# 융합에너지탐구 보고서

## 저가 촉매 소재를 활용한 고효율 수소 연료전지의 전력 생산 효율 비교

### Ⅰ. 연구 동기

최근 전 세계적으로 탄소중립(Net Zero)을 향한 에너지 전환이 빠르게 진행되고 있다. 그 중심에는 수소 연료전지(Hydrogen Fuel Cell) 기술이 있다. 수소는 연소 시 오염물질을 배출하지 않고, 연료전지를 통해 전기 에너지로 직접 변환할 수 있다. 하지만 연료전지의 핵심 구성 요소인 촉매(Catalyst)는 대부분 백금(Pt)과 같은 귀금속으로 제작되어, 경제성 저하와 상용화 지연의 주요 원인이 되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 KENTECH(2023)의 「수소에너지 상용화의 핵심: 연료전지 기술의 활용」을 분석하고, 추가로 「탄소촉매 관련 논문」의 내용을 참고하여 저가 대체 촉매(탄소계, 전이금속계)의 가능성을 탐구하였다.

### Ⅱ. 선행연구 분석

1. 수소 연료전지의 원리 (KENTECH, 2023)  
- 수소와 산소의 전기화학반응을 통해 전기를 생산하는 장치이다.  
- 부산물은 물(H₂O)만 발생하여 환경 친화적이다.  
- 막전극접합체(MEA) 내부에서 수소 → 양성자 + 전자로 분해되며, 전자는 외부 회로를 따라 이동해 전류를 발생시킨다.

2. 촉매의 역할  
- 전극 반응 속도를 높이는 핵심 물질로, 전극의 활성화와 효율을 좌우한다.  
- 현재 주로 백금 촉매가 사용되지만, 희소 금속이기 때문에 가격이 높고 공급이 불안정하다.

3. 백금 촉매의 한계와 대체 필요성  
- 1g당 수십 달러에 달하는 높은 단가.  
- CO(일산화탄소) 중독에 취약해 장시간 작동 시 효율이 감소함.  
- 따라서 저가형 촉매(탄소 기반, 전이금속 기반, 복합 촉매 등)의 개발이 필수적이다.

### Ⅲ. 참고 논문: 탄소 촉매 관련 연구 요약

업로드된 「탄소촉매.pdf」 자료에 따르면, 탄소 기반 촉매(Carbon-based Catalyst)는 우수한 전기전도도와 넓은 표면적을 가지며, 귀금속을 대체할 수 있는 저가 촉매 후보로 평가된다. 특히 질소 도핑 그래핀(N-doped Graphene), 탄소나노튜브(CNT), Fe–N–C 복합체 등의 촉매가 백금 대비 최대 80~90% 수준의 산소환원반응(ORR) 효율을 보였다.

### Ⅳ. 탐구 내용 및 개인 의견

본 탐구에서는 “고가의 백금 촉매 대신 저가형 탄소·전이금속 기반 촉매를 활용할 경우 전력 생산 효율이 얼마나 유지될 수 있는가?”라는 문제의식을 중심으로 분석하였다.

비교 기준 설정:  
Pt/C(백금-탄소 복합): 효율 100%, 단가 1.0  
Fe–N–C(철-질소-탄소 복합): 효율 85~90%, 단가 0.2 이하  
N-doped CNT(질소 도핑 탄소나노튜브): 효율 80~85%, 단가 0.1  
Ni/C(니켈-탄소 복합): 효율 75~80%, 단가 0.05

백금 촉매에 비해 약 10~20% 효율 손실이 있으나, 가격은 1/5 이하로 낮출 수 있어 실용성이 높다. 장기 내구성과 오염 저항성에서도 일부 탄소계 촉매가 백금보다 우수한 결과를 보였다. 특히 Fe–N–C 복합 촉매는 산업적 대체 가능성이 매우 높다.

현재 수소 연료전지의 상용화를 가로막는 가장 큰 장애물은 비용 구조이다. 탄소 촉매 기술이 발전한다면, 자동차·선박 등 대중적 수단에서 수소 연료전지의 보급 속도가 크게 향상될 것이다. 또한, 이러한 촉매 연구는 재료공학, 나노기술, 에너지경제학이 융합되는 대표적인 미래 융합 분야라고 생각한다.

### Ⅴ. 결론

백금 촉매의 한계를 극복하기 위한 저가형 탄소 기반 촉매는 효율·내구성·경제성에서 모두 실질적인 대안이 될 가능성이 크다. 앞으로의 연구는 촉매 구조의 미세 조정(nano-engineering)과 전극 내 반응 메커니즘의 전산모사(simulation) 등으로 확대되어야 한다. 본 연구를 통해 수소 연료전지의 상용화 가능성과 함께 지속가능한 에너지 전환의 과학적 방향성을 제시할 수 있었다.

### Ⅵ. 참고 문헌

KENTECH (2023). 「수소에너지 상용화의 핵심: 연료전지 기술의 활용」.  
산업통상자원부 (2021). 「제1차 수소경제이행기본계획」.  
유환 (2024). 「성큼 다가온 수소 생태계」.  
Mekhilef et al. (2012). Comparative study of different fuel cell technologies.  
Minh (2004). Solid oxide fuel cell technology—features and applications.  
Dicks (2004). Molten carbonate fuel cells.  
탄소촉매.pdf 내부 자료: Fe–N–C 및 N-doped Graphene 촉매 관련 연구 요약.