

CH₄와 NO_x 저감 성능에 관한 CeO₂ 첨가의 영향

서충길
호원대학교 자동차기계공학과

Effect of CeO₂ Addition on De-CH₄ and NO_x Performance

Choong-Kil Seo

Department of Automotive & Mechanical Engineering, Howon University

요약 환경오염과 인체의 유해성 및 지구온난화로 인하여 자동차의 파워트레인의 변화가 심화되고 있으며 전기자동차의 시장점유율이 상승하고 있다. 또한, 화석연료를 기반으로 하는 내연기관 자동차의 엄격한 배기가스규제를 충족시키기 위해 자동차와 선박용 후처리장치의 비중이 점차로 증가하고 있다. 이 연구의 목적은 CNG 버스에서 배출되는 유독성 가스를 저감하는 NGOC의 CH₄와 NO_x 저감 능력 향상을 위하여 조촉매 CeO₂ 담지량에 영향을 파악하는 것이다. 3종의 천연가스산화촉매(NGOC)를 Fresh 조건과 700°C 12hr 열적 열화 조건으로 촉매를 제조한 후 유해가스 저감 성능을 평가하였다. CeO₂는 일반적으로 산화-환원반응성이 좋아 촉매활성에 좋다고 알려져 왔으며, 안정적인 물질인 CH₄와 NO_x 저감 능력에 미치는 영향을 연구하는 것은 의의가 있다. 6wt% CeO₂가 담지된 Fresh 1Pt-3Pd-1Rh-3MgO-6CeO₂/(Al+Z) NGOC는 CH₄에 대한 선택도가 큰 Pd의 분산도가 제일 높았고 유해가스 저감 성능도 향상되었다. 700°C 12hr 고온조건에서 내구성이 낮은 지지체 zeolite의 화합물 결정이 일부 파괴되면서 zeolite의 결정체인 Al₂O₃가 떨어져 나와 응집되었다. 6wt% CeO₂가 담지된 NGOC는 귀금속의 분산도 저하가 가장 작았고, CeO₂의 열적인 내구성으로 인하여 유해가스 저감 성능이 가장 높았다.

Abstract Due to environmental pollution, hazards of the human body, and global warning, changes in the power train of automobiles are intensifying, and the market forelectronic vehicles is rising. Also, in order to meet the stricter emission regulations forautomobiles with internal combustion engines based on fossil fuel, the proportion of after-treatments for vehicles and vessels is increasing gradually. The objective of this study is to investigate the effectsfrom additive ceric oxide (CeO₂) loading amounts to improve the methane (CH₄) and nitric oxide (NO_x) abatement ability of the natural gas oxidation catalysts(NGOC) reducing toxic gases emitted from compressed natural gas (CNG) buses. Three kinds of NGOC were prepared under the following conditions: fresh and 700°C for 12hr thermal aging, and the reduction performance of toxic gases was evaluated. Fresh 1Pt-3Pd-1Rh-3MgO-6CeO₂/(Al+Z) NGOC containing 6wt% CeO₂ had the highest dispersivity of palladium (Pd) with high selectivity to CH₄ and improved harmful gas reduction performance. The NGOC with 6wt% CeO₂ loaded the least decreased in the dispersivity of the noble metal, and showed the highest reduction of harmful gases due to the thermal durability of CeO₂.

Keywords : Catalyst, CeO₂, CH₄, CNG, NO_x, Pd

1. 서론

화석연료를 사용하는 내연기관에서 배출되는 유해가스는 환경오염과 지구온난화 및 인체에 유해하므로 더욱

더 배기가스규제가 엄격해지고 있으며 사회적으로도 큰 사회적인 이슈가 전 세계적으로 확산되면서 클린디젤(clean diesel)을 지향하던 디젤자동차의 수요는 점점 더 감소하고 있으며, 전기차 및 무인자동차 등의 파워트

본 논문은 호원대학교 교내연구지원비로 수행되었음.

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

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

Received August 2, 2017

Revised August 25, 2017

Accepted September 15, 2017

Published September 30, 2017

레인(power train)의 변화의 물결이 계속되고 있다. 최근에는 미세면지가 사회적인 화두가 되면서 이로 인하여 디젤엔진과 화력발전소에서 발생하는 에미션 관련하여 저감 대책을 수립하고 있다. 대체연료로 구분되는 천연가스(natural gas)는 화석연료 중 석유에 버금갈 만큼 풍부한 매장량을 가지고 있으며, 청정연료로써 대체에너지로 각광 받을 만큼 향후 30년 내에 에너지 소비량 중 천연연료가 30~40%로 증가할 것으로 전망되고 있다 [1,2]. 주로 압축천연가스(CNG) 버스의 주요 연료원으로 사용되어져왔으며, CNG 버스에 대한 배기가스규제 또한 엄격해지고 있다.

현재는 CNG(Compressed Natural Gas)버스는 메탄(CH₄)과 질소산화물(NOx)를 각각 저감시키는 촉매장치로 구성이 되어 후처리장치의 고비용과 공간을 많이 차지함에 따라 장치의 용이성이 저하되는 문제점을 가지고 있다. 지구온난화 가스인 CH₄는 안정적인 물질로써 저감시키는 위해서는 촉매와 조촉매 등 촉매물질들이 최적화되어야한다. 촉매 물질에는 주로 주촉매인 귀금속(Pt, Pd 및 Rh)과 조촉매(CeO₂, ZrO₂, TiO₂, Ni, Co, La 등등)이 사용되고 있으며, 후처리촉매의 비용저하 및 성능향상을 위해서는 귀금속을 사용하지 않거나 최소로 할 필요가 있다. 최근에도 조촉매 중 세리아(CeO₂) 첨가에 따른 성능 향상 및 결정변화 등등에 관한 연구가 이루어져 왔으나[3-10], 배기규제가 강화되고 있는 CNG 버스의 post Euro-6 대응을 위하여 CH₄와 NOx 저감 능력 향상을 위해 CeO₂ 담지량이 미치는 영향을 파악하는 것은 의의가 있다.

이 연구는 CNG버스의 CH₄와 NOx의 저감 능력 향상을 위해 조촉매인 CeO₂ 담지량에 따른 영향을 파악하여 NGOC(Natural Gas Oxidation Catalyst)의 촉매 성능향상을 꾀하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

CeO₂ 담지량(0, 3, 6wt%)에 따른 3종의 NGOC 촉매(1Pt-3Pd-1Rh-3MgO/(Al₂O₃+Zeolite))는 실험실규모에서 사용하는 함침법(impregnation)을 이용하여 제조하였다. 비이커 주변온도를 80℃로 유지한 후 비이커에 증류수 500cc를 넣은 후 Zeolite+ γ-Al₂O₃ 지지체(support)에 조촉매 MgO 3wt%, CeO₂를 3, 6wt%를 각각 넣고 2h 동안 교반(stirring)하였다. 귀금속 담지량을 최소로 하기

위하여 1Pt, 1Rh로 CH₄ 저감 능력을 향상시키기 위해 3Pd를 순차적으로 교반시켰다. 그 후 슬러리(slurry)를 80℃의 건조기에 넣고 12h 동안 건조(dry)하였다. 촉매 파우더는 밀링(milling) 작업 후에 50cc 증류수에 넣고 액상 실리카를 촉매파우더 무게대비 약 10% 수준으로 비이커에 넣은 후 80℃로 유지하면서 교반하였다. 코팅량은 약 6, 7회 얇게 담체(substrate)에 코팅하면서 최종적으로 80g/L(400CPSI)를 담지하였다. 그 후 코팅된 촉

Table 1. Specifications according to CeO₂ loading amount

No	Catalyst	Condition	BET (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Pore size(nm)
1	1Pt-3Pd-1Rh-3MgO/(Al+Z)	Fresh	414.819	0.515	4.974
		700℃	442.382	0.56	5.072
2	1Pt-3Pd-1Rh-3Mg-3CeO ₂ /(Al+Z)	Fresh	402.899	0.558	5.541
		700℃	391.743	0.553	5.647
3	1Pt-3Pd-1Rh-3Mg-6CeO ₂ /(Al+Z)	Fresh	394.508	0.546	5.542
		700℃	381.280	0.523	5.492

Table 2. Pt dispersion according to CeO₂ loading amount

No	Catalyst	Condition	Dispersion (%)	Surface area (m ² /g)	Average particle diameter (nm)
1	1Pt-3Pd-1Rh-3MgO/(Al+Z)	Fresh	28.869	71.294	3.923
		700℃	6.607	16.316	17.143
2	1Pt-3Pd-1Rh-3Mg-3CeO ₂ /(Al+Z)	Fresh	21.749	53.711	5.207
		700℃	4.997	12.342	22.662
3	1Pt-3Pd-1Rh-3Mg-6CeO ₂ /(Al+Z)	Fresh	31.410	77.568	3.606
		700℃	6.337	15.651	17.871

Table 3. Pd dispersion according to CeO₂ loading amount

No	Catalyst	Condition	Dispersion (%)	Surface area (m ² /g)	Average particle diameter (nm)
1	1Pt-3Pd-1Rh-3MgO/(Al+Z)	Fresh	5.249	23.378	21.351
		700℃	1.201	5.350	93.296
2	1Pt-3Pd-1Rh-3Mg-3CeO ₂ /(Al+Z)	Fresh	3.954	17.612	28.342
		700℃	2.636	11.602	41.705
3	1Pt-3Pd-1Rh-3Mg-6CeO ₂ /(Al+Z)	Fresh	5.711	25.434	19.625
		700℃	1.152	5.132	97.258

Table 4. Rh dispersion according to CeO₂ loading amount

No	Catalyst	Condition	Dispersion (%)	Surface area (m ² /g)	Average particle diameter (nm)
1	1Pt-3Pd-1Rh-3MgO/(Al+Z)	Fresh	15.228	67.016	7.220
		700 °C	3.485	15.337	31.548
2	1Pt-3Pd-1Rh-3Mg-3CeO ₂ /(Al+Z)	Fresh	11.473	50.488	9.583
		700 °C	2.636	11.602	41.705
3	1Pt-3Pd-1Rh-3Mg-6CeO ₂ /(Al+Z)	Fresh	16.569	72.914	6.636
		700 °C	3.343	14.712	32.888

Table 5. Experimental conditions evaluating NGOC catalyst performance

Gas components	Composition
CH ₄ (ppm)	500
NO(ppm)	500
CO(ppm)	700
O ₂ (%)	10
H ₂ O(%)	1.5
N ₂	Balance
SV(h ⁻¹)	28,000

매를 500 °C에서 30min 동안 H₂ 10%로 환원(reduction) 처리한 후, 2h 동안 air로 소성(calcination)하여 3종의 NGOC 촉매를 제조하였다.

Table 1은 CeO₂ 담지량 및 700 °C 12hr 열적열화에 따른 촉매의 물질적인 특성을 나타내고 있다. 또한 Table 2, 3, 4는 촉매활성이 좋은 귀금속(Pt, Pd, Rh)에 대한 분산도를 나타내고 있다.

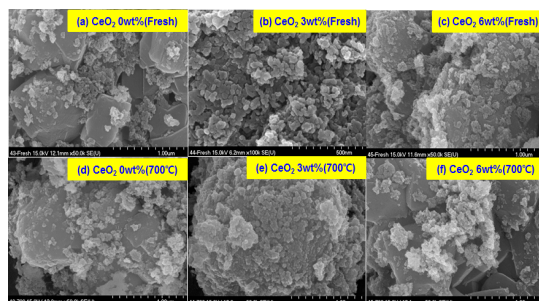
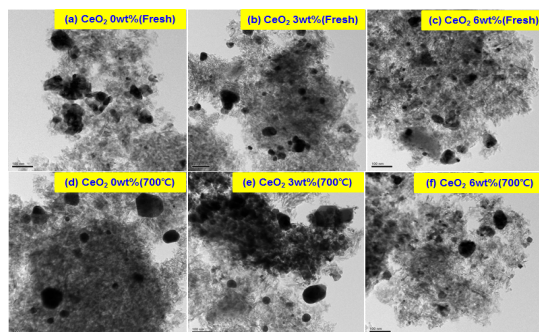
3종의 NGOC의 CH₄ 와 NO_x 저감 특성을 파악하기 위하여 모델가스 촉매 반응장치를 이용하였다[2]. 현재 CNG 버스는 이론공연비($\lambda=1$) 또는 희박공연비로 운전되고 있다. 이론공연비는 가혹한 규제측면에서 볼 때 공기보다는 연료 공급양이 많아짐에 따라 연비 악화와 유해가스 배출량이 증가하는 단점이 있다. 희박공연비는 유해가스(CH₄, CO, NO_x) 배출량도 적고 연비의 경제성을 확보할 수 있으므로 이점이 있고, 산화촉매(NGOC) 외에 배출가스 중 산소(O₂) 농도가 많아 NO_x를 제거할 de-NO_x 촉매가 필요하다.

이 실험은 희박공연비 운전조건측면에서 CNG 버스에서 배출되는 가스를 고려하여 Table 5와 같이 설정하였다. NGOC 촉매 성능평가는 200~600 °C까지 정상상

태(steady state)조건으로 촉매 반응 후에 가스분석기(VarioPlus Industrial, MRU Instruments, Inc.)를 이용하여 정량정성적으로 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 CeO₂ 함량에 따른 De-CH₄/NO_x에 미치는 영향

**Fig. 1.** SEM image according to CeO₂ loading amount (Fresh/ 700 °C 12hr thermal aging)**Fig. 2.** TEM image according to CeO₂ loading amount (Fresh/ 700 °C 12hr thermal aging)

이 절에서는 CeO₂ 담지량에 따른 CH₄와 NO_x 저감 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 1Pt-3Pd-1Rh-3MgO/(Al150:Z50) NGOC를 제조하였다. CeO₂는 산화와 환원반응 및 산소흡장물질로 알려져 있으며[5], 귀금속 분산도를 증가시키는 물질로[3] 촉매의 저감 성능을 향상시킬 수 있어서 중요한 조촉매이다. CeO₂ 담지량에 따른 영향을 파악하기 위하여 0, 3, 6wt%로 NGOC를 제조하여 실험하였다.

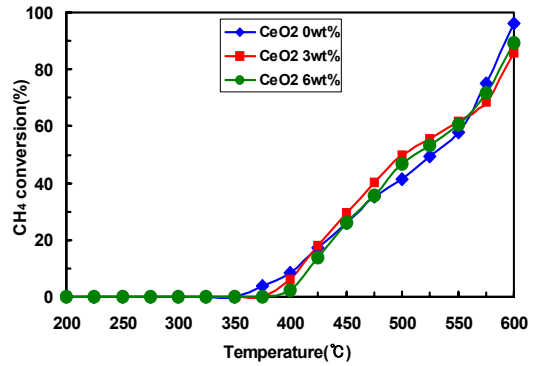
촉매는 Fresh와 700 °C 12hr 열적 열화 조건으로 제조하여 분석하였으며, Fig. 1은 SEM(JSM-7500F+EDS

Oxford) 이미지를 보여주고 있다. Fig. 1(a)는 CeO₂가 담지되어 있지 않은 NGOC이며, Fresh 상태에서 결정입자가 가장 큰 zeolite는 약 30nm-1um의 입자로 결정화되어있으며, Fig. 1(d) 700°C 12hr로 열적 열화되어 있는 NGOC의 경우 zeolite와 Al₂O₃의 결정이 동종성분끼리 응집(agglomeration) 되는 경향을 나타내고 있다. 촉매입자가 응집되면 촉매의 반응속도가 느려짐에 따라 촉매 성능이 저하 될 수 있다. Fig. 1(b)(c)와 (e)(f) NGOC는 CeO₂를 3, 6wt%를 담지한 NGOC이며, Fresh 촉매보다는 700°C 12hr로 열적 열화된 NGOC는 입자들이 응집(agglomeration)되는 경향을 나타내고 있다.

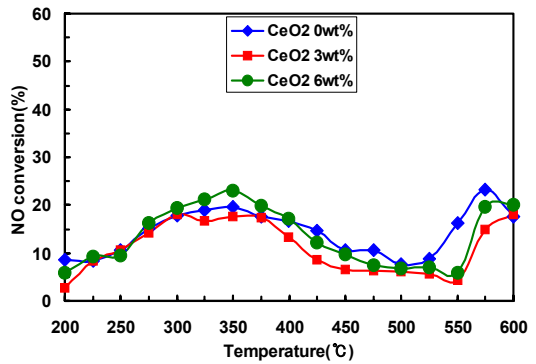
Fig. 2는 입자의 결정 형성과 응집 등을 보여주는 TEM(Transmission Electron Microscopy, JEM-2000FX) 이미지이다. TEM 이미지 상태에서는 구체적으로 CeO₂ 담지량이 증가함에 따라 촉매/조촉매의 구체적인 물리적인 특성은 파악되지 않으나, Table 1에서 볼 수 있듯이 BET(Brunauer, Emmett, Teller) 비표적은 CeO₂ 담지량이 증가할수록 감소하며 pore size는 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 촉매는 BET 비표면적 및 pore size에 대한 물리적인 특성보다는 화학적인 반응속도가 중요하다.

Fig. 3은 촉매전단의 온도를 정상상태 조건으로 설정한 후 실시한 de-CH₄, NO, CO 전환성능을 나타내고 있다. Fig. 3(a)의 de-CH₄ 성능은 촉매온도 375°C부터 CH₄가 저감되며 촉매활성화 온도도달시간 LOT(Light-Off Temperature)50는 500°C에서 이른다. Fresh NGOC의 CeO₂ 담지량에 따른 유해가스 저감 성능 차이는 거의 없지만 전체온도의 유해가스(CH₄, NO, CO)에 대한 평균 저감률은 40.5, 40.7 그리고 41.2%로써 CeO₂가 6wt%가 담지된 NGOC가 성능이 소폭 개선되었다.

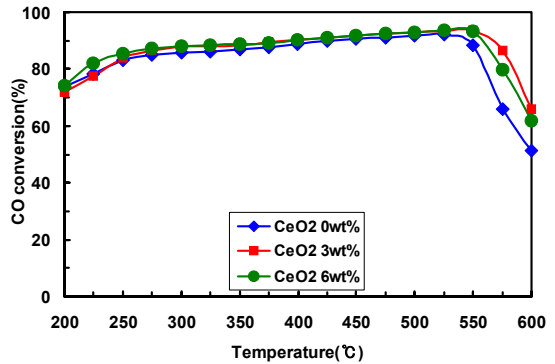
Table 2, 3, 4에서 볼 수 있듯이 조촉매 CeO₂ 6wt%가 담지된 1Pt-3Pd-1Rh-3MgO-6CeO₂/(Al50:Z50) NGOC는 귀금속 분산도가 제일 높다. 특히 CH₄에 대한 선택도(selectivity)가 큰 귀금속 Pd 분산도가 5.71%로 제일 높으며, CeO₂ 함량이 증가할수록 산소 간극 농도(oxygen vacancy concentration)가 커지므로 촉매의 활성이 커지기 때문이다. Fig. 3(b),(c)의 de-NO/CO의 경우와 마찬가지로 CeO₂ 6wt%가 담지된 NGOC가 촉매온도 전반적으로 유해가스 저감 성능이 소폭 향상되는 경향을 나타내고 있다.



(a) De-CH₄



(b) De-NO



(c) De-CO

Fig. 3. Conversion rate according to CeO₂ loading amount of Fresh NGOC

Fig. 4는 Fresh NGOC의 CeO₂ 담지량에 따른 SEM-EDX이다. CeO₂ 담지량이 증가할수록 상대적으로 지지체(support) 물질인 Al₂O₃와 SiO₂의 무게가 감소하고 있으며, 저중량으로 담지된 귀금속 Pt, Pd, Rh는 분석 오차범위 내에서 작은 무게 비율로 잘 분포되어있다.

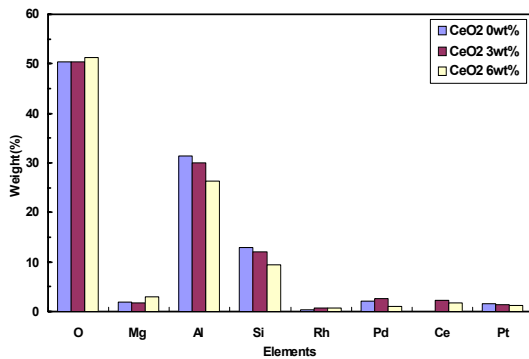


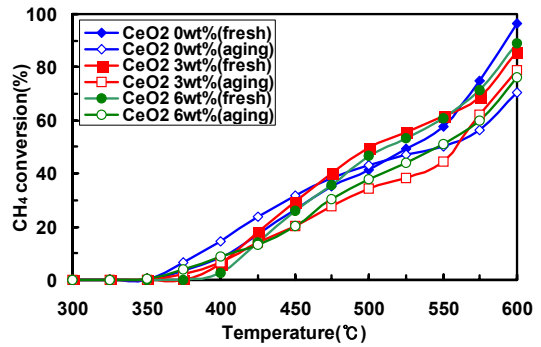
Fig. 4. SEM-EDX according to CeO₂ loading amount of Fresh NGOC

3.2 CeO₂ 담지량에 따른 열적 열화 영향

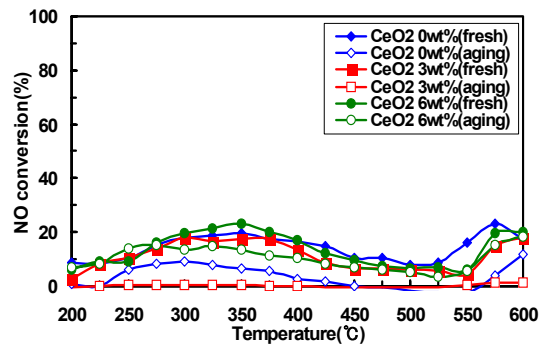
자동차용 촉매의 내구성을 저하시키는 가장 대표적인 요인으로는 고온의 배기온도와 수분에 장시간 노출되는 것을 꼽을 수 있다[11]. NGOC는 산화촉매로써 귀금속을 기반으로 귀금속 분산도 향상을 위하여 CeO₂가 담지되며 Al₂O₃의 비표면적 향상을 위하여 MgO 조촉매가 첨가된다. 또한 열적인 내구성 향상을 위하여 ZrO₂ 등 전이금속이 첨가되어 흡착의 세기조절과 고온 열화로 인하여 촉매 물질의 이동과 응집되는 거동을 방지하여 열적 내구성을 확보케 한다[12].

이 절에서는 CeO₂의 담지량이 열적인 내구성에 미치는 영향을 파악하기 3종의 NGOC를 공기분위기에서 700°C 12hr 열적으로 열화시켜 촉매온도에 따라 유해가스 저감성능을 나타내었다.

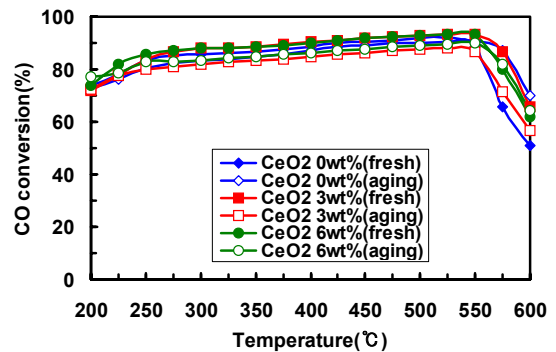
Fig. 5는 3종의 NGOC의 열적 열화에 따른 유해가스 전환율을 나타내고 있다. Fig. 5(a)의 de-CH₄ 성능은 희토류 CeO₂ 담지량이 없는 0wt%가 함유된 NGOC가 촉매온도 375°C에서 활성이 되어 550°C 고온으로 갈수록 열화에 따른 de-CH₄ 성능은 감소한다. 고온이 아닌 적당한(mild) 온도에서 촉매가 열적으로 열화될 경우에는 촉매의 흡착의 세기가 조절되어 촉매의 활성이 좋아질 수 있으며, Table 1에서 볼 수 있듯이 BET, pore size 등 물리적인 특성이 소폭 향상되었다. 반면에 CeO₂ 3wt%가 담지된 NGOC의 경우 열화에 따른 성능 저하가 큰 경향을 나타내고 있다. 촉매전단 전체온도에 대한 열적 열화로 인한 유해가스(CH₄, NO, CO) 평균 저감률은 45.94, 133.23 그리고 31.80%로 CeO₂ 6wt%가 담지된 NGOC가 열적 내구성이 크다. 또한 Table 2, 3, 4에서 볼 수 있듯이 700°C 12hr 열화된 NGOC의 경우 귀금속 분산도



(a) De-CH₄



(b) De-NO



(c) De-CO

Fig. 5. Conversion rate according to CeO₂ loading amount of 700°C 12hr thermal aging NGOC

와 pore size의 물리적인 값은 저하되지만 전반적으로 CeO₂ 6wt%의 NGOC는 물리적인 특성값도 양호하고 열적인 내구성 확보에 영향을 미친다고 할 수 있다.

Fig. 5(b)(c)의 de-NO/CO 성능은 CeO₂ 함량이 3, 0wt%의 담지된 NGOC의 성능 저하 폭이 크며, CeO₂의 담지량이 6wt%가 담지된 1Pt-3Pd-1Rh-3MgO-6CeO₂/

(A150:Z50) NGOC의 열적인 열화로 인한 성능 저하 폭이 가장 작고, 이는 열적인 열화로 인하여 귀금속의 이동, 응집(agglomeration) 및 소결(calcination)로 이어지는 과정을 CeO₂가 방지하는 역할을 담당했기 때문이다.

Fig. 6은 CeO₂ 담지량에 따른 열화된 NGOC의 SEM-EDX이며, Fresh NGOC에 비해 산소(O) 무게는 소폭 증가하였으며, Al은 CeO₂ 담지량 증가할수록 무게는 상대적으로 증가하였다. 이는 700°C 12hr 고온조건에서 Al₂O₃는 녹는점이 높아 열적으로 안정된 물질이지만 상대적으로 내구성이 낮은 zeolite(SiO₂+Al₂O₃)는 화합물 결정이 파괴되면서 zeolite의 결정체인 Al₂O₃가 떨어져 나와 Al이 응집됨에 따라 무게가 증가하였다고 판단한다.

Fig. 7은 CeO₂ 담지량에 따른 열적 열화된 3종의 NGOC의 SEM-EDX spectra를 나타내고 있다. SEM-EDX spectra는 각 원소에 대한 주피크와 보조피크가 동일한 위치에서 나와야만 분석의 신뢰성이 확보된다. 열적 열화로 인하여내구성능이 가장 저하되지 않은 CeO₂ 6wt% NGOC의 스펙트럼의 특징은 Fig. 6에서 분석한 내용처럼 Al 주피크가 크게 상승하는 것을 확인할 수 있으며 다른 촉매와 조촉매 물질들의 피크는 소폭 저하되는 것을 확인할 수 있다. 전반적인 경향을 볼 때 6wt% CeO₂가 담지된 NGOC는 귀금속의 분산도 저하를 막는 효과와 CeO₂의 열적인 내구성으로 인하여 유해가스 저감 성능이 가장 높다.

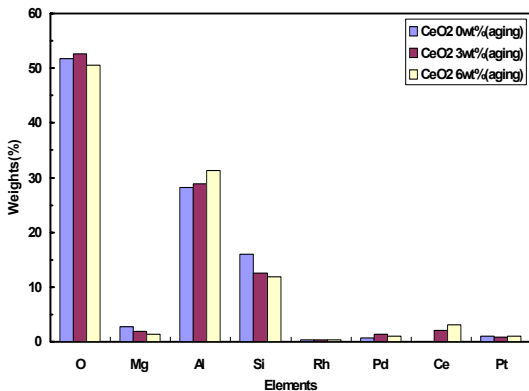
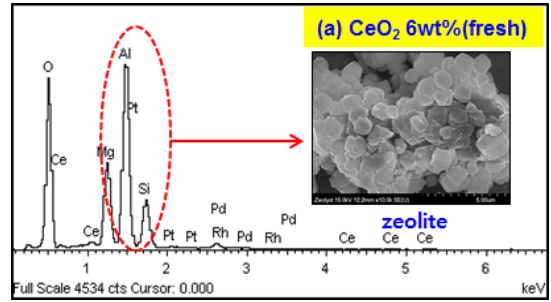
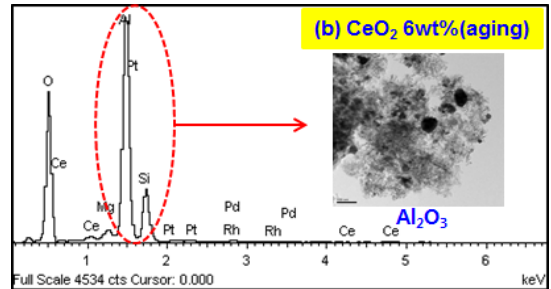


Fig. 6. SEM-EDX according to CeO₂ loading amount of 700°C 12hr thermal aging NGOC



(a) Fresh



(b) 700°C 12hr thermal aging

Fig. 7. SEM-EDX Spectra on thermal aging of CeO₂ 6wt% loading amount NGOC

4. 결론

CNG 버스에서 배출되는 CH₄와 NO_x 저감 능력 향상을 위하여 조촉매 CeO₂ 담지량에 따라 영향을 파악하였으며 결과는 아래와 같다.

- 1) 6wt% CeO₂가 담지된 Fresh NGOC는 CH₄에 대한 선택도가 큰 Pd 분산도가 5.71%로 제일 높았고 유해가스 저감 성능도 향상되었다.
- 2) 700°C 12hr 고온조건에서 내구성이 낮은 지지체 zeolite(SiO₂+Al₂O₃)는 화합물 결정이 파괴되면서 zeolite의 결정체인 Al₂O₃가 떨어져 나와 응집되었다.
- 3) 6wt% CeO₂가 담지된 NGOC는 귀금속의 분산도 저하를 막는 효과와 CeO₂의 열적인 내구성으로 인하여 유해가스 저감 성능이 가장 높았다.

References

[1] 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/kscst.2012.18.1.095>

- [2] C. K. Seo, “Research on Improvement of CH₄ Reduction Performance of NGOC for Bus”, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, vol. 18, no. 5, pp. 708-715, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.5.708>
- [3] W. Q. Chun, L. Z. Peng, A. S. Gil, W. R. Fen, “Effect of CeO₂-ZrO₂ on Pt/C Electrocatalysts for Alcohol Oxidation”, *Journal of Rare Earths*, vol. 34, no. 3, pp. 276, 2016.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(16\)60025-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(16)60025-X)
- [4] W. B. Wei, M. D. Jun, W. W. Han, L. Z. Hua, M. X. Bin, “Effect of Citric Acid Addition on MoO₃/CeO₂-Al₂O₃ Catalyst for Sulfur-resistant Methanation”, *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, vol. 44, no. 12, pp. 1479-1484, 2016.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(17\)30003-8](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(17)30003-8)
- [5] K. H. Kim, J. W. Han, “Mechanistic Study for Enhanced CO Oxidation Activity on (Mn, Fe)”, *Catalysis Today*, vol. 293, no. 11, pp. 82-88, 2016.
- [6] Z. J. Lv, Q. Zhong, M. Ou, “Utilizing Peroxide as Precursor for the Synthesis of CeO₂/ZnO Composite Oxide with Enhanced Photocatalytic Activity”, *Applied Surface Science*, vol. 376, no. 1, pp. 91-96, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.01.280>
- [7] G. V. Mamontov, M. V. Grabchenko, V. I. Sobolev, V. I. Zaikovskii, O. V. Vodyakina, “Ethanol Dehydrogenation over Ag-CeO₂/SiO₂ Catalyst: Role of Ag-CeO₂ Interface”, *Applied Catalysis A: General*, vol. 528, no. 10, pp. 161-167, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2016.10.005>
- [8] S. A. Hammdi, M. H. Highi, M. Maleki, “Sequential Impregnation vs. Sol-Gel Synthesized Ni/Al₂O₃-CeO₂ Nanocatalyst for Dry Reforming of Methane: Effect of Synthesis Method and Support Promotion”, *Molecular Catalysis*, vol. 431, no. 1, pp. 39-48, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2017.01.012>
- [9] P. R. Reddy, N. Jayarambabu, A. K. Somasai, V. Rao, Y. Aparna, “Structural and Morphological Studies of ZnO-CeO₂ Nanocomposites”, *Materials Today*, vol. 3, no. 8, pp. 4146-4150, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.11.088>
- [10] Y. L. Lopez, G. G. Rosales, J. J. Becerril, “Synthesis and Characteristics of Carbon-TiO₂-CeO₂ Composites and their Application in Phenol Degradation”, *Journal of Rare Earths*, vol. 35, no. 6, pp. 551-558, 2017.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(17\)60947-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(17)60947-5)
- [11] 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. 69, 2012.
- [12] 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. 98, 2012.

서충길(Choong-Ki Seo)

[정회원]



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

<관심분야>

연소공학, 배기후처리공학, 신재생에너지