

Cu-SCR 촉매의 De-NO_x 성능 향상을 위한 연구

서충길
호원대학교 자동차기계공학과

Research for Performance Improvement of De-NO_x of Cu-SCR Catalysts

Choong-Kil Seo

Department of Automotive & Mechanical Engineering, Howon University

요약 화석연료를 기반으로 하는 내연기관의 엄격한 배기가스규제를 충족시키기 위해 자동차와 선박용 후처리장치의 비중이 점차로 증가하고 있다. 디젤엔진은 CO₂ 배출량이 적고 강력한 파워와 연료의 경제성을 가지고 있으며, 상용차뿐만 아니라 승용차에서도 시장의 수요가 증가하고 있다. 디젤 연료 특성으로 인하여 질소산화물은 국부적인 고온연소 영역에서 생성되며, 입자상물질은 확산연소 영역에서 생성이 된다. LNT와 urea-SCR 촉매는 디젤엔진에서 NO_x를 저감시키기 위한 후처리장치로 개발되어져왔다. 이 연구는 가혹해지고 있는 배기가스 규제 대응을 위해 소형과 중-대형 디젤기관에 많이 사용되고 있는 Cu SCR 촉매의 NO_x 저감 성능 향상을 목적으로 한다. 5Cu-2ZrO₂/Zeolyst(Si/Al=13.7)SCR 촉매는 5Cu-2ZrO₂/93Zeolite(Si/Al=2.9) 촉매에 비해 촉매온도 300℃ 이상에서 약 5-50% 수준으로 de-NO_x 성능이 높았다. Zeolite는 zeolyst에 비해 금속의 분산도가 낮고 평균 입경이 커짐에 따라 촉매의 반응속도가 저하되었다. 10wt% Cu가 담지된 10Cu-2ZrO₂/88Zeolyst 촉매는 200℃에서 40%, 350℃에서 약 65%로 NO_x 정화성능이 가장 높았고, Cu의 이온이 제올라이트의 결정화합물인 Al과의 이온교환율이 증가함에 따라 다른 촉매에 비해 20-40% de-NO_x 성능이 향상되었다.

Abstract In order to meet the strict emission regulations for internal combustion engines based on fossil fuel, the proportion of after-treatments for vehicles and vessels is gradually increasing. Diesel engines have high power, good fuel economy, and lower CO₂ emissions, and their market shares are increasing in commercial vehicles and passenger cars. However, NO_x is generated in the localized high-temperature combustion regions, and particulate matter is formed in the zones of diffusion combustion. LNT and urea-SCR catalysts have been developed for after-treatment of the exhaust gas to reduce NO_x in diesel vehicles. This study aims to improve the NO_x reduction performance of Cu SCR catalyst, which is widely used in light, medium, and heavy-duty diesel engines. The de-NO_x performance of 5Cu-2ZrO₂/93Zeolyst(Si/Al=13.7) SCR catalyst was about 5-50% higher than that of 5Cu-2ZrO₂/93Zeolite(Si/Al=2.9) at catalyst temperatures of 300℃ or higher. The zeolite had lower metal dispersion than zeolyst, and the reaction rate of the catalyst decreased as the average particle size increased. The 10Cu-2ZrO₂/88Zeolyst catalyst loaded with 10wt% Cu had the highest NO_x conversion rate of 40% at 200℃ and about 65% at 350℃. The ion exchange rate of Cu ions increased with that of Al, the crystalline compound of zeolite, and the de-NO_x performance was improved by 20-40% compared to other catalysts.

Keywords : Catalyst, CO, Cu, Diesel Engine, NO_x, SCR

본 논문은 호원대학교 교내연구지원비로 수행되었음

*Corresponding Author : Choong-Kil Seo(Howon Univ.)

Tel: +82-63-450-7215 email: ckseo@howon.ac.kr

Received November 24, 2017

Revised January 2, 2018

Accepted March 9, 2018

Published March 31, 2018

1. 서론

신재생에너지에 대한 사회적인 관심과 정책적인 지원을 통하여 에너지 전환이 사회적인 이슈가 되고 있다. 화석연료를 사용하는 내연기관에서 배출되는 유해가스는 환경오염과 인체 유해성 및 지구온난화를 야기시키는 문제점으로 인하여 전기차와 무인자동차로의 전환이 적극적이다. 향후 경·소형차 부분에서는 전기차 등 친환경자동차의 시장 점유율이 증가하리라 전망되며, 중·대형차와 건설기계 및 선박 등 엔진의 동력이 많이 요구되는 기계는 계속적으로 내연기관의 수요가 지속되리라 보며, 엄격해지는 배기가스 규제를 충족시키기 위해서는 후처리 촉매개발에 대한 연구는 강화되어야 한다.

디젤엔진은 강력한 파워와 높은 연료경제성 및 CO₂ 배출량이 적어 상용차 뿐 만 아니라 일반 승용차에서도 시장 수요가 증가하고 있다[1]. 그러나 디젤 연소특성상, 질소산화물(NOx)은 국부적인 고온반응영역에서 입자상물질(PM)은 확산연소(diffusion combustion) 영역에서 다량 생성되는 문제점을 가지며, 이를 저감하기 위한 연구개발이 계속되고 있다. 이 중 urea-SCR(Selective Catalytic Reduction) 촉매 기술은 NOx 저감 기법 중 가장 강력한 기술 중 하나이다[2-9]. 고온의 배기관으로 분사된 urea 수용액(aqueous solution)은 H₂O 분해(decomposition)와 urea 열분해(thermal decomposition) 및 가수 분해(hydrolysis)과정을 경유해 NH₃을 생성하며, 이 과정에서 질산염(nitrate)과 황산염(sulfate), 고상의 시안산(HNCO)₃등을 생성하기도 한다 [10-13]. SCR 촉매는 환원제 NH₃를 이용하여 NO 및 NO₂와 선택적으로(selective)반응하여 N₂로 환원시킨다.

이 연구는 가혹해지고 있는 자동차의 배기가스 규제 대응을 위해 소형과 중·대형 디젤기관에 많이 사용되고 있는 Cu SCR 촉매의 NOx 저감 성능 향상을 목적으로 한다.

2. 실험장치 및 방법

디젤자동차에서 배출되는 NOx 저감 능력 향상을 위해 6종류의 SCR 촉매를 제조하였다. Cu SCR 촉매는 제올라이트(zeolite) 종류와 전이금속 Cu 담지량과 이온교환(Ion exchange) 시간에 따른 영향을 파악하고자 Table 1과 같이 촉매를 제조하여 물리적인 특성을 분석하였다.

Table 1. Specification of SCR Catalysts

No	Catalyst	Si/Al	BET (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Pore size(nm)
1	5Cu-2ZrO ₂ /93Zeolyst	13.7	560.823	0.834	5.954
2	5Cu-2ZrO ₂ /93Zeolite	2.9	776.219	0.314	1.620
3	2Cu-2ZrO ₂ /96Zeolyst	13.7	662.603	0.990	5.981
4	10u-2ZrO ₂ /88Zeolyst	13.7	534.359	0.821	6.153
5	5Cu-2ZrO ₂ /93Zeolyst(24hr)	13.7	602.161	0.874	5.812
6	5Cu-2ZrO ₂ /93Zeolyst(48hr)	13.7	574.530	0.788	5.488

Table 2. Experimental conditions for evaluating of performance of SCR catalysts

SCR conditions	Composition
NO (ppm)	500
CO(ppm)	700
NH ₃ (ppm)	500
O ₂ (%)	10
H ₂ O(%)	1.5
N ₂	Balance
SV(h ⁻¹)	28,000

1. 5Cu-2ZrO₂/93Zeolyst 촉매는 5CuSO₄의 전구체를 0.2g를 넣고 1hr 교반(stirring)하였다. 질산염을 이용하여 pH 지수 8-8.5로 맞춘 후 약 30분간 교반시켰다. 제올라이트는 많은 종류가 있으나 자동차용에 많이 사용되는 zeolyst(Si/Al=13.7)를 93wt%를 넣고 5hr 동안 이온교환(Ion-exchange)시켰다. 열적으로 내구성 향상과 산점(acid site) 조절을 위해 지르코니아(ZrO₂)를 2wt%를 넣고 2시간 교반한 후 80℃의 건조기에서 건조(dry)하였다. 밀링(milling) 작업 후에 50cc 증류수에 넣고 액상 실리카를 촉매파우더 무게 대비 약 10% 수준으로 비이커에 넣은 후 60℃로 유지하면서 코팅하였다. 코팅량은 120g/L(400CPSI)를 코팅하였다. 그 후 코팅된 촉매를 500℃에서 2h 동안 air로 소성(calcination)하여 제조하였다. Table 1은 제조한 촉매의 조성을 나타내고 있다. Table 2는 SCR 촉매의 성능 평가를 위한 모델가스 반응 조건이다. SCR 촉매의 평가시스템으로는 모델가스반응장치를 사용하였으며[1], 촉매의 성능평가는 200~550℃까지 정상상태(steady state)조건으로 실험하였다. SCR 촉매의 de-NOx 성능은 아래 식(1)과 같이 계산하였다.

촉매표면 분석은 주사전자현미경인 SEM(JSM-7500F+EDS(Oxford) 분석기를 이용하였다. 촉매세공(pore)의 물리적인 분석을 위해서 BET(Brunauer-Emmett-Teller, ASAP Q2 2020, Micromeritics) 분석을 이용하였다. 촉매 반응 후의 가스성분은 MRU 가스분석기(VarioPlus Industrial, MRU Instruments, Inc.)를 이용하여 정량·정성적으로 평가하였다.

$$\text{NOx conversion(\%)} = \frac{(\text{NOx in} - \text{NOx out}) * 100}{(\text{NOx in})} \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 Cu-SCR 촉매의 제올라이트의 종류에 따른 De-NOx 특성

이 절에서는 다용하고 있는 제올라이트 2종류를 선정하여 이에 따른 SCR 촉매의 de-NOx 성능을 파악하고자 한다. 제올라이트는 실리콘(Si), 알루미늄(Al), 산소(O₂)로 이루어져 있는데, 금속원자가 산소와 결합하기 때문에 산점(acid site)이 생성되며, 산성은 전자 농도가 낮아 전자 농도가 높은 염기성 물질(NH₃)과 선택적으로 반응한다. 제올라이트의 산/염기성은 알루미늄이 있어야 한다. Si/Al 몰비(molar ratio)는 제올라이트 산성도를 결정하는 가장 기본적인 성질이다. Si/Al 몰비가 크면 산점 개수는 적고, Si/Al 몰비가 작으면 Al 양이 많아지므로 산점 개수는 많아지며 NH₃를 흡장할 수 있는 사이트가 많아진다.

Fig. 1에서 Al(산점)에 NH₃는 선택적으로 흡장된다. 전이금속인 Cu, Fe는 NO를 산화시켜 여기된(excited) NO* 로 변환해준다. 결국, SCR 촉매의 세공(pore)의 산점(활성점)에서는 NH₄NO₃ 화합물로 흡장하게 된다. 전이금속 Cu, Fe가 활성화 에너지에 이르면 흡장된 NH₄NO₃와 반응하여 N₂로 탈리(desorption)시키는 메커니즘을 가진다.

Fig. 2는 2종류 제올라이트에 따른 Cu-SCR 촉매의 SEM 이미지를 나타내고 있다. Fig. 2(a)의 Zeolyst (Si/Al=13.7) 기반의 Cu-SCR 촉매는 50nm급의 입자사이므로 세공(pore) 사이즈는 5.9nm급으로 BET 비표면적은 580m²/g를 나타내고 있다. Fig. 2(b)의 Zeolite(Si/Al=2.9)의 기반의 SCR 촉매는 zeolite의 입자 사이즈는 100nm급으로 형상은 무정형 타입으로 되어있다.

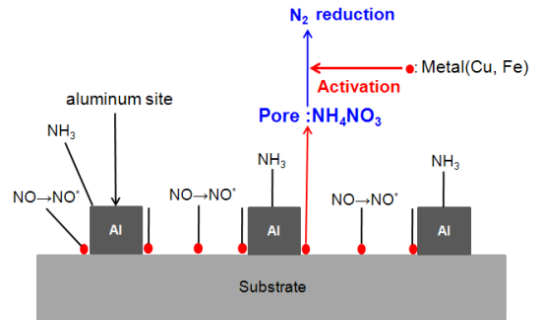


Fig. 1. Detailed mechanism of SCR reaction[14]

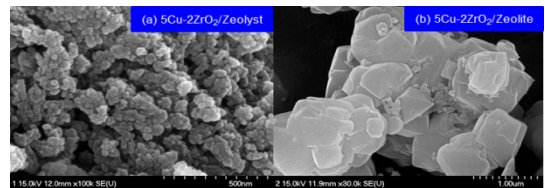


Fig. 2. SEM image according to kind of zeolites

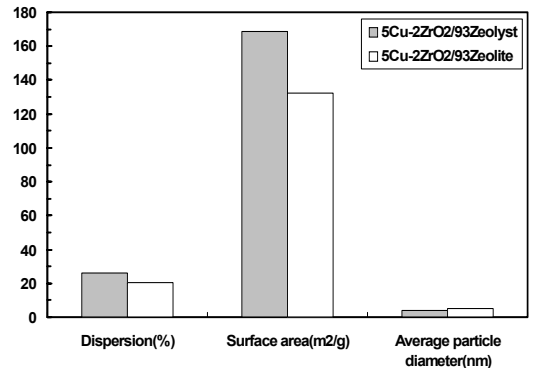
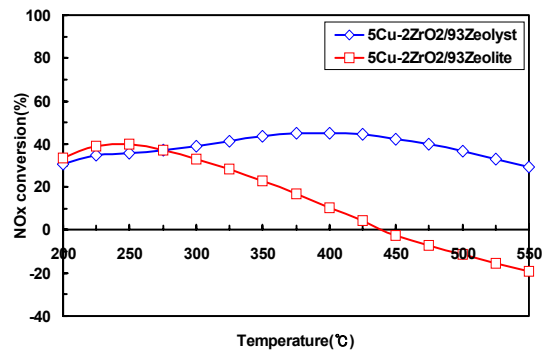


Fig. 3. Physical characteristics according to kind of zeolites



(a) De-NOx

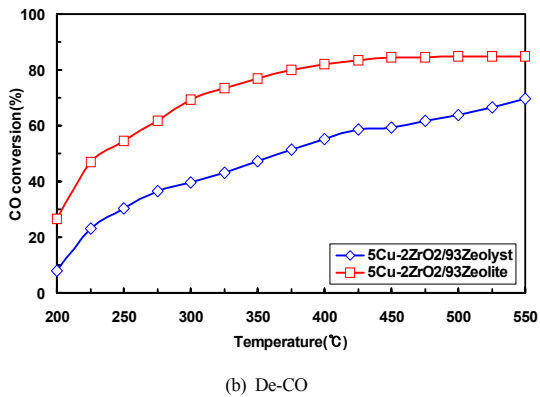


Fig. 4. Conversion rate according to kind of zeolite of Cu SCR catalysts

Fig. 4는 제올라이트 종류에 따른 De-NOx/CO 성능을 나타내고 있다. Fig. 4(a)에서 zeolyst 기반의 SCR 촉매는 200°C에서 약 33%의 de-NOx 성능을 나타내며, 온도가 증가함에 따라 de-NOx 성능이 향상되고 있다. 400°C에서는 약 43%의 NOx 저감 성능이 나타나고 있다. 반면에 Fig. 4(b)의 zeolite 기반의 SCR 촉매는 촉매온도 250°C에서 약 30%의 de-NOx 성능을 나타내고 있으나, 450°C 이상의 온도에서는 (-) 정화율을 나타내고 있다. 이는 촉매의 물리적인 특성(BET 비표면적 등)값은 좋으나, Fig. 1에서 볼 수 있듯이 SCR 촉매 산점(acid site, Al)에 염기성인 암모늄이 선 흡착(adsorption)된 후, 산성계열인 NOx가 후 흡착(질산암모늄(NH₄NO₃))이 된다. 전이금속 Cu가 활성화 에너지에 이르면 화합물인 질산암모늄을 빠르게 분해한 후 N₂로 환원시키지만, 촉매 성능이 저하되면 흡착-반응-탈착의 일련의 촉매반응 속도가 저하되어 NO가 탈착이 되므로 정화성능이 저하되는 것이다. Fig. 3에서 보면 Cu의 금속 분산도와 비표면적은 상대적으로 zeolyst가 zeolite보다 크게 나타나고 있다. 반면에 zeolite는 zeolyst에 비해 금속의 분산도가 낮고 평균 입경이 커짐에 따라 촉매의 반응속도가 저하되었다. 일반적으로 촉매의 반응속도가 빨라질수록 주촉매(Cu) 입자의 크기가 작고 골고루 잘 분산되어 있어야만 촉매의 활성이 좋다. 하지만 촉매의 물리적인 세공의 비표면적은 큰 것이 좋지만 촉매 성능에는 주촉매인 활성이 주요 영향을 미친다고 할 수 있다. Fig. 4(b)의 de-CO의 성능은 zeolite의 기반의 SCR 촉매가 물리적으로 BET 비표면적과 세공이 잘 발달되어 있어서 CO를 저온에서 흡착하고 온도가 상승하면 활성화 에너지가 낮

은 CO를 산화시키기 때문에 de-CO 성능이 향상되었다고 판단한다.

3.2 전이금속 Cu 담지량에 따른 De-NOx 특성

Fig. 5는 전이금속 Cu 담지량에 따른 3종류 Cu SCR 촉매의 SEM 이미지를 나타내고 있다. 전이금속 Cu의 함량은 2, 5, 10wt%이며, 3종류의 Cu SCR 촉매의 SEM 이미지에서 전이금속 Cu의 분포나 조촉매 ZrO₂의 형상은 확인할 수 없고, zeolyst 형상만 확인이 되고 있다. 전반적인 경향은 10Cu-2ZrO₂/88Zeolyst의 입자 사이즈가 크다.

Fig. 6은 Cu 담지량에 따른 Cu의 물리적인 특성을 나타내고 있다. Cu 함량 증가로 Cu의 금속분산도는 저하되며 표면적은 감소하고 평균 입경은 크다. Fig. 7은 Cu 함량에 따른 de-NOx/CO 성능을 나타내고 있다. Fig. 7(a)에서 Cu 담지량이 가장 많은 10, 5, 2wt%의 순서로 de-NOx 성능이 향상되고 있다. 10wt% Cu가 담지된 SCR 촉매는 200°C에서 40%, 350°C에서 약 65%로 NOx 정화성능이 가장 높고 전 온도 영역대에서 다른 함량의 촉매보다 20-40%가 높다. 반면에 Cu 담지량이 가장 작은 2wt% Cu가 담지된 SCR 촉매는 200°C에서 약 20%, 275°C에서 약 28%로 낮은 de-NOx 성능을 나타내

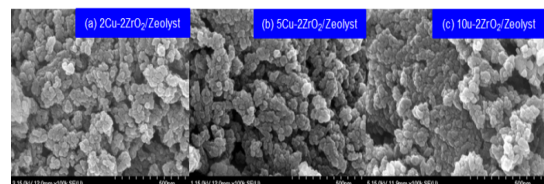


Fig. 5. SEM image according to Cu loading amount

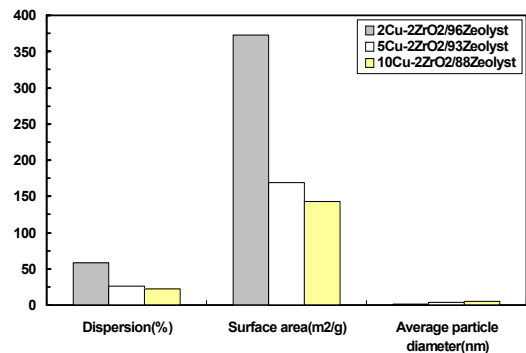


Fig. 6. Physical characteristics according to Cu loading amount

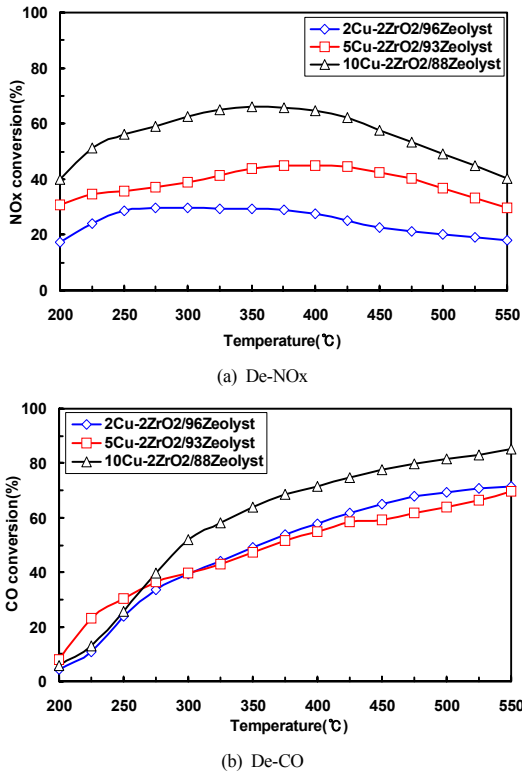


Fig. 7. Conversion rate according to Cu loading amount

고 있다. Cu의 담지량이 10wt%인 SCR 촉매는 물리적인 특성은 저하되지만, Cu 이온이 제올라이트의 결정화 합물인 Al과의 이온교환(Ion exchange)비율(Cu:Al=10:6.42=155%)이 증가함에 따라 de-NOx 성능이 다른 촉매에 비해 20-40% 증가하였다. Fig. 7(b)의 de-CO 성능의 전체적인 경향을 보면 2, 5wt%의 Cu가 담지된 촉매의 CO 전환률은 거의 같은 수준이다. 그러나 10w%의 Cu가 담지된 Cu-SCR 촉매는 300°C에서 50%, 550°C 고온에서 약 80%의 CO를 산화시키고 있다. CO의 산화는 zeolyst 함량보다는 전이금속 Cu의 담지량이 CO의 산화 성능에 영향을 미쳤기 때문이다.

3.3 이온교환 시간에 따른 De-NOx 특성

물질의 결합에는 이온결합과 공유결합 및 금속결합이 있다. 선택적인촉매환원촉매(SCR)에서 주촉매 전이금속(Cu, Fe)를 이용한 촉매제조법은 이온교환법을 주로 사용한다. 이 절에서는 양이온 일가를 가지고 있는 Cu⁺와 제올라이트의 결정성 화합물중 음이온인 Al과의 이온교환의 시간에 따른 de-NOx/CO 성능을 파악하여 SCR 촉

매의 성능 향상을 연구하였다. Fig. 8은 Cu SCR 촉매의 이온교환 시간에 따른 SEM 이미지를 나타내고 있다. 이온교환 시간 증가에 따른 SEM 이미지상의 결정구조 차이는 없지만, Fig. 8(a)에서 볼 때 zeolyst의 결정사이즈는 약 50nm급으로 확인이 되며, 이온교환 시간이 증가하면 Fig. 8(c)에서 볼 수 있듯이 zeolyst 결정들이 조밀하게 결합되는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 9는 이온교환 시간에 따른 Cu SCR 촉매의 전이금속 Cu의 물리적인 특성을 나타내고 있다. 이온교환 시간이 5, 24 그리고 48hr로 증가하면 전이금속의 Cu의 금속 분산도와 표면적이 증가하고, 평균입경이 작아지는 경향을 나타내고 있다. Cu 입자가 작을수록 활성화 에너지가 작아짐에 따라 촉매의 반응속도는 빨라진다.

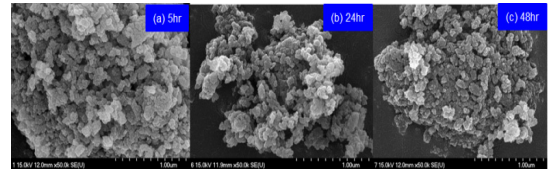


Fig. 8. SEM image according to ion exchange times

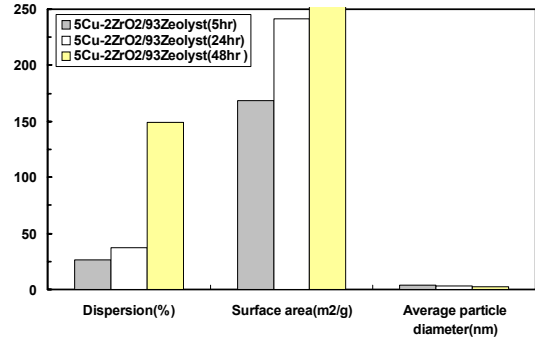
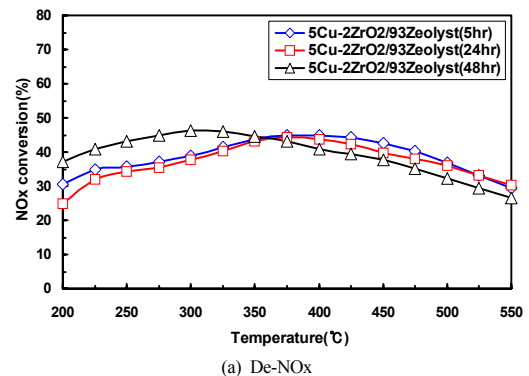
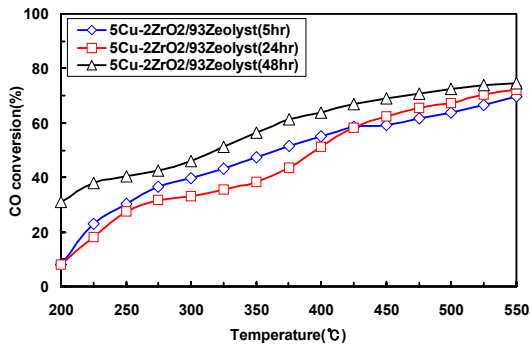


Fig. 9. Physical characteristics according to according to ion exchange times



(a) De-NOx



(b) De-CO

Fig. 10. Conversion rate according to ion exchange times

Fig. 10은 이온교환 시간에 따른 de-NOx/CO 성능을 나타내고 있다. Fig. 10(a)에서 5hr와 24hr 이온 교환한 Cu SCR 촉매의 de-NOx 성능은 거의 동등한 수준이다. 그러나 48hr로 이온교환 한 5Cu-2ZrO₂/93Zeolyst SCR 촉매는 200°C에서 약 38%의 de-NOx 성능을 나타내며 다른 시간으로 이온 교환한 촉매보다 8-13% 높다. 촉매 온도 200-325°C에서 다른 시간(5, 24hr)으로 이온교환 촉매에 비해 de-NOx 성능이 향상되었다. 이는 48hr 많은 시간으로 이온 교환한 SCR 촉매의 주촉매인 Cu의 금속분산도와 작은 사이즈의 입경으로 인하여 흡착·반응·탈착과정의 반응속도(reaction rate)가 빨라졌기 때문이라 판단한다. Fig. 10(b)의 CO의 정화성능을 살펴보면, de-NOx 성능과 거의 동등한 경향을 나타내고 있다. 5hr와 24hr로 이온 교환한 5Cu-2ZrO₂/93Zeolyst 촉매는 약 10-65%의 CO 전환율을 나타내고 있다. 반면에 48hr로 이온 교환한 Cu SCR 촉매는 다른 두 종류 촉매에 비해 평균 온도 전체영역에서 10-20% 수준의 높은 CO 정화성능을 나타내고 있다. CO가 CO₂로 산화될 때 필요한 활성화 에너지는 낮지만 상대적으로 48hr로 이온 교환한 촉매는 주촉매인 Cu의 분산도와 작은 입경으로 산화 능력이 향상되었다고 판단한다.

4. 결론

Cu SCR 촉매의 제올라이트 종류, 전이금속 Cu 담지량 및 이온교환 시간에 따른 de-NOx 성능을 파악한 결과는 아래와 같다.

1) 5Cu-2ZrO₂/93Zeolyst(Si/Al=13.7)SCR 촉매는 5Cu-2ZrO₂

/93Zeolite(Si/Al=2.9) SCR 촉매에 비해 촉매온도 300°C 이상에서 약 5-50% 수준으로 de-NOx 성능이 높았다. Zeolite는 zeolyst에 비해 금속의 분산도가 낮고 평균 입경이 커짐에 따라 촉매의 반응속도가 저하되었다.

- 2) 10wt% Cu가 담지된 10Cu-2ZrO₂/88Zeolyst 촉매는 200°C에서 40%, 350°C에서 약 65%로 NOx 정화 성능이 가장 높았고, Cu 이온이 제올라이트의 결정화합물인 Al과의 이온교환율이 증가함에 따라 de-NOx 성능이 다른 촉매에 비해 20-40% 향상되었다.
- 3) 이온교환을 48hr로 증가시킨 5Cu-2ZrO₂/93Zeolyst (48hr) SCR 촉매는 금속 분산도가 높고 입경이 작게 형성되어 de-NOx/CO 성능이 온도 전체영역에서 향상되었다.

References

- [1] C. K. Seo, "Effect of CeO₂ Addition on De-CH₄ and NOx performance", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 18, no. 9, pp. 473-479, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.9.473>
- [2] C. K. Seo, H. N. Kim, B. C. Choi, M. T. Lim, "De-NOx Characteristics of a combined System of LNT and SCR Catalysts according to Hydrothermal Aging and Sulfur Poisoning", Catalysis Today, vol. 164, no. 11, pp. 507-514, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.10.010>
- [3] L. Xu, W. Watkins, R. Snow, G. Grham, R. Macabe, "Laboratory and engine Study of Urea-related deposits in Diesel Urea-SCR after-treatment System", SAE no. 2007-01-1582.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2007-01-1582>
- [4] M. Klimczak, P. Kern, T. Heinzlmann, M. Lucas, P. Claus, "High-throughput Study of the Effects of inorganic Additives and Poisons on NH₃-SCR Catalysts-Part I", Applied Catalysis B: Environmental, vol. 95, no. 1-2, pp. 39-47, 2010.
- [5] A. Grossale, I. Nova, E. Tronconi, "Study of a Fe-zeolite-based System as NH₃-SCR Catalyst for Diesel Exhaust Aftertreatment", Catalysis Today, vol. 136, no. 1, pp. 18-27, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2007.10.117>
- [6] F. Marchitti, I. Nova, E. Tronconi, "Experimental Study of the Interaction between Soot Combustion and NH₃-SCR Reactivity over a Cu-Zeolite SDPF Catalyst", Catalysis Today, vol. 267, no. 1, pp. 110-118, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.01.027>
- [7] L. Pang, C. Fan, L. Shao, K. Song, "The Ce Doping Cu/ZSM-5 as a New Superior Catalyst to Remove NO from Diesel Engine Exhaust", Chemical Engineering Journal, vol. 253, no. 1, pp. 394-401, 2014.

- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.05.090>
- [8] K. Kubo, H. Lida, S. Namba, A. Igarashi, "Ultra-high Steaming Stability of Cu-ZSM-5 Zeolite as Naphtha Cracking Catalyst to Produce Light Olefin", Catalysis Communications, vol. 29, no. 5, pp. 162-165, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2012.10.004>
- [9] C. K. Seo, B. C. Choi, H. N. Kim, C. H. Lee, C. B. Lee, "Effect of ZrO₂ Addition on de-NO_x Performance of Cu-ZSM-5 for Catalyst", Catalysis Today, vol. 191, no. 15, pp. 331-340, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.03.027>
- [10] A. Lundström, B. Andersson, L. Olsson, "Urea Thermolysis studied under Flow Reactor Conditions using DSC and FT-IR" Chemical Engineering Journal, vol. 150, no. 2, pp. 544-550, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.03.044>
- [11] S. T. Choo, S. D. Yim, I. S. Nam, S. W. Ham, J. B. Lee, "Effect of Promoters including WO₃ and BaO on the Durability of V₂O₅/sulfated TiO₂ Catalyst for NO Reduction by NH₃", Applied Catalysis B: Environmental, vol. 44, no. 3, pp. 237-252, 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(03\)00073-0](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(03)00073-0)
- [12] F. Birhold, U. Meingast, P. Wassermann, O. Deutschmann, "Modeling and Simulation of the Injection of Urea-water-solution for Automotive SCR DeNO_x-Systems, Applied Catalysis B: Environmental, vol. 70, no. 1, pp. 119-127, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2005.12.035>
- [13] I. Nova, C. Ciardelli, E. Tronconi, D. Chatterjee, B. B. Konrad, "NH₃-NO/NO₂ Chemistry over V-based Catalysts and its Role in the Mechanism of the Fast SCR Reaction", Catalysis Today, vol. 42, no. 26, pp. 183-190, 2009.
- [14] C. K. Seo, "Optimization of an LNT-SCR combined System to de-NO_x the Diesel Engine Exhaust Gas", Dissertation for the degree of Ph. D., Chonnam National University, pp. 20, 2012.

서 충 길(Choong-Kil Seo)

[정회원]



- 2012년 2월 : 전남대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2012년 8월 : 자동차부품연구원 친환경하이브리드연구센터 선임연구원
- 2012년 9월 ~ 현재 : 호원대학교 자동차기계공학과 부교수

<관심분야>

연소공학, 배기후처리공학, 신재생에너지