TOP 10 RESEARCH
ACHIEVEMENTS

대기 오염 물질 정화를 위한 불균일계 금속 원자 촉매

Heterogeneous Metal Atomic Catalysts for Gas-Phase Pollution Remediation

소속학과 생명화학공학과

연구책임자 이현주

홈페이지 <http://catmat.kaist.ac.kr>

자동차 배기가스의 일산화탄소(CO), 탄화수소, 질소산화물(NO_x)은 대표적인 대기 환경오염 물질로 반드시 불균일계 촉매 반응을 통해 정화하여 배출해야 한다. 기존 자동차 촉매는 저온(150도 이하)에서의 낮은 활성 및 수열노화에 대한 낮은 내구성 등의 문제로 배기가스 정화 성능이 충분하지 못하여 환경 문제가 지속되어 왔다. 본 연구에서는 금속(백금, 팔라듐, 로듐) 원자 촉매를 개발하여 배기가스 정화 반응에 대해 세계 최고 수준의 저온 활성을 달성하였다. 또한 금속 원자 촉매는 수열노화, 장시간 반응, 재사용 평가 등에 대해 우수한 내구성을 나타냈다. 본 기술은 자동차 촉매 분야를 선도할 원천 기술로써 학술적 및 산업적 이용 가치가 매우 크다.

1. 연구배경

자동차 배기가스에서 배출되는 일산화탄소(CO), 탄화수소, 질소산화물(NO_x) 등은 인체 호흡기 유독 물질이며, 미세먼지 및 스모그의 전구체가 되는 대표적인 대기 환경오염 물질이다. 이 오염 물질들은 불균일계 촉매에 의한 산화 및 환원 반응을 통해 질소(N₂), 물(H₂O), 이산화탄소(CO₂) 등으로 정화하여 배출해야 한다. 하지만 기존 자동차 촉매는 저온(150도 이하)에서 낮은 활성을 가지고 물이 있는 고온(750도 이상)에서 낮은 내구성을 가져 배기가스를 충분히 정화하지 못했다. 특히 가솔린 하이브리드 자동차 등의 경우 연비가 크게 높아진 대신 자동차 내부 촉매층 온도가 낮아져 저온에서의 높은 활성을 갖는 촉매를 개발하는 것이 매우 중요하다. 또한 활성 자체는 낮은 온도에서 나타나야 하지만, 연소 과정에서 고온이 동반되는 바, 습기가 존재하는 고온 환경에서도 촉매 구조가 무너지지 않고 높은 내구성을 나타내야 한다.

2. 연구내용

모든 금속 원자가 표면에 드러나 100% 분산도를 나타내고, 강력한 금속-지지체 상호작용을 갖는 금속 원자 촉매(metal atomic catalysts)를 만들기 위해서 본 연구진은 결합자리가 풍부한 환원형 금속 산화물 지지체를 고안해냈다. 본 연구에서는 알루미늄(γ -Al₂O₃) 지지체를 수소로 환원 처리하여 강력한 고정 자리인 Al³⁺_{penta} 자리를 다량 형성시켰다. 이 자리에 세리아(CeO₂)를 담지시켜 알루미늄-세리아 이중 구조 지지체를 디자인하였다. 두 지지체간에 강력한 상호작용으로 인해 결합자리가 매우 많은 세리아가 합성되었다. 금속(백금, 팔라듐, 로듐)이 세리아에 담지될 때, 금속 원자와 세리아 결합자리 간에 강력한 상호작용이 발생하여 불안정한 금속 원자의 표면 자유에너지를 효과적으로 낮추었다. 그 결과, 모든 금속

원자가 표면에 드러나 100% 분산도를 갖는 Pt, Pd, Rh/CeO₂-Al₂O₃의 금속 원자 촉매가 디자인되었다. 금속 원자 촉매를 대표적 자동차 배기가스 정화 반응인 삼원 촉매 반응과 질소산화물 흡장형 촉매 반응에 적용하였다. 삼원 촉매 반응에 본 연구의 금속 원자 촉매를 사용했을 때, 기존 상용 삼원 촉매 대비 월등한 촉매 활성과 내구성을 보였다. 일산화탄소, 프로필렌, 질소산화물이 150 °C 이하에서 모두 제거되었고 프로판도 300 °C 이하에서 100% 전환율을 달성하는 등 금속 원자 촉매는 세계 최고 수준의 저온 활성을 나타냈다. 수열노화(900 °C, 24시간), 장시간 반응(420시간), 재사용 평가 등에서 금속 원자가 전혀 소멸되지 않고 안정적으로 100% 분산도 구조를 유지하며 매우 우수한 내구성을 나타냈다. 또한 질소산화물 흡장형 촉매 반응에 본 연구의 금속 원자 촉매를 사용했을 때, 200 °C 이하에서 기존 상용 촉매 대비 질소산화물 제거 성능이 3배 이상 향상되었다. 또한 수열노화(750 °C, 25시간) 이후에도 금속 원자 촉매의 구조가 변하지 않고 안정적으로 유지되었으며, 질소산화물 제거에서 초기 성능의 93%를 달성하였다.

3. 기대효과

본 연구진은 자동차 배기가스 대기 오염 물질 정화를 위한 고효율-고내구성 불균일계 금속 원자 촉매를 개발하였다. 금속 원자 촉매는 100% 분산도를 갖는 독특한 구조적 장점으로 인해 세계 최고 수준의 저온 활성을 달성하였다. 더 나아가서 강력한 금속-지지체 상호작용으로 인해 금속 소결이 현저히 억제되어 기존 자동차 촉매를 뛰어넘는 우수한 내구성을 지녔다. 따라서 본 기술은 자동차 배기가스 촉매 분야의 미래를 선도할 핵심 원천 기술로써, 고효율-고내구성 불균일계 금속 촉매 개발을 위한 가이드라인을 제시할 것이다. 또한 지속적으로 강화되고 있는 국제적 환경 규제에 효율적으로 대처할 수 있어서 다양한 가솔린 및 하이브리드 차량의 배기가스 촉매로 적용 가능할 것이다. 더 나아가서 선박, 항공, 오토바이, 발전소 등 배출가스 정화가 필요한 산업 전반에 걸쳐 본 기술을 응용할 수 있을 것이다.

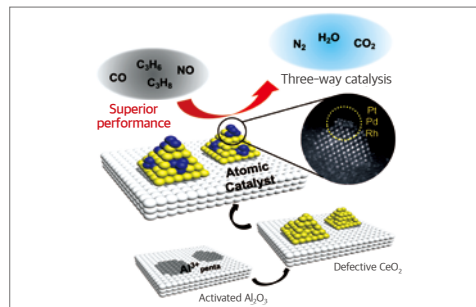


그림 1. 삼원 촉매 반응용 고효율-고내구성 금속 (백금, 팔라듐, 로듐) 원자 촉매

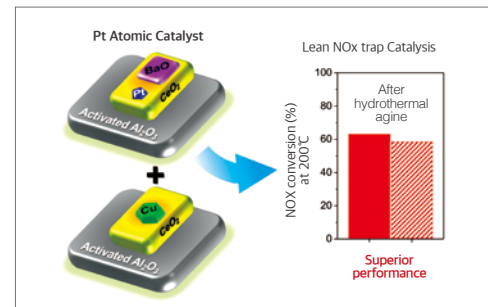


그림 2. 질소산화물 흡장형 촉매 반응용 고효율-고내구성 백금 원자 촉매



연구성과

[논문] H. Jeong, O. Kwon, B.-S. Kim, J. Bae, S. Shin, H.-E. Kim, J. Kim, H. Lee*, "Highly Durable Metal Ensemble Catalysts with Full Dispersion for Automotive Applications beyond Single-Atom Catalysts", *Nature Catalysis* 3, 368-375 (2020) [2020 Impact Factor = 30.471]
 B.-S. Kim, H. Jeong, J. Bae, P. S. Kim, C. H. Kim, H. Lee*, "Lean NO_x Trap Catalysts with High Low-Temperature Activity and Hydrothermal Stability", *Applied Catalysis B: Environmental* 270, 118871 (2020) [2020 Impact Factor = 16.683]
 [홍보] 논문 1에 대하여 언론보도 10여 회

연구비 지원

[정부과제] 부처명: 미래창조과학부, 과제고유번호: 2016R1A5A1009592, 연구사업명: 선도연구센터지원사업, 연구과제명: 초저에너지 자동차 초저배출 사업단
 부처명: 과학기술정보통신부, 과제고유번호: 2018R1A2A2A05018849, 연구사업명: 이공분야기초연구사업, 연구과제명: 불균일계 단일 원자 촉매 개발

[기업과제] 기업명: 현대엔지비(주), 과제고유번호: R-183091.0001, 연구사업명: 산업체연구개발사업, 연구과제명: 저온 활성화 LNT 촉매 개발