

하폐수 처리시설에서의 수소 생산 기술 (2부): 광전기화학적 기술의 현황과 발전방향

Molecular Hydrogen Production from Wastewater Treatment Facilities (Part 2): Current Status and Direction for Future Development in Photoelectrochemical Methods

지난 호의 이슈레터에서는 하폐수 처리시설에 적용 가능한 수소 생산 기술로 생물학적 수소생산 기술의 현황과 전망에 대해 살펴보았으며, 이어지는 본 호에서는 생물학적 수소생산 기술에 비해 역사는 짧지만 에너지 전환효율의 잠재성이 높은 신 기술로 각광받고 있는 광전기화학적 수소 생산 기술과 관련된 내용을 소개하고, 생물학적 수소 생산과 광전기화학적 수소 생산의 조합을 통해 지속가능한 에너지/물 넥서스 수처리 기술로 제안하고자 한다.

광전기화학적 수처리 동시 수소생산 기술

광전기화학적 수전해 수소생산기술 개요

재생에너지는 인류가 필요로 하는 에너지 (15 테라와트 수준) 1만 배에 달하는 지속가능성에도 불구하고, 기상조건에 따른 간헐적 특성과 수급의 불일치로 인해 에너지저장 기술로서 수소 등 고에너지밀도를 가진 물질 형태로 전환이 필요하다. 전술한 바와 같이 현재 사용되는 수소의 약 96%를 생산하는 탄화수소 수증기 개질법은 가격 경쟁력이 우수한 반면 온실가

스 발생 문제와 재생에너지와의 조합이 어렵다는 한계가 있다. 전기화학적 수전해 기술은 태양, 풍력 등 재생에너지를 동력으로 수전해를 통한 수소에너지로의 저장이 가능하다. 전기화학적 수소 생산 기술은 알칼리(Alkaline), PEM(Polymer Electrolyte Membrane), 고체산화물(Solid Oxide) 수전해 등으로 구분할 수 있고, 이 중 가격효율성이 우수한 알칼리 전기분해가 널리 상용화되었다. 미국은 수소 관련 연구를 에너지부(DOE, Department of Energy)를 통해 수행하며 Hydrogen Fuel Initiative, FreedomCar and Fuel Program, 국제 수소연료 전지 파트너십 (IPHE) 제조기술 연구개발 등의 프로그램으로 수소 제조비용 절감을 위한 생물학적, 고온 태양열 및 광전기 화학 이용 수소생산기술을 NREL 등을 중심으로 수행 중이다. 유럽 연합은 Fuel Cell and Hydrogen(FCH) 주관의 JTI(Joint Technology Initiative) 프로그램에서 10억 유로 규모 (2008~2017년)로 수소제조/저장/유통/이용/표준화 전반의 연구를 수행하였고, SOLAR-H, H2FCsupergen 프로그램 등 광전기 화학기술과 바이오의 융합 연구가 진행 중이다. 독일은 National Hydrogen Organization 관할의 National Innovation Program

하에서 10년간 14억 유로를 투자하여 〈GermanHy〉, 〈ZEM-Ship〉, 〈Zero-Regio-Project〉, 〈HyChain〉 등 다수의 연구 프로젝트가 진행중이고, EIHP 유럽연합통합수소전략(European integrated hydrogen project)과 TES 운송에너지 전략(Transport energy strategy)를 주축으로 하는 H2Mobility 파트너십은 2023년까지 약 400개소의 스테이션을 건립할 (3억5천만 유로) 계획이다. 중국은 수소/연료전지 정부지원인인 〈국가 고도기술 연구개발〉, 〈국가 기초연구 프로그램〉의 5년 중 현재 1차로 에너지원의 11.4%를 비화석연료로 대체하고 CO₂ 방출을 감축하는 중이고, 일본은 〈신에너지 산업기술 종합개발기구(NEDO)〉, 〈2014년 제4차 에너지기본계획〉, 〈수소 연료전지 전략 로드맵〉 등 정책으로 WE-NET (World Energy Network) 프로젝트 등을 추진 중이다.

현재까지 연구 개발된 주요 수소제조 기술을 살펴볼 때, 널리 활용되는 수증기 개질법을 제외하면 전기화학적 수전해 방법이 에너지 전환효율 및 상용화 가능성 측면에서 유리하다. 미국 에너지부의 장기 계획에 있어(US DOE, 2015)에서 상용화를 위한 수소 제조 비용 기준은 \$2.3/kgH₂ 수준 (정제/이송 포함 \$4/kgH₂)이므로, 범용원소 기반 전극, 태양전지, 폐수 전해질로 제조 비용을 \$2/kgH₂ 이하로 낮출 경우 국제 경쟁력 확보가 가능하며, 2020년 기준 수전해 수소생산의 에너지 전환효율은 75%, 생산 가격은 2~2.3 \$/kgH₂ 까지 달성하는 것을 목표로 하였다 (표 1). 하지만 에너지 전환효율은 이미 이론적인 한계치에 접근한 바, 전극 등 시설비 및 전기 소모량 절감에 중점을 두고 있다. 현재 수전해 수소생산은 KOH (알

칼리 수전해), NaCl (Chlori-Alkali 수전해), 폴리머 (PEM 수전해), 금속 산화물 등을 전해질로 이용하여 고가의 전해질, 순수 공급을 위한 수처리 및 화학약품 주입에 시설 및 운전 비용이 지속적으로 소모된다. 미국 분산형 수전해 수소생산 비용은 3.9 \$/kgH₂로 전기 비용이 3.1 \$/kgH₂ (80%)를 차지하는 반면 (US DOE, 2015), 국내에서는 낮은 전기가격으로 알칼리 수전해 수소생산 비용의 약 37%를 시설비가 차지한다 (김봉진 외, 2011).

광전기화학적 수전해 수소생산기술 수준

전기화학적 수전해로 연구되는 알칼리 수전해는 에너지 전환 효율 및 전류 밀도 (발생량) 측면에서는 PEM 수전해 보다 불리하지만 (표 2) 운전 수명 및 가격 경쟁력이 유리하여 상용화되어 있다. 알칼리 수전해의 전류밀도는 2,000~4,000 A/m² 수준으로 알려져 있지만 실제 운전에서는 1,000~2,000 A/m² 범위에서 운전되고, 음극은 Pt 등이 코팅된 Ni, 양극은 Mn, W, Ru 등의 산화물이 코팅된 Ni나 Cu가 사용되며, 30% 내외 KOH 조건에서 운전수명은 10년 이하로 알려진다. Alkaline 수전해의 가격 경쟁력 제고를 위해서 전기활성을 유지하면서 Pt/Ru를 대체할 범용원소 기반 촉매 전극 및 운전수명 연장, 에너지 사용량 저감을 위한 연구 개발이 필요하다. 수전해 기술의 핵심인 산소발생 양극과 수소발생 음극에 대한 연구 결과 정립된 Volcano Plot에서 양극 촉매는 RuO₂와 IrO₂, 음극 촉매는 Pt, Pd, Rh 등 희귀금속 활성이 가장 높다. IrO₂/RuO₂ 기반의 양극에서 희귀금속의 용출을 최소화하기 위해 Ti, Ta,

표 1. 상용화된 수소 제조기술의 비용 분석 (US DOE, 2015)

기술 종류	2015 추정/목표 비용 (\$/kgH ₂)					2020 목표 비용	2015 에너지 전환효율%
	시설비	원료 (전기)	O&M	기타	총 비용		
천연가스 개질 (분산형)	0.4	1.3	0.2	0.2	2.1	2.1	74
Bio-에탄올 개질 (분산형)	0.7	5.1	0.1	0.1	5.9	2.3	70
바이오매스 가스화	0.6	1	0.2	0.3	2.1	2.0	46
수전해 (분산형)	0.5	3.1	0.2	0.1	3.9	2.3	72
수전해 (집중형)	0.5	2.3	0.2	0.1	3.2	2	73

Si 등을 혼합하는 Dimensionally Stable Anode(DSA) 제조 방법은 Chloro-alkali Process 및 PEM 수전해에서 상용화되어 있다. 범용원소 기반의 양/음극은 합성 및 평가 방법에 따라 그 과전압 전기활성 측매에서 과전압이 상이하게 보고되나 최근 다양한 금속산화물/화합물에 대한 표준화된 평가 결과에 의하면 전류밀도 10 mA/cm² 기준 양극과 음극의 과전압은 0.3 V, 0.1 V가 최고 수준이다 (McCroory et al., 2015).

광전기화학적 기술은 태양에너지를 가장 직접적으로 수소에너지의 형태로 저장할 수 있는 방법으로 널리 연구되고 있지만, 태양열화학 물분해, 광촉매(광전극 또는 슬러리) 물분해 및 광이용 미생물 수소생산 기술 등은 에너지 전환(Solar to Hydrogen, STH) 효율 및 가격 경쟁력이 현재까지 상용화 수준에 미치지 못하고 (표 3) 생산된 수소의 정제에 추가 비용이 소요된다. 광촉매(전극)를 활용한 광전기화학적(Photoelectrochemical, PEC) 수소제조방법은 미래 기술로서 NREL, EPFL, DTU, UT-Austin, 동경대 등에서 가장 활발히 연구 중이며 10%이상의 STH 효율 달성과 셀수명 연장, 수소 순도 상승 등 제반 기술이 개발될 경우 상업성을 갖는 것으로 평가된다. PEC 물

분해를 위한 금속산화물 및 화합물(비산화물)을 이용한 연구에서 조촉매 등을 활용한 복합 광촉매계의 최대 광전환 (STH) 효율은 12.4%로 보고되었으나, 실제 태양광 조사시 대형화된 시스템 효율은 최고 2-3% 이내로 평가된다.

그림 1에 나타난 것과 같이 다양한 종류의 광전기화학적 수소생산 기술 중 태양전지-수전해(PV-EC) 시스템이 가장 높은 효율을 보이지만, 지금까지 보고된 최대~30%의 STH 효율은 42 - 800 sun과 같이 집적된 태양광 조건에서 얻어진 값이며, 일반적인 태양광 조사(1 sun) 조건에서는 20%를 약간 상회하는 STH 값을 나타내고 있다.

태양전지(PV)가 추가적으로 연결된 시스템에서는 자체적으로 전위차를 걸어주는 역할을 하기 때문에 상대적으로 높은 STH 값을 가질 수 있게 되지만, 산소 발생 전극, 수소 발생 전극, 태양전지를 연결시키는 과정에서 시스템 구성이 복잡해질 수 밖에 없고 고가의 광흡수 재료를 사용하며, 운전 수명이 짧은 단점이 있다. 반면, 산화/환원 광전극을 연결한 PE-PE 시스템은 슬러리형 광촉매보다 높은 효율을 보이고, 생성되는 산소-수소가스 분리가 용이할 뿐 아니라, 구성이 단순하여 제

표 2. 알칼리, PEM 수전해의 기술 수준 (Carmo et al., 2013)

기술 종류	전류 밀도 A/cm ²	셀 전압 V	전력 밀도 mW/cm ²	전압 효율 %	스택 에너지 사용량 kWh/Nm ³	시스템 에너지 사용량 kWh/Nm ³	수소 발생량 Nm ³ /h	스택 수명 년	운전 온도 °C	운전 압력 bar
Alkaline 수전해	0.2	1.8	< 1	62	4.2	4.5	< 760	< 10	60	< 30
	~	~		~	~	~			~	
PEM 수전해	0.4	2.4	< 4.4	82	5.9	7.0	< 10	< 2	80	< 30
	0.6	1.8		67	4.2	4.5			50	
	~	~		~	~	~			~	
	2.0	2.2		82	5.6	7.5			80	

표 3. 태양광 이용 수소 제조기술의 비용 (US DOE, 2015)

기술 종류	비용 추정치/목표 (\$/kgH ₂)			STH 에너지 전환효율 (%)		
	2015	2020	최종	2015	2020	최종
태양열기반 열화학 물분해	14.8	3.7	2	10	20	26
광촉매 수전해 (광전극)	17.3	5.7	2.1	15	20	25
광촉매 수전해 (슬러리)	28.6	4.6	2.1	1	5	10
광이용 미생물 수소생산	NA	9.2	2	2	5	17



자세히보기

그림 1. 태양에너지를 활용한 물 분해 시스템의 Solar-to-Hydrogen(STH) 효율 비교 (a) PC, (b) PEC, (c) PV-EC 시스템 (Kim et al., 2019)

조 공정이 간소화 될 수 있으며, 저가의 광흡수 재료를 사용할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 낮은 STH 효율이 단점이다. 즉, 시스템의 구성, 광전극 재료의 선택, 표면 반응속도 향상을 통해 STH 효율이 향상될 수 있는 여지가 많다. 현 시점에서 태양에너지를 수소로 저장하는 방법은 태양전지와 전기화학적 수전해를 조합한 시스템이 현실적이며, 오스트리아 Johannes Kepler 대학 조사에 따르면 (Carmo et al., 2013) 세계 약 50여개 재생에너지 기반 수소 생산시설 중 90% 이상이 태양전지 알칼리 수전해 조합기술이다. 상기 태양전지 연계 수전해 방법의 이론적인 광전환 (STH)효율은 18%까지 예측된 바 있으나, 전력 손실을 고려한 실제 한계치는 2 - 6%로 보고되어 있다 (Gibson and Kelly, 2008).

광전기화학적 수처리 동시 수소생산 기술

광전기화학적 폐수전해기술은 고염도 특성을 갖는 폐수(전기 전도도: 10 mS/cm 내외)를 전해질로 사용하여 수처리와 동시에 수소를 생산할 수 있는 기술로 기존 알칼리 수전해 또는 Chloro-alkali 공정 대비 수처리 비용 분의 수소 생산비 절감이 가능하고 에너지-물 산업에 융합 적용 가능한 혁신 기술이라고 할 수 있다. 일례로 1 Nm³ H₂/hr를 생산하는 알칼리 수전해 기술은 평균 6 kWh의 에너지가 소모되는 한편 1 m³의

폐수 처리에 소모되는 평균 에너지는 약 320 Wh에 해당하므로 (IWA, 2015), 4 m³/hr의 폐수를 처리하는 1 Nm³ H₂/hr급 전해 시스템의 경우 전기 소비량의 약 20% 절감이 가능하다. 또한, 초순수 및 화학약품 전해질 대신 폐수를 활용함에 따른 추가적인 경제성 확보가 가능하다. 한편, 일반적인 기존 전기화학적 수전해는 다전자 물산화를 통한 산소생성반응을 수소발생반응과 연계하는데, 다전자 산화에 기인한 동역학 장벽(과전압)에 공정의 효율이 좌우되며 생성된 산소의 효용가치가 없고 오히려 불순물로서 생성연료의 품질을 저하하는 문제가 있었다. 반면 폐수전해기술은 고염도/고농도 유기 폐수 전해질 내에서 1~3개 전자전달을 통해 생성되는 활성산소종이 매개하는 유기물 또는 염소이온의 산화를 통해 전체공정의 열역학/동역학적 필요에너지 절감이 가능하다. 유기오염물의 직접산화 및 산화반응의 매개체로 단전자 전달반응에 의해 생성되는 수산화 라디칼 또는 유사 활성산소종을 활용할 경우 열역학적으로 비자발적 반응(Uphill reaction)인 산소생성반응에서 벗어나 폐수 중 유기오염물의 자발적 산화반응(Downhill reaction)을 활용하여 수소생산 공정의 과전압, 효율, 안정성, 및 경제성을 동시에 향상시켜 실용화에 유리할 수 있다. 또한, 고염도 특성을 갖는 폐수를 전해질로 사용할 경우 염소 이온의 산화로 발생하는 염소계 산화제의 균질계 반응에 의한 소독 등 수처리를

통한 부가 효과(에너지 소비량 절감)를 기대 가능하다. 염소이온의 산화반응은 산소발생반응에 비해 표준산화환원전위값이 높지만 2전자 산화에 기인한 낮은 과전압으로 인해 에너지 효율과 반응속도가 물 산화에 비해 높다. 따라서, 이러한 수처리 공정이 연계된 광전기화학적 수소 생산 공정을 통해 높은 효율의 전자전달을 통한 수소 생산 효율을 향상시키고 수처리를 통한 부가 효과(에너지 소비량 절감)를 기대 가능하다.

상기 기술한 광전기화학적 수처리 동시 수소생산 기술의 장 점에도 불구하고 현 시점에서의 기술개발 수준은 낮지만, 일부 적용사례를 찾아볼 수 있다. 2011년부터 현재까지 미국 캘리포니아 공과대학(Caltech)에서는 Bill&Melinda Gates 재단 후원으로 개발도상국 대상 지속가능한 환경-에너지 기술로 전기화학적 화장실 폐수/수소생산 시설을 개발하였고 차세대 기술로서 CNN, BBC 등 해외 주요 언론의 주목을 받은 바 있다. Solar toilet (공식 명칭: Self-Contained, PV-Powered Domestic Toilet and Wastewater Treatment System)의 개념은 그림 6에 도시한 바와 같다. 화장실에서 발생하는 대소변은 인라인 믹서를 통해 균질화되고 일정기간 정화조에 체류

되는데, 이는 유량 조정과 동시에 고분자 유기물의 혐기성 소화를 통해 전처리하기 위함이다. 정화조 유출수는 폐수전해공정을 거치며 유기물, 총질소 등의 제거와 동시에 소독이 이루어지고 처리수는 여과를 거쳐 화장실 세척용수로 재이용된다. 필요에 따라서는 잉여의 처리수는 세척용수 또는 조경용수로 활용될 수 있다. 폐수전해공정은 높은 농도의 염소이온을 함유한 폐수의 전기분해 과정에서 발생하는 활성염소종을 활용해 오염물의 산화와 소독의 목적과 동시에 수소가스 생산의 목적을 달성할 수 있다. 또한, 폐수전해공정은 태양전지와 연결되어 외부 전력의 공급 없이 운전이 가능하며, 수전해를 통해 수소로 저장된 재생에너지는 필요에 따라 수소연료전지 등을 통해 전기에너지로 재생될 수 있다. 운전 조건 및 적용지역에 따라 상이하나 하루 100 Flush의 화장실 기준으로 약 0.3 kW의 전력이 소비되는 것으로 알려져 있다. 개발 기술은 현재 인도, 중국, 남아공에 시작품이 운전 중이며 중국 Yixinig 지역에 합작 벤처기업을 설립하여 대규모 생산 시설을 갖춘 상태로 알려져 있다.

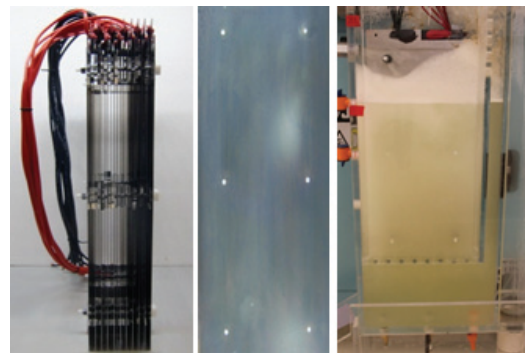
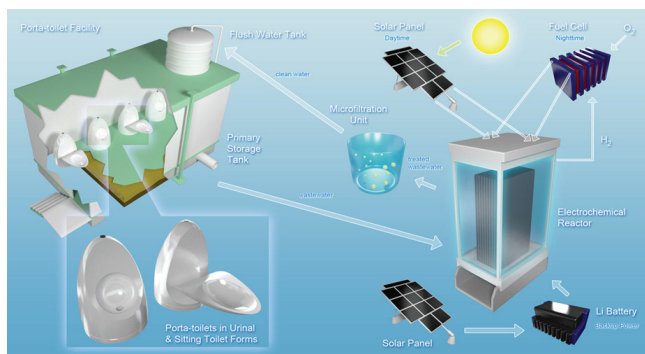


그림 2. Solar toilet 개념도 및 적용사례 (출처: Bill & Melinda Gates Foundation)

[자세히보기](#)

전망 및 제언

향후 산업분야 및 청정/재생 에너지 분야에서의 수소시장은 수소 스테이션, 수소 환원 제철 공정, 수소 자동차/버스, 수소 타운 등의 잠재적 수요처로 인해 연간 5% 이상의 성장이 예상된다. 국내 유통되는 수소의 생산 공정별 비율을 볼 때 Chloro-alkali 공정과 함께, 나프타 분해, 프로판 탈수소, 천연가스/메탄을 개질 등이 나머지를 차지한다. 이러한 상황에서 수소생산기술의 다변화는 당연한 기술적 요구이며, 상기 기술한 다양한 장점들을 고려할 때 생물학적 또는 광전기화학적 수처리 동시 수소생산기술의 상용화를 위한 연구개발은 필수적이다.

전기화학 기반 수전해를 응용한 수처리 기술은 전기산화, 전기응집, 전기흡착 등의 형태로 난분해성 오염물질을 포함한 악성폐수의 처리에 활용되어 왔으나, 수처리 동시 수소 생산의 목적이나 태양전지와 연동된 운전 방식에 대한 연구는 미미한 실정이다. 심지어 지금까지는 전기화학적 수처리 기술에서 필연적으로 발생하는 수소는 공정의 안전성을 위협하는 요소로 인식되어 온 바, 향후 발상의 전환을 통한 접근이 필요하다. 수전해 기술 핵심인 산소발생 양극과 수소발생 음극에 대한 연구 결과 고가 희귀금속의 대안으로 범용원소인 Ni, Fe, Mn, Co 등의 금속 및 그 화합물을 단독 또는 합금 촉매로 활용하는 최근 연구 동향에서 니켈-철 산화물 (NiFeO_2)과 니켈-몰리브덴 합금 (Ni-Mo Alloy)이 각각 산소와 수소발생에 있어 백금족 촉매와 유사한 활성을 가지는 것으로 보고되었다. 따라서, Ni, Fe, Co, Mn의 산화물은 장기 운전시 안정성만 확보된다면 상용화 가능한 활성을 보이는 양극 촉매이며, 전이금속의 비산화물계 화합물은 전자 전달을 위한 집전체와 연계한다면 뛰어난 음극 성능을 보일 것으로 예상된다.

궁극적으로는 지난 호에서 기술한 생물학적 방법과 광전기화학적 방법을 결합한 융합적 수처리 동시 수소생산 기술의 개발이 필요하다. 생물학적 기술과 광전기화학적 기술이 융합된 대표적인 예는 미생물 전기화학기술이라고 할 수 있다. 외부와 직접 전자를 주고받을 수 있는 전기 활성 미생물이 소화슬러지

를 포함한 여러 mixed-culture에 다수 존재한다는 사실이 알려지면서 전극과 미생물간의 상호작용이 활발히 연구되고 있으며 이를 미생물 전기화학이라고 통칭한다. 미생물 전기화학의 원리를 이용하여 미량의 전기에너지 투입 또는 전도성 물질 첨가 등을 통해 반응의 종류, 방향, 정도를 조절할 수 있다. 따라서, 미생물 전기화학 기술을 활용하는 경우 바이오수소의 생산뿐만 아니라 적용 방법에 따라 혐기성 소화 공정의 메탄 발생량 증대와 공정의 안정성을 향상시킬 수 있다. 따라서, 미생물 전기화학 기술을 활용하는 경우 바이오수소의 생산뿐만 아니라 적용 방법에 따라 혐기성 소화 공정의 메탄 발생량 증대와 공정의 안정성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 특히 미생물 전기화학의 일부인 미생물 전해전지(microbial electrolysis, MEC)는 화학양론적 수소 수율인 $12 \text{ mol H}_2/\text{C}_6$ 을 달성할 수 있는 잠재력이 유망한 기술이며, 아직 TRL 2단계 수준의 초기 단계이지만 원천 기술 확보 중심으로 연구가 활발히 진행 중이다.

한편, 혐기성 소화에 있어서 환경적으로는 하수처리장 부하로 작용하는 혐기성소화 유출수(반류수)의 2차 처리가 필요하고 상대적으로 긴 체류시간이 필요한 생물학적 수처리 방법에 대한 대안이 필요하다. 에너지적인 측면에서도 바이오가스의 고부가가치화를 위한 수소비율의 증대 및 생산속도의 증가가 필요하다. 한편, 광전기화학적 수소생산 기술의 경우 염소계 산화제 등과 반응성이 낮은 탄화수소 등에 대한 전처리가 필요하다는 점, 생성된 수소의 순도가 60% 내외로 질소, 이산화탄소 등 불순물에 대한 고려가 필요하다는 점, 에너지 전환효율의 추가적인 증진이 필요하다는 점 등의 환경적, 에너지적 한계점을 가지고 있다. 이러한 측면에서, 혐기성 소화와 광전기화학적 폐수전해 공정을 조합할 경우에는 1) 혐기성 소화 유출수에 대한 전기화학적 2차처리가 가능, 2) 혐기성 전처리를 통한 전기화학 수처리 효율 증대, 3) 바이오메스와 태양에너지를 동시에 에너지원으로 활용 가능, 4) 혐기성소화에서 생산되는 메탄과 폐수전해공정에서 생성된 수소의 혼합연료 생산을 통한 부가가치의 증대 등의 시너지 효과가 달성 가능할 것으로 예상된다. 특히, 고분자 유기물(단백질, 탄수화물 등)이 혐기성 소

Anaerobic Digestion + Wastewater Electrolysis Cell

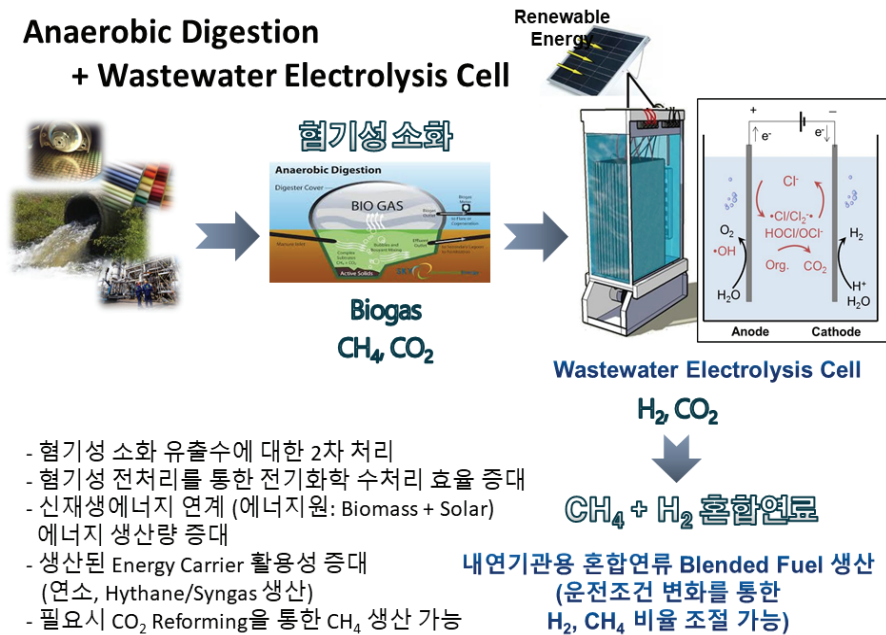


그림 3. 혐기성소화와 광전기화학적 폐수전해공정을 조합 개념도

[자세히보기](#)

화 전처리를 통해 저분자 물질로 분해될 경우 폐수전해공정에서 생성되는 활성염소종과의 반응성이 증가하여 화학적 산소요구량 저감 및 수처리 에너지 효율이 증진되는 것이 보고된 바 있다. 또한 H₂와 CH₄ 혼합물은 생산/보관/유통 및 내연기관 연소에 있어 효율적이므로 단독 연료보다 높은 부가 가치를 제공할 수 있는 것으로 알려져 있다. 최근 분뇨/축산 폐수, 음식물 쓰레기, 매립장 침출수 등 악성 폐수에 대한 사회적 비용이 증가하는 바, 상기 제안하는 융합 기술은 고유기폐수의 정화와 함께 생산된 수소에너지를 활용한 수소 충전 스테이션 구축의 목적으로 활용될 수 있다.

생물학적 기술과 광전기화학적 기술을 조합한 수처리 동시 수소생산 기술 개발을 통해 무한한 태양광 등 재생에너지와 물을 청정한 에너지 매체인 수소 에너지원으로 전환하는 지속가능한 에너지공급 신규 기술을 확립할 수 있다. 환경적으로는 고농도 난분해성 유기물 및 영양염류가 함유된 매립장 침출수, 음식물 쓰레기 반류수, 축산폐수 등 기존의 환경 기술로 대응이 어려운 수처리 관련 환경 현안 문제 해결 기술로 활용될 수 있으며 에너지적으로는 기존 수전해 기술의 생산/설치/운전 단가를 낮추고 운전수명을 증진시켜 국내 에너지시스템의 혁신과

에너지산업에 적용되는 수전해 기술의 가격 경쟁력 향상을 기대할 수 있다. 궁극적으로 태양에너지를 이용한 분산형 수소 스테이션 기반 수소 공급기술을 통해 수소경제 사회로의 진입을 촉진하고, 에너지/물 넥서스 기술로서 환경비용의 저감 효과 및 국민에게 안전한 물 공급 등 청정한 생활환경 구현에 기여하기 위한 지속적인 기술 개발이 필요하다.

참고문헌

- 김봉진, 김종욱, 고현민 (2011) 국내 저온수전해 수소생산의 경제성 평가, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, 22권 4호, 559-567.
- Charles C. L. McCrory, Suho Jung, Ivonne M. Ferrer, Shawn M. Chatman, Jonas C. Peters, and Thomas F. Jaramillo (2015) Benchmarking Hydrogen Evolving Reaction and Oxygen Evolving Reaction Electrocatalysts for Solar Water Splitting Devices, Journal of the American Chemical Society, 137, 13, 4347-4357.
- Jin Hyun Kim, Dharmesh Hansora, Pankaj Sharma, Ji-Wook Jang, Jae Sung Lee (2019) Toward practical solar hydrogen production - an artificial photosynthetic leaf-to-farm challenge, Chemical Society Reviews, 48, 1908-1971.

Marcelo Carmo, David L. Fritz, Jurgen Mergel, Detlef Stolten (2013) A comprehensive review on PEM water electrolysis, International Journal of Hydrogen Energy, 38(12), 4901-4934.

Thomas L. Gibson, Nelson A. Kelly (2008) Optimization of solar powered hydrogen production using photovoltaic

electrolysis devices, International Journal of Hydrogen Energy, 33(21), 5931-5940.

US DOE (2014), The Water-Energy Nexus: Challenges and Opportunities, DOE/ESPA-2002.

US DOE (2015) Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan.

■ 집필진 소개(가나다 순)



김상현 교수는 현재 연세대학교 건설환경공학과에 부교수로 재직 중이며 주요 연구분야는 생물학적 하폐수/폐기물 처리와 바이오수소 생산이다. 현재까지 환경분야 국제저명학술지에 170편의 논문을 게재하였으며, 한국과학기술한림원 차세대회원, Bioresource Technology Associate Editor, 대한환경공학회 국문지 부편집위원장, 유기성자원학회 총무이사 등을 역임하고 있다. 수소 관련으로는 현재 3개의 연구개발사업을 연구책임자로 수행 중이다.



김이중 교수는 현재 홍익대학교 건설환경공학과 조교수로 재직 중이며 주요 연구분야는 수처리 및 폐기물 처리시 자원화와 에너지 활용, 입자성 물질의 거품 흡착, 이산화탄소 하이드레이트의 생성 및 활용 등이다. 현재까지 국제저명학술지 논문 18편을 게재하였으며, 한국물환경학회 통합미래위원회 및 편집위원회 위원, 대한상하수도학회 교육정책위원회 위원, 한국지하수토양환경학회 교육연구위원회 위원 등을 역임하고 있다.



명재욱 교수는 현재 KAIST 건설및환경공학과에 조교수로 재직 중이며 주요 연구 분야는 유기성 폐기물 자원화 기술, 에너지 중립형 하·폐수 처리 기술, 생분해성 바이오플라스틱 제조 기술, 폐플라스틱 에너지화 기술 개발 등이다. 최근 5년간 총 11편(10편에서 교신저자 혹은 제1저자)의 SCI 논문(평균 IF=7.518)을 출판하였으며, 한국물환경학회-대한상하수도학회 통합미래위원회 위원, 대한환경공학회 학술위원회 위원, 한국폐기물자원순환학회 편집위원회 위원 등을 역임하고 있다.



조강우 교수는 현재 포항공과대학교 환경공학부에 조교수로 재직 중이며 주요 연구분야는 환경전기화학을 이용한 수처리 및 에너지 회수 공정, 그리고 이를 위한 전기화학촉매 개발 등이다. 현재까지 ACS Energy Lett., Appl. Catal. B: Environ., Water Res., Chem. Mater., ES&T 등 환경-에너지 분야 최상위 저널 20편을 포함해 46편의 국제학술지 논문을 게재하였다. 현재 ACS ES&T Engineering Early Career Board 위원, Membrane and Water Treatment 편집위원, 대한상하수도학회 편집위원 등을 역임하고 있다.

한국물환경학회-대한상하수도학회 통합 미래위원회

위원장 | 이재우, 최용주

위 원 | 김상현, 김영진, 김이중, 김형일, 명재욱, 박새롬, 박성직, 박제량, 박주영, 배성준, 배효관, 부찬희, 손아정, 윤석환, 이태권, 정석희, 정성필, 조강우, 조경화, 최정권

Water4FutureCity 2021년 3호

한국물환경학회 서울특별시 종로구 삼봉로 81 두산위브 파빌리온 1137호
Tel. 02-389-4250 | Fax. 02-385-3702 | E-mail. ksw@kswe.org

대한상하수도학회 서울특별시 강남구 광평로 280 로즈데일빌딩 1323호
Tel. 02-507-1170 | Fax. 02-502-1170 | E-mail. ksw@ksww.or.kr

※ 본 이슈레터는 2019년 1호부터 한국물환경학회와 대한상하수도학회가 공동으로 운영하는 통합 미래위원회에서 발간합니다.