

H₂-SCR의 나트륨 첨가가 질소산화물과 일산화탄소 저감 성능에 미치는 영향

Influence of Sodium Addition on NO_x and CO Reduction Performance in H₂-SCR

서충길*†
Choong-Kil Seo

(Received 21 January 2026, Revision received 06 May 2026, Accepted 08 May 2026)

초록 : 최근에는 지구 온난화의 주요 원인인 이산화탄소를 배출하지 않는 청정 에너지원인 수소의 제조, 생산, 운송 및 활용에 대한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. H₂-SCR은 배기가스 온도가 낮은 가정용 보일러와 H₂-엔진에서 발생하는 유해 가스를 저감시키기 위한 후처리 촉매 시스템으로서 향후 활용 가능성이 높다. 이 연구는 H₂-SCR의 상용화를 위하여 산화물 지지체에 조촉매 Na 담지량에 따른 유해 가스 저감 성능을 파악하였다. Na 담지량에 따른 H₂-SCR 촉매의 물리·화학적 특성은 SEM-EDX, BET 비표면적, H₂-TPR, XPS 분석 및 NO_x/CO 저감 성능을 통하여 파악하였다. 2wt% Na가 담지된 (2) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂-2Na/CeO₂ H₂-SCR은 125℃에서 약 77%의 가장 높은 NO_x 전환율을 나타냈고, 온도우도 또한 대폭 확대되었다. 향후 저온활성 개선과 중·고온에서 유해 가스 저감 성능을 위한 귀금속과 조촉매에 대하여 연구할 계획이다.

키워드 : 수소, 선택적인환원촉매, 질소산화물, 일산화탄소, 나트륨

Abstract : Recently, research and development focused on the production, transportation, and application of hydrogen—a clean energy source that does not emit carbon dioxide, the primary driver of global warming—have been actively pursued. H₂-SCR(Selective Catalytic Reduction using Hydrogen) is a post-treatment catalyst system designed to mitigate harmful gases generated from H₂-engines and residential boilers with low exhaust temperatures, holding significant potential for future commercial application. This study investigated the reduction performance of harmful gases based on the loading amount of the Na promoter on an oxide support to facilitate the commercialization of H₂-SCR. The physicochemical properties of the H₂-SCR catalysts according to the Na content were characterized using SEM-EDX, BET specific surface area, H₂-TPR, and XPS analysis, alongside evaluations of NO_x/CO reduction performance. The results showed that the (2) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂-2Na/CeO₂ catalyst, loaded with 2wt% Na, exhibited the highest NO_x conversion rate of approximately 77% at 125°C and significantly expanded the operating temperature window. Future research will focus on noble metals and promoters to improve low-temperature activity and enhance harmful gas reduction performance at promoters to improve low-temperature activity and enhance harmful gas reduction performance at medium-to-high temperatures.

Key Words : Hydrogen, Selective Catalytic Reduction, NO_x, CO, Sodium

*† 서충길(<https://orcid.org/0000-0003-2205-2111>) : 교수, 호원대학교 자동차기계공학과
E-mail : ckseo@howon.ac.kr, Tel : 063-450-7215

*† Choong-Kil Seo(<https://orcid.org/0000-0003-2205-2111>) : Professor, Department of Automotive & Mechanical Engineering, Howon University.
E-mail : ckseo@howon.ac.kr, Tel : 063-450-7215

1. 서 론

최근에 폭우, 폭설, 폭염, 한파, 가뭄과 같은 이상 기후 현상이 빈번해지고 있다. 아직까지도 에너지 의존도가 높은 화석 연료에서 배출되는 온실 가스가 주요 원인이다. 또한 배출 가스는 인체에 해로울 뿐만 아니라 미세 먼지 등 대기 질을 악화시키고 있다. 현재 전 세계 에너지 구조에서 가장 큰 비중은 여전히 화석연료(석유·석탄·가스)이며, 전체 1차 에너지 소비의 약 82%를 차지하고 있다.¹⁾

현재 동력 발생원은 주로 내연기관이 차지하고 있으며, 댓수가 많은 자동차는 전기차(EV)와 수소 연료전지차(FCEV)로 파워트레인 전환이 진행 중이다. 그러나, 최근 전기차의 화재 문제와 인프라 부족 등 사용에 불편함이 해결되지 않아 시장의 보급 속도가 다소 둔화된 반면, 사용하기 편리하고 연비 이점 등 메리트가 많은 하이브리드 자동차(HEV)의 판매량은 증가하고 있다. 그럼에도 불구하고 내연기관은 국내외 자동차 시장에서 여전히 큰 비중을 차지하고 있다. 이에 따라 건설 기계, 선박, 농기계, 보일러 및 오토바이에 이르기까지 점차 배기가스 규제는 더욱더 엄격하게 강화되고 있다. 내연기관은 높은 연소 온도에서 발암 물질인 질소산화물(NOx)이 배출되며, NOx 저감을 위해 가장 널리 사용되는 후처리 촉매 시스템은 SCR(Selective Catalytic Reduction)^{2,3)}이다.

최근에는 지구 온난화의 주요 원인인 이산화탄소(CO₂)를 배출하지 않는 청정 에너지원인 수소(hydrogen)의 제조, 생산, 운송 및 활용에 대한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 그중에서도 H₂-SCR^{4,5)}은 배기가스 온도가 낮은 가정용 보일러(한국 규제)와 곧 상용화될 H₂-엔진에서 발생하는 유해 가스를 저감시키기 위한 후처리 촉매 시스템으로서 향후 활용 가능성이 매우 높다. 지금까지의 H₂-SCR의 연구 개발 동향은 주촉매 특성^{6,7)}, 조촉매(promoter) 영향⁸⁾, 지지체 특성⁹⁾, 촉매 제조 방법¹⁰⁾ 및 반응 메커니즘¹¹⁾ 등에 관하여 연구를 진행해 왔다. 저자의 선행 연구는 H₂-SCR의 NOx와 CO 유해 가스 저감 성능 향상을 위하여

촉매 물질 영향, 조촉매 영향, 제조 방법 및 후처리 복합 시스템 등에 관하여 연구를 진행해 왔다.^{8,9)} 환원제 H₂는 저온에서 활성이 좋으나, 산소 농도가 많은 분위기의 중·고온에서 산화(H₂O)로 인하여 유해 가스 저감 능력이 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 문제점을 극복하고자 산성 계열인 NOx와 흡착 특성이 좋은 알칼리 계열인 나트륨(Na)을 산화물 지지체에 담지하여 연구하는 것은 의의가 있다. 나트륨(Na)은 산성을 억제하고 전자를 조절하며 촉매의 구조의 안정화 및 선택성을 강화시키는 역할을 담당하는 물질이다. 이에 관한 선행 연구는 제올라이트 기반에 Cu 촉매에 Na 첨가의 영향,¹¹⁾ DOC-DPF-SCR 엔진시스템에 Na 도핑 시 영향,¹²⁾ Na 포함 시 Mn 기반 저온 SCR 영향¹³⁾ 등에 관한 연구가 진행되었다. 그러나 환원제 H₂를 이용하는 H₂-SCR 촉매에 관한 연구는 미진한 상황이며, 이 연구는 산화물 지지체(0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂-XNa/CeO₂)에 조촉매 Na 담지량에 따른 H₂-SCR의 유해 가스 저감 성능을 파악하는 것이다.

2. 촉매 제조 및 실험 방법

Fig. 1은 H₂-SCR의 공침법(co-precipitation)의 제조 공정도를 나타내고 있다. 주 지지체 Ce 전구체(Sigma-Aldrich, Cerium(III) nitrate hexahydrate)에 10wt% 이하로 조촉매를 담지하였다. 조촉매는 MgO(Sigma-Aldrich, Magnesium oxide), ZrO₂(Sigma-Aldrich, Zirconium nitrate hydrate), Na(Sigma-Aldrich, Sodium dichloroisocyanurate dihydrate)를 사용하여 동시에 공침하였고, 촉매 물질 간의 계면활성을 위하여 pH 8.0으로 조절한 후 3시간 동안 교반하였다. 건조기 온도를 100℃로 설정한 후 24시간 건조(Drying) 하였다. 제조된 분말을 밀링(Milling) 한 후 500℃에서 2시간 소성(Calcination) 하였다. 지지체 화합물(9.25MgO-5ZrO₂-XNa/CeO₂)에 0.75wt%의 Pt를 넣고 3시간 함침하였다. 밀링 및 소성을 거쳐 400CPSI(Cell Per Square Inch)의 담체(substrate)에 198g/L을 코팅하였다. 500℃에서 3시간 동안 공기로 소성하였고, 400℃에서 30분 동안 H₂ 5%로 환원(reduction) 처리하였다.

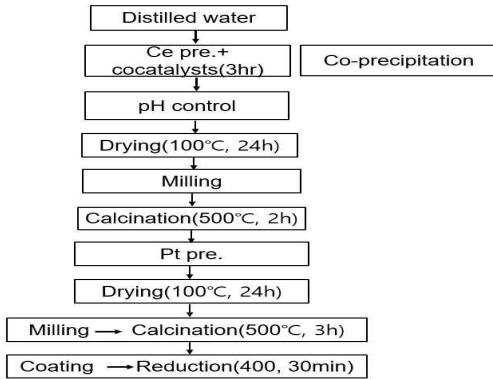


Fig. 1 Catalyst manufacturing process diagram of Co-precipitation of H₂-SCR

H₂-SCR의 NO_x와 CO의 유해가스 성능을 파악을 위한 모델가스반응조건을 Table 1에 나타내었다. 가스 구성은 수천 ppm의 NO_x를 배출하는 H₂-엔진 및 200 ppm 이하의 CO를 배출하는 가정용 보일러에서 배출되는 가스(한국 규제)를 고려하였다. 촉매 전단 온도는 75~350°C 정상 상태를 유지하면서 유해 가스 저감 성능을 파악하였다. 촉매의 NO_x와 CO의 전환율은 식 (1)과 같고, 촉매 전단에 들어가는 유해 가스(NO_x, CO) 농도 대비 H₂-SCR 촉매 후단에서 배출되는 유해 가스의 농도로 구한다. 분석기로는 MRU 가스분석기(VarioPlus Industrial, MRU Instruments, Inc.)를 이용하여 1초 간격으로 정량·정성적으로 측정하였다.

$$\frac{(NO_x/CO_{in} - NO_x/CO_{out}) \times 100}{(NO_x/CO_{in})} \quad (1)$$

Table 1 Model gas components for evaluation the performance of H₂-SCR

Gas components	Concentration
NO(ppm)	500
CO(ppm)	700
O ₂ (%)	5
H ₂ (%)	1
H ₂ O(%)	1.5
N ₂	Balance
SV(h ⁻¹)	28,000

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Na 담지량에 따른 H₂-SCR 촉매의 물리·화학적 특징

Fig. 2는 H₂-SCR의 SEM 이미지를 나타내고 있다. CeO₂는 입방정계(cubic crystal system)에 속하며, 10~50 nm급으로 잘 분포되어 있다. 보조 지지체 MgO는 입방정계 구조에 속하며, 합성방법과 조건에 따라 크게 달라지며 일반적으로 수 nm 수십 μm까지 다양하다. SEM 이미지에서 (1)과 (2)의 SEM 이미지에서 얇은 폭과 길이를 나타내는 조촉매가 MgO이다.

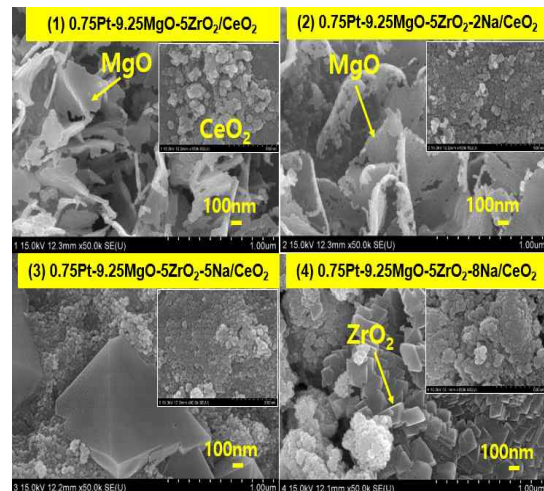


Fig. 2 SEM image of H₂-SCR according to the amount of Na loaded

Table 2 Physical specification of H₂-SCR(Fresh)

Catalyst	BET (m ² /g)	Pore size(nm)
(1) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO ₂ /CeO ₂ (STD.)	65.448	1.902
(2) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO ₂ -2Na/CeO ₂	16.340	1.904
(3) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO ₂ -5Na/CeO ₂	21.883	1.906
(4) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO ₂ -8Na/CeO ₂	18.995	1.909
Ave.	30.67	1.910

(4) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂-8Na/CeO₂ H₂-SCR에서 열적인 안정성을 제공하는 ZrO₂ 형상이 관찰되며, 응집상태 및 다공성 구조를 확인할 수 있다. ZrO₂는 합성방법에 따라 초미세나노입자 4.5 nm에서 고온 소결 후에는 수백 nm~수 μ m까지 성장한다. 알칼리 계열 Na가 담지되면 주로 Na₂O 화합물이 생성되며 합성 방법에 따라 수십~수백 nm 범위에서 입자가 생성된다. 작은 입자 사이즈는 촉매가 반응하는 표면적이 커서 반응성을 높인다.

Table 2는 공침법 제조된 H₂-SCR의 BET 비표면적(ASAP 2020, Micromeritics Instruments Corp, USA) 물리적인 특성을 나타내고 있다. 이 기기는 미세 다공성(0.35~2 nm) 및 중다공성(2~50 nm) 물질의 기체 흡착 분석에 이상적이다. 질소로 기존의 등온선을 수집할 수 있고, BET 비표면적 및 BJH 기공 크기 분포를 쉽게 판정할 수 있다. (1) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂/CeO₂(STD.) H₂-SCR(fresh)의 BET 비표면적은 65.448 m²/g이며, Pore size는 1.902 nm이다. 알칼리 계열 Na가 담지된 3종류 H₂-SCR은 16.340~21.883 m²/g이며, Pore size는 1.904~1.910 nm이다. Na 담지량이 2, 5 및 8wt%로 증가할수록 BET 비표면적은 감소하며, Pore size는 소폭 증가하는 경향을 나타내고 있다. 물리적으로 BET 비표면적이 크면 활성사이트(active site)가 많아져 유해 가스 저감 성능의 향상에 유리하다.

Fig. 3은 Na 담지량에 따른 H₂-TPR(Temperature Programmed Reduction, BEL-CAT)을 나타내고 있다. H₂-TPR 분석은 촉매의 환원 특성 분석으로 촉매 물질의 환원 온도 분포와 H₂ 양으로부터 환원 정도를 관찰할 수 있는 분석법이다. 약 250~300°C에서 생성된 피크는 주촉매 PtO 산화물에서 Pt⁰로 환원되는 것이다. Na 담지량이 많은 (4) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂-8Na/CeO₂ H₂-SCR의 193°C에서 생성된 피크는, CeO₂ 표면에 존재하던 Na₂O가 전자 밀도 변화로 인해 Na-O-Ce 계면(표면)에 흡착된 산소종이 환원되는 것이다. 약 600°C에서 생성된 피크는 Na 첨가시 Ce-O 결합 강도가 변화하여 중온 영역에서 환원피크가 발생되고 있으며, Na-CeO₂ 결합에 의해 생성된 격자 산소(O-bulk, lattice oxygen)가 환원되는 피크이다. 850~950°C

에서 생성된 피크는 주 지지체 CeO₂의 구조물의 격자 산소(lattice oxygen, bulk)가 환원되는 것이다. (3) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂-5Na/CeO₂ H₂-SCR은 다른 H₂-SCR에 비해 600°C 피크가 생성되었다. 이는 CeO₂ 표면 하부 및 Na에 도핑된 CeO₂ 구조에서 환원되었다. 약 860°C에서 생성된 피크는 주지지체 CeO₂가 Ce^x로 환원되는 것이다. 촉매를 구성하는 물질과 촉매 제조 방법에 따라 물질 간의 결합력이 다르기 때문에 환원되는 피크 온도는 다르다.

Fig. 4는 H₂-SCR의 산화물 지지체에 Na 담지량에 따른 Ce의 XPS 스펙트럼을 나타내고 있다. XPS(Thermo Scientific, K-Alpha+) 분석은 시료 표면에 존재하는 원소의 표면 원자 농도와 산화 상태를 확인할 수 있다. 또한 지지체인 CeO₂ 산화물의 Na 담지량에 따른 Ce 양이온 생성 특성을 보여 주고 있다. H₂-SCR에서 산소 종의 흡착 및 활성화에 좋은 Ce³⁺ 양이온은 901.56 eV와 883 eV에서 피크가 명확하게 생성된다. Ce⁴⁺ 양이온은 916 eV, 907 eV, 899 eV 및 888 eV에서 피크가 생성되며, Ce³⁺ 상태가 H₂-SCR에서 활성종이다. MgO-ZrO₂-Na-CeO₂ 산화물 지지체에서 촉매 물질 간에 상호 보완적으로 작용하여 Ce³⁺ 생성 및 산소 저장 용량(OSC)을 크게 향상시킨다. 적정량의 Na 첨가는 도핑 또는 계면 결합을 통해 CeO₂ 격자 내의 산소 결합을 더욱 안정화시켜 Ce⁴⁺를 Ce³⁺로 환원시키는 역할을 한다. Na 담지량에 따른 4종류 H₂-SCR에서 (2) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂-2Na/CeO₂ H₂-SCR은

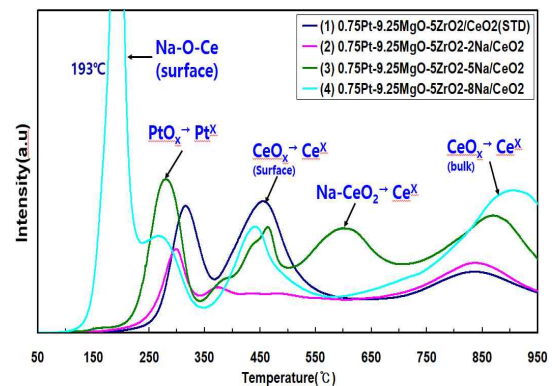


Fig. 3 H₂-TPR profile of H₂-SCR according to the amount of Na loaded

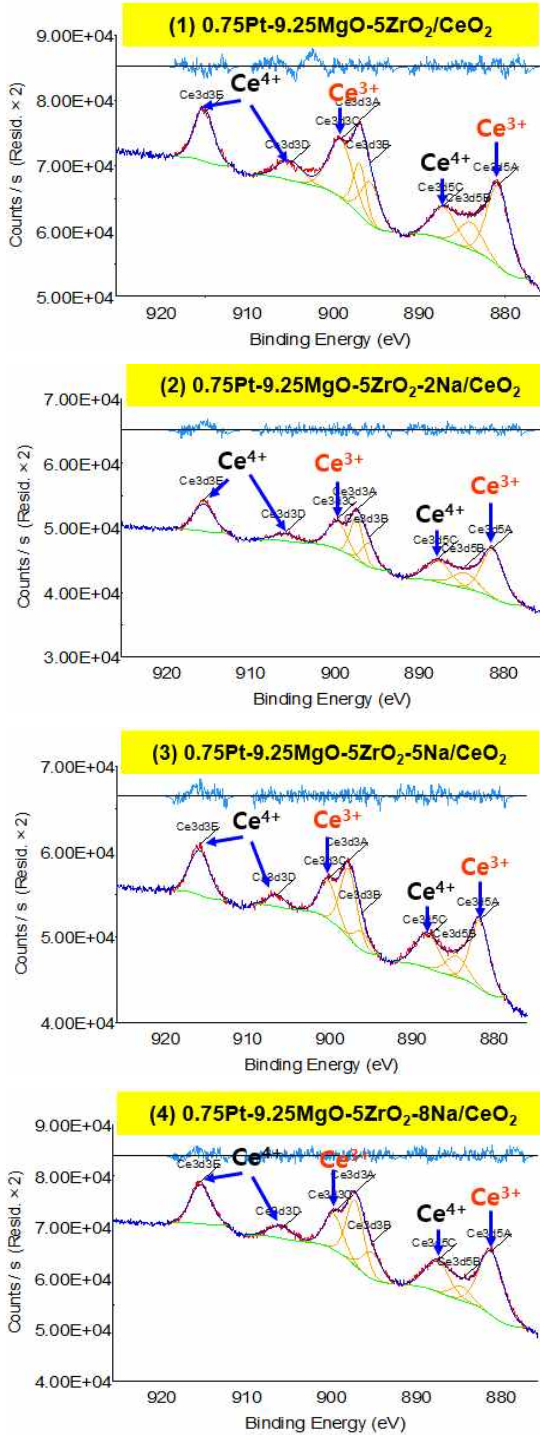


Fig. 4 XPS of of H₂-SCR according to the amount of Na loaded(Ce)

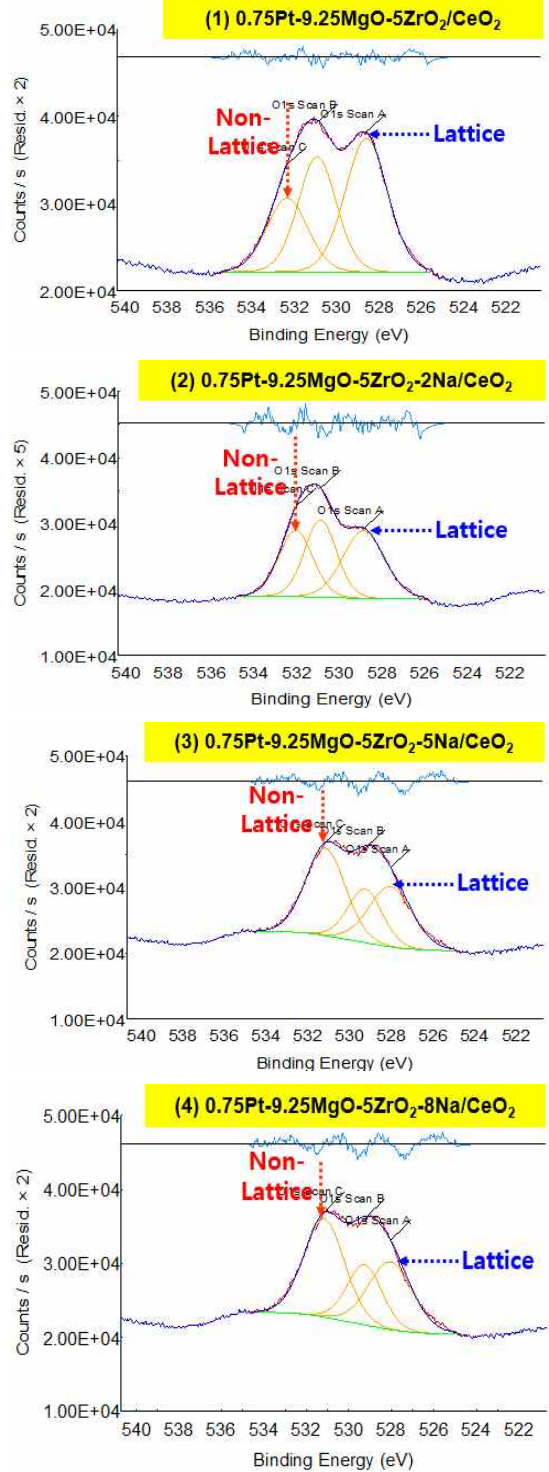


Fig. 5 XPS spectra of H₂-SCR according to the amount of Na loaded(O)

다른 3종의 H₂-SCR 촉매보다 Ce⁴⁺ 양이온의 피크가 가장 작은 경향을 나타내고 있다. Ce³⁺는 환원 상태이고 산소공공(oxygen vacancy)을 형성하여 촉매 활성을 증가시키며, Ce⁴⁺는 산화 상태로 안정적인 산화력을 제공함에 따라 촉매의 내구성을 보장하는데 도움이 된다. 결과적으로 Ce³⁺와 Ce⁴⁺의 균형(balance)이 촉매 성능에 영향을 미치는데, (2) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂-2Na/CeO₂ H₂-SCR이 전반적으로 양이온 화학종의 균형이 적절하다.

Fig. 5는 H₂-SCR의 Na 함량에 따른 산소(O)종의 XPS 스펙트럼을 보여 주고 있으며, 격자 산소와 비격자 산소로 구분된다. 격자 산소는 산화물 결정 내에 존재하며, 구조를 유지하고 재료의 특성에 영향을 미친다. 반면, 비격자 산소는 산화물 표면과 산소 결함에 존재하는 산소 원자 또는 이온으로, 이동성 산소로서 표면 반응, 촉매 반응 및 산소 저장에 관여하는 산소 화학종이다.

(3) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂-5Na/CeO₂ H₂-SCR 촉매를 살펴보면, 530.9 eV에서 나타나는 피크는 격자 산소이고, 532.2 eV에서 나타나는 피크는 비격자 산소이다. 격자 산소와 비격자 산소 피크는 서로 다른 결합 에너지 값을 가지며 균형 있게 나타난다. (1) H₂-SCR은 격자 산소가 비격자 산소에 비해 더 높은 피크를 나타내고 있다. 반면에 (2) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂-2Na/CeO₂ H₂-SCR 촉매는 격자 산소와 동일한 피크를 갖는 비격자 산소 피크가 생성되었다. 비격자 산소는 NO_x 환원 반응 경로를 제어하고 산소 과잉 조건에서도 선택성을 유지하는 데 중요한 역할을 하며¹⁴⁾ 격자와 비격자 산소의 피크가 균형(balance)을 이루는 것이 촉매 활성화에 도움이 된다.

3.2 Na 담지량에 따른 H₂-SCR의 de-NO_x /CO 성능

Fig. 6은 H₂-SCR 촉매의 산화와 환원반응 메커니즘을 나타내고 있다. 주촉매 Pt(Co 등)가 O₂가 있는 분위기에서 NO와 CO를 산화시키며, NO는 NO₃ 질산염(nitrate)으로 흡장된 뒤 환원제 H₂가 공급된다. 저온에서도 환원제 분자 수소(H₂)는 스퍼illover(spillover)됨에 따라 수소(H)로 분해된 뒤,

산화물 지지체로 이동하여 확산됨에 따라 촉매 반응성이 향상되어 NO_x를 저감시킨다.

유해 가스 NO와 CO의 환원과 산화 반응식은 식 (2)~(6)과 같다.

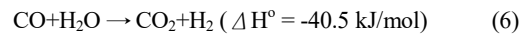
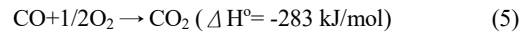
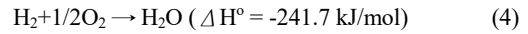
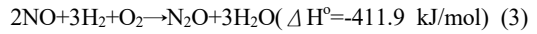
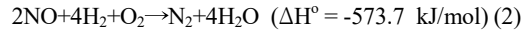


Fig. 7은 Na 담지량에 따른 H₂-SCR의 유해 가스의 de-NO_x/CO 성능을 나타내고 있다. (1) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂/CeO₂(STD) H₂-SCR은 촉매 온도 75℃에서 약 40%, 100℃에서 61%, 350℃에서 약 4%의 NO_x 전환율을 나타내고 있다. 75℃에서 Na가 담지된 3종의 H₂-SCR에 비해 약 9~20%의 NO_x 전환율이 높지만, 150℃ 이상의 온도에서는 가장 낮은 NO_x 전환율을 나타내고 있다. 2wt% Na가 담지된 (2) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂-2Na/CeO₂ H₂-SCR은 75℃에서 약 20%, 125℃에서 약 77%의 가장 높은 NO_x 전환율은 나타내고 있으며, 윈도우(window)도 또한 대폭 확대되었다. 특히, 125~225℃에서 NO_x 전환율이 향상되었고, 이는 알칼리 계열 2wt% Na가 적절하게 담지되면 산성계열 NO_x 흡착, 반응 및 탈착의 전체 반응



Fig. 6 Mechanism of simultaneous harmful gas reduction of H₂-SCR

속도가 향상되기 때문이다. (4) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂-8Na/CeO₂ H₂-SCR은 75℃에서 약 21%의 NO_x 전환율을 나타내며, 저온 온도 영역에서 가장 성능이 낮다.

반면, 250℃ 이상의 온도에서 다른 3종 H₂-SCR 촉매에 비해 10~21%의 NO_x 전환율이 높다. NO_x 흡착 반응 특성을 향상시켜 NO_x 저감 성능을 향상시켰기 때문이다.

Fig. 7(b)의 CO 전환율을 살펴보면, (1) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂/CeO₂(STD) H₂-SCR은 75℃에서 17%, 150℃에서 90%의 CO 전환율을 나타내고 있다. Na가 담지된 3종류 H₂-SCR의 CO 전환율은 성능 차이가 다소 있으나, Na가 첨가되지 않은 (1) H₂-SCR에 비해, 촉매 온도 125℃ 이하 온도

에는 저온 활성이 낮은 편이다. 산화물 지지체에 Na 첨가가 되면 BET 비표면적 감소와 더불어 활성화 에너지가 더 많이 필요하기 때문이다.

4. 결 론

H₂-SCR의 산화물 지지체에 조촉매 Na 담지량에 따른 H₂-SCR의 유해 가스 저감 성능을 파악하였으며, 연구 결과는 다음과 같다.

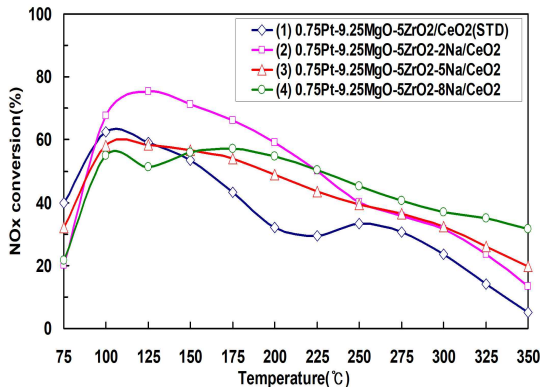
1) Na 담지량이 많은 (4) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂-8Na/CeO₂ H₂-SCR의 H₂-TPR 분석 결과, 193℃에서 생성된 피크는 CeO₂ 표면에 존재하던 Na₂O가 전자 밀도 변화로 인해 Na-O-Ce 계면(표면)에 흡착된 산소종이 환원되었다.

2) (2) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂-2Na/CeO₂ H₂-SCR은 125℃에서 약 77%의 가장 높은 NO_x 전환율을 나타냈고, 125~225℃에서 윈도우 폭 또한 확대되었다. 알칼리계열 Na가 적정하게 담지되면 산성계열 NO_x의 흡착, 반응 및 탈착의 전체 환원 반응 속도가 향상되었다.

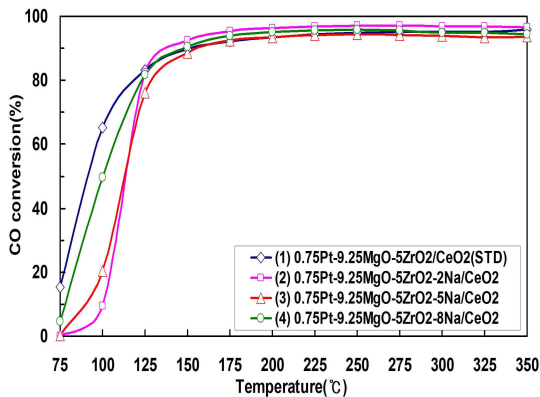
3) Na 담지량이 많은 (4) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO₂-8Na/CeO₂ H₂-SCR은 저온 온도 영역에서 NO_x 저감 성능이 저하되었다. 반면, 250℃ 이상 온도에서 다른 3종 H₂-SCR 촉매에 비해 10~21%의 NO_x 전환율이 높았다. Na 담지량이 많을수록 중온 이상에서 H₂ 산화를 감소시켜, NO_x 저감 성능을 향상시켰다. 향후 저온활성 개선과 중·고온에서 유해 가스 저감 성능을 위한 귀금속과 조촉매에 대하여 연구할 계획이다.

Author contributions

C. K. Seo; Conceptualization. Data curation. Investigation. Project administration. Writing-original draft. Writing-review & editing. S. G. Cho; Investigation, Resources.



(a) NO_x conversion



(b) CO conversion

Fig. 7 De-NO_x/CO performance of H₂-SCR according to the amount of Na loaded

References

1. <https://www.enerdata.co.kr>, 2025 Global Energy Trends: Integrated Energy Statistics and World Outlook.
2. W. Liu, Z. Gao, M. Sun, J. Gao, L. Wang, X. Zha and R. Yang, 2022, "One-pot synthesis of $\text{Cr}_\alpha\text{Mn}_\beta\text{CeTiOx}$ mixed oxides as NH_3 -SCR catalysts with enhanced low-temperature catalytic activity and sulfur resistance", *Chemical Engineering Science*, 251(10), 117450. (<https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.117450>)
3. S. E. Bozbag, T. B. Sari, G. H. Karadag, D. Sanli, B. özener, G. Hisar and C. Erkey, 2022, "Origins of Bi-model NO CO conversion behavior in NH_3 -SCR over Cu-chabazite revealed by mass transfer and surface kinetics analysis", *Chemical Engineering Science*, 263, 118093. (<https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118093>)
4. K. D. Z. Liu, J. Li, L. Yuan, H. Hu and S. I. Woo, 2014, "Novel Pd-Au/ TiO_2 catalyst for the selective catalytic reduction of NOx by H_2 ", *Catalysis Communications* 57, 19-22. (<https://doi.org/10.1016/j.catcom.2014.07.033>)
5. L. Li, F. Zhang, N. Guan, E. Schreier and M. Richter, 2008, "NO selective reduction by hydrogen on potassium titanate supported palladium catalyst", *Catalysis Communications*, 9, 1827-1832. (<https://doi.org/10.1016/j.catcom.2008.02.019>)
6. G. J. Kim, J. H. Shin, S. B. Kim and S. C. Hong, 2023, "The role of Pt valence state and La doping on titanium supported Pt-La/ TiO_2 catalyst for selective catalytic reduction with H_2 ", *Applied Surface Science*, 608, 155040. (<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155040>)
7. C. N. Costa and A. M. Efstathiou, 2007, "Mechanistic Aspects of the H_2 -SCR of NO on a novel Pt/MgO- CeO_2 Catalyst", *The Journal of Physical Chemistry C*, 111(7), 3010-3020. (<https://doi.org/10.1021/jp064952o>)
8. F. J. P. Schott, P. Balle, J. Adler and S. Kureti, 2009, "Reduction of NOx by H_2 on Pt/ WO_3 / ZrO_2 Catalyst in Oxygen-rich Exhaust", *Applied Catalysis B: Environmental*, 87(1-2), 18-29. (<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.08.021>)
9. C. K. Seo, 2024, "De- NOx/CO Performance According to Ag Loading Amount and Support Type of H_2 -SCR", *International Journal of Automotive Technology*, 25, 745-754. (<https://doi.org/10.1007/s12239-024-00088-6>)
10. C. K. Seo, 2025, "Reaction Characteristics of H_2 -SCR according to the Impregnation and Co-precipitation Methods", *Journal of Power System Engineering*, 29(4), 20-27. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2025.29.4.020>)
11. C. Wang, J. Wang, J. Wang, Z. Wang, Z. Chen, X. Li, M. Shen, W. Yan and X. Kang, 2018, "The Role of Impregnated Sodium Ions in Cu/SSZ-13 NH_3 -SCR Catalysts", *Catalysts*, 8(12), 593. (<https://doi.org/10.3390/catal8120593>)
12. M. Lance, 2016, "Evaluation of Fuel-Borne Sodium Effects on a DOC-DPF-SCR Heavy-Duty Engine Emission Control System: Simulation of Full-Useful Life", *SAE Paper*, 9(3), 683-694. (DOI:10.4271/2016-01-2322)
13. J. Zhang, Z. Ma, A. Cao, J. Yan, Y. Wang, M. Yu, L. Hu and S. Pan, 2024, "Research progress of Mn-based low-temperature SCR denitrification catalysts", *RSC Advances*, 44, 32583-32601. (<https://doi.org/10.1039/D4RA05140H>)
14. K. Awaya, Y. Sato, A. Miyazaki, M. Furukubo, K. Nishiyama, M. Tsushida, S. Ida, J. Ohyama and M. Machida, 2024, "Selective catalytic NOx reduction by H_2 in excess O_2 over Pt/zirconium phosphate nanosheets", *Catalysis Science & Technology*, 14, 6055-6064. (<https://doi.org/10.1039/D4CY00879K>)