

석탄화력발전소 저온영역에서 조촉매 성분 및 함량에 따른 Metal type SCR 코팅 촉매 성능 연구

주은영, 마동민, 강다현, 김미라, 최동석, 나우진, 박해경*
한서대학교 화학공학과

De-NO_x performance of Metal type SCR catalyst as a function of promotor composition and content in the low temperature zone of coal-fired power plants

Eun-Young Ju, Dong-Min Ma, Da-Hyeon Kang, Mi-Ra Kim,
Dong-Seok Choi, Woo-Jin Na, Hea-Kyung Park*
Department of Chemical Engineering, Hanseo University

요약 NO_x 배출 규제가 강화됨에 따라 석탄 화력 발전소에 설치된 기존 SCR 촉매로는 규제를 만족시킬 수 없는 상황이다. 본 연구에서는 기존 SCR 설비를 통해 제거되지 못한 NO_x를 FGD 공정 후단 저온영역에서 높은 겉표면적과 열응답성이 높은 금속 지지체에 촉매를 코팅하여 NO_x를 저감하는 연구를 진행하였다. 저온영역에서 NO_x 저감 성능을 높이고자 주촉매 V의 함량은 14wt%로 고정하고 조촉매 Co, Ce, W 성분의 함량을 달리하여 촉매를 제조하였다. 제조된 촉매는 Lab-Scale 상압반응기를 이용하여 NO_x 저감 성능을 평가하였으며, 촉매의 특성 분석은 코팅된 촉매의 내마모도, 차압, BET, XRF, SEM을 진행하였다. 연구 결과 본 연구의 적용 온도 구간인 180°C에서 Co과 Ce를 첨가한 촉매는 주촉매만 넣어 제조한 촉매보다 낮은 NO_x 저감 성능을 보였다. 반면 W를 8wt% 첨가한 촉매는 V만 넣어 제조한 촉매보다 4.6% 높은 NO_x 저감 성능을 보였다. 또한, 상용 압출성형 촉매와 차압을 비교한 결과 금속 지지체의 CPSI가 2배 높았지만 상용 압출성형 촉매보다 낮은 차압을 나타냈으며, NO_x 저감 성능 또한 높게 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 금속 지지체에 코팅한 SCR 촉매는 새로운 형태의 촉매로써 SCR 공정이 적용되는 다양한 분야에서 적용할 수 있을 것으로 보인다.

Abstract As NO_x emission regulations are tightening, conventional SCR catalysts installed in coal-fired power plants cannot satisfy the regulations. In this study, NO_x was reduced using a metal substrate catalyst with a high bulk surface area and high thermal responsiveness at low temperatures. The catalytic slurries were prepared with 14wt% V and different contents of Co, Ce, and W. The de-NO_x performances of the prepared catalysts were investigated using a laboratory-scale atmospheric pressure reactor. The catalysts were characterized by air jet erosion, pressure drop test, Brunauer-Emmett-Teller surface area measurements, x-ray fluorescence spectroscopy, and scanning electron microscopy. At 180°C, the catalysts with Co and Ce exhibited lower de-NO_x performance than those prepared with V alone. The catalyst with 8 wt. % W showed 4.6% higher de-NO_x performance than the catalyst with V alone. A comparison of the pressure drop with the commercial honeycomb catalyst revealed the CPSI of the metal substrate to be twice as high, but the pressure drop was lower than the commercial honeycomb catalyst, and the de-NO_x performance was better. Overall, the SCR catalyst coated on a metal substrate is a new type of catalyst that can be applied to various fields where the SCR process is applied.

Keywords : SCR Catalyst, NO_x Removal Performance, Metal Substrate, Air Pollution, Low Temperature

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 September 12, 2023

Revised October 25, 2023

Accepted December 8, 2023

Published December 31, 2023

1. 서론

석탄 화력 발전소는 NO_x 저감을 위해 선택적 촉매 환원법(SCR: Selective Catalytic Reduction, 이하 SCR)을 사용하고 있으며, 사용되는 SCR촉매는 압출성형(Honeycomb Type), 판형(Plate Type) 형태의 촉매가 있다[1-5]. 현재 대부분의 석탄 화력 발전소에서는 분진 발생이 많고 황 함량이 높은 저급탄 사용이 많아지고 있으므로 압출성형 촉매보다 판형 촉매가 더 많이 쓰이고 있다. 판형 촉매는 분진에 의한 촉매 채널 막힘으로부터 압출성형 촉매보다 자유롭기 때문에 많이 쓰이고 있지만 겉표면적이 압출성형 촉매보다 작은 단점을 가지고 있어 동일량의 배가스를 처리하더라도 압출성형 촉매보다 많은 촉매량과 넓은 촉매 설치공간이 필요하다.

최근 지속적으로 강화되고 있는 환경 규제 때문에 석탄 화력 발전소의 기존 SCR 설비로는 NO_x 저감 성능을 만족시킬 수 없는 상황이다. 환경규제를 만족시키기 위해서는 기존 SCR 공정에 촉매를 추가 설치하는 방법이 있으나 설치한다 하여도 장기적으로는 규제를 만족시킬 수 없는 상황이며, 설비의 차압 문제가 발생하게 된다. 따라서, 현재 석탄 화력 발전소에서는 기존 SCR 설비를 증설하여 추가로 더 많은 촉매를 설치하는 것과 배가스에 있는 황 화합물을 제거하는 FGD(Flue Gas Desulfurization) 공정 후단에 SCR 설비를 추가 설치하여 NO_x를 제거하는 것을 검토하고 있다.

일반적인 SCR 공정은 낮은 온도에서 NO_x 저감 성능이 저하되기 때문에 FGD 후단에 설치되면 최고 성능을 얻기 위해 설비의 재가열이 필요하다[6-9]. 하지만 재가열 과정에서 막대한 에너지가 필요하고 많은 연료비가 발생하므로 경제성이 떨어진다[4,10,11].

따라서, 본 연구에서는 FGD 후단 공정을 통해 나온 배가스를 재가열을 하지 않고 저온영역에서 높은 NO_x 저감 성능을 보이는 촉매를 개발하고자 NO_x 저감 성능이 우수하다고 알려진 V를 주촉매로 사용하였고 조촉매로는 Co, Ce, W를 사용하여 촉매 Slurry를 제조하였다 [12,13]. 제조된 Slurry는 압출성형 및 판형 촉매보다 겉표면적이 높아 상대적으로 적은 부피의 촉매를 사용하여도 동일한 NO_x 저감 성능을 기대할 수 있는 stainless steel 금속 재질의 지지체에 코팅하였다. 금속 지지체는 기계적 강도 및 열전도도 특성이 우수하고, 사용 후 수명이 다한 촉매를 재제조할 때에도 여러번 재제조가 가능하여 새로운 신품으로 교체하지 않아도 되는 큰 경제적 이점이 있다.

본 연구에서는 석탄 화력 발전소의 기존 SCR 설비에서 1차로 NO_x를 제거하고 FGD 공정에서 황 화합물이 제거한 후 남은 NO_x를 저온 영역인 150~200℃에서 강화된 규제에 만족할 수 있는 우수한 SCR 금속 코팅 촉매를 개발하고자 하였다.

2. 실험

2.1 촉매 제조

본 실험에 사용된 지지체는 금속지지체(200cps, YIDA CO., Ltd. in China)이며, 코팅 Slurry 시료는 TiO₂와 V, Co, Ce, W, 바인더 Silicasol 30 % solution(99 %, S-Chemtech Co., Ltd. in Korea), 분산제 Dispex(83 %, BASF Co., Ltd. in Germany), 증류수를 혼합하여 제조하였다. 먼저 증류수에 조촉매를 용해한 후, V를 녹여 투입하여 1시간 교반 후 TiO₂를 소량씩 넣으면서 교반하였으며, 이어서 분산제 Dispex를 넣고 30분, 바인더 Silicasol을 넣어 1시간 교반하여 Slurry를 제조하였다. 제조된 Slurry는 워시코팅 방식(Dip-Sipping)으로 금속(3 × 3 × 3 cm) 지지체에 코팅하였다. TiO₂를 기준으로 V, Co, Ce, W의 함량을 Table 1에 맞게 첨가하여 제조하였으며, 150g/L 코팅량으로 각각 워시코팅하고 450 °C에서 4시간 소성을 진행하여 촉매를 완성하였다. 제조된 시료명은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Notation of prepared catalyst

Catalyst Notation	Conditions
V-14	V ₂ O ₅ 14wt%
V-Co-5	V ₂ O ₅ 14wt%, Co 5wt%
V-Co-10	V ₂ O ₅ 14wt%, Co 10wt%
V-Co-15	V ₂ O ₅ 14wt%, Co 15wt%
V-Ce-3	V ₂ O ₅ 14wt%, CeO ₂ 3wt%
V-Ce-5	V ₂ O ₅ 14wt%, CeO ₂ 5wt%
V-Ce-8	V ₂ O ₅ 14wt%, CeO ₂ 8wt%
V-Ce-10	V ₂ O ₅ 14wt%, CeO ₂ 10wt%
V-W-5	V ₂ O ₅ 14wt%, WO ₃ 5wt%
V-W-8	V ₂ O ₅ 14wt%, WO ₃ 8wt%
V-W-10	V ₂ O ₅ 14wt%, WO ₃ 10wt%

2.2 물성 평가

촉매 제조 시 지지체에 코팅과 동시에 Slurry를 소성하여 분말 형태로 만든 후, BET(Brunauer Emmett Teller, TriStar II3020, Micromeritics Co., Ltd. in USA)로 비표면적 및 기공 분포를 측정하였다. 성분 원소들은 XRF(X-ray Fluorescence, ZSX Primus IV, Rigaku Co., Ltd. in Japan)를 통해 분석하였으며, SEM(Scanning Electron Microscope, EX-250, HORIBA Co., Ltd. in British)을 통해 촉매의 표면을 관찰하였다. 또한, 금속 지지체에 코팅된 촉매 물질의 부착력을 알아보기 위하여 코팅 촉매의 내마모도 측정과 차압 실험을 진행하여 압출성형 촉매와의 압력손실 정도를 비교하였다.

2.3 시험조건 및 장치

NO_x 저감 성능 시험 장치는 연속 흐름식 상압반응기로서 Fig. 1와 같이 구성하였다. 반응기로 흐르는 모든 가스의 흐름은 MFC(Mass Flow Controller, Line Tech Co., Ltd. in Korea)로 제어하였고, 혼합탱크와 반응기 내의 온도는 PID controller를 사용하여 조절하였다. 석탄화력발전소의 FGD 후단의 온도는 50~90℃이지만, FGD 전단의 GAH(Gas Air Heater) 1의 열소자 표면적을 감축하여 설비에서 회수하는 폐열을 줄이면 후단 온도가 상승하여 GGH(Gas Gas Heater) cooler에서 기존보다 많은 열을 회수 하므로 회수된 열을 GGH(Gas Gas Heater)에 공급하면 저온 SCR을 설치할 곳의 온도를 상승시킬 수 있다. 또한, 이들 열교환기의 용량을 조절하면 SCR 전단의 온도를 150~200℃로 조절할 수 있게 된다. 따라서, 본 연구의 온도 범위를 150~200℃로 설정하였다. 반응 가스의 조성은 Gas Analyzer(MRU Co., Ltd. in Germany)를 통해 측정하였다. NO gas(20%, in N₂ Sung kang specialty gas, in Korea)는 50ppm (v/v), NH₃ gas(10%, in N₂ Sung kang specialty gas, in Korea)는 NO의 농도와 동일 몰비로 MFC를 이용하여 유입시켰다. SO₂ gas(2%, in N₂ Sung kang specialty gas, in Korea)는 5ppm (v/v), O₂ gas(99.9%, Sung kang specialty gas, in Korea)의 농도는 4% (v/v)를 유지시켰으며, N₂ gas(99.9%, Sung kang specialty gas, in Korea)로 총 유량을 유지시켰다. 공간속도를 20,000hr⁻¹으로 설정하고, 각 온도까지 일정 속도로 온도를 상승시킨 후 30분의 안정화 시간을 두어 온도 및 유량이 안정화가 된 후

성능을 측정하였다. 시험 조건에서 소량의 SO₂가 존재하며, 180℃ 온도 이하에서는 ammonium bisulfate 생성에 의한 촉매 피독을 고려하여 본 연구의 주 활성 온도는 180℃로 설정하였다. 본 시험 조건은 Table 2에 나타내었다.

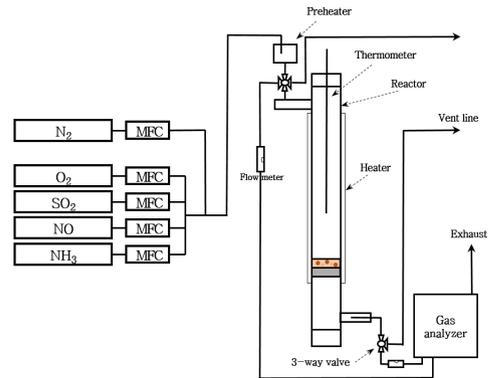


Fig. 1. Schematic diagram of catalyst performance test unit.

Table 2. Experimental conditions

Item	Unit	Condition	
S.V	hr ⁻¹	20,000	
Temp.	℃	150~200 (10)	
Off gas comp.	NO _x	ppm	50
	SO ₂	ppm	5
	NH ₃	ppm	50
	O ₂	%	4
	N ₂	-	Balance

3. 결과 및 고찰

3.1 제조된 촉매의 NO_x 저감 성능 평가

본 연구에서 조촉매인 Co, Ce, W의 함량을 달리하여 제조한 촉매를 대상으로 S.V : 20,000hr⁻¹, SO₂ 5ppm, NO 50ppm, O₂ 4%, 150~200℃ 조건에서 NO_x 저감 성능 측정하여 Fig. 2~6에 나타내었다. Fig. 2는 주촉매만 넣은 V-14 촉매의 NO_x 저감 성능이며, 본 연구의 적용 온도 구간인 180℃에서 90.6% NO_x 저감 성능을 나타내어 조촉매를 첨가한 촉매들과 NO_x 저감 성능을 비교하였다.

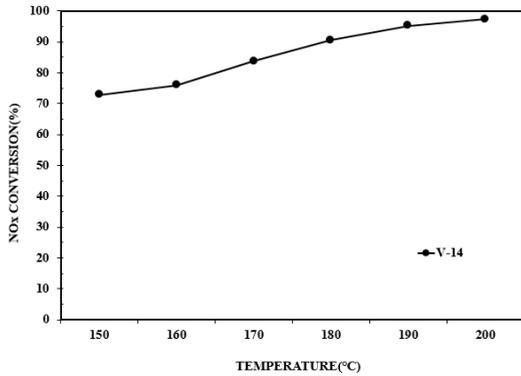


Fig. 2. Conversion of NOx over V-14 Catalyst.

조촉매 Co 함량에 따른 NOx 저감 성능을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 시험 결과 Co의 함량을 높일수록 NOx 저감 성능이 낮아지는 경향이 나타났으며, V-Co-5 촉매가 180°C에서 69.2%로 가장 좋은 NOx 저감 성능을 나타내었다. 이는 Co가 조촉매로 담지되었을 때 NOx 저감을 향상하는 물질이라는 연구결과와 달리 본 연구에서는 Co가 조촉매로서 효과가 미미한 것으로 보인다[14].

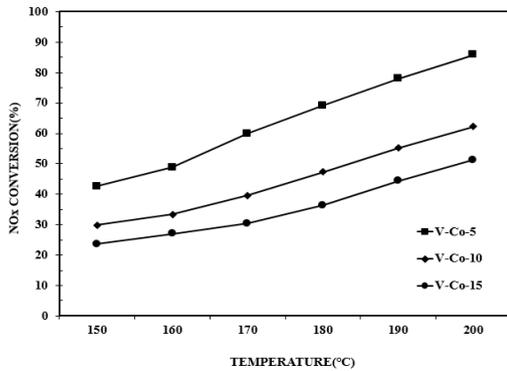


Fig. 3. Conversion of NOx over V-Co-5, V-Co-10, V-Co-15 Catalysts.

Fig. 4는 조촉매 Ce 함량에 따른 NOx 저감 성능을 나타내었다. Ce는 값비싼 W에 비해 경제성이 우수하고 촉매에 담지되었을 때 저온에서 우수한 활성을 보이는 것으로 알려져 있다[15]. 조촉매 Co를 첨가하여 제조한 촉매와 비슷한 경향으로 Ce의 함량이 낮았던 V-Ce-3, V-Ce-5 촉매가 가장 높은 NOx 저감 성능을 나타내었으며, 함량이 가장 높은 V-Ce-10이 가장 낮은 NOx 저감 성능을 보였다. 또한, 본 연구의 적용 온도 구간인 180°C에서 V-Ce-3, V-Ce-5 촉매의 NOx 저감 성능은

86.6%로 Co를 첨가한 촉매보다 우수하지만 조촉매를 첨가하지 않은 V-14의 결과보다 4% 낮은 NOx 저감 성능을 보여주었다.

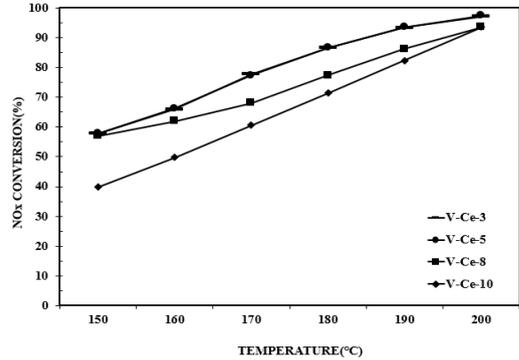


Fig. 4. Conversion of NOx over V-Ce-3, V-Ce-5, V-Ce-8, V-Ce-10 Catalysts.

W는 SCR 촉매에서 가장 많이 쓰이는 조촉매 중 하나이다. W는 특히 저온 영역에서 NOx 저감 성능의 향상을 가져오고 최고 활성 온도 영역을 확장시키는 장점이 있다고 알려져 있다[16,17]. 조촉매 W 함량에 따른 NOx 저감 성능을 Fig. 5에 나타내었으며, 시험 결과 V-W-8은 180°C에서 94%로 NOx 저감 성능이 가장 높았고 V-W-5, V-W-10은 전반적으로 비슷한 NOx 저감 성능을 나타내었다. 본 NOx 저감 성능 시험을 통해 Co, Ce 보다 W가 높은 NOx 저감 성능을 보인 것을 확인할 수 있었고 W를 넣은 촉매는 Co와 Ce를 넣은 촉매와는 다르게 조촉매의 함량이 증가함에 따라 NOx 저감 성능이 줄어드는 경향은 보이지 않았다. 이에 따라 본 연구의 시험조건에서 최적의 NOx 저감 성능을 얻기 위해서는 적절한 조촉매의 선정과 주촉매 및 조촉매의 함량 조절이 필요할 것으로 사료된다.

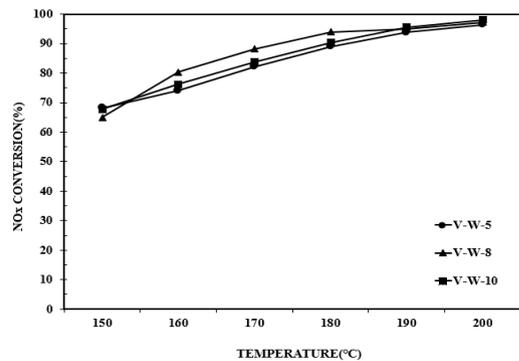


Fig. 5. Conversion of NOx over V-W-5, V-W-8, V-W-10 Catalysts.

또한, SCR 촉매에서 주촉매 V만을 넣어 제조한 촉매는 300°C 이하에서 SO₂ 피독으로 인해 활성 저하가 발생한다고 알려져있다[18]. 석탄화력발전소에서 FGD 공정을 통해 나온 배가스에도 소량의 SO₂가 존재하며, 본 연구 시험조건에서도 SO₂가 소량 존재한다. SO₂는 장기적으로 SCR촉매 내구성에 영향을 준다고 알려져 있지만 [18] 조촉매 W를 첨가하여 제조한 촉매는 SO₂에 대한 내구성이 증가한다고 알려져 있다[19,20].

3.2 상용 압출성형 촉매와 NO_x 저감 성능 비교

현재까지 200°C 이하에서 운전되고 있는 상용 SCR 촉매는 알려진 것이 없다. 대부분의 소각장은 저온 200 ~ 250°C 범위에서 SCR 설비를 운전하고 있으며, 소각장에서 쓰이는 100cpsi 압출성형 촉매를 본 연구의 온도 조건에서 NO_x 저감 성능을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 시험 결과 180°C에서 상용 압출성형 촉매는 57.2%의 NO_x 저감 성능을 보였으며, V-W-8 촉매의 NO_x 저감 성능의 60% 수준으로 확인되어 금속 지지체에 코팅된 V-W-8 촉매의 NO_x 저감 성능이 상용 압출성형 촉매보다 우수함을 알 수 있었다.

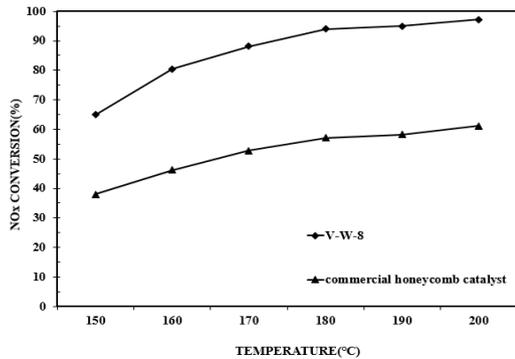


Fig. 6. Conversion of NO_x over commercial Catalyst and V-W-8 Catalyst.

3.3 촉매의 비표면적 분석

조촉매 별로 가장 높은 NO_x 저감 성능과 낮은 성능을 나타낸 촉매의 비표면적을 측정된 결과를 Table 3에 나타내었다. 조촉매 함량이 높을수록 기공 내에 분포된 금속량이 많아지기 때문에 비표면적이 작게 나타나는 것을 확인하였지만 비표면적의 크기와 NO_x 저감 성능 사이에는 연관이 없는 것으로 보인다.

Table 3. BET analysis results of the prepared catalysts

Item	BET surface area(m ² g ⁻¹)
V-14	71.05
V-Co-5	57.20
V-Co-15	48.55
V-Ce-5	67.27
V-Ce-10	63.21
V-W-5	65.89
V-W-8	62.41

3.4 촉매의 성분 함량 분석

금속 지지체에 촉매를 코팅하기 전 제조된 촉매 Slurry를 건조 소성하고 NO_x 저감 성능이 가장 높은 촉매의 성분 함량을 XRF로 분석하여 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 분석 결과 3가지 촉매 모두 설정한 함량에 맞게 제조된 것을 확인할 수 있었다.

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

	V-Co-5	V-Ce-5	V-W-8
P ₂ O ₅	0.22	0.15	0.11
SO ₃	0.88	0.26	0.12
TiO ₂	79.11	79.84	76.96
V ₂ O ₅	14.42	14.61	14.19
Co ₂ O ₃	5.14	-	-
CeO ₂	-	4.92	-
WO ₃	-	-	8.42
Nb ₂ O ₅	0.22	0.21	0.18

3.5 촉매의 표면 관찰

촉매의 활성에 영향을 미치는 인자 중 물리적 특성은 비표면적, 불순물 함량, 입자크기, 공극 크기 분포 그리고 밀도 등으로 알려져 있다[21]. SEM 분석을 통해 입자크기, 공극 크기 분포를 알 수 있으며 제조된 촉매의 표면을 관찰하기 위하여 조촉매 별로 NO_x 저감 성능이 가장 우수한 촉매와 V-14 촉매를 분석하여 비교하였다.

분석 배율은 50μm 와 10μm로 다르게 하여 관찰하였고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보는 것과 같이 NO_x 저감 성능이 우수할수록 입자가 작고 균일하게 분산되어 공극이 작은 것을 확인할 수 있었다.

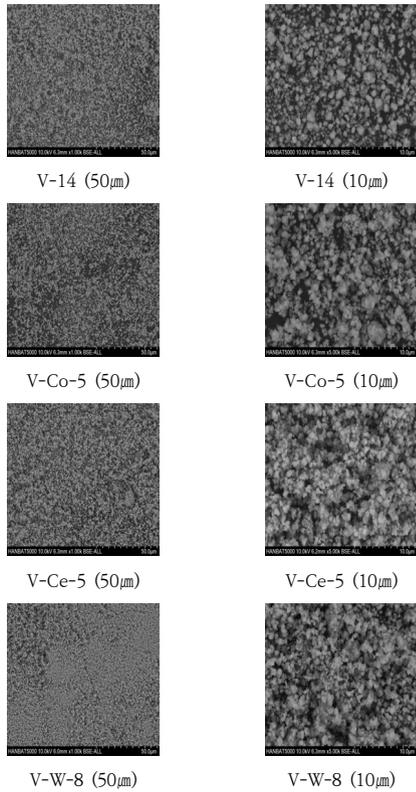


Fig. 7. SEM analysis results of the prepared catalysts.

3.6 촉매 내마모도 측정

석탄 화력 발전소에서 나오는 fly ash 등 입자상 물질들과의 물리적 충돌에 의해 코팅된 촉매가 탈리 될 경우 촉매 활성이 감소하게 된다. 따라서 금속 지지체 표면에 코팅된 촉매의 부착력은 촉매 활성도와 장기 안정성에 큰 영향을 미치는 인자이다[22].

내마모도 측정을 위하여 상용 압출성형 촉매(100cps), V-W-8 촉매를 Fig. 8과 같이 측정 준비하였으며, 시험 조건은 Table 5에 나타내었다.

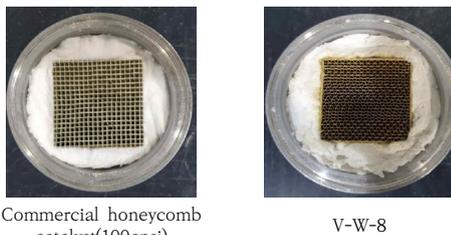


Fig. 8. Catalysts for air jet erosion testing.

Table 5. Air jet erosion test conditions

Item	conditions
Linear Velocity	25m/s
Abrasive	SiO ₂ #6
Discharge amount of abrasive	3kg/h
Test Time	30min

각 촉매의 내마모도를 3회 측정된 평균값을 계산하여 Table 6에 나타내었으며, 상용 압출성형 촉매의 내마모율은 5.9%, V-W-8 촉매는 0.9%로 나타났다. 상용 압출성형 촉매 자체는 촉매 원재료를 반죽하여 형태를 만든 것이며, 표준화된 규격이 가로 150mm 세로 150mm이다. 상용 압출성형 촉매의 내마모율이 높게 나타난 이유는 정해진 칫수 안에서 촉매의 cps가 결정되기 때문에 cps가 커질수록 Wall thickness가 얇고 기계적강도가 약해지게 된다. 따라서, 연마재가 먼저 닿는 곳의 촉매 표면이 마모된 것으로 보이며, 금속 지지체에 코팅한 V-W-8 촉매는 금속 표면에 촉매가 견고하게 부착되어 있어 내마모율이 압출성형 촉매와 비교하여 낮게 나타난 것으로 보인다.

Table 6. Air jet erosion test results

Item	Commercial honeycomb catalyst (100cps)	V-W-8
weight of before (g)	194.3	160.1
weight of after (g)	182.8	158.7
Erosion rate(%)	5.9	0.9

3.7 압력손실 측정

Fig. 9와 10은 각각 상용 압출성형 촉매와 금속지지체의 Wall thickness를 나타내었다.

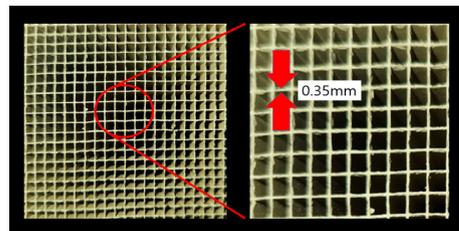


Fig. 9. Wall thickness of Honeycomb Type Substrate.

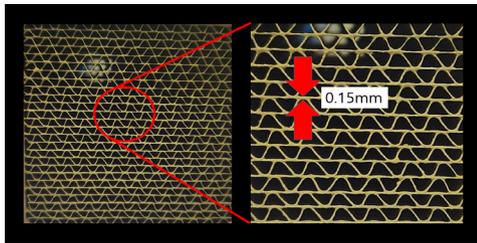


Fig. 10. Wall thickness of Metal Type Substrate.

금속 지지체의 NO_x 저감성능이 상용촉매보다 훨씬 뛰어나지만 설비에 차압이 높게 되면 배가스를 배출하기 어려워지며, 설비에 문제가 발생하게 된다. 금속 지지체 200cps는 상용 압출성형 촉매 100cps보다 Wall thickness가 0.15mm로 작게 나타났고 금속 지지체의 현장 적용 가능성을 살펴보기 위하여 Fig. 11에 차압 측정장비를 이용하여 차압을 측정하여 그 결과를 Table 8에 나타내었다.



Fig. 11. Pressure drop analysis equipment.

Table 7. Pressure drop analysis equipment specifications.

Item	Specifications
Size	150 × 150 × 380 mm
Flow rate(Max.)	630 m ³ /h
Pressure Gauge	0 ~ 100 mmH ₂ O
Digital Pressure Gauge	0 ~ 200 mmH ₂ O

차압 측정 결과 금속 지지체 200cps에 코팅한 V-W-8 촉매가 상용 압출 촉매보다 차압이 5.4 mmH₂O 작게 나타났으며, 금속 지지체의 cps가 높지만 wall thickness가 상용 압출성형 촉매에 비하여 상대적으로 얇기 때문에 촉매 전면 오픈 면적이 압출성형 촉매보다 높아 배가스의 저항을 덜 받은 것으로 보여진다.

Table 8. Pressure drop analysis results

Catalyst	Pressure drop(mmH ₂ O)
Commercial honeycomb catalyst(100cps)	34.8
V-W-8	29.4

차압이 가장 낮은 촉매는 판형 촉매이지만 다른 촉매에 비해 많은 촉매량과 넓은 촉매 설치공간이 필요하다. 또한, 상용 압출성형 촉매는 재제조를 위하여 재제조 용액으로 촉매를 처리할 경우 촉매의 기계적 강도가 많이 약해지기 때문에 재제조를 하여도 1회 정도 재제조할 수 있다. 반면에 금속 지지체는 촉매의 수명이 다하여도 촉매의 재제조를 다회 가능하여 신촉매로 교체하지 않아도 되기 때문에 경제적 이점이 크다고 할 수 있다[23].

4. 결론

본 연구에서는 SCR 촉매의 주성분인 V의 함량은 고정하고 조촉매 종류와 함량을 달리하여 NO_x 저감 성능과 촉매의 물성을 확인함으로써 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 조촉매의 종류와 함량별로 본 연구의 적용온도인 180℃에서 NO_x 저감 성능을 비교한 결과 각각 V-W-8, V-Ce-5, V-Co-5 촉매가 가장 높은 NO_x 저감 성능을 보여주었다.
- 2) 조촉매를 넣지 않은 V-14 촉매와 조촉매를 첨가한 촉매의 NO_x 저감 성능을 비교한 결과 V-Ce-5, V-Co-5 촉매는 V-14보다 낮은 NO_x 저감 성능을 나타내었고, 특히 Co는 조촉매로서 효과가 미미하였다. 이와 반면에 V-W-8 촉매는 V-14 촉매보다 4.6 % 높은 NO_x 저감 성능을 나타냄으로써 NO_x 저감 성능을 향상하고 최고 활성 온도 영역을 확장한다는 문헌의 내용을 뒷받침하였다. 또한 상용촉매는 180℃에서 57.2%의 NO_x 저감 성능을 보였으며, 이는 V-W-8 촉매의 NO_x 저감 성능의 60% 정도로 V-W-8 촉매가 현재 상용되는 촉매보다 좋은 성능을 가진 것을 확인하였다.
- 3) 금속 지지체의 현장 적용 가능성을 알아보기 위하여 상용 압출성형 촉매와 금속 지지체의 내마모도 및 차압을 비교하였다. 내마모도 측정 결과 상용 압출촉매의 내마모율은 5.9%, 금속 지지체는 0.9%

로 금속 지지체가 더 견고한 것을 알 수 있었다. 차압 측정 결과 상용 압출성형 촉매는 34.8mmH₂O, 금속 지지체는 29.4mmH₂O로 금속 지지체의 차압이 더 작았으며, 이는 현재 상용 촉매를 금속 지지체로 바꾸어도 차압으로 인한 설비 운전 문제가 없음을 보여준다.

- 4) V-W-8 촉매가 상용 압출성형 촉매보다 저온에서의 NO_x 저감 성능이 뛰어나고 물성분석 결과로 압출성형 촉매에 비해 금속 지지체 촉매가 내마모도와 차압 측면에서 뛰어나다는 것을 알 수 있다. 이는 금속 지지체에 코팅한 V-W-8 촉매가 FGD 공정 후단에 설치할 촉매로서 가능성이 있음을 확인하였다.

References

- [1] Park. K. H., Lee. J. Y., Hong. S. H., Choi. S. H., Hon. S. C., "A Study on the Deactivation of Commercial DeNO_x Catalyst in Fired Power Plant", *The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.19, No.4, pp.376-381, Aug. 2008.
- [2] Hong. S. Ch., Kwon. D. W., "Selective Catalytic Reduction (SCR) Technology Trends for the Nitrogen Oxide Removal of Exhaust Gas", *Korea Ind. Chem. News*, Vol.19, No.5, pp.12-24, 2016.
- [3] Ko. S. J., Kim. J. H., Kim. M. J., Cho. Y. B., Park. Y. K., "Characteristics of SCR-Catalytic with de-NO_x System in Thermal Power plants", *Journal of the Korean Applied Science and Technology*, Vol.30, No.3, pp.451-460, Sep. 2013.
- [4] Na. W. J., Park. Y. J., Bang. H. S., Bang. J. S., Park. H. K., "Effect of SO₂ on NO_x Removal Performance in Low Temperature Region over V₂O₅-Sb₂O₃/TiO₂ SCR Catalyst Washcoated on the Metal Foam", *Clean Technology*, Vol.22, No.2, pp.132-138, Jun. 2016.
- [5] Ha. H. P., Maddigapu. P. R., Pullur. A. K., Lee. K. J., Jung. S. H., "SO₂ resistant antimony promoted V₂O₅/TiO₂ catalyst for NH₃-SCR of NO_x at low temperatures" *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol.78, No.3-4, pp.301-308, Feb. 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2007.09.012>
- [6] Kim. S. B., Choi. G. R., Shin. J. H., Hong. S. Ch., "Selective Catalytic Reduction (SCR) of NO_x with NH₃ on Sb-promoted VWTi Catalysts", *The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.32, No.1, pp.35-41, Feb. 2021.
- [7] Kwon. D. W., Choi. H. J., Park. K. H., Hong. S. C., "A Study on Characterization for Low Temperature SCR Reaction by Mn/TiO₂ Catalysts with Using a Various Commercial TiO₂ Support", *The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.23, No.2, pp.190-194, Apr. 2012.
- [8] Xiaojiang. Y., Tingting K., Li C., Shimin. D., Fumo. Y., Lin. D., "Enhanced low-temperature NH₃-SCR performance of MnO_x/CeO₂ catalysts by optimal solvent effect", *Applied Surface Science*, Vol.420, pp.407-415, Oct. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.05.156>
- [9] Hongtai. Z., Liyun. S., Kai. L., Rui. W., Wenge. Q., Hong. H., "Low-Temperature SCR Catalyst Development and Industrial Applications in China", *Catalysts*, Vol.12, No.3, pp.341, Mar. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.3390/catal12030341>
- [10] Choi. S. K., Choi. S. W., "Low-Temperature Selective Catalytic Reduction of No with NH₃ over Mn-V₂O₅/TiO₂", *Journal of Environmental Science International*, Vol.15, No.4, pp.333-340, Apr. 2006.
DOI: <https://doi.org/10.5322/JES.2006.15.4.333>
- [11] Na. W. J., Park. H. K., "A Study on the Low Temperature SCR Catalyst Wash-coated on Metal Corrugated Substrate for Application of Steel Mill De-NO_x Process", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.23, No.8, pp.506-512, Aug. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.8.506>
- [12] Ye. B. R., Jeong. B. R., Lee. M. J., Kim. T. H., Park. S. S., Jung. J. I., "Recent trends in vanadium-based SCR catalysts for NO_x reduction in industrial applications: stationary sources", *Nano Convergence*, Vol.9, No.1, pp.51, Nov. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1186/s40580-022-00341-7>
- [13] Yi. L., Zheng. L., Brian. M., Arvind. V. H., Huiling. L., Behnam. B., "Chemical deactivation of commercial vanadium SCR catalysts in diesel emission control application", *Chemical Engineering Journal*, Vol.287, pp.680-690, Mar. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.043>
- [14] Seo. C. K., "Effect of Containing Promoter on SCR Catalysts", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.9, pp.474-481, Sep. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.9.474>
- [15] Park. S. H., Lee. K. Y., Cho. S. J., "Catalytic Technology for NO_x Abatement using Ammonia", *Clean Technology*, Vol.22, No.4, pp.211-224, Dec. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.7464/ksct.2016.22.4.211>
- [16] Kim. M. H., "Formation of N₂O in NH₃-SCR DeNO_xing Reaction with V₂O₅/TiO₂-Based Catalysts for Fossil Fuels-Fired Power Stations", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol.51, No.2, pp.163-170, Apr. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.9713/kcer.2013.51.2.163>
- [17] Jaegers. N. R., Lai. J. K., He. Y., Walter. E., Dixon. D. A., "Mechanism by which Tungsten Oxide Promotes the Activity of Supported V₂O₅/TiO₂ Catalysts for NO_x

Abatement: Structural Effects Revealed by 51V MAS NMR Spectroscopy”, *Angewandte Chemie*, Vol.131, No.36, pp.12739-12746, Jul. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1002/ange.201904503>

- [18] Sim. G. S., Jang. B. J., Lee. S. J., Hong. S. C., “A Study on the Poisoning and Tolerance from SO₂ of V/TiO₂ Catalyst for SCR”, *Korean Society Of Environmental Engineers*, pp.739-744, Oct. 2011.
- [19] Park. K. H., Cha. W. S., “Effect of Vanadium Oxide Loading on SCR Activity and SO₂ Resistance over TiO₂-Supported V₂O₅ Commercial De-NOx Catalysts”, *Applied Chemistry for Engineering*, Vol.23, No.5, pp.485-489, Oct. 2012.
- [20] Guido. B., Luca. L., Gianguido. R., Francesco. B., “Chemical and mechanistic aspects of the selective catalytic reduction of NOx by ammonia over oxide catalysts: A review”, *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol.18, No.1-2, pp.1-36, Sep. 1998.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(98\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(98)00040-X)
- [21] Seo. P. W., Sim. G. S., Hong. S. C., “Study on the characteristic & modification of V/TiO₂ Catalyst for SCR in low temperature”, *Korean Society Of Environmental Engineers*, pp.1244, Oct. 2004.
- [22] Lee. C. H., Choi. J. H., Kim. M. S., Seo. B. H., Kang. C. H., “An Optimization Study on a Low-temperature De-NOx Catalyst Coated on Metallic Monolith for Steel Plant Applications”, *Clean Technology*, Vol.27, No.4, pp.332-340, Dec. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.7464/ksct.2021.27.4.332>
- [23] Na. W. J., Park. H. K., “A Study on the NOx 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>

주 은 영(Eun-Young Ju)

[준회원]



- 2023년 2월 : 한서대학교 화학공학 (공학사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학과 (석사과정)

<관심분야>

촉매, 환경오염제어, 에너지

마 동 민(Dong-Min Ma)

[준회원]



- 2023년 2월 : 한서대학교 화학공학과 (공학사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학과 (석사과정)

<관심분야>

촉매, 환경오염제어, 에너지

강 다 현(Da-Hyeon Kang)

[준회원]



- 2023년 2월 : 한서대학교 화학공학과 (공학사)

<관심분야>

환경과학

김 미 라(Mi-Ra Kim)

[준회원]



- 2023년 2월 : 한서대학교 화학공학과 (공학사)

<관심분야>

화학공정, 환경과학, 분석화학

최 동 석(Dong-Seok Choi)

[정회원]



- 2023년 2월 : 한서대학교 화학공학
학과 (공학사)
- 2023년 3월 : 폴리피아 연구소

<관심분야>
촉매, 고분자

나 우 진(Woo-Jin Na)

[정회원]



- 2012년 8월 : 한서대학교 화학공학
학과 (공학석사)
- 2020년 8월 : 한서대학교 화학공학
학과(촉매공학) (공학박사)
- 2015년 6월 ~ 2022년 1월 : 한서
대학교 촉매공정기술연구원 선임
연구원
- 2022년 2월 ~ 현재 : 한서대학교 연구교수

<관심분야>
환경, 에너지, 촉매, 재자원화기술

박 해 경(Hea-Kyung Park)

[정회원]



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

<관심분야>
환경, 에너지, 촉매, 재자원화기술