

H₂-SCR의 배출 가스가 De-NO_x/CO 성능에 미치는 영향

Effect on De-NO_x/CO Performance of the Exhaust Gas of H₂-SCR

서충길*†
Choong-Kil Seo*†

(Received 06 October 2022, Revision received 21 March 2023, Accepted 22 March 2023)

초록 : 자동차, 건설기계, 선박, 가정용 보일러 등에 대한 배기가스 규제가 강화되고 있습니다. 이 연구는 내연기관에서 배출되는 가스가 H₂-SCR 촉매의 NO_x 및 CO 저감 성능에 미치는 영향을 파악하는 것이다. H₂ 농도가 클수록 최대 250°C까지 NO_x 전환율 윈도우가 넓어졌다. 환원제 H₂ 농도가 증가할수록 H₂ 분자와 NO_x 분자 간의 충돌 횟수가 증가하여, NO_x 환원 능력이 향상되었다. NO_x 환원 반응에서 많은 양의 O₂ 농도는 환원제 H₂를 산화시키고, H₂O 생성에 영향을 미치므로 O₂ 농도가 낮을수록 NO_x 환원 능력이 더 좋다. 수분 농도가 높을수록 H₂-SCR 촉매의 흡착, 반응 및 탈착의 일련의 촉매 반응 속도를 방해하기 때문에 de-NO_x 성능이 저하되었다.

키워드 : 촉매, 질소산화물, 선택적촉매환원, 일산화탄소, 수소

Abstract : Exhaust gas regulations on automobiles, construction machinery, ships, and domestic boilers are being strengthened. This study is to investigate the effect of the gas emitted from the internal combustion engine on the NO_x and CO reduction performance of the H₂-SCR. The larger the H₂ concentration, the wider the NO_x conversion window was formed up to 250°C. As the reducing agent H₂ concentration increased, the number of collisions between H₂ molecules and NO_x molecules increased. Thus, the NO_x reduction ability was improved. In the NO_x reduction reaction, lower O₂ concentration improved the NO_x reduction ability since a large amount of O₂ concentration oxidized the reducing agent H₂ and affected H₂O production. The higher the H₂O concentration, the lower the de-NO_x performance. The reason for this is that it blocked the reaction rate of a series of catalysts of adsorption, reaction and desorption of the H₂-SCR.

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

1. 서 론

화석연료에서 배출되는 물질로 인한 지구온난화와 인체의 유해성 등으로 전 세계가 탄소중립

정책을 추진하고 있다. 그 대책의 일환으로 전기차, 수소차 등 친환경 자동차로 파워트레인의 전환이 진행되고 있다. 그러나 친환경 자동차의 인프라 구축, 비용문제, 화재사고의 안정성 문제점

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

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.¹⁾ 그리고 2027년도에는 자동차 내연기관의 마지막 규제라 할 수 있는 엄격한 Euro 7 배기규제가 시행될 예정이다. 특히, 디젤엔진에서 많이 배출되는 질소산화물(NOx)은 WHO에서 정한 발암 물질이며, 미세먼지를 유발하는 환경오염 물질이다. 현재까지 질소산화물 저감을 위한 후처리 촉매는 SCR(Selective Catalytic Reduction)²⁻⁷⁾이 연구되고 상용화되었다. 또한 미래는 청정 에너지원인 수소(H₂)를 제조하고 활용하는 기술이 각광받을 것으로 전망되므로 수소 관련 연구는 매우 중요하다.

지금까지 수소를 이용하여 유해가스를 저감시키는 H₂-SCR⁸⁻¹²⁾의 대한 선행 연구가 이루어졌다. 그러나 기존의 Urea-SCR은 150°C 이하의 저온에서 활성화되지 않아 배출되는 유해가스의 저감이 어려웠다. 하지만 친환경 에너지원인 H₂를 이용하여 저온에서 NOx, CO 가스를 저감시킬 수 있다면 H₂-SCR의 활용성은 크다고 할 수 있다. 특히, 배출가스의 온도가 150°C 이하인 내연기관, H₂ 연료 엔진 및 가정·산업용 보일러 등에 상용화될 수 있다.

이 연구는 H₂-SCR의 배출가스가 De-NOx/CO 성능에 미치는 영향을 파악하는 것이다.

2. 촉매 특성 및 실험 방법

이 연구에 제조된 H₂-SCR(0.5Pt-2CeO₂/TiO₂, 0.91 g, 중으로 코팅, 212g/L)은 함침법(impregnation method)을 이용하여 제조하였다. SCR의 코팅량은 212 g/L이며, 담체(substrate, 400CPSI: Cell Per Square Inch)에 소정의 촉매와 조촉매 물질을 담지하였다. 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

Table 1 Textura properties of H₂-SCR catalys

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 catalys

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

촉매보다 pore의 BET 비표면적이 작고, pore 입자가 큰 경향을 나타내고 있다. Pore의 BET 비표면적이 크고, 화학반응을 대상으로 하는 가스의 pore 사이즈가 잘 맞아야 촉매의 화학반응 성능을 개선시킬 수 있다. Table 2는 TiO₂ 지지체 표면의 Pt 입자의 분산도(dispersion) 측정을 위하여 CO-chemisorption(Microtrac BEL, JP/BELCAT II)을 수행한 결과이며, TiO₂ 위에 Pt가 담지되었을 때, 분산도 및 입자크기에 따라 흡착하는 CO gas의 흡착량을 나타내고 있다. 분산도는 16.85%로 보통 수준의 분산도로 촉매제조법에 따라 달라질 수 있다. 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 촉매 활성을 나타낸다.

Fig. 1은 TiO₂의 비표면적과 pore volume 특성을 나타내고 있다. 질소 흡·탈착 등온선 결과를 통하여 비표면적을 구하였고, BJH식을 이용하여 기공 입자 및 부피를 구하였다. 300°C, 5 hr 동안 진공으로 촉매를 전처리한 후 액체 질소를 압력을 변경하여 흡착시킨다. Fig. 1(b)는 TiO₂의 pore 입자 사이즈에 따른 pore 부피를 나타내고 있다. 주로 30 nm급의 mesopore(2~50 nm)가 많이 발생되고 있으며, mesopore가 많이 발달할수록 금속 입자의 분산도는 저하된다.

Fig. 2는 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. SCR 촉매 물질의 형상과 사이즈를 분석하기 위해 TEM(JEM-2000FX II (200kV), JEOL)을 이용하였다. Fig. 3은 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂ H₂-SCR 촉매의 XRD(D/max ULTIMA III)와 H₂-TRP(BELCAT-M-77) 분석 자료이다. 지지체 TiO₂는 아나타제 결정구조를 이루고 있으며, 결정에 따라 촉매의 활성에 영향을 미칠 수 있다. 소량의 2 wt% CeO₂가 담지되면 주피크와 보조피크가 크게 생성되지 않고 있다.

Fig. 3(b)는 H₂-TPR 거동을 나타내고 있다. 실험 조건은 500°C에서 3 hr 동안 공기에서 소성(calcination)한 촉매 파우더에 BEL-CAT(H₂-TPR) 분석기에 H₂ 5%/Ar을 50~1,000°C까지 분당 10°C 상승시켜 거동을 파악하였다. 250, 550°C에서 발생

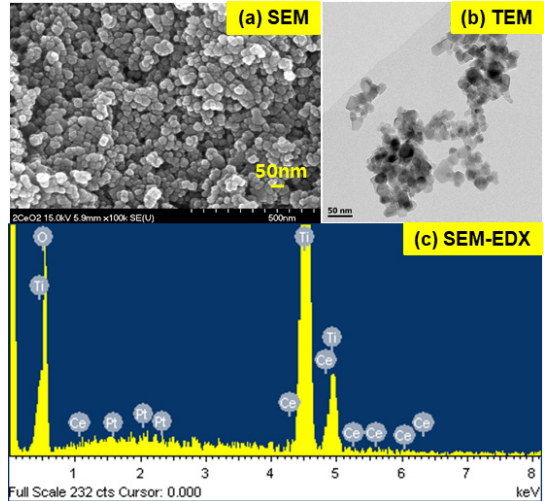
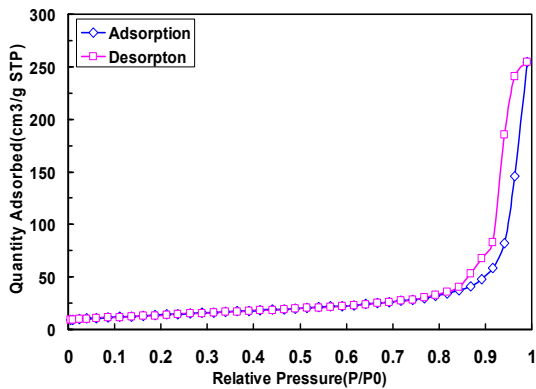
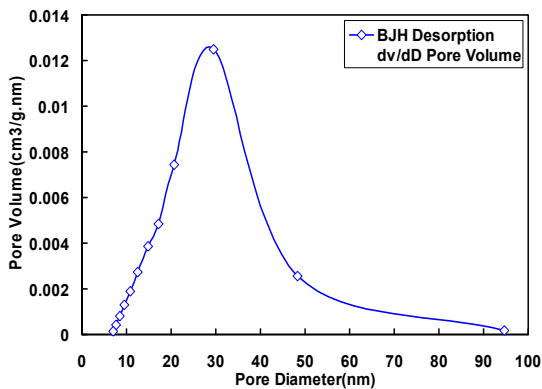


Fig. 2 Analysis data of 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂ H₂-SCR

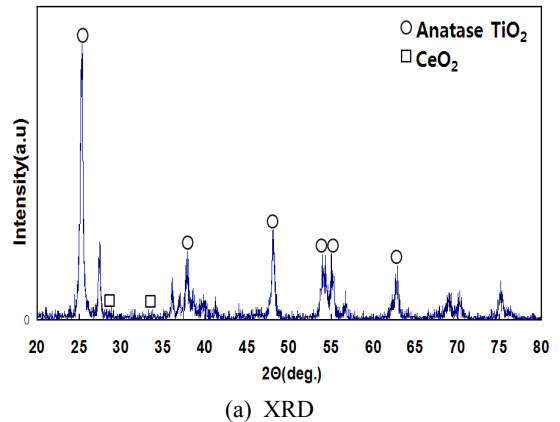


(a) Isotherm linear plot

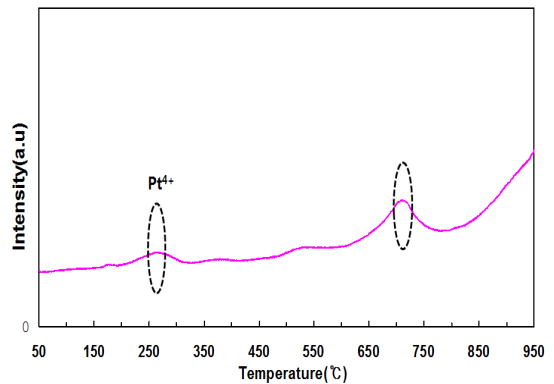


(b) Pore volume

Fig. 1 Surface area and pore volume of TiO₂



(a) XRD



(b) H₂-TPR

Fig. 3 XRD and H₂-TPR 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 (%)	2, 5, 10
H ₂ (%)	0.3, 1, 2.5
H ₂ O(%)	1.5, 5, 10
N ₂	Balance
SV(h ⁻¹)	28,000

된 피크는 Pt⁴⁺, Pt²⁺가 metallic Pt로 환원되었다고 판단된다. PtO의 화합물보다는 metallic Pt가 촉매 활성을 촉진시킬 수 있다.

Table 3은 H₂-SCR의 de-NOx/CO 성능 평가를 위한 모델가스조건¹⁾이다. Fig. 4는 H₂-SCR의 유해가스 성능을 파악하기 위한 모델가스반응장치를 나타낸다. 모델가스반응장치는 가스 공급부, 유량 제어부, 촉매 반응부 및 분석부로 구성된다. 촉매 온도는 75~350°C 정상상태(steady state) 조건에서 5분을 유지하면서 de-NOx/CO 성능을 측정하였다. 수분(H₂O) 농도 조절(H₂O 1.5, 5, 10%)은 가습기 온도 변화에 따라 포화 수분량이 변화되는 수분 트랩 방식의 가습기에 N₂ 가스를 통과시켜 조절하였다. H₂-SCR의 유해가스 정화성능은 식 (1)과 같이 계산하였으며, 촉매 반응 후의 가스 성분은 가스분석기(VarioPlus Industrial, MRU Instruments, Inc.)를 이용하여 1초 간격으로 정량적으로 측정하였다.

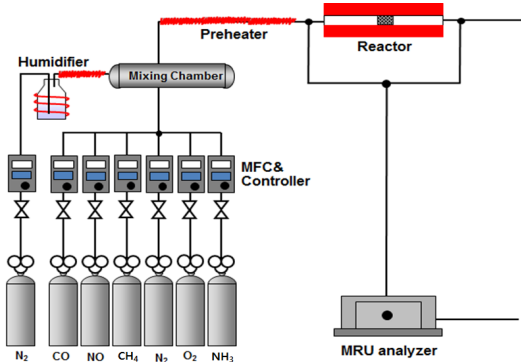


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

$$\frac{(NO_{xin} - NO_{x out}) * 100}{(NO_{xin})} \quad (1)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 환원제 H₂ 농도에 따른 De-NOx/CO 성능

Fig. 5는 H₂-SCR의 유해가스 NO_x, CO 및 HC의 동시저감 메커니즘을 나타내고 있다. One layer zone coating법을 이용하며, 유해가스를 저감시킨다. 전단에는 소량의 귀금속 Pt를 담지하여 NO와 CO를 산화시키며, NO는 질산염(nitrate)으로 흡장된 뒤 환원제 H₂가 공급될 때 환원된다. 후단에는 HC에 선택도(selectivity)가 높은 Pd를 소량 담지하여 HC를 산화시킨다. NO와 CO의 산화와 환원 반응식을 (2)-(6)에 나타내었다.

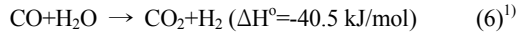
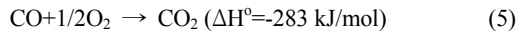
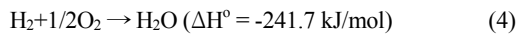
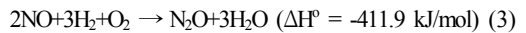
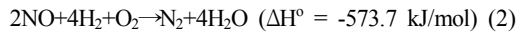


Fig. 6은 환원제 H₂ 농도에 따른 de-NOx/CO 저감 성능을 나타내고 있다. H₂ 0.3% 농도의 경우 촉매 온도 150°C에서 NO_x 저감율은 약 18% 수준이며, H₂ 2.5% 농도에 비해 윈도우(window)가 좁고 NO_x 저감 성능이 매우 낮다. H₂ 1% 농도에서는 0.3% 농도에 비해 윈도우의 변화는 거의 없지

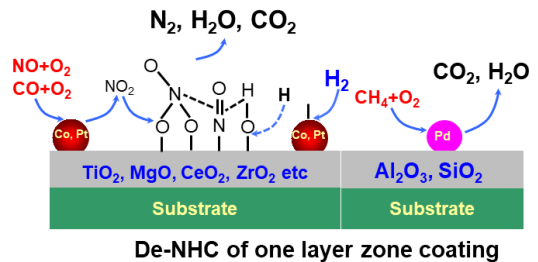
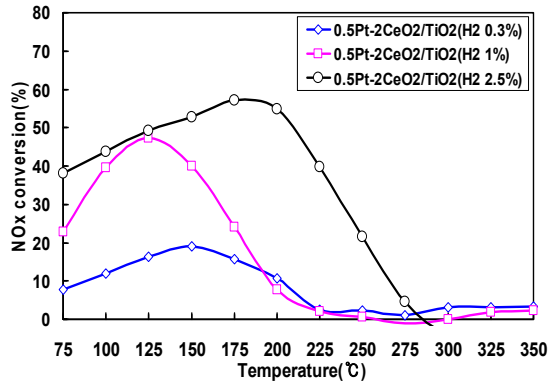


Fig. 5 Mechanism of simultaneous harmful gas reduction of H₂-SCR¹⁾

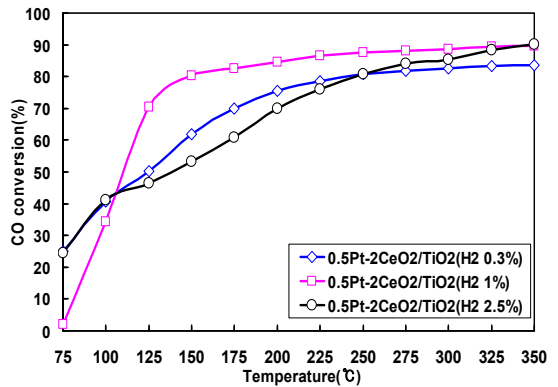
만 NO_x 저감 성능이 크게 향상되며 그 최대값은 125°C에서 약 45%를 나타낸다. H₂ 2.5% 농도의 경우, NO_x 전환율이 75°C에서 약 39%, 175°C에서 약 57%로 가장 우수한 NO_x 저감 성능을 나타낸다. 그리고 NO_x 저감 윈도우는 250°C까지 넓게 형성되고 있다. 위의 결과로부터 H₂ 농도의 증가가 NO_x 저감 윈도우에 미치는 영향은 단정할 수 없지만, 적어도 150°C 부근의 저온 영역에서는 H₂ 농도가 증가할수록 NO_x 저감 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 이는 환원제 H₂ 농도가 증가하면 H₂ 분자와 NO_x 분자 간의 충돌 횟수가 증가하면서 질산염(nitrate)으로 흡장된 NO_x 환원 능력을 향상시켰기 때문으로 생각된다. Fig. 6(b)의 CO 전환율에서 H₂ 농도 1%가 공급될 경우, H₂-SCR의 CO 저감 성능은 125°C 이상의 온도에서 70%를 초과하면서 가장 뛰어난 저감 성능을 나타내고 있다.

한편, 식 (5)의 CO가 CO₂로 변환되는 과정에서 열량 변화 $\Delta H^0 = -283 \text{ kJ/mol}$ 로 낮으므로 환원제 H₂ 농도의 증가에 따른 CO 전환율은 큰 영향이 없다고 판단한다.

Fig. 7은 환원제 H₂ 농도에 따른 H₂-SCR의 산소(O₂) 농도의 거동을 나타내고 있다. 0.5pt-2CeO₂/TiO₂(H₂ 0.3%) SCR은 H₂ 농도가 0.3% 공급될 때, 초기 O₂ 농도 5%는 촉매온도에 따라 변화가 미미하다. H₂ 농도가 1% 공급될 때의 O₂ 농도 거동은 75~125°C 온도 영역에서 O₂ 농도 저감 폭이 가장 크며, 그 이상의 온도에서는 변화가 미미하다. 75~125°C 온도 영역에서 O₂ 농도가 감소한 것은 NO와 CO의 산화반응에 참여하였기 때문이다. 0.5pt-2CeO₂/TiO₂(H₂ 2.5%) SCR의 H₂ 농도가 2.5%로 공급될 경우, 촉매온도 75°C에서 O₂ 농도 4.2%, 350°C에서 3.7%까지 H₂ 농도가 클수록 O₂ 농도 감소량이 크고 감소되는 기울기도 크다. 이는 식 (3), (4)와 같이, H₂ 농도가 클수록 NO와 H₂가 반응하여 N₂O로 전환되고, H₂와 O₂의 반응으로 인해 H₂O가 생성되기 때문이다. 따라서 환원제 H₂의 농도는 NO 및 CO 저감 능력의 향상뿐만 아니라 경제성을 고려하여 적절하게 조절할 필요가 있다.



(a) NO_x conversion



(b) CO conversion

Fig. 6 De-NO_x/CO performance according to H₂ concentration

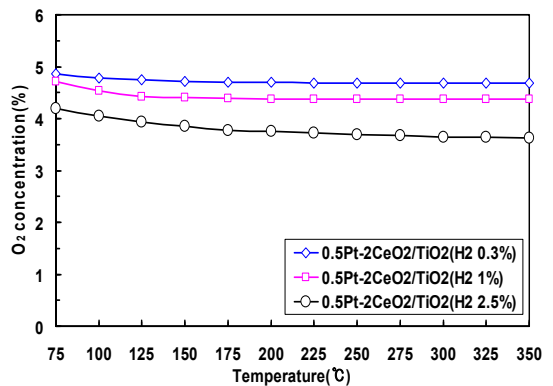
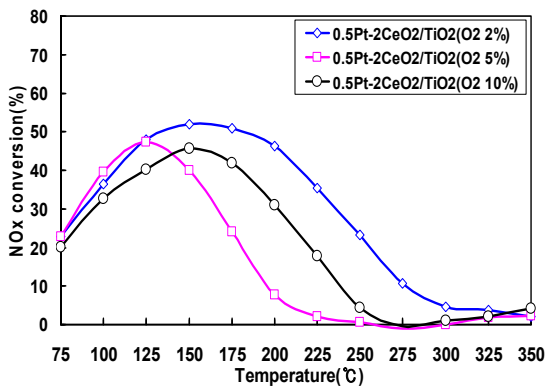


Fig. 7 Behaviour of O₂ gases according to H₂ concentration

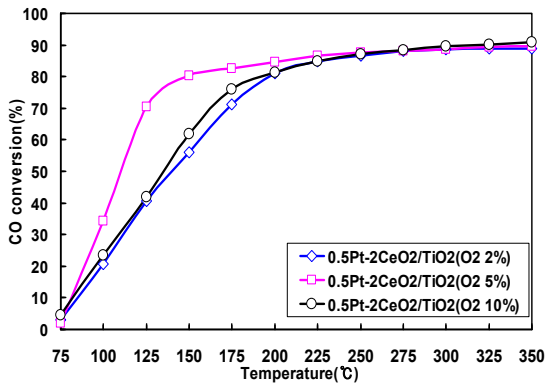
3.2 O₂ 농도에 따른 De-NOx/CO 성능

공기 중 약 21% 정도를 차지하는 산소(O₂)의 전기음성도는 3.44, 전자친화도는 141 kJ/mol로 대기에 존재하는 주요 기체 중에서 화학 반응성이 가장 크다. 그러므로 산소는 연소제 및 촉매의 산화와 환원반응에서 중요한 역할을 담당한다.

Fig. 8은 H₂-SCR의 O₂ 농도에 따른 de-NOx/CO 성능을 나타내고 있다. 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂(O₂ 2%) SCR의 NO_x 저감율은 75°C에서 22%, 150°C에서 52%로 O₂ 농도가 가장 낮은 조건에서 NO_x 전환율이 가장 높고 온도도 넓게 분포하고 있다. 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂(O₂ 10%) SCR의 NO_x 전환율은 75°C에서 20%, 150°C에서 45%로 O₂ 2%에 비해 NO_x 전환율이 낮고 또 NO_x 전환 온도도 좁다.



(a) NO_x conversion



(b) CO conversion

Fig. 8 De-NOx/CO performance according to O₂ concentration

O₂는 산화 및 환원 반응에서 중요한 가스이며, 특히 NO_x 환원 반응에서는 높은 O₂ 농도가 환원제 H₂를 산화시켜 H₂O 생성에 영향을 미친다. 따라서 NO_x 환원 반응의 경우 O₂ 농도가 낮을수록 유리하다. 한편, O₂ 5%의 조건에서는 75~125°C에서의 NO_x 전환율이 가장 높다. 그런데 125°C를 초과한 영역에서는 그 값이 가장 낮으며 온도도 가장 좁게 나타난다.

Fig. 8(b)의 H₂-SCR의 CO 저감율을 살펴보면, O₂ 5%의 경우 100°C에서 35%, 200°C에서 83%로 조건 중 가장 큰 값을 나타낸다. 그리고 O₂ 2%와 O₂ 10%의 조건에서는 CO 저감율이 100°C에서 약 20%, 200°C에서 약 80% 정도로 농도와 관계없이 거의 동일한 수준이고 온도도 분포폭선도 거의 같은 경향을 나타내고 있다.

CO 전환율은 화학식 (5)에서 볼 수 있듯이 1 mol의 CO와 0.5 mol의 O₂가 반응하여 1 mol의 CO₂를 생성시키는 화학반응식으로 에너지가 많이 필요하지 않다. 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂ H₂-SCR의 CO 전환 성능에 있어서 O₂ 농도에 따른 영향은 미미하며, NO_x 저감 성능에는 열량이 많이 요구되므로 중요한 인자가 될 수 있다. 식 (5)의 CO₂ 생성 과정에는 많은 에너지가 필요하지 않으므로 O₂ 농도가 H₂-SCR의 CO 전환 성능에 미치는 영향은 미미하다. 그러나 식 (2), (3)의 NO_x 환원 과정의 경우 CO₂ 생성 과정에 비해 많은 열량이 필요하므로 O₂ 농도는 NO_x 저감 성능에 중요한 인자가 될 수 있다.

3.3 수분 농도에 따른 De-NOx/CO 성능

내연기관에서 배출되는 물질 중 수분(H₂O)이 차지하는 부피는 약 1.5~10%로 작지 않다. 이 절에서는 수분 농도가 H₂-SCR에 미치는 영향을 파악하였다. 수분 농도는 가습기의 온도를 조절하여 1.5%, 5%, 10%로 설정하였다.

Fig. 9는 수분 농도에 따른 H₂-SCR의 유해가스 저감 성능을 나타내고 있다. 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂(H₂O 1.5%)는 온도 125°C에서 60% 수준의 de-NO_x 성능을 나타내며, 250°C 이상에서는 약 10%의 성능을 나타내고 있다. 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂(H₂O 5%) SCR

은 150°C에서 약 60%의 NO_x 저감 성능을 나타내고 있다. H₂O 5% SCR은 H₂O 1.5%와 거의 같은 NO_x 저감 성능을 나타내지만, 저온 활성은 H₂O 1.5%에 비해 낮다. 수분 농도가 가장 높은 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂(H₂O 10%) SCR은 150°C에서 약 53%로 가장 낮은 NO_x 저감 성능을 나타내고 있으며, 농도가 증가할수록 de-NO_x 성능 곡선의 창(window)이 우측으로 이동(shift)한다. 수분 농도가 높을수록 H₂-SCR 촉매의 흡착, 반응 및 탈착의 일련의 촉매의 반응속도를 방해(blocking)하기 때문에 de-NO_x 성능이 저하된다.

Fig. 9(b)는 수분 농도에 따른 H₂-SCR의 CO 저감 성능을 나타내고 있다. de-NO_x 성능 경향과 동일하게 수분 농도가 낮은 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂(H₂O

1.5%) SCR은 125°C 이하 저온에서 활성이 좋고, 150°C 이상 온도에서는 90%의 CO 저감 성능을 나타내고 있다.

CO 저감 성능은 de-NO_x 성능 경향과 동일하게 수분 농도가 낮을수록 125°C 이하 저온에서 활성이 좋고, 150°C 이상에서는 수분 농도와 관계없이 90% 정도를 나타내고 있다. 수분 농도가 높은 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂(H₂O 10%) SCR은 150°C에서 가장 낮은 약 70%의 CO 저감 성능과 window가 우측으로 이동되며 촉매의 반응속도가 저하되었다.

4. 결 론

내연기관에서 배출되는 가스가 H₂-SCR의 NO_x와 CO 저감 성능에 미치는 영향을 파악한 결과는 다음과 같다.

- 1) 150°C 부근의 저온 영역에서는 H₂ 농도가 증가할수록 NO_x 저감 성능이 개선되었다. 이는 환원제 H₂ 농도가 클수록 H₂ 분자와 NO_x 분자 간의 충돌 횟수가 커짐에 따라 NO_x 환원 능력이 향상되었다.
- 2) H₂ 농도가 클수록 NO와 H₂가 반응하여 N₂O로 전환되고 H₂와 O₂의 반응으로 인해 H₂O가 생성되기 때문에 O₂의 감소량은 증가한다. 그러므로 환원제 H₂의 농도는 de-NO_x/CO 성능의 향상뿐만 아니라 경제성을 고려하여 적절하게 조절할 필요가 있다.
- 3) 0.5Pt-2CeO₂/TiO₂(H₂O 1.5%) SCR은 125°C에서 de-NO_x/CO 성능이 각각 60% 및 85% 정도였고, 수분의 농도가 높을수록 de-NO_x/CO 성능이 저하되었다.

후 기

이 연구는 호원대학교 교내연구비로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

References

1. C. K. Seo, 2022, "Effect of ZrO₂ and La on the

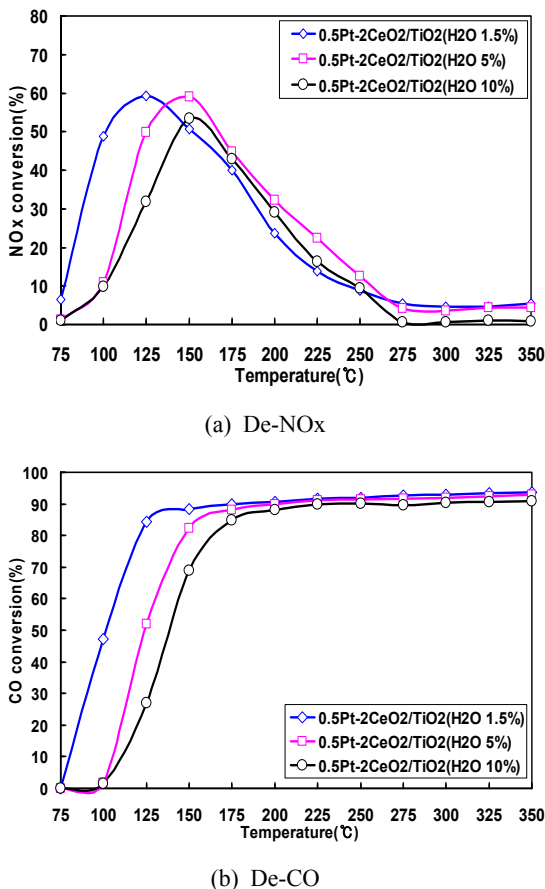


Fig. 9 De-NO_x/CO performance according to H₂O concentration amount of H₂-SCR catalysts

- NOx and CO Reduction Performance of H₂-SCR Catalyst”, *Journal of Power Engineering*, 26(4), 5-11.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2022.26.4.005>)
2. T. Usui et al., 2018, “Improve the Hydrothermal Stability of Cu-SSZ-13 Zeolite Catalyst by Loading a Small Amount of Ce”, *ACS Catalysis*, 8(10), 9165-9173.
(<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscatal.8b01949>)
 3. 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>)
 4. L. Xuesong, W. Xiaodong, W. Duan and S. Lei, 2016, “Modification of Cu/ZSM-5 with CeO₂ for Selective Catalytic Reduction of NOx with Ammonia”, *Journal of Rare Earths*, 34(10), 1004-1009.
([https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(16\)60127-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(16)60127-8))
 5. 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>)
 6. 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>)
 7. F. Birkhold, U. Meingast, P. Wassermann and O. Deutschmann, 2007, “Modeling and Simulation of the Injection of Urea-water-solution for Automobile SCR De NOx-systems”, *Applied Catalysis B: Environmental*, 70(1-4), 119-127.
(<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2005.12.035>)
 8. J. Kim, K. Ha and G. Seo, 2014, “Selective Catalytic Reduction of NO by H₂ over Pt-MnOx/ZrO₂-SiO₂ Catalyst”. *Korean Chemical Engineering Research*, 52(4), 443-450.
(<https://doi.org/10.9713/kcer.2014.52.4.443>)
 9. C. K. Seo, 2021, “Characteristics of Harmful Gases 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>)
 10. Z. Savva, K. C. Petallidou, C. M. Damaskinos, G. G. Olympiou, V. N. Stathopoulos and A. M. Efstathiou, “H₂-SCR of NOx on low SSA CeO₂ supported Pd: The Effect of Pd Particle Size”, *Applied Catalysis A, General*, 615(2), 118062.
(<https://doi.org/10.1016/j.apcata.2021.118062>)
 11. Y. Xue, W. Sun, Q. Wang, L. Cao and J. Yang, “Sparsely loaded Pt/MIL-96(Al) MOFs Catalyst with enhanced activity for H₂-SCR in a Gas Diffusion Reactor under 80°C”, *Chemical Engineering Journal*, 335(5), 612-620.
(<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.011>)
 12. S. S. Kim, H. J. Choi and S. C. Hong, 2010, “A Study on Reaction Characteristics of H₂ SCR using Pt/TiO₂ Catalyst”, *Applied Chemical Engineering*, 21(1), 18-23.