

함침법과 공침법에 따른 H₂-SCR의 반응 특성

Reaction Characteristics of H₂-SCR according to the Impregnation and Co-precipitation Methods

서충길* †
Choong-Kil Seo

(Received 09 July 2025, Revision received 21 August 2025, Accepted 22 August 2025)

초록 : 이 연구는 H₂-SCR의 유해 가스 저감 성능 향상을 위해 함침법과 공침법에 따른 물리·화학적인 특성을 파악하는 것이다. H₂-TPR 분석에서 102~350℃에서 생성된 피크는 주촉매 PtO 산화물에서 Pt^x로 환원되었다. 공침법으로 제조된 (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce(CP) H₂-SCR은 329℃에서 생성된 피크는 다른 H₂-SCR에 비해 피크가 낮고 완만하게 생성되었고, 이는 PtO는 결합의 세기가 커져서 조금 더 높은 온도에서 환원되었다. (3) 0.75Pt-9.25Zr/Ce(IM) H₂-SCR은 125℃에서 표면에서 흡착된 NOx가 탈착되면서 (-) NOx 전환율을 나타냈고, 200℃에서 약 25%의 가장 낮은 NOx 저감 성능을 나타냈다. (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce(CP) H₂-SCR은 100℃와 125℃에서 NOx 전환율은 약 39%와 56%의 가장 높은 NOx 저감 성능을 나타냈다. 공침법으로 제조된 (4)~(6) H₂-SCR은 주촉매, 조촉매, 지지체 간에 결합이 작은 사이즈로 분산이 잘 되었고, 산화물 지지체의 결합 구조가 잘 형성되었다.

키워드 : 수소, 선택적인환원촉매, 질소산화물, 함침법, 공침법

Abstract : This study is to identify the physical and chemical characteristics according to the impregnation and co-precipitation methods to improve the harmful gas reduction performance of H₂-SCR. In the H₂-TPR analysis, the peak generated at 102~350℃ was reduced from the main catalyst PtO oxide to Pt^x. (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce(CP) H₂-SCR manufactured by the co-precipitation method showed a peak generated at 329℃ that was lower and more gentle than that of other H₂-SCRs, which means that PtO was reduced at a slightly higher temperature due to its increased bond strength. (3) 0.75Pt-9.25Zr/Ce(IM) H₂-SCR showed a (-) NOx conversion rate as the NOx adsorbed on the surface was desorbed at 125℃, and showed the lowest NOx reduction performance of approximately 25% at 200℃. (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce(CP) H₂-SCR showed the highest NOx reduction performance of about 39% and 56% in NOx conversion at 100℃ and 125℃, respectively. (4)-(6) H₂-SCR manufactured by the Co-precipitation method showed that the bonds between the main catalyst, co-catalyst, and support were well dispersed with a small size, and the bonding structure of the oxide support was well formed.

Key Words : Hydrogen, Selective Catalytic Reduction, NOx, Impregnation Method, Co-precipitation

* † 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 이상기온, 열대야, 한파, 호우, 폭설, 가뭄 등 이상기후가 빈번하게 발생하고 있으며, 지구온난화와 연관되어 있다. 화석에너지원의 사용 비중이 높기 때문에 이로 인하여 배출된 가스가 인체의 폐해와 대기의 질을 악화시키고 있다.¹⁾ 최근 미국 정부는 “파리기후협약”을 다시 탈퇴하면서 미국 주도의 에너지 및 환경 정책을 추진하지만, 탄소를 저감하는 정책과 기술은 아무리 강조해도 부족함이 없다. 전기자동차(EV)와 연료전지 전기자동차(FCEV)로 파워트레인의 전환이 진행되고 있다. 최근에는 전기자동차의 화재와 인프라 부족 등으로 보급률이 주춤하고 있으며, 하이브리드 전기자동차(Hybrid Electric Vehicle) 판매가 증대되고 있다. 국내의 내연기관 자동차의 비중은 약 90% 이상을 차지하고 있으며, 건설기계, 선박, 농기계 및 보일러 등에 대한 배기가스 규제가 더욱더 강화되고 있다. EC(European Commission)는 Euro 7 배기가스 규정을 제안하였고, 새로운 차량량에 대해서는 2025년도 7월 1일에, 대형 차량에 대해서는 2027년 7월 1일에 발효된다.²⁾

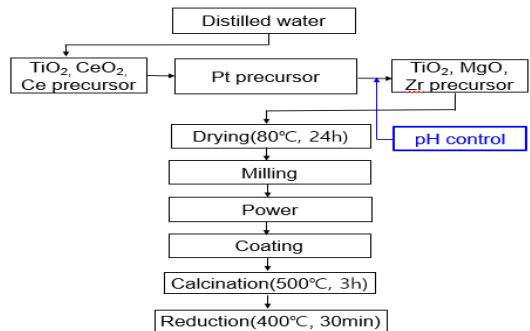
질소산화물(NOx)은 내연기관에서 배출량이 많으며, 연소온도가 높은 조건에서 배출되는 유독성 물질로서 강력한 후처리 촉매시스템은 SCR(Selective Catalytic Reduction)³⁻⁵⁾이 사용되고 있다. 최근 청정 에너지원인 수소(Hydrogen)에 관한 제조, 생산 및 활용에 관한 연구개발이 활발하게 진행되고 있으며, 그중 H₂-SCR은 배출가스가 낮은 내연기관이나 향후 상용화될 H₂-엔진에서 배출되는 유해가스 저감용으로 활용될 수 있다.

지금까지의 연구 동향은, 환원제 H₂가 이용하여 NOx 저감 성능을 향상시키는 연구가 진행되어 왔다. H₂-SCR 촉매의 성능 향상을 위해 주촉매(main catalyst),^{6,7)} 안정제(promoter),^{8,9)} 지지체(support)¹⁰⁾ 및 반응 메커니즘 등에 관하여 선행 연구가 이루어져 왔다. 촉매의 유해 가스 성능 및 내구성 향상을 위한 변수는 다양하다. 그중 촉매 제조법이 반응 특성에 미치는 연구가 진행되어 왔다. 촉매 제조법에는 여러 가지가 있지만, 주로 실험실 규

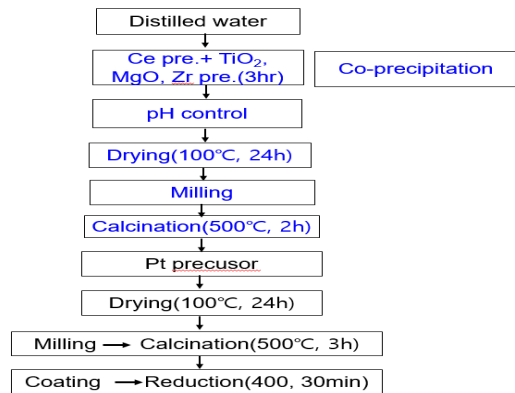
모에서는 지지체를 활성 물질이 녹아 있는 용액에 담근 후 용매를 증발시켜 활성 물질을 지지체에 담지하는 방법인 함침법(Impregnation method)을 이용하여 촉매를 제조해 왔다.¹⁾ 또한 2개 이상의 금속이온이 포함된 침전물 전구체가 동시에 동일하게 침전되도록 하는 처리법이 공침법(Co-precipitation)이며, 촉매 활성을 위해 연구되어져 왔다.^{11,12)} H₂-SCR의 촉매의 활성을 개선시키기 위해 귀금속이 담지되는 지지체 제조를 위해 공침법을 적용해 보는 것은 의의가 있다.

이 연구의 목적은 유해 가스 저감 성능 향상을 위하여 함침법과 공침법으로 제조된 H₂-SCR의 유해 가스 물리·화학적 반응 특성을 파악하고자 한다.

2. 촉매 제조 및 실험 방법



(a) Impregnation method



(b) Co-precipitation

Fig. 1 Catalyst manufacturing process diagram

Fig. 1은 H₂-SCR의 합침법과 공침법의 제조 공정도이다. Fig. 1(a)는 합침법으로 제조된 0.75Pt-9.25X/Ce(IM) H₂-SCR이다. 지지체 Ce 전구체 (Sigma-Aldrich, Cerium(III) nitrate hexahydrate)에 0.75wt% Pt를 담지하였고, 9.25wt%의 조촉매(TiO₂: DegussaTiO₂, MgO: Sigma-Aldrich, Magnesium oxide, Zr: Sigma-Aldrich, Zirconyl nitrate hydrate)를 담지하였다. 그 후 건조(Drying) 및 밀링(Milling) 작업을 한 후에 slurry 상태에서 400CPSI(Cell Per Square Inch) 담체(Substrate)에 198g/L을 코팅하였다. 500℃에서 3시간 동안 공기로 소성(calcination) 하였고, 400℃에서 30분간 H₂ 5%로 환원(reduction) 처리하였다. Fig. 1(b)는 공침법의 제조 공정도이며, 합침법과의 차이점은 금속 이온들을 동시에 공침하여 산화물 지지체(oxide support)를 제조하였다. 그후 귀금속 Pt를 합침, 건조, 밀링, 코팅, 소성 및 환원처리 과정을 거쳤다.

H₂-SCR의 NO_x와 CO의 전환율을 파악을 위한 모델가스반응조건을 Table 1에 나타내었다. 가스 구성은 H₂-엔진 및 가정용 보일러에서 배출되는 가스를 근거로 설정하였다. 촉매 전단 온도는 75~350℃ 정상 상태 (steady state) 조건을 유지하면서 화학 반응 특성을 파악하였다. 촉매의 NO_x와 CO의 전환율은 아래 식(1)과 같고, 촉매 전단에 들어가는 유해 가스(NO_x, CO) 농도 대비 촉매 후 단에서 나오는 유해 가스의 농도의 변환율로 구한다. 분석기로는 MRU 가스분석기(VarioPlus Industrial, MRU Instruments, Inc.)를 이용하여 1초 간격으로 정량·정성적으로 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 H₂-SCR의 합침법과 공침법의 제조에 따른 물리·화학적 특성

Fig. 2는 H₂-SCR의 합침법과 공침법에 따른 SEM-EDX(JSM-7500F+EDS, Oxford)를 나타내고 있다. H₂-SCR은 Ce 기반 지지체에 Pt와 3종류의 조촉매를 첨가하되, 합침법과 공침법으로 제조하였다. 기존 합침법으로 제조된 (1)~(3) H₂-SCR(IM)은 Ce 기반 지지체에서 Ti, Mg, Zr 조촉매의 주피크/보조피크에서 잘 생성되어 있다. 미량의 0.75wt%의 Pt의 피크는 확인이 되지 않고 있다. 반면에 공침법으로 제조된 (4)~(6) H₂-SCR(CP)은 조촉매 Ti, Mg, Zr 첨가에 따른 주피크/보조피크에서 잘 생성되어 있다. 미량의 0.75wt%의 Pt의 피크도 확인이 되고 있으며, 이는 공침법으로 제조됨에 따라 귀금속 Pt 분산도가 향상되었기 때문이다.

Fig. 3은 합침법과 공침법에 따른 H₂-SCR의 SEM/TEM(JEM-2000FX II (200kV), JEOL) 이미지를 나타내고 있다. Fig. 3(a)에서 (1)~(3)의 H₂-SCR의 SEM 이미지는 합침법으로 제조된 촉매로서, (4)~(6)의 H₂-SCR에 비해 촉매 물질 입자들이 크고 분리된 것 같은 이미지를 나타내고 있다. (4)~(6)의 H₂-SCR(CP)의 이미지는 입자들이 작은 편이며, 잘 분산된 이미지를 나타내고 있다. 분산이 잘되면 촉매 활성이 향상될 수 있다. Fig. 3(b)는 3차원 분석인 TEM 이미지를 보면, (1)~(3)의 합침법은 Ce 지지체와 촉매 물질 간의 분리된 경향을 나타내고 있으며, (2), (3) H₂-SCR은 3~10 nm 사이즈의 Pt가 담지되어 있다. 공침법으로 제조된 (4) H₂-SCR은 Ce와 TiO₂가 잘 결합된 산화물 지지체에 담지된 Pt가 확인이 가능하다. (5) H₂-SCR은 Ce와 20~30 nm급으로 MgO가 결합된 산화물 지지체에 작은 사이즈의 Pt가 담지되어 있다. SEM/TEM 이미지에서 합침법으로 제조된 (1)~(3) H₂-SCR은 지지체와 촉매 물질 간 입자가 크고 분리된 경향을 나타낸다. 반면에 공침법으로 제조된

(4)~(6) H₂-SCR은 주촉매, 조촉매, 지지체 간에 결합이 작은 사이즈로 분산이 잘 되어 있고, 산화물 지지체의 결합 구조가 잘 형성된 경향을 나타

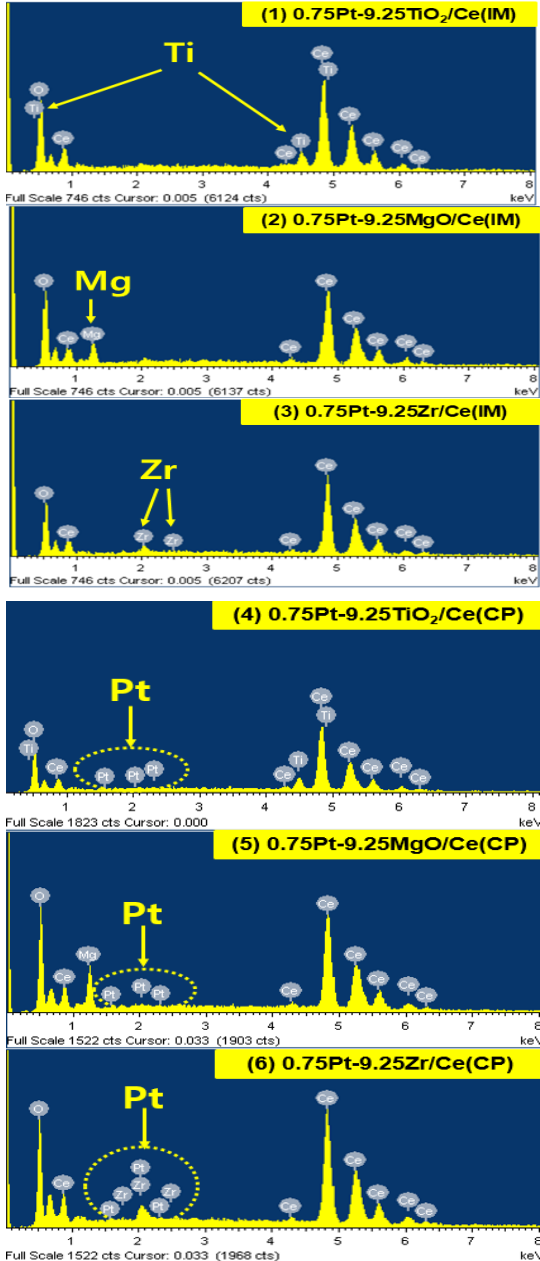
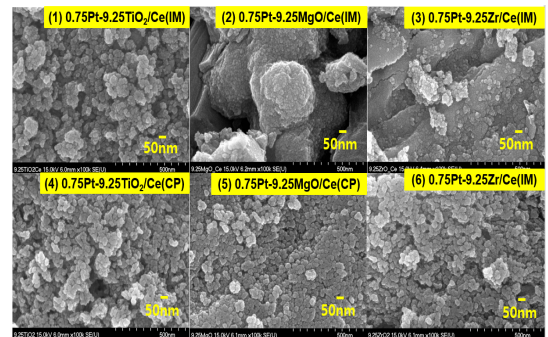
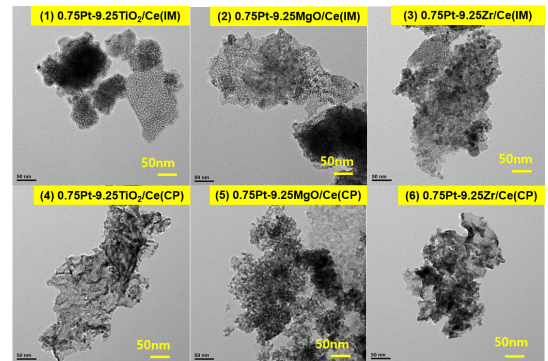


Fig. 2 SEM-EDX spectra according to the impregnation and Co-precipitation methods of H₂-SCR

내고 있다. Table 2는 함침법과 공침법을 이용한 H₂-SCR의 BET 비표면적(ASAP 2020, Micromeritics Instruments Corp, USA)의 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)의 H₂-SCR(IM)의 경우, BET 비표면적이 91.067 m²/g으로 가장 크고, pore size도 4.439 nm로 작은 편이다. (2)와 (3) H₂-SCR(IM)의 경우, BET 비표면적은 36.686, 30.627 m²/g을 나타내고 있다. 그에 비해 공침법으로 제조된 (4)~(6) H₂-SCR(CP)의 BET 비표면적은 62.459~65.544 m²/g으로 (1) H₂-SCR(IM)을 제외하고 전반적으로 함침법으로 제조된 H₂-SCR에 비해 비표면적이 대폭 증가한 경향을 나타내고 있다. BET 비표면적이 증가하면, 활성사이트(Active site)가 많아져 촉



(a) SEM



(b) TEM

Fig. 3 SEM/TEM image according to the catalyst manufacturing method

Table 2 Physical specification of H₂-SCR

Catalyst	BET (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Pore size(nm)
(1) 0.75Pt-9.25TiO ₂ /Ce(IM)	91.067	0.101	4.439
(2) 0.75Pt-9.25MgO/Ce(IM)	36.686	0.046	5.059
(3) 0.75Pt-9.25Zr/Ce(IM)	30.627	0.030	3.936
(4) 0.75Pt-9.25TiO ₂ /Ce(CP)	62.459	0.194	12.241
(5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce(CP)	60.526	0.0951	6.285
(6) 0.75Pt-9.25Zr/Ce(CP)	65.544	0.264	16.135

매의 성능향상에 기여할 수 있다. 전반적으로 함침법에 비해 공침법으로 제조된 H₂-SCR은 pore size는 소폭 크지만, pore volume이 크고 결과적으로는 BET 비표면적은 증가한다.

Fig. 4는 H₂-SCR의 함침법과 공침법에 따른 H₂-TPR(Temperature Programmed Reduction, BEL-CAT)을 나타내고 있다. H₂-TPR은 촉매의 환원 특성 분석으로 촉매 물질의 환원 온도 분포와 H₂ 양으로부터 환원 정도를 관찰할 수 있는 분석법이다. 102~350℃에서 생성된 피크는 주촉매 PtO 산화물에서 Ptx로 환원되었다. (5) 0.75Pt-9.25 MgO/Ce

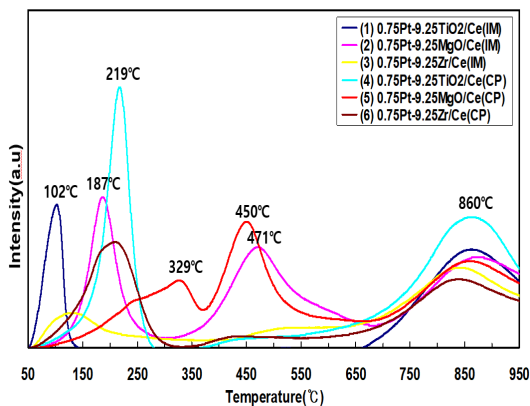


Fig. 4 H₂-TPR profile according to the impregnation and Co-precipitation methods of H₂-SCR

(CP) H₂-SCR은 329℃에서 생성된 피크는 다른 H₂-SCR에 비해 피크가 낮고 완만하게 환원되는 경향을 나타내고 있다. 공침법으로 제조된 산화물 지지체 위에 형성된 PtO의 결합의 세기가 커지므로 인하여, 다른 H₂-SCR에 비해 조금 더 높은 온도에서 환원되었다. 또한 450~471℃에서 생성된 피크는 조촉매 MgO가 환원되며, 약 860℃에서 생성된 피크는 지지체 CeO₂가 환원되었다고 할 수 있다.

Fig. 5는 H₂-SCR의 함침법과 공침법에 따른 XRD(EMPYREAN) 분석 자료이며, XRD는 물질의 결정 구조를 조사하는데 유용하다. (1) 0.75Pt-9.25 TiO₂/Ce(IM) H₂-SCR에서 26°, 38°, 48°, 55°에서 생성된 피크는 TiO₂ 결정 구조를 나타내는데, 함량이 10wt% 이하의 함량으로 제조된 TiO₂의 주피크/보조피크는 확인되지 않는다. (2) 0.75Pt-9.25MgO/Ce(IM) H₂-SCR에서 42°, 61°, 78°, 생성된 피크는 MgO이나 주피크/보조피크를 확인할 수 없다. 공침법으로 제조된 (4)~(6) H₂-SCR의 경우에도 10wt% 이하로 첨가된 조촉매 3종에 대한 주피크/보조피크는 확인이 어렵다. 90wt% CeO₂ 지지체는 함량이 많은 관계로 28°, 33°, 47°, 57°에서 생성된 주피크/보조피크는 함침법과 공침법으로 제조된 H₂-SCR에서 동일하게 나타났다. 촉매 제조법에 따른 담지량이 많은 주 지지체 물질의 결정 구조는 변하지 않았다고 할 수 있다.

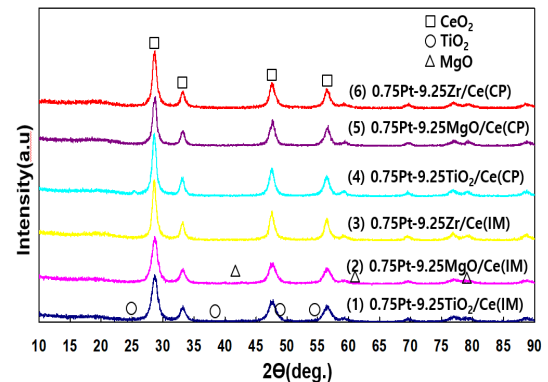


Fig. 5 XRD spectra according to the impregnation and Co-precipitation methods of H₂-SCR

3.2 H₂-SCR의 함침법과 공침법에 따른 유해 가스 저감 특성

이 절에서는 함침법과 공침법 제조된 H₂-SCR의 유해 가스 저감 성능을 파악하고자 한다. Fig. 6은 H₂-SCR의 유해 가스 질소산화물(NO_x), 일산화탄소(CO)의 동시 저감 메커니즘을 나타내고 있다. 소량으로 담지된 백금(Pt)은 O₂가 있는 연소 분위기에서 NO와 CO를 산화시키며, NO는 질산염(nitrate)으로 흡장된 뒤 환원제 H₂가 공급될 때 환원이 된다. 환원제 H₂는 저온에서도 spillover가 되므로 NO_x를 저감시킬 수 있다.

Fig. 7은 H₂-SCR의 Ce 지지체에 조촉매 첨가에 따른 유해가스 거동을 나타내고 있다. 함침법과 공침법으로 제조된 H₂-SCR에서 NO₂ 가스는 약 10 ppm 이하로 생성되어서 데이터에는 나타나지 않았다. 일산화질소(NO) 가스는 촉매 온도에 따라 환원되는데, 125~150℃에서 NO 저감 능력이 크다. NO 농도는 230~620 ppm 밴드에서 거동되며,

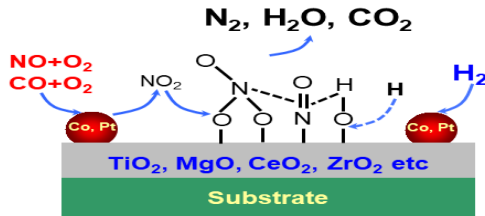


Fig. 6 Mechanism of simultaneous harmful gas reduction of H₂-SCR¹³⁾

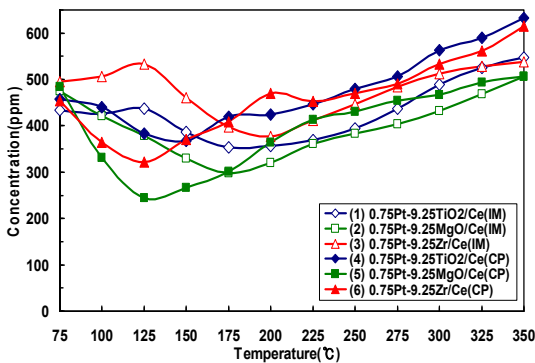
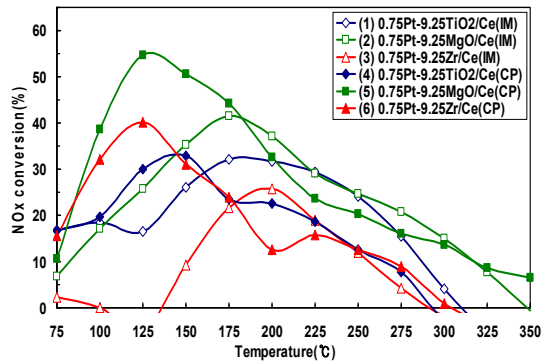


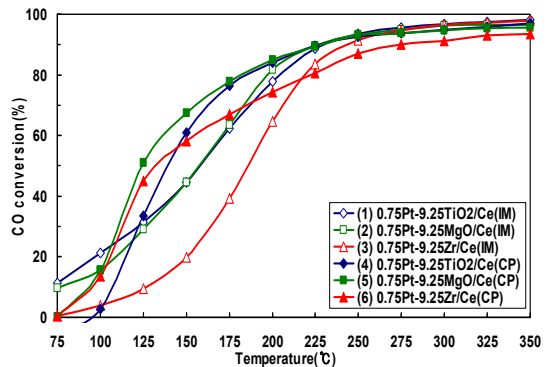
Fig. 7 Gas behaviour according to the impregnation and Co-precipitation methods of H₂-SCR

(5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce(CP) H₂-SCR의 NO 가스의 감소 폭이 크고, 저온 영역에서 활성이 좋다.

Fig. 8은 함침법과 공침법에 따른 H₂-SCR의 유해 가스 저감 성능을 나타내고 있다. (3) 0.75Pt-9.25Zr/Ce(IM) H₂-SCR은 125℃에서 (-) NO_x 전환율을 나타내고 있으며, 200℃에서 약 25%의 가장 낮은 NO_x를 저감시키고 있다. Zr은 선행연구에서 촉매의 산점(Acid site)의 세기의 조절 및 열적 내구성을 향상시키는 촉매 물질이다. 반면에 공침법으로 제조된 (6) 0.75Pt-9.25Zr/Ce(CP) H₂-SCR은 125℃에서 약 40%의 NO_x를 저감시키며, 윈도우폭 또한 대폭 확대되었다. (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce(CP) H₂-SCR은 100℃와 125℃에서 NO_x 전환율은 약 39%와 56%의 가장 높은 NO_x 저감 성능을 나타



(a) NO_x conversion



(b) CO conversion

Fig. 8 De-NO_x/CO performance according to the impregnation and Co-precipitation methods of H₂-SCR

내고 있다. 전체적인 경향을 볼 때 함침법과 공침법으로 제조된 H₂-SCR의 NO_x 저감 성능은 공침법이 대폭 향상된 특성을 확인할 수 있다. BET 비표면적 등과 같은 물리적인 측면과 유해 가스 NO_x와 CO의 흡착-반응-탈착의 전체 반응속도 (reaction rate)가 향상되었기 때문이다. Fig. 8(b)의 CO 전환율을 보면, (3) 0.75Pt-9.25Zr/Ce(IM) H₂-SCR이 촉매 온도 200℃에서 약 65%의 CO 전환율을 나타내고 있으며, 윈도우 폭도 가장 좁다. 반면에 공침법으로 제조된 (4)~(6)의 H₂-SCR은 함침법으로 제조된 (1)~(3) H₂-SCR에 비해 CO 저감 성능이 향상되며, 윈도우 또한 확대되는 경향을 나타내고 있다. 그중 (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce(CP) H₂-SCR의 CO 가스 저감 성능이 125℃ 이상에서 가장 높다.

Fig. 9는 함침법과 공침법에 따른 H₂-SCR의 O₂ 소모율을 나타내고 있다. NO_x와 CO의 산화와 환원 반응에는 O₂가 필요하며, O₂ 소모율은 NO_x와 CO 저감 성능과 연관이 되어 있다. Fig. 9에서 함침법으로 제조된 H₂-SCR에서 (1)과 (3) H₂-SCR(IM)이 촉매 온도 100~200℃까지 O₂ 소모율이 8.7% 이하로 가장 낮다. 반대로 산화물 지지체를 공침한 (4)~(6)의 H₂-SCR(CP) 촉매들은 함침법 3종류의 촉매들보다 전체온도 영역에서 약 1~3%의 O₂ 소모율이 높고, 유해 가스 NO_x와 CO의 산화환원 반응을 향상시켰다고 판단한다.

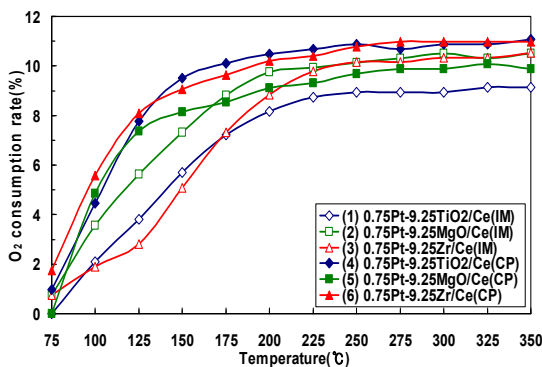


Fig. 9 O₂ consumption rate according to the impregnation and Co-precipitation methods of H₂-SCR

4. 결 론

유해 가스 저감 성능 향상을 위하여 함침법과 공침법으로 제조된 H₂-SCR의 유해 가스 반응 특성을 파악한 결과는 다음과 같다.

1) H₂-TPR 분석에서 102~350℃에서 생성된 피크는 주촉매 PtO 산화물에서 Pt₀로 환원되었다. (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce(CP) H₂-SCR은 329℃에서 생성된 피크는 다른 H₂-SCR에 비해 피크가 낮고 완만하게 환원되었다. 공침법으로 제조된 산화물 지지체 위에 형성된 PtO의 결합의 세기가 커지므로 인하여 다른 H₂-SCR에 비해 조금 더 높은 온도에서 환원되었다.

2) (3) 0.75Pt-9.25Zr/Ce(IM) H₂-SCR은 125℃에서 (-) NO_x 전환율을 나타냈고, 200℃에서 약 25%의 가장 낮은 NO_x를 저감시켰다. (5) 0.75Pt-9.25MgO/Ce(CP) H₂-SCR은 100℃와 125℃에서 NO_x 전환율은 약 39%와 56%의 가장 높은 NO_x 저감 성능을 나타냈다. 함침법과 공침법으로 제조된 H₂-SCR의 NO_x 저감 성능은 전반적으로 공침법이 대폭 향상되었다. BET 비표면적 등과 같은 물리적인 측면과 유해 가스 NO_x와 CO의 전환율이 향상되었기 때문이다.

3) CO 전환율에서 (3) 0.75Pt-9.25Zr/Ce(IM) H₂-SCR이 촉매 온도 200℃에서 약 65%의 CO 전환율을 나타냈고, 윈도우 폭도 가장 좁았다. 반면에 공침법으로 제조된 (4)~(6)의 H₂-SCR은 함침법으로 제조된 (1)~(3) H₂-SCR에 비해 CO 저감 성능이 향상되었고, 윈도우 또한 확대되었다.

4) H₂-SCR의 유해 가스 저감 성능 향상을 위해서는 산화물 지지체의 상호작용과 귀금속 Pt 분산력을 좋게 하는 공침법 제조법이 H₂-SCR의 유해 가스 저감 성능 향상에 기여하였고, 향후 조촉매 CeO₂-MgO-조촉매 물질 첨가에 따른 유해가스 저감 성능 및 내구성에 대해 연구할 계획이다.

후 기

이 연구는 호원대학교 교내 연구비로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

Author contributions

C. K. Seo; Conceptualization. Data curation. Investigation. Project administration. Writing-original draft. Writing-review & editing.

References

1. C. K. Seo, 2024, "Effect on Reduction of NO_x and CO according to the Alkali Metal Loading of H₂-SCR", *Journal of Power System Engineering*, 28(3), 13-20.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2024.28.3.013>)
2. Association for Emissions Control by Catalysis (AECC), 2020, "EURO 7/VII Emission Standards", AECC position paper.
3. D. Karamitros and G. Koltsakis, 2017, "Model-based Optimization of Catalyst Zoning on SCR-coated Particulate Filters", *Chemical Engineering Science*, 173(14), 514-524.
(<https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.08.016>)
4. X. Zhang, X. Yang, Y. Chen, X. Hu and X. Wu, 2021, "CeMn/TiO₂ Catalyst Prepared by Different Methods for enhanced low-temperature NH₃-SCR Catalytic Performance", *Chemical Engineering Science*, 238(20), 116588.
(<https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116588>)
5. H. Sjövall, R. Blint and L. Olsson, 2009, "Detailed kinetics modeling of NH₃ SCR over Cu-ZSM-5", *Applied Catalysis b: Environmental*, 92(1-2), 138-153.
(<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.07.020>)
6. C. N. Costa and A. M. Efstathiou, 2007, "Mechanistic Aspects of the H₂-SCR of NO on a novel Pt/MgO-CeO₂ Catalyst", *The Journal of Physical Chemistry C*, 111(7), 3010-3020.
(<https://doi.org/10.1021/jp064952o>)
7. 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/TiO₂ catalyst for selective catalytic reduction with H₂", *Applied Surface Science*, 608(15), 155040.
(<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155040>)
8. R. Burch and M. D. Coleman, 2002, "An Investigation of Promoter Effects in the Reduction of NO by H₂ under Lean-Burn Conditions", *Journal of Catalysis*, 208(2), 435-447.
(<https://doi.org/10.1006/jact.2002.3596>)
9. F. J. P. Schott, P. Balle, J. Adler and S. Kureti, 2009, "Reduction of NO_x by H₂ on Pt/WO₃/ZrO₂ Catalyst in Oxygen-rich Exhaust", *Applied Catalysis B: Environmental*, 87(1-2), 18-29.
(<https://doi.org/10.1006/j.apcatb.2008.08.021>)
10. C. K. Seo, 2024, "DE-NO_x/CO Performance According to Ag Loading Amount and Support Type of H₂-SCR", *International Journal of Automotive Technology*, 25(4), 745-754.
(<https://doi.org/10.1007/s12239-024-00088-6>)
11. V. K. Patel and S. Sharma, 2021, "Effect of Oxide Supports on Palladium based Catalysts for NO Reduction by H₂-SCR", *Catalysis Today*, 375, 591-600.
(<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.04.006>)
12. 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 CeO₂-promoted Co₃O₄ Catalysts for N₂O Decomposition", *Clean Technology*, 24(3), 198-205.
(<https://doi.org/10.7464/ksct.2018.24.3.198>)
13. C. K. Seo, 2023, "Harmful Gas Reduction Characteristics according to the C₃H₆ Coexistence and Space Velocity of H₂-SCR", *Journal of Power System Engineering*, 27(5), 25-33.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.202327.5.025>)