

촉매 제조 시 pH 지수에 따른 H₂-SCR의 반응 특성 Reaction Characteristics of H₂-SCR according to the pH Index during Catalyst Preparation

서충길* †
Choong-Kil Seo* †

(Received 12 February 2025, Revision received 01 April 2025, Accepted 01 April 2025)

초록 : 이 연구는 H₂-SCR의 NO_x/CO 저감 성능 향상을 위해 pH(수소이온농도) 조건이 촉매 특성에 미치는 영향을 분석하는 것이다. SEM/TEM, BET 비표면적, H₂-TPR, XPS 분석 및 de-NO_x/CO 성능 평가의 물리·화학적 분석법을 이용하였다. pH 지수에서 H₂-TPR 분석을 통해 109℃에서 생성된 두 개의 환원 피크(pH 6, 7)가 관찰되었고, (C) 0.75Pt-2CeO₂/TiO₂(pH 9) H₂SCR은 147℃에서 생성된 환원 피크는 더 높은 온도로 환원되었다. 600℃ 부근에서 생성된 피크는 지지체 TiO₂에 H₂ 스퍼 오버로 인하여 Ti^{X+}로 부분적으로 환원된 결과이다. H₂-SCR(pH 7)은 100℃ 저온에서 가장 높은 33%의 NO_x 저감 성능을 나타냈고, pH 6로 조절된 H₂-SCR보다 저온과 중고온에서 NO_x 저감 성능이 소폭 향상되었다. H₂-SCR 제조 시 유해 가스 저감 성능을 고려하면 촉매 물질 간 결합력이 적절하여 촉매 활성이 좋은 pH 7이 최적의 조건으로 밝혀졌다.

키워드 : 수소, 선택적인환원촉매, 질소산화물, 일산화탄소, 수소이온농도, 암모니아

Abstract : This study analyzes the effect of pH (hydrogen ion concentration) conditions on catalyst characteristics to improve the NO_x/CO reduction performance of H₂-SCR. Physicochemical analysis methods such as SEM/TEM, BET surface area, H₂-TPR, XPS analysis and de-NO_x/CO performance evaluation were used. (C) 0.75Pt-2CeO₂/TiO₂ (pH 9) H₂-SCR showed a reduction peak generated at 147℃, which was reduced at a higher temperature. The peak generated around 600℃ was the result of partial reduction to Ti^{X+} due to H₂ spillover into support TiO₂. H₂-SCR (pH 7) showed the highest NO_x reduction performance of 33% at a low temperature of 100℃, and showed slightly improved NO_x reduction performance at low and medium to high temperatures than the H₂-SCR adjusted to pH 6. Considering the performance of reducing harmful gases when manufacturing H₂-SCR, pH 7, which has good catalytic activity due to appropriate bonding force between catalyst materials, was found to be the optimal condition.

Key Words : Hydrogen, Selective Catalytic Reduction, NO_x, Carbon Monoxide, pH, NH₃

1. 서 론

전 세계적으로 지구온난화로 인하여 위기감이

증폭되고 있으며, 파리협정은 195개국이 지구의 평균 온도가 산업화 이전에 비해 2℃ 이상 상승하지 않도록 하고 최종적으로 파리 협정 195 개국이

* † 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

이산화탄소 순 배출량 “0”을 목표로 자체적으로 온실가스 배출 목표를 정하고 실천하고 있다. 이산화탄소 배출량이 많은 화석연료 대신 그린에너지로의 전환이 가속화되고 있으며, 그중 전기자동차(EV) 및 수소연료전지전기자동차(FCEV)의 변화속도가 빠르다. 그러나 최근 국내외에서 발생한 전기자동차의 화재 문제로 인하여 그 문제점이 부각되고 있으며, 이를 극복하기 위한 여러 대책 마련과 연구개발이 진행되고 있다. 국내 자동차 등록 대수 중에 내연기관이 차지하는 비중은 약 90% 수준으로, 아직도 친환경자동차 전환으로의 길은 멀지만, 각각의 사용되는 에너지원에서 에너지 변환 효율은 향상시키고, CO₂ 배출은 최소로 하는 종합적인 전략과 기술개발이 필요로 하다고 본다. 내연기관에서 연소온도가 높은 조건에서 유독성 물질인 질소산화물(NOx)이 생성되며, 이는 발암물질로서 엄격하게 규제되고 있다. NOx를 저감시키는 후처리 촉매시스템을 SCR(Selective Catalytic Reduction)이라고 한다.¹⁻³⁾

최근에는 H₂-엔진 및 가정용 보일러용 등 여러 분야로 적용될 수 있는 환원제 H₂를 이용한 H₂-SCR 연구가 진행되고 있다. H₂-SCR의 선행 연구는 유해 가스 성능 향상을 위한 귀금속,^{4,5)} 조촉매,⁶⁾ 지지체⁷⁾ 및 공존하는 배출가스에 대한 촉매 반응^{8,9)} 등에 관한 연구들이 진행되어 왔다. 후처리 촉매의 성능은 제조 방법 및 촉매를 구성하는 여러 물질 및 함량 등 촉매 성능에 미치는 변수가 너무 많다. 그중 촉매 제조 과정 동안 지지체와 촉매 물질 간 가교결합을 도와주는 물질을 첨가하여 pH를 조절한다. 그간 SCR 촉매의 활성 및 수열 안정성 향상을 위해 촉매의 제조 시 pH를 조절해 왔다.¹⁰⁾ pH 조절을 통해 촉매 표면의 산성도 및 염기도를 조절하면 촉매 물질 담지량 및 분산도에 영향을 미쳐 촉매 성능을 향상시켰다.¹¹⁾ 기존 연구의 동향은 촉매를 구성하는 물질에 따라 pH 조절값이 촉매의 성능에 미치는 영향이 각각 다르다. 저자의 H₂-SCR 선행연구^{7,8)}에서는 함침법을 이용하여 유해가스(NOx, CO) 저감 성능 향상을 위해서 연구해 왔다. 그 차원에서 H₂-SCR 제조 시 pH 조건에 따른 추가적인 연구가 필요하

며, 이 연구는 중요하며 의의가 있다고 할 수 있다.

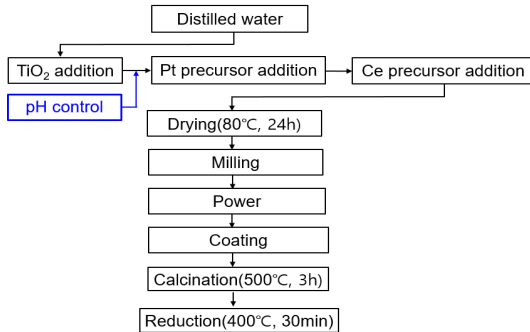
이 연구는 H₂-SCR의 NOx/CO 저감 성능 향상을 위해 pH(수소이온농도) 조건이 촉매 특성에 미치는 영향을 분석하는 것이다.

2. 촉매 제조 및 실험 방법

후처리 촉매의 성능은 제조 방법에 따라 변수가 많다. H₂-SCR도 주촉매와 조촉매 및 지지체간에 결합으로 인한 상호 작용(Interaction)에 따라 여러 형태로 촉매 반응은 영향을 받을 수 있다. 이 절에서는 수산화암모늄(Ammonium hydroxide solution, Fluka)을 이용하여 pH 지수를 달리하여 3 종류의 H₂-SCR를 제조하였다. pH는 산성이나 염기성의 척도가 되는 수소이온(H⁺)이 얼마나 존재하는지를 나타내며, 수소이온농도의 음의 대수로식 (1)과 같다.

$$pH = -\log [H^+] \quad (1)$$

H₂-SCR은 지지체를 활성 물질이 녹아있는 용액에 담근 후 용매를 증발시켜 활성 물질을 지지체에 담지하는 방법인 함침법(Impregnation method)으로 제조되었다. 0.75Pt-2CeO₂/TiO₂ H₂-SCR은 지지체 TiO₂ 기반에 소정의 Pt, 수산화암모늄 양으로 pH(수소이온농도) 지수를 조절하였고(7, 9), pH 6은 수산화암모늄을 넣지 않았고, 기존 증류수의 pH 지수이다. pH 측정은 색깔로 산과 염기를 쉽게 구별 가능한 리트머스시험지(ADVANTEC, UNIV)를 이용하였다. 귀금속 Pt 분산도를 향상시키고, 조촉매 2CeO₂의 담지를 원활하게 위해 마지막으로 CeO₂를 담지하였다. CeO₂는 주촉매 역할을 하는 귀금속 Pt의 분산도 향상과 촉매의 활성을 증가시키는 조촉매이다.^{12,13)} 그 후 건조(Drying) 및 밀링(Milling)을 한 후에 slurry 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%로 환원(reduction) 처리하였다. Fig. 1은 H₂-SCR의 제조 공정도이다.

Fig. 1 Diagram of prepared process of H₂-SCRTable 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

Table 1은 H₂-SCR의 유해 가스 저감 성능 파악을 위한 모델가스 반응조건이다. N₂ Balance는 기저 가스이며, SV(h⁻¹)는 시간당 처리 가스량(촉매 통과 풍량)을 촉매량으로 나눈 수치이다. 촉매 전단 온도는 75~350℃ 정상 상태(steady state) 조건을 유지하면서 NO_x와 CO의 유해 가스 저감 성능을 파악하였다. 촉매의 유해 가스 정화 성능은 아래 식 (2)와 같이 계산하였으며, 촉매 전단에 들어가는 유해 가스(NO_x, CO) 농도 대비 촉매 후단에서 배출되는 유해 가스의 농도의 변환율로 구한다. MRU 가스분석기(VarioPlus Industrial, MRU Instruments, Inc.)를 이용하여 1초 간격으로 정량적으로 측정하였다.

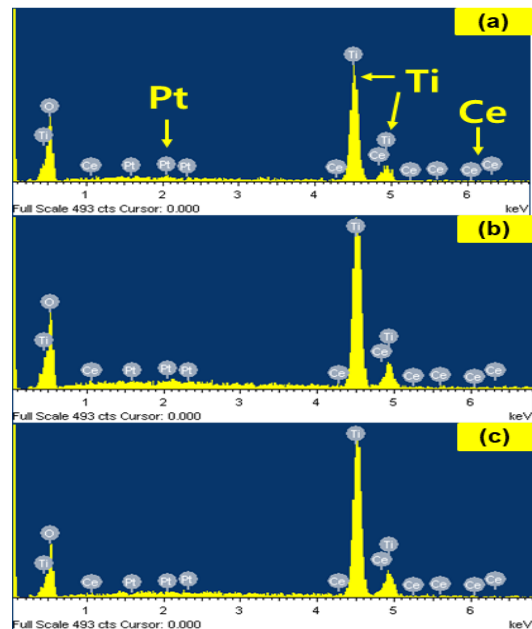
$$\frac{(NO_x/CO_{in} - NO_x/CO_{out}) \times 100}{(NO_x/CO_{in})} \quad (2)$$

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 H₂-SCR의 pH 지수에 따른 물리·화학적인 특징

Fig. 2는 pH 지수(6, 7, 9)를 달리하여 제조된 3종류 H₂-SCR의 SEM-EDX(JSM-7500F+EDS, Oxford) 이미지이다. Fig. 2의 (a), (b), (c)는 pH 6, pH 7, pH 9 지수를 나타내고 있다. 0.75Pt, 2CeO₂ 및 지지체 TiO₂의 주피크/보조피크가 잘 생성되어 있어서 H₂-SCR의 구성 물질이 잘 포함되어 있다.

특히, 촉매 제조 시 작은 함량인 0.75 wt%로 담지된 주촉매인 Pt가 확인이 되며, 이는 산화 및 환원 반응에 선택성(selectivity)이 높다. Fig. 3은 촉매 구성 물질의 형상과 사이즈를 분석하기 위한 SEM/TEM(JEM-2000FX II (200kV), JEOL) 이미지이다. 귀금속 0.75wt%Pt는 소량 담지되어 있어서 2차원 분석법인 SEM 이미지에서는 확인하기 힘들다. 그러나 산화와 환원 능력을 가지고 있는 지지체 TiO₂는 약 20~60 nm 사이즈로 무정형(formless) 형상으로 자리 잡고 있다. Fig. 3(b)는 3차원 분석법 TEM 이미지이며, 스케일 별로(20 nm, 50 nm)

Fig. 2 SEM-EDX spectra according to the pH concentration of H₂-SCR

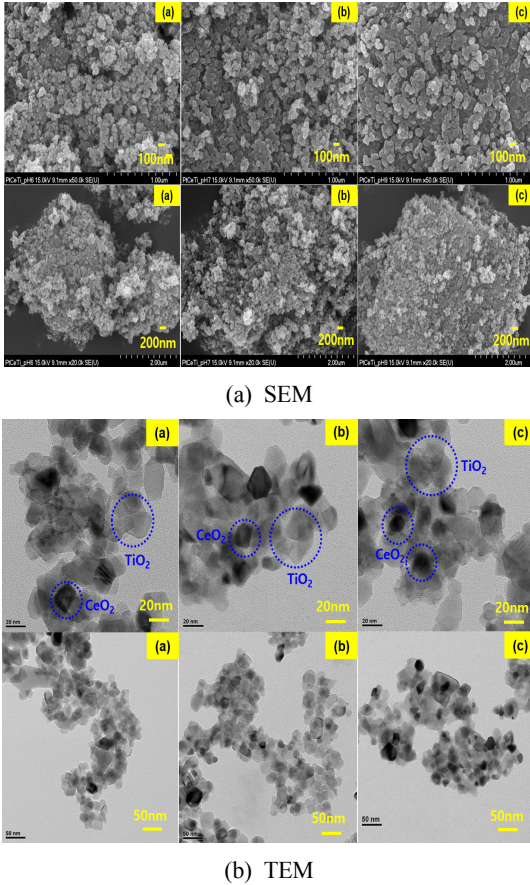


Fig. 3 SEM/TEM image of H₂-SCR ((a) pH 6, (b) pH 7 and (C) pH 9)

Table 2 Physical specification of H₂-SCR

Catalyst	BET (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Pore size (nm)
(a) 0.75-2CO ₂ /TiO ₂ (pH 6)	51.080	0.440	28.576
(b) 0.75-2CO ₂ /TiO ₂ (pH 7)	49.200	0.413	26.910
(c) 0.75-2CO ₂ /TiO ₂ (pH 9)	52.971	0.472	26.774

표현하였으며, pH 조절에 의한 3종류의 H₂-SCR은 조촉매 CeO₂는 면심입방정계정사면체 구조로 약 20 nm급으로 잘 분산되어 있으며, 2, 3 nm급의 Pt는 관찰되지 않고 있다. Table 2의 3종류 H₂-SCR

의 BET 비표면적의 물리적인 분석에서 0.75Pt-2CeO₂/TiO₂(pH 7) H₂-SCR은 49.200 m²/g이고 0.75Pt-2CeO₂/TiO₂ H₂-SCR(pH 9)이 52.971 m²/g로 약간 크다. Table 2에서 0.75Pt-2CeO₂/TiO₂ H₂-SCR(pH 9)은 Pore size가 26.774 nm로 가장 작고, Pore volume은 0.472 cm³/g으로 약간 큰 특징을 나타내고 있다. 촉매 활성사이트(Active site)가 많아져 촉매 성능 향상에는 유리하게 작용할 수 있으나, 촉매 물질 간의 전체 화학 반응속도(흡착-반응-탈착)가 빨라져야 촉매 성능 향상에 더 영향을 미칠 수 있다.

Fig. 4는 H₂-SCR의 pH 지수에 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.

Fig. 4에서 109℃에서 형성된 두 개(pH 6, 7)의 환원 피크가 관찰되는데, PtOx cluster에서 금속 화학종(Pt⁺)으로 환원되었기 때문이다. 그러나 (C) 0.75Pt-2CeO₂/TiO₂(pH 9) H₂-SCR은 147℃에서 H₂ 소모 피크(환원)가 생성되고 있다. 이는 알칼리 물질 수산화암모늄이 가장 많이 첨가되어 지지체 TiO₂와 귀금속 Pt와의 결합의 세기가 커져서 더 높은 온도에서 PtOx cluster에서 Pt⁺로 환원되었다고 판단한다. 600℃ 부근에서 생성된 피크는 H₂ 스피일 오버로 인하여 지지체 TiO₂가 Ti^{X+} 부분적으로 환원되었다고 판단한다.⁴⁾

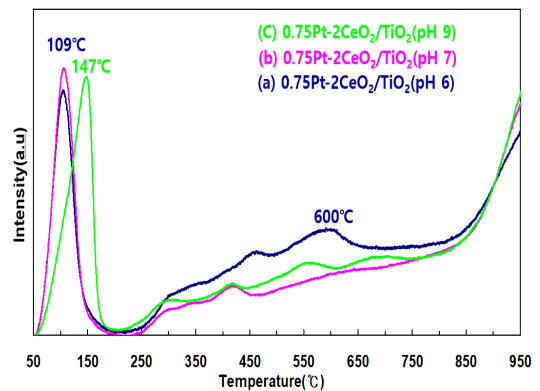


Fig. 4 H₂-TPR profile according to the pH concentration of H₂-SCR

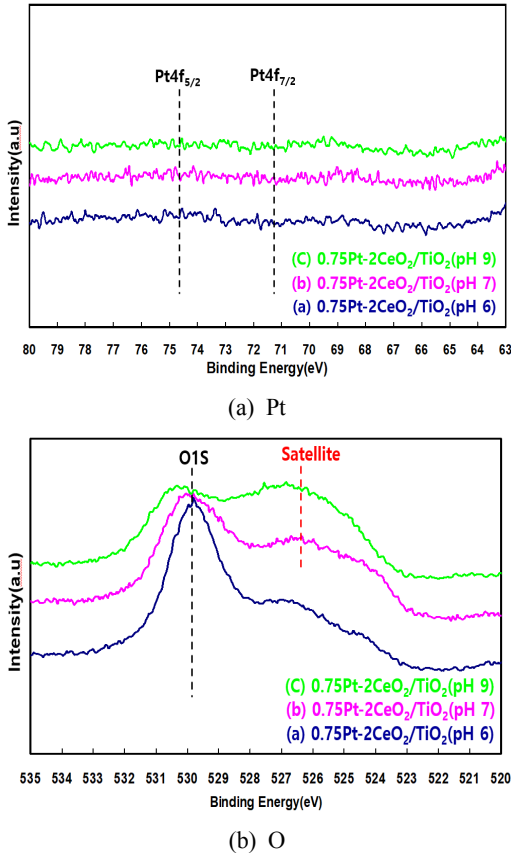


Fig. 5 XPS spectra according to the pH concentration of H₂-SCR

Fig. 5는 H₂-SCR의 pH 지수에 따른 XPS 스펙트럼을 나타내며, 그 중 Pt와 O의 원자 표면의 결합 특성을 나타내고 있다. Fig. 5(a)는 0.75 wt%가 담지된 Pt의 XPS 분석 자료이다. 촉매를 산화 상태로(Air 500℃, 3hr) 분석한 자료로서 pH 조절에 따른 Pt 화학종에 대한 선명한 피크가 관찰이 되지 않음에 따라 Pt는 PtO_x로 화합물 상태가 판단이 된다. 문헌에 의하면, Binding Energy가 71~76 eV에서 생성된 피크는 Pt⁺, Pt⁴⁺로 관찰된다.⁴⁾

Fig. 5(b)는 O 원자의 결합특성을 나타내며, (a) 0.75Pt-2CeO₂/TiO₂ H₂-SCR(pH 6)은 약 530 eV에서 생성된 O 원자의 결합에너지의 강도를 나타내며, pH 9로 조절된 (c) 0.75Pt-2CeO₂/TiO₂ H₂-SCR(pH 9)은 약 526 eV에서 위성 피크(Satellite peak)가 생성되고 있으며, 이는 pH 지수가 증가함에 따라 알카

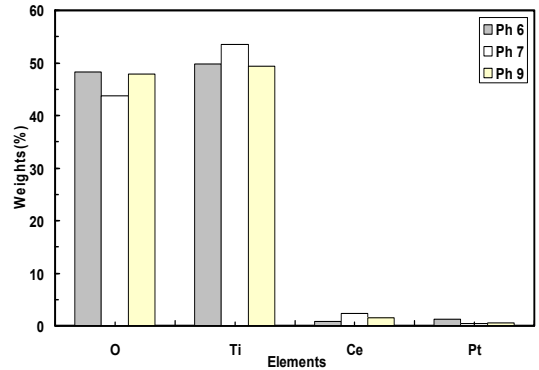


Fig. 6 SEM-EDX elements according to the pH concentration of H₂-SCR

리 계열 수산화암모늄이 첨가량이 증가하여 금속이 O와의 결합을 증가시킨 것이라고 판단한다.

Fig. 6은 pH 지수에 따른 3종류의 H₂-SCR의 SEM-EDX에서 분석한 원소(Weights)를 나타내고 있다. 각각의 촉매 샘플마다 3번의 시료를 분석한 후에 평균을 낸 방법을 이용하였다. 소량이 담지된 Pt와 Ce는 SEM-EDX에서는 작은 양을 나타내고 있다. 담지량이 많은 지지체 TiO₂는 Ti와 O로 구분이 되며, pH 7의 H₂-SCR이 O 양은 적고, 금속 Ti가 많은 경향을 나타내고 있다. 금속이 산화되는 것보다는 금속(Metallic)으로 자리 잡고 있을 때 촉매는 더 활성이 좋을 수 있다.

3.2 H₂-SCR의 pH 지수에 따른 유해 가스 저감 특성

Fig. 7은 H₂-SCR의 유해 가스 NO_x, CO의 동시 저감 메커니즘을 나타내고 있다. 소량의 귀금속 Pt는 O₂가 있는 분위기에서 NO와 CO를 산화시키며, NO는 질산염(Nitrate)으로 흡장된 뒤 환원제 H₂가 공급될 때 환원된다. 환원제 H₂는 저온에서도 spillover가 되므로 NO_x를 저감시킬 수 있다. NO와 CO의 산화와 환원 반응식을 (2)~(6)에 나타내었다. 식 (2)~(6)은 유해 가스 NO와 CO의 산화와 환원 반응에서 반응물과 생성물 사이의 에너지 변화 관계를 나타내며, NO 환원 반응에 더 많은 에너지가 필요하다. NO_x 환원 반응 동안 촉매 활성이 저하되면 암모니아(NH₃) 중간생성물이 생성되며, NO_x 환원 반응에 기여할 수 있다.

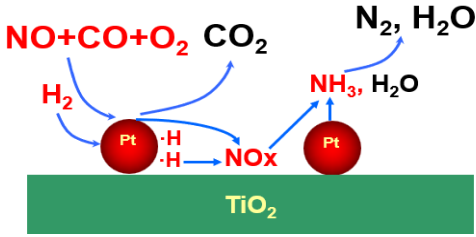


Fig. 7 Mechanism of simultaneous harmful gas reduction of H₂-SCR

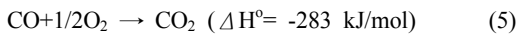
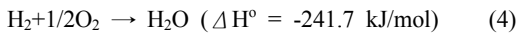
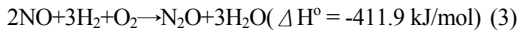
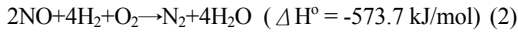
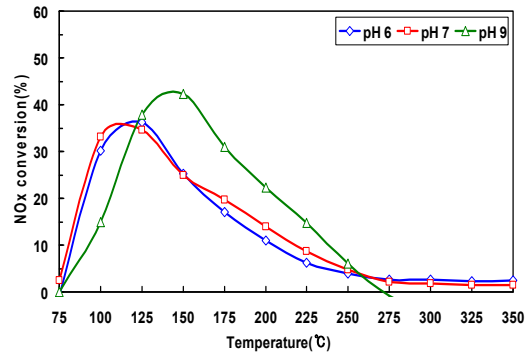
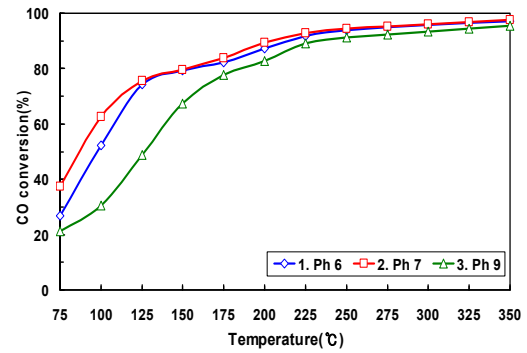


Fig. 8은 H₂-SCR의 pH 지수에 따른 유해 가스 저감 성능을 나타내고 있다. pH 6(w/o AH)은 수산화암모늄을 포함되지 않은 경우이고, pH 7과 pH 9는 수산화암모늄 양으로 조절하였다. Fig. 8(a)는 pH 지수에 따른 NO_x 저감 성능을 나타내고 있다. Fig. 8(a)에서 H₂-SCR(pH 6)은 촉매 온도 125℃에서 약 38%의 NO_x 저감 성능을 나타내며, 온도가 올라가면서 H₂ 환원제 특성상 NO_x 저감 성능이 저하되고 있다. 이는 촉매 온도가 증가하면서 O₂가 있는 분위기에서 환원제 H₂로 인한 환원 반응보다는 H₂가 산화되기 때문이다. H₂-SCR(pH 7)은 촉매 온도 100℃에서 33%의 NO_x 저감 성능을 나타내며, pH 6로 조절된 H₂-SCR 보다 저온과 중고온에서 NO_x 저감 성능이 소폭 향상되었다. 이는 Fig. 4의 H₂-TPR에서 볼 수 있듯이, 109℃에서 환원되는 피크가 높은 것을 볼 때, 촉매 활성화에 기여하는 Pt 화학종(Pt^{x+})이라고 판단한다. 수산화암모늄 양이 많이 포함된 (c) H₂-SCR(pH 9)는 150℃에서 42%의 NO_x 저감 성능을 나타내며, 저온에서 NO_x 저감 능력이 떨어지고, 촉매 활성이 향상되지 않았다. Fig. 4(c) H₂-TPR에서 147℃에서 생성된



(a) NO_x conversion



(b) CO conversion

Fig. 8 De-NO_x/CO performance according to the pH concentration of H₂-SCR

피크는 pH 농도가 6, 7로 제조된 H₂-SCR에 비해 Pt 금속보다는 Pt 산화물 형태의 화학종이라고 판단이 되며, 불안정한 Pt^{x+} 종보다 Pt 산화물 화학종은 촉매 반응 속도가 저하된다. Fig. 8(b)는 H₂-SCR의 pH 지수에 따른 유해 가스 CO 전환율을 나타내고 있다. CO의 산화는 NO_x 환원보다는 활성에너지가 작은 물질이며, 많은 양을 호흡할 때는 사망에 이르게 하고, 최근에는 자동차 및 보일러에서도 규제하는 물질이다.

H₂-SCR(pH 7)은 촉매 온도 75℃에서 약 38%의 CO 저감 성능을 나타내며, 250℃에서는 약 90%의 CO 저감 능력을 나타낸다. 3종류 H₂-SCR에서 저온에서도 활성이 좋고, 촉매 온도 전체에서 가장 넓은 윈도우를 나타내고 있다. H₂-SCR(pH 7)은 75℃에서 27%에서 시작해 250℃에서 90%의 CO 전환율을 나타내고 있다. H₂-SCR(pH 9)은 75℃에

서 약 21%의 CO 전환율을 나타내며, 전체 온도에서 CO 전환율이 낮다. CO의 산화 능력은 귀금속 Pt가 선택도가 높은 물질로, 촉매 온도 150℃ 이하에서 H₂-SCR(pH 7)이 높은 다른 촉매보다 10~30% 높은 것은 Pt 귀금속 화학종과 분산도가 좋아졌기 때문인 것으로 판단한다. 순수 증류수만으로 제조된 H₂-SCR보다 적절 양의 계면활성제가 포함된 H₂-SCR(pH 7)이 NO_x와 CO 전환율이 높으며, pH 7 지수가 적절한 양이라고 판단한다.

Fig. 9는 H₂-SCR 촉매 제조시 pH 지수에 따른 O₂ 소모율을 나타내고 있다. NO_x와 CO의 환원과 산화 반응에는 O₂가 필요하며, O₂ 소모율은 NO_x와 CO 저감 성능과 연관이 된다. Fig. 9에서 H₂-SCR(pH 7)은 100℃에서 약 6%의 O₂ 소모율을 나타내며, 350℃에서 약 8%의 O₂ 소모율을 나타내고 있다. H₂-SCR(pH 6)은 pH 7로 제조된 H₂-SCR(pH 7)에 비해 O₂ 소모율 또한 저온에서 낮고, 최고온도 350℃에서 약 8.5%보다 낮다. NO_x/CO 저감 능력이 저온에서 가장 낮은 H₂-SCR(pH 9)의 O₂ 소모율은 100℃에서 약 3%, 350℃에서 9%의 수준에 이르며, 저온에서 3종류 H₂-SCR에서 가장 낮고, 중고온 이상에서는 O₂ 소모율이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 저온에서 O₂ 소모율이 증가하면 촉매의 저온 활성이 향상되고, 중고온에서 O₂ 소모율이 증가하면 중고온에서 산화반응이 좋아지는 경향을 나타낸다.

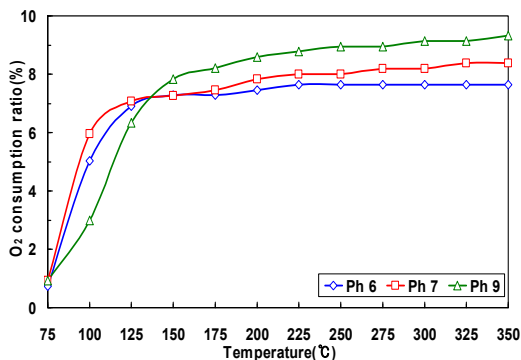


Fig. 9 O₂ consumption rate according to the pH concentration of H₂-SCR

4. 결 론

이 연구는 H₂-SCR의 de-NO_x/CO 성능 향상을 위하여 촉매 제조 시 pH(수소이온농도) 지수 영향에 따른 특성을 파악하였다.

1) 109℃에서 형성된 두 개(pH 6, 7)의 환원 피크가 관찰되었고, PtOx cluster에서 금속 화학종(Pt⁰)으로 환원되었기 때문이다. 0.75Pt-2CeO₂/TiO₂ (pH 9) H₂-SCR은 147℃에서 H₂ 소모 피크(환원)가 생성되었으며, 지지체 TiO₂와 귀금속 Pt와의 결합의 세기가 커져서 더 높은 온도에서 PtOx cluster에서 Pt⁰로 환원되었다.

2) (c) 0.75Pt-2CeO₂/TiO₂ H₂-SCR(pH 9)은 약 526 eV에서 위성 피크(Satellite peak)가 생성되었고, pH 지수가 증가함에 따라 알칼리 계열 수산화암모늄이 첨가량이 증가하여 금속이 O와의 결합을 증가시켰다.

3) H₂-SCR(pH 7)은 100℃ 저온에서 가장 높은 33%의 NO_x 저감 성능을 나타냈고, pH 6으로 조절된 H₂-SCR 촉매보다 저온과 중고온에서 NO_x 저감 성능이 소폭 향상되었다. H₂-SCR(pH 9)은 150℃에서 약 43% NO_x 저감 능력을 나타냈고 반응속도가 저하되었다. SCR 제조 시 촉매 물질 간의 결합력이 적절하여 촉매 활성이 좋은 pH 7이 적절하였다.

4) 향후 연구 방향은 H₂-SCR의 촉매 제조법 중 기존 함침법 대비 공침법을 적용하여 유해 가스 성능 및 내구성 향상에 대해 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.

References

1. A. F. Suarez-Corredor, M. U. Babler, L. Olsson, M. Skoglundh and B. Westerberg, 2022, "Understanding the NH₃ adsorption mechanism on a vanadium-based SCR catalyst: A data-driven modeling approach", *Chemical Engineering Science*, 262, 117975.
(<https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.117975>)
2. P. S. Metkar, V. Balakotaiah and M. P. Harold, 2011, "Experimental study of mass transfer limitations in Fe- and Cu-zeolite-based NH₃-SCR monolithic catalysts", *Chemical Engineering Science*, 66, 5192-5203.
(<https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.07.014>)
3. 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>)
4. 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, 155040.
(<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.155040>)
5. L. Cao, Q. Wand and J. Yang, 2020, "Ultrafine Pt particles directed by poly vinylpyrrolidone on zeolite on zeolite beta as an efficient low-temperature H₂-SCR catalyst", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8, 103631.
(<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103631>)
6. 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 H₂-SCR", *Chemical Engineering Journal*, 260, 419-426.
(<https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.030>)
7. 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, 745-754.
(<https://doi.org/10.1017/s12239-024-00088-6>)
8. C. K. Seo, 2023, "Effect of De-NO_x/CO Performance of the Exhaust Gas of H₂-SCR", *Journal of Power System Engineering*, 27(2), 5-12.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2023.27.2.005>)
9. K. Yokota, M. Fukui and T. Tanaka, 1997, "Catalytic removal of Nitric Oxide with Hydrogen and Carbon Monoxide in the presence of Excess Oxygen", *Applied Surface Science*, 121-122(2), 273-277.
([https://doi.org/10.1016/50169-4332\(97\)00305-X](https://doi.org/10.1016/50169-4332(97)00305-X))
10. H. Zho, G. Yang, A. J. Hill, B. Luo and G. Jing, 2021, "One-Step ion-exchange from Na-SSZ-13 to Cu-SSZ-13 for NH₃-SCR by adjusting the pH valence of Cu-exchange solution", *Microporous and Mesoporous Materials*, 324, 111271.
(<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111271>)
11. G. J. Dong, Y. f. Zhang, Y. Zhao and Y. Bai, 2014, "Effect of the pH value of precursor solution on the catalytic performance of V₂O₅-WO₃/TiO₂ in the low temperature NH₃-SCR of NO_x", *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 42(12), 1455-1463.
([https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(5\)60003-2](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(5)60003-2))
12. C. K. Seo, 2017, "Effect of CeO₂ Addition on De-CH₄ and NO_x Performance", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 48(9), 1975-4701.
(<https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.9.473>)
13. H. B. Im, S. J. Kwon, C. K. Byun, H. S. Ahn, K. Y. Koo, W. L. Yoon and K. B. Yi, 2014, "Effect of Support Geometry on Catalytic Activity of Pt/CeO₂ Nanorods in Water Gas Shift Reaction", *Journal of Hydrogen and New Energy*, 25(6), 577-585.
(<https://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2014.25.6.577>)