

제철소 탈질 공정 적용을 위한 Metal Corrugated에 워시 코팅된 저온 SCR 촉매의 관한 연구

나우진, 박해경*
한서대학교 화학공학과

A Study on the Low Temperature SCR Catalyst Wash-coated on Metal Corrugated Substrate for Application of Steel Mill De-NO_x Process

Woo-jin Na, Hea-Kyung Park*
Department of Chemical Engineering, Hanseo University

요약 본 연구에서는 제철소 탈질 설비의 원료 및 운전 경비 절감을 위하여 기존 상용 SCR 촉매보다 표면적이 높고 온도 응답성이 우수한 SCR 촉매 개발을 목적으로 하였다. WO₃와 V₂O₅의 함량을 달리하여 metal corrugated 형태의 지지체에 코팅하여 SCR 촉매를 제조한 후, 실험실 규모의 마이크로 상압반응기상에서 NO_x 저감 성능을 측정하였다. 촉매의 특성은 BET, EDX(energy dispersive x-ray spectrometer), XRF(x-ray fluorescence spectrometry) 기기를 이용하여 분석하였다. 연구 결과, V₂O₅의 함량이 증가함에 따라 NO_x 저감 성능도 증가하였지만 V₂O₅의 함량이 1.5wt.% 일 때 보다 1.2wt.% 일 때 가장 우수한 NO_x 저감 성능을 나타내었다. 또한, V₂O₅의 함량이 1.2wt.% 촉매는 SO₂에 장시간 노출 시켰을 경우에도 NO_x 저감 성능이 유지되는 것으로 나타났으며 제철소에서 사용되고 있는 상용 honeycomb 촉매와 NO_x 저감 성능 비교 결과 220℃ 에서 NO_x 저감 성능이 2배 높게 나타남에 따라 metal corrugated 지지체에 워시코팅한 SCR 촉매는 제철소 탈질 공정의 저온 영역에서 이용 가능함을 확인 하였다.

Abstract To develop a catalyst superior to conventional commercial extruded SCR catalysts by using a metal corrugated substrate with a high bulk surface area and excellent thermal response to reduce catalytic raw materials and steel mill de-NO_x operating costs. A catalytic slurry was wash-coated on a corrugated metal substrate in the conventional manner. The de-NO_x performances of prepared catalysts were investigated using a laboratory scale atmospheric micro-test unit and by BET, EDX(energy dispersive x-ray spectrometer), and XRF(x-ray fluorescence spectrometry). de-NO_x performance increased as V₂O₅ content increased, but best de-NO_x performance was obtained at a V₂O₅ content of 1.2 wt.%. Furthermore, de-NO_x performance was maintained despite exposure to SO₂ for 100 hr. In addition, when the catalyst(V₂O₅ 1.2 wt.%) was compared with a commercial extruded honeycomb catalyst used in a steel mill, the de-NO_x performance of the prepared catalyst exceeded that of the commercial catalyst at 220°C. The study shows that the devised wash-coated SCR catalyst could be used in the low-temperature region of steel mill de-NO_x processes.

Keywords : SCR Catalyst, NO_x, Low Temperature, Metal Corrugated, Wash Coating

본 논문은 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원의 연구과제로 수행되었음.
(20193410100050, 저온 탈질 석탄연소 배기가스 처리 신공정 개발)

*Corresponding Author : Hea-Kyung Park(Hanseo Univ.)

email: jhkp@hanseo.ac.kr

Received May 10, 2022

Revised June 10, 2022

Accepted August 3, 2022

Published August 31, 2022

1. 서론

국내 대기오염이 최근 10년 사이 점점 악화 되어 대기 오염으로 인한 사망자가 점점 늘어나 18,200명에 이르러 경제협력개발기구(OECD)회원국 중에서 최악의 수준으로 나타나 있다. 1급 발암물질로 분류된 미세먼지와 같은 경우는 2018년 기준 미세먼지 매우 나쁨($75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상) 5일과 나쁨($35\sim 75\mu\text{g}/\text{m}^3$) 72일로 증가하여 국민들의 삶의 질을 저하시키는 가장 큰 요인으로 나타나고 있다. 환경부에서는 미세먼지 관리 종합대책을 통하여 2022년까지 산업부문의 오염물질 배출량 중 43%(52,791톤)를 줄이는 목표로 배출허용기준을 강화하였다[1].

산업부문의 제철소에서는 소결, 코크스, 압연 등의 공정에서 NO_x를 배출하고 있으며, 대부분 저감 기술로 선택적 촉매 환원법(Selective Catalytic Reduction, SCR)이 적용되어 있다[2-6]. 현재 상용화되어 가장 많이 사용되고 있는 SCR 촉매는 압출성형(Honeycomb type), 판형(Plate type) 형태의 촉매가 있으며[7], 압출성형 SCR 촉매는 열병합발전소 및 소각장, 석탄화력발전소에서 대부분 사용되고 무게가 무겁고 온도 응답성이 느린 단점이 있다[8-10]. 또한, 판형 SCR 촉매는 배가스 중 dust가 많은 석탄 화력에서 주로 사용되지만, 촉매의 겉표면적이 다른 촉매보다 작은 단점을 가지고 있어 동일량의 배가스를 처리하더라도 다른 촉매에 비해 많은 촉매량 및 넓은 촉매 설치공간이 필요하다[11]. 일반적으로 SCR 공정은 250~400℃ 온도 범위에서 높은 탈질 효율을 나타내지만 배기가스 온도가 위의 온도보다 낮아지면 탈질 효율이 저하되는 문제가 지적되고 있다.

최근 제철소, 소각로 등을 중심으로 원료 및 운전경비 절감을 위해 저온 SCR 촉매에 대한 요구가 증가되고 있으나, 기존 상용 SCR 촉매로는 저온에서 대응하기 어려운 상황이다. 또한, 소결로와 소각로, 시멘트 SCR 공정에 적용되는 운전 온도는 280℃ 내외로 bag filter 후단 온도가 이보다 낮은 상황에서는 SCR 공정의 반응온도를 확보하기 어려워 추가적인 에너지를 투입해야 됨으로써 운영비의 증가를 초래한다[12]. 이에 따라 제철소에서는 원료 및 운전 경비 절감을 위한 저온 SCR 적용은 시도하지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 상용 SCR 촉매보다 겉표면적이 높아 상대적으로 적은 부피의 촉매를 사용하여도 동일한 NO_x 저감 성능을 기대할 수 있는 금속 재질의 metal corrugated 지지체를 사용하여 촉매를 제조하였

다. metal corrugated 지지체는 기계적 강도 및 열전도도 특성이 우수하고, 사용 후 수명이 다한 촉매를 재제조할 때에도 여러번 재제도가 가능하여 새로운 신제품으로 교체하지 않아도 되는 큰 경제적 이점이 있다[13].

본 연구에서는 제철소의 소결로 배가스 조건에서 저온 영역인 160~260℃ 온도 범위에서 NO_x 저감 성능이 우수한 SCR촉매의 개발을 목적으로 V₂O₅-WO₃/TiO₂ 형태로 촉매 슬러리를 제조하였으며, SCR촉매의 주촉매인 V₂O₅ 와 조촉매인 WO₃ 함량을 조절하여 metal corrugated 지지체에 워시코팅 하였다. 촉매의 NO_x 저감 성능은 lab. scale의 상압반응기를 통해 확인하였고, 제조한 촉매의 물성을 확인하고자 하였다.

2. 실험

2.1 촉매 제조

본 실험에 사용된 지지체는 metal corrugated(100cps, YIDA Inc., China)이며, 코팅 슬러리 시료는 TiO₂(99%, Cristal Global Co., Ltd. in Saudi Arabia)와 V₂O₅(99%, Daejung Chemical CO., Ltd. in Korea), WO₃(99%, Sigma-Aldrich CO., Ltd. in Germany), 바인더 Silicasol 30% solution(99%, S-Chemtech. CO., Ltd. in Korea), 유기산 oxalic acid(99.5%, Daejung Chemical Co., Ltd. in Korea), 증류수를 사용하였다. 증류수에 WO₃를 온도 60℃로 유지시켜 용해한 후, V₂O₅와 oxalic acid를 추가 투입하여 1시간 교반한 후 TiO₂에 투입하였다. 그 후 30분 교반하여 코팅 슬러리를 제조한 후 관례적인 워시코팅 방식(dip-sipping)으로 metal corrugated 지지체에 코팅하였다.

NO_x 저감 시험을 위한 metal corrugated는 3 cm × 3 cm × 3 cm로 준비하였고, 코팅 슬러리는 150g/L

Table 1. Notation of prepared catalysts

Catalyst notation	conditions
MVW-A	V2O5 0.3 wt.%, WO3 2.0 wt.%
MVW-B	V2O5 0.6 wt.%, WO3 2.0 wt.%
MVW-C	V2O5 0.9 wt.%, WO3 2.0 wt.%
MVW-D	V2O5 1.2 wt.%, WO3 2.0 wt.%
MVW-E	V2O5 1.5 wt.%, WO3 2.0 wt.%
MVW-F	V2O5 1.2 wt.%, WO3 1.0 wt.%
MVW-G	V2O5 1.2 wt.%, WO3 3.0 wt.%

코팅량으로 각각 위시코팅을 하였다. 이후, 120℃에서 1시간 건조 후, 470℃에서 3시간 소성을 진행하여 촉매를 준비하였다. 제조된 촉매의 시료명은 Table 1에 나타내었다.

2.2 물성평가

촉매를 코팅하기 전에 슬러리를 소성한 샘플을 대상으로 BET(TriStarII 3020, Micromeritics, in USA)로 비표면적을 측정하였고, 성분 원소들은 XRF(X-ray Fluorescence, ZSX primus, Rigaku Co., Ltd. in Japan)를 통해 분석하였으며, 표면성분 Ti, V, W 등의 확인은 SEM(Scanning Electron Microscope)-EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer, Hitachi SU5000, Hitachi high technology Co., Ltd., Japan)로 분석하였다.

2.3 시험조건 및 장치

NO_x 저감 성능 시험 장치는 Fig. 1과 같이 구성하였다. 반응 실험에 사용된 장치는 연속 흐름식 상압 반응기로서 제조된 촉매의 부피는 27 cm³이고, 모든 가스의 흐름은 MFC (Mass Flow Controller, F-100C, Bronkhorst Co., Ltd. in UK)로 제어를 하였으며, 온도는 PID controller를 사용하여 160~260 ℃의 범위로 조절하였다. 반응가스의 조성은 Gas analyzer (NOVA9K, MRU, Co., Ltd. in Germany)를 사용 분석하였다. NO gas(10 % in N₂, Sung kang speciality gas, in Korea)는 300 ppm (v/v)을 정량적으로 흘려주었으며, SO₂ gas(2 % in N₂, Sung kang speciality gas, in Korea)는 조건에 따라 100 및 400 ppm(v/v), NH₃ gas(10 % in N₂, Sung kang speciality gas, in Korea)는 NO의 농도와 동일 몰비로 MFC를 이용하여 유입시켰다. O₂ gas(99.9 %, Sung kang speciality gas, in Korea)의 농도는 15 % (v/v)를 유지하였으며, N₂ gas(99.9 %, Sung kang speciality gas, in Korea)로 총 유량이 유지되도록 하였다. 공간속도를 5,000 및 10,000hr⁻¹ 으로 설정하고, 각 온도까지 일정 속도로 승온 한 후 30분의 안정화 시간을 두어 온도 및 유량이 안정화가 된 후 성능을 측정하였다. 본 실험 조건은 Table 2에 나타내었고 사용된 촉매는 Fig. 2에 나타내었다.

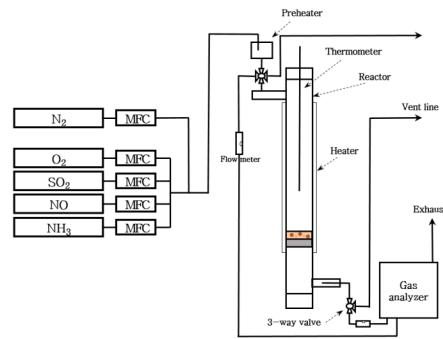


Fig. 1. Schematic diagram of catalyst performance test unit.

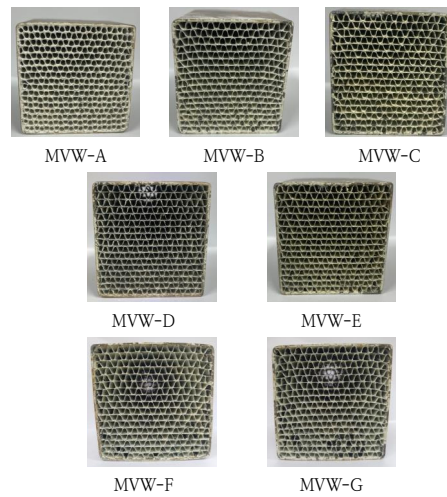


Fig. 2. Prepared metal corrugated catalysts.

Table 2. Experimental condition of de-NO_x measurement

	Conditions
Catalyst Volume(cm ³)	27
S.V(hr ⁻¹)	5,000, 10,000
NO(ppm)	300
SO ₂ (ppm)	100, 400
O ₂ (%)	15
NH ₃ /NO mole ratio	1
N ₂	balance
Temperature(℃)	160~260

3. 결과 및 고찰

3.1 제조된 촉매의 반응활성 평가

WO₃의 함침량을 고정하고 V₂O₅의 함침량을 달리 하여 제조한 metal corrugated 촉매를 대상으로 NO_x 저감 성능을 제철소 소결로 배가스 조건에서 측정하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. S.V 5,000hr⁻¹조건에서 V₂O₅의 함량에 따른 NO_x 저감 성능을 종합적으로 비교하였고, V₂O₅의 함량이 증가함에 따라 NO_x 저감 성능이 서서히 증가하였으며, MVW-C 촉매부터 NO_x 저감 성능이 급격히 증가하였다. 또한, V₂O₅함량이 가장 높았던 MVW-E 촉매보다 MVW-D 촉매가 가장 높은 NO_x 저감 성능을 보여주었다. 이러한 결과로부터 저온에서 NO_x 저감 성능을 나타내기 위해서는 일정량 이상의 V₂O₅가 요구됨을 확인할 수 있었으며, 본 연구 조건에서의 V₂O₅ 함량은 1.2wt% 정도가 되어야 함을 알 수 있었다.

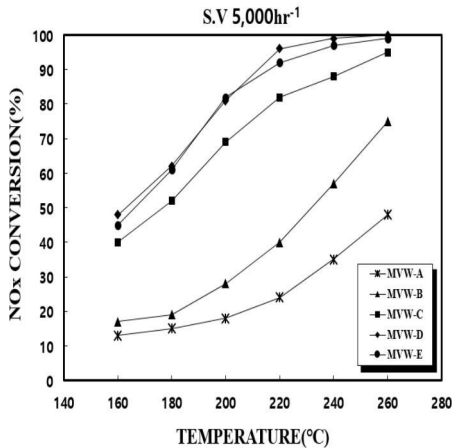


Fig. 3. Conversion of NO_x according to changes in vanadium content of prepared catalysts.(S.V 5,000hr⁻¹)

같은 촉매로 S.V 10,000hr⁻¹에서의 실험결과를 Fig. 4에 나타내었다. S.V 5,000hr⁻¹에서 NO_x 저감 성능이 가장 높았던 MVW-D 촉매는 S.V 10,000hr⁻¹에서 최고 80%의 NO_x 저감 성능을 나타내었으며, S.V 5,000hr⁻¹에서는 MVW-E 촉매와 성능이 비슷해 보였지만 S.V 10,000hr⁻¹에서는 NO_x 저감 성능 차이가 확실히 나타났다.

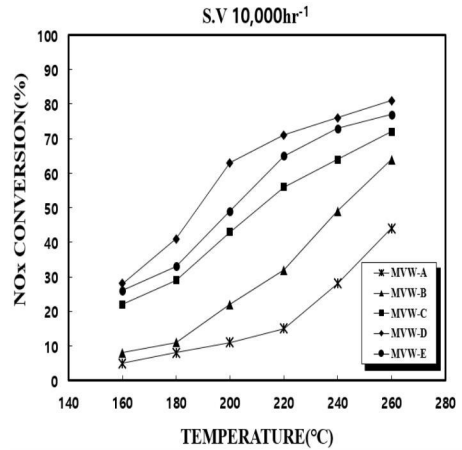


Fig. 4. Conversion of NO_x according to changes in vanadium content of prepared catalysts.(S.V 10,000hr⁻¹)

3.2 촉매의 NO_x 저감 성능 내구성 평가

대부분의 제철소 배가스에는 SO₂가 필연적으로 포함되어 있고, 이는 촉매 활성 저하 및 장치를 부식시키는 문제를 가지고 있다[14,15]. 따라서 제조된 촉매를 S.V 5,000hr⁻¹에서 SO₂ 농도를 400ppm으로 하여 NO_x 저감 성능 저하 여부를 평가하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. SO₂ 농도를 4배 높여 실험한 결과 전체적으로 NO_x 저감 성능이 5~10% 저하 되었으며, MVW-D 촉매만 220°C 온도 구간부터 90% 이상의 NO_x 저감 성능을 나타내었다.

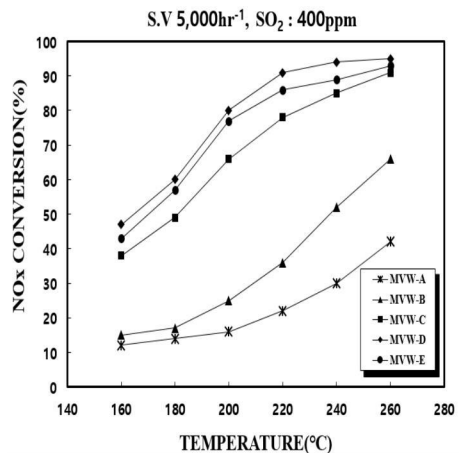


Fig. 5. Conversion of NO_x according to changes in vanadium content of prepared catalysts.(S.V 5,000hr⁻¹, SO₂ : 400ppm)

또한, 촉매의 반응 활성 내구성 실험을 위하여 NO_x 저감 성능이 가장 높았던 MVW-D 촉매의 조성 중 V₂O₅의 함량을 고정하고, 조촉매 WO₃의 함량을 조절하여 MVW-F, MVW-G 촉매를 제조하였다. 제조된 촉매는 S.V 5,000hr⁻¹, SO₂ 400ppm, 220℃ 조건에서 100시간 동안 MVW-D 촉매와 활성도 저하 여부를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다.

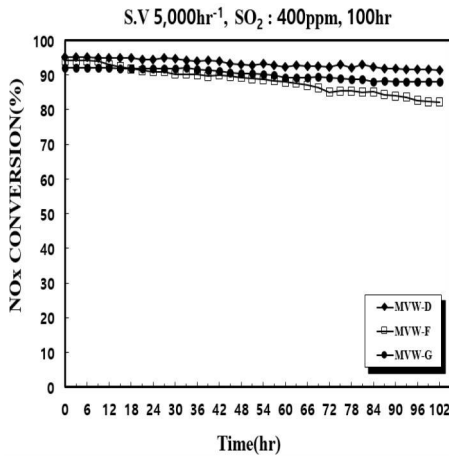


Fig. 6. NO_x Conversion of MVW-D, MVW-F and MVW-G catalysts according to run time.(S.V 5,000hr⁻¹, SO₂ : 400ppm)

WO₃ 함량이 낮은 MVW-F 촉매의 초기 NO_x 저감 성능은 MVW-D 촉매와 유사하였지만 10시간 경과 후부터는 ammonium bisulfate(NH₄HSO₄) 생성에 의한 영향으로 급격히 활성이 감소하였으며, 초기 NO_x 저감 성능에 비해 12% 성능이 감소하였다. 또한, MVW-D 촉매는 반응 시간 60hr 까지는 NO_x 저감 성능이 서서히 감소하였으나, 이후에는 큰 변화 없이 약 91%의 NO_x 저감 성능을 유지 하였다. SO₂에 대한 촉매의 내구성 향상을 위해 WO₃의 함량을 가장 높게 제조하였던 MVW-G 촉매는 초기 NO_x 저감 성능이 가장 낮게 나타났지만 MVW-F 촉매와 다르게 NO_x 저감 성능을 MVW-D 촉매와 비슷하게 유지하였다. 이러한 결과로부터 제철소 탈질 공정 저온 영역에 SCR 촉매를 적용하기 위해서는 촉매 활성 성분 함량이 다르게 요구됨을 알 수 있었다.

3.3 상용 SCR촉매와 제조된 SCR 촉매의 NO_x 저감 성능 비교

본 연구에서 사용된 metal corrugated 100cpsi 지지체는 Fig. 2와 같이 얇은 금속판으로 되어 있고 wall thickness가 기존 상용 SCR촉매 보다 3배 얇다. 또한 단위 부피당 접촉면적이 넓어 기존 상용 SCR 촉매보다 촉매 부피를 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 metal corrugated 지지체에 코팅한 촉매와 상용 SCR 촉매의 NO_x 저감 성능을 비교하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 상용 SCR 촉매는 160℃부터 매우 낮은 NO_x 저감 성능을 나타내었으나 위의 실험결과에서 가장 높은 NO_x 성능을 나타내었던 MVW-D 촉매는 3배 높은 NO_x 저감 성능을 나타내었다. 또한, 온도가 증가할수록 MVW-D 촉매는 NO_x 저감 성능이 크게 증가하여 240℃에서 99% NO_x 저감 성능을 나타내었고, 상용 SCR 촉매는 260℃에서 최대 NO_x 저감 성능이 86%를 나타내었다.

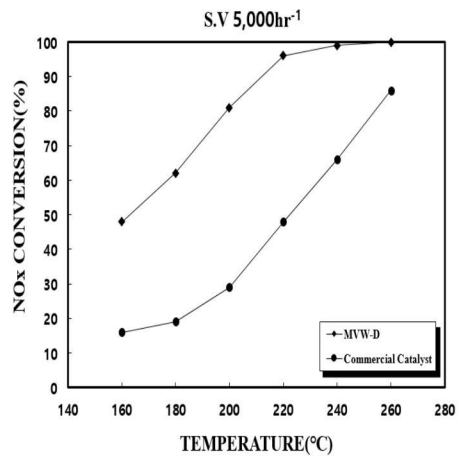


Fig. 7. NO_x Conversion of MVW-D catalyst compared to commercial SCR catalyst.

3.4 촉매의 비표면적 분석

촉매의 비표면적 측정된 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 보는 것과 같이 촉매의 비표면적은 대부분 약 95~98m²/g사이로 나타났으며, 그 경향은 각 촉매의 NO_x 저감 성능이 증가함에 따라 표면적의 크기가 약간씩 줄어드는 것으로 확인 하였다.

Table 3. BET analysis results of the prepared catalyst

Item	BET surface area(m ² g ⁻¹)
MVW-A	98.92
MVW-B	98.59
MVW-C	97.88
MVW-D	96.47
MVW-E	95.96
MVW-F	96.21
MVW-G	95.19

3.5 촉매의 성분 함량 분석

지지체에 코팅하기 전 제조된 촉매 슬러리를 건조 소성하여 XRF와 EDX로 촉매의 성분 함량을 분석하였으며, 그 결과를 Table 4~5에 나타내었다. 분석 결과를 살펴보면 촉매의 주성분인 TiO₂, V₂O₅, WO₃, SiO₂ 성분으로 구성되어 있음을 알 수 있었고, 설정했던 금속 함량대로 성분이 분석된 것을 알 수 있었다.

Table 4. XRF analysis results of the prepared catalyst (unit : wt.%)

Catalyst	Al	Si	S	Ca	Ti	V	W
MVW-A	0.02	6.23	0.40	0.04	58.62	0.42	2.66
MVW-B	0.02	5.89	0.38	0.01	59.08	0.76	2.74
MVW-C	0.03	6.64	0.42	0.03	58.92	0.96	2.61
MVW-D	0.02	6.31	0.44	0.01	59.33	1.28	2.58
MVW-E	0.04	6.71	0.34	0.03	59.11	1.42	2.80
MVW-F	0.03	5.98	0.41	0.02	58.94	1.31	1.42
MVW-G	0.04	6.42	0.54	0.01	58.72	1.24	3.49

Table 5. EDX analysis results of the prepared catalyst (unit : wt%)

Catalyst	V	W	Ti	S	Si	Al
MVW-A	0.78	3.39	84.67	0.65	9.84	0.67
MVW-B	1.12	3.64	82.38	0.69	10.56	0.51
MVW-C	1.32	3.99	81.96	0.58	10.25	0.64
MVW-D	1.66	3.81	83.22	0.49	11.64	0.48
MVW-E	2.05	4.14	80.98	0.50	11.78	0.54
MVW-F	1.68	2.58	81.15	0.74	11.20	0.71
MVW-F	1.59	4.65	83.14	0.42	10.54	0.57

4. 결론

metal corrugated 지지체를 사용하여 V₂O₅ 와 WO₃ 함량에 따라 촉매를 제조하여 저온영역의 제철소 소결로 배가스 조건에서 NO_x 저감 성능과 촉매의 물성을 확립함으로써 아래와 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) SCR촉매의 주 활성성분인 V₂O₅의 함량에 따라 본 연구의 적용 온도인 220℃에서 MVW-A촉매는 24%, MVW-B촉매는 40%, MVW-C촉매는 82%, MVW-D촉매는 96%, MVW-E촉매는 92%의 NO_x 저감 성능을 나타내었다. 상기 결과를 통해 V₂O₅ 함량이 증가할수록 NO_x 저감 성능이 좋아 지지만 각 온도에 활성성분의 함량이 적절 해야됨을 알 수 있었다.
- 2) MVW-D 촉매가 220℃에서 SO₂에 의한 NO_x 저감 성능 저하가 미미하였다. 따라서, MVW-F, MVW-G 촉매를 제조하여 100시간 동안 SO₂에 의한 내구성을 실험한 결과 MVW-F 촉매는 NO_x 저감 성능 저하 폭이 가장 컸으며, MVW-G 촉매는 MVW-D 촉매와 같이 NO_x 저감 성능이 유지 되었으나, MVW-D 촉매보다 초기 성능이 낮아 활성성분의 함량이 중요함을 알 수 있었다.
- 3) XRF 및 EDX 분석을 통하여 촉매의 활성 성분인 V₂O₅와 WO₃의 분석 결과가 함량에 맞게 분석된 것을 확인하였고, BET 분석을 통하여 각 촉매의 NO_x 성능이 증가함에 따라 촉매의 비표면적은 약간씩 줄어든 것을 알 수 있었다.
- 4) 상용 SCR촉매와 MVW-D촉매의 NO_x 저감 성능을 비교한 결과, 상용 SCR 촉매는 전체적으로 MVW-D 촉매보다 낮은 NO_x 저감 성능을 나타내었고, MVW-D 촉매는 220℃에서 상용 SCR촉매보다 2배 높은 NO_x 저감 성능을 나타냄으로써 원료 및 운전경비 절감이 필요한 제철소에 저온 SCR 촉매로 이용 가능성은 충분할 것으로 사료된다.

References

- [1] K. J. Seong, C. S. Lee, "Operation and Improvement Cases of FGD Non-leakage Type Gas-Gas Heater(GGH) for Coal Fired Power Plants", *J. Korean Soc. Combust.*, Vol.22, No.4, pp.35-42, Dec. 2017. DOI: <https://doi.org/10.15231/jksc.2017.22.4.035>

- [2] Y. C. Byun, K. M. Lee, D. J. Koh, D. N. Shin, "Simultaneous Removal of NO_x and SO₂ through the Combination of Sodium Chlorite Powder and Carbon-based Catalyst at Low Temperature", *Journal of KSEE*, Vol.33, No.1, pp.39-46, Jan. 2011.
DOI: <https://doi.org/10.4491/KSEE.2011.33.1.039>
- [3] J. K. Kim, K. H. Park, S. C. Hong, E. D. Lee, Y. Kang, "Effects of Calcium on the Activity of V₂O₅/TiO₂ Catalysts in SCR Processes", *Korean Chem. Eng. Res.*, Vol.50, No.5, pp.772-777, Oct. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.9713/kcer.2012.50.5.772>
- [4] M. S. Kang, J. H. Hwang, "Effect of SO₂ Concentration on NO_x Removal Efficiency in NaOH Based Wet Scrubbing", *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, Vol.34, No.5, pp.659-667, Oct. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.5.659>
- [5] S. H. Moon, "A Study on the Catalyst Development for NO_x Reduction from the Flue Gas of Thermal Power Plant", *Journal of KSEE*, Vol.21, No.2, pp.399-408, Oct. 1999.
- [6] B. K. Shin, J. H. Kim, S. H. Yoon, H. S. Lee, D. W. Shin, W. S. Min, "Preparation and Thermal Degradation Behavior of WO₃-TiO₂ Catalyst for Selective Catalytic Reduction of NO_x", *Kor. J. Met. Mater.*, Vol.49, No.8, pp.596-600, Aug. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.3365/KJMM.2011.49.8.596>
- [7] S. K. Ryi, J. S. Park, S. H. Choi, S. H. Cho, S. H. Kim, "Novel micro fuel processor for PEMFCs with heat generation by catalytic combustion", *Chemical Engineering Journal*, Vol.113, No.1, pp.47-53, Aug. 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2005.08.008>
- [8] L. Lietti, "Reactivity of V₂O₅-WO₃/TiO₂ de-NO_x Catalysts by Transient Methods", *Appl. Catal. B : Environ.*, Vol.10, No.4, pp.281-297, Dec. 1996.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(97\)80001-X](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(97)80001-X)
- [9] R. Burch, P. J. Millington, "Selective Reduction of Nitrogen Oxide by Hydrocarbons under Lean-burn Conditions using Supported Platinum Group Metal Catalysts", *Catal. Today*, Vol.26, No.1, pp.185-206, Nov. 1995.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0920-5861\(95\)00136-4](https://doi.org/10.1016/0920-5861(95)00136-4)
- [10] M. Inomata, K. Mori, A. Miyamoto, T. Ui, Y. Murakami, "Structures of Supported Vanadium Oxide Catalyst. 1, Vanadium (V) Oxide/Titanium Dioxide (anatase), Vanadium(V) Oxide/Titanium Dioxide (rutile), and Vanadium (V) Oxide/Titanium Dioxide (Mixture of Anatase with Rutile)", *J. Phys. Chem.*, Vol.87, No.5, pp.754-764, Mar. 1983.
DOI: <https://doi.org/10.1021/j100228a013>
- [11] S. S. Kim, S. C. Hong, "The Emission of NO₂ and NH₃ in Selective Catalytic Reduction over Manganese Oxide with NH₃ at Low Temperature", *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, Vol.18, No.3, pp.255-261, Jun. 2007.
- [12] P. W. Seo, S. G. Sim, S. C. Hong, "Study on the characteristic & modification of V/TiO₂ Catalyst for SCR in low temperature", *Proceedings of KSEE*, pp.1244-1251, Oct. 2004.
- [13] W. J. Na, H. K. Park, "A Study on the NO_x Reduction According to the Space Velocity Variation and Binder Content of Metal foam SCR Catalyst for Cogeneration Power Plant Application", *Journal of the Korean Applied Science and Technology*, Vol.36, No.1, pp.153-164, Mar. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.12925/jkocs.2019.36.1.153>
- [14] S. C. Hong, "The Effect of SO₂ in Flue Gas on the SCR Activity of V/TiO₂", *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, Vol.17, No.5, pp.490-497, Oct. 2006.
- [15] S. H. Lee, J. U. Seo, S. G. Byeon, S. C. Hong, "SCR Reaction Activity and SO₂ Durability Enhancement in Accordance with Manufacturing Conditions of the V/TiO₂ Catalysts", *Clean Technol.*, Vol.22, No.2, pp.114-121, Jun. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.7464/ksct.2016.22.2.114>

나 우 진(Woo-Jin Na)

[정회원]



- 2012년 8월 : 한서대학교 화학공학과 (공학석사)
- 2020년 8월 : 한서대학교 화학공학과(촉매공학) (공학박사)
- 2015년 6월 ~ 2022년 1월 : 한서대학교 촉매공정기술연구원 선임연구원
- 2022년 2월 ~ 현재 : 한서대학교 연구교수

<관심분야>

환경, 에너지, 촉매, 재자원화기술

박 해 경(Hea-Kyung Park)

[정회원]



- 1988년 2월 : 연세대학교 화학공학과 (공학석사)
- 1994년 4월 : 연세대학교 화학공학과(촉매공학) (공학박사)
- 1996년 10월 ~ 2003년 3월 : (주)코캣 대표이사
- 1994년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학과 교수

<관심분야>

환경, 에너지, 촉매, 재자원화기술