

하폐수 처리시설에서의 수소 생산 기술 (1부): 생물학적 기술의 현황과 발전방향

Molecular Hydrogen Production from Wastewater Treatment Facilities (Part 1): Current Status and Direction for Future Development in Biological Methods

수소에너지: 개관

수소연료는 연소 시 이산화탄소를 배출시키지 않고 순수한 물만 발생시키기 때문에 온실가스의 주범인 화석연료의 사용을 대체할 수 있는 청정에너지이며, 열량(122 kJ/g)이 기존연료(hydrocarbon fuel)보다 약 2.75배 높아 미래의 연료, 즉 에너지 저장 및 전달체로 부상하고 있다. 국내의 수소 생산량은 2015년 기준 총 190만톤(정유공정 74.9%, 납사분해 12.9%, 천연가스개질 6.4%)이며, 이중 대다수는 정유 등 생산 공정에 재투입되고, 26만톤 가량이 화학 공정 원료로서 사용되고 있다. 정부는 수소경제 활성화 로드맵(19.01.17)을 통해 2040년

까지 연간 526만톤의 수소를 생산할 것이며, 초기에는 부생수소 및 추출수소를 초기 수소경제 이행의 공급원으로 사용하며, 장기적으로는 생산과정에서 이산화탄소를 발생시키지 않는 그린수소로 대체하겠다는 계획을 발표하였다. 수소경제는 우리나라만의 정책이 아니라 전세계적인 흐름이다. <그림 1>에 도시한 바와 같이 생산방식에 따라 수소연료는 현재 그레이, 블루, 그린 수소로 구분하고 있고, 온실가스(CO₂) 생산을 줄이는 탄소중립의 관점에서 궁극적으로는 재생에너지를 활용한 그린수소로의 전환이 필요하다.

현재 전 세계적으로 90% 이상의 수소는 화석연료를 이용한 수증기 개질법(부생수소 생산) 및 액화천연가스 정제과정에서



1) CCUS: Carbon Capture, Utilization & Storage

그림 1. 생산방식에 따른 수소연료의 구분 (출처: SK E&S)

얻는 방법(추출수소 생산)에 의해서 생산되고 있다. 이 방법으로 생산되는 수소는 생산 반응에서 다량의 온실가스를 배출할 뿐 아니라 고온·고압의 상태를 유지해야 되는 전형적인 그레이 수소이다. 화석연료 중 가장 온실가스 발생량이 낮은 메탄의 경우, 1 kg 당 9.3 kg의 CO₂를 발생하는 것으로 알려져 있다. 그린 수소를 구현할 수 있는 대표적인 방법으로 제안되는 것은 재생에너지로 생산된 전기를 이용해 물을 분해하는 수전해이다. 물에 전류를 가하여 양극에서 산소, 음극에서 수소를 발생시키는 수전해는 대규모 수소 생산 기술 중 가장 상용화에 가까운 기술로, 각국의 탄소중립 정책 추진으로 인해 재생에너지가 전력 생산의 대부분을 차지한다는 가정 하에 그린 수소를 생산할 수 있는 좋은 방안이다. 그러나 현재 기술로는 수소생산 가격이 화석연료를 이용한 수소 생산 비용보다 3배 이상 비싸고, 전기의 상당량이 화석연료로 만들어지기 때문에 현재 모든 국가에서 수전해는 천연가스 개질보다 온실가스 발생량이 높으며, 재생에너지 전기 생산비율이 40%인 경우에도 탄소배출량이 13 kg CO₂/kg H₂에 달한다. 이에 비해, 전기가 대부분 재생에너지로 생산될 2050년 Energy mix 기준으로는 수전해 수소 생산의 탄소 배출량이 3 kg CO₂/kg H₂ 수준으로

예측된 바 있다.

국제재생에너지기구(International Renewable Energy Agency, IRENA)에서는 재생에너지를 이용한 수전해와 함께 바이오매스를 이용해서 생산되는 수소, 즉 바이오수소를 그린수소로 규정하고 있다. 일반적으로 바이오매스의 산화과정에서 발생하는 CO₂(biogenic CO₂)는 온실가스가 아니므로, 바이오수소는 화석연료는 물론 수전해에 비해 낮은 온실가스 발생량을 보일 수 있는 잠재력이 있다. 바이오매스 부존량의 한계로 인해 미래 수소 수요를 모두 바이오매스로부터 생산하는 것은 무리가 있겠지만, 하폐수, 폐기물, 미활용 바이오매스 등의 친환경적인 자원화 측면에서 바이오수소 생산이 경제적, 환경적 의미를 가질 수 있다.

바이오매스는 화석연료와 유사하게 열화학적 반응인 열분해(pyrolysis)와 개질(reforming)을 통해 수소로 전환될 수 있다. 그러나 바이오매스의 발열량이 낮거나 수분을 함유하는 경우 열화학적 수소 생산 반응은 흡열 반응이 되어 외부에너지의 투입을 필요로 하고 효율적인 공정 운영이 어렵게 된다. 폐기물 중 폐플라스틱, 폐비닐 등은 열화학적 수소 전환이 유망하고, 또 환경적으로 의미가 있지만, 이들은 석유 유래 폐기물로 국제 기준으로는 재생에너지로 인정되지 않으며, 그린 수소도



그림 2. 친환경적 바이오수소 생산의 필요성

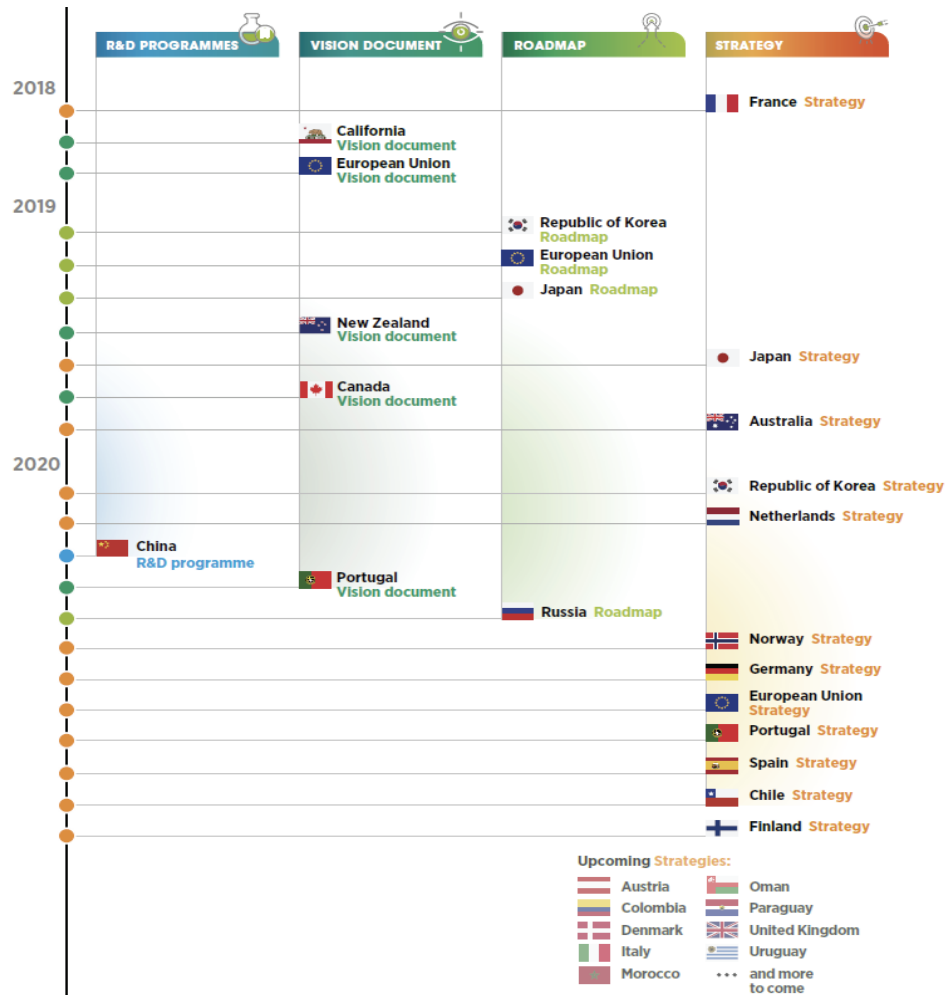


그림 3. 각국의 최근 수소 관련 정책 및 전략

(IRENA (2020), Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 °C Climate Goal, Abu Dhabi)

될 수 없다. 반면 생물학적 수소생산방법은 이산화탄소 발생 없이 수소를 생산할 수 있고, 고압이나 고온을 요구하지 않는다. 다만, 생산성과 수율, 그리고 공정의 신뢰도가 물리·화학적 방법에 비해 낮아, 그린수소에 대한 정책적 지원이 없었던 최근까지는 상용화되지 못하였다. 생물학적 수소 생산 방법은 크게 빛에너지를 이용하는 방법(광분해, 광발효)과 빛에너지를 사용하지 않는 혐기성 수소발효에 의한 방법으로 나뉘지는데, 광분해에 의한 방법은 물과 빛만을 이용해 수소를 생산할 수 있는 인류 궁극의 에너지 생산 방법이지만, 수소 생산성이 매우 느릴 뿐만 아니라, 수소생산 시 부산물로 생성되는 산소가 지속적인 반응을 방해한다는 기술적인 문제에 봉착하고 있다. 유기물과 빛을 각각 탄소원과 에너지원으로 이용하는 광

발효는 광분해 보다는 실현 가능성이 높지만, 역시 수소생산속도가 느리며 낮은 태양에너지 전환율 때문에 넓은 면적과 큰 부피의 반응기를 필요하는 점과 높은 활성화 에너지를 요구한다는 문제 때문에 실용화에는 보다 많은 시간이 소요될 것으로 예상되고 있다. 혐기성 수소발효 기술은 유기성폐기물, 농업부산물, 해조류 등 다양한 바이오매스에 폭넓게 적용 가능하고, 동일한 유입 기질을 사용하는 바이오가스화에 비해 월등히 빠

표 1. 생물학적 수소생산기술 비교

생물학적 수소 생산 기술	수소 생산성 ($\text{m}^3/\text{m}^3/\text{d}$)
Photolysis	< 0.1
Light fermentation	< 1
Dark fermentation	> 65

표 2. 수소 생산 기술 별 단가

분류	공정	에너지원	단가 (\$/kg)
Fossil fuel based H ₂	Coal gasification	Coal	0.8-1.3
	Steam methane reforming	Natural gas	1.8-3.0
Electrolysis using nuclear electricity	Nuclear energy and electrolysis	Nuclear	4.2-7.0
Electrolysis using renewable electricity	Wind turbines and electrolysis	Wind	5.9-6.0
	Photovoltaics and electrolysis	Solar	12-55
Biohydrogen	Biomass Pyrolysis	Biomass, External heat	4.3
	Biogas reforming	Biomass	4.8-4.9
	Photo fermentation	Solar, Biomass	13.6
	Dark fermentation	Biomass	2.6

른 생산속도를 가지고 있다. 그러나 유기물이 가지고 있는 에너지의 상당량이 수소가 아닌 유기산으로 잔류하므로 수소 수율이 4 mol H₂/mol C₆로 제한된다는 단점이 있다. 최근에는 외부 전극과 전자를 직접 교환할 수 있는 전기활성미생물을 활용하는 미생물 전기화학을 통해 수소 발효의 한계 수율을 극복하는 연구도 활발히 진행되고 있다.

또 다른 바이오수소 생산 경로는 상용화된 혐기성 소화를 통해 바이오매스를 바이오가스로 전환하고, 바이오가스 중 메탄을 수소로 개질하는 것이다. 이 경로는 상기한 혐기성 수소발효에 비해 기술 성숙도가 높다. 다만 바이오가스 개질 반응이 흡열 반응이어서 바이오가스 중 일부를 연소하여 에너지원으로 사용해야 하고 개질 전후단의 정제와 고질화(upgrading)에 많은 에너지와 비용이 들기 때문에, 바이오가스화 및 개질/정제/고질화 기술의 개선과 함께 타 기술과의 융합이 필요하다. 현재까지 보고된 수소생산 기술 별 단가를 <표 2>에 정리하였다.

하폐수처리시설에서의 수소생산 필요성

국제물기구(IWA)는 상수 공급과 하폐수처리 과정에서 발생하는 온실가스량이 전체 발생량의 3-7%에 해당한다고 보고했다. 또한, 미국 에너지부(US DOE)는 미국 전체 에너지 사용량의 4%를 상수 공급과 하폐수 처리에 사용하며, 상수 공급과 하폐수 처리의 에너지 사용량은 유사한 것으로 보고했다. 우리나라에서 하폐수처리에 사용된 전력량은 2019년 기준 3.31 TWh로 집계되었다. 이 수치는 해당년도 국내 전체 전력 사용량 526.15

TWh의 0.63%에 해당되는데, 해외에 비해 낮은 비율은 국내 하수처리시설이 전력을 적게 소모해서가 아니라 우리나라가 산업부에서 전력을 다량 사용하는 국가이기 때문이다. 실제로 국내 하수처리시설의 BOD₅ 1 kg 당 평균 전력 사용량은 2.7 kWh로 COD_{Cr} 1 kg 당 전력 사용량이 0.4 kWh인 유럽의 POWERSTEP 사례 등과 비교했을 때 상당히 과다한 편이다.

하폐수 처리의 목적을 방류수 수질 달성 뿐 아니라 탄소중립에 대한 기여로 설정하는 것이 선진국을 중심으로 세계적인 추세가 되고 있으며, 이를 구현하기 위해 가장 우선적으로 추진해야 하는 사항은 현재의 에너지 다소비형 처리를 에너지 회수형 처리로 전환하는 것이다. 국내에서 하수처리장 내 태양광과 풍력 확대 보급을 중심으로 수행되어 온 에너지 자립화는 하수처리장의 유효 부지를 활용한다는 점에서 의미가 있지만, 하폐수 내에 포함된 유기물 화합물의 화학에너지를 무해한 형태로 전환하는 과정(처리)에서 유용한 에너지를 회수하고 처리에 사용되는 에너지를 절감하여 탄소중립에 기여하는 에너지 자립화의 원래 목적과는 다소 거리가 있다. 따라서 하폐수가 함유하고 있는 에너지를 회수하여 탄소 중립형, 더 나아가 탄소 감축형 하폐수처리를 달성하고, 더 나아가 수소를 비롯한 고부가가치 산물을 생산하는 노력이 성공한다면 하폐수처리시설의 기능과 목적을 재정립할 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 음식물류폐기물, 가축분뇨, 하수찌꺼기로 대표되는 유기성폐기물은 해양투기 금지와 기존 사료화·퇴비화 중심 자원화 생산물의 수요 부족 및 비점오염원으로서의 작용으로 인해, 최근 혐기성 소화로 처리의 방향이 바뀌고 있다. 환경부에

표 3. 국내 바이오수소 생산 잠재량

바이오매스	바이오매스 발생량 (ton/yr)	투입가능 분율 (%)	VS 함량 (ton VS/ton wet weight)	ton H ₂ /yr
음식물류폐기물	5,255,963	0.80	0.2000	37,543
하수슬러지	2,793,673	0.5	0.15	9,354
가축분뇨	64,398,410	0.2	0.1	57,499
농업부산물	6,469,333	0.25	0.8	57,761.9
임업부산물	48,679,977	0.05	0.8	86,929
해조류	1,749,891	0.2	0.08	1,250
계	129,347,247	—	—	250,335

서는 음식물류쓰레기, 가축분뇨, 하수찌꺼기를 일정량 이상 배출하는 지방자치단체와 대규모 배출자·처리자에게 바이오가스 등 신재생에너지 생산량 목표를 설정·관리할 계획을 추진하고 있으며, 유기성폐기물별 각각의 처리장보다는 하폐수처리장 등 기존 시설을 활용한 병합 혐기성 소화를 통해 바이오가스 수율을 높이고 혐기성 소화 유출수의 관리를 원활하게 할 것을 장려하고 있다. 또한, 환경부는 기존의 하수처리장 에너지 자립화 사업을 보다 강화하여 환경기초시설에 대한 재생에너지 시설 설치를 지원하고 유기성폐자원(음식물, 가축분뇨 등)을 활용한 바이오가스 생산 확대 추진 계획을 2021년에 발표했다. 전국에 산재한 하폐수처리장, 특히 국내 하수 처리 부하의 70%를 차지하는 유입 하수처리용량 10 만톤/일 이상의 56개소 중대형하수처리장은 일일 1톤 이상의 수소를 생산할 수 있는 지역 분산형 바이오수소 생산 시설로 활용될 수 있는 잠재력이 크다. 하수찌꺼기, 음식물류폐기물, 가축분뇨, 그리고 미활용 바이오매스의 발생량, 투입가능분율 등으로부터 바이오수소 생산 잠재량을 산출하여 <표 3>에 도시하였다. 국내 바이오수소 생산 잠재량인 250,335 ton H₂/yr은 수소경제 활성화 로드맵 상 2040년 목표치의 4.8%에 해당한다.

생물학적 수처리 동시 수소생산 기술

바이오가스 생산 후 개질

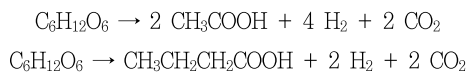
혐기성소화는 다양한 고분자 형태의 유기성폐자원을 기질로 활용할 수 있고 생물학적 공정임에도 비열균 상태에서 운전이

가능하며, 생산되는 에너지가 가스 형태로 공정에서 쉽게 분리될 수 있다는 장점으로 인해 세계적으로 유기성폐자원 에너지화의 핵심 기술로 자리 잡았다. 전술한 바와 같이 바이오가스는 약 60%의 메탄, 40%의 이산화탄소 및 미량 불순물로 구성되며, 미량 불순물 제거 후 건식 개질(dry reforming) 또는 이산화탄소를 제거하는 업그레이드 후 수증기 개질(steam reforming)를 통해 정제하여 고순도 수소를 생산할 수 있다. 또한, 미생물 전기화학과 유기물 직접발효 기술 등을 바이오가스와 결합하여 수소 수율을 향상시킬 수 있다. 그러나 국내에서 바이오가스화의 설계와 운전에 사용되는 인자는 유기물 부하와 수리학적 체류시간이 사실상 전부이며, 나머지는 경험과 관행에 의존하고 있어, 다수의 국내 바이오가스화 시설의 성능(유기물 제거율, 메탄 수율)과 처리 안전성이 해외에 비해 낮은 상황이 크게 개선되지 못할 뿐만 아니라 동일 규모의 경험에 의존하여 설계 및 운영되고 있다. 환경현안인 유기성폐기물의 처리 및 에너지화를 위해 복수의 실증 연구가 진행되고 우수한 처리 성능이 보고되었으나, 기존 및 신규 바이오가스화 시설의 설계와 운영이 활용되는 경우가 제한적이다. 특히 기존 방법으로는 미생물과 유기성고형물을 구분하지 못해 미생물 체류시간 등의 설계 개념이 없으며(수리학적 체류시간 & 유기물 부하 적용) 고형물 농도에 따른 교반방법과 소화조의 안정성을 평가하는 휘발성지방산과 알칼리도의 경우 실시간 모니터링이 가능하지 않아 안정적인 운전에 필요한 설계·운전 인자들이 제시되지 못할 뿐만 아니라 향후 CPS(Cyber Physical System) 도입 시에도 장애요소로 작용하고 있다.

혐기성 수소발효

혐기성 수소발효(anaerobic hydrogen fermentation) 또는 암발효 수소생산(dark fermentative hydrogen production)은 혐기성소화와 마찬가지로 비멸균 상태에서 혼합 균주를 통해 구현될 수 있다. 물론 특정 균주에 의한 반응도 가능하지만, 생물학적 수처리에 적용되기에는 혼합 균주가 유리하다. 혼합 균주를 이용한 혐기성 수소발효 시 가장 흔히 발견되는 수소생성균은 Clostridiales 목(order)에 속하는 *Clostridium butyricum* 등이다. 이들 수소 생성 미생물들은 흔히 혐기성 혼합 균주 내에서 가수분해를 담당하며 포도당 뿐 아니라 다양한 육탄당/오탄당과 녹말, 헤미셀룰로오스, 셀룰로오스를 기질로 활용할 수 있다.

수소를 생산하는 반응은 주로 다음의 두 경로이며, 대부분의 경우 부티르산(butyrate, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$)경로가 아세트산(acetate, CH_3COOH) 보다 우세하다. 혐기성 수소발효의 수소 수율을 증대하기 위해서는 아세트산 경로의 비중을 높일 수 있는 전략이 필요하다.



혐기성 수소 발효 시 수소 생산 경로는 같은 기질을 두고 수소 생성 미생물 내부의 타 경로 또는 타 미생물의 반응과 경쟁하는 경우가 많다. 또한 생성된 수소가 다른 반응에 의해 소모되기도 한다. 혐기성 수소 발효의 효율 저하 시 흔하게 나타나는 수소소모 반응은 다음과 같다.

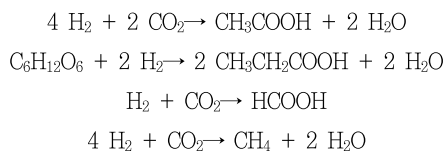
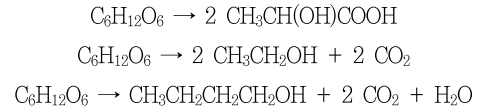


표 4. 혐기성 암발효와 타 바이오에너지 생산 비교

Biofuels	Production rate (m^3 biofuel/ m^3/d)	Energy density (MJ/m^3)	Energy efficiency (%)	Energy productivity ($\text{MJ}/\text{m}^3/\text{d}$)
Hydrogen	65	10.8	50	351
Methane	2	35.8	30	21
Ethanol (2 nd)	0.064	21,145	25	338

또한 혐기성 수소 발효의 효율 저하 시 흔하게 나타나는 비 수소 생성 경쟁 반응은 다음과 같다.



수소 소모 반응과 비 수소 생성 경쟁 반응을 억제하고 수소 생산 반응, 그 중에서도 아세트산 경로 반응을 더 증대시키기 위해 다양한 연구가 수행되어 왔다. 통상적으로 식종균으로는 열처리된 슬러지를 사용하고 연속 운전 시 기질 농도는 탄수화물 기준 10–30 g/L, 운전 pH는 5.0–6.0, 수리학적체류시간은 1.5–24 시간으로 운전되는 것이 일반적이다. 이러한 조건에서 수소 소모 및 경쟁 반응들은 대체로 억제되거나 수소를 소모하면서 아세트산을 생성하는 반응인 homoacetogenesis는 수소 생성과 동반되는 경우가 종종 있다. 더욱이 혐기성 수소 생성 조건에서 homoacetogenesis를 발현하는 미생물이나 제어 방법에 대해서도 알려진 바가 많지 않아 최근 이를 규명하기 위한 연구가 집중되고 있다. <표 4>는 혐기성 수소발효가 유기성폐기물을 포함하는 바이오매스의 생물학적 에너지화 기술 중 에너지 생산성이 탁월한 방법임을 보여준다.

전망 및 제언

혐기성 소화를 통한 바이오가스 생산 및 생물학적 수소생산 기술은 범용 설계 요소의 도출 및 적용, 운영 Data 축적 및 활용을 통한 최적 운전 기법의 발전과 공유 등이 바이오가스화 확대와 더 나아가 하폐수처리시설에서의 바이오수소 생산 실현을 위해 선행될 필요가 있다. 또한, 혐기성 수소 발효와의 결합을 통해 수소 수율과 경제성을 높이고 유기성폐기물을 유기산

등 생분해도가 높아진 형태로 전환한 후 고율 바이오가스 생산의 기질로 사용하거나, 미생물 전기화학 기술을 통한 바이오가스 생산량 및 순도를 높이는 방법 등이 함께 고려될 수 있다. 바이오가스 개질은 천연가스 개질과 기본적으로 동일한 반응이나 개질 반응 전후의 불순물의 존재로 인해 개질 공정의 최적화와 전단 및 후단에서의 불순물 제거 기술 개발 및 실증이 필요하다. 현재 국내에서는 산업통상자원부의 지원으로 0.5 ton H_2/d 규모의 실증 연구가 진행 중이며, 환경부에서도 바이오가스 개질을 통한 수소공급(2개소 설계) 추진 계획을 2021년에 발표했다. 본 분야의 장기적인 발전을 위해서 연료로서의 바이오가스의 활용을 촉진하는 법률의 제정이 필요한 시점이다.

혐기성 수소 생산의 경제성은 고부하 운전을 통해 수소 생산성을 높임으로서 확보될 수 있다. 고부하 운전은 HRT를 낮추거나 유입 농도를 높임으로써 달성할 수 있는데, 유기성폐기물 또는 바이오매스의 농도를 농축하여 높이는 것은 현실성이 낮으므로 수리학적 체류시간의 감소가 필요하다. HRT를 낮춤에 있어 기존의 완전혼합형반응조(Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)에서는 HRT가 고형물 체류시간(Solids Retention Time, SRT)와 같고, 수소 생산균의 SRT가 8시간 이상으로 유지되어야 하는 한계가 있어, 고부하 운전을 위해서는 SRT와 HRT를 분리하는 고율 공정(high-rate process)의 적용이 필요하다. 성능 및 신뢰성 면에서 탁월한 고액분리 방안으로 막분리(membrane separation)가 있다. 막분리는 1 μm 미만의 공극을 갖는 막 소재를 다공성 지지체에 결합한 후 분리 대상을 투과시키는 원리를 사용하며 막 소재의 공극 또는 투과 가능 크기(가상 공극 크기)가 작을수록 제거능이 향상되지만, 막 소재 비용, 동력비, 막오염이 심해지는 단점 또한 존재한다. 일반적으로 사용되는 막 소재 중 가장 공극이 큰 정밀여과(microfiltration)를 사용하더라도, 10 μm 이상의 부유성 고형물이 다량 함유된 기질이 유입되고 미생물이 고농도로 존재하는 고율 혐기성 소화에 적용되기에는 막 소재 비용, 동력비, 빈번한 막오염으로 인해 경제성이 문제가 될 수 있다. 생물막 반응조 외에도 upflow anaerobic sludge blanket (UASB), fixed bed reactor(FBR)이 연구되었으며 최근에는 dynamic

membrane bioreactor(DMBR) 등을 활용한 고율 수소 발효가 연구되고 있다. 동적막(dynamic membrane, DM)은 다공성 지지체에 생물반응조 운전 기간 동안 부착 형성된 미생물이 자체적으로 막 소재의 역할을 수행하도록 하여 처리수와 고형분의 고액분리가 가능하고, 설치 및 관리 비용을 줄임과 동시에 수소 생산 효율이 높은 공정을 구현하는 것을 의미한다. 동적막을 활용할 경우 담체나 막을 전혀 사용하지 않아 기존 막결합 생물공정 대비 설치 비용, 운전 비용, 역세척 요구량을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다. 현재까지 알려진 혐기성 수소 발효의 생산속도는 $65 \text{ m}^3/\text{m}^3/\text{d}$ 수준이다. 고율 혐기성 연속 수소 생산의 TRL은 4단계 수준으로 연구실 수준의 성능을 실증 환경에서 구현하기 위한 다양한 접근이 시도되고 있다.

참고문헌

- 국립산림과학원 (2019), Solid biofuel market and policy of Korea.
- 농림축산식품부 (2014), 바이오매스 에너지화 추진전략 개발.
- 산업통상자원부 (2019), 수소경제 활성화 로드맵.
- 환경부 (2018), 2017 전국 폐기물 발생 및 처리현황.
- 환경부 (2018), 2017 가축분뇨 처리통계.
- 환경부 (2020), 2019 하수도 통계.
- 환경부 (2021), 2021년 탄소중립 이행계획.
- Barei B., K., de la Rua, C., Möckl, M., Hamacher, T. (2019), Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems, Appl. Energy 237, 862-872.
- Chadrsekhar, K., Naresh Kumar, A., Kumar, G., Kim, D.-H., Song, Y.-C., Kim, S.-H. (2021), Electro-fermentation for biofuel and biochemical production: Current status and future directions, Bioresource Technology 323, 124598.
- IRENA (2020), Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5oC Climate Goal, Abu Dhabi.
- IWA (2015), Can the Water Sector Deliver on Carbon Reduction?, <https://iwa-network.org/can-the-water-sector-deliver-on-carbon-reduction/>
- Park, J.-H., Chandrasekhar K., Jeon, B.H., Jang, M., Liu, Y., Kim, S.-H. (2021), State-of-the-art technologies for continuous high-rate biohydrogen production, Bioresource Technology 320, 124304.

POWERSTEP (2016), WP4: Nitrogen management in side stream D4.1: Experience and performance data for the implementation of nitrification on a two-stage WWTP.
Stagnaro, C. (2021), Case study Italy: Optimising emissions cuts means we'll need "grey" and "blue" Hydrogen too,

energypost.eu/case-study-italy-optimising-emissions-cuts-means-we'll-need-grey-and-blue-hydrogen-too/
US DOE (2014), The Water-Energy Nexus: Challenges and Opportunities, DOE/ESPA-2002.

■ 집필진 소개(가나다 순)



김상현 교수는 현재 연세대학교 건설환경공학과에 부교수로 재직 중이며 주요 연구분야는 생물학적 하폐수/폐기물 처리와 바이오소 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.

‘하폐수 처리시설에서의 수소생산 기술 (2부): 광전기화학적 기술의 현황과 발전방향’은 10월에 곧 발간될 예정입니다. 많은 관심 바랍니다.

한국물환경학회-대한상하수도학회 통합 미래위원회

위원장 | 이재우, 최우주

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

Water4FutureCity 2021년 2호

한국물환경학회 서울특별시 종로구 삼봉로 81 두산위브 파빌리온 1137호

Tel. 02-389-4250 | Fax. 02-385-3702 | E-mail. kswe@kswe.org

대한상하수도학회 서울특별시 강남구 광평로 280 로즈데일빌딩 1323호

Tel. 02-507-1170 | Fax. 02-502-1170 | E-mail. kswwww@kswww.or.kr

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