

저온 H₂-SCR용 PtNi/W-TiO₂ 촉매에 조촉매 CeO₂가 NO_x 저감에 미치는 영향김정수^{1,2}, 김영희^{1*}¹호서대학교 벤처대학원 융합공학과
06724 서울시 서초구 남부순환로 2497²(주)일신종합환경
13569 경기도 성남시 분당구 방아로 16번길 11

(2023년 12월 5일 접수; 2023년 12월 14일 수정본 접수; 2023년 12월 14일 채택)

Effect of Co-catalyst CeO₂ on NO_x Reduction in PtNi/W-TiO₂ Catalysts for Low-temperature H₂-SCRJungsoo Kim^{1,2} and Younghee Kim^{1*}¹Department of Convergence Engineering, Graduate School of Venture Hoseo University
2497 Nambusoohwan-ro, Seocho-gu, Seoul 06724, Republic of Korea²ILSHIN Environmental Engineering Co., Ltd.
11 Banga-ro, 16 beon-gil, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13569, Republic of Korea

(Received for review December 5, 2023; Revision received December 14, 2023; Accepted December 14, 2023)

요 약

대표적인 비암모니아성 선택적 촉매환원반응기인 H₂-SCR의 활용성을 높이기 위하여 Ce를 조촉매로 활용한 PtNi/CeO₂-W-TiO₂의 촉매 분말을 합성하고 다공성 금속 구조(porous metal structure, PMS)에 코팅하여 선택적 촉매 환원에 의한 NO_x 제거 특성을 평가하였다. CeO₂를 조촉매로 사용한 H₂-SCR은 CeO₂를 사용하지 않은 경우에 비해 더 높은 NO_x 제거 효율을 나타내었으며, CeO₂ 담지율 10 wt%에서는 반응온도 90°C에서 가장 높은 제거효율을 보였다. 한편, 촉매구조체인 PMS의 촉매 코팅량이 증가함에 따라 NO_x 제거효율은 90°C 이하에서는 향상되었으나, 120°C 이상에서는 감소하는 경향을 보였고 공간속도를 4,000 h⁻¹에서 20,000 h⁻¹로 변경한 경우, 120°C이상의 온도에서 NO_x 제거 효율이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

주제어 : 금속구조체, 선택적 촉매반응, 수소, 산소저항성, 세리아

Abstract : In order to increase the usability of H₂-SCR, the NO_x removal characteristics with catalyst powder of PtNi/CeO₂-W-TiO₂ using Ce as a co-catalyst was synthesized and coated on a porous metal structure (PMS) were evaluated. Catalyst powder of PtNi/CeO₂-W-TiO₂(PtNi nanoparticles onto W-TiO₂, with the incorporation of ceria (CeO₂) as a co-catalysts) was synthesized and coated onto a porous metal structure (PMS) to produce a Selective Catalytic Reduction (SCR) catalyst. H₂-SCR with CeO₂ as a co-catalyst exhibited higher NO_x removal efficiency compared to H₂-SCR without CeO₂. Particularly, at a 10wt% CeO₂ loading ratio, the NO_x removal efficiency was highest at 90°C. As the amount of catalyst coating on PMS increased, the NO_x removal efficiency was improved below 90°C, but it was decreased above 120°C. When the space velocity was changed from 4,000 h⁻¹ to 20,000 h⁻¹, the NO_x removal efficiency improved at temperatures above 120°C. It was expected that the use of the catalyst could be reduced by applying the PMS with excellent specific surface area as a support.

Keywords : Porous metal structure, SCR, Hydrogen, Oxygen resistance, Ceria

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: yhkim514@hoseo.edu; Tel: +82-2-2059-2354; Fax: +82-2-707-5770

doi: 10.7464/ksct.2023.29.4.313 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

기후 영향을 완화하기 위한 환경적 노력에 대한 전 세계적인 높은 요구가 온실가스 저감을 위한 기업의 책임을 강조하고 있으며 우리나라를 포함한 여러 나라에서 NET Zero Emission 등의 정책으로 인해 극도로 강화된 배출 규제는 고효율 대기오염 방지 기술에 대한 수요를 증가시키고 있다.

질소산화물(NOx)은 온실가스이자 미세먼지의 전구체인 대표적인 대기오염물질로서 이를 제거하기 위해서는 암모니아(NH₃)를 환원제로 사용하는 선택적 촉매환원(selective catalyst reduction, SCR)장치가 주로 사용된다. 그러나 NH₃-SCR 시스템은 미반응 암모니아(NH₃)를 방출할 가능성이 있으며, 이는 질소산화물이나 황산화물과 반응하여 미세먼지와 황산암모늄과 같은 부식성 물질을 형성하는 단점이 있으며, 특히 제거 효율을 높이기 위해 암모니아 주입량이 증가할 경우, 미반응 암모니아 배출로 인한 2차오염의 문제점을 가지고 있다. NH₃-SCR 시스템은 NOx 제거 촉매를 활성화하기 위해 최소 300°C의 온도가 필요하기 때문에 배출된 연소가스로부터 열회수를 제한하기도 한다. 더구나 산업용 소각로의 배기가스 온도는 보통 80~150°C로 낮아 NH₃-SCR 시스템을 적용하려면 온도를 높여야 하므로 설치 및 운영비용이 증가하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 150°C에서 작동하는 NH₃-SCR이 보고되기도 하였으나, 여전히 요구되는 반응온도가 높고[1] 미반응 암모니아 문제를 해결하지 못하였다.

이러한 문제해결을 위하여 수소(H₂)를 환원제로 사용하는 SCR 시스템이 대안으로써 많이 연구되고 있다[2-5]. H₂-SCR은 100°C 부근에서 NOx 환원에 탁월한 촉매 활성을 갖는 장점이 있으며, 저온 조건에서 2차 오염물질 배출이 없어 백금(Pt), 팔라듐(Pd) 등 귀금속의 촉매를 기반으로 광범위하게 연구가 진행되고 있다. Pt를 적용한 H₂-SCR은 100°C 이하의 온도에서 우수한 NOx 제거 효율을 보이고 있으며[6-16], 150°C의 온도에서 Pd를 사용하는 경우 내구성이 증가하였다는 보고가 있다[17-21]. 촉매로 사용되는 귀금속의 촉매 활성은 Pt > Pd-Ru > Pd > Ru > Au의 순서로 보고되고 있으며, Pt-Ni 합금(Pt:Ni = 65:35)이 저온에서 가장 우수한 NOx 제거 촉매 활성을 나타내기도 하였다[22].

H₂-SCR의 촉매 활성을 향상시키기 위한 다양한 조촉매 연구도 보고되었으며, 특히 WO₃와 Ce를 조촉매로 활용하면 NOx 제거효율이 증가한다는 연구결과도 있다[23-27]. 그러나 H₂-SCR

과 WO₃의 반응으로 인해 NOx 제거효율이 충분하지 않아 상용화에는 여전히 어려움이 남아있다. 본 연구에서는 H₂-SCR의 실제 구현을 방해하는 것으로 알려진 산소(O₂)로 인하여 환원제인 H₂소모에 의한 효율저하를 해결하기 위해 W와 CeO₂를 조촉매로 하는 PtNi 촉매를 이용하여 다양한 조건에서 NOx 제거효율을 평가함으로써 H₂-SCR의 활용도를 높이고자 한다.

2. 연구방법

2.1 촉매 합성

PtNi/CeO₂-W-TiO₂ 분말을 합성하기 위해 증류수 150 mL에 H₂PtCl₆·H₂O(Sigma-Aldrich) 0.08 mM을 첨가하고 상온에서 약 30분간 교반하였다. Ni(acac)₂ (Sigma-Aldrich) 0.04 mM을 첨가하고 상온에서 약 30분간 교반 후 0.1 M NaOH를 첨가하여 pH 7로 조절한 후 상온에서 약 24시간 동안 교반하였다. CeO₂-W-TiO₂를 제조하기 위해 W-TiO₂(Umicore, DT-52) 1,850 mg과 CeO₂(sigma-Aldrich) 185 mg을 증류수 100 mL에 첨가하고 1시간 동안 초음파로 분산시켰다. 촉매(PtNi)와 지지체(CeO₂-W-TiO)의 비율은 1 wt%(촉매(mg)/지지체(mg))로 조정하였으며 0.2 mM의 NaBH₄를 첨가하였다. 여과된 분말을 증류수와 에탄올로 세척하고 건조하였다. 조촉매 CeO₂는 전체 촉매분말의 중량비를 10 wt%, 20 wt%, 30 wt%로 조절하여 제조하였다. 제조된 시료의 조성과 표면적은 Table 1과 같다. 표면적은 Surface Area & Pore size analyzer(BET, Autosorb IQ, Quantachrome)를 이용하여 분석하였다.

2.2 촉매 코팅

촉매는 다공성 금속 구조체(porous metal structure, PMS, N12Y30-NiFeCrAl, Alantum Co., Ltd., 한국) 위에 코팅하였다. 150 mg의 촉매 분말을 10 mL의 증류수에 첨가하여 분산시키고 점성 촉매 잉크를 제조하기 위해 Ludox AS40 콜로이드 실리카(Sigma-Aldrich) 15 mL와 PEO(Sigma-Aldrich) 400 mg을 사용하였다. PMS를 코팅하고 상온에서 2시간 동안 건조한 후 500°C에서 3시간 동안 소결하였다. PMS에 코팅된 촉매의 총량은 반복적인 코팅과정을 통해 조절하였다.

2.3 실험방법

실험장비는 Figure 1과 같이 촉매 코팅된 PMS를 유동 반응기의 테스트 프레임에 장착하고 유량과 온도제어가 가능하도록

Table 1. Component and surface area of prepared SCR samples

LIST	Component (wt%)					Surface Area (m ² /g)
	Pt	Ni	CeO ₂	W	TiO ₂	
W-TiO ₂	0.9	0.1		10	90	57.94
PtNi/W-TiO ₂	0.9	0.1		9.9	89.1	84.36
PtNi/CeO ₂ -W-TiO ₂ (CeO ₂ 10 wt%)	0.9	0.1	10	8.9	80.1	88.65
PtNi/CeO ₂ -W-TiO ₂ (CeO ₂ 20 wt%)	0.9	0.1	20	7.9	71.1	65.64
PtNi/CeO ₂ -W-TiO ₂ (CeO ₂ 30 wt%)	0.9	0.1	30	6.9	62.1	51.96

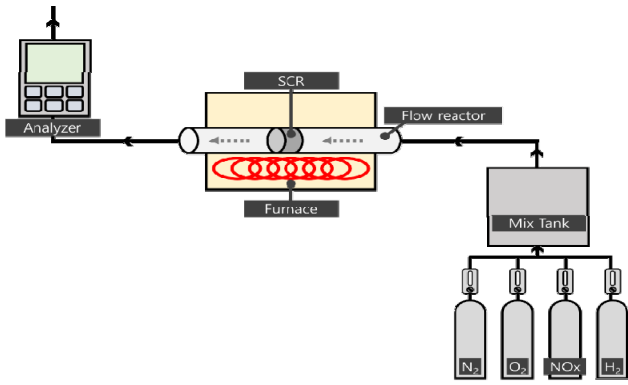


Figure 1. Schematic diagram of H₂-SCR analysis system.

를 설계하였으며 N₂(99.999%), NOx(5,000 ppm, N₂ 밸런스), O₂ (10%, N₂ 밸런스), H₂(5%, N₂ 밸런스)의 고압가스를 이용하여 질량유량조절기(mass flow controller, MFC)에 의해 유입농도를 조절하였다. 공간속도를 4,000 h⁻¹과 20,000 h⁻¹로 유지하기

위해 가스유량을 1.8 Lmin⁻¹과 7.2 Lmin⁻¹으로 결정하였다. 유입 가스 내 NOx 농도는 50~300 ppm으로 조절하였고 NOx 제거효율은 온도 60~210°C, 산소농도 0~10%에서 평가하였다. NOx 농도는 가스분석기(모델명: MK6000+)를 이용하여 측정 및 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 촉매 특성

촉매 시료의 형태학적 특성은 TEM, XRD, SEM을 이용하여 분석하였다. Figure 2에 나타난 바와 같이, W-TiO₂ 입자는 일치된 불규칙 다각형 고체를 보였으며, PtNi를 첨가 후 W-TiO₂ 입자 표면에 고르게 분산된 것을 확인하였다. PtNi/CeO₂-W-TiO₂ 촉매분말에는 10 nm 미만의 PtNi 입자와 약 25 nm 크기의 정사각형 모양의 CeO₂ 결정이 W-TiO₂ 지지체에 고르게 분산되어 있음이 확인되었다.

Figure 3에서 TiO₂의 XRD 패턴을 통해 TiO₂의 구조가 정방

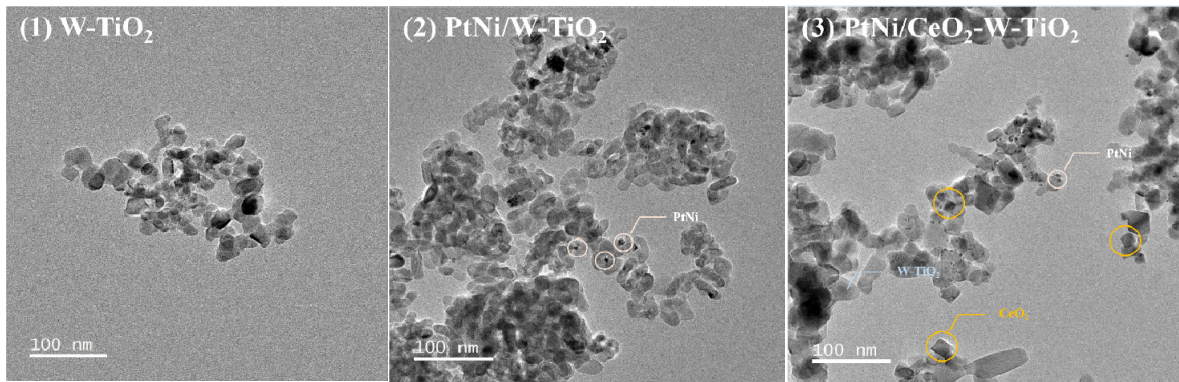


Figure 2. TEM images of catalyst samples.

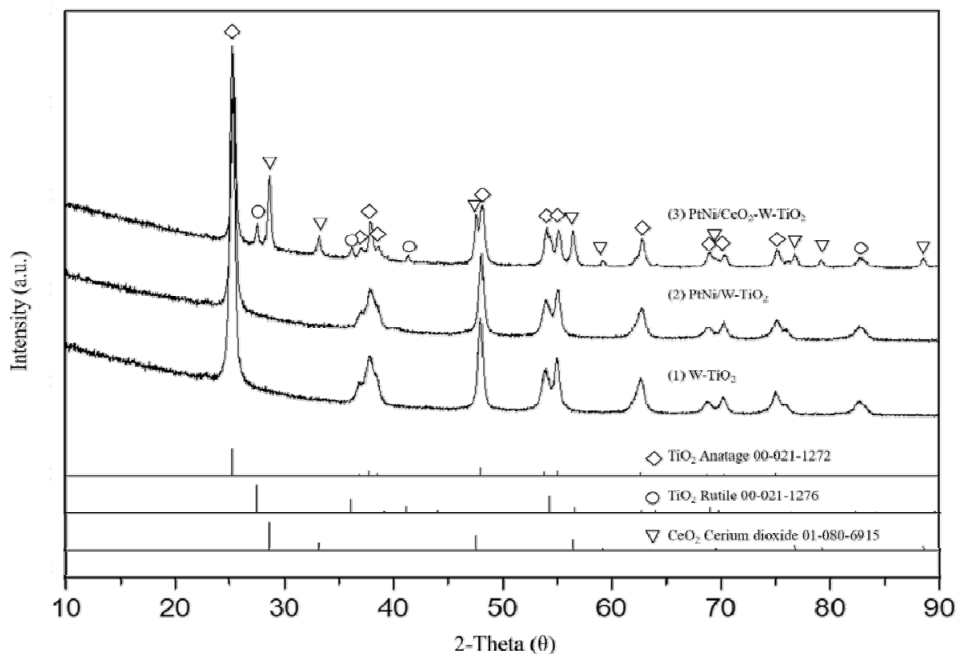


Figure 3. XRD patterns and peaks of catalyst powder used in this study.

형계 결정구조를 갖는 아나타제임을 확인하였다. 그러나 W 또는 WO₃에 대한 XRD 패턴은 관찰되지 않았으며, 이는 W/WO₃가 TiO₂ 구조 및 PtNi/W-TiO₂ 내에 도핑되어 있기 때문인 것으로 추정된다. 촉매 코팅 후와 비교하여 피크 이동이 관찰되지 않았으며, 이는 비정질 PtNi가 형성되었음을 나타내며 CeO₂를 포함한 촉매인 PtNi/CeO₂-W-TiO₂의 XRD 분석에서 입방체 CeO₂뿐만 아니라 TiO₂의 아나타제와 루틸도 포함되어 있는 것으로 나타났다.

PMS에 분체 코팅량은 PtNi/CeO₂-W-TiO₂ 분말의 2 mgL⁻¹, 4 mgL⁻¹, 40 mgL⁻¹이었다. Figure 4에서 SEM-EDS 분석을 이용한 분말 코팅의 정성적 평가에서는 구형 PtNi/CeO₂-W-TiO₂ 입자가 2 mgL⁻¹ 및 4 mgL⁻¹ 코팅된 PMS 표면에 고르게 분포되어 코

팅된 것으로 나타났으며, 이는 비표면적 증가로 인해 DeNOx 효율이 향상에 기여할 것으로 판단된다. 그러나 40 mgL⁻¹ 코팅에서는 Figure 4(3)과 같이 PMS 표면에 촉매막이 형성되어 오히려 NOx 제거에 부정적인 영향을 미칠 것으로 보인다. Pt는 코팅된 PMS 전반에 걸쳐 고르게 도포된 것이 확인되었다.

3.2 조촉매(CeO₂) 효과

산소는 H₂-SCR에서 NOx 전환을 감소시키는 주요 영향인자이다. Ce는 산소가 존재할 때 산소의 흡착과 탈리특성을 개선하기 위한 조촉매로 연구되어 왔다[26]. NOx 변환에 대한 CeO₂의 영향을 조사하기 위해 촉매에 CeO₂ 조촉매를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대하여 NOx 제거효율은 평가한

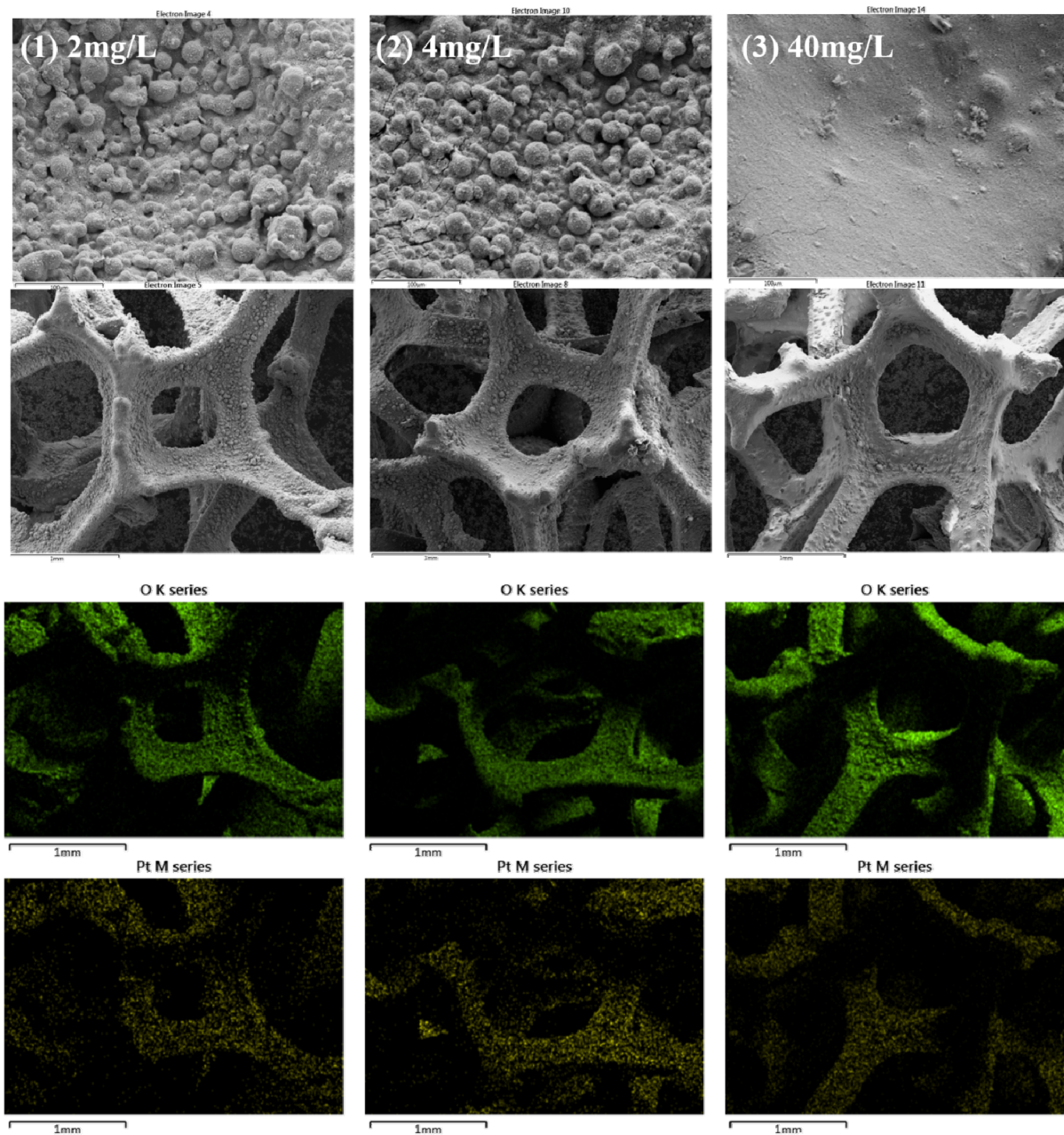


Figure 4. SEM-EDX images of coated PMS with PtNi/CeO₂-W-TiO₂.

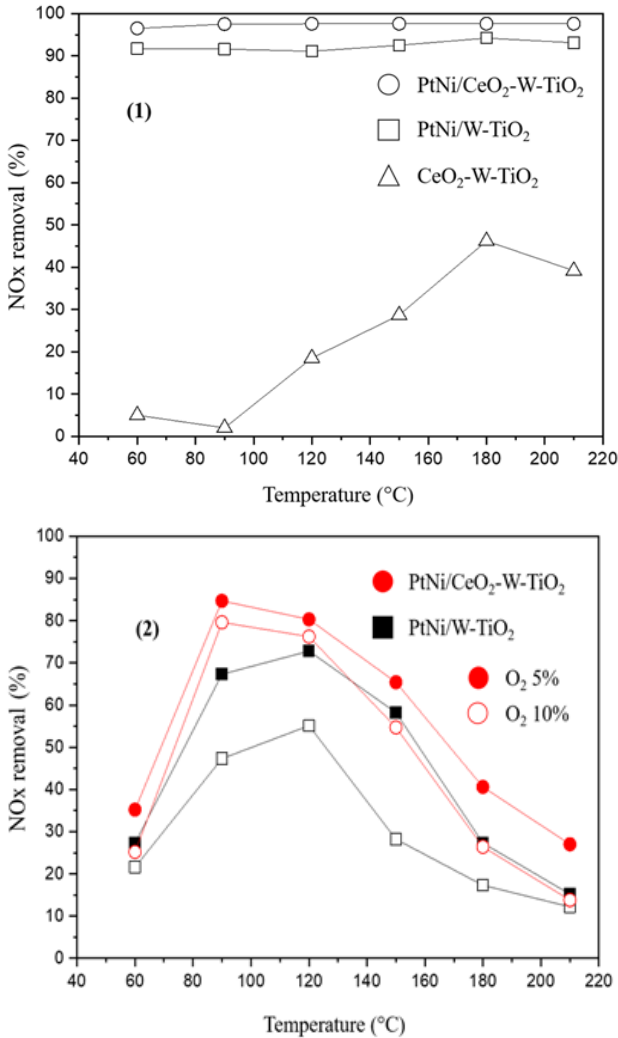


Figure 5. NO_x removal performance of catalysts at test condition of SV : 4,000 h⁻¹, NO_x : 200 ppm, H₂ : 2,000 ppm.

결과는 Figure 5와 같다.

NO_x 전환은 0%, 5%, 10%의 다양한 O₂ 농도 하에서 4,000 h⁻¹의 공간 속도에서 평가하였다. Figure 5(1)에서 볼 수 있듯이 O₂ 농도 0%에서는 60~210°C 온도 범위에서 일관되게 90% 이상의 전환율을 보이는 등 차이가 관찰되지 않았다. PtNi/CeO₂-W-TiO₂의 NO_x 전환율은 PtNi/W-TiO₂에 비해 약 5% 더 높았다. PtNi 촉매가 없는 CeO₂-W-TiO₂의 NO_x 전환율은 <100°C 온도 범위에서 10% 이하로 매우 낮았다. Figure 5(2)에서 O₂ 농도가 5%일 때 PtNi/W-TiO₂의 최대 NO_x 전환율은 120°C에서 72.8%였으며 PtNi/CeO₂-W-TiO₂의 최대 NO_x 전환율은 90°C에서 84.7%였다. O₂ 농도가 10%일 때 PtNi/W-TiO₂의 최대 NO_x 전환율은 120°C에서 55.1%였으며 PtNi/CeO₂-W-TiO₂의 NO_x 전환율은 90°C에서 79.6%, 120°C에서 76.2%로 나타났다. O₂ 농도가 10%일 때 CeO₂가 포함되지 않은 PtNi/W-TiO₂의 NO_x 제거율은 O₂ 농도가 5%일 때에 비하여 90°C에서 약 20% 감소하였으며 120°C에서 약 17.7% 감소하였다. 이에 비하여 O₂ 농도가 10%일 때 PtNi/CeO₂-W-TiO₂의 NO_x 전환율은 O₂ 농도가 5%일 때의 평가 결과와 비교하여 90°C에서 약 5.1%,

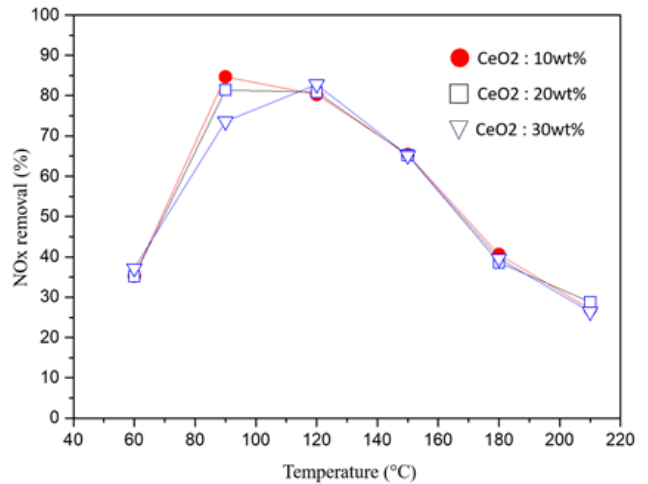


Figure 6. NO_x removal performance of SCR with CeO₂ at test condition of SV : 4,000 h⁻¹, O₂ 5%, NO : 200 ppm, H₂ : 2,000 ppm.

120°C에서 4.1% 감소하였으며 CeO₂를 조촉매로 첨가한 경우 O₂ 농도가 증가할수록 NO_x 전환율이 감소하는 것을 방지하는 효과가 있음을 확인하였다.

120°C 이상의 온도에서는 온도가 높을수록 전환율이 낮아지기 시작해 150°C 이상의 온도에서 NO_x 전환율이 급격히 감소하는 것은 해당 온도에서 H₂와 O₂의 반응 속도가 향상되어 경쟁적으로 이러한 현상이 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 전반적으로 CeO₂는 산소에 대한 저항성을 증가시켰으며, 이는 이전 연구에서 Ce가 없는 경우보다 Ce를 첨가한 경우 NO_x 전환율이 더 높다는 결과와 유사하였다.

CeO₂ 첨가가 H₂-SCR 활성에 미치는 영향은 O₂ 농도 5%에서 CeO₂ 첨가 비율을 10 wt%, 20 wt%, 30 wt%로 변화시켜 조사하였다. 90°C에서는 CeO₂ 탑재율이 10 wt%일 때 NO_x 전환율이 84.7%에 달해 가장 높은 성능을 보였다. 70% 이상의 NO_x 전환율을 나타내는 90~120°C 사이의 촉매 활성화 온도는 Ni_{1-x}Ce_xCo_{1.95}Pd_{0.05}O₄를 사용한 이전 연구보다 낮은 온도였다 [30]. CeO₂ 첨가율이 20 wt%와 30 wt%로 증가함에 따라 NO_x 전환효율은 각각 81.4%와 73.6%로 약간 감소하였다. Figure 6에서 120~210°C의 온도 범위에서 NO_x 전환은 CeO₂ 로딩에 관계없이 비슷한 성능을 나타냈다.

3.3 촉매 코팅량이 PMS에 미치는 영향

촉매 코팅량이 NO_x 제거에 미치는 영향을 분석하기 위하여 PMS에 PtNi/CeO₂-W-TiO₂ 코팅량을 다르게 하여 평가하였다 (Figure 7). 공간속도(SV) 4,000 h⁻¹ 및 60°C에서 NO_x 전환율은 촉매량에 따라 증가하여 2 mgL⁻¹에서 35.2%, 4 mgL⁻¹에서 55.2%, 40 mgL⁻¹에서 96.5%를 나타내 촉매 코팅량이 많을수록 높은 효율을 보였다. 그러나 90°C에서는 NO_x 전환효율이 84.7%(2 mgL⁻¹), 88.3%(4 mgL⁻¹), 75%(40 mgL⁻¹)로 촉매 코팅량에 따른 큰 차이를 보이지 않았으며, 120°C에서는 80.3%(2 mgL⁻¹), 80%(4 mgL⁻¹), 65.1%(40 mgL⁻¹)로 나타나 오히려 촉매 코팅량이 적을수록 효율이 더 높은 것으로 나타났다. 150°C, 180°C, 210°C

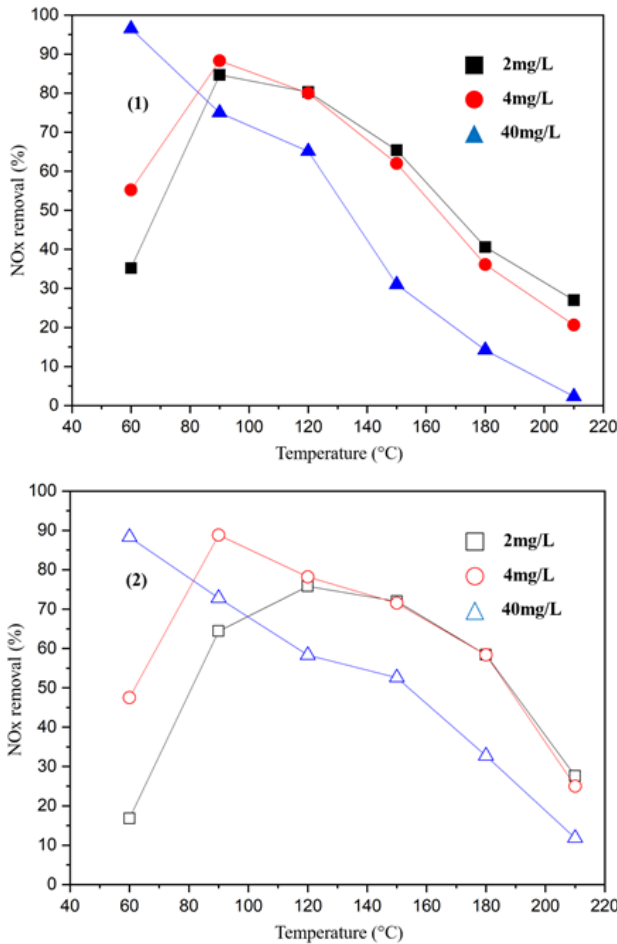


Figure 7. NOx removal performance of SCR (CeO₂: 10wt%) with different coating amount; (1) SV 4,000 h⁻¹ and (2) SV 20,000 h⁻¹, (O₂: 5%, NO: 200 ppm, H₂: 2,000 ppm).

의 더 높은 온도에서는 2 mgL⁻¹의 촉매로 코팅된 SCR이 가장 높은 NOx 전환율을 나타내어 촉매 코팅량이 반응온도에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. PtNi 촉매는 산소환원반응(ORR)의 촉매로 흔히 사용되는 것으로 보고되고 있다[28-29]. PtNi의 실질적인 존재는 120°C 이상의 온도에서 ORR을 향상시키는 것으로 알려져 있으며, 이는 결과적으로 H₂와 O₂ 사이의 반응을 촉진하여 NOx 전환을 감소시킨 것으로 보인다.

공간속도가 증가함에 따라 2 mgL⁻¹, 4 mgL⁻¹, 40 mgL⁻¹ 촉매 모두에서 NOx 전환율이 감소하는 것이 관찰되었다(Figure 7(2)). 그러나 4 mgL⁻¹로 코팅된 SCR은 촉매는 최대 120°C까지 4,000 h⁻¹의 공간 속도와 유사한 NOx 전환을 유지했다. 특히, 120°C보다 높은 온도에서는 공간 속도 20,000 h⁻¹에서 NOx 전환이 동일한 온도에서 4,000 h⁻¹보다 우수한 것으로 나타났다.

3.4 유입 NOx 농도의 영향

유입 NOx 농도가 50 ppm일 때, 70~110°C 온도 범위에서 NOx 전환율이 75% 이상이었고 입구 NOx 농도가 200 ppm일 때 80~130°C 온도 범위에서 NOx 전환율이 75% 이상이었다(Figure 8). 또한, 유입 NOx 농도가 300 ppm인 경우 90~150°C

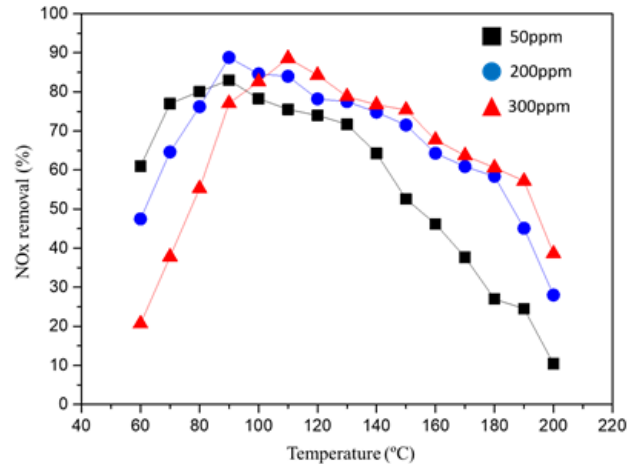


Figure 8. NOx removal performance by inlet NO concentration of prepared SCR (CeO₂: 10wt%, SV: 20,000 h⁻¹, O₂: 5%).

온도 범위에서 NOx 전환율이 75% 이상인 것으로 나타났다. 유입구 NOx 농도가 증가할수록 더 넓은 온도 범위에서 NOx 전환율이 높아지는 것으로 나타났다.

4. 결 론

H₂-SCR용 PtNi/CeO₂-W-TiO₂ 촉매를 PMS에 적용하여 다양한 운전 조건에 따른 NOx 전환율 측면에서 평가하였다.

첫째, 촉매분말의 구조는 W-TiO₂ 지지체 위에 10 nm 미만의 PtNi 입자와 25 nm의 CeO₂ 입자가 잘 분포되어 있으며, PMS 표면에는 촉매분말이 잘 분산되어 있는 것으로 나타났다. 그러나, 촉매의 양이 많을수록 코팅층이 응집되어 필름같은 형상이 더 많이 나타나 NOx 제거효율에는 부정적인 영향을 미쳤다. 코팅량 2~4 mgL⁻¹에서는 표면이 구형 입자의 특성을 보여 반응 활성에 영향을 미치는 비표면적이 더 크게 나타났다.

둘째, CeO₂ 조촉매를 사용한 H₂-SCR에서 NOx 제거성능이 향상되었으며, CeO₂ 농도 10%에서 가장 좋은 효율을 보였다. PtNi/CeO₂-W-TiO₂ 촉매의 반응온도는 90~120°C로 확인되었으며, NOx농도 50~300 ppm에서 75% 이상의 제거효율을 보였다. 따라서 PtNi/CeO₂-W-TiO₂ 촉매는 H₂-SCR용으로 저온 영역에서 사용이 가능하며, 특히 CeO₂는 NO의 저감에 부정적으로 작용하는 산소의 영향을 줄이는 데 효과적임을 확인할 수 있었다.

사 사

본 연구는 중소기업벤처부의 그린벤처사업에서 지원받은 연구비(No. S3023447)로 수행되었습니다.

References

- Damma, D., Ettireddy, P. R., Reddy, B. M., and Smirniotis, P. G., "A Review of Low Temperature NH₃-SCR for Removal NOx," *Catalysts*, **9**(4), 349 (2019).

2. Costa, C. N. and Efstathiou, A. M., "Low-temperature H₂-SCR of NO a Novel Pt/MgO-CeO₂ Catalyst," *Appl. Catal. B: Environ.*, **72**, 240-252 (2007).
3. Costa, C. N., Savva, P. G., Fierro, J. G., and Efstathiou, A. M., "Industrial H₂-SCR of NO on a Novel Pt/MgO-CeO₂ Catalyst," *Appl. Catal. B: Environ.*, **75**, 147-156 (2007).
4. Shibata, J., Hashimoto, M., Shimizu, K., Hattori, H. T., and Satsuma, A., "Factors Controlling Activity and Selectivity for SCR of NO by Hydrogen over Supported Platinum Catalysts," *J. Phys. Chem. B*, **108**(47), 18327-18335 (2004).
5. Kim, S. and Hong, S., "Relationship between the Surface Characteristics of Pt Catalyst and Catalytic Performance on the H₂ SCR," *J. Ind. Eng. Chem.*, **16**, 992-996 (2010).
6. Cao, L., Wang, Q., and Yang, J., "Ultrafine Pt Particles Directed by Polyvinylpyrrolidone on Zeolite Beta as an Efficient Low-temperature H₂-SCR Catalyst," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8**, 103631 (2020).
7. Liu, Y., Tursun, M., Yu, H., and Wang, X., "Surface Property and Activity of Pt/Nb₂O₅-ZrO₂ for Selective Catalytic Reduction of NO by H₂," *Molecular Catalysis*, **464**, 22-28 (2019).
8. Wang, Xi., Wang, Xu., Yu, H., and Wang, X., "The Functions of Pt Located at Different Positions of HZSM-5 in H₂-SCR," *Chem. Eng. J.*, **355**, 470-477 (2019).
9. Hong, Z., Sun, X., Wang, Z., Zhao, G., Li, X., and Zhu, Z., "Pt/SSZ-13 as an Efficient Catalyst for the Selective Catalytic Reduction of NO_x with H₂," *Catal. Sci. Technol.*, **9**, 3994-4001 (2019).
10. Xue, Y., Sun, W., Wang, Q., Cao, L., and Yang, J., "Sparsely Loaded Pt/MIL-96(Al) MOFs Catalyst with Enhanced Activity for H₂-SCR in a Gas Diffusion Reactor under 80°C," *Chem. Eng. J.*, **335**, 612-620 (2018).
11. Tu, B., Shi, N., Sun, W., Cao, L., and Yang, J., "SO₂-tolerant and H₂O-promoting Pt/C Catalysts for Efficient NO Removal via Fixed-bed H₂-SCR," *Environ Sci. Pollut. Res.*, **24**, 676-684 (2017).
12. Sun, W., Qiao, K., Liu, J., Cao, L., Gong, X., and Yang, J., "Pt-Doped NiFe₂O₄ Spinel as a Highly Efficient Catalyst for H₂ Selective Catalytic Reduction of NO at Room Temperature," *ACS Comb. Sci.*, **18**, 195-202 (2016).
13. Gao, S., Wang, X., Li, M., Wang, X., Li, J., and Feng, J., "Nanofibrous SUZ-4 Loading Pt Used for Selective Catalytic Reduction of NO_x by Hydrogen," *Microporous and Mesoporous Materials*, **183**, 185-191 (2014).
14. Mihet, M., Lazar, M. D., Borodi, G., and Almasan, V., "Effect of Pt Promotion on Ni/Al₂O₃ for the Selective Catalytic Reduction of NO with Hydrogen," *AIP Conf. Proc.*, **1565**, 126-132 (2013).
15. Park, S., Kim, M., Kim, E., Han, H., and Seo, G., "H₂-SCR of NO on Pt-MnO_x Catalyst : Reaction path via NH₃ Formation," *Applied Catalyst A : General*, **395**, 120-128 (2011).
16. Wu, P., Li, L., Yu, Q., Wu, G., and Guan, N., "Study on Pt/Al-MCM-41 for NO Selective Reduction by Hydrogen," *Catal. Today*, **158**, 228-234 (2010).
17. Duan, K., Wang, Z., Hardacre, C., Liu, Z., Chansai, S., and Stere, C., "Promoting Effect of Au on Pd/TiO₂ Catalyst for the Selective Catalytic Reduction of NO_x by H₂," *Catal. Today*, **332**, 69-75 (2019).
18. Xu, C., Sun, W., Cao, L., Li, T., Cai, X., and Yang, J., "Highly Efficient Pd-doped Aluminate Spinel Catalysts with Different Divalent Cations for the Selective Catalytic Reduction of NO with H₂ at Low Temperature," *Chem. Eng. J.*, **308**, 980-987 (2017).
19. Peng, Z., Li, Z., Liu, Y., Yan, S., Tong, J., Wang, D., Ye, Y., and Li, S., "Supported Pd Nanoclusters with Enhanced Hydrogen Spillover for NO_x Removal via H₂-SCR : the Elimination of "Volcano-type" Behaviour," *Chem. Commun.*, **53**, 5958-5961 (2017).
20. Xu, C., Sun, W., Cao, L., and Yang, J., "Highly Efficient Pd-doped Ferrite Spinel Catalysts for the Selective Catalytic Reduction of NO with H₂ at Low Temperature," *Chem. Eng. J.*, **289**, 231-238 (2016).
21. Duan, K., Chen, B., Zhu, T., and Liu, Z., "Mn Promoted Pd/TiO₂-Al₂O₃ Catalyst for the Selective Catalytic Reduction of NO_x by H₂," *Appl. Catal. B: Environ.*, **176-177**, 618-626 (2015).
22. Tu, B., Sun, W., Xue, Y., Zaman, W., Cao, L., and Yang, J., "Facile Synthesis of Pt_xNi_y Catalyst Supported on Carbon for Low Temperature H₂-SCR," *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **5**, 5200-5207 (2017).
23. Hu, Z. and Yang, R. T., "110th Anniversary : Recent Progress and Future Challenges in Selective Catalytic Reduction of NO by H₂ in the Presence of O₂," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **58**, 10140-10153 (2019).
24. Cai, X., Sun, W., Zaman, W., Cao, L., and Yang, J., "Limited Ce Doped Ni-Co as a Highly Efficient Catalyst for H₂-SCR of NO with Good Resistance to SO₂ and H₂O at Low Temperature," *RSC Adv.*, **6**, 91930-91939 (2016).
25. Zhang, X., Wang, X., Zhao, X., Xu, Y., Liu, Y., and Yu, Q., "Promotion Effect of Tungsten on the Activity of Pt/HZSM-5 for H₂-SCR," *Chem. Eng. J.*, **260**, 419-426 (2015).
26. Valiheiikki, A., Petalidou, K. C., Kalamaras, C. M., Kolli, T., Maunula, M. T., Keiski, R., and Efstathiou, A. M., "Selective Catalytic Reduction of NO_x by Hydrogen (H₂-SCR) on WO_x-promoted Ce_zZr_{1-z}O₂ Solids," *Appl. Catal. B: Environ.*, **156-157**, 72-83 (2014).
27. Olympiou, G. G. and Efstathiou, A. M., "Industrial NO_x Control via H₂-SCR on a Novel Supported-Pt Nanocatalyst," *Chem. Eng. J.*, **170**, 424-432 (2011).
28. Wang, J., Li, B., Yang, D., Lv, H., and Zhang, C., "Preparation Optimization and Single Cell Application of PtNi/C Octahedral Catalyst with Enhanced ORR Performance," *Electrochimica Acta*, **288**, 126-133 (2018).

29. Kodama, K., Nagai, T., Kuwaki, A., Jinnouchi, R., and Morimoto, Y., "Challenges in Applying Highly Active Pt-based Nanostructured Catalysts for Oxygen Reduction Reactions to Fuel Cell Vehicles," *Nature Nanotechnology*, **16**, 140-147 (2021).
30. Cai, X., Sun, W., Zaman, W. Q., Cao, L., and Yang, J., "Limited Ce Doped Ni-Co as a Highly Efficient Catalyst for H₂-SCR of NO with Good Resistance to SO₂ and H₂O at Low Temperature," *RSC Adv.*, **6**, 91930-91939 (2016).