

SCR 촉매에 포함된 조촉매 영향

서충길
호원대학교 자동차기계공학과

Effect of Containing Promoter on SCR Catalysts

Choong-Kil Seo

Department of Automotive & Mechanical Engineering, Howon University

요 약 친환경자동차의 보급 확대를 위한 정책수립과 기술개발이 지속적으로 이루어지고 있는 실정이나 아직까지도 내연기관이 차지하는 비중은 약 95% 차지하고 있다. 화석연료를 기반으로 하는 내연기관의 엄격한 배기가스규제를 충족시키기 위해 자동차와 선박용 후처리장치의 비중이 점차로 증가하고 있다. 디젤엔진은 이산화탄소 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 생성된다. 희박한 LNT(질소산화물 흡장촉매)와 urea-SCR(선택적인축매환원장치)는 디젤엔진에서 질소산화물을 저감시키기 위한 후처리장치로 개발되어져왔다. 이 연구는 가혹해지고 있는 배기가스 규제 대응을 위해 선택적인축매환원장치의 촉매에 포함된 조촉매의 영향을 파악하는 것이다. 망간-선택적인축매환원장치의 질소산화물 저감 성능이 가장 우수하였으며, 망간 이온과 Zeolyst의 Al과의 이온교환이 잘 되었고, 활성화 에너지가 낮아 반응 속도가 빨라짐에 따라 질소산화물 저감 성능이 향상되었다. 7Cu-15Ba/78Zeolyst SCR 촉매의 질소산화물 저감 성능은 200도에서 32%, 500도에서 30%를 나타내며 가장 높은 성능을 나타내었고, 조촉매로 첨가된 산화바륨의 질소산화물의 흡장 물질이 Cu-SCR 촉매에 잘 분산되어 있고 Cu-SCR 촉매의 환원 반응과 더불어 산화바륨의 추가적인 질소산화물 저감 성능이 영향을 끼쳤기 때문이다. 7Cu-15Ba/Zeolyst SCR 촉매는 3종 촉매 중 열적 열화에서 내구성이 강하였다. 열적 열화에 따른 동종 성분 산화구리가 이동하여 응집되는데, 산화바륨이 주촉매 산화구리 입자의 응집을 감소시켰기 때문이다.

Abstract The policy-making and technological development of eco-friendly automobiles designed to increase their supply is ongoing, but the internal combustion engine still accounts for approximately 95% of automobiles in use. To meet the stricter emission regulations of internal combustion engines based on fossil fuels, the proportion of after-treatments for vehicles and (ocean going) vessels is increasing continuously. As diesel engines have high power and good fuel economy in addition to less CO₂ emissions, their market share is increasing not only in commercial vehicles, but also in passenger cars. Because of the characteristics of the diesel combustion, however, NO_x is generated in localized high-temperature combustion regions, and particulates are formed in the zones of diffusion combustion. LNT and urea-SCR catalysts have been developed for the after-treatment of exhaust gas to reduce NO_x in diesel vehicles. This study examined the effect of a containing promoter on SCR catalysts to cope with the severe exhaust gas regulation. The de-NO_x performance of the Mn-SCR catalyst was the best, and the de-NO_x performance was improved as the ion exchange rate between Mn ion and Zeolyst was good and the activation energy was low. The de-NO_x performance of the 7Cu-15Ba/78Zeolyst catalyst was 32% at 200 °C and 30% at 500 °C, and showed the highest performance. The NO_x storage material of BaO loaded as a promoter was well dispersed in the Cu-SCR catalyst and the additional de-NO_x performance of BaO was affected by the reduction reaction of the Cu-SCR catalyst. Among the three catalysts, the 7Cu-15Ba/Zeolyst SCR catalyst was resistant to thermal degradation. The same type of CuO due to thermal degradation migrates and agglomerates because BaO reduces the agglomeration of the main catalyst CuO particles.

Keywords : Barium, Catalyst, Copper, Diesel Engine, NO_x, Selective Catalytic Reduction

본 논문은 호원대학교 교내연구지원비로 수행되었음

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

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

Received June 4, 2018

Revised Revised (1st July 31, 2018, 2nd August 7, 2018)

Accepted September 7, 2018

Published September 30, 2018

1. 서론

최근에 건강을 위협하는 가장 큰 요소는 미세먼지라는 국내외 여론조사 결과가 나왔으며, 미세먼지는 호흡기질환과 각종 질병을 야기시키는 원인이 되고 있다. 국가도 미세먼지 문제를 해결하기 위하여,

전 국민의 아이디어를 공모하는 등 많은 노력을 기울이고 있다. 미세먼지와 지구 온난화 등은 그간 산업화를 통하여 얻은 인간생활의 윤택과 편리함 속에서 치루어야 대가이기도 하며 또한 해결해야 할 우리나라의 난제이기도 하다. 현실적으로 화석연료를 사용하는 내연기관의 이용을 줄이고 전기자동차와 신재생에너지 등 파워트레인(power train)의 변화가 거세다. 향후 경·소형차 부문에서는 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 위해서 후처리 촉매개발에 대한 연구는 계속되어야 한다.

디젤엔진은 연소특성상, 질소산화물(NOx)과 입자상물질(PM)이 많이 배출되는데 이에 관한 연구개발이 계속되고 있다 [1]. 이 중 urea-SCR(Selective Catalytic Reduction) 촉매 기술은 NOx를 가장 많이 저감할 수 있는 기술 중 하나이다 [2-9].

최근에 폭스바겐의 디젤게이트 이후로 소형디젤자동차에 적용이 되었던 LNT(Lean NOx Trap) 촉매는 연료 페널티와 de-NOx 성능 저하로 urea-SCR 촉매로 대체가 되고 있으며 향후 중·대형 자동차, 건설기계 및 선박 등에 시장의 수요가 계속적으로 증가하리라 판단되어 이에 대한 연구는 의의가 있다. 이 연구는 urea-SCR 촉매에 사용되는 Cu-SCR 촉매의 de-NOx 성능 향상을 위하여 여러 포함된 조촉매의 영향을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

SCR 촉매의 담지된 조촉매 영향을 파악을 위해 전이금속(Cu, Co, Ni, Mn, Co)과 NOx 흡장 물질에 따른 de-NOx 성능을 파악하였다. 그 후 성능이 우수한 SCR 촉매의 열적 열화(thermal aging)에 따른 조촉매의 영향을 파악하여 de-NOx 성능을 개선시키기 위해서 총 8종의 SCR 촉매를 Table 1과 같이 제조하였다. 1. 7Cu/Zeolyst 촉매는

Table 1. Specification of SCR Catalysts

No	Catalyst	Si/Al	BET (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Pore size(nm)
1	7Cu/Zeolyst	13.7	567.083	0.798	5.635
2	7Co/Zeolyst	13.7	576.045	0.810	5.626
3	7Ni/Zeolyst	13.7	633.456	0.932	5.889
4	7Mn/Zeolyst	13.7	570.347	0.803	5.634
5	7Co/Zeolyst	13.7	603.849	0.855	5.664
6	7Cu-15BaO/Zeolyst	13.7	451.066	0.607	5.387
7	7Cu-15K/Zeolyst	13.7	418.127	0.684	6.545
8	7Cu-15Ca/Zeolyst	13.7	540.482	0.741	5.486

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

5CuSO₄의 전구체 0.52g를 넣고 1hr 교반(stirring)하였다. 질산염을 이용하여 pH 지수 8-8.5로 맞춘 후 약 30분간 교반시켰다. 지지체 Zeolite는 Zeolyst(Si/Al=13.7)를 93wt%를 넣고 24hr 동안 이온 교환시켰다. 1회 세척(washing) 이후 80℃의 건조기에서 24hr 건조(dry)하였고 밀링(milling) 작업하였다. 그 후 촉매 파우더를 50cc 증류수에 넣고 액상 실리카를 촉매 파우더 무게 대비 약 10% 수준으로 비이커에 넣은 후 60℃로 유지하면서 53g/L(400CPSI)로 코팅하였다. 그 후 코팅된 촉매를 500℃에서 2h 동안 air로 소성(calcination)하였다. 2-5번 SCR 촉매 또한 1번 SCR 촉매와 동일한 방법으로 전이금속만 바꾸어서 제조하였다. 6-8번 SCR 촉매는 1-5번 SCR 촉매 제조법과 같고 마지막 제조 공정에서 조촉매 NOx 흡장 물질(Ba, K, Ca)을 첨가하여 2hr 교반하여 제조하였다. 이에 관한 SCR 촉매의 세부 규격은 Table 1에 나타내었다. BET(Brunauer-Emmett-Teller) 방법으로 SCR 촉매의 비표면적과 포어(Pore) 사이즈와 체적을 분석하였다(ASAP Q2 2020, Micromeritics). SCR 촉매의 조촉매의 형상과 사이즈 및 결정 구조를 확인하기 위해 TEM(TEM, JEM-2000FX II(200kV), JEOL)을 이용하

였다.

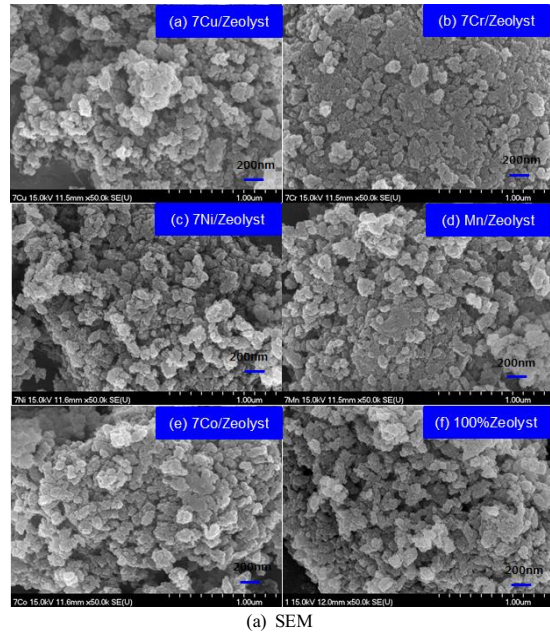
Table 2는 SCR 촉매의 de-NOx/CO 성능 평가를 위한 모델가스 조건이다. SCR 촉매의 평가시스템으로는 모델가스반응을 사용하였으며 [1], 촉매의 성능 평가는 200~500℃까지 정상상태(steady state)조건으로 설정하였다. SCR 촉매의 de-NOx 성능은 아래 식(1)과 같이 계산하였으며, 촉매 반응 후의 가스 성분은 가스분석기(VarioPlus Industrial, MRU Instruments, Inc.)를 이용하여 정량·정성적으로 평가하였다.

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

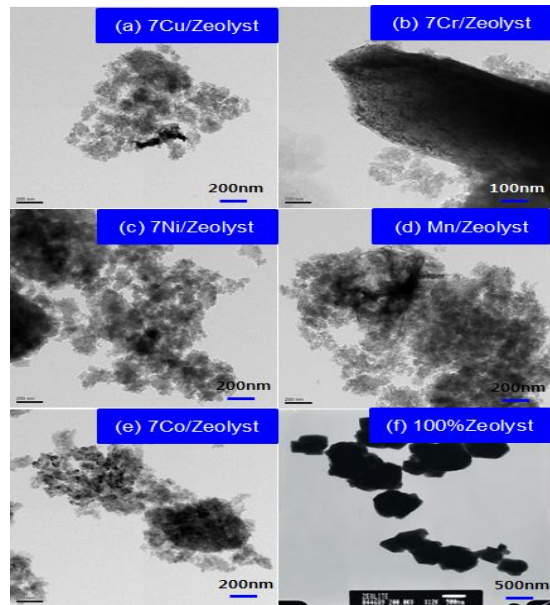
3. 결과 및 고찰

3.1 SCR 촉매에 포함된 전이금속의 특성

현재 실용화되어 있는 SCR 촉매 종류로는, Fe, Cu-SCR 및 V-SCR 촉매로 구분할 수 있으며, Cu-SCR 촉매는 저·중온 온도 영역에서 촉매 활성도가 높아 실용화가 되어왔다. 그러나 Cu-SCR 촉매의 Cu는 독성이 있어서 지적되어왔으며, 이에 대한 대체 전이 금속을 연구하는 것은 의의가 있다. 크롬(Cr)금속은 NOx 산화능력이 커서 산화촉매의 조촉매로 사용되어져왔다 [10, 11]. 니켈(Ni)금속 [12, 13]은 CH4에 대한 선택도(selectivity)가 있어서 CH4 산화를 향상시키는 금속이다. 망간(Mn)은 NOx 흡장(Lean NOx Trap)촉매의 Pt를 대체할 만한 산화 능력이 뛰어난 금속이다. 코발트(Co) 금속 또한 조촉매로 담지되었을 때에 NOx 저감 능력을 향상시키는 물질로 알려져 있다. 제올라이트 종류는 많으나 전반적으로 실리콘(Si), 알루미늄(Al), 산소(O2)로 이루어져 있는데, 금속원자가 산소와 결합하기 때문에 산점이 생성되며, 산성은 전자 농도가 낮아 전자 농도가 높은 염기성 물질(NH3)과 선택적으로 반응한다. 제올라이트의 산/염기성은 알루미늄이 있어야 한다. Si/Al 몰비는 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. SCR 촉매가 반응하는 메커니즘은 Al(산점)에 NH3가 선택적으로 흡장된다. 전이금속인 Cu, Fe는 NO를 산화시켜 여기된(excited) NO*로



(a) SEM



(b) TEM

Fig. 1. SEM/TEM image according to kind of transition metal

변환해준다. 결국, SCR 촉매의 세공(pore)의 산점(활성점)에서는 NH4NO3와 반응하여 N2로 탈리시키는 메커니즘을 가진다 [1].

Fig. 1은 조촉매 5종류가 포함된 SCR 촉매의 SEM/TEM 이미지를 나타내고 있다. Fig.1(a)의 SEM 이

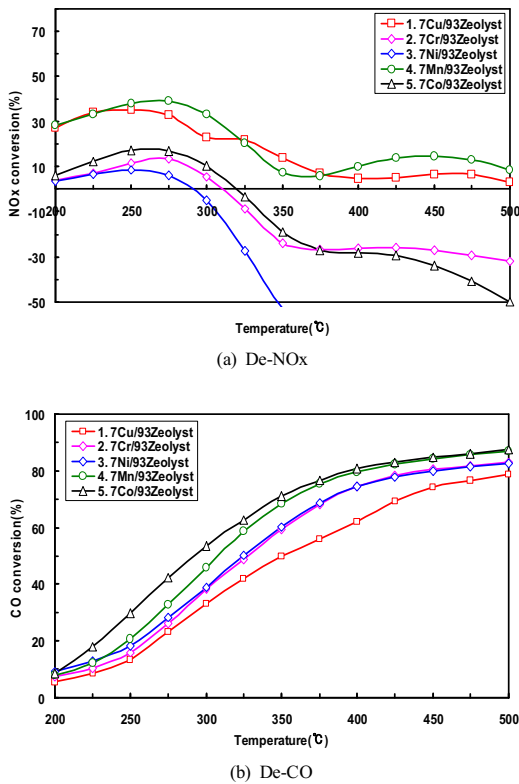


Fig. 2. Conversion rate according to kind of transition metal

미지에서 지지체 93wt% Zeolyst에 7wt%의전이 금속이 담지됨에 따른 물리적인 특성은 파악Fig. 1은 조촉매 5 종류가 담지된 SCR 촉매의 SEM/TEM 이미지를 나타내고 있다. Fig.1(a)의 SEM 이미지에서 지지체 93wt% Zeolyst에 7wt%의전이 금속이 담지됨에 따른 물리적인 특성은 파악하기 어렵다. Fig.1(b) TEM 이미지에서 전이금속 5종류는 10-20nm 사이즈 급으로 zeolyst 입자위에 분산되어 있다.

Fig. 2는 담지된 전이 금속 종류에 따른 de-NOx/CO 성능을 나타내고 있다. 2, 3 그리고 4번 Cr, Ni, Co-SCR 촉매는 온도 약 275°C에서 최고 15% 수준의 낮은 de-NOx 성능을 나타내고 있으며, 325°C에서 마이너스 (-) NOx 정화율을 나타내고 있다. 이는 전이 금속의 활성화 에너지가 높아 NOx 저감 효과가 낮다고 판단되며, 마이너스(-) de-NOx 성능은 NH₄NO₃(질산염)으로 흡장되어 있던 NOx가 촉매의 반응속도가 저하됨에 따라 N₂로 환원되지 못하고 NO+NO₂로 탈착되기 때문이다. 1,

4번 Cu, Mn-SCR 촉매는 워시코트(Washcoat) 담지량이 작지만 촉매온도 200°C에서 NOx 정화 성능이 30%로 시작하여 300°C에서 40%까지 저감되었다. 그 중 Mn 조촉매가 첨가된 Mn-SCR 촉매의 de-NOx 성능이 가장 우수하다. 이는 Mn 이온과 Zeolyst의 Al과의 이온교환이 잘 되었고, 활성화 에너지가 낮아 반응 속도가 빨라짐에 따라 de-NOx 성능이 향상되었다고 판단한다. Fig. 1(b)의 de-CO 성능을 살펴보면, 전이 금속에 따른 5종류의 SCR 촉매는 산(acid) 촉매이므로 산성계열인 CO가스는 SCR 촉매와의 반응성은 높지 않지만 전반적인 경향은 촉매온도 200°C에서 약 10%에서 시작으로 500°C에서 약 70~80%까지 CO는 CO₂로 산화되었다.

3.2 NOx 흡장물질이 de-NOx/CO 성능에 미치는 영향

향후 미세먼지 등 환경오염과 인체의 유해성으로 인하여 배기가스 규제가 엄격해질 것으로 예상된다. NOx 가스 중 NO₂는 광화학 스모그로써 미세먼지의 주범이므로 SCR 촉매의 de-NOx 성능 개선은 중요하다. 이 절에서는 소형 디젤자동차에 많이 사용되어져 온 de-NOx 촉매 중 희박 질소산화물 흡장촉매(LNT)의 NOx 흡장 물질 중 Ba이 사용되어져 왔다 [14]. 산성 계열인 NOx 가스를 염기성인 물질(BaO, K, Ca)을 담지하여 NOx를 흡장한 후 환원제가 공급될 때 제거하는 반응 메커니즘을 가진다.

Fig. 3은 NOx 흡장 물질 담지에 따른 SEM/TEM 이미지를 보여주고 있다. 지지체 78wt% Zeolyst에 Cu와 NOx 흡장 물질이 담지되었고, 2차원 표면을 나타낸 Fig. 3(a) SEM 이미지에서는 분석이 용이하지 않다. Fig. 3(b) TEM 이미지의 7Cu-15Ba/Zeolyst 촉매에서 Ba는 무정형 형상으로 약 200~600nm급으로 담지되어 있으며, 큰 사이즈로 분산되어 있다. 7Cu-15K/Zeolyst 촉매에서 폭과 길이가 약 20-700nm 수준으로 K이 담지되어 있다. 7Cu-15Ca/Zeolyst 촉매 또한 CaO의 입자는 무정형 타입으로 약 20nm급의 사이즈로 분산과 응집(agglomeration)으로 구성되어 있다.

Fig. 4는 NOx 흡장 물질 담지에 따른 3종류의 SEM-EDX의 피크를 나타내고 있다. Fig. 4(d)의 7Cu/Zeolyst를 기준으로 BaO, K 그리고 Ca 흡장물질이 주피크와 보조피크를 나타내고 있다.

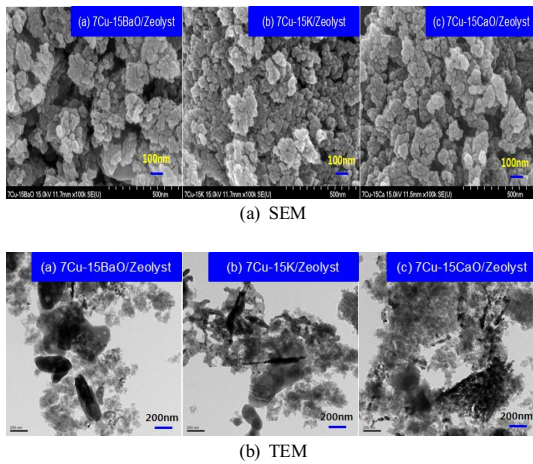


Fig. 3. SEM/TEM image according to NOx storage material

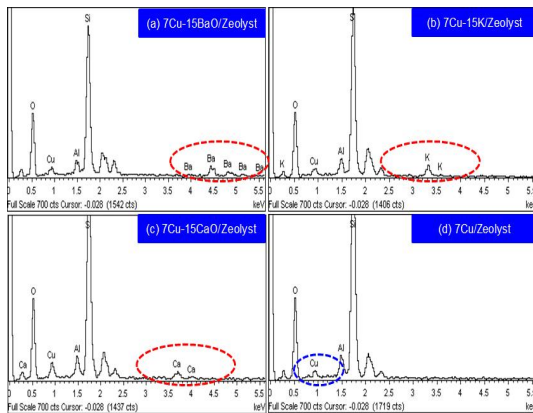
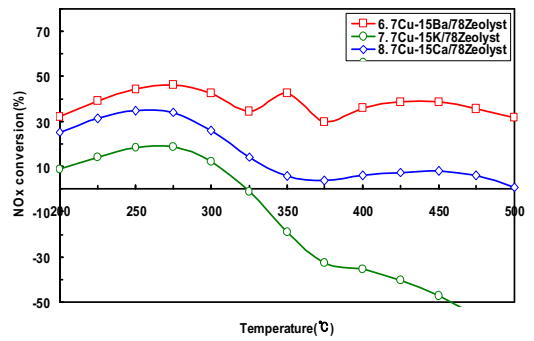
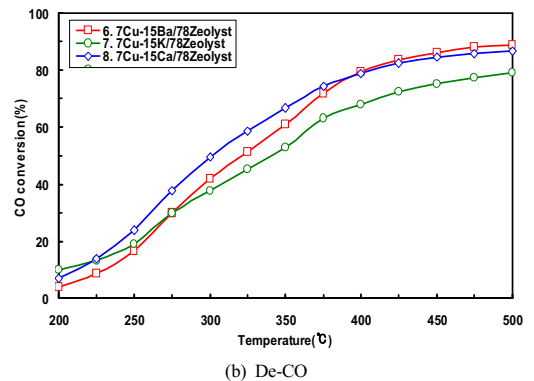


Fig. 4. SEM-EDX image according to NOx storage material

Fig. 5는 NOx 흡장 물질 담지에 따른 de-NOx/CO 성능을 나타내고 있다. 7. 7Cu-15CaO/78Zeoyst 촉매는 300℃에서 최고 약 20%, 325℃ 이상에서는 마이너스(-) 정확율을 나타내며 가장 낮은 NOx 정확율을 나타내고 있다. 6. 7Cu-15Ba/78Zeoyst 촉매는 200℃에서 de-NOx 성능은 32%에서 시작하여 500℃에서 30%를 나타내며 가장 높은 성능을 나타내고 있다. 이는 조촉매로 첨가된 BaO의 NOx 흡장 물질이 Cu-SCR 촉매에 잘 분산되어 있고, Cu-SCR 촉매의 환원 반응과 더불어 BaO의 추가적인 de-NOx 성능이 영향을 끼쳤기 때문이다. Fig 5(b)의 de-CO 성능은 촉매온도 200℃에서 약 10%, 500℃에서 약 80% 성능을 나타내고 있지만, 산화 촉매에 비해 산(acid) 촉매이므로 낮은 수준이다.



(a) De-NOx



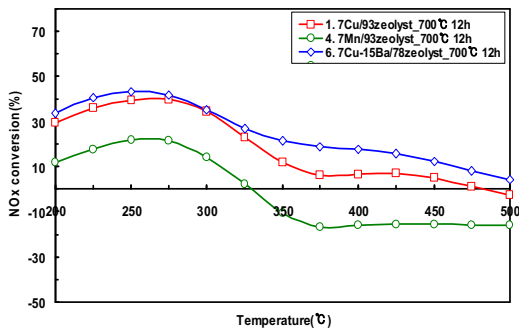
(b) De-CO

Fig. 5. Conversion rate according to NOx storage material

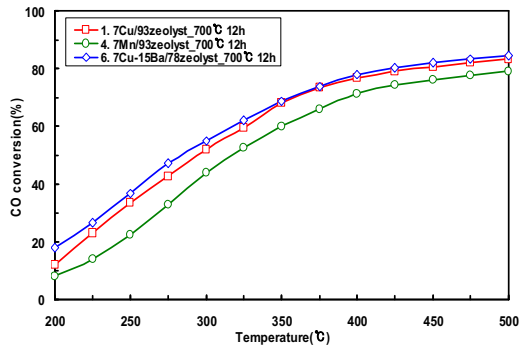
3.3 조촉매가 열적 열화에 미치는 영향

자동차용 촉매는 내연기관의 연소온도가 높기 때문에 열적 열화와 배기가스가 고유량으로 배출되므로 이로 인하여 많은 부하를 받는다. 그 중 열적 열화(thermal aging)으로 인하여 촉매의 내구성은 급감하며 이를 개선시키기 위해 조촉매 연구는 중요하다. 선행 연구에서 SCR 촉매의 산점의 세기 조절과 열적 열화 개선을 위해 지르코니아(ZrO₂) 담지에 대한 연구를 진행했었다 [2]. 적절하게 담지된 조촉매는 열적 열화에 대해 촉매의 내구성을 개선시킬 수 있다. 자동차의 촉매 물질은 열적 열화에 의해 입자가 소결(sintering)되고 이동 및 응집(agglomeration)되어 촉매활성은 저하된다.

Fig. 6은 제조된 촉매 8종 중 de-NOx 성능이 높은 촉매 3종을 선정하여 에어분위기에서 700℃ 12hr 열적 열화를 실시한 후 de-NOx/CO 성능을 파악하였다. 4. 7Mn/Zeolyst SCR 촉매의 NOx 정확율은 200℃에서 10%, 250℃에서 약 20%를 나타내면서 de-NOx 성능 저하가 크다. 1, 4번 7Cu/Zeoylst와 7Cu-15Ba/Zeolyst SCR



(a) De-NOx



(b) De-CO

Fig. 6. Conversion rate according to hydrothermal aging

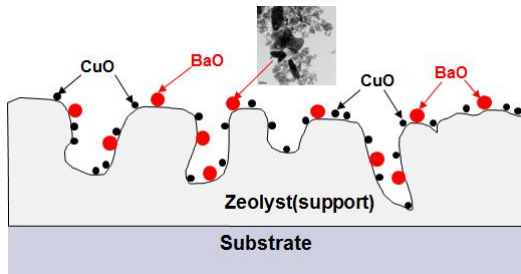
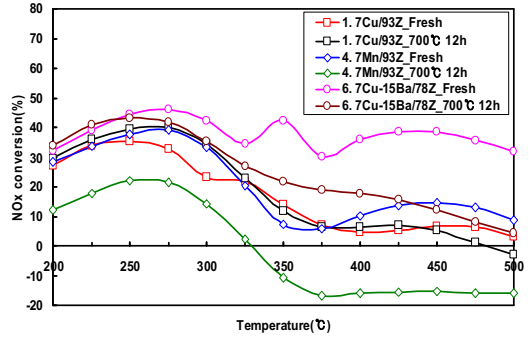
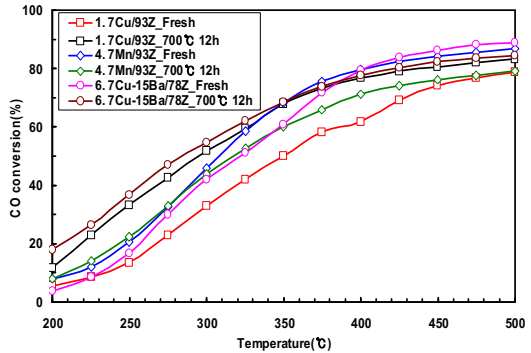


Fig. 7. Schematic of BaO role according to thermal aging

촉매는 200°C 저온에서 de-NOx 성능이 약 30%, 250°C에서 약 40%를 나타내며 촉매 온도가 증가할수록 de-NOx 성능은 감소하고 있다. NOx 흡장 물질이 담지된 7번 7Cu-15Ba/Zeolyst SCR 촉매는 3종 촉매 중 가장 de-NOx 성능이 가장 높다. 350°C 이상에서 1번 7Cu/Zeolyst SCR 촉매보다 약 10% 이상이 향상되었고 열적 열화에 따른 내구성이 강하다. 이는 Fig.7과 같이 700°C 고온에서 열적 열화에 따른 동종 성분 CuO가 이동하여 응집되는데, NOx 흡장 물질 중 BaO가 분산되어



(a) De-NOx



(b) De-CO

Fig. 8. Conversion rate comparison according to fresh/hydrothermal aging

촉매 역할을 담당하는 CuO 입자의 응집을 감소시켰기 때문이다. Fig. 6(b)의 CO 정화율을 살펴보면 3종의 촉매는 200°C에서 10-20%, 온도가 증가하면서 약 80% 수준의 정화율을 나타내고 있다. CO 산화 능력이 저하되는 것은 Pt와 같은 귀금속이 담지 될 때 200°C에서도 약 90% 이상을 저감시킬 수 있는데, 산성 계열의 SCR 촉매의 CO 산화 능력은 NOx 환원 반응보다 부 반응이기 때문이다. Fig. 8은 de-NOx 성능이 우수한 촉매의 Fresh 촉매와 700°C에서 12hr 열적 열화시킨 촉매에 따른 de-NOx/CO 성능 비교를 나타내고 있다. Fig. 8(a)의 de-NOx 성능에서 4번 7Mn/Zeolyst 촉매는 Fresh 대비 열적 열화에 따른 de-NOx 성능 저하 폭이 약 20-30%로 가장 크게 감소하고 있다. 6번 7Cu-15Ba/Zeolyst Fresh 촉매는 열화에 따라 300°C에서 10%, 500°C에서 약 25% 수준으로 de-NOx 성능이 저하되지만, 촉매 온도 전반영역에서 de-NOx 성능이 높고 열적 열화에 따른 내구성이 확보되는 것을 확인할 수 있어서 Cu-SCR 촉매의 조촉매로써 중요한 역할을 할 수 있다. Fig. 8(b)의 CO 정화

율을 살펴보면, 1번 7Cu/Zeolyst Fresh 촉매에 비해 열적 열화에 따른 소폭 CO 산화율이 증가하였으며, 4, 7번 SCR 촉매의 CO 산화율은 소폭 감소하였지만 de-NOx 촉매를 고려할 때 7번 7Cu-15Ba/Zeolyst SCR 촉매의 조합이 적절하다.

4. 결론

SCR 촉매에 포함된 조촉매 영향의 결과는 아래와 같다.

- 1) Mn-SCR 촉매의 de-NOx 성능이 가장 우수하였으며, Mn 이온과 Zeolyst의 Al과의 이온교환이 잘 되었고, 활성화 에너지가 낮아 반응 속도가 빨라짐에 따라 de-NOx 성능이 향상되었다.
- 2) 7Cu-15Ba/78Zeost 촉매의 de-NOx 성능은 200℃에서 32%, 500℃에서 30%를 나타내며 가장 높은 성능을 나타내었고, 조촉매로 첨가된 BaO의 NOx 흡착 물질이 Cu-SCR 촉매에 잘 분산되어 있고, Cu-SCR 촉매의 환원 반응과 더불어 BaO의 추가적인 de-NOx 성능이 영향을 끼쳤기 때문이다.
- 3) 7Cu-15Ba/Zeolyst SCR 촉매는 3종 촉매 중 열적 열화에서 내구성이 강하였다. 열적 열화에 따른 동종 성분 CuO가 이동하여 응집되는데, BaO가 주 촉매 CuO 입자의 응집을 감소시켰기 때문이다.

References

[1] C. K. Seo, "Research for Performance Improvement of De-NOx of Cu-SCR Catalysts", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.3, pp.112-118, 2018.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.3.112>

[2] C. K. Seo, B. Choi, H. Kim, C. H. Lee, C. B. Lee, "Effect of ZrO₂ addition on de-NOx performance of Cu-ZSM-5 for SCR catalyst", *Chemical Engineering Journal*, Vol.191, No.15, pp.331-340, 2012.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2012.03.027>

[3] K. Kubo, H. Iida, 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://dx.doi.org/10.1016/j.catcom.2012.10.004>

[4] L. Pang, C. Fan, L. Shao, K. Song, J. Yi, X. Cai, J. Wang, M. Kang, T. Li, "The Ce doping Cu/ZSM-5 as a new superior catalyst to remove NO from diesel engine

exhaust", *Chemical Engineering Journal*, Vol.253, pp.394-401, 2014.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.05.090>

[5] F. Marchitti, I. Nova, E. Tronconi, "Experimental study of the interaction between soot combustion and NH₃-SCR reactivity over a Cu - Zeolite SDFP catalyst", *Catalysis Today*, Vol.267, No.1, pp.110-118, 2016.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2016.01.027>

[6] 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.1-2, pp.18-27, 2008
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2007.10.117>

[7] M. Klimeczak, 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: V₂O₅ - WO₃/TiO₂ catalysts", *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol.95, No.1-2, pp.39-47, 2010.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.12.007>

[8] L. Xu, "Impact of a Cu-zeolite SCR Catalyst on the Performance of a Diesel LNT+SCR System", SAE No.2009-010285

[9] C. K. Seo, H. Kim, B. Choi, M. T. Lim, C. H. Lee, C. B. Lee, "De-NOx characteristics of a combined system of LNT and SCR catalysts according to hydrothermal aging and sulfur poisoning", *Catalysis Today*, Vol.164, No.1, pp.507-514, 2012.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2010.10.010>

[10] J. R. Sohn, S. G. Ryu, Y. I. Pae, "Structure and Thermal Properties of Chromium Oxide Supported on Zirconia", *Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers*, Vol.30, No.5, pp.586-593, 1992.

[11] S. H. Zhang, M. F. Wu, T. T. Tang, Q. J. Xing, C. Q. Peng, F. Li, H. Liu, X. B. Luo, J. P. Zou, X. B. Min, J. M. Luo, "Mechanism investigation of anoxic Cr(VI) removal by nano zero-valent iron based on XPS analysis in time scale", *Chemical Engineering Journal*, Vol.335, pp.945-953, 2018.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.182>

[12] K. H. Hong, J. H. Kim, K. Chang, J. Kwon, "The role of Cr on oxide formation in Ni-Cr alloys: A theoretical study", *Computational Materials Science*, Vol.142, pp.85-191, 2018.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.09.056>

[13] G. Y. Jung, W. C. Jeon, S. Lee, S. H. Jung, S. G. Cho, "Reaction Characteristics of Ni-Al nanolayers by molecular dynamics simulation", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.57, pp.290-296, 2018.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2017.08.035>

[14] C. K. Seo, "Optimization of an LNT-SCR combined System to de-NOx 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