

# 수산화니켈을 사용한 전기화학적 HMF 산화 반응에서 유기 용매 첨가에 따른 효과

한양대학교 장윤정 교수

E yjang53@hanyang.ac.kr

전기화학적 수소 생산과 커플링 될 수 있는 HMF 산화 반응에 유기 용매 첨가제를 도입하여 생산물인 FDCA의 패러데이 효율을 저전압 영역에서 최대 90%까지 향상시켰으며, 이는 전체 셀 전압을 낮추면서도 양 전극에서 모두 고부가가치 물질을 얻을 수 있다는 데 의의를 가진다.

## 연구 배경

전기화학적 수소 생산 반응은 반쪽 반응으로, 산업화에 도입되기 위해서는 산화/환원 반응<sup>1)</sup>이 짝지어진 전체 반응으로 확대되어야 한다. 물 전기분해 반응의 환원 반응인 수소 생산 반응은 산화 반응인 산소 생산 반응과 같이 연구가 진행되어 오고 있다. 특히 산소 생산 반응에는 이리듐(Ir), 루테튬(Rh) 등의 귀금속 촉매가 사용되지만, 아직은 귀금속 촉매를 대체할 새로운 촉매 개발 연구가 진행 중이다. 더불어 산소 생산 반응에는 전압이 크게 걸리고, 산소는 경제성이 없는 물질로 평가받고 있다.

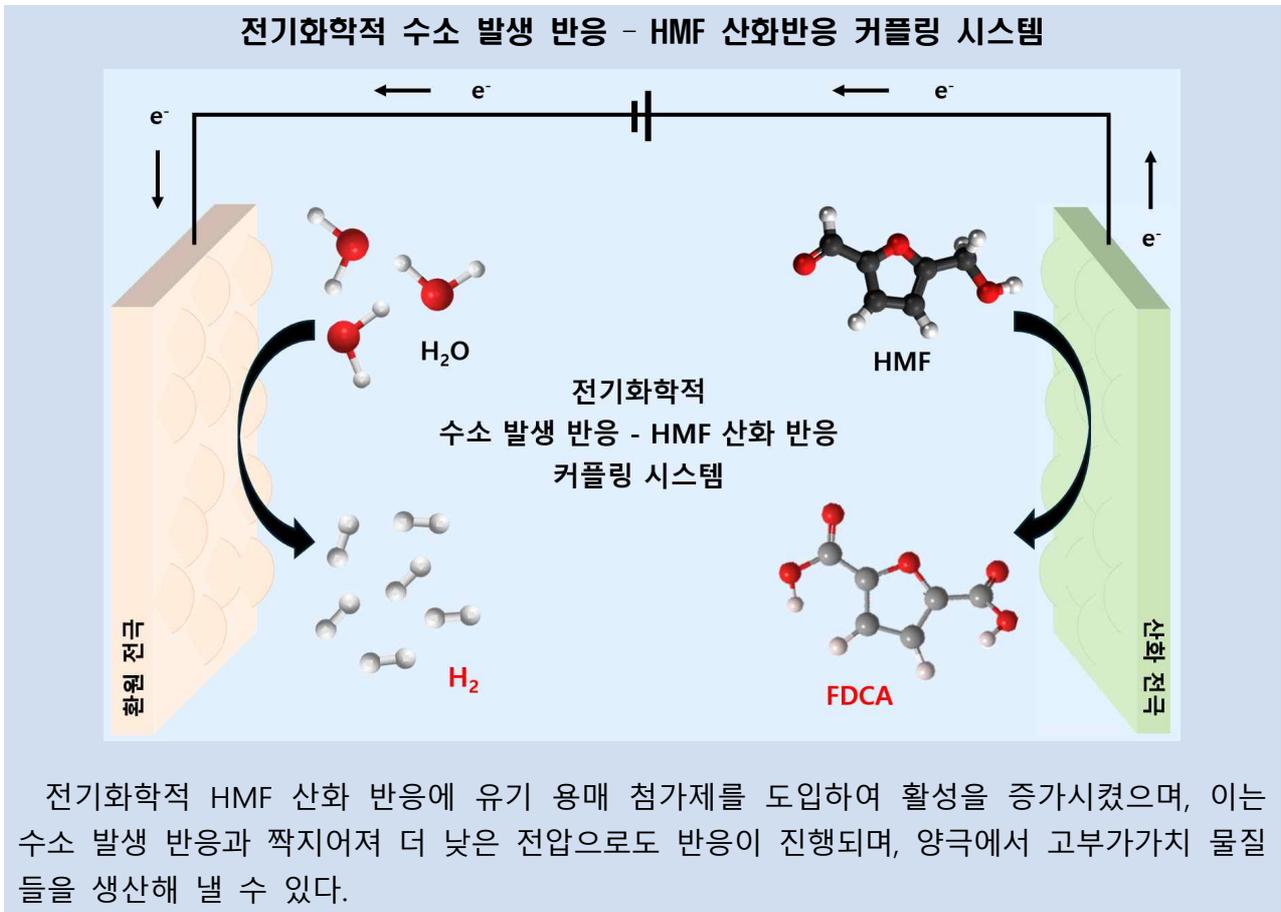
이에 최근에는 산소 생산 반응을 대체할 새로운 산화 반응에 대한 연구가 진행되고 있다. HMF(5-Hydroxymethylfurfural)<sup>2)</sup> 산화 반응도 그중 하나로, 반응 전압을 낮출 수 있고, 니켈(Ni)이나 구리(Cu), 코발트(Co)와 같은 전이 금속 기반 비귀금속 촉매로도 95% 이상의 효율을 보이며, 고부가가치 물질인 FDCA(2,5-Furandicarboxylic acid)를 생산할 수 있다는 점에서 산소 생산 반응의 대체 반응으로 주목받고 있다. 바이오매스 유래 물질인 FDCA는 석유계 플라스틱인 PET를 대체할 PEF 소재의 원료로 알려져 있다. 따라서 환원 반응인 수소 생산 반응과 산화 반응인 HMF 산화 반응 (FDCA 생산 반응)이 짝지어져 진행된다면 전체 반응 전압은 낮출 수 있으며, 양쪽 전극에서는 고부가가치 물질인 수소와 FDCA를 동시에 생산할 수 있다는 점에서 의미가 있다.

1) 산화/환원 반응 : 산화는 전자를 잃는 과정이며, 환원은 전자를 얻는 과정으로 정의됨. 즉, 전기화학적 산화 환원 반응은 산화 반응에서 나온 전자가 이동하여 환원 반응에 사용되는 것으로 반쪽 반응이 아닌 전체 반응을 의미

2) HMF(5-Hydroxymethylfurfural) : 목질계 바이오매스 중 셀룰로오스로부터 유래한 물질로, 화학 산업에서 연료, 의약품, 플라스틱 등을 만들기 위한 원료 화합물로 활용되는 물질

## 연구 내용

기존의 HMF 산화 반응은 촉매와 flow 시스템 기반의 셀<sup>3)</sup> 개발 위주로 연구가 진행되었으며, 특히, 수산화니켈(Ni(OH)<sub>2</sub>)를 비롯한 Ni 기반 촉매를 사용하여 반응을 진행하는 경우 99% 이상의 FDCA 수율과 패러데이 효율<sup>4)</sup>이 보고 되어왔다. 하지만, Ni 기반 촉매를 사용하는 경우 Ni<sup>2+</sup>의 산화 후, 산화된 Ni이 다시 환원되며 HMF를 산화시키는 간접 산화 방식으로 진행된다. 이러한 간접 산화 시, Ni<sup>2+</sup>의 산화 전압인 1.45V 이상에서 진행되므로 반응의 산화 전압이 비교적 높다는 한계점이 있다.



본 연구에서는 저전압 영역에서 HMF 산화 반응을 진행하여 증가된 효율을 보이는 것을 목표로 하였으며, 이는 반응 전압을 낮춰 전체 셀 전압을 낮추는데 도움이 될 뿐만 아니라 에너지 효율의 측면에서도 유리하다.

**학회** Effects of Organic Solvent Addition in Electrochemical Oxidation of HMF Using Ni(OH)<sub>2</sub>(한국화학공학회, 2024, 우수 포스터 발표상 수상)

3) flow 시스템 기반의 셀 : 반응물의 지속적인 흐름을 통해 반응이 진행되게 하는 반응기로 산업화를 위해 중요함  
4) 패러데이 효율 : 외부에서 가해준 전하량 대비 원하는 생성물을 만드는 데 사용된 전하량의 비율

## 차별성 및 우수성

본 연구가 지니는 차별점은 유기 용매 첨가제의 도입이다. 기존 연구들은 염기성 전해질 조건에서 반응성이 좋은 촉매 및 flow 시스템 기반의 셀 연구를 위주로 하였지만, 본 연구는 반응 전해질에 첨가제를 넣어 활성을 조절하는 것으로 반응 시스템에 대한 연구를 한다는 것이 기존과는 다른 점이라고 할 수 있다.

유기 용매 첨가제를 도입하였을 때, 낮은 전압 영역인 1.4V에서 FDCA 패러데이 효율이 첨가제 도입 전과 비교하여 10% 향상한 것을 관찰하였다. 즉, 최대 90% 달하는 FDCA 패러데이 효율을 저전압 영역에서 기록하였다. 이러한 저전압 구간 HMF 산화 연구는 매우 도전적이며, 해당 영역에서 패러데이 효율을 높였다는 점에서 의미가 있다.

## 파급효과 및 활용계획

전기화학적 HMF 산화 반응에서 첨가제를 도입한 연구는 진행된 적이 없지만, 첨가제 도입을 통해 저전압 영역에서 패러데이 효율을 높였다. 이를 환원 반응인 수소 생산 반응과 결합하였을 때, 전체 셀에 필요한 전압을 낮출 수 있으며, 낮은 전압에서도 고부가가치 물질인 수소와 FDCA를 높은 효율로 생산해 낼 수 있다. 또한, 반응 진행이 어려운 산소 발생 반응을 효과적으로 대체하여 활용될 수 있다.

더불어, 실시간 FTIR 분광법(in-situ FTIR Spectroscopy), 라만 분광법(Raman spectroscopy) 등 다양한 분석의 도입으로 유기 용매 첨가제의 역할이 규명된다면, 비슷한 역할을 할 수 있는 새로운 유기 용매 첨가제 후보군을 도입하여 활성 및 반응성 향상에 도움이 될 것이라 기대된다.