

H₂-SCR의 프로필렌 공존과 공간 속도에 따른 유해 가스 저감 특성 Harmful Gas Reduction Characteristics according to the C₃H₆ Coexistence and Space Velocity of H₂-SCR

서충길*†
Choong-Kil Seo*†

(Received 07 July 2023, Revision received 05 October 2023, Accepted 05 October 2023)

초록 : 인간의 몸에 유해한 가스를 유해 가스라고 하며, 이 연구는 내연기관에서 배출되는 유해 가스인 NO_x와 CO를 저감시키기 위한 H₂-SCR의 C₃H₆ 공존과 공간 속도에 따른 영향을 파악하는 것이다. C₃H₆가 공존하지 않을 경우(w/o C₃H₆), H₂-SCR 촉매는 150℃에서 약 60% 수준으로 가장 높은 NO_x 전환율을 나타냈고, window 또한 C₃H₆가 공존하는 경우보다 저온에서 활성화되었다. 공간 속도 14,000 h⁻¹의 경우, 125℃에서 약 60%의 가장 높은 NO_x 전환율을 나타냈다. 공간 속도가 작으면 촉매 체적에 잔류하는 시간이 길어지므로 de-NO_x/CO 저감 성능이 높았다. H₂-SCR 촉매의 de-NO_x/CO 성능 감소는, SV 영향보다는 결합 구조가 약하여 화합물 분해가 잘되는 C₃H₆가 공존할 때가 더 컸다.

키워드 : 내연기관, 질소산화물, 선택적인 촉매환원, 일산화탄소, 공간 속도

Abstract : Gases that are harmful to the human body are called harmful gases. This study is to investigate the coexistence of C₃H₆ and the effect of space velocity of H₂-SCR in order to reduce NO_x and CO, which are harmful emissions from internal combustion engines. In the case of where C₃H₆ does not coexist (w/o C₃H₆), the H₂-SCR catalyst exhibited the highest NO_x conversion rate at about 60% at 150℃ and window was also activated at a lower temperature than in the case where C₃H₆ coexists. In the case of SV (Space Velocity) 14,000 h⁻¹, the highest NO_x conversion rate of about 60% was shown at 125℃. When the space velocity was small, the residence time in the catalyst volume was long. Thus, the de-NO_x/CO reduction performance was high. The decrease in de-NO_x/CO performance of the H₂-SCR catalyst was greater when C₃H₆, that has a weak bond structure and is easily decomposed, coexisted rather than under the influence of SV.

Key Words : Internal Combustion Engine, NO_x, Selective Catalytic Reduction, Carbon Monoxide, Space Velocity

1. 서 론

아직까지 화석에너지원의 사용 비중이 높기 때

문에 이산화탄소 배출량이 많고 이로 인하여 지구온난화가 가속화되고 있으며, 또한 유해한 배출가스로 인체의 폐해와 대기의 질이 악화되고 있다.

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

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

글로벌적으로 탄소중립 정책이 세계적인 이슈로 급부상하고 있으며, 각 나라마다 배기가스의 규제강화와 기술혁신 및 보조금 지원 등으로 환경문제 개선을 위해 노력하고 있다. 그 대책의 일환으로 전기차, 수소차 등 친환경 자동차로 파워트레인의 전환이 진행되고 있다. 그러나 친환경 자동차의 인프라 구축, 비용문제, 화재사고의 안정성 문제점 또한 해결해야 할 과제이다.

한편, 국내에서도 동력기계의 90% 이상을 차지하는 내연기관 자동차를 비롯하여 건설기계, 선박, 농기계 및 보일러 등에 대한 배기가스 규제가 더욱더 강화되고 있다. 그리고 2025년도에는 자동차 내연기관의 마지막 규제라 할 수 있는 엄격한 Euro 7 배기규제가 시행될 예정이다. 특히, 질소산화물(NO_x)은 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서 정한 발암물질이며, 미세먼지를 유발하는 환경오염 물질이다.

현재까지 질소산화물(NO_x) 저감을 위한 후처리 촉매는 SCR(Selective Catalytic Reduction)¹⁻⁶⁾이 연구되고 상용화되었다. 또한 미래는 청정 에너지원인 수소(H₂)를 제조하고 활용하는 기술이 각광을 받을 것으로 전망되므로 수소 관련 연구는 매우 중요하다.⁷⁾ H₂-SCR 촉매의 연구 동향은, 환원제 H₂ 이용하여 NO_x를 저감시키는 연구가 진행되어 왔다. 주로 H₂-SCR 촉매의 성능 향상을 위해 주촉매, 조촉매, 지지체 및 반응 메커니즘 등에 관하여 선행 연구가 이루어져 왔다. 특정 H₂-SCR 촉매에 대한 활성 및 선택성을 개선하기 위해 다양한 개질제가 사용되어 왔다.

Yokota et al.은 Pt의 산화 효율을 감소시키는 Mo 및 Na의 첨가는 Pt/SiO₂의 NO 전환 및 N₂ 선택성을 향상시켰다고 보고했다.⁸⁾ Burch와 Machida는 각각 Pt/Al₂O₃ 및 Pt-ZSM-5의 성능에 대한 Na 첨가 효과를 연구했다.⁹⁾ 그러나 Na 첨가 효과는 촉매 지지체의 유형에 따라 크게 달라졌다.

Kureti et al.은 Pt/ZrO₂에 텅스텐을 도입하면 Pt의 전자 밀도가 증가하여 H₂-SCR용 촉매가 활성화된다고 주장했다.¹⁰⁾ Ti 종의 첨가는 또한 백금의 존재 상태와 분산을 변화시킴으로써 H₂-SCR에서 Pt/Si-MCM-41의 활성과 선택성을 향상시켰

다.¹¹⁾ H₂-SCR 촉매의 지지체에 대한 연구도 진행되었다. kim et al.은 H₂-SCR촉매의 지지체 TiO₂를 사용할 때, Pt 원자가 상태연구와 NO_x 저감 성능을 향상시켰다.¹²⁾ 그리고 비표면적이 큰 zeolite 계열의 지지체를 이용하여 NO_x 저감 성능과 내황성을 강화시켰다.¹³⁾ 연구자의 선행연구는 Pt/TiO₂의 H₂-SCR 촉매의 NO_x와 CO 유해가스 동시 저감을 위해 연구해 왔으며,^{14,15)} 그중 촉매의 성능을 저하시키는 C₃H₆ 공존 및 공간 속도에 따른 촉매에 미치는 영향에 관심이 많다. H₂를 이용하여 화석연료를 사용하는 기관에서 배출되는 NO_x, CO 가스를 저감시키며, 최근 상용화된 H₂-엔진에서 배출되는 NO_x와 H₂를 저감시킬 수 있다면 H₂-SCR 촉매의 활용성은 크다고 할 수 있다.

이 연구는 H₂-SCR 촉매의 상용화를 위한 기초 연구로, 배출가스 중 탄소 침적(coking)의 원인이 되는 프로필렌(C₃H₆)이 공존할 때와 공간 속도(Space Velocity, SV)에 따른 유해가스 저감 특성을 파악하는 것이다.

2. 촉매 특성 및 실험 방법

제조된 H₂-SCR(0.5Pt-2CeO₂/TiO₂)은 합침법(impregnation method)으로 제조되었다. H₂-SCR은 400CPSI(Cell Per Square Inch) 담체(substrate)에 176g/L을 코팅하였다. 500°C에서 3 hr 동안 공기로 소성하였고, H₂ 5%, 400°C에서 1 hr 환원 처리하였다.

Table 1은 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂ H₂-SCR 촉매의 BET 비표면적(ASAP 2020, Micromeritics Instruments Corp, USA) 분석 자료이다. H₂-SCR은 Zeolite 계열 촉매보다 pore의 BET 비표면적이 작고, pore 입자가 큰 경향을 나타내고 있다. Pore의 BET 비표면적이 크고, 화학반응을 대상으로 하는 가스의 pore 사이즈가 잘 맞아야 촉매의 화학반응을 향상시킬 수 있다. Table 2는 TiO₂ 지지체 표면의 Pt 입자의 분산도(Dispersion) 측정을 위하여 CO-chemisorption(Microtrac BEL, JP/BELCAT II)을 수행한 결과이다. 산화에 선택성(Selectivity)이 높은 Pt는 유해가스 저감을 위해서 중요한 역할을

Table 1 Textura properties of H₂-SCR catalyst

Catalyst	BET (m ² /g)	Pore size (nm)	Pore volume (cm ³ /g)
0.5Pt-2CeO ₂ /TiO ₂	49.96	31.51	0.39

Table 2 CO-chemisorption results of H₂-SCR catalyst

Catalyst	Metal dispersion (%)	Metallic surface area (m ² /g)	Ave. particle diameter (nm)
0.5Pt-2CeO ₂ /TiO ₂	16.85	41.62	6.72

담당하며, 지지체 TiO₂ 위에 Pt가 담지되었을 때, 분산도 및 입자크기에 따라 흡착하는 CO gas의 흡착량을 나타내고 있다. 촉매 제조법에 따라 분산도가 달라질 수 있으며, 분산도가 높을수록 촉매 활성이 좋아진다. TiO₂에 담지된 Pt의 비표면적(metallic surface area)은 41.62 m²/g이다. 분산도가 높고 TiO₂ 표면의 유효금속의 표면적이 높을수록 반응의 활성점(active site)으로 작용하여 더 높은 촉매활성을 나타낸다.

Fig. 1은 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂ H₂-SCR 촉매의 SEM, TEM 및 SEM-EDX 분석 자료이다. 촉매의 2차원 표면 분석은 주사전자현미경인 SEM(JSM-7500F+EDS, Oxford) 분석기를 이용하였다. H₂-SCR 촉매 물질의 형상과 크기를 분석하기 위해 TEM JEM- 2000FX II (200kV), JEOL)을 이용하였다.

Fig. 2는 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂ H₂-SCR 촉매의 XRD(D/max ULTIMA III) 분석 자료이다. 지지체 TiO₂는 아나타제 결정구조를 이루고 있으며, 700°C 12 hr thermal aging한 H₂-SCR 촉매는 Rutile 구조를 띠고 있다. 지지체 TiO₂ 결정구조에 따라 촉매의 활성에 영향을 미칠 수 있다.

Table 3은 H₂-SCR의 de-NO_x/CO 성능 평가를 위한 모델가스조건이다. H₂-SCR의 유해가스 성능을 파악하기 위하여 모델가스반응장치를 이용하였다.⁷⁾ 모델가스반응장치는 가스 공급부, 유량 제어부, 촉매 반응부 및 분석부로 구성된다. 촉매온도는 75~350°C 정상상태(steady state) 조건에서 5

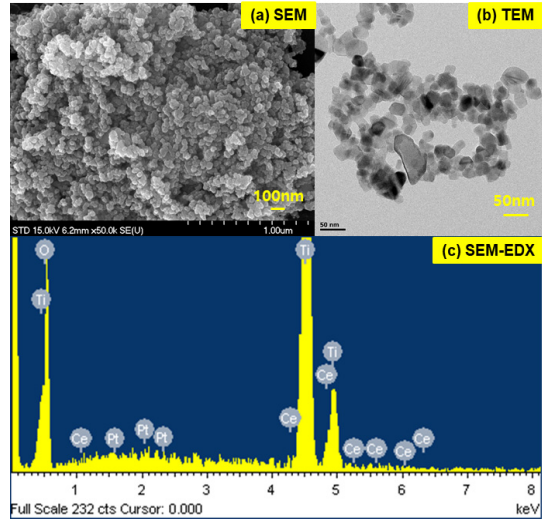


Fig. 1 Analysis data of 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂ of H₂-SCR

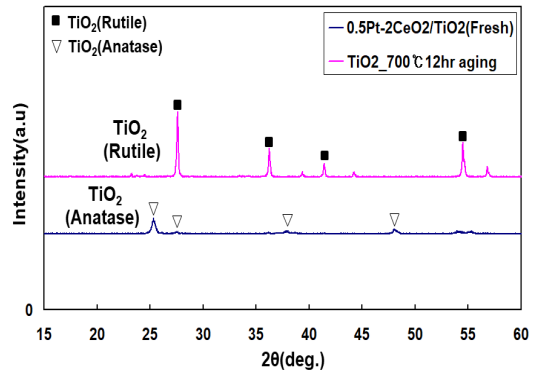


Fig. 2 XRD analysis data of 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂ H₂-SCR

Table 3 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
C/N ratio	0, 9, 13.5
N ₂	Balance
SV (h ⁻¹)	14,000, 28,000, 42,000

분을 유지하면서 de-NO_x/CO 성능을 측정하였다. C₃H₆ 함량에 따라 C/N ratio는 0, 9, 13.5이며, 공간 속도는 배출가스 유량/촉매체적을 의미하고, 14,000 h⁻¹, 28,000 h⁻¹, 42,000 h⁻¹이다. H₂-SCR의 유해가스 정화성능은 식 (1)과 같이 계산하였으며, 촉매반응 후의 가스성분은 MRU 가스분석기 (VarioPlus Industrial, MRU Instruments, Inc.)를 이용하여 1초 간격으로 정량적으로 측정하였다.

$$\frac{(NOx_{in} - NOx_{out}) \times 100}{(NOx_{in})} \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 H₂-SCR의 C₃H₆ 공존에 따른 영향

Fig. 3은 H₂-SCR의 유해가스 NO_x, CO의 동시 저감 메커니즘을 나타내고 있다. 소량의 귀금속 Pt를 담지하여, NO와 CO를 산화시키며, NO는 질산염(nitrate)으로 흡장된 뒤 환원제 H₂가 공급될 때 환원된다. NO와 CO의 산화와 환원 반응식을 (2)-(6)에 나타내었다. 내연기관의 연소실(combustion chamber)에서 완전연소에 참여하지 못한 다양한 종류의 배기가스 중 탄화수소(HC)가 있다. 내연기관에서 배출되는 HC 성분 중 화합물 성분(paraffin, olefin, aromatic)에 따라 H₂-SCR 촉매에 미치는 영향이 있으나 선행연구³⁾를 살펴보면, 불포화 구조를 가지고 있는 olefin 계열 C₃H₆이 산화되면서 NO_x 환원 반응을 방해(blocking)한다. 따라서 반응성이 좋은 C₃H₆가 배기가스 중에 공존 시 H₂-SCR 촉매의 de-NO_x/CO 성능에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다.

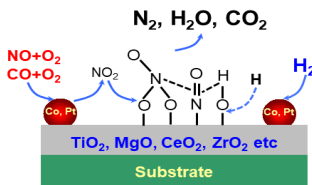


Fig. 3 Mechanism of simultaneous harmful gas reduction of H₂-SCR¹⁴⁾

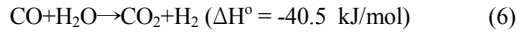
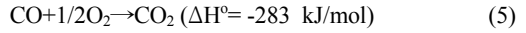
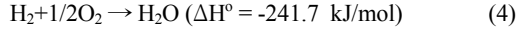
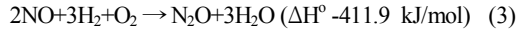
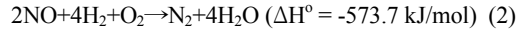


Fig. 4는 C₃H₆ 공존 시 NO와 NO₂ 가스의 거동을 나타내고 있다. C₃H₆가 공존하지 않을 경우, 촉매온도 125℃에서 NO 500 ppm 가스는 약 210 ppm까지 저감되며, 200℃ 이상에서는 약 350 ppm 이상으로 선형으로 증가한다. 175℃부터 Pt가 활성화됨에 따라 NO₂ 가스가 증가하고 있으며, 275℃ 이상에서는 약 100 ppm 수준으로 증가하고 있다. C₃H₆가 공존하는 C/N=9, 13.5 조건의 경우, 촉매온도 225℃에서 NO는 약 330 ppm 수준으로 감소하며, NO₂ 생성은 275℃ 이상에서 약 20 ppm 이하로 감소하였다. 결정구조가 약한 C₃H₆가 산화되면서 NO_x의 전체 환원반응을 방해하였기 때문이다. NO_x 환원과 C₃H₆의 산화 반응이 공존하면, 산화 반응이 우세하고 후순위 반응으로 환원 반응이 진행되며, 또한 결정구조가 약한 C₃H₆ 산화에 필요한 분해에너지가 NO 환원에 필요한 분해에너지보다 작으므로 NO_x 환원능력이 감소하는 것이다.

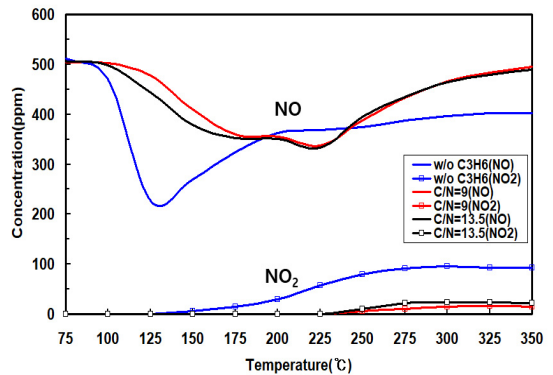
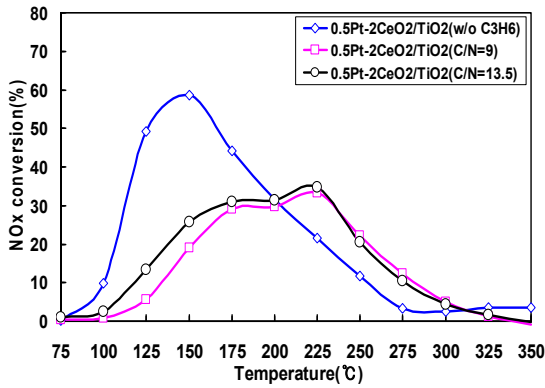


Fig. 4 Behaviour of NO and NO₂ gases according to co-existence C₃H₆

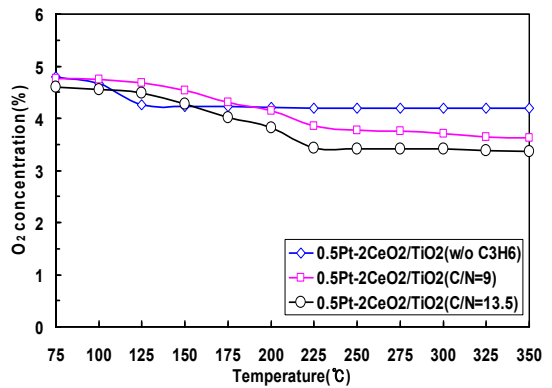
Fig. 5는 H₂-SCR 촉매의 C₃H₆ 공존에 따른 de-NO_x/CO의 동시저감 성능을 나타내고 있다. Fig. 5(a)에서 C₃H₆가 공존하지 않을 경우(w/o C₃H₆) 촉매온도 150℃에서 약 60% 수준으로 가장 높은 NO_x 정화 성능을 나타내고 있으며, window 또한 C₃H₆가 공존하는 경우보다 저온에서 활성화되었다. C₃H₆가 공존하는 C/N ratio = 9, 13.5의 경우, 225℃에서 약 35%의 가장 높은 de-NO_x 성능과 window는 우측으로 이동하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 5(b)에서 de-CO 성능에서 C₃H₆가 공존하지 않을 경우(w/o C₃H₆)에 촉매온도 125℃에서 약 78℃, 150℃에서 약 90% 이상의 CO 저감 성능을 나타내고 있다. C/N ratio = 9, 13.5인 경우, 150℃에서 시작해서 250℃에서 약 70% 이상의 CO

저감 성능을 나타내고 있다. H₂-SCR 촉매는 C₃H₆가 공존 시 농도 영향보다는 작은 농도의 C₃H₆가 공존할 때 촉매의 산화와 환원 반응을 방해하는 경향이 있다.

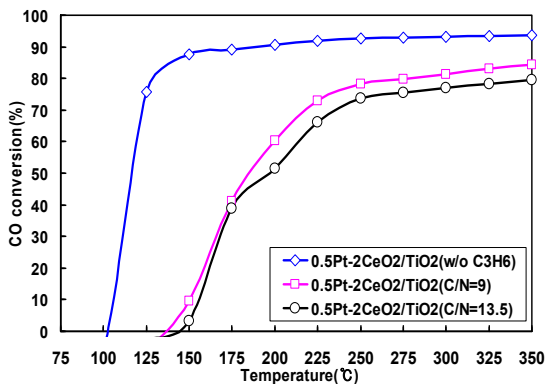
Fig. 6은 H₂-SCR 촉매의 C₃H₆ 공존에 따른 de-NO_x/CO 저감 성능을 토대로 산소(O₂) 농도 거동과 소모율을 나타내고 있다. O₂ 농도는 유해가스 산화와 환원 반응에 중요한 역할을 담당한다. C₃H₆가 공존하지 않은 경우(w/o C₃H₆) 최대 10% 수준의 O₂ 소모율을 나타내고 있다. 그러나 C₃H₆ 농도가 높은 C/N ratio = 9, 13.5인 경우, H₂-SCR 촉매는 225℃까지 O₂가 서서히 소모되고 있다. C/N ratio = 9의 경우, 350℃에서 최대 23%, C/N ratio = 13.9의 경우, 350℃에서 최대 28%까지 O₂가



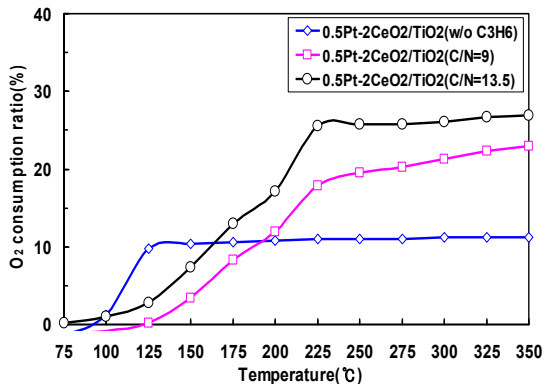
(a) NO_x conversion



(a) O₂ concentration behavior



(b) CO conversion



(b) O₂ consumption ratio

Fig. 5 De-NO_x/CO performance according to co-existence C₃H₆

Fig. 6 O₂ behavior and consumption ratio according to the C₃H₆ coexistence

소모되고 있다. 그 이유는 NO_x와 CO와의 반응에 필요한 O₂ 농도 이외에도, C₃H₆가 공존할 경우 결합구조가 약한 올레핀 계열의 C₃H₆의 산화에 필요한 O₂가 더 많이 사용되었기 때문이다.

3.2 H₂-SCR의 공간 속도에 따른 영향

자동차용 촉매는 다른 분야에 사용되는 촉매에 비해 엔진에서 배출되는 고온의 가스로 인하여 열적 열화(thermal aging)와 운전되는 상황에 따라 배출되는 가스의 유량이 수시로 변화하므로 촉매는 배출가스의 부하를 받게 된다. 공간 속도는 14,000 h⁻¹, 28,000 h⁻¹, 42,000 h⁻¹로 변경하면서 유해가스 저감 성능을 파악하였다.

Fig. 7은 여러 공간 속도에 따른 NO와 NO₂ 가스의 거동을 나타내고 있다. 유량이 가장 작은 14,000 h⁻¹의 경우, 촉매온도 125℃에서 NO 500 ppm에서 약 220 ppm까지 저감되며, 350℃에서 약 350ppm을 나타내고 있다. 150℃ 이하 온도에서는 활성이 높은 H₂ 환원제 영향으로 NO₂가 생성되지 않고 NO_x가 환원되며, 촉매온도 175℃ 이상 온도에서는 환원제 H₂의 일부 산화 및 산화 반응이 향상되므로 NO₂가 350℃에서 약 140 ppm 수준으로 배출되고 있다. 공간 속도 28,000 h⁻¹, 42,000 h⁻¹의 경우, 공간 속도가 증가하며 유량이 증가함에 따라 NO 가스는 높은 온도에서 저감이 되며, NO₂는 감소하는 경향을 나타내고 있다.

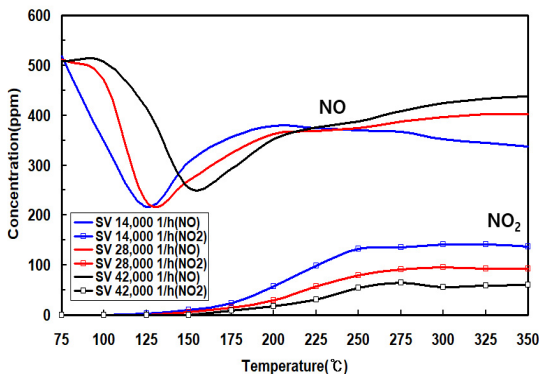
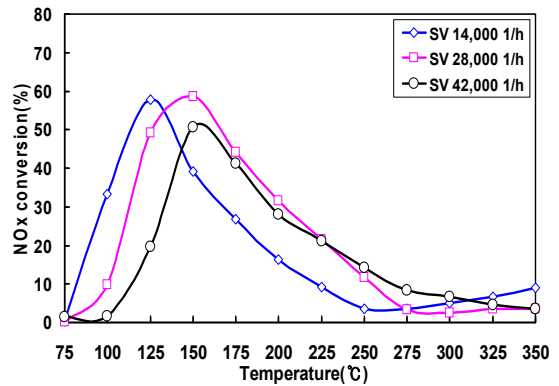
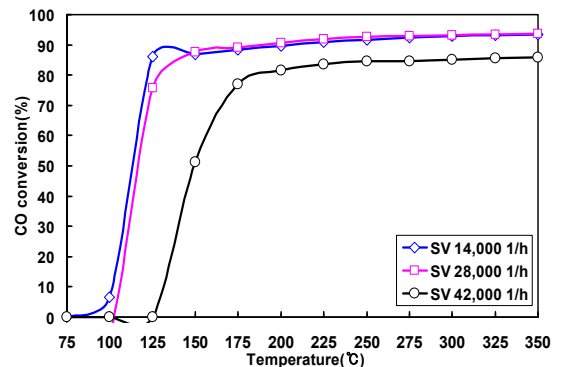


Fig. 7 Behaviour of emission gases according to the SV of H₂-SCR catalysts

Fig. 8은 여러 공간 속도에 따른 de-NO_x/CO 저감 성능을 나타내고 있다. Fig. 8(a)에서 유량이 가장 작은 14,000 h⁻¹의 경우, 125℃에서 약 60%의 가장 높은 NO_x 저감 성능을 나타내고 있다. 유량이 커지는 SV 28,000 h⁻¹, 42,000 h⁻¹의 경우, H₂-SCR 촉매는 SV 14,000 h⁻¹보다 온도인 150℃에서 가장 높은 NO_x 저감 성능을 나타내며, window 또한 우측으로 이동(shift)하는 동일한 경향을 나타내고 있다. 이는 공간 속도가 작으면 유량이 작은 경우이므로 촉매 체적에 잔류하는 시간이 길어지므로 de-NO_x/CO 저감 성능이 높다. 그러나 유량이 증가하면 촉매에 잔류하는 시간이 짧아지므로 Fig. 10의 B영역에서 유해가스가 배출되므로 저감 성능이 저하되는 것이다. Fig. 8(b)는 여러



(a) NO_x conversion



(b) CO conversion

Fig. 8 De-NO_x/CO performance according to the SV of H₂-SCR catalysts

SV에 따른 de-CO 저감 성능을 나타내고 있다. NO 환원에 필요한 에너지($\Delta H^\circ = -573.7 \text{ kJ/mol}$)보다 낮은 CO 산화에 필요한 에너지($\Delta H^\circ = -283 \text{ kJ/mol}$)로 인하여 CO 산화는 촉매온도 100°C 에서 시작된다. SV $14,000 \text{ h}^{-1}$ 와 $28,000 \text{ h}^{-1}$ 의 경우, $\text{H}_2\text{-SCR}$ 은 100°C 에서 CO 산화가 시작되면서 125°C 이상에서는 약 90%의 CO를 저감시키고 있다. 유량이 큰 SV $42,000 \text{ h}^{-1}$ 의 경우, 150°C 에서 약 52%, 200°C 이상에서 약 83%의 CO 저감 성능을 나타내고 있다. 이 또한 공간 속도가 증가하고 유량이 증가할수록 $\text{H}_2\text{-SCR}$ 촉매에 잔류하는 시간이 짧아짐에 따라 Fig. 10의 NO_x 저감 계통도의 B영역에서 유해가스가 배출되며, 공간 속도가 작을수록 배출가스의 촉매 길이 방향의 잔류시간이 길어져 C영역에서 배출되므로 유해가스 저감 성능이 향상되는 것이다.

Fig. 9는 $\text{H}_2\text{-SCR}$ 촉매의 SV에 따른 de- NO_x/CO 저감 성능을 토대로 O_2 소모율을 나타내고 있다. 유량이 가장 작은 $14,000 \text{ h}^{-1}$ 의 경우, 저온 75°C 에서 시작해 125°C 에서 O_2 가 약 10% 전환되고 있다. 낮은 유량으로 인하여 NO와 CO가 환원과 산화에 O_2 가 사용되었기 때문이다. 유량이 커질수록 SV $28,000 \text{ h}^{-1}$, $42,000 \text{ h}^{-1}$ 의 경우, SV $14,000 \text{ h}^{-1}$ 보다 O_2 전환율은 100°C 에서 시작해서 촉매온도 150°C 에서 약 12%의 O_2 소모율을 나타내고 있다. SV가 작을수록 저온에서 O_2 소모율이 높고, SV가

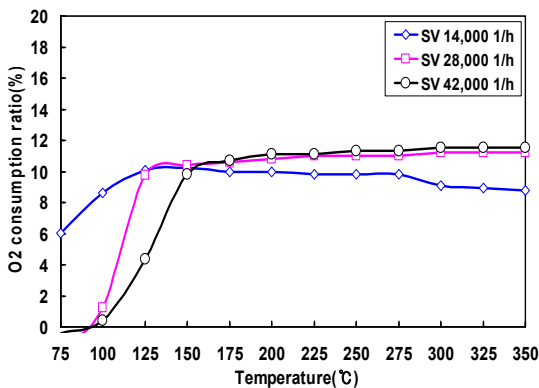


Fig. 9 O_2 consumption characteristics according to the SV

클수록 O_2 전환율은 중온 이상에서 높다. 이는 Fig. 8의 de- NO_x/CO 성능 그래프에서 볼 수 있듯이 SV가 커질수록 window가 우측으로 이동하기 때문이다.

Fig. 11은 C_3H_6 공존과 공간 속도에 따른 $\text{H}_2\text{-SCR}$ 촉매의 평균 de- NO_x/CO 성능을 나타내고 있다. 촉매온도 $75 \sim 350^\circ\text{C}$ 에서 평균적으로 NO_x 와 CO 저감 성능을 나타낸 값이다. $0.5\text{Pt-2CeO}_2/\text{TiO}_2$ $\text{H}_2\text{-SCR}$ 에 비해 C_3H_6 가 공존하는 $\text{C/N ratio} = 13.5$ 인 경우, 평균 NO_x 전환율은 20.01%에서 14.74%로 약-5.27% 감소하였다. 평균 CO 전환율은 73.82%에서 44.24%로 약-29.58% 감소하였다. 표준 SV인 $28,000 \text{ h}^{-1}$ 에서 유량이 증가한 $42,000 \text{ h}^{-1}$ 에 비해 평균 NO_x 전환율은 20.01%에서 16.81%로 약 -3.2% 감소하였다. 평균 CO 전환율은 73.82%에서 59.94%로 약 -13.88% 감소하였다. C_3H_6 공존 시 평균 NO_x 전환율이 감소하는 추세는 식 (7)을

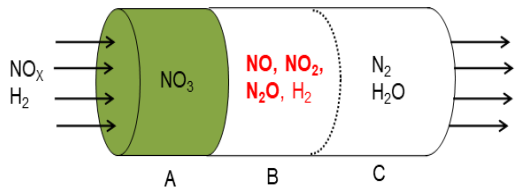


Fig. 10 Schematic diagram of NO_x reduction according to axial length on $\text{H}_2\text{-SCR}$ catalyst

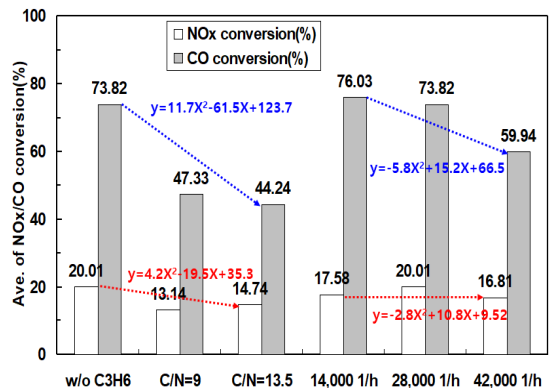


Fig. 11 Average of NO_x/CO conversion according to C_3H_6 coexistence and SV

추중하며, CO의 평균 전환율이 감소하는 추세는 식 (8)을 추중한다. H₂-SCR 촉매의 여러 부하에 따른 촉매의 de-NO_x/CO 성능 감소는 SV 영향보다는 결합구조가 약하여 화합물 분해가 잘되는 C₃H₆가 공존할 때가 더 크다고 할 수 있다. C₃H₆ 공존 시 NO_x와 CO 가스 저감 능력 특성을 통하여 주촉매 귀금속, 조촉매 및 지지체의 최적화 연구가 진행될 계획이다.

$$y = 4.2x^2 - 19.5x + 35.3 \quad (7)$$

$$y = 11.7x^2 - 61.5x + 123.7 \quad (8)$$

4. 결 론

H₂-SCR의 배출가스 중 프로필렌(C₃H₆)이 공존할 때와 공간 속도에 따른 유해가스 저감 특성을 파악한 결과는 다음과 같다.

1) C₃H₆가 공존하지 않을 경우(w/o C₃H₆), H₂-SCR 촉매는 150℃에서 약 60% 수준으로 가장 높은 NO_x 정화 성능을 나타냈고, window 또한 C₃H₆가 공존하는 경우보다 저온에서 활성화되었다.

2) C/N ratio = 13.9의 경우 350℃에서 최대 28%까지 O₂가 전환되었다. 이는 NO_x와 CO와의 반응에 필요한 O₂ 농도 이외에도, C₃H₆가 공존할 경우, 결합구조가 약한 올레핀 계열의 C₃H₆의 산화에 필요한 O₂가 더 많이 사용되었기 때문이다.

3) 14,000 h⁻¹의 경우, 125℃에서 약 60%의 가장 높은 NO_x 저감 성능을 나타냈다. 이는 공간 속도가 작으면 유량이 작으므로 촉매 체적에 잔류하는 시간이 길어지므로 de-NO_x/CO 저감 성능이 높기 때문이다.

4) H₂-SCR의 de-NO_x/CO 성능 감소는 SV 영향보다는 결합구조가 약하여 화합물 분해가 잘되는 C₃H₆가 공존할 때가 더 컸다.

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. X. Wei, R. Zhao, B. Chu, S. Xie, Q. Qin, K. Chen, L. Li, S. Zhao, B. Li and L. Dong, 2022, "Significantly enhanced activity and SO₂ resistance of Zr-modified CeTiO_x catalyst for low-temperature NH₃-SCR by H₂ reduction treatment", *Molecular Catalysis*, 518, 112069. (<https://doi.org/10.1016/j.mcat.2021.112069>)
2. W. Zhang, G. Liu, J. Jiang, Y. Tan, Q. Wang, C. Gong, D. Shen and C. Wu, 2020, "Temperature Sensitivity of the Selective Catalytic Reduction (SCR) performance of Ce-TiO₂ in the presence of SO₂", *Chemosphere*, 243(5), 125419. (<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125419>)
3. C. K. Seo, 2021, "Effect on TiO₂ Addition of the Durability of Cu-SCR Catalysts for Nitrogen Oxide Reduction", *Journal of Power System Engineering*, 25(1), 70-77. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2021.25.1.070>)
4. L. Xuesong, W. Xiaodong, W. Duan and S. Lei, 2016, "Modification of Cu/ZSM-5 with CeO₂ for Selective Catalytic Reduction of NO_x with Ammonia", *Journal of Rare Earths*, 34(10), 1004-1009.
5. J. W. Yoon, F. R. Xu and S. H. Jung, 2019, "Numerical Analysis for Temperature Distributions of SCR in Kaya Ship", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 23(1), 63-69. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2019.23.1.063>)
6. T. Usui, Z. Liu, S. Ibe, J. Zhu and C. Anand, 2018, "Improve the Hydrothermal Stability of Cu-SSZ-13 Zeolite Catalyst by Loading a Small

- Amount of Ce”, *ACS Catalysis*, 8(8), 9165-9173.
7. C. K. Seo, 2023, “Effect on De-NOx/CO Performance of the Exhaust Gas of H₂-SCR”, *Journal of Power Engineering*, 27(2), 5-12. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2023.27.2.005>)
 8. 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))
 9. 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>)
 10. F. J. P. Schott, P. Balle, J. Adler and S. Kureti, 2009, “Reduction of NOx by H₂ on Pt/WO₃/ZrO₂ catalyst in oxygen-rich exhaust”, *Applied Catalysis B: Environmental* 87(1-2), 18-29. (<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.08.021>)
 11. L. Li, P. Wu, Q. Yu, G. Wu and N. Guan, 2010, “Low Temperature H₂-SCR over Platinum Catalysts supported Ti-containing MCM-41”, *Applied Catalysis B: Environmental*, 94(3-4), 254-262. (<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.11.016>)
 12. 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.2022.155040>)
 13. L. Cao, Q. Wang and J. Yang, 2020, “Ultrafine Pt particle directed by polyvinylpyrrolidone on zeolite beata as an efficient low-temperature H₂-SCR catalyst” *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8(1), 103631. (<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103631>)
 14. C. K. Seo, 2022, “Improvement of NOx and CO reduction performance at low temperature of H₂-SCR catalyst”, *International Journal of Automotive Technology*, 23, 1509-1515. (<https://doi.org/10.1007/s12239-022-0131-x>)
 15. C. K. Seo, 2021, “Characteristics of Harmful of H₂-SCR Catalysts for Domestic and Industrial Boilers”, *Journal of Power System Engineering*, 25(4), 62-68. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2021.25.4.062>)