

H₂-SCR의 지지체 Ce 기반의 조촉매 첨가에 따른 질소산화물과 일산화탄소의 저감 특성

NO_x and CO Reduction Characteristics according to the Addition of Ce-based Cocatalyst as a Support for H₂-SCR

서충길*† · 조상곤**

Choong-Kil Seo*† and Sang-Gon Cho**

(Received 03 July 2025, Revision received 19 August 2025, Accepted 19 August 2025)

초록 : 이 연구는 H₂-SCR의 NO_x와 CO 유해 가스 저감 성능 향상을 위해 지지체 Ce 기반에 3종류의 조촉매를 첨가하여 물리·화학적 특성을 파악하는 것이다. 6종류 H₂-SCR의 H₂-TPR 분석에서 102~251℃에서 생성된 피크는 조촉매 Pt²⁺, Pt⁴⁺가 Pt⁰로 환원되었다. Pt 화학종이 환원되면서 온도 차이가 나타나는 것은 조촉매 물질 첨가에 따른 지지체 Ce와 귀금속 Pt와의 결합의 세기가 달라졌기 때문이다. (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce H₂-SCR은 100~325℃ 온도 영역까지 가장 높은 NO_x 저감 성능을 나타냈고, 조촉매, 조촉매 및 지지체가 작은 입자로 잘 결합되었다. 이러한 현상은 촉매 물질의 상호작용(interaction)을 향상시켜서 촉매의 유해 가스 저감 성능을 향상시켰다. 지지체 TiO₂ 비해 지지체 Ce 기반의 조촉매가 첨가된 H₂-SCR은 유해 가스 저감 성능이 대폭 향상되는 결과를 나타냈다.

키워드 : 수소, 선택적인환원촉매, 질소산화물, 일산화탄소, 세리아

Abstract : This study aims to identify the physical and chemical characteristics of H₂-SCR by adding three types of promoters to the Ce-based support to improve the NO_x and CO harmful gas reduction performance. In the H₂-TPR analysis of six types of H₂-SCR, the peaks generated at 102~251℃ were the main catalysts Pt²⁺ and Pt⁴⁺ reduced to Pt⁰. The temperature difference when the Pt chemical species were reduced is because the strength of the bond between the support Ce and the precious metal Pt changed according to the addition of the promoter material. (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce H₂-SCR exhibited the highest NO_x reduction performance in the temperature range of 100℃ to 325℃, and the main catalyst, cocatalyst, and support were well combined into small particles. This phenomenon enhanced the interaction of the catalyst materials, thereby improving the harmful gas reduction performance of the catalyst. Compared to the support TiO₂ with good oxidation and reduction capabilities, the H₂-SCR with the addition of a Ce-based promoter showed significantly improved harmful gas reduction performance.

Key Words : Hydrogen, Selective Catalytic Reduction, NO_x, Carbon Monoxide, CeO₂

*† 서충길(<https://orcid.org/0000-0003-2205-2111>) : 교수, 호원대학교 자동차기계공학과

E-mail : ckseo@howon.ac.kr, Tel : 063-450-7215

**조상곤(<https://orcid.org/0000-0002-1937-8674>) : 교수, 국립군산대학교 해양·바이오특성화대학 기관공학과

*† 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

**Sang-Gon Cho(<https://orcid.org/0000-0002-1937-8674>) : Professor, Dept. of Marine Engineering, College of Ocean & Bioscience, Kunsan University

1. 서 론

최근 미국 정부는 “파리 기후협약”을 다시 탈퇴하면서 그린 뉴딜(친환경 경제성장 정책)을 종료하고 전기차 의무화를 폐지하겠다고 강조했다. 이산화탄소 배출량이 많은 화석연료 대신 전기자동차(EV)와 수소연료전지전기자동차(FCEV)와 같은 그린에너지로의 전환이 진행되고 있다. 하지만 전기자동차(EV)의 화재와 인프라 부족 및 고가로 인하여 시장의 보급 확산이 더디다. 수소연료전지전기자동차는 수소 생산량이 적고 인프라 부족 및 저장에 관한 문제점을 내포하고 있어서 이를 극복하기 위한 노력들이 절실하다. 작년 말 국내의 자동차 등록 대수 중에 친환경자동차(하이브리드, 전기차, 수소연료전지전기차)가 10.4%를 차지하고 있지만, 아직도 내연기관의 비중이 큰 현실이다. 그러나 내연기관에서 배출되는 유해 가스 중 연소 온도가 높은 조건에서 질소산화물(NOx)이 생성되며, 이는 발암물질로써 엄격하게 규제되고 있다. NOx를 저감시키는 후처리 시스템 중에 SCR(Selective Catalytic Reduction)은 성능이 좋아서 다용되고 있다.¹⁻³⁾

최근에는 향후 상용화될 H₂-엔진 및 가정용 보일러에서 배출되는 유해 가스 저감을 위해 환원제 H₂를 이용한 H₂-SCR 연구가 진행되고 있다. H₂-SCR의 선행 연구는 유해 가스 성능 향상을 위한 귀금속,^{4,5)} 조촉매,^{6,7)} 지지체⁸⁾ 및 공존하는 배출가스에 대한 촉매 반응⁹⁾ 등에 관한 연구들이 진행되어져 왔다. 후처리 촉매의 성능은 제조 방법, 촉매를 구성하는 물질 및 함량 등이 미치는 변수가 많다. H₂-엔진의 양산화를 대비한 H₂-SCR 촉매에 다용되는 지지체 TiO₂ 대신 지지체 CeO₂를 적용하여 유해 가스 저감 성능 향상을 위한 연구는 의의가 있고 차별성이 있다고 할 수 있다. 종래 연구에서 세륨(Ce)은 쉽게 산화되는 성질을 가지고 있어서, 세리아(CeO₂) 산화물 형태로 존재하며 촉매 물질 및 첨가제로 활용되었다. 특히 자동차 배기가스 정화 촉매나 오염 물질 분해 촉매로 사용되었다. 특히, CeO₂는 NOx를 저감시키는 NOx 흡장 촉매(LNT, Lean NOx Trap)에서 산소흡장물

질(OSC, Oxygen Storage Catalyst) 역할을 하면서 NOx 흡장 및 환원 과정에서 중요한 역할을 담당했다.⁹⁻¹¹⁾ 그러나 CeO₂는 서로 다른 입자 크기나 도핑된 CeO₂의 제조 및 연마 공정 재현성을 확보하기 어렵고, 특정 조건에서 Ce⁴⁺가 Ce³⁺로 환원되어 원치 않는 변화인 전자 전도성을 나타내는 단점도 있다.

이 연구는 H₂-SCR의 NOx와 CO 유해 가스 저감 성능 향상을 위해 지지체 CeO₂에 조촉매를 첨가하여 물리·화학적인 특성을 파악하고자 한다.

2. 촉매 제조 및 실험 방법

H₂-SCR은 지지체를 활성 물질이 녹아있는 용액에 담근 후 용매를 증발시켜 활성 물질을 지지체에 담지하는 방법인 함침법(Impregnation method)으로 제조하였다. 지지체 Ce 전구체에 0.75wt% Pt를 담지하였고, 9.25wt%의 조촉매(TiO₂, MgO, Zr precursor)를 담지하였다. 그 후 건조(Drying) 및 밀링(Milling) 작업을 한 후에 촉매 파우더와 증류수를 잘 혼합한 걸쭉한 상태에서 400CPSI(Cell Per Square Inch) 담체(Substrate)에 198 g/L을 코팅하였다. 500℃에서 3시간 동안 공기로 소성(Calcination)하였고, 400℃에서 30분간 H₂ 5%/N₂ bal.로 환원(Reduction) 처리하였다. Fig. 1은 H₂-SCR의 제조 공정도이다.

H₂-SCR의 NOx와 CO의 유해 가스 저감 성능 파악을 위한 모델가스 반응조건은 Table 1과 같다.

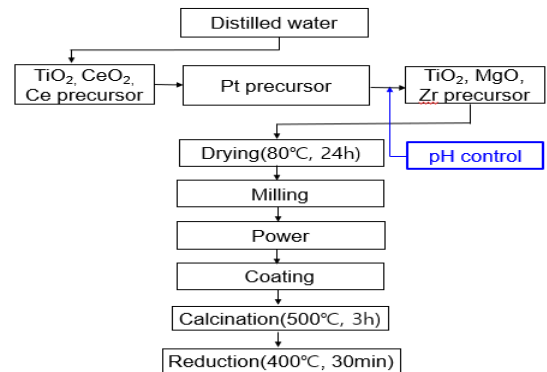


Fig. 1 Diagram of prepared process of H₂-SCR

SV(h⁻¹)는 시간당 처리 가스량(촉매통과 풍량)을 촉매 부피로 나눈 수치이다. 촉매 전단 온도는 75~350℃ 정상 상태(steady state) 조건을 유지하면서 유해 가스 저감 성능을 파악하였다. 촉매의 유해 가스 정화 성능은 아래 식 (1)과 같이 계산하였으며, 촉매 전단에 들어가는 유해 가스(NO_x, CO) 농도 대비 촉매 후단에서 나오는 유해 가스의 농도의 변환율로 구한다. MRU 가스분석기(VarioPlus Industrial, MRU Instruments, Inc.)를 이용하여 1초 간격으로 정량적으로 측정하였다.

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

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

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Ce 기반의 조촉매 첨가에 따른 H₂-SCR의 물리·화학적 특징

Fig. 2는 지지체 종류와 Ce 기반의 조촉매 첨가에 따른 SEM-EDX spectra이다. (1) 0.75Pt/TiO₂(STD) H₂-SCR은 종래 연구에서 사용된 지지체 TiO₂ 기반에 Pt가 0.75wt%가 담지된 촉매이며, 담지량이 많은 Ti의 주피크가 잘 생성되어 있다. (2)와 (3)의 SEM-EDX spectra는 산화물 형태의 CeO₂와 Ce 전구체를 이용하여 0.75wt% Pt가 담지되었을 때의 영향을 파악하기 위한 목적으로 제작된 H₂-SCR이며, 주피크와 보조피크는 동일한 경향을 나타내고 있다. (4)~(6)은 지지체 Ce 기반에 0.75wt% Pt를

담지하고, H₂-SCR 촉매의 유해 가스 저감 성능 향상을 위해 3종의 조촉매(TiO₂, MgO, 및 Zr 전구

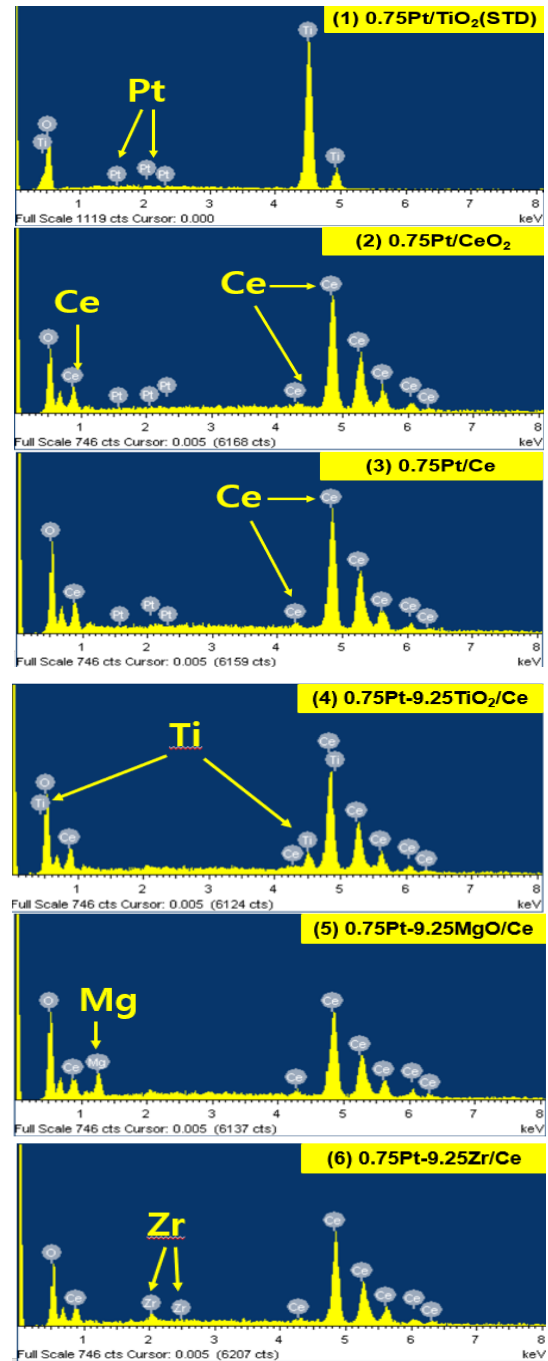


Fig. 2 SEM-EDX spectra according to the Ce-based cocatalyst of H₂-SCR

체)를 담지한 것이다. Ti, Mg 및 Zr 조촉매의 피크가 잘 생성되어 있다.

Table 2는 지지체 Ce 기반 3종의 조촉매가 담지되었을 때의 촉매 파우더에 포함된 원소 성분을 분석하기 위한 X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF, ARL PERFORMX1) 정량적인 데이터이다. (4)~(6)의 H₂-SCR에서 Ce는 91.94~93.50wt%가 분석되었고, 조촉매로 첨가된 Ti, Mg 및 Zr은 4.47~5.08wt%로 분석되었다. 나머지는 양은 산소(O) 원소라고 판단되며, XRF 분석은 나트륨(Na)에서 우라늄(U) 원자까지만 분석이 가능하며, 가스 종류인 O는 검출되지 않는다.

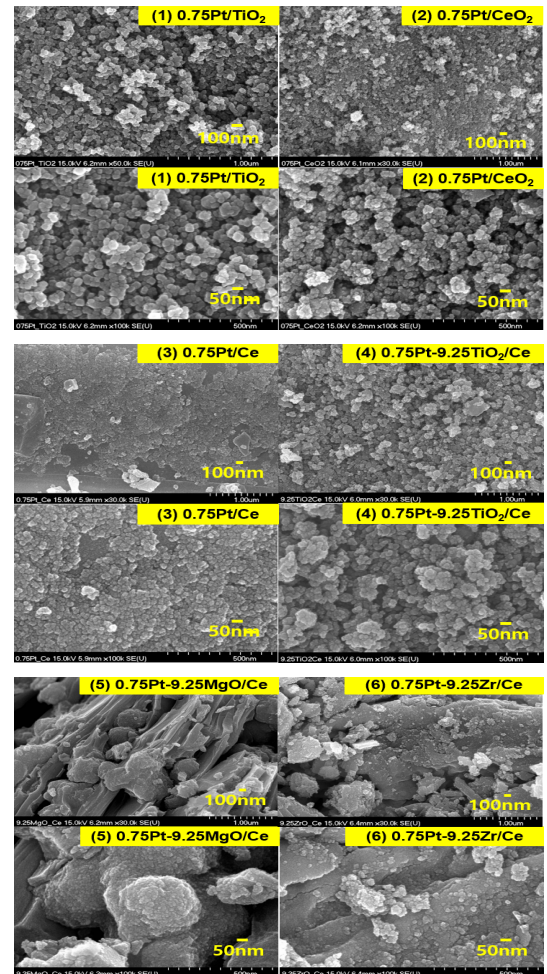
Fig. 3은 6종의 H₂-SCR 촉매의 SEM/TEM (JEM-2000FX II (200 kV), JEOL) 이미지를 나타내고 있다. (2)와 (3)의 H₂-SCR의 SEM 이미지에서 산화물 CeO₂ 기반의 (2) H₂-SCR의 입자는 약 40-60 nm급으로 크지만, (3) 0.75Pt/Ce H₂-SCR의 입자는 10~20 nm급으로 작은 특성을 나타내고 있다. 입자 사이즈가 작으면 세공(pore volume)이 발달되어 촉매의 활성 사이트가 많아진다. (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce H₂-SCR은 지지체와 조촉매가 잘 결합되어 있는 형상을 보여 주고 있다. 입자 사이즈는 약 300 nm급이다. (6) 0.75Pt-9.25Zr/Ce H₂-SCR은 지지체 Ce에 입자가 약 300~500 nm 사이즈급의 Zr가 담지되어 있다. Fig. 3(b)의 TEM 이미지에서 (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce H₂-SCR은 스케일 50 nm 이미지에서는 약 2~5 nm 사이로 잘 분산된 Pt가 관찰이 되며, 이는 촉매의 반응속도를 향상시킬 수 있다. (6) 0.75Pt-9.25Zr/Ce H₂-SCR에서 하단의 50nm 스케일의 이미지에서 보이는 입자는 Pt라고 판단이 되며, 입자가 약 5~10 nm로 응집된 경향을 나타내며 이는 촉매의 반응속도를 저하시킨다.

Table 3은 6종의 H₂-SCR의 BET 비표면적의 물리적인 특성을 나타내고 있다. (1)~(3)의 H₂-SCR에서 지지체 TiO₂보다 지지체 Ce가 첨가될 경우, 51.075 m²/g보다 57.4 m²/g가 더 크다. CeO₂ 산화물 지지체보다도 Ce 전구체로 제조된 (3) 0.75Pt/Ce H₂-SCR이 Pore size가 3.771 nm로 더 작음에 따라, BET 비표면적은 소폭 커진다. (4)~(6)의 H₂-SCR

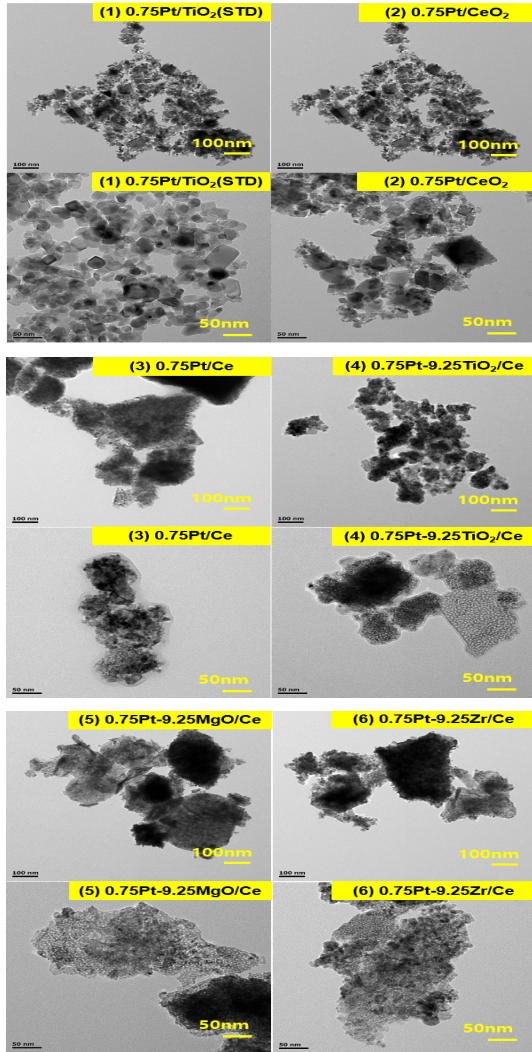
은 촉매의 성능 향상을 위하여 3종의 조촉매가 첨가되었다. (4) 0.75Pt-9.25TiO₂/Ce H₂-SCR은 91.067

Table 2 XRF data of according to the Ce-based cocatalyst of H₂-SCR

Catalyst	Pt(wt%)	Ce (wt%)	X(wt%)
(3) 0.75Pt/Ce	0.470	97.73	-
(4) 0.75Pt-9.25TiO ₂ /Ce	0.546	92.65	Ti(5.06)
(5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce	0.619	93.50	Mg (4.47)
(6) 0.75Pt-9.25Zr/Ce	0.518	91.94	Zr(5.08)



(a) SEM



(b) TEM

Fig. 3 SEM/TEM image according to the Ce-based cocatalyst of H₂-SCR

m²/g으로 6종의 촉매 중 가장 BET 비표면적이 크며, 이는 TiO₂와 Ce간 결합을 통하여 활성 사이트가 많아졌으나, 촉매의 성능은 반응물의 흡착-반응-탈착의 전체 반응속도(reaction rate)가 빨라져야 성능이 향상된다. (5)와 (6)의 H₂-SCR은 조촉매가 첨가됨에 따라 BET 비표면적은 단독 CeO₂ 지지체 기반 H₂-SCR 촉매보다 30.627~36.686 m²/g으로 작아지는 경향을 나타내고 있다.

Table 3 Physical specification of H₂-SCR

Catalyst	BET (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Pore size(nm)
(1) 0.75Pt/TiO ₂	51.075	0.127	10.012
(2) 0.75Pt/CeO ₂	57.265	0.165	11.533
(3) 0.75Pt/Ce	57.498	0.054	3.771
(4) 0.75Pt-9.25TiO ₂ /Ce	91.067	0.101	4.439
(5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce	36.686	0.046	5.059
(6) 0.75Pt-9.25Zr/Ce	30.627	0.030	3.936

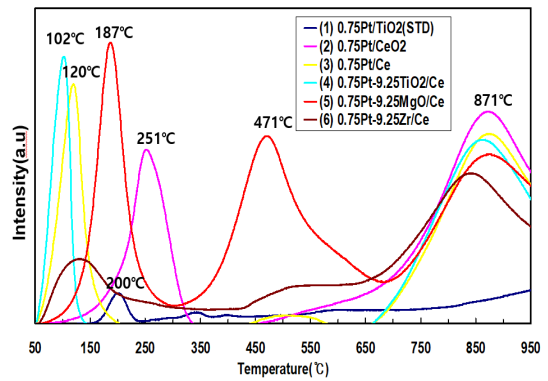


Fig. 4 H₂-TPR profile according to the the according to the Ce-based cocatalyst of H₂-SCR

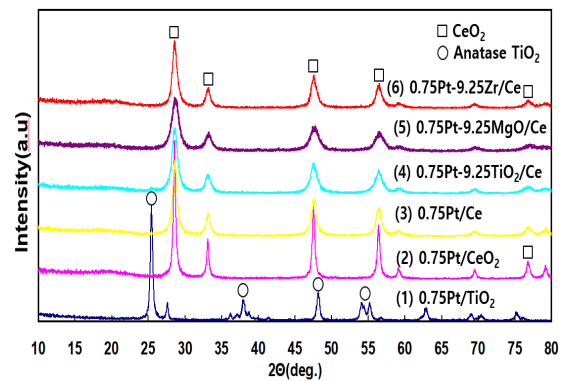


Fig. 5 XRD spectra according to the according to the Ce-based cocatalyst of H₂-SCR

Fig. 4는 H₂-SCR의 Ce 기반의 조촉매 첨가에 따른 H₂-TPR(Temperature Programmed Reduction,

BEL-CAT)을 나타내고 있다. H₂-TPR은 촉매의 산화 환원 특성 분석으로 촉매 물질의 환원 온도 분포와 H₂ 양으로부터 환원 정도를 관찰할 수 있는 분석법이다. 102~251℃에서 생성된 피크는 주촉매 Pt²⁺, Pt⁴⁺가 Pt⁰로 환원되었다. (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce H₂-SCR은 187℃에서 생성된 피크가 높고 넓은 영역을 나타내고 있어서 활성 중 Pt* 종이 발달되어 촉매의 활성을 증가시킬 수 있다. 또한 471℃에서 생성된 피크는 MgO가 환원되며, 871℃에서 생성된 피크는 지지체 Ce가 환원되었다고 할 수 있다. 102~251℃에서 Pt 화학종이 환원되면서 온도 차이가 나는 것은 조촉매 물질 첨가에 따른 지지체 Ce와 귀금속 Pt와의 결합의 세기가 달라짐에 따라 환원되는 온도가 차이가 있는 것이다.

Fig. 5는 H₂-SCR의 Ce 기반의 조촉매 첨가에 따른 XRD(EMPYREAN) 분석 자료를 나타내고 있다. (1) 0.75Pt/TiO₂는 26°, 38°, 48°에서 생성된 피크는 TiO₂ 결정 구조를 잘 나타내고 있다. (2) 0.75Pt/CeO₂ H₂-SCR은 28°, 33°, 48°, 57°에서 생성된 피크는 지지체 CeO₂ 결정 구조를 잘 나타내고 있다. (3)~(6)은 지지체 Ce 전구체에 주촉매와 조촉매를 첨가한 H₂-SCR의 XRD 결정 구조를 잘 나타내고 있다. 0.75wt% Pt와 조촉매 첨가에 따른 주/보조피크는 확인이 어렵다. 그러나 지지체 CeO₂ 산화물에 제조된 (2) 0.75Pt/CeO₂ H₂-SCR에 비해 (3)~(6)의 H₂-SCR은 28°, 33°, 48°, 57°에서 생성된 주피크와 보조피크가 낮은 경향을 나타내고 있다. 이는 산화물 지지체 CeO₂가 지지체 Ce 전구체 기반보다 중량이 많아서 주피크와 보조피크가 높은 것이다.

3.2 H₂-SCR의 pH 지수에 따른 유해 가스 저감 특성

식 (2)~(6)은 유해 가스 NO와 CO의 산화와 환원반응을 나타내고 있다.

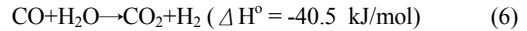
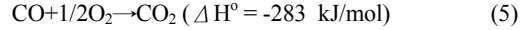
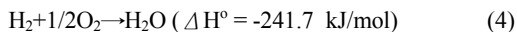
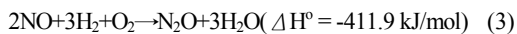
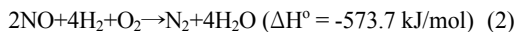


Fig. 6은 H₂-SCR의 지지체 Ce 기반의 조촉매 첨가에 따른 유해 가스 거동을 나타내고 있다. 6 종류의 H₂-SCR에서 NO₂ 가스는 (2) 0.75Pt/CeO₂ H₂-SCR은 촉매온도 150~175℃에서는 NO가 환원되지 못하고 탈착되면서 (-) NO_x 전환율을 나타내고 있다. 지지체 CeO₂ 산화물은 세륨(Ce)이 산소(O₂)와 반응하여 안정적인 중성 화합물로서, 이는 화학 반응의 활성이 저하될 수 있다. (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce H₂-SCR은 175℃에서 약 300 ppm 수준까지 떨어지면서, 촉매 온도 전체 영역대에서 NO 가스 감소 폭이 크고 윈도우가 넓다.

Fig. 7은 H₂-SCR의 Ce 기반의 조촉매 첨가에 따른 NO_x/CO 전환율을 나타내고 있다. 산화물 CeO₂ 지지체 기반의 (2) 0.75Pt/CeO₂ H₂-SCR은 NO_x 전환율이 가장 낮다. 3종류의 조촉매가 첨가된 (4)~(6)번 H₂-SCR은 조촉매가 전혀 첨가 안된 (3) 0.75Pt/Ce H₂-SCR보다 100~200℃에서 NO_x 전환율이 상승하였고, 125℃ 이하 저온에서도 활성화되었다. 그 중 (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce H₂-SCR은 100~325℃ 온도 영역까지 가장 높은 NO_x 저감 성능을 나타내고 있다. 이는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 촉매 물질들이 작은 입자로 잘 결합되어 상호작용(interaction) 향상으로 촉매의 활성이 향상되었다. Fig. 7(b)는 6종의 H₂-SCR의 CO 전환율

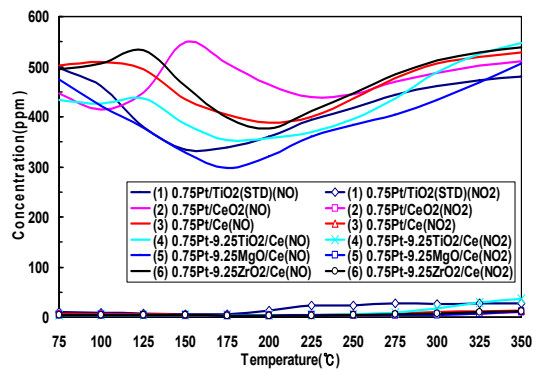


Fig. 6 Gas behaviour according to the Ce-based cocatalyst of H₂-SCR

을 나타내고 있다. NO_x 전환율과 동일하게 (2) 0.75Pt/CeO₂ H₂-SCR이 CO 전환율이 가장 낮다. 그 다음으로 (3) 0.75Pt/Ce H₂-SCR 촉매가 175℃ 이상 온도에서 CO의 유해 가스 저감 성능이 낮은 편이다. (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce H₂-SCR이 125℃ 이상 온도 CO 전환율이 가장 높은 편이며, NO_x/CO의 유해 가스 저감 성능을 고려할 때 지지체 Ce 기반에 MgO 조촉매가 첨가될 때 NO_x와 CO 저감 성능이 가장 우수하다.

Fig. 8은 지지체 Ce 기반의 조촉매 첨가에 따른 H₂-SCR의 O₂ 소모율을 나타내고 있다. NO_x와 CO의 환원과 산화 반응에는 필수적으로 O₂가 필요하며, O₂ 소모율은 NO_x와 CO 저감 성능과 연관이 되어 있다. Fig. 8에서 (2) 0.75Pt/CeO₂ H₂-SCR은 175℃에서 약 2.5%의 O₂ 소모율을 나타내며, 350℃에서 약 8.5%의 가장 낮은 O₂ 소모율을 나

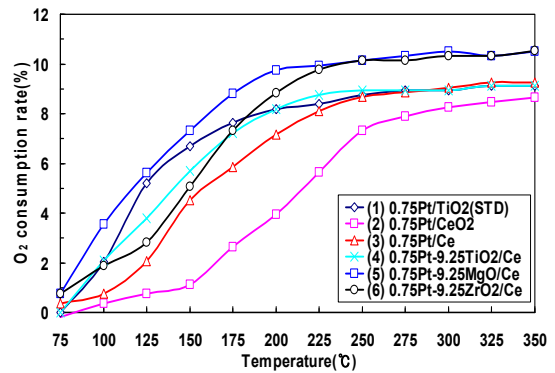


Fig. 8 O₂ consumption rate according to the according to the Ce-based cocatalyst of H₂-SCR

타내고 있다. (3) 0.75Pt/Ce H₂-SCR은 산화물 지지체 CeO₂보다 온도 전체 영역에서 약 0.5~3%의 O₂ 소모율이 향상되고 있다. 조촉매 9.25wt%가 첨가된 (4)~(6)의 3종의 H₂-SCR은 (3) 0.75Pt/Ce H₂-SCR보다 O₂ 소모율이 향상되는 경향을 나타내고 있다. 그 중 (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce H₂-SCR은 75~325℃에서 (1) 0.75Pt/TiO₂(STD) H₂-SCR 보다 O₂ 소모율이 0.54~1.5% 높으며, 유해 가스의 산화·환원 반응이 향상되었다고 할 수 있다.

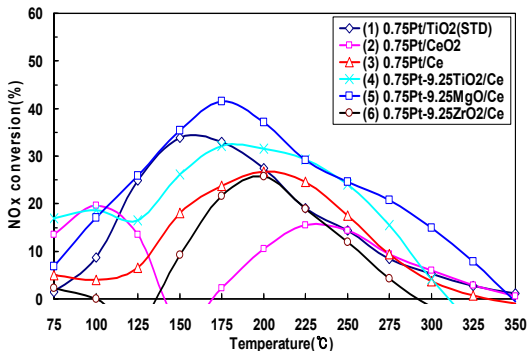
4. 결 론

H₂-SCR의 NO_x와 CO 유해 가스 저감 성능 향상을 위해 지지체 Ce 기반에 조촉매를 첨가하여 물리·화학적 특성을 파악하였다.

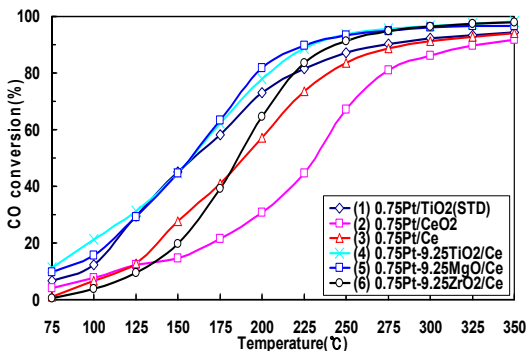
1) H₂-SCR의 H₂-TPR 분석에서 102~251℃에서 생성된 피크는 주촉매 Pt²⁺, Pt⁴⁺가 Pt⁰로 환원되었다. Pt 화학종이 환원되면서 온도 차이가 나는 것은 조촉매 첨가에 따른 지지체 Ce와 귀금속 Pt와의 결합의 세기가 달라졌기 때문이다.

2) (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce H₂-SCR이 100~325℃ 온도 영역까지 NO_x 저감 성능이 높았고, CO 전환율 또한 125℃ 이상에서 가장 높았다. 촉매 물질 간 상호작용(interaction) 촉진으로 촉매의 유해 가스 저감 성능이 향상되었다.

3) Ce 기반의 조촉매가 첨가된 H₂-SCR이 유해 가스 저감 성능이 향상되었고, 향후 조촉매 MgO



(a) NO_x conversion



(b) CO conversion

Fig. 7 De-NO_x/CO performance according to the Ce-based cocatalyst of H₂-SCR

의 함량에 따른 유해가스 저감 성능 및 내구성에 관하여 연구할 계획이다.

후 기

이 연구는 호원대학교 교내연구비로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

Author contributions

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

References

1. H. Sjövall, R. Blint and L. Olsson, 2009, "Detailed kinetics modeling of NH_3 SCR over Cu-ZSM-5", *Applied Catalysis b: Environmental*, 92(1-2), 138-153.
(<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.07.020>)
2. P. S. Metkar, V. Balakotaiah and M. P. Harold, 2011, "Experimental study of mass transfer limitations in Fe- and Cu-zeolite-based NH_3 -SCR monolithic catalysts", *Chemical Engineering Science*, 66(21), 5192-5203.
(<https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.07.014>)
3. A. F. Suarez-Corredor, M. U. Babler, L. Olsson, M. Skoglundh and B. Westerberg, 2022, "Understanding the NH_3 adsorption mechanism on a vanadium-based SCR catalyst: A data-driven modeling approach", *Chemical Engineering Science*, 262(23), 117975.
(<https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.117975>)
4. L. Cao, Q. Wang and J. Yang, 2020, "Ultrafine Pt particles directed by polyvinylpyrrolidone on zeolite beta as an efficient low-temperature H_2 -SCR catalyst", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 103631.
(<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103631>)
5. 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.2020.155040>)
6. 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/10.1017/s12239-024-00088-6>)
7. X. Zhang, X. Wang, X. Zhao, Y. Xu, Y. Liu and Q. Yu, 2015, "Promotion effect of tungsten on the activity of Pt/HZSM-5 for H_2 -SCR", *Chemical Engineering Journal*, 260, 419-426.
(<https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.030>)
8. 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(4), 745-754.
(<https://doi.org/10.1017/s12239-024-00088-6>)
9. C. K. Seo, 2017, "Effect of CeO_2 Addition on De- CH_4 and NOx Performance", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 18(9), 473-479.
(<https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.9.473>)
10. R. You, Y. Zhang, D. Liu, M. Meng, Z. Jiang, S. Zhang and Y. Huang, 2015, "A Series of Ceria Supported Lean-Burn NOx Trap Catalysts $\text{LaCoO}_3/\text{K}_2\text{CO}_3/\text{CeO}_2$ using Perovskite as Active Component", *Chemical Engineering Journal*, 260, 357-367.
(<https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.016>)
11. H. J. Kim, M. J. Kim, S. J. Lee, I. S. Ryu, K. B. Yi and S. G. Jeon, 2018, "Effect of the Preparation Method on the Activity of CeO_2 -promoted Co_3O_4 Catalysts for N_2O Decomposition", *Clean Technology*, 24(3), 198-205.
(<https://doi.org/10.7464/ksct.2018.24.3.198>)