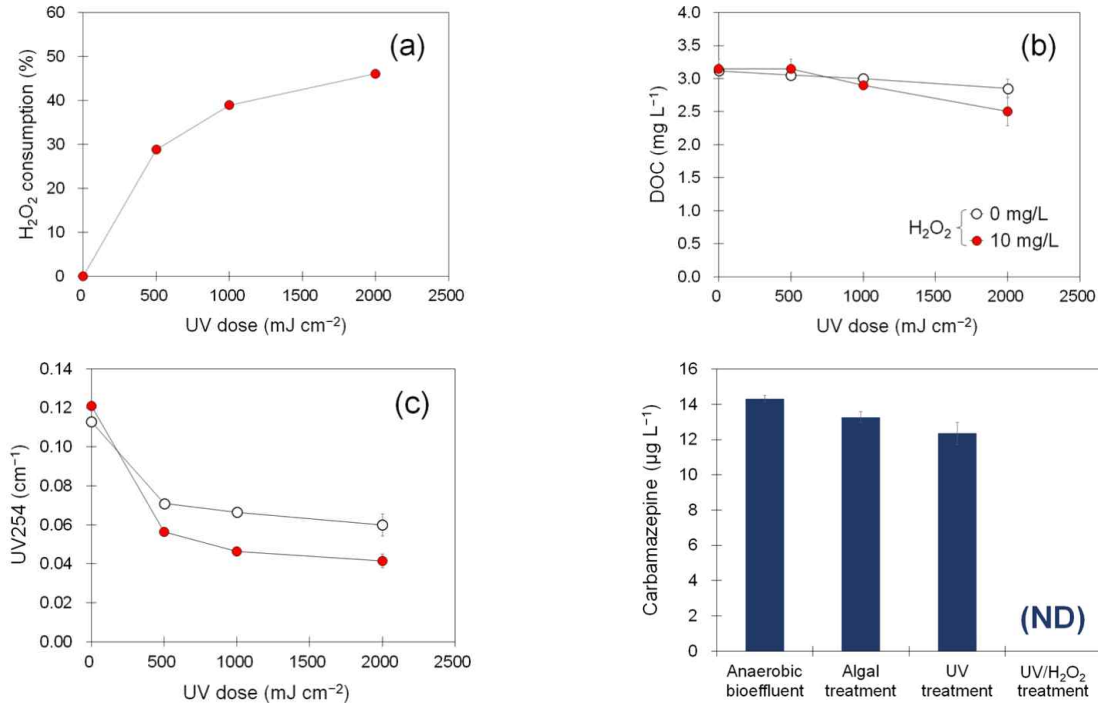
- 재래식 MBR 공정 (Maeng et al., 2013), 광합성생물반응공정 (Maeng et al., 2018), 생물여과 공정 (Kim et al., 2017), 무산소 조건하에서 생물전기화학공정 (Werner et al., 2015)을 이용한 다양한 수질개선 공법에서 생물분해에 대한 저항특성을 갖는 CBZ를 지표물질로 선정함.
- Clofibric acid, diclofenac, gemfibrozil, naproxen 등과 함께 난분해성 그룹으로 분류되는 CBZ는 특히 UV/ H_2O_2 고도산화공정에 대해서도 분해하는데 가장 높은 자외선 요구량을 나타내어 본 과업에서 증명하고자하는 현장 생산 H_2O_2 와 UV조사 병용처리를 통한 수질개선 효과를 입증하는데 가장 적합한 지표물질로 판단됨.



Parameter	Value
pH of the anolyte (media) at the end of test	6.3±0.2 (the initial pH = 7.3±0.1)
Removal of COD in the anolyte	89±2 % (the initial COD = 173±3 mg L^{-1})
Coulombic efficiency	96±2 %
Conversion efficiency at the end of test	71±2 %
Energy consumption for H_2O_2 production	0.276±0.007 kWh per kg H_2O_2
pH of the catholyte (tap water) at the end of test	11.5±0.1 (the initial pH = 7.8±0.1)

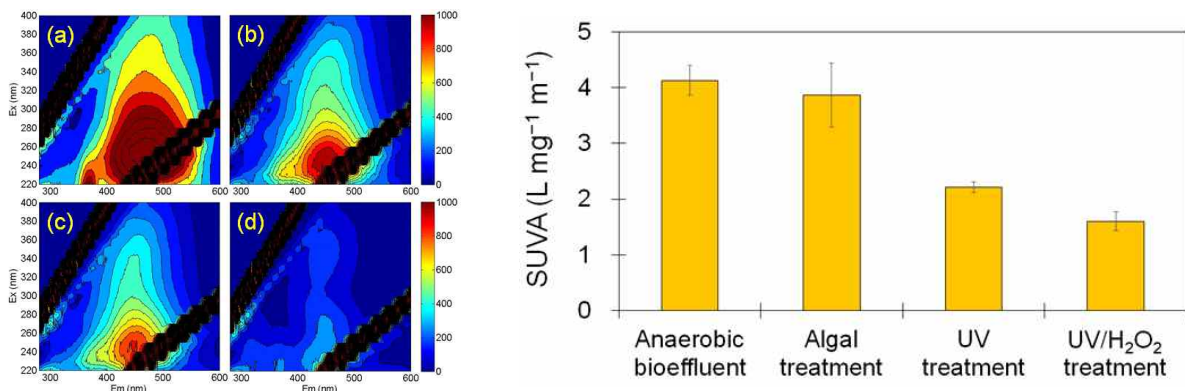
[그림 5] 생물전기화학반응기로부터 도시하수의 유기물질 분해과정을 통한 H_2O_2 생산특성

- 전형적인 국내도시하수 COD 범위에 해당하는 173 ± 3 mg/L의 인공하수에 대하여 24시간 생물전기화학반응을 통하여 $89 \pm 2\%$ 의 COD가 제거되는 동안 222 ± 11 mg/L·d의 H_2O_2 생산성을 확보
- 통상 재래식 전해기술을 이용한 H_2O_2 의 현장생산에 필요한 단위에너지 요구량은 $4.4 \sim 8.9$ kWh/kg- H_2O_2 로서 (Foller and Bombard, 1995) 이는 본 과업에서 제시한 생물전기화학반응공정을 이용한 저에너지 H_2O_2 생산성 대비 최대 30배 이상의 에너지 절감효과를 획득 (후술하는 ‘카. 무산소조 전극 고정 미생물을 이용한 저에너지 H_2O_2 생산 및 유기물 제거’ 에서 추가로 토의)



[그림 6] 현장생산 H_2O_2 혼입과 UV 조사량에 따른 수질인자 거동특성 및 최적조건에서 난분해성 미량오염물질(CBZ)의 저감특성

- 10 mg/L 농도의 H_2O_2 이 혼입된 처리대상 인공하수에 대하여 500 mJ/cm^2 의 UV조사량으로 급격한 용존 H_2O_2 소비와 흡광도(UV254) 감소 결과를 나타냄.
- 난분해성 미량오염물질의 저감을 위해 요구되는 UV조사량을 보수적으로 산정하여 1000 mJ/cm^2 의 UV조사량으로 처리한 결과 난분해성 지표물질인 CBZ의 불검출 달성하였으며, 이는 기존 연구 결과에서 제시하고 있는 UV조사량에 근사한 수치임 (Afonso-Olivares et al., 2016).
- 광합성 생물반응공정 이후에도 생물분해 저항특성에 기인하여 CBZ 대부분이 잔류하는 것으로 조사되었으며, H_2O_2 가 혼입되지 않은 처리대상 인공하수에 대한 UV 단독처리 결과 역시 마찬가지로 매우 낮은 CBZ 저감효율을 나타내어 UV/ H_2O_2 조합시스템의 필요성이 확인됨



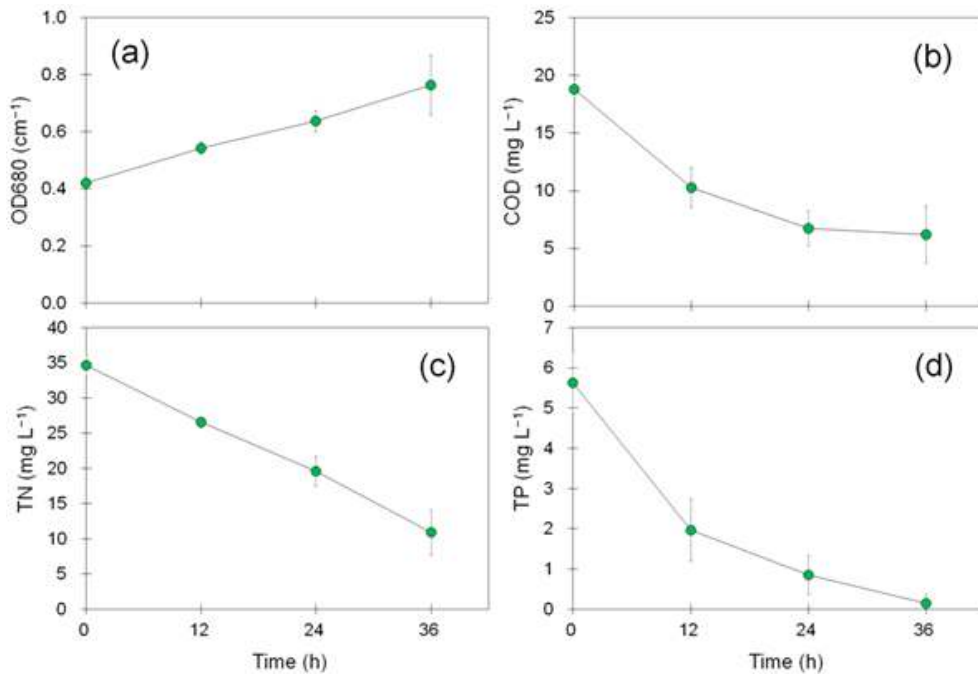
[그림 7] 분광분석을 통한 처리대상 인공하수의 용존유기물질 특성변화.

- 인공하수에 포함된 용존유기물질의 UV254 흡광도 측정값에 기반하여 유기물질의 생물분해 지표로 사용되는 SUVA값은 H_2O_2 혼입여부에 관계없이 UV 단독처리의 경우에도 크게 감소하는 경향을

나타내었으며, 이는 처리대상 하수의 고도처리를 위해 후속 공정에서 사용되는 254 nm에서 조사되는 UV처리 특성에 기인한 것임.

- SUVA 값과 달리 용존유기물질의 형광특성의 경우 UV/H₂O₂ 고도산화의 경우 유기물질의 형광발현 특성이 거의 모두 사라진 반면, UV 단독처리의 경우 형광강도에 큰 변화가 없는 것으로 나타나 UV 단독처리 결과에 대한 생물분해도 향상과 관련한 해석에 주의를 요함.
- 한편, 난분해성 미량오염물질의 고도처리 실험에 적용된 UV조사량은 최소 500 mJ/cm²로서 통상 멤브레인 유출수의 미생물 불활성화를 위해서 하수처리에 적용되는 UV조사량 범위인 최대 50 mJ/cm²의 10배에 해당하기 때문에 *E. coli* 전수 불활성화로 규정함 (Metcalf and Eddy, 2014).

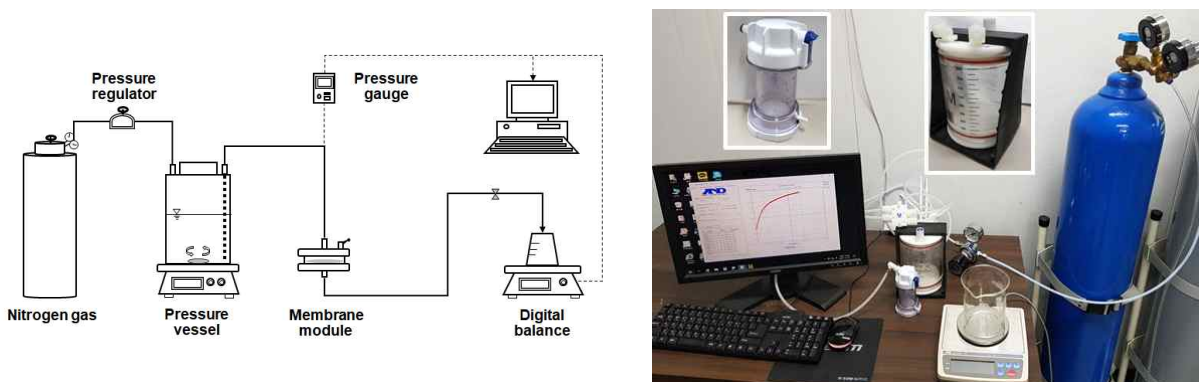
라. 광합성 생물반응공정을 이용한 잔존 유기물질 및 영양염류의 유출수질 개선



[그림 8] 생물전기화학반응공정과 연계한 광합성생물반응공정으로부터 최종유출수질 개선효과.

- 무산소 내지 혐기성 조건하에서 실시되는 생물전기화학반응공정으로부터 H₂O₂의 현장 생산이 진행되는 동안 하수에 포함되어 있는 (COD로써 정량 가능한) 탄소성유기물질의 약 90%까지의 분해가 확인된 바, 물재이용 목적에 맞는 선택적 공정운용이 가능하도록 잔존하는 유기물질을 비롯하여 하수 원수에 포함되어 있는 영양염류의 추가 저감이 필요함.
- 따라서 생물전기화학반응공정과 연속한 광합성생물반응공정으로부터 최종 COD 10 mg/L 이하, TN 15 mg/L 이하, TP 0.5 mg/L 이하 처리수질 달성하였으며, 환산 계수를 사용한 최종 유출수 BOD 농도는 5 mg/L 이하로 조사됨 (BOD/COD = 0.39, Metcalf & Eddy, 2014).

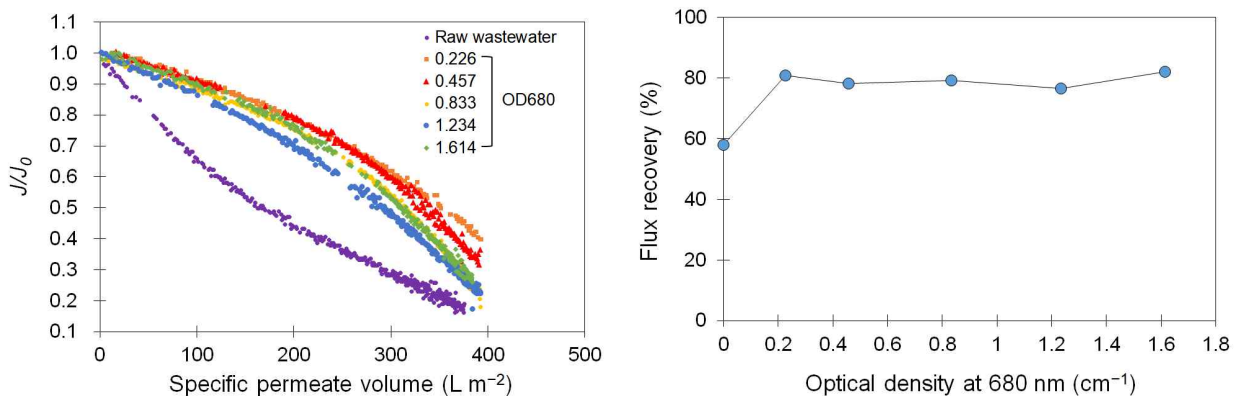
마. 멤브레인 성능평가 프로토콜



[그림 9] 광합성 생물반응공정 멤브레인 성능평가 시스템 모식도(좌) 및 시스템 전경(우)

○ 광합성 생물반응공정으로부터 처리수를 여과하는 경우, 바이오매스 농도에 따른 처리수의 멤브레인 여과성능을 [그림 9]에 나타난 멤브레인 성능평가 시스템을 이용하여 하기의 프로토콜에 따라 평가하였음.

- ① 특성 평가를 위하여 광합성 생물반응조로부터 고형물을 제외하고 상등액 500 mL 또는 그 이상을 채취하여 유효 용량 800 mL의 저류탱크로 옮김.
- ② 상기의 저류탱크는 질소가스 실린더와 연결되어 가스 주입으로부터 시료의 여과에 필요한 압력이 제공되며, 미세압력조절기와 전자식 압력계를 이용하여 적용압력을 0.06 MPa로 균일하게 조절함.
- ③ 주입가스 개폐장치의 조작에 의해 시료는 멤브레인 모듈로 주입되며, 모듈내 공기층이 완전히 제거될 때 까지 시료를 주입함.
- ④ 시료 주입이 개시되기 전 문헌고찰을 통해 선정된 0.22 μm polyvinylidene fluoride (PVDF) 멤브레인을 상술한 모듈에 장착하되, 성능평가에 앞서 반드시 멤브레인 전처리를 수행함.
- ⑤ 멤브레인의 전처리는 메탄올(98%) 20 mL를 포함하는 유리용기에 멤브레인의 여과 면이 아래를 향하게 하여 완전히 잠기게 하고 10분 동안 유지시킨 다음, 500 mL 또는 그 이상의 증류수를 포함하는 유리용기로 옮겨 멤브레인이 완전히 잠기도록 24시간 연속 세척하여 진행함.
- ⑥ 멤브레인 모듈의 유출수 개폐장치를 조작함으로써 멤브레인을 통과한 시료의 여과와 유출이 연속하여 진행되며, 이 때 유출된 여과수는 정밀저울위에 위치시킨 경량의 플라스틱 용기 안으로 포집되고 실온 조건에서 여과수의 무게가 400 g이 될 때까지 시료의 여과를 지속함.
- ⑦ 데이터 저장 수단으로써 컴퓨터를 상기의 정밀저울과 연결하여 여과 지속시간 동안 저울의 측정 데이터를 연속하여 컴퓨터에 저장함.
- ⑧ 시료의 여과 종료 후 모듈로부터 멤브레인을 분리하여 흐르는 증류수로 세척한 다음 500 mL 또는 그 이상의 증류수를 포함하는 유리용기에 24 시간 동안 멤브레인의 여과 면이 바닥을 향하도록 증류수에 완전히 잠기게 하여 세척을 실시함.
- ⑨ 상술한 세척과정이 완료된 다음 멤브레인을 모듈에 재장착하고 전술한 ①부터 ⑦까지의 멤브레인 여과실험을 시료가 아닌 증류수를 이용하여 실시함.
- ⑩ 상술한 멤브레인은 당초 시료의 여과를 개시하기에 앞서 증류수를 이용하여 동일한 조건에서 멤브레인이 보유한 고유의 플렉스를 측정하고, ⑨에 개시된 시료의 여과와 세척을 연속하여 거친 멤브레인의 플렉스를 측정/비교함으로써 플렉스 회복을 산출함.

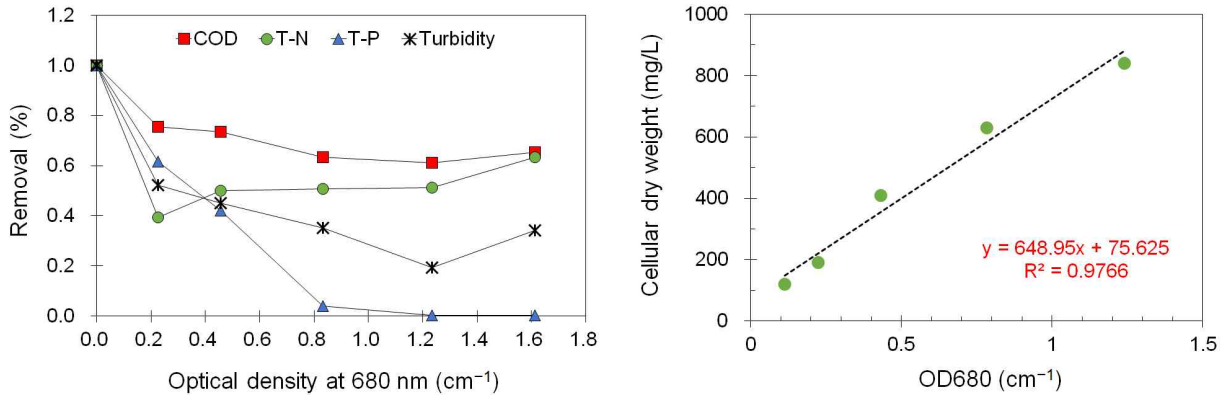


[그림 10] 광합성 생물반응공정 바이오매스 농도에 따른 멤브레인 여과성능(좌) 및 플렉스회복(우)

○ 바이오매스 농도에 따른 여과성능 차이는 무시할만한 수준이며, 멤브레인의 플렉스회복 역시 광합성 생물종을 이용한 운전에서 큰 차이 없이 80% 정도로 조사되어 광합성 생물반응공정을 운전하는 경우 하/폐수의 직접 여과에 의해 유발 가능한 막오염을 크게 저감할 수 있을 것으로 판단됨.

- 다만, 반복되는 여과공정 운전에 의한 여과성능 지속성이 저하됨에 따라 물리적 세정 이외에 약품 세정 또는 그에 준하는 별도의 세정 기법을 마련하여 오염된 멤브레인의 여과지속성을 향상시킬 수 있는 방안이 마련되어야하며, 이와 관련하여 후술하는 ‘사. 여과성능 지속성 향상을 위한 세정조건에 따른 멤브레인 오염제어’ 에서 추가로 논의함.

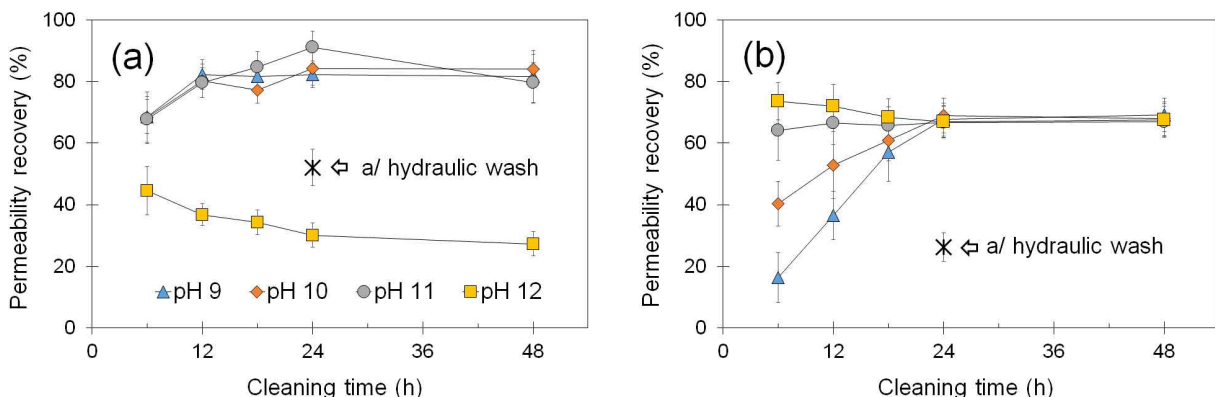
바. 멤브레인 운전에 따른 폐수처리 특성



[그림 11] 광합성 생물반응공정의 운전시 바이오매스 농도에 따른 처리수질(좌) 및 바이오매스의 광흡수도 대비 생체중량 상관성(우)

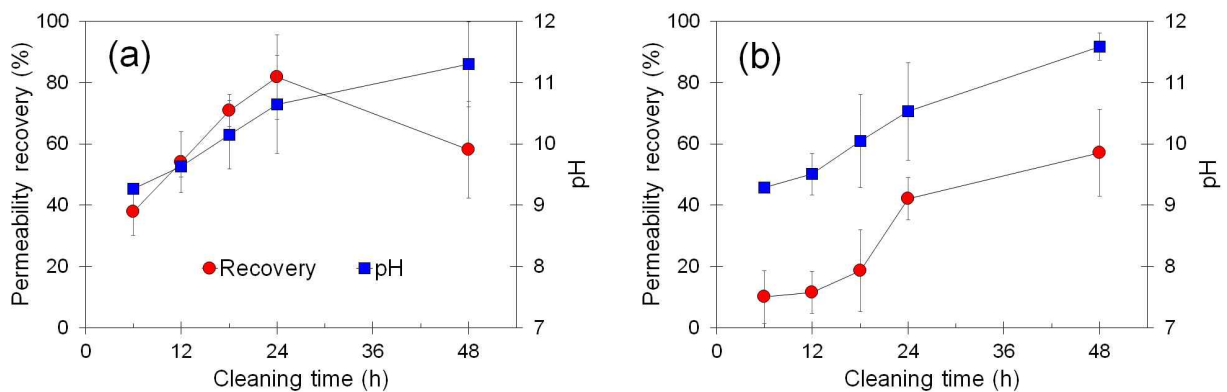
- 인공폐수 800 mL를 포함하는 유효용량 1 L의 유리 반응조 5개에 광흡수도 기준 0.2~1.6 cm⁻¹(생체중량 기준 220~1050 mg/L에 해당) 범위의 서로 다른 농도의 바이오매스를 각각 주입하고 인공조명 하에서 24시간 동안 연속하여 처리한 다음 폐수원수 및 처리수의 상등액을 공극크기 1.2 μm의 유리섬유 필터로 여과하고 여액의 화학적산소요구량(COD), 총질소(TN), 총인(TP), 탁도를 분석하여 광합성 바이오매스의 농도에 따른 생물반응공정의 폐수 처리특성을 평가함.
- 광흡수도 기준 약 0.8~1.2 cm⁻¹ 사이의 농도로 바이오매스를 주입하여 처리하는 경우 가장 안정적인 처리수질을 확보할 수 있는 것으로 조사되었으며, 이 때 COD 37~39%, TN 49~50%, TP 96~99%, 탁도 65~81%(2 NTU 이하)의 제거율을 나타냄.
- 광흡수도 기준 0.8 cm⁻¹에 크게 미달하여 폐수의 적정처리에 필요한 바이오매스가 부족한 경우뿐만 아니라 바이오매스 농도가 1.2 cm⁻¹ 보다 매우 높은 경우에도 바이오매스 상호간 광차폐 현상으로 인하여 광 이용 효율이 저하되기 때문에 바이오매스 농도에 비례하여 처리성능이 개선되는 현상이 관찰되지 않음.

사. 여과성능 지속성 향상을 위한 세정조건에 따른 멤브레인 오염제어



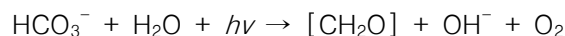
[그림 12] 대상원수에 대한 여과 반복수행으로 오염된 0.22 μm MF 멤브레인의 약품세정 조건에 따른 여과성능 회복특성: 친수성 멤브레인(좌) 및 소수성 멤브레인(우).

- 여과 반복수행으로 오염된 친수성 멤브레인의 경우 물리적 세정에 따른 여과성능 개선효과는 60% 미만으로 감소했으나 통상의 pH 9~11 범위의 알칼리성 약품세정 결과 최초 12 시간 동안 평균 $81 \pm 5\%$ 의 여과성능을 회복하였으며, 이후 48 시간까지 약품세정을 지속하더라도 추가적인 여과성능의 현저한 개선효과는 나타나지 않음.
- pH 12 조건의 약품세정을 제외하면 모든 경우의 세정 조건에서 친수성 멤브레인의 여과성능 회복율이 최초 24 시간 또는 그 이상 동안 $68 \pm 5\%$ 의 여과성능 회복을 달성한 소수성 멤브레인의 경우보다 상대적으로 높은 여과지속가능성을 나타냄.
- 여과성능 개선효과에 사용된 멤브레인은 모두 PVDF 재질로 여과대상 하수와 접하는 멤브레인 표면의 화학적 개질특성에 따라 친수성 또는 소수성으로 구분하며, 친수성 멤브레인의 경우 pH 12 조건에서 여과성능이 오히려 현저히 저하되어 증류수를 이용한 물리적 세정효과 보다 낮게 조사되어 강알칼리에 대한 내부식성이 소수성 멤브레인에 비해 상대적으로 낮은 것으로 판단됨.

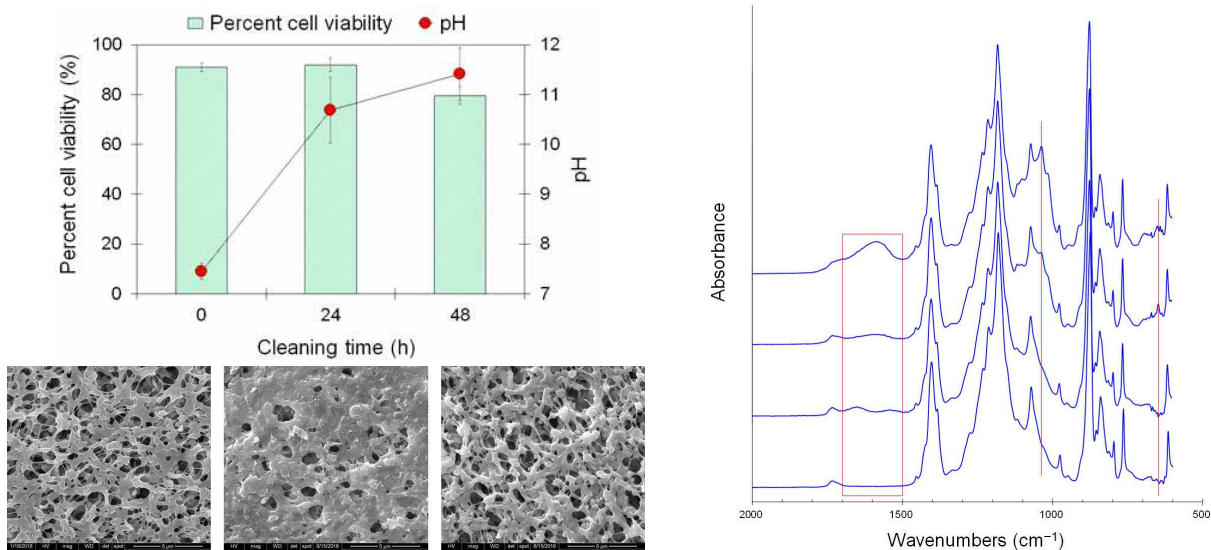


[그림 13] 대상원수에 대한 여과 반복수행으로 오염된 0.22 μm MF 멤브레인의 바이오세정 조건에 따른 여과성능 회복특성: 친수성 멤브레인(좌) 및 소수성 멤브레인(우).

- 반복여과 수행으로부터 오염된 멤브레인의 경우 물리적 세정효과가 현저히 감소함에 따라 간헐적 화학세정이 필요하나 그에 따른 운전중단과 약품사용에 대한 부담 및 폐액발생 등 여러 부정적 측면이 있어 본 과업에서는 이러한 단점을 보완하여 간헐적 화학세정을 수행하여 여과성능 지속가능한 바이오세정 기법을 제시함.
- 광합성 바이오매스의 성장특성에 착안하여 무기탄소원인 CO_2 주입을 중단하여 광합성생물반응조 내 pH 상승을 촉발하여 오염된 멤브레인의 여과성능을 회복시킴



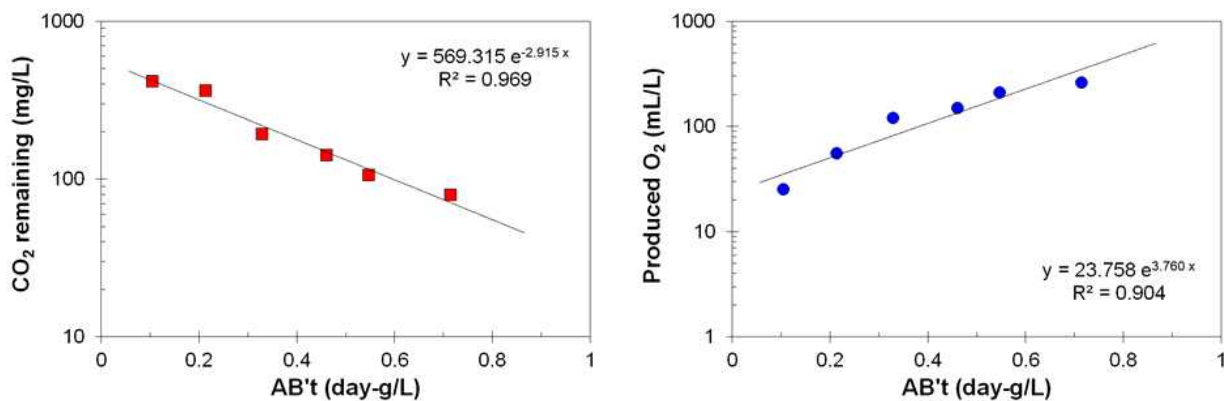
- 오염된 친수성 멤브레인의 바이오세정 시간 경과에 따라 광합성 바이오매스 성장으로부터 지속적인 pH 증가 현상이 확인되었으며, 최초 24 시간 동안 평균 80% 이상의 여과성능을 회복한 것으로 조사됨.
- 반면, 48 시간까지 세정시간을 제공하는 경우 오히려 여과성능 회복율이 감소하는 결과를 나타내었으며, 이는 앞서 약품세정에서 확인한 바와 같이 pH 11을 초과하는 경우 친수성 멤브레인 표면의 화학적 특성이 변형됨에 따라 공극율이 크게 감소하여 투과성을 상실하는 것으로 판단됨.
- 동일한 바이오세정 조건에서 소수성 멤브레인의 경우 세정시간 경과에 따른 점진적인 여과성능 회복율이 증가하는 것으로 조사되었으나, 최대 48시간 동안 평균 60%이하의 여과성능 개선효과를 나타내어 광합성 생물반응공정에 적합하지 않은 것으로 평가됨.



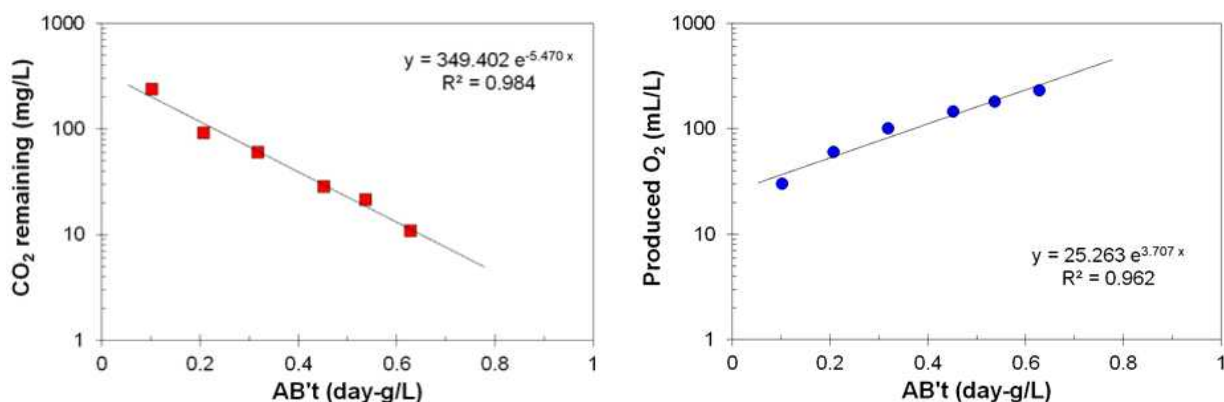
[그림 14] 바이오세정 전후 바이오매스의 활성화 평가 및 친수성 멤브레인의 물리화학적 특성분석.

- 광학분석기기를 이용한 진단학적 특성분석 결과 바이오세정에 의한 멤브레인 표면상에서 개선된 공극특성이 확인되었으며, 이는 앞서 서술한 여과성능 실험으로부터 도출된 결과와 일치함.
- 또한, 바이오세정에 사용된 광합성 바이오매스는 24시간 동안 세정이 진행되는 경우 생물 활성화도에 큰 변화가 없어 바이오세정이 종료된 이후 하수 중으로 CO₂ 주입을 통한 즉각적인 pH조정이 가능하여 오염된 멤브레인의 화학세정에 소요되는 시간과 부수적 조치단계를 생략할 수 있어 공정운용 편의성을 크게 향상시킬 수 있음.

아. 바이오매스 종에 따른 온실가스고정 특성

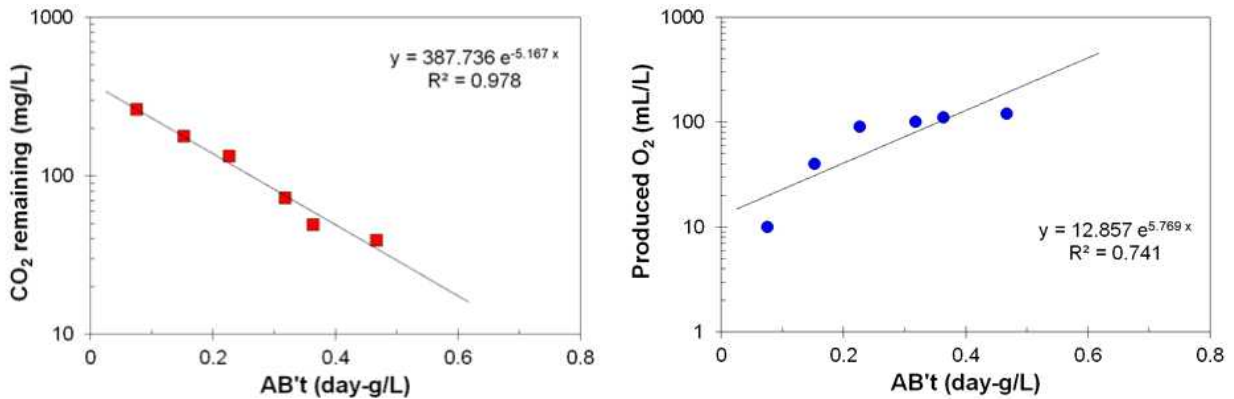


[그림 15] 광합성 생물반응공정으로부터 CO₂ 흡수속도(좌) 및 O₂ 발생률(우) 평가
인공원수: BG-11 미디어, 광합성 생물종: *Scenedesmus quadricauda*

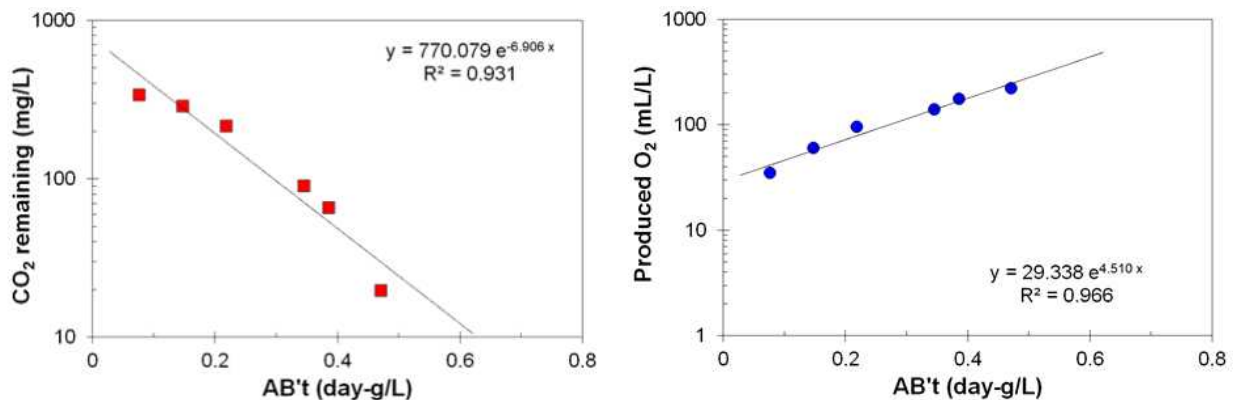


[그림 16] 광합성 생물반응공정으로부터 CO₂ 흡수속도(좌) 및 O₂ 발생률(우) 평가
인공원수: 인공 하/폐수, 광합성 생물종: *Scenedesmus quadricauda*

- 광합성 생물종 *Scenedesmus quadricauda*을 이용한 생물반응공정에서 원수 성상에 따른 이산화탄소 흡수효율을 평가함으로써, 조합시스템 구성을 위한 생물전기화학반응공정으로부터 발생하는 온실가스의 배출억제 효율을 평가하였음.
- 원수 성상에 따른 산소발생 속도는 큰 차이가 없는 반면($K = 3.7 \sim 3.8 \text{ L g-cell}^{-1} \text{ day}^{-1}$), 이산화탄소 흡수 속도 K 값은 $2.9 \sim 5.5 \text{ L g-cell}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 의 범위로 조사되어 영양물질이 풍부한 증식 조건보다 상대적으로 빈영양 조건에서 이산화탄소 흡수 속도가 더 높은 것으로 조사됨.
- 마찬가지로 최대 비증식속도 $\mu_{\max}$ 값 역시 인공배지인 BG-11의 경우 0.24 day^{-1} 로 조사된 반면, 인공 하/폐수를 사용한 경우 0.53 day^{-1} 의 값을 나타내어 전술한 이산화탄소 흡수 속도 평가 결과와 일치하는 경향을 나타냄.



[그림 17] 광합성 생물반응공정으로부터 CO₂ 흡수속도(좌) 및 O₂ 발생률(우) 평가
인공원수: BG-11 미디어, 광합성 생물종: *Chlorella vulgaris*



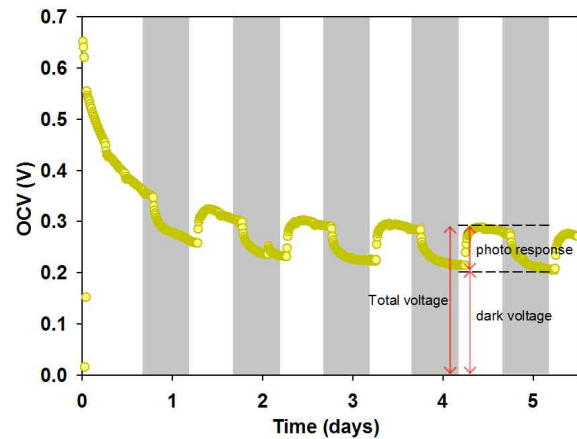
[그림 18] 광합성 생물반응공정으로부터 CO₂ 흡수속도(좌) 및 O₂ 발생률(우) 평가
인공원수: 인공 하/폐수, 광합성 생물종: *Chlorella vulgaris*

- 광합성 생물종 *Chlorella vulgaris*을 이용한 생물반응공정에서 원수 성상에 따른 이산화탄소 흡수효율을 평가함으로써, 생물전기화학반응공정으로부터 발생하는 온실가스의 배출억제 효율을 평가하였으며, 대표적 광합성 생물종간 온실가스 흡수효율을 비교하였음.
- 원수 성상에 따른 이산화탄소 흡수 속도 K 값은 $5.2 \sim 6.9 \text{ L g-cell}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 의 범위로 조사되어 *S. quadricauda* 생물종의 결과와 유사하게 영양물질이 풍부한 증식 조건보다 상대적으로 빈영양 조건에서 이산화탄소 흡수 속도가 더 높은 것으로 조사됨.
- 반면, 산소발생 속도는 오히려 빈영양 조건에서 상대적으로 더 낮은 K ($4.5 \text{ L g-cell}^{-1} \text{ day}^{-1}$) 값을 나타내어 앞선 *S. quadricauda* 생물종을 이용한 실험 결과와 반대되는 경향을 나타냄.
- 마찬가지로 최대 비증식속도 $\mu_{\max}$ 값 역시 인공배지인 BG-11의 경우 0.29 day^{-1} 로 조사된 반면, 인공 하/폐수를 사용한 경우 0.79 day^{-1} 의 값을 나타내어 전술한 이산화탄소 흡수 속도 평가 결과와 일치하는 경향을 나타냄.

- 평가실험에 사용된 두 종류의 광합성 생물종 모두 실제 하/폐수와 같이 불균형 상태의 영양조건에서 오히려 온실가스인 이산화탄소 흡수 효율이 더 높은 것으로 조사되어 본 과업에서 달성하고자 하는 CO₂-neutral 시스템 구현에 부합하는 것으로 평가되었으며, *S. quadricauda* 생물종의 경우 상대적으로 낮은 비증식속도를 나타내어 함께 평가된 *C. vulgaris*에 비해 실제 운전에서 다른 고품 폐기물 발생과 처리/처분에 따른 부담이 상대적으로 낮을 것으로 판단됨.

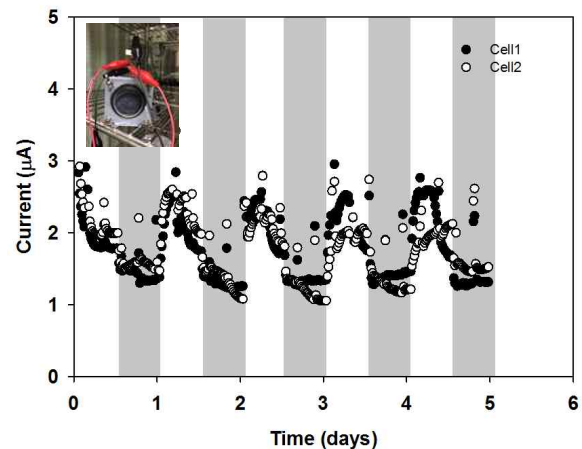
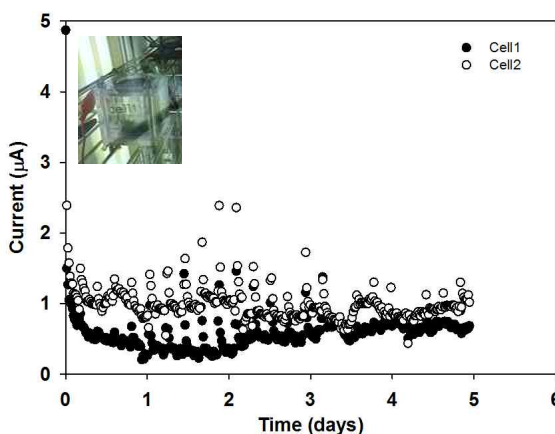
자. 바이오매스의 분산 및 광노출 특성에 따른 에너지회수 특성

- *Scenedesmus quadricauda*를 이용하여 CO₂ 고정과 동시에 전기의 형태로 에너지를 회수 할 수 있는 Bio-photovoltaic cell(BPV)을 구현함
- 산화전극과 환원전극이 한 반응조를 공유하는 단일형 반응조를 이용하였으며 산화전극은 *S. quadricauda*에 의해 전자를 얻어 환원되며 환원전극에서는 산소환원반응(ORR, oxygen reduction reaction)이 일어나 전기를 생산함.



[그림19] *S. quadricauda*의 dark/light 조건에서의 OCV 거동 측정셀(좌) 및 12시간 dark/light 조건에서의 OCV 측정값(우)

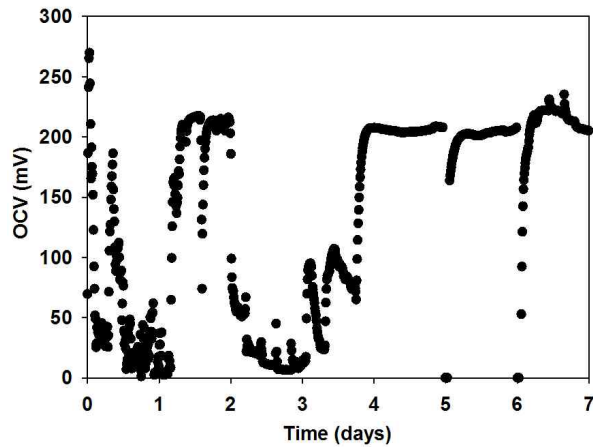
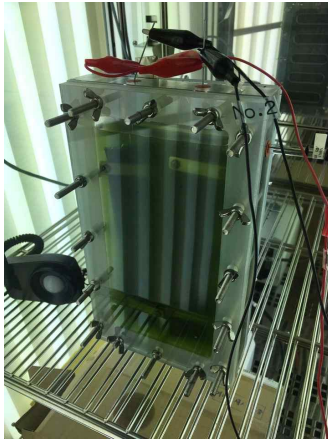
- [그림19]에서 볼 수 있듯이 BG-11용액 상에 미세조류를 부유시키고 두 전극을 이용하여 개방전압(OCV, open circuit voltage)을 측정하였을 때, 암조건 일 때는 약 0.20V OCV인 반면 광조건에서 해당 생물종의 광합성에 의해 약 0.27V까지 OCV가 상승하는 것으로 나타남.
- *S. quadricauda*의 광에 대한 전기응답을 확인 한 후 표준형 전기화학셀을 이용하여 전극배치, 외부저항, air-cathode 사용 유무, 바이오매스의 분산정도에 따른 전기에너지 회수 영향에 대한 기초실험을 수행함.



[그림 20] 반응조 상부의 대기 노출형 환원전극을 이용한 에너지회수(외부저항 10Ω)(좌) 및 반응조 측면에 air-cathode를 배치한 형태의 에너지회수(외부저항 1000Ω. 각각 12 시간 light/dark 순환주기)(우)

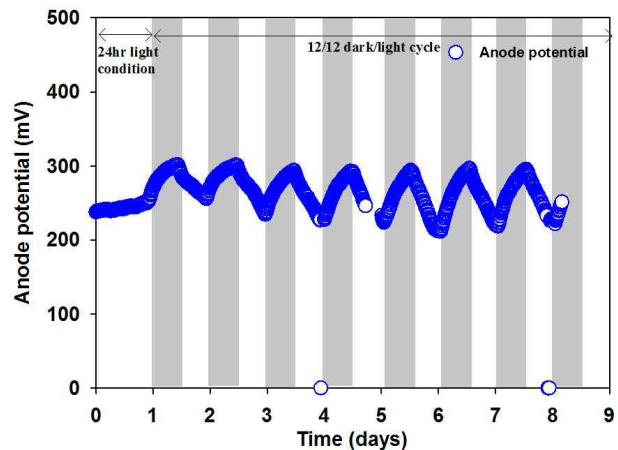
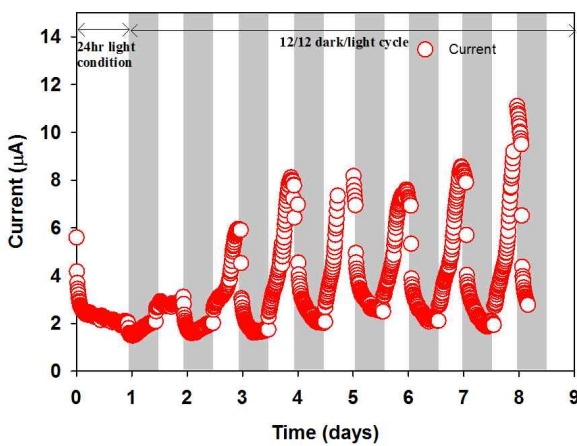
- [그림 20]의 cubic cell 실험에서 환원전극이 상부에 위치하여 대기 중에 노출되어 있는 반응조(최대 1.3 μA , 1.9 mA/m^2)의 경우 외부저항(10 Ω)이 낮아 높은 전류가 발생할 것으로 예상되었으나 1000 Ω 의 반응조(최대 2.5 μA , 3.6 mA/m^2) 보다 낮은 전류가 측정됨.
- 특히 환원전극이 상부에 위치하게 될 경우 바닥에 위치한 산화전극 표면의 바이오매스에 의해 발생한 기포가 환원전극 표면을 대부분 덮어버려 환원전극의 유효면적이 감소하는 문제가 발생하여 적절한 전극 배치라 할 수 없음.

차. 바이오매스를 이용한 에너지자립도 성능평가 프로토콜



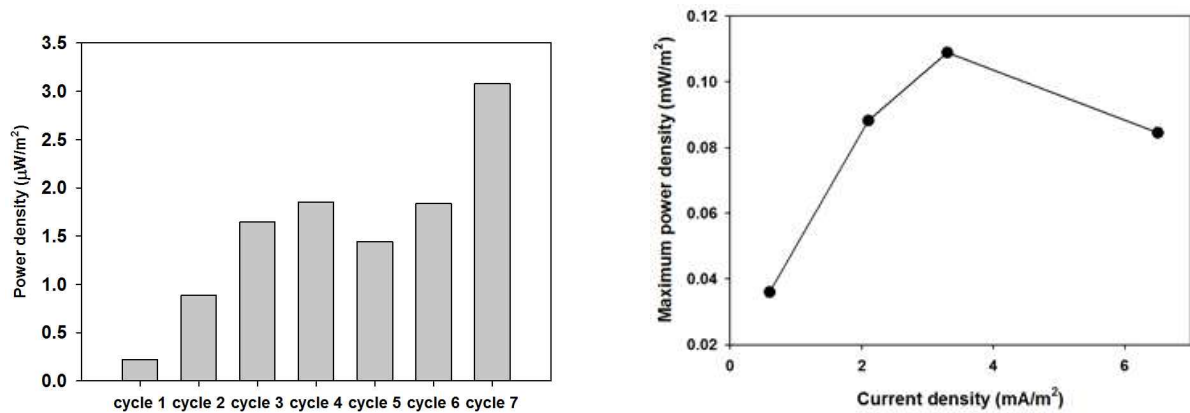
[그림 21] 0.6L급 BPV 반응기(좌) 및 광합성 생물종 증식에 따른 OCV(우)

- 기초실험 결과를 바탕으로 0.6L급 BPV반응기를 제작하여 초기 *S. quadricauda* 주입 농도 224 mg/L 조건에서 셀 성능 평가를 수행하였으며, 4일 이후 24시간 연속조명 하에서 안정적인 OCV 생산이(205~221 mV) 가능하였음.



[그림 22] 연속 전류 발생 모니터링(좌) 및 전류발생에 따른 anode potential (우)

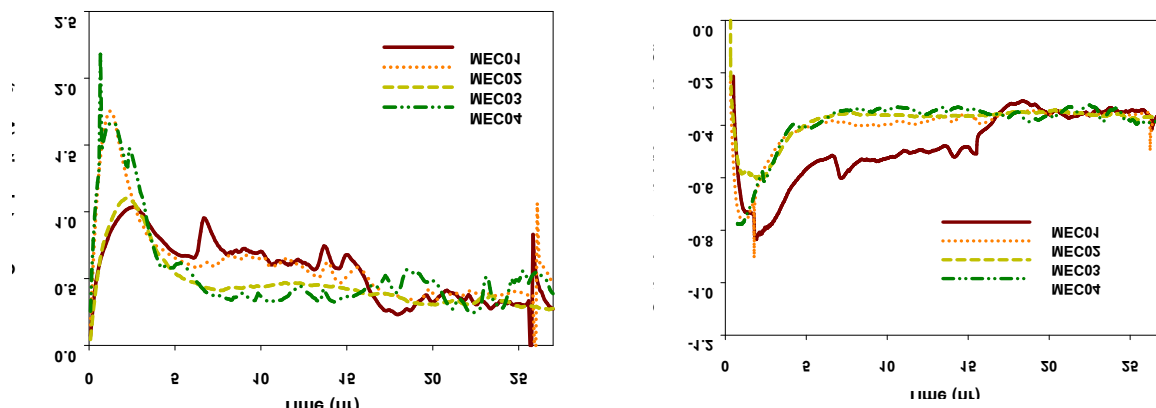
- 운전 초기 24시간 연속조명 하에서 전기에너지를 지속적으로 회수 하고자 하였으나 전류는 오히려 서서히 감소하여 측정 1일 후 출력 값이 약 0.10 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ 으로 나타남.
- 이 후 12시간 light/dark 순환주기로 운전형태를 전환하여 광·암조건 전환이 반복될수록 전류는 계속적으로 증가하였으며(~11 μA), 반응조의 anode potential도 광·암조건에서 변화하는 것으로 나타남.



[그림 23] Light/dark 순환주기 반복에 따른 사용전극 면적당 전력밀도(좌) 및 전력밀도그래프(우)

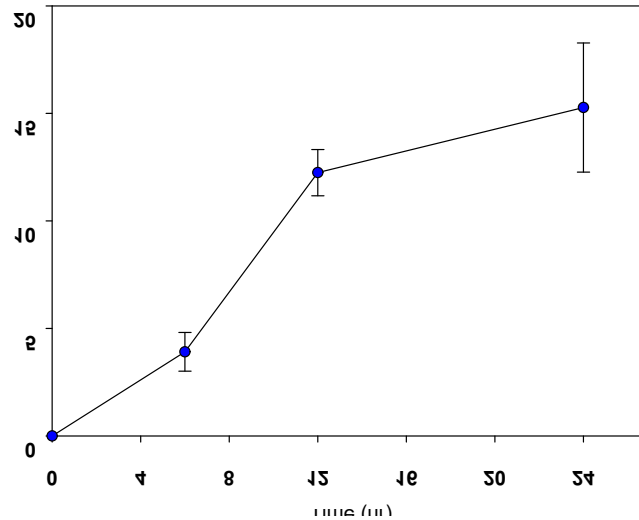
- 초반에 $0.10 \text{ W}/\text{m}^2$ 이었던 출력은 계속적으로 상승하였으며 최대 $3.08 \mu\text{W}/\text{m}^2$ 까지 증가하였음.
- 광합성 생물종에 의한 에너지 회수와 광노출 사이에 밀접한 관계가 확인되었으며, 광노출 조건에서 CO_2 고정과 동시에 전기에너지 회수가 가능하더라도 암반응을 거쳐야 높은 전기에너지 회수가 가능함.
- 따라서 bio-photovoltaic cell의 성능 측정을 위해서는 광노출 조건에서 그 성능을 평가하여야 하며, 아래 전개되는 성능평가 프로토콜에 따라 일정간격으로 외부저항별 반응기의 전압을 측정하여 전력을 계산하고 가장 높은 값을 취하여 최대출력을 도출함.
 - ① 반응기는 기존에 연결되어 있던 외부저항기를 분리하고 안정적인 OCV가 유지될 때까지 기다림.
 - ② OCV가 안정적으로 유지되면 반응기를 가변저항기와 멀티미터에 연결함.
 - ③ 저항(Ω)을 30, 50, 100, 500, 1000, 5000 Ω 으로 변화하며, 각 조건을 20분 유지하면서 발생되는 전압(V)을 멀티미터로 모니터링.
 - ④ 옴의법칙($I=V/R$)을 이용하여 전압과 저항을 이용하여 전류값을 산출함.
 - ⑤ 전력(P)는 $P=V \times I$ 를 이용하여 계산하고 전력밀도는 반응기에 사용한 환원전극의 크기(0.02 m^2)로 나누어 산출함(mW/m^2 또는 $\mu\text{W}/\text{m}^2$).
 - ⑥ 최대출력은 각 저항에서 얻은 전력 산출치들 중에서 가장 큰 값을 취함.
 - ⑦ 상기 실험에서 획득한 power density curve를 [그림23]에 나타냄.

카. 무산소조 전극 고정 미생물을 이용한 저에너지 H_2O_2 생산 및 유기물 제거



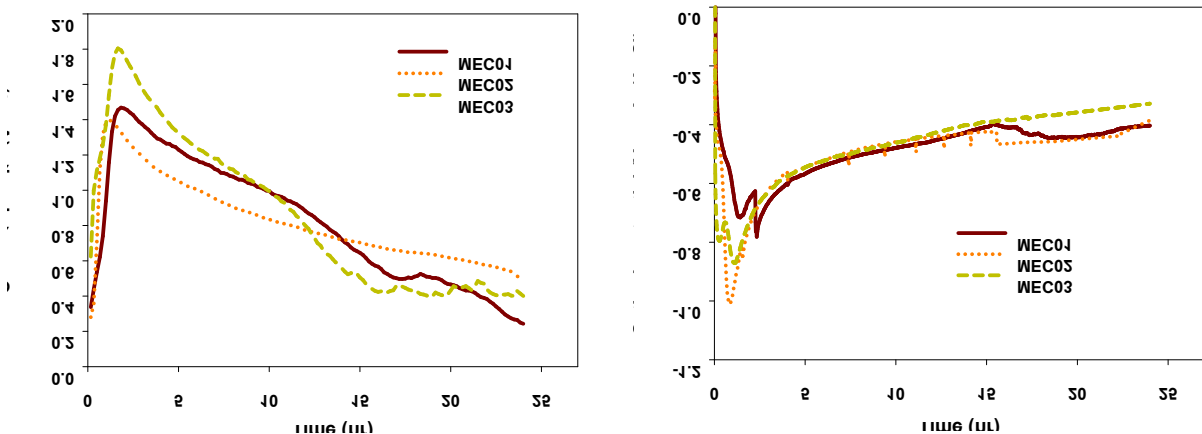
[그림 24] Anode potential -0.2V 에서 전극(cathode) 면적당 전류밀도(좌) 및 cathode potential(우)

- 생물전기화학반응조에서 에너지 소모율이 적으며 H_2O_2 양이 높은 산화전극 전위 조건을 찾기 위한 실험을 진행하였음.
- 산화전극 전위(Anode potential)를 -0.2V (vs. Ag/AgCl)로 고정한 경우 100 mg/L sodium acetate와 50 mM bicarbonate buffer를 사용하여 발생된 최대 전류밀도는 평균적으로 약 $1.5 \pm 0.6\text{ A/m}^2$ 이었으며, 이때 환원전극 전위(cathode potential)는 약 $-0.3 \sim -0.8\text{ V}$ 사이로 유지되었고 이는 H_2O_2 생산이 가능한 전위조건인 것으로 알려져 있음 [그림 24] (Sim et al., 2015).



[그림 25] Anode potential -0.2V 에서 반응시간에 따른 생산된 H_2O_2 농도 변화

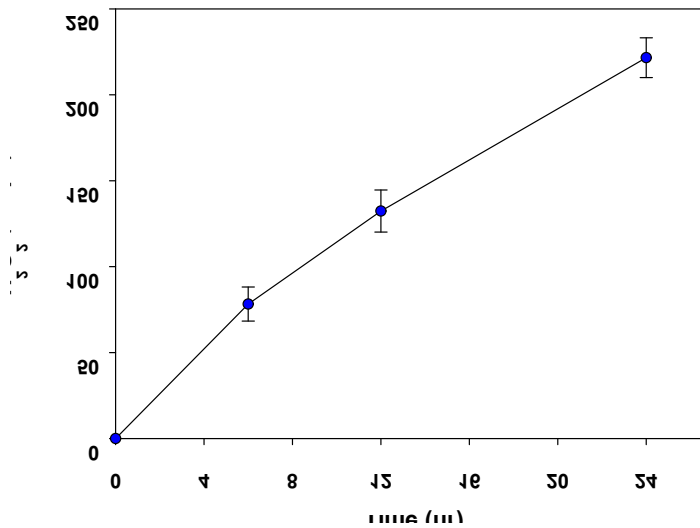
- [그림 25]에서 볼 수 있듯이 H_2O_2 생산은 24 시간 동안 최대 $15 \pm 3\text{ mg/L}$ 가 발생되었는데 H_2O_2 conversion efficiency로 따지면 약 $48 \pm 13\%$ 로 과거 보고와 비슷한 수준인 것으로 나타났음.
- 반면 쿨롱효율(CE, coulombic efficiency)이 100%가 넘는 문제가 발생하였는데 이는 적절하지 않는 유기물 조건과 높은 산화전극 전위 조건으로 인한 문제로 판단되어 산화전극 전위를 -0.4V 로 낮추어 실험을 진행함.



[그림 26] Anode potential -0.4V 에서 전극(cathode) 면적당 전류밀도(좌) 및 cathode potential(우)

- [그림 26]은 산화전극 전위를 -0.4V 로 고정한 경우(250 mg/L sodium acetate, 50 mM bicarbonate buffer)의 전류밀도 및 환원전극 변화를 나타내며, 최대 전류밀도는 평균 $1.5 \pm 0.6\text{ A/m}^2$ 으로 산화전극전위 -0.2V 에서와 큰 차이는 없었으나 24시간동안 발생된 쿨롱(C)의 양이 $50.3 \pm 1.3\text{ C}$ 으로 -0.2V 때 발생된 쿨롱($33.7 \pm 3.6\text{ C}$)보다 1.5배 높은 양이 발생되어 전기화학미생물에 의해 폐수로부터 전자를 생성하기에 적합한 전위임을 알 수 있었음.

- 해당 조건에서 생물전기화학반응조로부터 CO₂ 발생량을 평가하면 acetate 1 mole 당 2 mole의 CO₂가 발생하는 것으로 -0.4 V에서 250 mg/L sodium acetate의 기질농도와, 평균 COD 제거율 90%, 그리고 반응기 부피 28 mL를 고려하면 단위부피 1 m³ 당 약 0.238 kg의 CO₂가 방출되는 것으로 산출됨.



[그림 27] Anode potential -0.4V에서 반응시간에 따른 생산된 H₂O₂ 농도 변화

- H₂O₂ 생산의 경우 anode potential -0.2V의 경우보다 약 15배 높게 생산되어 성능이 매우 향상되었음을 알 수 있었으며, 이때 쿨롱효율은 96±2%, H₂O₂ conversion efficiency 71±2% 로 향상되었음.
- -0.4V에서 H₂O₂ 생산에 소모된 에너지는 약 0.276±0.007 kWh/kg H₂O₂로서 기존 공정 대비 에너지 소모율을 획기적으로 줄일 수 있음을 확인하였음 (Modin & Fukushima, 2013).
- 본 조건에서 생물전기화학반응조를 이용하여 하수 처리 및 H₂O₂ 생산을 한 경우 에너지 소모율은 약 0.04±0.02 kWh/m³으로서 종래의 재래식 2차 하수처리시스템에서 단순히 BOD 저감 목적으로 운전하는 경우 소모되는 에너지가 약 0.10~0.18 kWh/m³ 이라 했을 때 최소 0.06 kWh/m³ 이상의 에너지 절감 효과가 있는 것으로 조사됨 (Metcalf and Eddy, 2014).
- 아울러, 본 과업의 제안기술인 그 외 조합공정의 에너지 요구량을 다음과 같이 예측할 때, (1)광생물반응조 0.05~0.1 kWh/m³, (2)MF 또는 UF 멤브레인 공정 0.2~0.3 kWh/m³, (3)UV/H₂O₂ 고도처리시스템 0.05~0.1 kWh/m³, 제안기술의 총 에너지 요구량은 0.34~0.54 kWh/m³이며, 따라서 종래의 MBR 하수처리시스템에서 소모되는 에너지가 약 0.5~1.0 kWh/m³ 이라 했을 때 에너지 효율 측면에서 비교 우위의 기술로 평가할 수 있음 (Metcalf and Eddy, 2014).

타. 내부저항 최소화를 위한 전극 소재 및 반응조 구조 최적화

- 공기를 환원반응에 이용하는 환원전극(Air-cathode)의 대기노출 면에는 GDL(gas diffusion layer)을 만들어 주어야 하는데 기존의 방식은 전극면에 60% polytetrafluoroethylene (PTFE) emulsion을 발라주고 370°C에서 10분동안 열처리하는 방식을 4번 반복하여 GDL을 형성함.
- 반면 본 연구에서는 GDL 형성 방식을 단순화하여 개선하고 다양한 전극재료를 테스트하여 내부저항이 낮은 환원전극을 만들고자 하였으며 이를 통해 환원전극의 ORR (oxygen reduction reaction) 성능을 높이하고자 함.
- GDL로서 polyethylene (PE) sheet와 PTFE sheet 두 가지를 테스트 하였으며 [표1]과 같이 공극율이 각기 다른 재료를 선별하여 ORR 성능이 가장 좋은 GDL을 선정하는 실험을 진행.

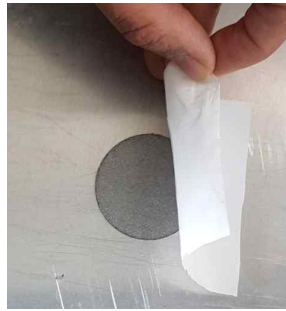
[표1] PE와 PTFE sheet의 특성비교

	PE45	PE60	PTFE
Thickness (μm)	25	15	75
Porosity (%)	45	60	76
Pore size (nm)	70	30	800
Manufacture	TEIJIN	TEIJIN	ADVANTEC

- GDL은 carbon cloth (CC)전극 표면에 PE나 PTFE sheet를 hot press를 이용하여 200bar의 압력을 가해 붙이는 방법으로 제작되었으며 전극과 sheet 사이에 부착이 잘 되도록 하기 위해 parafilm을 사이에 두고 압착하였음 [그림28].



Hot press 예열 (50 C)



전극 위에 parafilm과 PE or PTFE sheet 순으로 배치



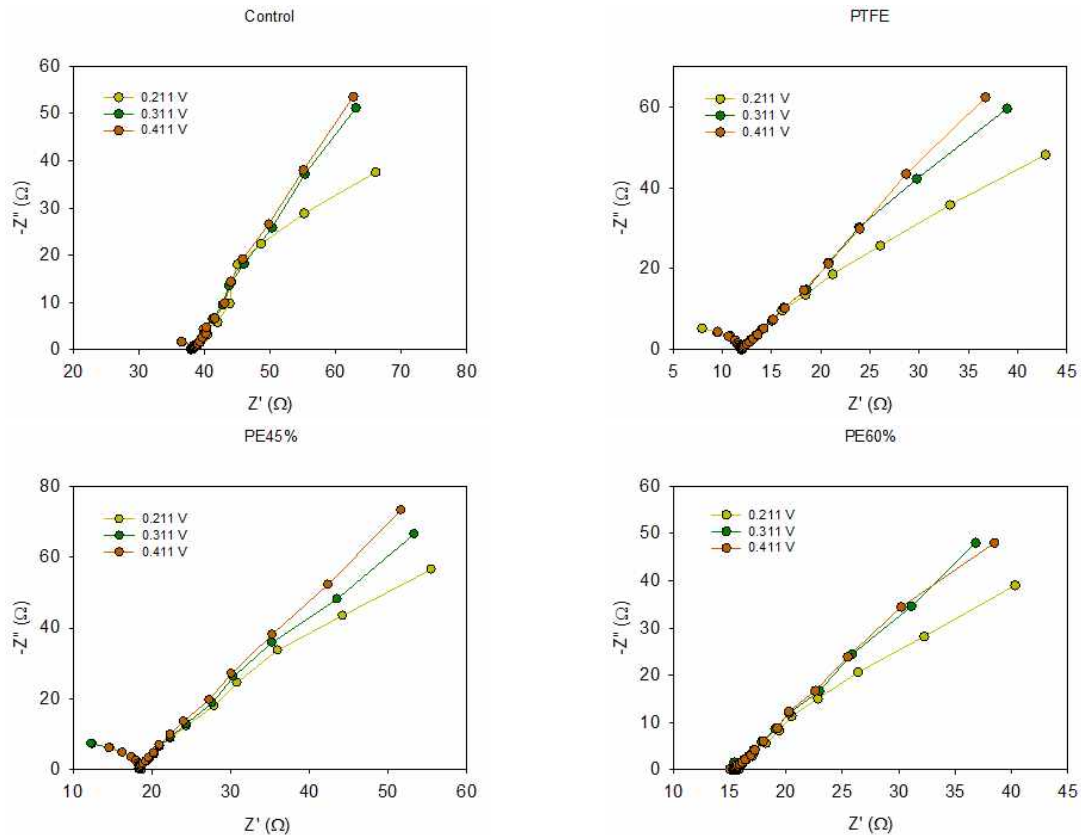
50 C, 200 bar로 압착



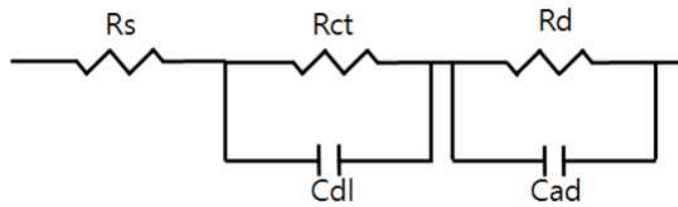
완성된 전극

[그림 28] 전극 위 PE 및 PTFE sheet 부착 방법

- 제작된 전극을 Potentiometer를 이용하여 Impedance(50 mM 인산염 완충액 사용)를 측정하고 등가회로를 이용하여 각 GDL 별 저항을 분석함.



[그림 29] 전극 전위별 Nyquist plots



Rs: solution resistance (Ω)
 Rct: charge transfer resistance (Ω)
 Rd: diffusion resistance (Ω)
 Cdl: capacitance of catalyst layer (F)
 Cad: capacitance of diffusion layer (F)

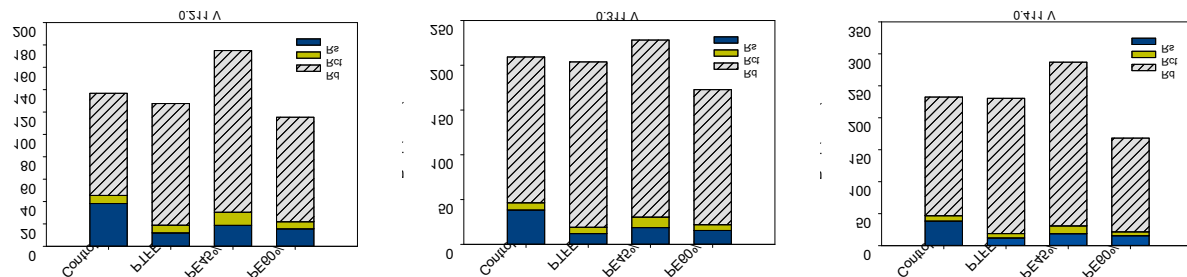
[그림 30] 분석에 사용된 등가회로

- [그림29]은 환원전극의 전위별(vs. SHE) 임피던스 측정 결과를 보여주며, [그림 30]의 등가회로를 이용하여 fitting 한 후 [표2]과 같이 각 파라미터의 임피던스 값을 획득함

[표2] Fitting parameters for each electrode at different electrode potential

	Applied voltage (V)	Rs (Ω)	Rct (Ω)	Rd (Ω)	Cdl (F)	Cad (F)
Control	0.211	38.25	7.24	91.25	0.1868	0.2878
	0.311	38.38	8.11	162.80	0.2036	0.2708
	0.411	38.45	8.45	185.50	0.2013	0.2647
PTFE	0.211	11.99	6.91	108.70	0.1706	0.2469
	0.311	12.06	7.06	184.60	0.1686	0.2229
	0.411	12.07	6.89	211.50	0.1613	0.2217
PE45%	0.211	18.71	11.73	144.50	0.1448	0.2148
	0.311	18.70	11.75	197.70	0.1426	0.1997
	0.411	18.69	12.29	255.90	0.1439	0.1898
PE60%	0.211	15.62	6.40	93.34	0.2182	0.3201
	0.311	15.46	6.52	150.80	0.2209	0.2837
	0.411	15.57	6.14	146.50	0.2174	0.2807

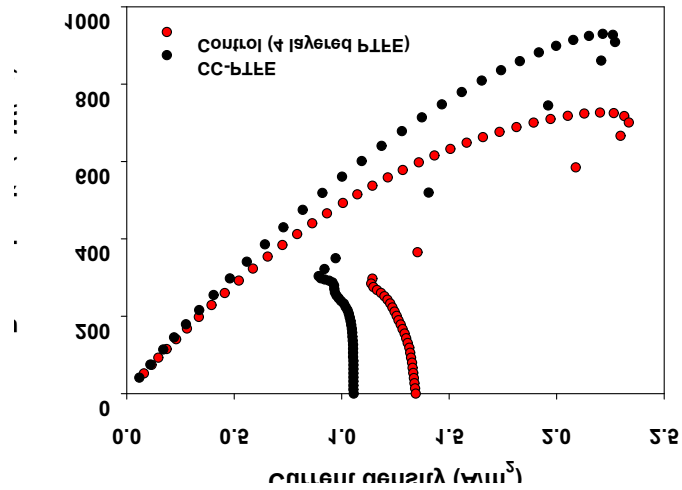
- [표2]에서 볼 수 있듯이 모든 조건에서 내부저항 중 Rd의 비중이 가장 컸으며 porosity가 큰 PE60과 PTFE 전극이 PE45보다 Rd가 낮음.
- Rs는 PTFE가 가장 낮았으며 그 다음 PE60, PE40, Control 순 인 것으로 나타남. Rct의 경우 가장 비중이 작았으며 각 전극별로 6.4~11.7 Ω 사이의 값을 나타냄.
- 전체 저항은 PE60의 경우 가장 작았으나 두께가 너무 얇아 water leakage 현상이 보여 실제 운전 중에 사용이 어려운 것으로 판단되었고 PTFE의 경우 PE40과 Control 전극 대비 내부저항이 낮아 성능이 가장 좋을 것으로 예측됨 [그림31].



[그림 31] 전극 위 PE, PTFE sheet 부착 방법

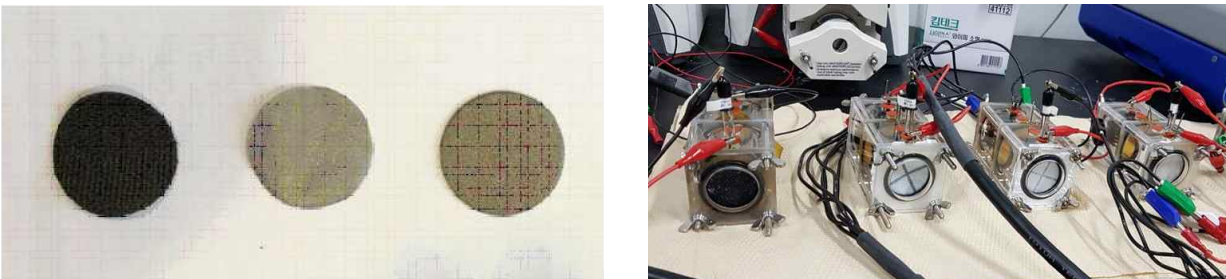
- 따라서 전극의 water side면에 약 0.5 mg Pt/cm²로 코팅된 전극을 미생물연료전지(Microbial Fuel Cell)을 이용한 전력 생산에 이용하여 그 성능을 평가하였으며 power density는 Potentiometer를 이용하여 LSV(linear sweep voltammetry, 0.1 mV/s, 0.65~0V)를 통해 측정하였음.

- [그림32]와 같이 내부저항이 낮은 PTFE 전극이 control 전극 대비 성능이 높은 것으로 나타남. PTFE 전극의 경우 최대출력이 930 mW/m^2 로 Control 전극(726 mW/m^2) 대비 약 28% 더 높은 전력이 생산되었으며 이는 낮은 내부저항과 큰 porosity로 인해 ORR 반응이 향상되어 가능했던 것으로 판단됨.

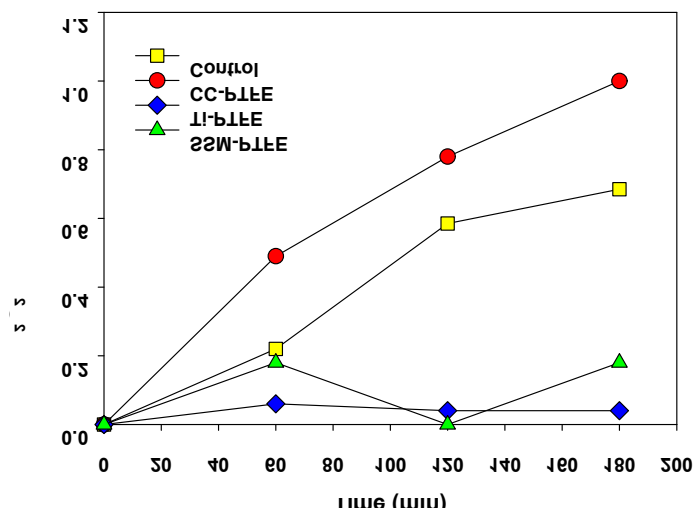


[그림 32] 대조군 대비 평가 대상 cathode를 이용한 power density curves

- PTFE GDL을 전기 생산 반응 외에 ORR을 통한 H_2O_2 생산에 적용하여 보았으며 이때 전극 재료를 carbon cloth (CC), stainless steel mesh (SSM), titanium foam (Ti) 등을 평가 [그림33]
- PTFE는 상기한 바와 같이 Hot press를 이용하여 각 전극 위에 부착하여 사용하였으며 CEM으로 분리한 양극 반응조에 Tap water를 채우고 chronopotentiometry를 이용하여 환원전극에 1mA의 전류를 가해 주며 H_2O_2 생산 실험을 수행하였음.

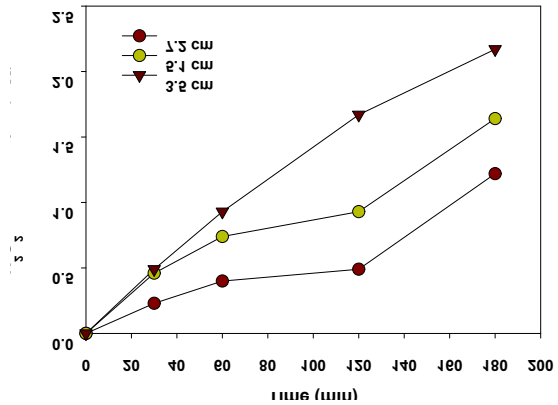
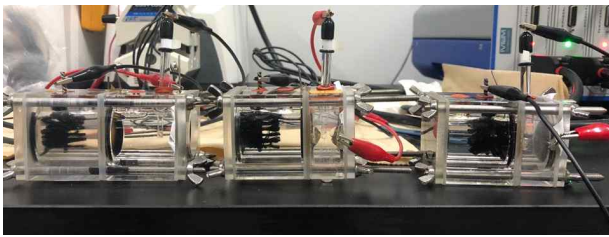


[그림33] H_2O_2 생산에 이용된 전극재료, 왼쪽부터 CC, SSM, Ti (좌) 및 H_2O_2 생산 전기화학조 (우)



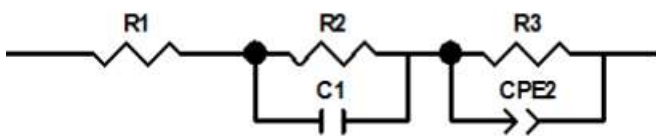
[그림 34] 대조군 대비 평가 대상 cathode를 이용한 H_2O_2 생산성 평가

- [그림34] 실험결과 MFC 모드의 전력 생산과 마찬가지로 H_2O_2 생산에서도 Control (0.69 mM H_2O_2) 대비 PTFE (1.0 mM H_2O_2) 가 H_2O_2 생산량이 더 많은 것으로 확인됨. 반면 SSM과 Ti 와 같은 금속 전극들은 H_2O_2 생산량이 매우 적어 전극표면을 개선하지 않는 한 H_2O_2 생산에 적합하지 않는 것으로 판단됨.
- 최종적으로 GDL을 개선한 전극 중 CC와 PTFE를 이용한 경우 가장 ORR 성능이 가장 좋아 CC-PTFE 전극을 H_2O_2 생산 최적의 전극으로 보고 향후 시스템 구조 개선에 사용하였음
- 내부저항이 낮은 반응조는 우선적으로 산화전극과 환원전극의 거리가 가까운 구조로 개선되어야 할 필요가 있는데 H_2O_2 에 전극간의 거리가 실제 H_2O_2 생산에 미치는 영향이 있는지 판단하기 위한 실험을 진행함.



[그림 35] 전극사이 거리가 다른 전기화학조, 왼쪽부터 7.2 cm, 5.1 cm, 3.5cm (좌) 및 각 반응조에서의 H_2O_2 생산량 비교 (at 1mA) (우)

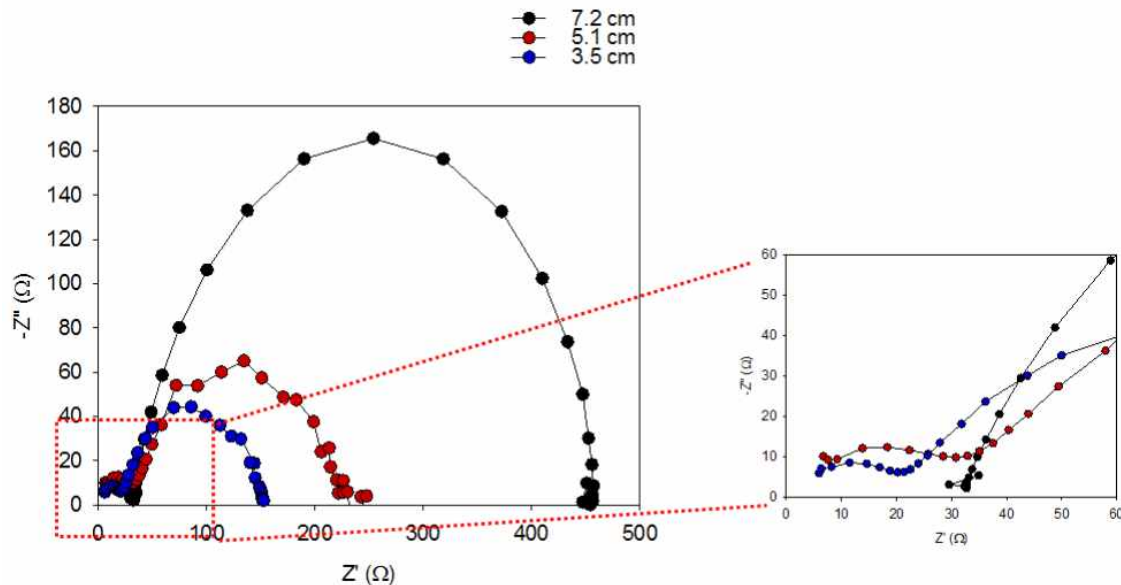
- [그림35]와 같이 CEM을 사이에 둔 산화전극과 환원전극의 거리가 7.2cm, 5.1cm, 3.5cm인 반응조를 이용하여 H_2O_2 생산 실험을 한 결과 거리가 가까울수록 H_2O_2 생산량이 높아지는 것을 알 수 있었으며 가장 가까운 순서로 2.2 mM, 1.6 mM, 1.2 mM의 H_2O_2 가 생산됨.
- 성능향상 원인은 전체 시스템의 EIS 분석을 통해 확인해 보았는데 획득한 Nyquist plot을 [그림 36]의 등가회로를 이용하여 fitting 하여 각 파라미터 값을 얻음.



R1 : ohmic resistance
 R2 : film resistance
 C1 : film capacitance
 R3 : charge transfer resistance
 CPE2 : electrode capacitance

[그림 36] 분석에 사용된 등가회로

- [그림37]에서 볼 수 있듯이 전극 거리가 가까울수록 R1이 크게 감소하는 것을 알 수 있으며 거리가 7.2cm에서 3.5cm로 감소할 때 최대 32Ω에서 6Ω까지 R1 저항이 감소하였음. R2의 경우 전극 표면에 형성된 gas bubble에 의한 저항으로 판단되었으며 반응이 원활할수록 그 저항이 감소하는 것으로 보였으며 R2의 경우 7.2cm→165Ω, 5.1cm→146Ω, 3.5cm→115Ω 순으로 감소하였음. R3 역시 H_2O_2 생산량이 많을수록 감소하는 것으로 보였으며 전극 거리가 짧을수록 낮은 내부저항으로 인해 ORR 반응이 원활했음을 알 수 있음. R3는 7.2cm→259Ω, 5.1cm→67Ω, 3.5cm→20Ω 순으로 감소하였음.

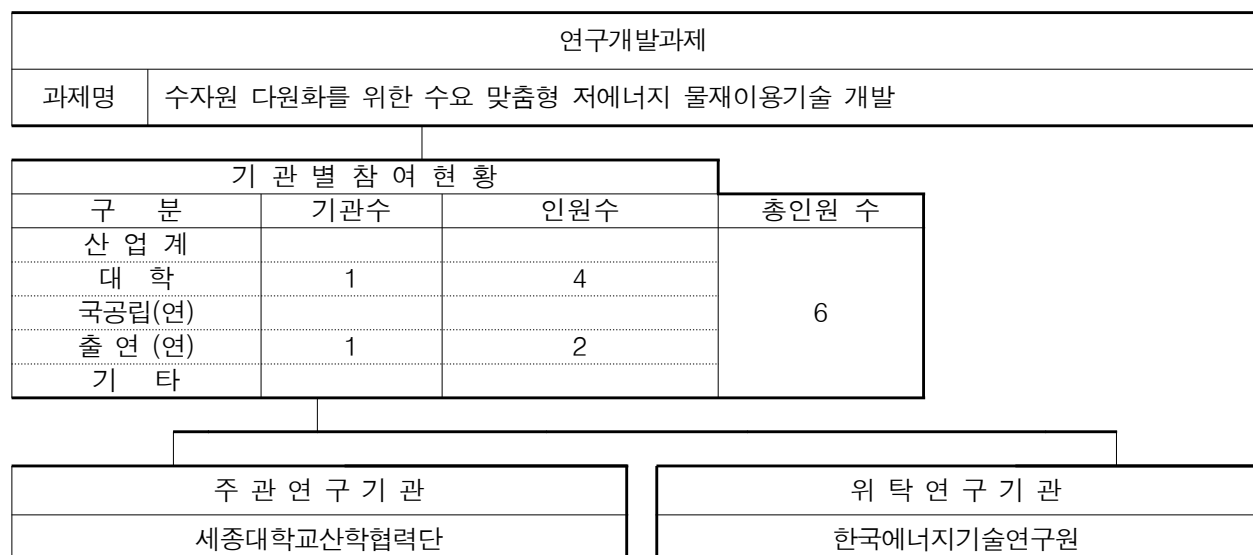


[그림 37] 각기 다른 전극간격에 따른 H_2O_2 생산성 평가 (cathode potential $-1V$ vs. $Ag/AgCl$)

3. 연구개발 추진 전략 및 방법

- 연구책임자는 참여기관과 연구원의 연구 참여와 업무수행을 본 연구제안서가 제시하고 있는 연구개발의 최종목표와 단계별 연구개발 내용 및 추진일정을 고려하여 역할을 분담하고, 업무보고를 통하여 적절한 업무수행이 이루어지도록하며 사안별로 문제해결방안 등을 논의하고 필요한 경우 대외협력기관과 자문단 등을 적극 활용하여 협의토록 함.
- 제안된 과제에의 궁극적 연구목표를 달성함과 동시에 현재 기술수준의 미비점 및 개선점을 추가적으로 분석하기 위하여 각 핵심 분야의 국내외 국공립연구소 연구자와 대학 교수진을 주축으로 하는 기술자문단을 구성하여 유기적이고 상호보완적인 연구를 진행함.
- 본 제안과제의 핵심연구 분야인 특정 소재와 시스템을 이용한 신개념 하수재이용 및 공정운용 최적화를 위한 원천기술개발을 바탕으로 국내외 선행기술 및 문헌조사를 통해 최종적으로 이루고자하는 기술의 진보와 선진화를 달성하여 발명특허 및 연구논문 등에 있어 차별성과 독창성을 부여함.
- 전문가 그룹을 적극 활용하여 연구기술의 특허진행을 원활히 진행하고 원천기술 개발에 따라 이를 응용 및 산업화와 연계하여 연구개발 종료 이후에도 기술이전 및 사업화를 체계적으로 수행함과 동시에 차상위연구과제와 연계하여 연구의 지속성과 연계성을 확보하여 실질적인 기후변화대응 과학기술발전과 더불어 기술의 실용화 전략을 제시함.

4. 연구개발 추진 체계 및 일정



참 여 연 구 원 주관연구책임자 (김현철)외 4명	참 여 연 구 원 위탁연구책임자 (남주연)외 1명
담당연구개발내용 ○ Non-byproducts 저에너지 소독/고도산화 기술개발 - 미생물 불활성화 효율 평가 - 고도산화 응용기법 연구 - 소독/고도산화 적정 에너지 공급량 산정 ○ Anti-fouling 재처리수 고액분리 기술 개발 - 멤브레인 운전조건에 따른 고액분리 성능 평가 - 멤브레인 여과 지속가능특성 평가	담당연구개발내용 ○ CO₂-neutral 탄소성유기물질 저감 기술 개발 - 바이오매스 고정화 기법 최적화 - 바이오매스 고정화에 따른 공정성능 영향 평가 - 전기화학 반응조 운영 최적화 및 하수처리 특성 평가

	연구과제명 (연구수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	1차년도				2차년도			
		핵심성과	단위성과	질적 성과지표			1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
총괄														
주관	Non- byproducts 저에너지 소독/고도 산화 기술 (세종대학교 산학협력단)	1	1-1	1-1-①	자료 조사		■							
					기초실험/목표성능설정		■	■						
					성능시험/효율평가			■	■					
			1-2	1-1-②	전문학술회의 발표				■					
					성능시험/효율평가					■				
				1-2-①	국내특허출원	특허					■			
	Anti-fouling 재처리수 고액분리 기술 (세종대학교 산학협력단)	2	2-1		Bench scale 장치 제작						■			
					운전평가 및 최적화							■	■	
				1-2-②	논문제출	논문								■
			2-2	2-1-①	자료 조사		■							
					기초실험/목표성능설정		■	■						
				2-1-②	성능시험/효율평가			■	■					
위탁	CO ₂ -neutral 탄소성유기물질 저감 기술 (한국에너지 기술연구원)	3	3-1		평가프로토콜 수립				■					
				2-2-①③④	Bench scale 장치 제작					■				
					운전 및 평가검증						■	■	■	
			3-2		논문제출	논문						■		
				3-2-①②④	평가검증 및 최적화							■	■	■
					논문제출	논문								■
			3-2-③		국내특허출원	특허								■

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

○ 본 연구개발과제의 핵심연구성과를 아래 상술하였으며, 성과점검기준표와 성과지표별 목표에서 제시하는 항목의 달성 여부를 기준으로 평가한 결과 100% 목표 달성함.

○ 성과지표별 목표

- SCI(E)급 학술지 게재: 2건

- 일반학술지게재; 1건

- 특허출원: 3건

○ 성과점검기준표

[총괄]

구분		핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수		
						질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치			
주관	1	Non- byproducts 저에너지 소독/고도 산화 기술	1-1	미생물 불활성화 효율 평가	①	대장균군	불검출	불검출	실험분석	보고서 제출	10	특허: 출원 1건 등록 1건		
					②	국내 학술발표	1건	2건	학술회의 사무국	발표초록 제출	5	논문: 1건 사제품: 1건 SW: 1건		
			1-2	고도산화 응용기법 연구	①	국내특허출원	1건	1건	기술이전 센터활용	출원증명 제출	10	특허: 출원 1건 등록 1건		
					②	논문제출	1건	0.5건	저널사무 국활용	별쇄본 제출	10	논문: 1건 사제품: 1건 SW: 1건		
	2	Anti-fouling 재처리수 고액분리 기술	2-1	멤브레인 운전조건에 따른 고액분리 성능 평가	①	잔류탁도	2NTU 이하	2 NTU 이하	실험분석	보고서 제출	5	특허: 출원 1건 등록 1건		
					②	실험실환경 성능평가 프로토콜수립	1건	1건	정보검색	보고서 제출	5	논문: 1건 사제품: 1건 SW: 1건		
			2-2	멤브레인 여과지속가 능특성 평가	①	논문제출	1건	-	저널사무 국활용	별쇄본 제출	5	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 사제품: 1건 SW: 1건		
					②	국내특허출원	1건	-	기술이전 센터활용	출원증명 제출	5			
					③	바이오세정 플렉스회복	80% 이상	-	정보검색	보고서 제출	5			
					④	총질소(TN) 및 총인(TP)	20 및 1mg/L 이하	-	정보검색	보고서 제출	5			
			위탁	3	3-1	바이오매스 고정화에 따른 공정성능 영향 평가	①	실험실환경 성능평가 프로토콜수립	1건	1건	정보검색	보고서 제출	5	특허: 출원 1건 등록 1건
							①	생물화학적 산소요구량 (BOD)	5mg/L 이하	-	실험분석	보고서 제출	5	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 사제품: 1건 SW: 1건
3-2	전기화학 반응조 운영 최적화 및 하수처리특 성 평가	②			논문제출	1건	-	저널사무 국활용	별쇄본 제출	10				
		③			국내특허출원	1건	-	기술이전 센터활용	출원증명 제출	10				
		④			에너지절감율	0.05 kWh/m ³ 이상	-	정보검색	보고서 제출	5				
							100	특허: 출원 3건 등록 3건						
							100	논문: 3건						
							100	사제품: 3건						
					100	SW: 3건								

[1차년도]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	1	Non-byproducts 저에너지 소독/고도 산화 기술	1-1	미생물 불활성화 효율 평가	① 대장균군	불검출	-	배양실험	보고서 제출	10	특허: 출원 <u>건</u> 등록 <u>건</u> 논문: <u>건</u> 시제품: <u>건</u> SW: <u>건</u>
					② 국내 학술발표	1건	-	학술회의 사무국	발표초록 제출	5	
	2	Anti-fouling 재처리수 고액분리 기술	2-1	멤브레인 운전조건에 따른 고액분리 성능 평가	① 잔류탁도	2NTU 이하	-	분광분석	보고서 제출	5	특허: 출원 <u>건</u> 등록 <u>건</u> 논문: <u>건</u> 시제품: <u>건</u> SW: <u>건</u>
					② 실험실환경 성능평가 프로토콜수립	1건	-	정보검색	보고서 제출	5	
위탁	3	CO ₂ -neutral 탄소성유기 물질 저감 기술	3-1	바이오매스 고정화에 따른 공정성능 영향 평가	① 실험실환경 성능평가 프로토콜수립	1건	-	정보검색	보고서 제출	5	특허: 출원 <u>건</u> 등록 <u>건</u> 논문: <u>건</u> 시제품: <u>건</u> SW: <u>건</u>
계										30	특허: 출원 <u>건</u> 등록 <u>건</u> 논문: <u>건</u> 시제품: <u>건</u> SW: <u>건</u>

[2차년도]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수		
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치			
주관	1	Non-bypr oducts 저에너지 소독/고도 산화 기술	1-2	고도 산화 응용기법 연구	①	국내특허출원	1건	1건	기술이전 센터활용	출원증명 제출	10	특허: 출원 1건 등록 <u>건</u> 논문: <u>1건</u> 시제품: <u>건</u> SW: <u>건</u>	
					②	논문제출	1건	0.5건	저널사무 국활용	별쇄본 제출	10		
	2	Anti-fouling 재처리수 고액분리 기술	2-2	멤브레인 여과지속가 능특성 평가	①	논문제출	1건	-	저널사무 국활용	별쇄본 제출	5	특허: 출원 1건 등록 <u>건</u> 논문: <u>1건</u> 시제품: <u>건</u> SW: <u>건</u>	
					②	국내특허출원	1건	-	기술이전 센터활용	출원증명 제출	5		
					③	바이오세정 플렉스회복	80% 이상	-	정보검색	보고서 제출	5		
					④	총질소(TN) 및 총인(TP)	20 및 1mg/L 이하	-	정보검색	보고서 제출	5		
	위탁	3	CO2-neutral 탄소성유기 물질 저감 기술	3-2	전기화학 반응조 운영 최적화 및 하수처리특 성 평가	①	생물화학적 산소요구량 (BOD)	5mg/L 이하	-	실험분석	보고서 제출	5	특허: 출원 1건 등록 <u>건</u> 논문: <u>1건</u> 시제품: <u>건</u> SW: <u>건</u>
						②	논문제출	1건	-	저널사무 국활용	별쇄본 제출	10	
③						국내특허출원	1건	-	기술이전 센터활용	출원증명 제출	10		
④						에너지절감율	0.05 kWh/m ³ 이상	-	정보검색	보고서 제출	5		
계											70	특허: 출원 3건 등록 <u>건</u> 논문: <u>3건</u> 시제품: <u>건</u> SW: <u>건</u>	

○ 핵심 연구성과

연 번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형 ¹⁾	연구기관	해당 연차	TRL
1	Non-byproducts 저에너지 소독/고도산화 기술	소독부산물을 생성시키지 않으며, 재이용수의 미생물학적 안전성을 확보하고 나아가 난분해성미량유기오염물질의 저감 유도	공법	세종대학교 산학협력단	1~2	3
2	Anti-fouling 재처리수 고액분리 기술	경제성이 담보된 MF 분리막을 혼합 시스템 형태로 구성하여 부유고형물질을 포함한 일부 용존유기물질의 제거와 수질향상에 기여	공법	세종대학교 산학협력단	1~2	3
3	CO ₂ -neutral 탄소성유기물질 저감 기술	채래식 하수처리방식과 달리 기계적 산소공급 없이 탄소성유기물질을 무기화하여 재처리수의 BOD를 저감	공법	한국에너지 기술연구원	1~2	3

○ 핵심 연구성과별 설명

핵심성과 1		
정의	Non-byproducts 저에너지 소독/고도산화 기술	
목적	소독부산물을 생성시키지 않으며, 재이용수의 미생물학적 안전성을 확보하고 나아가 난분해성미량유기오염물질의 저감 유도	
성능목표	(기존기술 수준) 동 성능목표 달성을 위한 과도한 에너지 소모 (개발기술 수준) 대장균군 불검출	
성과달성 책임자 (소속기관)	김현철 (세종대학교산학협력단)	
소요기간	2017. 04 ~ 2018.12 (1년 9개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	- 논문별쇄본 또는 온라인 출력본 첨부: 저자명, 요약, 사사 등 정보 수록 - 특허출원증명서 사본 첨부: 발명인, 출원일, 출원번호 등 정보 수록	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	[출원 : 1건, 등록 : 0건]
	논문	[SCI(E) : 1건, 학술지 : 0건]
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 2		
정의	Anti-fouling 재처리수 고액분리 기술	
목적	경제성이 담보된 MF 분리막을 혼합 시스템 형태로 구성하여 부유고형물질을 포함한 일부 용존유기물질의 제거와 수질향상을 달성	
성능목표	(기존기술 수준) 동 성능목표 달성을 위한 과도한 에너지 소모 (개발기술 수준) 잔류탁도 2NTU 이하; on-site 바이오세정 실시하여 80% 이상 여과플럭스 회복; 총질소(TN) 20 mg/L 이하; 총인(TP) 1 mg/L 이하	
성과달성 책임자 (소속기관)	김현철 (세종대학교산학협력단)	
소요기간	2017. 04 ~ 2018.12 (1년 9개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	- 논문별쇄본 또는 온라인 출력본 첨부: 저자명, 요약, 사사 등 정보 수록 - 특허출원증명서 사본 첨부: 발명인, 출원일, 출원번호 등 정보 수록	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	[출원 : 1건, 등록 : 0건]
	논문	[SCI(E) : 1건, 학술지 : 0건]
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 3		
정의	CO ₂ -neutral 탄소성유기물질 저감 기술	
목적	재래식 하수처리방식과 달리 기계적 산소공급 없이 탄소성유기물질을 무기화하여 재처리수의 BOD를 저감하며, 이산화탄소배출을 최소화	
성능목표	(기존기술 수준) 동 성능목표 달성을 위한 과도한 에너지 소모 (개발기술 수준) 생물화학적산소요구량 5 mg/L 이하; 에너지절감율 0.05 kWh/m ³ 이상	
성과달성 책임자 (소속기관)	남주연 (한국에너지기술연구원)	
소요기간	2017. 04 ~ 2018.12 (1년 9개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	- 논문별쇄본 또는 온라인 출력본 첨부: 저자명, 요약, 사사 등 정보 수록 - 특허출원증명서 사본 첨부: 발명인, 출원일, 출원번호 등 정보 수록	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	[출원 : 1건, 등록 : 0건]
	논문	[SCI(E) : 0건, 학술지 : 1건]
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

2. 연구개발성과

가. 국내외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부	게재일	등록번호 ISSN
1	Evaluation of chemical washing for granular activated carbon during drinking water treatment	Desalination and Water Treatment	김현철	97	미국	Desalination Publications	SCI	20171115	1944-3994
2	Photostimulation of sequential degradation and assimilation of recalcitrant carbonaceous organics in <i>Scenedesmus quadricauda</i>	Process Biochemistry	김현철	65	네덜란드	Elsevier	SCI	20180215	1359-5113
3	Treatment of highly saline RO concentrate using <i>Scenedesmus quadricauda</i> for enhanced removal of refractory organic matter	Desalination	김현철	430	네덜란드	Elsevier	SCI	20180315	0011-9164
4	The growth of <i>Scenedesmus quadricauda</i> in RO concentrate and the impacts on refractory organic matter, Escherichia coli, and trace organic compounds	Water Research	김현철	134	네덜란드	Elsevier	SCI	20180501	0043-1354
5	Degradation of sulfonamide antibiotics and their intermediates toxicity in an aeration-assisted non-thermal plasma while treating strong wastewater	Chemosphere	남주연	209	네덜란드	Elsevier	SCI	20180618	0045-6535
6	Assessing the behavior of the feed-water constituents of a pilot-scale 1000-cell-pair reverse electrodialysis with seawater and municipal wastewater effluent	Water Research	남주연	148	네덜란드	Elsevier	SCI	20181023	0043-1354
7	Domestic wastewater treatment in a tubular microbial electrolysis cell with a membrane electrode assembly	Int. Journal of Hydrogen Energy	남주연	44	네덜란드	Elsevier	SCI	20181129	0360-3199
8	미세조류를 이용한 역삼투 농축수의 처리	한국도시환경학회지	김현철	18	한국	한국도시환경학회	비SCI	20180930	1598-253X

나. 지적재산권

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기 여 율
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
1	연수화 방법 및 그 장치	한국	세종대학교 산학협력단	2017. 10. 16	10-2017-0133918	-	-	-	100
2	하수 처리 시스템 및 방법	한국	세종대학교 산학협력단	2018. 11. 28	10-2018-0149781	-	-	-	100
3	수소 생산 하수 처리 시스템	한국	한국에너지기술연구원	2018. 12. 27	10-2018-0171065	-	-	-	100

다. 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	The International Conference on Assessment and Control of Emerging Micropollutants in Water: Asian Experiences (제5회 부산국제물포럼)	양희성	2017.9.7	부산광역시	대한민국
2	The 10th International Desalination Workshop (국제담수화워크숍)	KHAN WARIS	2017.11.23	부산광역시	대한민국
3	The 2nd International Conference on Bioresources, Energy, Environment, and Materials Technology (BEEM2018)	KHAN WARIS	2018.06.10	홍천	대한민국
4	The 4th International Conference on Contaminated Land, Ecological Assessment and Remediation 2018	남주연	2018.08.16	Hong Kong Polytechnic University	홍콩
5	The 2018 World Congress on Advances in Civil, Environmental, & Materials Research (ACEM18)	양희성	2018.08.28	인천광역시	대한민국

라. 연구개발성과의 혁신성

- 생물학적 하수처리에 이은 재이용 방식과 달리 기계적 산소공급 없이 탄소성유기물질의 제거 가능
- 소독부산물발생 없이 미생물을 제거하거나 불활성화 달성 가능한 on-site 소독 기능
- 선행연구에서 확보된 광합성생물공정으로부터 산소를 공급하여 전기화학시스템의 성능 향상
- 탄소성유기물질의 분해시 발생하는 CO₂를 포집 고정함으로써 carbon-neutralization 실현
- 에너지자립도향상 기술로 분산형 기반의 수자원 다원화를 위한 탄력적 재이용수 생산 공정운용 가능
- 미생물대량증식을 배제하고 응집제 주입이 필요 없어 약품사용 및 슬러지 처리비용 경감

3. 관련 분야 기여도

- 기술적 측면
 - 고유의 특성화된 생물반응공정을 이용한 소규모/분산형 시스템을 구현함으로써 환경에너지관련 기술수준을 크게 향상시킬 것으로 판단되며, 온실가스저감, 에너지자립도 향상, 유용물질 생산 등 관련분야에 탄력적인 기술접목으로 대외 기술경쟁력 향상이 기대됨.
 - 우리나라 물 산업 시장은 개발도상국을 대상으로 맞춤형 기술을 수출한 사례 등의 경험이 있고, 전기, 화학, 기계, 통신 등 플랜트 기초 기술과 수출 플랜트 사업에 기술적인 강점을 지니고 있으므로, 필요성에 따라 수질맞춤형 수처리 플랜트 기술개발 시 경쟁력이 상당할 것으로 판단됨.
 - 협력연구를 통하여 도출된 결과물에 대한 공동저술을 진행하여 관련 학계 및 산업계로부터 우리기관의 인지도를 향상시킴으로써 효과적인 기술성과확산을 유도함.

○ 경제적·산업적 측면

- 안정적 물자원 이용 등을 목표로 급증하는 중국 및 동남아를 비롯한 해외시장에 물 문제 해결을 위한 맞춤형 패키징기술 진출이 가능하며, 동시에 시장여건을 고려하여 수처리산업분야의 수출유망 환경기술로서 연 성장을 20%에 이르는 중국과 동남아개발도상국 등 인접시장 진출과 전문인력 일자리 창출 가능함.
- 또한 표준화 시스템의 설계 및 실용화 방안을 마련하여 국내 하수처리수 재이용 기술의 자립화를 달성하고, 궁극적으로 저에너지 하수재이용기술 최적화를 통한 상용화 전략을 다변화함으로써 내수시장과 관련 산업의 형성에도 기여할 수 있을 것으로 판단됨.

○ 사회적 측면

- 본 제안과제에서 제시된 단계별 목표를 성공적으로 달성하고 그에 따른 저에너지 하수재이용 기술을 완성함으로써 하천 등 기존 수원에서 취수를 줄여 물에 대한 스트레스를 줄이고 기후변화에 따른 가뭄 등 국가적 난제에 대한 선제적 대응 전략을 마련하는데 공헌할 수 있음.
- 정부의 불 재이용 활성화 법률 개정 및 제3의 물시장으로 하수처리수 재이용 육성 정책사업 추진을 위한 동력이 상승될 것이며, 기후변화 대응력을 높이고 지역간 기술보급 편차에 따른 수자원 이용 불균형 해소에 기여할 것으로 기대됨.

4. 연구성과의 우수성 및 차별성

하수처리/물재이용 범용기술 대비 제안과제의 연구 성과물의 차별성	
현존 대표적 하수처리/물재이용 조합공정 (MBR 하수처리 + RO + UV소독)	본 과제의 분산형 제안기술 (수요 맞춤형 저에너지 재이용수 생산 공정)
● 재래식 하수처리에 의존하여 기계식 공기 공급에 따른 에너지과밀화로 운전비용 상승 ● 수요 측의 재이용수 용도수질에 관계없이 항상 높은 수준의 재처리공정 운영을 요함 ● 총인 저감을 위한 응집제의 사용에 따라 약품비와 슬러지처리비 등 추가의 운전비용이 발생하고 재이용설비의 분리막 오염을 가중 ● 역삼투공정 운전으로 난분해성 농축수가 필연적으로 발생하여 별도의 공정조합이 요구되어 물 순환체계와 연계한 복잡성증가 ● 재이용수 공급이 대형 도시하수처리장 인근으로 제한되어 투입비용 대비 생산성 저하	● 종래의 생물학적 하수처리와 달리 기계적 산소공급 없이 탄소성유기물질의 제거 가능 ● 탄소성유기물질의 분해시 발생하는 CO₂를 포집 고정함으로써 carbon-neutralization 실현 ● 수자원 다원화 목적에 따라 탄력적 및 선택적 재이용수 생산 공정운영 설계가능 ● 미생물 대량증식을 배제하고 총인 저감을 위한 추가의 응집제 주입이 필요 없어 약품사용 및 슬러지 처리비용 경감 ● 에너지자립도 향상 기술로 분산형 기반의 공정설계가 가능하며, 신종미량오염물질의 제거 가능한 on-site 소독/고도산화 기능을 탑재

○ 저에너지 및 물재이용 관련 지표

- 종래의 MBR 하수처리시설에서 소비되는 에너지는 최소 0.5 kWh/m³ 정도로 이중 약 50% 가량이 시설 내 미생물 활성을 유지하기 위해 실시하는 공기공급에 따른 것이며, 재이용수 생산을 위한 후속 역삼투공정과 UV소독을 위해 각각 0.5~0.65 kWh/m³ 및 0.01~0.05 kWh/m³ 범위의 에너지 추가 투입을 요하므로 이들 조합공정운영에 따른 에너지 소비율은 약 1.01~1.2 kWh/m³ 범위에 달함 (Metcalf & Eddy, 2014).
- 이에 반하여, 본 과제의 분산형 제안기술의 경우 탄소성유기물질 저감에 0.04 kWh/m³, 질소/인 등 영양염류 제거와 고형물 분리에 0.25~0.4 kWh/m³, 그리고 UV/H₂O₂ 고도처리에 0.05~0.1 kWh/m³ 을 투입하는 경우 총 0.34~0.54 kWh/m³ 범위의 에너지 소비율을 나타내어 종래의 역삼투분리막 기반의 물재이용기술과 비교하여 약 30~50% 수준의 에너지 요구량을 나타냄.
- 본 과제의 제안기술을 적용하여 실험실 규모의 처리실험을 실시한 결과, 물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률(환경부, 2016)의 하·폐수처리수 재처리수 및 온배수 재처리수의 용도별 수질기준(제14조) 중에서, 결합잔류염소를 요하지 않는 세척·살수용수, 조경용수, 농업용수, 그리고 하천 등 유지용수의 수질기준을 만족하는 결과를 나타냄.
- 또한, 질소/인 등 영양염류의 제거를 요하지 않는 조경용수와 농업용수 등의 재이용수 사용 목적을 달성하기 위하여 선택적 공정운영을 하는 경우, 질소/인 등 영양염류 제거와 고형물 분리에 요구되는 0.25~0.4 kWh/m³ 범위의 에너지 투입을 절감할 수 있어 추가의 운전비용 절감효과를 얻을 수 있음.

-
- 현재 에너지/비용 과밀화된 물재이용 기술사용을 탈피하여 분산형 기반의 지속가능한 새로운 접근이 요구되며, 그에 따라 향후 공공 과제기획을 통한 상용화연구 추진은 물론 지적재산권 활용 기술이전 추진을 통하여 엔지니어링 기반의 기술사업화 유도 등 점진적 성과활용이 가능함. (※ 이에 대하여 후술하는 “제5장. 연구개발성과의 활용계획”에 관련내용을 구체적으로 서술함)
-

제5장. 연구개발성과의 활용계획

- 연구협업을 통하여 도출될 기초연구자료와 발명기술들을 활용하여 향후 공공 과제기획을 통한 후속 연구 추진은 물론 엔지니어링 기반의 원천기술 지적재산권 관리 및 기술이전 추진을 통하여 관련 산업분야로 기술사업화를 유도함.
 - 특히 수자원 산업분야에 대한 연구개발 및 상용화에 기폭역할을 할 것으로 보이며, 동종 건설환경에 너지 및 바이오소재 이용분야에 대한 접목성이 높아 신산업창출 등 그 파급효과 또한 매우 클 것으로 판단됨.
 - 아울러 국내외 여러 지역에서 기존 도시의 재개발 필요성이 증가함에 따라 개발기술을 활용하여 물순환 도시 인프라 구축을 위한 지능형 도시 물 공급 및 물 자립 기술보급 추진이 가능함.
 - 최근 저영향개발 기반의 물 공급을 위해 활발히 추진되고 있는 인공녹지와 빗물침투설비 확충 그리고 지하저류시설 구축 등과 병행하여 물 부족 대비 수자원 다원화를 위한 안정적 활용기술로 판단됨.
 - 또한 하수재이용 목적 외에 소화조반류수, 축산폐수, 음폐수 등의 고농도 유기성폐액과 병합처리가 가능한 연계처리기술 확보가 가능하며, 특정 바이오매스 활용분야의 원천기술 확보 및 친환경적 기술 보급을 통한 부가가치 창출 등의 활용 폭이 매우 다양함.
 - 그 외 연구수행 단계에서 우수인력을 참여연구원으로 선발하여 국내 R&D 교육프로그램 뿐만 아니라 협력연구기관 또는 그 연구기관이 지정하는 유관기관에 파견하여 방문연구를 수행하게 함으로써 실질적 인력양성을 이행하고 상호간 국제인력교류를 통하여 대외협력기관과의 네트워킹을 강화에 활용함.
-

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- 전 세계적으로 탈화석연료 시대의 도래에 맞춰 지속가능한 기술혁명뿐 아니라 사회경제분야에 이르기 까지 이른바 ‘녹색경제’로의 급속한 체제변화가 이루어지고 있으며, 국가 간 교역 및 산업전반에 걸쳐 파급효과가 커지고 있음.
 - 신재생에너지 산업의 급속한 성장은 분산형 구조의 에너지 공급체계를 구축하고 그에 따라 물과 식량 역시 현재의 과밀화된 중앙공급 방식에서 벗어난 새로운 형태로의 체제 전환이 가속화 될 것으로 전망됨에 따라 분산형 구조의 물재이용 전략과 그에 따른 적정기술 마련에 관심이 집중되고 있음.
 - 지속가능한 물재이용 활성화를 위해 과거 빗물과 중수도 이용에서 최근 적극적 하수재이용 추진으로 친환경 대체용수 확보 요구가 상승하고 있는 반면 현재의 물공급/재이용 전략은 아직까지 비생산적 수자원관리와 대형 하수처리에 의존하고 있어 패러다임 전환과 적정기술 마련이 요구됨.
-

제7장. 연구개발성과의 보안등급

※ 보안등급 분류: 일반

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황 (※ 해당사항 없음)

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

■ 실험실 안전 점검 체계

- 진단주기: 매년 전체 연구실에 대해 정기안전점검 및 정밀안전진단 (매년 1회)
- 일상안전점검: 매일 1회 연구실 안전관리담당자 및 정기안전점검
- 정밀안전진단: 진단기기를 통하여 화공, 가스, 전기, 위생, 기계 등 정밀점검
- 후속조치: 진단결과 미비점에 대하여 개선될 수 있도록 전체 연구실험실에 공지/시정요청 후 피드백

■ 실험실 정밀안전진단 실시

- 대상: 연구개발 활동에 유해화학물질 관리법 제2조 7호에 따른 유해화학물질을 취급하는 연구실, 산업안전보건법 제39조에 따른 유해인자를 취급하는 연구실, 과학기술부령이 정하는 독성가스를 취급하는 연구실 등
- 실시: 2년마다 1회 실시하여 결과를 교육과학기술부에 보고

■ 교육훈련

- 대상: 이공계열 전체 연구 활동 종사자 (교원, 직원, 연구원, 연구보조원, 대학원생, 학부생, 기타 실험에 참여하는 모든 자)로서 매년 1학기 연구실 안전법에서 정하는 대상자에 대하여 실시하며, 2학기에는 신규입학 및 복학인원을 대상으로 실시
- 방법: 사이버 교육 환경안전교육 (홈페이지 개설 동영상교육 등), 자료/유인물, 외부 온라인상, 외부 강사, 전문교육기관외뢰 등
- 특별교육: 해당기관에서 자체 또는 외부의 전문기관에 의뢰하여 위탁교육 실시

■ 보험 가입 현황

- 전체 과업기간 동안 화재보험 가입

■ 추가 이행

- 연구실 안전표식 설치
- 실험실 안전보호장비 구비 등 보완
- 가스용기에 용기캡 의무부착
- 위험가스를 취급하는 실험실에서 가스 누출에 대비 센서 및 경보기 설치
- 실험실 유해물질농도 측정관리 및 환기
- 실험실 환경안전지침 작성
- 특수위험 실험실에 별도의 소화설비 설치 및 사고 예방에 주력

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번 호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	The growth of <i>Scenedesmus quadricauda</i> in RO concentrate and the impacts on refractory organic matter, <i>Escherichia coli</i> , and trace organic compounds	세종대학교 산학협력단	교신 저자	Water Research	7.051	2018.5.1	중복사사	SCI

※ 그 외 연구개발과제의 연구성과를 “제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도”에 구체적으로 명시함.

제12장. 참고 문헌

Foller and Bombard (1995) Processes for the production of mixtures of caustic soda and hydrogen peroxide via the reduction of oxygen.

Maeng et al. (2018) The growth of *Scenedesmus quadricauda* in RO concentrate and the impacts on refractory organic matter, *Escherichia coli*, and trace organic compounds.

Werner et al. (2015) Attenuation of trace organic compounds (TOrcs) in bioelectrochemical systems.

Kim et al. (2017) Characterization of organic precursors in DBP formation and AOC in urban surface water and their fate during managed aquifer recharge.

Maeng et al. (2013) Influences of solid retention time, nitrification and microbial activity on the attenuation of pharmaceuticals and estrogens in membrane bioreactors.

Afonso-Olivares et al. (2016) Estimation of kinetic parameters and UV doses necessary to remove twenty-three pharmaceuticals from pre-treated urban wastewater by UV/H₂O₂.

Metcalf and Eddy (2014) Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse.

Modin and Fukushi (2013) Production of high concentrations of H₂O₂ in a bioelectrochemical reactor fed with real municipal wastewater.

Sim et al. (2015) Characterization and optimization of cathodic conditions for H₂O₂ synthesis in microbial electrochemical cells.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.