

수소-선택적인 환원촉매의 환원제 및 분사 방법에 따른 유해가스 저감 특성

Harmful Gas Reduction Characteristics according to Reducing Agent and Injection Method of H₂-SCR

서충길* †
Choong-Kil Seo* †

(Received 23 July 2024, Revision received 01 October 2024, Accepted 08 October 2024)

초록 : 이 연구는 H₂-SCR의 환원제 종류와 분사 방식에 따른 유해가스 저감을 파악하는 것이다. 환원제 NH₃ 1,000 ppm이 H₂-SCR 공급될 경우, 연소온도가 H₂보다 느리므로 125°C에서 NO_x가 저감되기 시작하면서 200°C에서 LOT50에 이르렀다. H₂ 1%+NH₃ 1,000 ppm의 환원제가 될 경우, 촉매온도 약 130°C에서 NO_x 전환율은 LOT50에 이르렀고, 175°C에서 약 81%의 가장 높은 성능을 나타냈고, window 또한 대폭 넓어졌다. Urea-SCR 촉매의 환원제 NH₃는 H₂-SCR에도 동일한 경향을 환원제 역할을 담당했고, 이는 산화능력이 매우 큰 지지체 TiO₂가 알칼리 계열 NH₃의 흡착력이 작용했기 때문이다. In-cylinder-injection 환원제 분사에 비해 post-injection 방식이 훨씬 더 저온활성 능력과 de-NO_x/CO 성능이 향상되었으며, H₂-SCR 후처리 시스템에는 post-injection 방식이 적합하다.

키워드 : 수소, 선택적인 환원촉매, 질소산화물, 일산화탄소, 환원제

Abstract : This study aims to investigate the reduction of harmful gases according to the type and injection method of H₂-SCR. When 1,000 ppm of the reducing agent NH₃ is supplied to H₂-SCR, the combustion temperature is slower than that of H₂; therefore, NO_x began to be reduced at 125°C and reached LOT50 at 200°C. In the case of a reducing agent of H₂ 1% + NH₃ 1,000 ppm, the NO_x conversion rate reached LOT50 at the catalyst temperature of about 130°C, the highest performance of about 81% at 175°C, and the window was also greatly widened. The reducing agent NH₃ of the Urea-SCR catalyst served as a reducing agent in the same trend for H₂-SCR, because the adsorption power of the alkali-based NH₃ acted on the support TiO₂ with very high oxidation capacity. Compared to the injection of the in-cylinder-injection reductant, the post-injection method improved the low-temperature activity capacity and de-NO_x/CO performance, and the post-injection method is suitable for the H₂-SCR post-processing system.

Key Words : Hydrogen, Selective Catalytic Reduction, NO_x, Carbon Monoxide, Reducing Agent

1. 서 론

화석 연료에서 배출되는 이산화탄소로 인하여 지구온난화가 지속되고 있으며, 유해가스는 대기

* † 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

질을 악화시키고 있다. 자동차는 차량 대수가 많으므로 배기 가스 배출 비중이 높아서, 전 글로벌적으로 배기 가스 규제가 엄격해지고 있다. EU는 Euro 7 배기가스 규정을 제안하였고, 새로운 소형 차량에 대해서는 2025년도 7월 1일에, 대형 차량에 대해서는 2027년 7월 1일에 발효된다.¹⁾ Euro 7 배기규제는 자동차의 내연기관에 적용되는 마지막 규제라고 판단이 되며, 유해가스는 거의 “0”에 미션을 달성해야 한다. 현재 ‘수소경제활성화로 드맵’, ‘2050 탄소 중립 추진 전략’에 따라 수소는 다양한 산업 부문으로 확대돼 청정에너지인 수소의 수요가 크게 증가할 것으로 예상된다. 이러한 가운데 무탄소 연료인 암모니아(NH₃)의 사용은 수소 캐리어(Carrier)로써 수소 경제를 견인할 수 있고, 이동 중에 독성가스 암모니아 누출 제어만 잘 된다면 향후 주목되는 CO₂-free 연료가 될 수 있다.

최근에 H₂-엔진이 개발되어 시판이 되었으나, H₂ 충전량이 작은 문제점을 드러내고 있다. 우리나라의 경우 친환경 자동차 도입을 위하여 많은 노력을 기울이고 있지만, 내연기관이 차지하는 비중은 약 90%를 차지하고 있다. 내연기관에서 배출되는 유해가스 중 연소온도가 높을 때 질소산화물(NOx)이 생성되며, 이는 발암물질로써 엄격하게 규제된다. NOx를 저감시키는 후처리 시스템을 SCR(Selective Catalytic Reduction)이라고 한다.^{2,3)}

특히 H₂-SCR은 H₂-엔진 및 가정용 보일러용 등 여러 분야로 적용될 수 있다. H₂-엔진에서 배출되는 물질은 H₂O와 NOx 및 H₂-엔진의 연료로 사용되었다가 슬립되는 H₂이다. 슬립되는 H₂를 이용하여 유해가스인 NOx를 저감시키는 기술은, 일거양득이라고 할 수 있다. 또한 배출가스 온도가 낮은 가정용 보일러에서 배출되는 유해가스는 NOx와 CO인데, 배기 가스 온도가 125°C 이하이므로 저온 조건에서 NOx와 CO를 동시에 저감시킬 수 후처리 시스템도 H₂-SCR로써 이에 대한 연구는 중요하고 의의가 있다고 할 수 있다.

지금까지의 연구 동향은 H₂-SCR 촉매의 성능 향상을 위해 주촉매(main catalyst),⁴⁾ 안정제(promoter),^{5,6)} 지지체(support)⁷⁾ 및 촉매 반응 메커니즘 등에 관한 선행 연구가 이루어져 왔다.

현재 국내에서 H₂-엔진 상용화를 위해 연구 중이며 곧 상용화가 될 예정이다. 이에 따른 후처리 촉매시스템에 관한 연구는 중요하며 실용화를 위한 선행기초 데이터로 의의가 있다.

이 연구는 H₂-SCR촉매의 실용화를 위한 기초 연구로써, 환원제(H₂, NH₃, H₂+NH₃) 및 환원제 분사 방법(in-cylinder-injection, post-injection)에 따른 유해가스 저감 특성을 파악하는 것이다.

2. 촉매 제조 및 실험 방법

제조된 H₂-SCR은 함침법(impregnation method)으로 제조되었다. 함침법은 실험실 규모에서 다용하는 촉매 코팅법이며, 지지체를 활성 물질이 녹아있는 용액에 담근 후 용매를 증발시켜 활성 물질을 지지체에 담지하는 방법이다. 0.75Pt-0.75Pd/TiO₂ H₂-SCR은 지지체 TiO₂ 기반에 소정의 귀금속 Pt와 Pd를 400CPSI(Cell Per Square Inch) 담체(substrate)에 198 g/L을 코팅하였다. 500°C에서 3시간 동안 공기로 소성(calcination)하였고, 400°C에서 1시간 H₂ 5%로 환원(reduction) 처리하였다. 또한 Cu-SCR 촉매는 상용화된 촉매를 이용하였다.

Fig. 1은 H₂-SCR은 촉매 물질의 형상과 사이즈를 분석한 TEM(JEM-2000FX II (200kV), JEOL) 이미지이다. 귀금속 0.75 Pt와 0.75 Pd는 소량이 담지되고 입자가 작아서 이미지에서 확인하기 힘들지만, 강력한 산화와 환원 능력을 가지는 지지체 TiO₂는 약 20~60 nm 사이즈로 무정형(formless)형상으로 자리 잡고 있다. Fig. 2는 상용 Cu-SCR 의

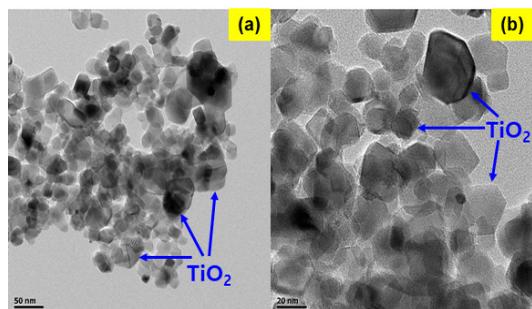


Fig. 1 TEM image of H₂-SCR

SEM((JSM-7500F+EDS, Oxford)과 TEM 이미지를 나타내고 있다. Fig. 2(a)에서 Zeolite ($Al_2O_3+SiO_2$ 화합물)는 직사각형 형상을 나타내며, 눈으로 확인할 수 없지만 많은 촉매 물질이 반응하는 세공 (pore)이 형성되어 있다. Fig. 2(b)는 SCR의 활성 물질인 전이금속 Cu가 약 20 nm 수준으로 담지되어 있음을 확인할 수 있으며, 작은 입자로 골고루 잘 분산되어 있으면 Cu-SCR 촉매의 활성을 향상시킬 수 있다.

Table 1은 Cu-SCR 촉매를 이루고 있는 원소의 중량과 Table 2는 BET(ASAP Q2 2020, Micromeritics) 비표면적과 pore 사이즈 등의 물리적인 특성을 나타내고 있다. Zeolite 물질 특성상 BET 비표면적은 $639.33(m^2/g)$ 크고, Pore size는 3.25 nm로 작다. BET 비표면적이 크면 활성사이트가 많아져 촉매 성능에 유리하다.

Table 3은 H_2 -SCR의 유해가스 저감 성능 파악을 위한 모델가스 반응조건이다. 이 장치는 실험 변수가 작고, 경제적이고 빠른 화학 반응 특성을 파악할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 촉매온도

Table 1 The total elements of power of Cu-SCR (wt.%)

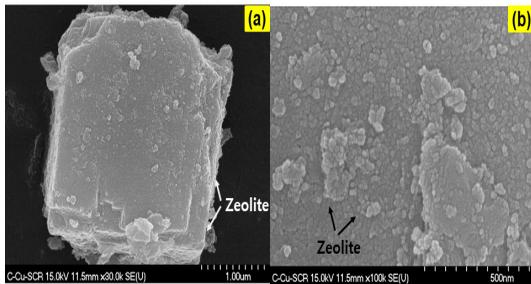
Catalyst	Zeolite	Cu	Al	Si
Cu-SCR	SSZ-13	2.29	2.59	50.9

Table 2 Physical specification of Cu-SCR

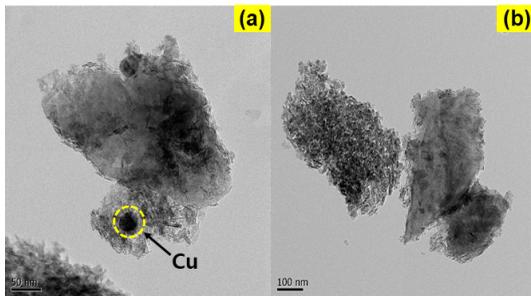
Catalyst	BET (m^2/g)	Pore volume (cm^3/g)	Pore size(nm)
Cu-SCR	639.33	0.52	3.25

Table 3 Model gas components for evaluation the performance of H_2 -SCR

Gas components	Concentration
NO (ppm)	500
CO (ppm)	700
O_2 (%)	5
H_2 (%)	1
H_2O (%)	1.5
N_2	Balance
SV (h^{-1})	28,000



(a) SEM



(b) TEM

Fig. 2 SEM/TEM image of commercial Cu-SCR

는 저온 $75\sim 350^\circ C$ 정상 상태(steady state) 조건에서 5분을 유지하면서 NO_x 와 CO의 유해가스 저감 성능을 파악한다. 촉매의 유해가스 정화 성능은 아래 식 (1)과 같이 계산하였으며, 촉매 반응 후의 가스 성분은 MRU 가스분석기(VarioPlus Industrial, MRU Instruments, Inc.)를 이용하여 1초 간격으로 정량적으로 측정하였다.

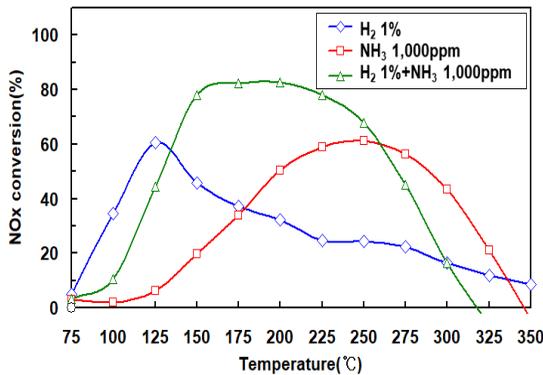
$$\frac{(NO_{x_{in}} - NO_{x_{out}}) \times 100}{(NO_{x_{in}})} \quad (1)$$

3. 실험 결과 및 고찰

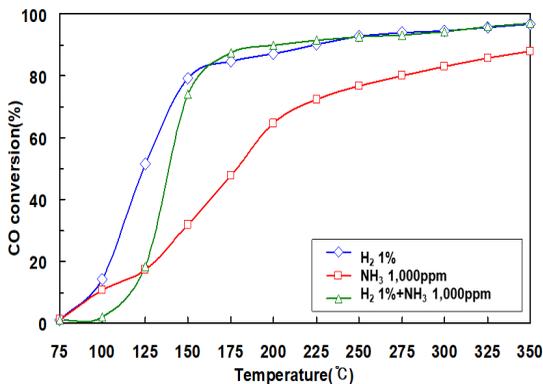
3.1 H_2 -SCR의 환원제에 따른 유해가스 저감 특성

H_2 -SCR은 지지체 TiO_2 와 Al_2O_3 에 산화와 환원에 반응성이 좋은 소량의 귀금속(Pt, Pd etc)과 조촉매(Ce, Ru, Zr, Mg etc)를 담지하여, 인체에 유해한 가스인 NO와 CO를 산화와 환원을 시킨다.

Fig. 3은 0.75Pt-0.75Pd/TiO₂ H₂-SCR의 환원제에 따른 de-NOx/CO 성능을 나타내고 있다. Fig. 3(a)에서 환원제 H₂ 1%가 공급될 경우, H₂-SCR은 촉매온도 125°C에서 약 61%의 NOx 전환율을 나타낸다. 활성이 좋은 환원제 H₂로 인하여 저온에서 NOx 저감 성능이 향상되며, 200°C 이상 온도에서는 H₂의 산화로 NOx 환원 능력은 저하된다. 환원제 NH₃ 1,000 ppm이 공급될 경우, 활성화 에너지(Activation energy)가 더 많이 요구되는 NH₃는 125°C에서 시작해서 200°C에서 LOT50에 이른다. 여기서 LOT(Light off Time)란 촉매에 유입되는 배기가스의 온도를 서서히 상승시키면서 정화효율이 50%가 될 때의 배기 가스 온도를 말한다.



(a) NOx conversion



(b) CO conversion

Fig. 3 De-NOx/CO performance according to the reducing agents of H₂-SCR

환원제 H₂ 1%의 경우보다 NOx 전환율의 window가 우측 중온으로 이동하고 있다. 이온교환법으로 제조된 Cu-SCR은 제올라이트의 산점(Acid site)에 환원제인 NH₃를 선 흡장 후, 유해가스 NOx를 선택적으로 N₂로 환원시킨다. 지지체 TiO₂기반에 0.75Pt-0.75Pd/TiO₂ H₂-SCR의 경우도 지지체 TiO₂에 NH₃ 선 흡장 후 NOx 반응하여 N₂로 환원시키는 특징을 나타내고 있다. H₂ 1%+NH₃ 1,000 ppm의 환원제가 공급될 경우, 촉매온도 100°C에서 NOx가 저감되면서, 약 130°C에서 LOT50에 이른다. 촉매온도 175°C에서 NOx 전환율은 약 81%의 가장 높은 성능을 나타내며, window 또한 대폭 넓어지면서 전체적으로 NOx 저감 성능이 향상되었다. 각각의 환원제 H₂ 1%, NH₃ 1,000 ppm이 공급될 경우에 비해 NOx 전환율의 경향은, 125°C 이하에서 촉매 활성이 늦지만, 150~250°C에서는 약 70%의 이상의 높은 NOx 저감 성능을 나타내고 있다. 저온에서 NH₃가 공급됨에 따라 H₂의 spillover가 지연되어 NOx 환원 반응을 방해(blocking)하지만, 중온 이상에서 환원제 H₂가 산화되는 문제점을 NH₃ 흡장 후 반응 및 탈착의 전체 반응속도를 향상시키고 있다.

Fig. 3(b)는 환원제에 따른 CO의 전환율을 나타내고 있다. 환원제 H₂ 1%가 공급될 경우, 0.75Pt-0.75Pd/TiO₂ H₂-SCR의 CO 전환율은 촉매온도 100°C에서 약 15%, 150°C에서 약 80%를 나타내며 저온영역에서 촉매 활성이 향상되었다. 환원제 NH₃ 1,000 ppm이 공급될 경우, H₂-SCR의 CO 전환율은 촉매온도 100°C에서 약 11%, 350°C에서 약 85% 나타내며, 온도가 상승함에 따라 천천히 상승하고 있다. NH₃가 가지는 최대층류 연소속도는 0.07 m/s이고, 이에 비해 H₂는 2.91 m/s이므로, 촉매연소에서 그만큼 반응속도가 늦다고 할 수 있다. 환원제 H₂ 1%+NH₃ 1,000 ppm의 환원제가 공급될 경우, H₂-SCR의 CO 전환율은 촉매온도 125°C에서 약 17%, 175°C에서 약 87%를 나타내고 있다. 환원제 H₂ 1%가 공급되는 경우보다는 150°C 이하에서는 활성이 늦지만, 그 이상 온도에서는 CO 전환율이 향상되고 있다.

Fig. 4는 0.75Pt-0.75Pd/TiO₂ H₂-SCR의 환원제

종류에 따른 O₂ 소모율을 나타내고 있다. H₂-SCR 촉매가 유해가스 NO_x와 CO를 환원과 산화반응할 때 O₂가 필요하므로, O₂ 소모율은 H₂-SCR 촉매의 반응특성과 연관이 된다.

Fig. 3(b)에서 H₂-SCR의 CO 전환율에서 볼 수 있듯이, 환원제 H₂ 1%가 촉매온도 100℃에서 약 4.3%, 350℃에서 약 10.5%의 O₂ 소모율을 나타내고 있다. NH₃ 1,000 ppm이 공급될 경우, H₂-SCR의 O₂ 소모율은 최대 약 4.3% 이하로 O₂가 소모되고 있으며, 이는 산화와 환원 반응에 악영향을 미친다고 할 수 있다. 환원제 H₂ 1%+NH₃ 1,000 ppm의 환원제가 공급될 경우, H₂-SCR의 O₂ 소모율은, H₂ 1% 단독으로 공급될 경우보다 150℃ 이상 온도에서 O₂ 소모율이 약 10% 수준으로 향상되고 있다. 이는 NO_x와 CO 저감 성능 능력과 연관이 된다.

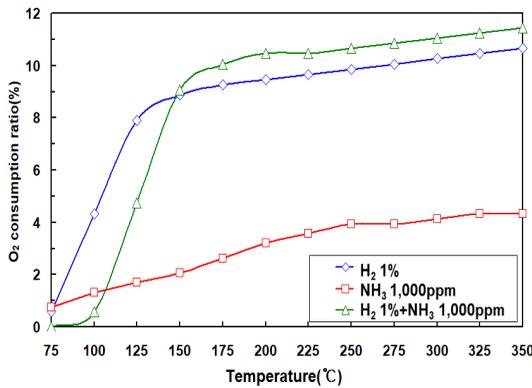


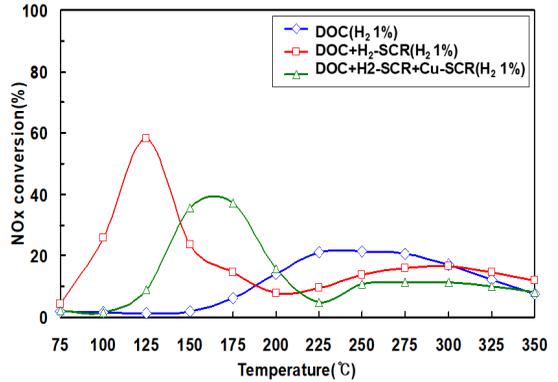
Fig. 4 O₂ consumption rate according to the reducing agents of H₂-SCR

3.2 H₂-SCR의 환원제 분사 방법에 따른 유해가스 저감 특성

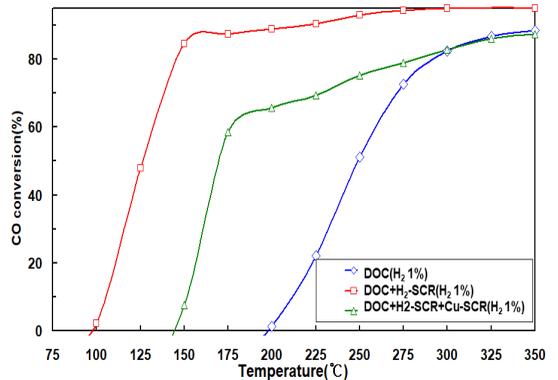
자동차 내연기관에서 배출되는 유해가스 중에 연소온도가 높은 조건에서 배출되는 NO_x는 산성계열로, 이를 저감하기 위해 환원제(Urea, NH₃, H₂, CO, HC 등)가 사용된다. 환원제를 공급하는 방식은 CRDI 시스템에서 실린더 내 분사방식(in-cylinder-injection)과 Urea-SCR과 같은 후분사방식(post-injection)이 있다. 이 절에서는 기존 H₂-SCR

촉매를 토대로 후처리복합시스템에 따른 유해가스 저감 특성을 파악하고자 한다. 전단에 디젤산화촉매(DOC), 후단에 Cu-SCR이 장착된다.

Fig. 5는 H₂-SCR에 사용된 환원제 H₂ 1%를 공급할 때, in-cylinder-injection 환원제 분사 방법에 따른 de-NO_x/CO 성능을 나타내고 있다. Fig. 5(a)에서 단독 DOC(0.5Pt-2MgO/Al₂O₃)에 H₂ 1%가 공급될 경우, 촉매온도 175℃에서 약 7%, 225℃에서 21%의 NO_x 전환율을 나타내고 있다. Al₂O₃ 기반에 05Pt가 담지된 DOC는 H₂를 산화시키므로 인하여 NO_x 환원 능력은 미미하다. DOC+H₂-SCR H₂ 1%가 공급될 경우, 촉매온도 100℃에서 약 27%의 NO_x 전환율을 나타내고 있으며, 125℃ 이하에서 촉매 활성이 개선되었다.



(a) NO_x conversion



(b) CO conversion

Fig. 5 De-NO_x/CO performance according to the combined system of H₂-SCR (in-cylinder-injection)

DOC+H₂-SCR+Cu-SCR 복합시스템은 DOC(only) 촉매에 비해 저온으로 NO_x 전환율 window가 좌측으로 이동하였지만, DOC+H₂-SCR 복합시스템에 비해 저온 활성이 저감되었다. 이는 Cu-SCR에 필요한 환원제 NH₃가 생성되지 않음에 따라 NO_x 저감 성능은 향상되지 않았다.

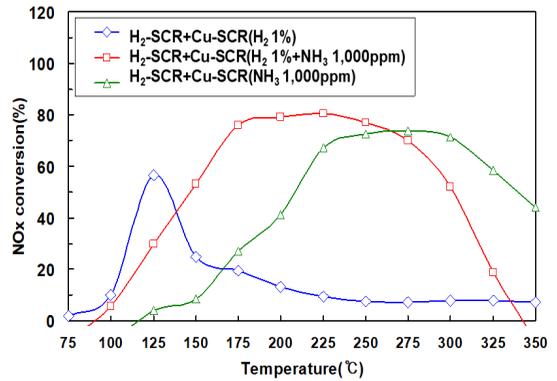
Fig. 5(b)는 in-cylinder-injection 방식에서 촉매시스템에 따른 CO 전환율을 나타내고 있다. NO_x 전환율에 볼 수 있듯이, DOC 촉매는 CO 전환율 또한 226°C에서 시작해서 촉매온도 350°C에서 약 85% 수준의 CO 전환율을 나타내고 있다. 0.5 Pt의 귀금속 담지량이 적으므로 de-NO_x/CO 저감 성능이 저온영역에서 향상되지 않았다고 판단한다. DOC+H₂-SCR 복합시스템은 H₂-SCR(only) 촉매보다 150°C 이상 온도에서 de-NO_x 성능이 향상되는 것은 H₂ 산화가 적었기 때문이다.

Fig. 6은 환원제 분사 방식 중 post-injection의 de-NO_x/CO 성능을 나타내고 있다. Fig. 6(a)에서 H₂-SCR+Cu-SCR 복합시스템은 환원제 H₂ 1%가 공급될 경우, 125°C에서 약 57%의 NO_x 전환율을 나타내고 있다. NH₃ 1,000 ppm이 공급될 경우, 촉매온도 150°C에서 시작하여 275°C에서 약 72%의 NO_x 전환율을 나타내고 있다. H₂-SCR+Cu-SCR 복합시스템에서 H₂ 1%+NH₃ 1,000 ppm이 공급될 경우, NO_x 전환율은 125°C에서 시작해서 200°C에서 약 80%의 NO_x 전환율을 나타내며, NO_x 전환율 window는 대폭 확대되었다. Fig. 6(b)는 후분사에 따른 CO 전환율을 나타내고 있다. In-cylinder-injection 방식의 Fig. 5(b)에 비해 CO 전환율의 window가 좌측 저온 영역으로 이동하는 경향을 파악할 수 있다. 이는 in-cylinder-injection 환원제 분사 방식보다는 post-injection 분사 방식이 훨씬 더 저온 활성 능력과 de-NO_x/CO 성능이 향상되었으며, window가 넓어지는 점을 고려하면, post-injection 방식이 H₂-SCR 촉매시스템에는 적합하다고 할 수 있다. 또한 환원제는 촉매온도를 고려해 볼 때, H₂ 환원제는 125°C 이하에서, NH₃는 촉매온도 175~300°C에서 유해가스 저감 성능이 좋다고 할 수 있다.

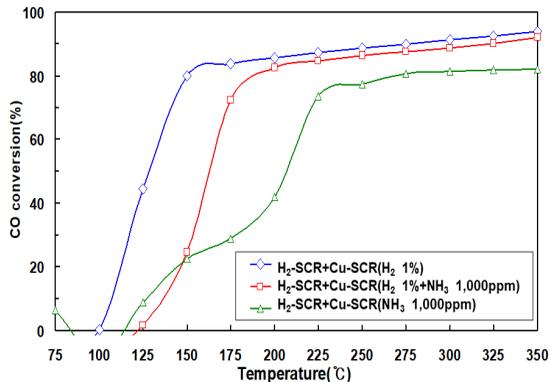
Fig. 7은 환원제 분사 방식에 따른 NO_x와 CO가 저감될 때 얼마나 O₂가 소모되었는지를 가늠

하는 O₂ 소모율을 나타내고 있다. Fig. 7(a)는 in-cylinder-injection 분사 방식의 O₂ 소모율을 나타내고 있다. De-NO_x/CO 성능에서 볼 수 있듯이, DOC+H₂-SCR 복합시스템에서 100°C에서 약 3.2%, 150°C에서 약 9%의 가장 높은 O₂ 소모율을 나타내고 있다. DOC+H₂-SCR+Cu-SCR 복합시스템은 좀 더 낮은 온도에서 O₂ 소모율이 증가하지만, 175°C에서 약 8.8%의 O₂ 소모율을 나타내고 있다.

Fig. 7(b)는 post-injection 방식에 따른 O₂ 소모율을 나타내고 있다. 환원제 NH₃가 포함된 촉매시스템은 200°C 이상 온도에서 O₂ 소모율이 약 4% 이하이다. 또한 H₂-SCR+Cu-SCR 복합시스템의 경우가 가장 촉매온도 100°C에서 시작해서 150°C에



(a) NO_x conversion



(b) CO conversion

Fig. 6 De-NO_x/CO performance according to the combined system of H₂-SCR (post-injection)

서 약 9%의 O₂ 소모율을 나타내고 있다. H₂-SCR+Cu-SCR 복합시스템의 경우, 환원제 H₂ 1%+NH₃ 1,000 ppm이 공급될 때 H₂ 1%(only)가 공급될 때보다 NH₃ 활성이 낮으므로 인하여 저온영역에서 유해가스 저감 및 O₂ 소모율도 낮다.

Fig. 8은 환원제의 특성과 분사 방식을 고려하여 H₂-SCR 후처리 시스템의 분사 전략의 개념도를 나타내고 있다. 환원제 NH₃는 누설만 잘 방지하면, H₂보다 보관과 충전이 용이하므로 장점이 많다. 평상시(1) 내연기관이 작동하면 NH₃ 환원제는 개질기(reformer)를 통하여 H₂를 만들어 H₂-SCR 환원제로 공급하여 저온에서 촉매의 활성을 촉진시킨다. 촉매온도 150°C 이상이 되면 유량 제어기로

NH₃를 H₂-SCR에 공급하여(H₂+NH₃) Fig. 3(a)의 실험 결과와 같이 저온과 중온에서 유해가스 NO_x와 CO의 저감 성능을 대폭 향상시킬 수 있다.

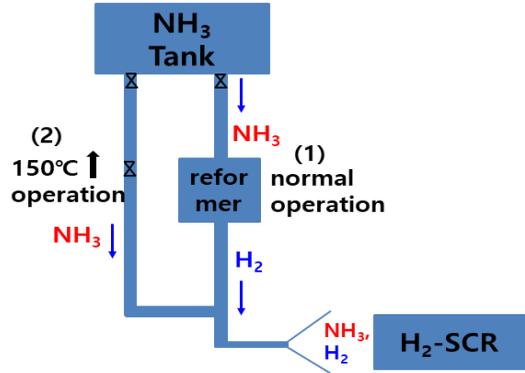


Fig. 8 Conceptual diagram of the proposed reducing agent injection strategy

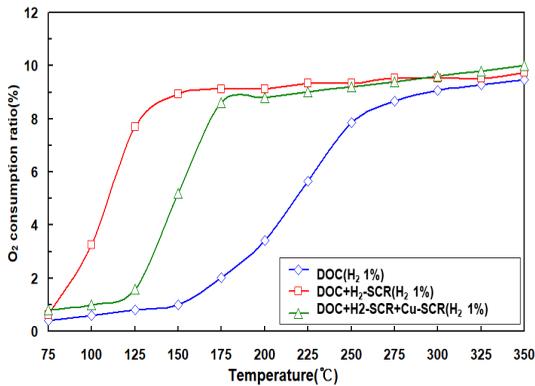
4. 결론

이 연구는 H₂-SCR 촉매의 실용화를 위하여 환원제 및 환원제 분사 방식에 따른 유해가스 저감 특성을 파악하였으며 결과는 다음과 같다.

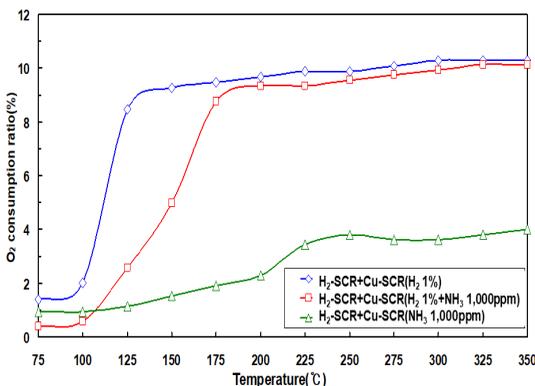
1) H₂ 1%+NH₃ 1,000 ppm의 환원제가 공급될 경우, 촉매온도 100°C에서 NO_x는 저감되었고, 약 130°C에서 NO_x 전환율은 LOT50에 이르렀고, 175°C에서 약 81%의 가장 높은 성능을 나타냈고, window 또한 대폭 넓어지면서 전체적으로 NO_x 저감 성능이 향상되었다.

2) 환원제 특성으로 H₂ 1%가 공급될 경우보다 NH₃ 1,000 ppm이 하이브리드로 공급될 경우에 NO_x 전환율은 125°C 이하에서 촉매 활성이 낮었지만, 150~250°C에서는 약 80%의 이상의 높은 NO_x 저감 성능을 나타냈다. 저온에서 NH₃가 공급됨에 따라 H₂의 spillover가 지연됐지만, 중온 이상에서 환원제 H₂가 산화되는 문제점을 NH₃ 흡착 후 반응 및 탈착의 전체 반응속도를 향상시켰다.

3) H₂-SCR+Cu-SCR 복합시스템에서 H₂ 1%+NH₃ 1,000 ppm이 공급될 경우, NO_x 전환율은 125°C에서 시작해서 200°C에서 약 80%의 NO_x 전환율을 나타내며, NO_x 전환율 window는 대폭 확대되었다.



(a) in-cylinder-injection



(b) post-injection

Fig. 7 O₂ consumption rate according to reducing agent injection method of the combined system of H₂-SCR

4) H₂-SCR+Cu-SCR 복합시스템은 H₂ 1%+NH₃ 1,000 ppm이 공급될 경우, NO_x 전환율은 125°C에서 시작해서 200°C에서 약 80%의 NO_x 전환율을 나타냈고, window 폭이 대폭 넓어지는 점을 고려하면 post-injection 방식이 H₂-SCR 촉매시스템에는 적합하다.

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. Association for Emissions Control by Catalysis (AECC) 2020, "EURO 7/VII Emission Standards". AECC position paper.
2. X. Zhang, X. Zhang, X. Yang, Y. Chen, X. Hu and X. Wu, 2021, "CeMn/TiO₂ Catalysts prepared by different methods for enhanced low-temperature NH₃-SCR catalytic performance", *Chemical Engineering Science*, 238, 116588. (<https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116588>)
3. D. Karamitros and G. Koltsakis, 2017, "Model-based optimization of catalyst zoning on SCR-coated particulate filters", *Chemical Engineering Science*, 173, 514-524. (<https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.08.016>)
4. C. N. Costa and A. M. Efstathiou, 2007, "Mechanistic aspects of the H₂-SCR of NO on a novel Pt/MgO-CeO₂ catalyst", *The J. Physical Chemistry, C* 111(7), 3010-3020. (<https://doi.org/10.1021/jp064952o>)
5. 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/jcat.2002.3596>)
6. 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))
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 catalytic reduction with H₂", *Applied Surface Science*, 608, 155040. (<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155040>)