

CNG 버스용 SCR 촉매의 세라믹과 메탈 담체에 따른 De-CH₄/NO_x 특성

서충길
호원대학교 자동차기계공학과

Characteristics on De-CH₄/NO_x according to Ceramic and Metal Substrates of SCR Catalysts for CNG Buses

Choong-Kil Seo

Department of Automotive & Mechanical Engineering, Howon University

요약 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. 천연가스는 대기환경 오염물질을 거의 배출하지 않는 청정연료이며, 주로 시내버스의 연료로 사용되어져 왔다. CNG 버스의 보급률이 계속적으로 증가하고 있으며 이에 대한 엄격한 배기규제를 충족시키고 경제적인 후처리장치의 연구개발이 필요하다. 장기적인 연구로는, CNG 버스에서 배출되는 유독성가스인 CH₄와 NO_x를 동시저감시키는 새로운 NGOC/LNT+NGOC/SCR 복합시스템을 개발하는 것이다. 이 연구는 복합시스템 후단에 장착되는 선택적촉매환원(SCR)의 washcoat를 세라믹과 메탈 담체에 코팅하여 de-CH₄/NO_x 특성을 파악하는 것이다. V, Cu-SCR 촉매는 CH₄ 산화반응에는 영향을 미치지 않고, 이중층으로 코팅된 2, 4번 NGOC/SCR 촉매는 400℃에서 CH₄가 산화되기 시작하여 약 550℃에서는 약 20% 수준으로 CH₄가 저감되었다. NGOC/SCR처럼 two layer로 코팅된 2, 4번 SCR 촉매는 350℃이상에서는 마이너스(-) NO_x 전환률을 나타냈다. 이는 NH₄NO₃(질산염)으로 흡장되어 있는 NO_x가 촉매의 반응속도가 저하됨에 따라 N₂로 환원되지 못하고 NO+NO₂로 탈착되었기 때문이다. 세라믹 기반의 복합시스템은 400℃에서 약 30%, 500℃에서 LOT50에 이르러 메탈 기반의 복합시스템보다 약 20% CH₄ 정화 성능이 높았고, NGOC/LNT+Cu-SCR 복합시스템 조합이 적합하다.

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 about 95% of the automobiles in use. Also, in order 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 gradually increasing. Natural gas is a clean fuel that emits few air pollutants and has been used mainly as a fuel for city buses. In the long term, we intend to develop a new NGOC/LNT+NGOC/SCR combined system that simultaneously reduces the toxic gases, CH₄ and NO_x, emitted from CNG buses. The objective of this study is to investigate the characteristics of de-CH₄/NO_x according to the ceramic and metal substrates of the SCR (Selective Catalytic Reduction) catalysts mounted downstream of the combined system. The V and Cu-SCR catalysts did not affect the CH₄ oxidation reaction, the two NGOC/SCR catalysts each coated with two layers began to oxidize CH₄ at 400℃, and the amount of CH₄ emitted was reduced to about 20% of its initial value at about 550℃. The two NGOC/SCR catalysts each coated with two layers showed a negative (-) NO_x conversion rate above 350℃. The ceramic-based combined system reached LOT50 at 500℃, which was about 20% higher in terms of the CH₄ conversion rate than the metal-based combined system, showing that the combined system of NGOC/LNT+Cu-SCR is a suitable combination.

Keywords : Catalyst, Ceramic, CH₄, CNG, Metal, NO_x, Substrate

본 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015R1D1A101058708)

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

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

Received September 25, 2017

Revised November 10, 2017

Accepted January 5, 2018

Published January 31, 2018

1. 서론

전기차와 수소차 등 친환경자동차 도입을 위하여 국내·외의 많은 정책도입과 시장에서 점유율이 증가하고 있지만 아직까지도 화석연료를 기반으로 하는 내연기관이 차지하는 비중은 약 95%이다.

최근에는 ‘디젤게이트’와 선진국 차량들의 배기가스 조작과문으로 인하여 소비자들의 관심이 증가하고 있으며, 배기가스 규제 또한 엄격해지고 있다[1]. 화석연료가 가지고 있는 여러 가지 문제로 인하여 새로운 대체에너지나 연료에 대한 연구가 진행 중이며, 천연가스(natural gas)는 화석연료 중 석유에 버금갈 만큼 풍부한 매장량을 가지고 있고 압축천연가스(CNG) 버스의 주요 연료원으로 사용되어져왔다[2]. 최근 정부의 전폭적인 지원하에 급성장을 해오던 천연가스 차량업계는 유가하락과 Euro-5, 6 도입 등 대외변수에 대응할 힘을 갖추지 못하며 위기를 맞았지만 다시 재도약을 하기 위해 정부와 지자체, 업계가 한 곳으로 힘을 모으고 정책지원부터 인프라 확충, 관련기술 개발까지 중장기 로드맵을 정밀하게 정립하였다[3].

현재는 CNG 버스에 사용되는 후처리장치는 CH₄와 NO_x를 각각 따로 저감시키는 촉매장치로 구성이 되어 있어서 후처리장치의 고비용과 공간을 많이 차지함에 따라 장치의 용이성이 저하되는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 가지고 있는바 이 연구는 장기적인 관점에서 CNG 버스의 post Euro-6 대응을 위하여 CH₄와 NO_x를 동시에 저감시키는 복합시스템을 개발하는 것이다. 이번 연구는 de-CH₄/NO_x 성능 향상을 위해 기존의 세라믹(ceramic)과 메탈(metal) 담체[4]에 선택적인 촉매 환원(Selective Catalytic Reduction) 촉매[5-11]washcoat를 코팅하여 담체에 따른 de-CH₄/NO_x 성능을 파악하는 것이다.

2. 실험장치 및 방법

CNG 버스용 de-CH₄/NO_x 저감 능력 향상을 위해 4 종류의 SCR 촉매를 제조하였고, Fig.1은 세라믹과 메탈 담체의 사진을 나타내고 있다. 1. V-SCR 촉매는 TiO₂ 기반에 3wt%의 바나디아(V₂O₅, Vanadium)과 5wt의 텅스타(WO₃)를 넣어 2시간 함침하고 건조하였다. 500℃

에서 2h 동안 소성한 후 촉매 파우더는 밀링(milling) 작업 후에 50cc 증류수에 넣고 액상 실리카를 촉매파우더 무게대비 약 10% 수준으로 비이커에 넣은 후 80℃로 유지하면서 교반하였다. 코팅량은 세라믹과 메탈 담체에 동일한 양으로 120g/L(400CPSI)를 코팅하였다. 그 후 코팅된 촉매를 500℃에서 2h 동안 air로 소성(calcination)하여 제조하였다. 2. NGOC/V-SCR는 1번 V-SCR 촉매를 단층(one layer)로 코팅한 후에 NGOC(1Pt-3Pd-1Rh-3MgO-3Ni-6CeO₂-5Cr-15Ba/(Al+Si))를 이중층(two layer)로 코팅하였다. 3. Cu-SCR 촉매는 Cu를 5wt%를 증류수에 투입하고 pH=8-8.5로 맞춘 후 93wt%의 ZSM-5와 5시간 이온교환(Ion exchange)법으로 제조한 후 3wt%의 지르코니아(ZrO₂)를 넣어 함침하였다. 건조(dry)후 500℃ 공기분위에서 2hr 소성하였다. 4. NGOC/Cu-SCR 촉매는 Cu-SCR 촉매를 단층으로 코팅한 후에 NGOC를 이중층으로 코팅하여 소성 및 환원처리 한 후에 촉매를 제조하였다. 촉매 조성은 Table 1과 같다.



Fig. 1. Photo of Ceramic and metal substrates

Table 1. Specification of SCR Catalysts

No	Catalyst	Composition	Coating layer
1	V-SCR	3V ₂ O ₅ -5WO ₃ -3Zeolite/ 89TiO ₂	one
2	NGOC/ V-SCR	1Pt-3Pd-1Rh-3MgO-3Ni-6CeO ₂ -5Cr- 15Ba/V-SCR	two
3	Cu-SCR	5Cu-2ZrO ₂ /93ZSM-5	one
4	NGOC/ Cu-SCR	1Pt-3Pd-1Rh-3MgO-3Ni-6CeO ₂ -5Cr- 15Ba/Cu-SCR	two

Table 2와 3은 CNG 버스의 희박공연비 운전조건을 고려하여 설정하였다. Table 2는 NGOC/LNT+NGOC/SCR 복합시스템의 후단에 장착되는 SCR 성능 평가를 위한 실험조건이고, Table 3은 De-CH₄/NO_x 성능 향상을 위하여 설정한 실험조건이다. Fig. 2는 모델가스반응 장치의 개략도이며, 촉매의 성능평가는 200~550℃까지 정상상태(steady state)조건으로 설정하였고, 촉매 반응 후의 가스성분은 가스분석기(VarioPlus Industrial, MRU Instruments, Inc.)를 이용하여 정량정성적으로 평가하였다.

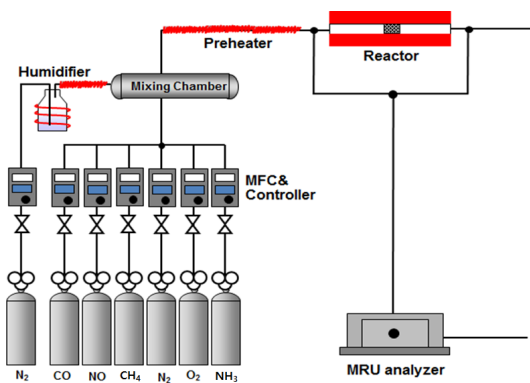


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus

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

NGOC/SCR, SCR conditions	Composition
CH ₄ (ppmC ₁)	500
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

Table 3. Experimental conditions for evaluating of performance of NGOC/LNT+Cu-SCR combined system

NGOC/LNT conditions	Lean	Rich
CH ₄ (ppmC ₁)	500	0
NO(ppm)	500	0
CO(ppm)	700	30,000
H ₂ (ppm)	0	13,000
O ₂ (%)	10	0
H ₂ O(%)	1.5	1.5
N ₂	Balance	Balance
SV(h ⁻¹)	28,000	28,000
Duration(sec)	55	5

3. 결과 및 고찰

3.1 SCR 촉매의 물리적인 특성과 De-NO_x 반응 메커니즘

Fig. 3은 Vanadia SCR(좌)과 Cu-SCR(우) 촉매의 사진이며, SCR 촉매를 이루는 기본 촉매와 조촉매가 잘 분산되어 결정화 되어있다. Vanadia SCR 촉매의 주촉매인 V₂O₅는 비결정성 형상으로 NO_x 환원에 선택성을 가지고 있다. 지지체 티타니아(TiO₂)는 약 30nm급의 입자로 황(sulfur)에 대한 내황성과 열적인 안정을 가지고 있다. 텅스타(WO₃)는 SCR 촉매의 구조 및 기하학적 형상을 유지해주는 강점을 가지고 있고 촉매의 표면 산성(acidity)을 증가시킨다[12]. Fig. 3의 Cu-ZSM-5 SCR(우)촉매는 이온교환에 참여하지 못한 Cu 입자는 소성 과정을 통하여 Cu²⁺보다 안정된 CuO 산화물로 존재하며, CuO 입자는 20-30nm급이며, ZSM-5 입자는 약 300nm급이다.

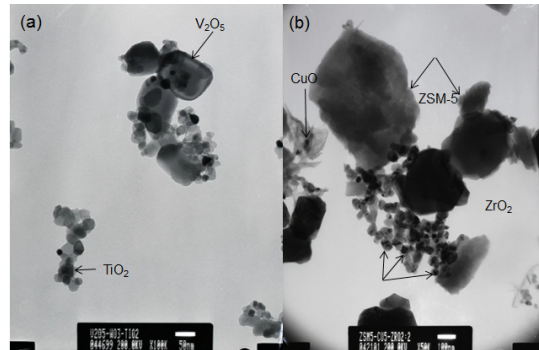


Fig. 3. SEM photograph of V, Cu-SCR catalysts

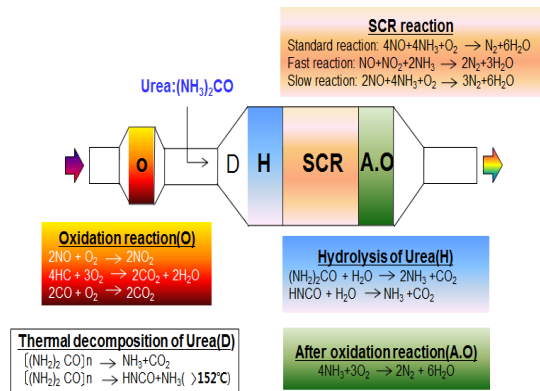


Fig. 4. Reaction mechanism of Urea-SCR catalyst

Urea-SCR 촉매 기술은 NO_x 저감 기법 중 가장 강력한 기술 중 하나이다. Fig. 4와 같이 고온의 배기관으로 분사된 urea 수용액은 H₂O 분해와 urea 열분해(thermal decomposition) 및 가수분해(hydrolysis)을 경유해 NH₃를 생성한다. 이를 통해 질산염(nitrate)과 황산염(sulfate), 고상의 시안산(HNCO)₃ 등을 생성하기도 한다 [13-16]. 암모니아에 의한 NO_x 정화 경로는 아래 3가지이며 그 중에 (2) 반응식은 가장 빠른 반응인 동시에 가장 필요시 되는 경로라고 할 수 있다. 디젤엔진 운전조건에서 배출되는 NO_x는 대부분 NO이다. DOC 촉매는 NO를 NO₂로 산화시키고 NO와 NO_x 비율이 1:1 일 때 SCR 촉매에 의해 가장 높은 정화 효율을 나타낸다.

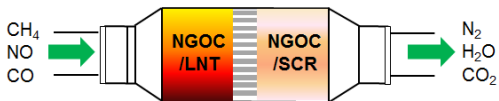
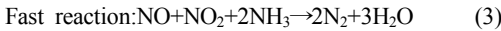
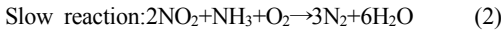
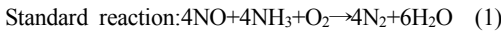
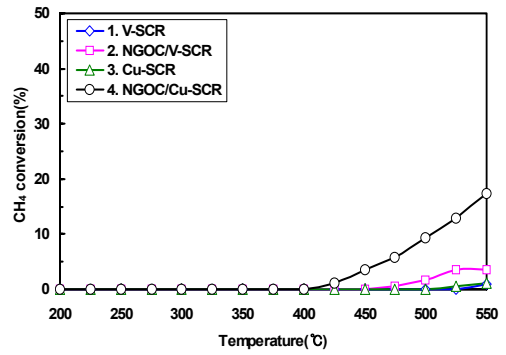


Fig. 5. Reaction schematic of NGOC/LNT+NGOC/SCR combined system

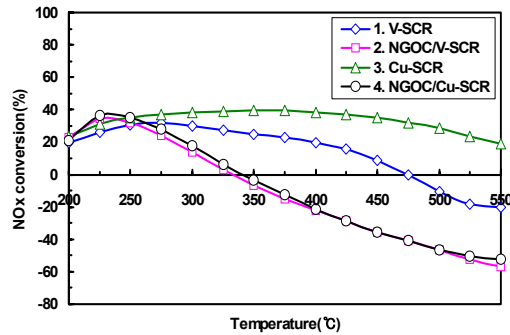
Fig. 5는 CNG 버스에서 배출되는 유독성가스인 CH₄와 NO_x를 동시 저감하는 후처리복합시스템의 개략도를 나타내고 있으며, 이 연구에서는 복합시스템 후단에 장착되는 촉매를 이중층으로 코팅한 NGOC/SCR 또는 단일층으로 코팅한 SCR 촉매를 제조하여 평가하였다.

3.2 세라믹 담체기반의 SCR 촉매 종류에 따른 유해가스 저감 특성

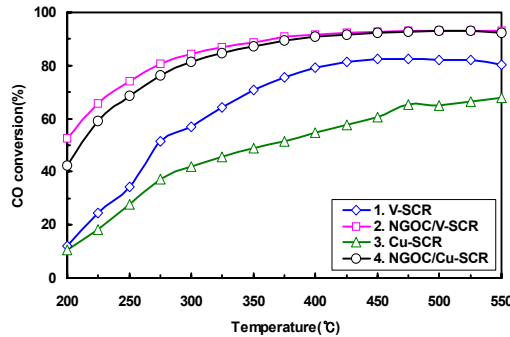
이 절에서는 현재 디젤자동차 및 선박용에 실용화되어 있는 de-NO_x 촉매로는 V(바나듐)-SCR과 Fe, Cu-SCR(제올라이트) 촉매가 다용되고 있으며, 선행연구에서 도출된 결과물을 토대로 2종류(V, SCR)의 SCR 촉매에 이중층(two layer)로 NGOC/LNT용 washcoat를 코팅하여 소성 및 환원 처리한 후 de-CH₄/NO_x 성능에 따라 NGOC/SCR 촉매를 선정하고자 한다. 1, 3번 SCR 촉매는 실용화되어 있는 일반적인 SCR 촉매이며, 2, 4번은 개발된 NGOC/LNT를 two layer로 코팅한 촉매로써 SCR 촉매는 희박연소(O₂ 농도 공존)를 하는 디젤자동차에서 먼저 염기성가스인 NH₃를 흡장하고 산성계열의 NO_x와 반응하여 환원시키는 촉매이다.



(a) De-CH₄



(b) De-NO_x



(c) De-CO

Fig. 6. Conversion rate according to type of SCR catalysts based on ceramic substrate

Fig. 6(a)의 CH₄ 전환율에서 1, 3번 V, Cu-SCR 촉매는 기질이 산성이므로 CH₄(중성) 산화반응에는 영향을 미치지 않는다. 반면에 이중층으로 NGOC와 SCR이 코팅된 2, 4번 NGOC/SCR 촉매는 400°C에서 CH₄가 산화되기 시작하여 약 550°C에서는 약 20% 수준으로 CH₄가 저감되며 4번 NGOC/Cu-SCR 촉매의 CH₄ 정화성능이 제일 우수하다. Fig.6(b)의 de-NO_x 성능을 보면 NGOC/SCR처럼 two layer로 코팅된 2, 4번 SCR 촉매

는 저온 225℃에서 약 40%의 NOx 저감 성능을 나타내고 있으나, 350℃이상에서는 마이너스(-) NOx 전환율을 나타내며 NOx 저감 능력이 급격히 저하된다. 이는 Fig 7의 SCR 촉매의 반응 메커니즘에서 pore 안에 NH₄NO₃(질산염)으로 흡장되어 있는 NOx가 촉매의 반응속도가 저하됨에 따라 N₂로 환원되지 못하고 NO+NO₂로 탈착됨에 따라 마이너스 전환율이 발생된 것이다. Fig. 6(C)의 CO 전환율을 보면 귀금속이 이중층으로 코팅된 2, 4번 NGOC/SCR 촉매의 성능이 좋고 최고 90%의 CO가스가 저감되며 2번 NGOC/V-SCR 촉매의 CO 정화능력이 약간 높다. 단일 V-SCR과 Cu-SCR 촉매 또한 CO의 CO₂로의 산화반응은 나타났고 이는 CO의 활성화 에너지가 낮기 때문이다. CNG 버스용 NGOC/LNT+NOGC/SCR 복합시스템에서는 후단에 장착되는 후처리촉매는 단일 SCR 촉매 장치가 바람직하다.

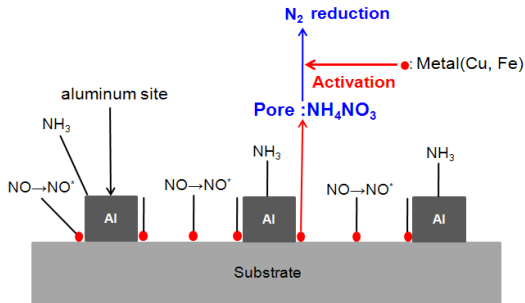


Fig. 7. Detailed mechanism of SCR reaction[17]

3.3 세라믹과 메탈 담체에 코팅된 NGOC/LNT+Cu-SCR 촉매의 유해가스 저감 특성

Fig. 8은 CNG 버스의 연비이득과 CO₂ 배출량을 감소시키기 위해 NGOC/LNT+Cu-SCR 복합시스템의 유해배출가스 저감 메커니즘이다. 정상시는 희박운전을 하면서 CH₄와 NOx는 전단에 장착된 NGOC/LNT에 의해 산화 및 흡장물질(Ba)에 흡장이 되어 CH₄와 NOx를 동시에 감소시키며, Ba 사이트에 흡장된 NOx가 포화에 이르면 In-cylinder 및 post 연료분사에 따라 CO와 HC 계열의 환원제(reductant)가 발생된다. Ba 사이트에 흡장되어 있는 Ba(NO₃)₂의 NOx는 환원제 H₂와 환원반응 중에 촉매의 반응속도가 저하되면 N₂로 환원이 되지 못하고 NH₃가 슬립되며, 후단에 장착되는 Cu-SCR 촉매의 환원제 역할을 담당하여 NOx 저감을 향상에 기여한다.

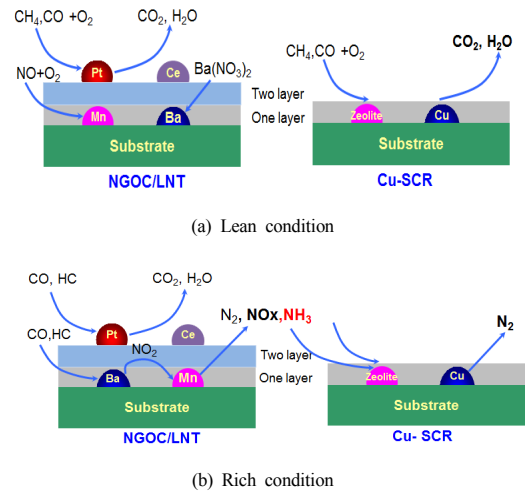
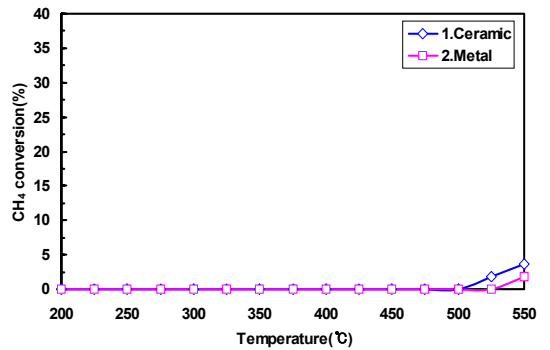
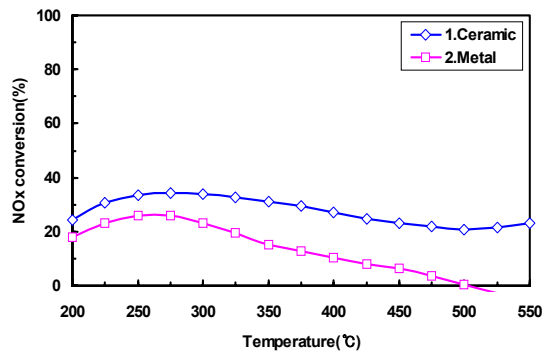


Fig. 8. Reaction mechanism for simultaneous reduction of CH₄ and NO_x according to lean/rich conditions



(a) De-CH₄



(b) De-NO_x

Fig. 9. Performance comparison according to ceramic and metal substrates of Cu-SCR catalysts mounted at the rear

Fig.9는 Cu-SCR 촉매의 washcoat를 세라믹과 메탈 촉매에 동일한 양으로 코팅하여 담체에 따른 de-CH₄/NO_x 성능을 파악하였다. 세라믹과 메탈 담체에 코팅된 Cu-SCR 촉매는 안정적이고 중성계열인 CH₄ 저감 능력에는 영향을 미치지 못하고 있다. Fig. 9(b)의 NO_x 저감 능력은 세라믹 담체에 코팅된 Cu-SCR 촉매가 메탈 담체 촉매보다 온도 전체영역에서 10-20%의 정화성능이 높다. 이는 동일양 양으로 코팅된 washcoat 일지라도 세라믹 담체에는 pore가 잘 발달되어 있어서 촉매물질 코팅이 잘되었기 때문이다. 반면에 메탈 담체는 열전도율은 세라믹 담체보다 높지만 washcoat가 담체에 골고루 코팅이 안되었고, 담체의 홀이 큰 편임에 따라 유해가스가 빠져 나감에 따라 촉매 성능이 저하되었기 때문이다.

복합시스템을 구성하여 유해가스 저감 성능을 파악하였다. Fig.9(a)의 CH₄ 산화온도는 세라믹과 메탈에 코팅된 NGOC/LNT+Cu-SCR 복합시스템은 325℃에서 산화되기 시작하여 550℃에서 약 60%의 정화성능을 나타내고 있다. 세라믹 기반의 복합시스템은 400℃에서 약 30%, 500℃에서 LOT50에 이르러 메탈 기반의 복합시스템보다 약 20% CH₄ 정화 성능이 높다. Fig. 9(b)의 NO_x 전환율에서 세라믹과 메탈 기반의 복합시스템은 약 30% 동일한 수준으로 NO_x가 정화되고 있다. 저·중 온도에서는 NO_x 정화성능이 주반응으로 나타나며 고온에서는 CH₄ 산화능력이 주반응으로 나타나고 있다. CNG 버스용 de-CH₄/NO_x 성능 향상을 위하여 NGOC/LNT+Cu-SCR 복합시스템에는 세라믹 담체에 Cu-SCR 촉매 장착이 적합하다고 판단한다.

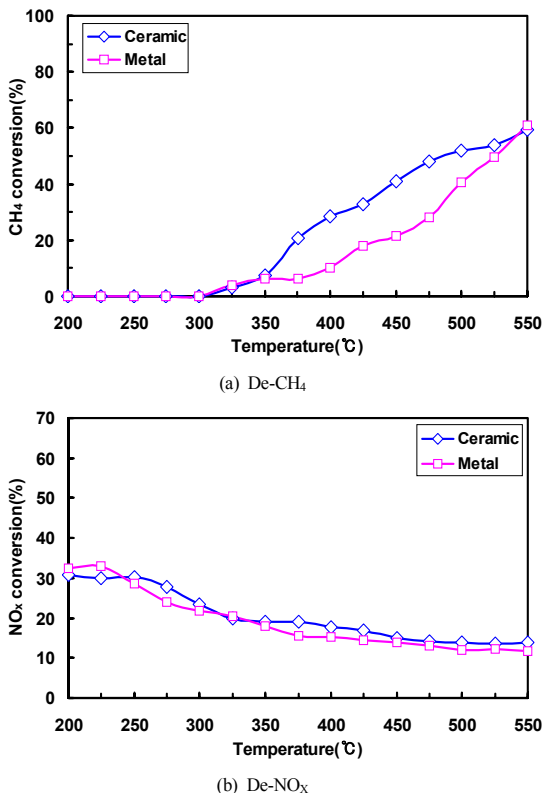


Fig. 10. Performance comparison according to ceramic and metal substrates of NGOC/LNT+Cu-SCR combined system

Fig.10은 CNG 버스용 de-CH₄/NO_x 저감 능력 향상을 위하여 세라믹과 메탈 담체 각각에 NGOC/LNT+Cu-SCR

4. 결론

세라믹(ceramic)과 메탈(metal) 담체 기반의 SCR 촉매의 CH₄와 NO_x 저감 특성을 파악하였고 결과는 아래와 같다.

- 1) 1 3번 V, Cu-SCR 촉매는 CH₄ 산화반응에는 영향을 미치지 않았고, 이중층으로 코팅된 2, 4번 NGOC/SCR 촉매는 400℃에서 CH₄가 산화되기 시작하여 약 550℃에서는 약 20% 수준으로 CH₄가 저감되었다.
- 2) NGOC/SCR처럼 이중층으로 코팅된 2, 4번 SCR 촉매는 350℃이상에서는 마이너스(-) NO_x 전환율을 나타냈고, NO_x 저감 능력이 급격히 저하되었으며, NH₄NO₃(질산염)으로 흡장되어 있는 NO_x가 촉매의 반응속도가 저하됨에 따라 N₂로 환원되지 못하고 NO+NO₂로 탈착되었기 때문이다.
- 3) 세라믹 기반의 복합시스템은 400℃에서 약 30%, 500℃에서 LOT50에 이르러 메탈 기반의 복합시스템보다 약 20% CH₄ 정화 성능이 높았고, NGOC/LNT+Cu-SCR 복합시스템 조합이 적합하다.

References

[1] C. K. Seo, "Research on Improvement of CH₄ Reduction Performance of NGOC for CNG Bus", Journal of the

- Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 18, no. 5, pp. 708-715, 2017.
- [2] J. H. Hong, H. J. Ha, J. D. Han, "The Promotion Effects on Partial Oxidation of Methane for Hydrogen Production over Co/Al₂O₃ and Ni/Al₂O₃ Catalysts", Clean Technology, vol. 18, no. 1, pp. 95-101, 2012. DOI: <https://doi.org/10.7464/ksct.2012.18.1.095>
- [3] <http://www.kangv.org/bbs/board.php>. (accessed July, 03, 2017)
- [4] K. C. Oh, C. K. Seo, S. C. Go, "Commercialization Research of a Metal DOC based on Fe-Cr-Ni substrate", Chemical Engineering Journal, vol. 254, no. 9, pp. 426-433, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2014.05.125>
- [5] 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>
- [6] M. Klimczak, P. Kern, T. Heinzelmann, M. Lucas, P. Claus, "High-throughput Study of the Effects of inorganic Additives and Poisons on NH₃-SCR Catalysts-Part 1", Applied Catalysis B: Environmental, vol. 95, no. 1-2, pp. 39-47, 2010.
- [7] 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>
- [8] 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>
- [9] 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.ccej.2014.05.090>
- [10] 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>
- [11] 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.ccej.2012.03.027>
- [12] C. K. Seo, "The Effect of Additive Catalyst according to Thermal Aging of Vanadia SCR", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, vol. 18, no. 3, pp. 14-19, 2014. DOI: <https://doi.org/10.9726/kspse.2014.18.3.014>
- [13] 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.ccej.2009.03.044>
- [14] 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.
- [15] 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>
- [16] 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)
- [17] 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