

열병합발전소 적용을 위한 Metal foam SCR촉매의 공간속도와 바인더 함량에 따른 NO_x 저감에 관한 연구

나우진* · 박해경†

한서대학교 화학공학과
(2019년 1월 7일 접수: 2019년 3월 28일 수정: 2019년 3월 29일 채택)

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

Woo-Jin Na · Hea-Kyung Park†

*Department of Chemical Engineering, Hanseo University
46 Hanseo 1-ro, Heami-myun, Seosan, Chungnam 31962, Korea
(Received January 7, 2019; Revised March 28, 2019; Accepted March 29, 2019)*

요 약 : 본 연구에서는 기존 상용 SCR 촉매보다 비표면적, 경량성 및 온도 응답성이 우수한 SCR 촉매의 개발을 목적으로 바나듐과 텅스텐의 함량과 바인더의 첨가량을 달리하여 Metal foam 형태의 지지체에 코팅하여 SCR 촉매를 제조한 후, 실험실 규모의 마이크로 상압반응기상에서 공간속도별로 NO_x 저감 성능을 측정하였다. 촉매의 특성은 Porosimeter, SEM(scanning electron microscope), EDX(energy dispersive x-ray spectrometer) 및 ICP(inductively coupled plasma), 실체현미경(Stereomicroscope) 기기를 이용하여 분석하였다. 연구 결과 NO_x 저감 성능은 공간속도가 증가할수록 감소하였고, 바나듐과 텅스텐의 함량이 3.5 wt.% 일 때 가장 우수한 것으로 확인하였다. 또한, 바인더 첨가량이 많을수록 NO_x 저감 성능이 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 촉매 표면상의 활성점 수가 바인더에 의해 점유되어 감소된 것에 따른 것으로 판단된다. 또한 표면 코팅 상태 분석을 통하여 바인더의 첨가량이 적절히 조절 되어야 함을 알 수 있었다.

주제어 : SCR촉매, NO_x, 메탈폼, 워시코팅

Abstract : To develop a high performance SCR catalyst which has better specific surface area, lightness of weight and fast temperature response than those of existing commercial SCR catalyst, metal foam type SCR catalysts were prepared by washcoating with vanadium, tungsten and binder.

†Corresponding author
(E-mail: jhkp@hanseo.ac.kr)

The de-NO_x performance test of the prepared catalysts was carried out on atmospheric micro-test unit at lab. scale according to space velocity variation and temperature change, and the characteristics of them were analyzed by Porosimeter, SEM(scanning electron microscope), EDX(energy dispersive x-ray spectrometer), ICP(inductively coupled plasma) and Stereomicroscope. The NO_x reduction performance decreased as the space velocity increased and was found to be the best at 3.5 wt.% contents of the vanadium and tungsten. It was found that the larger amount of binder was added, the worse the NO_x reduction performance was, which was considered to be that the number of active sites of the prepared catalyst surface was occupied by the binder. We found that the amount of binder to be added to prepare the catalyst should be properly controlled by the condition of coated catalyst surface.

Keywords : SCR catalyst, NO_x, Metal foam, Wash coating

1. 서론

산업의 고도화로 인해 지속적으로 전력수요는 증가되고 있는 한편 CO₂ 배출량은 감소가 요구됨에 따라 열병합 발전소 설치가 증가하고 있다. 열병합 발전 시스템은 산업체, 건축물 등에서 보일러 가동 및 자체 발전시설을 이용하여 일차적으로 전력을 생산한 후 배출되는 열을 회수하여 이용한다. LNG를 연료로 사용하는 열병합 발전소에서는 일반적으로 질소산화물 배출 농도도 낮고 SO_x 및 기타 환경오염물질이 거의 배출되지 않아 청정 발전설비로 인식되고 있지만, 환경규제가 날로 강화되고 있어 질소산화물 또한 환경규제를 피하기 어려워진 상황에 처하게 되었다. 국내의 질소산화물 배출규제는 최근 농도규제에서 총량 규제로 변경되었고, 수도권 대기총량 유상 할당제가 시작됨에 따라 노후화된 열병합 발전소는 질소산화물을 처리하는 시스템의 도입이 필요하게 되었다. 질소산화물을 높은 효율로 제어하는 기술로는 NH₃ 및 Urea를 환원제로 이용한 선택적 촉매 환원법(Selective Catalytic Reduction, SCR)이 많이 쓰이고 있으며[1,2,3,4,5,6], 상용화되어 있는 SCR 촉매는 압출성형(Honeycomb type), 판형(Plate type) 형태의 촉매가 많이 사용되고 있다.[7]

압출성형 SCR 촉매는 열병합발전소 및 소각장, 석탄화력발전소에서 대부분 사용되고 무게가 무겁고 온도응답성이 느린 단점이 있으며 [8,9,10], 판형 SCR 촉매는 배가스 중 dust가 많은 석탄 화력에서 주로 사용되지만, 비표면적이 다른 촉매보다 작은 단점으로 인하여 동일량의

배가스를 처리하더라도 다른 촉매에 비해 많은 촉매량 및 넓은 촉매 설치 공간이 필요하다.[11,12,13] 하지만 노후화된 열병합발전소는 SCR 시스템을 적용할 적정공간이 확보되어 있지 않기 때문에 주로 HRSG(Heat Recovery steam generator) 내부의 열교환기 튜브사이에 설치하여야 하므로 가볍고 적은 촉매 부피로 상용촉매와 동일 성능을 확보 가능한 촉매가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 상용 SCR 촉매보다 비표면적이 높아 상대적으로 적은 부피의 촉매의 사용으로 협소한 설치공간에도 설치가 가능하며, 경량성, 기계적 강도 및 열전도도 특성이 우수한 금속재질의 metal foam 형태의 지지체를 사용하여 촉매를 제조하였다.[14,15,16,17] 또한 사용 후 수명이 다한 촉매를 재제조할 때에도 metal foam은 여러번 재제조가 가능하여 새로운 신제품으로 교체하지 않아도 되는 큰 경제적 이점이 있다.

본 연구에서는 metal foam 지지체를 사용하여 SCR 시스템이 갖춰져 있지 않은 노후화된 열병합 발전소의 열교환기 온도영역(270~310 °C)에서 NO_x 저감 성능이 우수한 SCR촉매의 개발을 목적으로 V₂O₅-WO₃/TiO₂ 형태로 촉매 Slurry를 제조하였으며, 여기에 중요한 워시코팅 조건인 바나듐 및 텅스텐 함량(3, 3.5, 4 wt.%)과 바인더의 함량(10, 15, 20 wt.%)별로 각각 제조하여 metal foam에 워시코팅 하였다.[18,19,20,21] 촉매의 NO_x 저감 성능은 lab. scale의 상압반응기를 통해 확인하였고, 제조한 촉매의 물성을 확인하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 촉매 제조

본 실험에 사용된 metal foam 지지체는 (주)알란탄사의 metal foam 3,000 μm 이며, 코팅 slurry 시료는 TiO_2 (99 %, Cristal Global Co., Ltd. in Saudi Arabia)와 V_2O_5 (99 %, Daejung Chemical Co., Ltd. in Korea), WO_3 (99 %, Sigma-Aldrich Co., Ltd. in Germany), 바인더 Silicasol 30 % solution(99 %, S-Chemtech, Co., Ltd. in Korea), 분산제 dispexA40(83%, BASF Co., Ltd. in Germany), 유기산 oxalic acid(99.5 %, Daejung Chemical Co., Ltd. in Korea), 증류수를 사용하였다. 증류수에 WO_3 를 온도 60 $^\circ\text{C}$ 로 유지시켜 용해한 후, V_2O_5 와 oxalic acid를 추가 투입하여 1시간 교반한 후 TiO_2 에 투입하였다. 그 후 30분 동안 교반하여 코팅 slurry를 제조한 후 관례적인 워시코팅 방식(dip-sipping)으로 metal foam 지지체에 코팅하였다.

NO_x 저감 시험을 위한 sample은 metal foam을 2.85 cm \times 2.85 cm \times 0.45 cm로 총 36개를 재단하였고, 코팅 slurry는 TiO_2 를 기준으로 V_2O_5 와 WO_3 를 3.0, 3.5, 4.0 wt.%로 각각 제조한 후, 바인더를 TiO_2 기준으로 10, 15, 20 wt.%를 첨가하여 150 g/L 코팅량으로 각각 4개씩 워시코팅을 하였다. 워시코팅된 촉매를 120 $^\circ\text{C}$ 에서 1시간 동안 건조 후, 500 $^\circ\text{C}$ 에서 3시간 동안 소성을 진행하여 촉매를 준비하였다. 제조된 촉매의 시료명은 Table 1에 나타내었다.

2.2. 물성평가

촉매 코팅하기 전에 slurry를 소성한 샘플을 대상으로 기공을 측정기(Porosimeter, Auto Pore IV 9520, Micromeritics, in USA)로 기공크기를 측정하였고, 표면성분 Ti, V, W 등의 확인은 SEM-EDX (MIRA3, TESCAN, in Czech), ICP(Inductively coupled plasma optical emission spectrometer: ICP-OES, 5300DV, PerkinElmer, in USA)로 분석하였으며, 코팅된 촉매의 표면 변화를 알아보기 위하여 실체현미경(ST-43, Microscopes Inc, in USA)으로 분석을 수행하였다. 기공을 측정은 0~60,000 psia 범위에서 측정하였고, 실체 현미경은 60배율로 샘플을 촬영하였다.

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 14.63 cm^3 이고, 모든 가스의 흐름은 MFC (Mass Flow Controller, F-100C, Bronkhorst Co., Ltd. in UK)로 제어를 하였으며, 온도는 PID controller를 사용하여 열병합발전소 열교환기의 온도범위인 270~310 $^\circ\text{C}$ 의 범위로 조절하였다. 반응가스의 조성은 Gas analyzer(Greenline D max. II, 9000, Eurotron Co., Ltd. in UK)를 사용 분석하였다. NO gas(10 % in N_2 , Sung kang specaility gas, in Korea)는 50 ppm (v/v)을 정량적으로 흘려주었으며, NH_3 gas(10 % in N_2 , Sung kang specaility gas, in Korea)는 NO 의 농도와 동일 몰비로 MFC를 이용하여 유입시켰다.

Table 1. Notation of processing condition

Catalyst notation	conditions
MVW3-A	V_2O_5 3 wt.%, WO_3 3 wt.%, Binder 10 wt.%
MVW3-B	V_2O_5 3 wt.%, WO_3 3 wt.%, Binder 15 wt.%
MVW3-C	V_2O_5 3 wt.%, WO_3 3 wt.%, Binder 20 wt.%
MVW3.5-A	V_2O_5 3.5 wt.%, WO_3 3.5 wt.%, Binder 10 wt.%
MVW3.5-B	V_2O_5 3.5 wt.%, WO_3 3.5 wt.%, Binder 15 wt.%
MVW3.5-C	V_2O_5 3.5 wt.%, WO_3 3.5 wt.%, Binder 20 wt.%
MVW4-A	V_2O_5 4 wt.%, WO_3 4 wt.%, Binder 10 wt.%
MVW4-B	V_2O_5 4 wt.%, WO_3 4 wt.%, Binder 15 wt.%
MVW4-C	V_2O_5 4 wt.%, WO_3 4 wt.%, Binder 20 wt.%

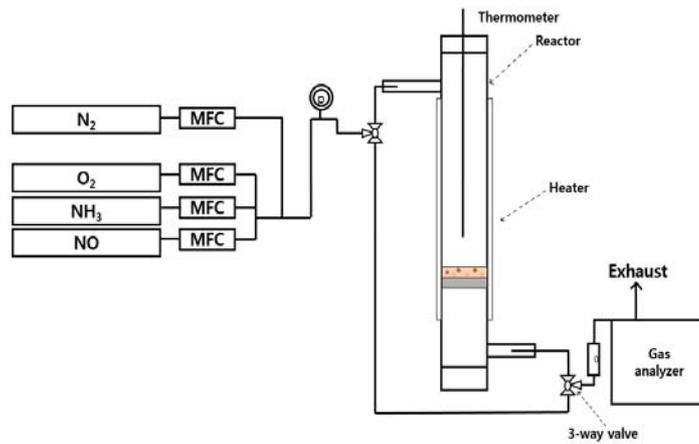


Fig. 1. Schematic diagram of catalyst performance test unit.

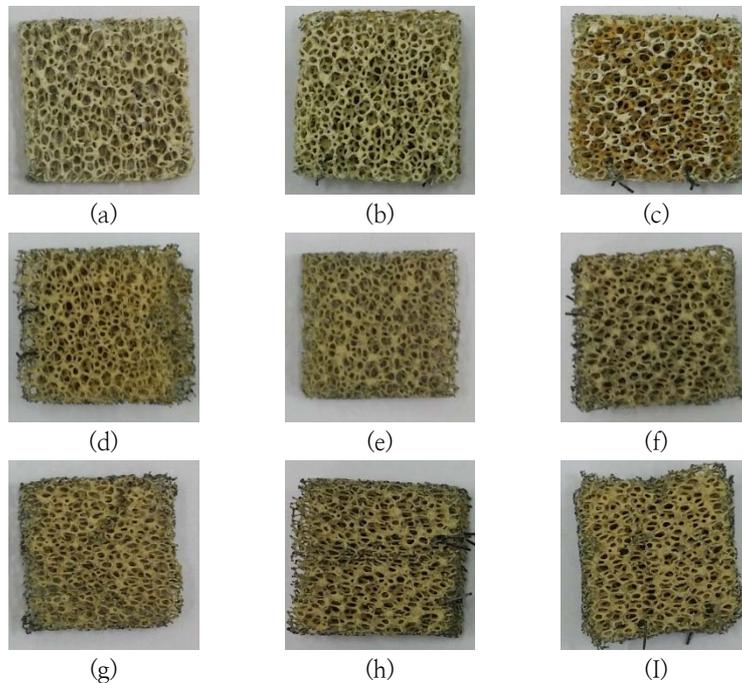


Fig. 2. Prepared metal foam catalysts.

(a) MVW3-A, (b) MVW3-B, (c) MVW3-C, (d) MVW3.5-A, (e) MVW3.5-B, (f) MVW3.5-C, (g) MVW4-A, (h) MVW4-B, (i) MVW4-C

O₂ gas(99.9 %, Sung kang specaility gas, in Korea)의 농도는 12 % (v/v)를 유지하였으며, N₂ gas(99.9 %, Sung kang specaility gas, in Korea)로 총 유량이 유지되도록 하였다. 공간속도를 30,000~70,000 hr⁻¹ 으로 설정하고, 각 온

도까지 일정 속도로 승온 한 후 30분 의 안정화 시간을 두어 온도 및 유량이 안정화가 된 후 성능을 측정하였다. 본 실험 조건은 Table 2에 나타내었고 사용된 촉매는 Fig. 2에 나타내었다.

Table 2. Experimental conditions of NOx reduction measurement

		Conditions		
Catalyst Volume(cm ³)		14.63		
S.V(hr ⁻¹)	30,000	50,000	70,000	
NO(ppm)		50		
O ₂ (%)		12		
NH ₃ /NO mole ratio		1		
N ₂		balance		
Temperature(°C)		270~310		

3. 결과 및 고찰

3.1. 제조된 촉매의 반응활성 평가

V₂O₅와 WO₃ 함침량을 3~4 wt.%로 달리하여 제조한 metal foam 촉매를 대상으로 각 촉매의 바인더 함량과 S.V 조건에 따른 NOx 저감 성능 측정 결과를 Fig. 3~11에 나타내었다. Fig. 3~5은 S.V 30,000~70,000 hr⁻¹에서 바인더의 함량이 10 wt.% 일 때 V₂O₅와 WO₃의 함침량에 따른 NOx 저감 성능을 종합적으로 비교하였고, S.V가 증가함에 따라 NOx 저감 성능은 감소하였으며, MVW3.5-A 촉매가 가장 높은 NOx 저감 성능을 보여주었다. Fig. 6~8은 바인더의 함량이 15 wt.% 일 때 S.V 조건에 따른 NOx 저감 성능을 종합적으로 비교하였고, 바인더 10 wt.% 결과와 같이 MVW3.5-B 촉매가 다른 촉매보다 NOx 저감 성능이 가장 높게 나왔다. Fig. 9~11은 바인더의 함량이 20 wt.% 일 때의 NOx 저감 성능을 비교하였으며, 바인더 10 wt.% 와 15 wt.% 일 때와 같이 MVW3.5-C 촉매가 가장 우수한 NOx 저감 성능을 보여주었지만 Fig. 12~14 와 같이 MVW3.5-A, MVW3.5-B 보다 가장 낮은 NOx 저감 성능을 나타내었다. 이러한 결과로부터 270~310 °C 온도영역에서는 V₂O₅와 WO₃ 함침량이 3.5 wt.% 일때 가장 좋은 NOx 저감 성능을 보여주는 것을 확인 할 수 있었고, 활성 성분의 함침량이 같더라도 바인더의 함량이 많아짐에 따라 NOx 저감 성능은 줄어드는 것을 볼 수 있었다.

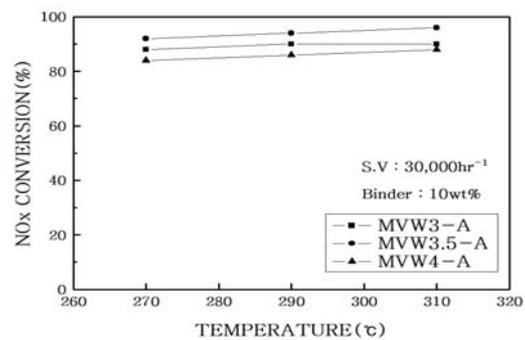


Fig. 3. Conversion of NOx at different V₂O₅ & WO₃ amounts of prepared catalyst. (Binder : 10wt.%, S.V : 30,000hr⁻¹)

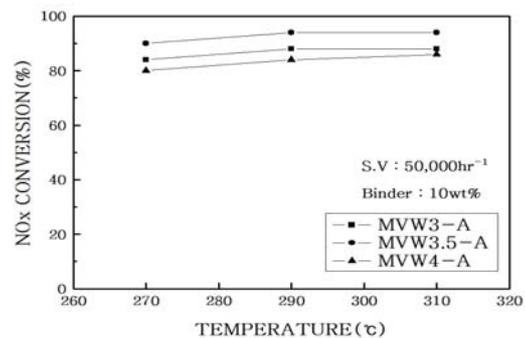


Fig. 4. Conversion of NOx at different V₂O₅ & WO₃ amounts of prepared catalyst. (Binder : 10wt.%, S.V : 50,000hr⁻¹)

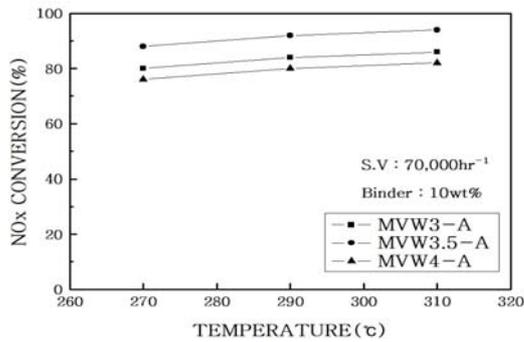


Fig. 5. Conversion of NOx at different V₂O₅ & WO₃ amounts of prepared catalyst. (Binder : 10wt.%, S.V : 70,000hr⁻¹)

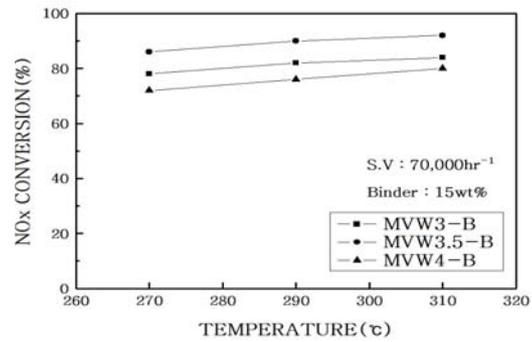


Fig. 8. Conversion of NOx at different V₂O₅ & WO₃ amounts of prepared catalyst. (Binder : 15wt.%, S.V : 70,000hr⁻¹)

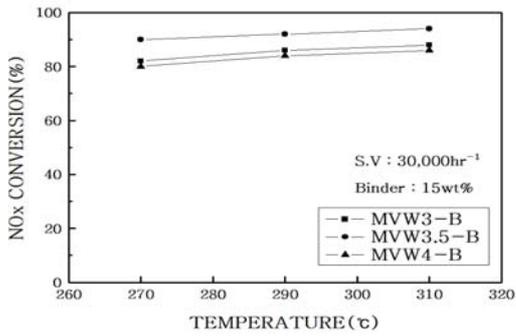


Fig. 6. Conversion of NOx at different V₂O₅ & WO₃ amounts of prepared catalyst. (Binder : 15wt.%, S.V : 30,000hr⁻¹)

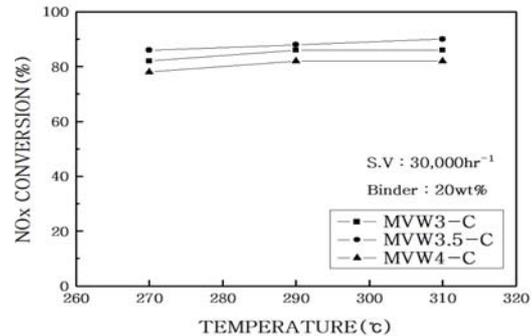


Fig. 9. Conversion of NOx at different V₂O₅ & WO₃ amounts of prepared catalyst. (Binder : 20wt.%, S.V : 30,000hr⁻¹)

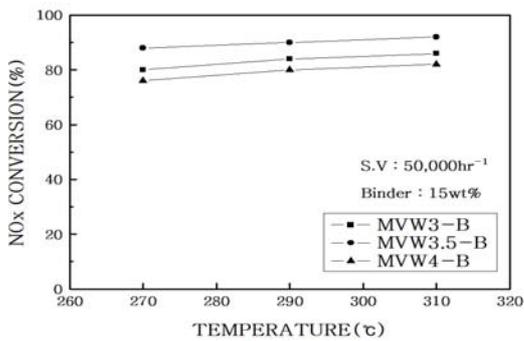


Fig. 7. Conversion of NOx at different V₂O₅ & WO₃ amounts of prepared catalyst. (Binder : 15wt.%, S.V : 50,000hr⁻¹)

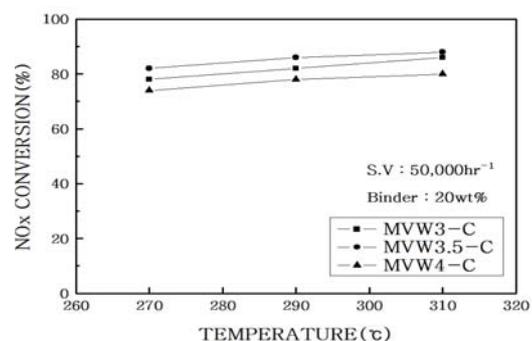


Fig. 10. Conversion of NOx at different V₂O₅ & WO₃ amounts of prepared catalyst. (Binder : 20wt.%, S.V : 50,000hr⁻¹)

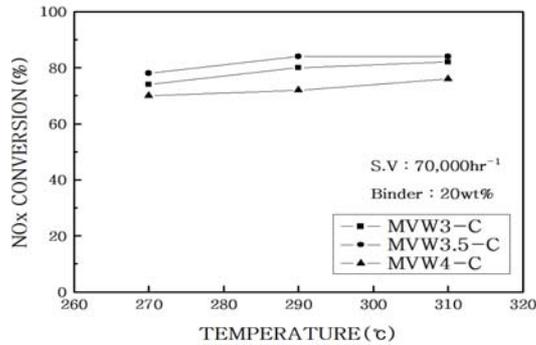


Fig. 11. Conversion of NOx at different V₂O₅ & WO₃ amounts of prepared catalyst. (Binder : 20wt.%, S.V : 70,000hr⁻¹)

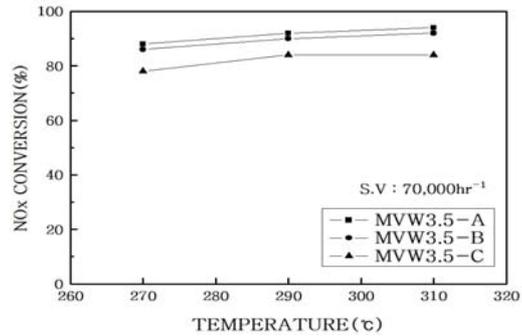


Fig. 14. Conversion of NOx at different binder amounts of prepared catalyst. (V₂O₅: 3.5 wt.%, WO₃: 3.5 wt.%, S.V : 70,000hr⁻¹)

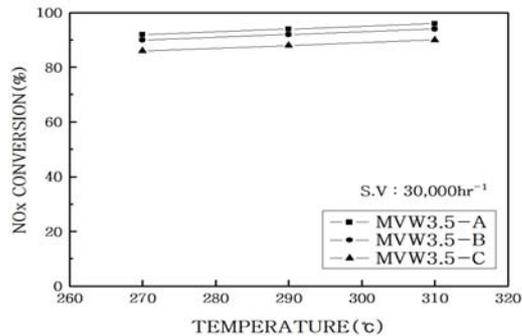


Fig. 12. Conversion of NOx at different binder amounts of prepared catalyst. (V₂O₅: 3.5 wt.%, WO₃: 3.5 wt.%, S.V : 30,000hr⁻¹)

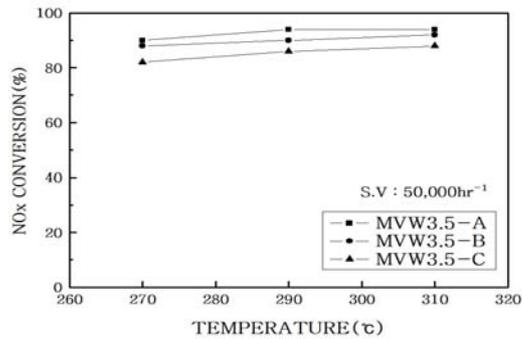


Fig. 13. Conversion of NOx at different binder amount of prepared catalyst. (V₂O₅: 3.5 wt.%, WO₃: 3.5 wt.%, S.V : 50,000hr⁻¹)

3.2. 촉매의 기공율 분석

촉매의 기공율을 Porosimeter로 측정된 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 보는 것과 같이 촉매의 기공율은 바인더의 첨가량이 적을수록 증가하였다. V₂O₅ 및 WO₃ 함침량에 관계없이 MVW-A를 기준하여 MVW-C의 기공율은 큰 폭의 변화를 보였으며, 이는 바인더의 첨가량이 증가할수록 촉매의 기공이 좁아지는 것으로 판단되며, 본 연구에서 수행한 NOx 저감 성능 측정 결과와도 부합됨을 확인 하였다.

Table 3. Porosimeter analysis results of the prepared catalyst

Items	Porosity(%)
MVW3-A	73.23
MVW3-B	71.04
MVW3-C	68.51
MVW3.5-A	74.61
MVW3.5-B	72.24
MVW3.5-C	69.68
MVW4-A	73.14
MVW4-B	70.85
MVW4-C	67.72

3.4. 촉매의 표면성분 분석

V₂O₅ 및 WO₃의 함침량과 바인더 첨가량에 따라 제조된 촉매의 표면 변화를 관찰하기 위하여 SEM 분석을 수행하였고, Fig. 15에 나타내었다.

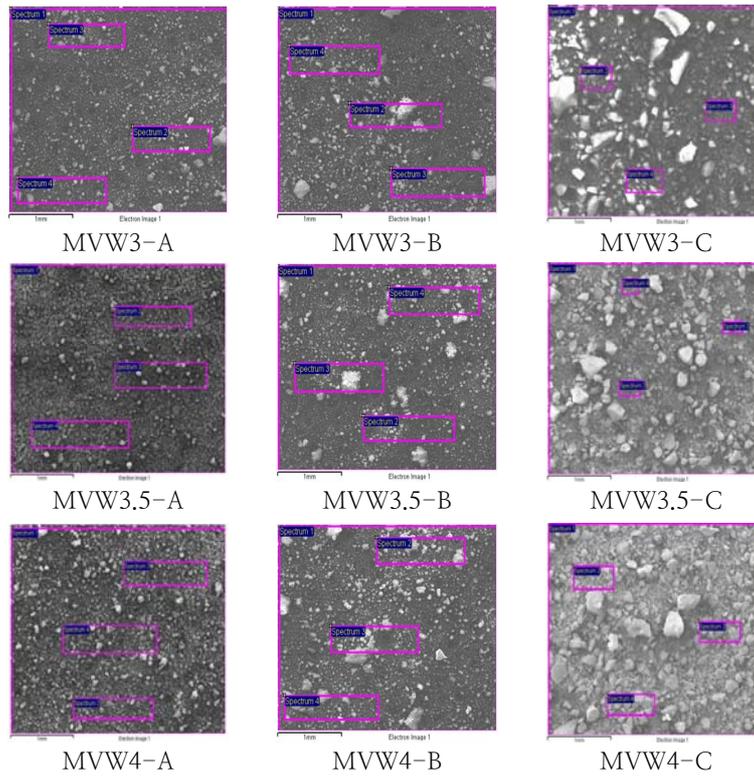


Fig. 15. SEM analysis results of the prepared catalysts.

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

Catalyst	O	Si	Ti	V	W
MVW3-A	48.22~61.74	5.31~6.24	26.41~30.23	1.44~2.89	1.28~3.09
MVW3-B	46.71~60.83	4.98~5.75	26.18~31.62	1.59~3.05	1.39~2.88
MVW3-C	47.85~61.48	5.09~6.21	25.81~30.84	1.68~2.97	1.49~3.04
MVW3.5-A	40.52~55.42	6.48~8.09	27.52~35.52	1.84~3.45	2.04~3.52
MVW3.5-B	39.84~53.74	7.10~8.34	27.19~34.67	1.96~3.59	2.11~3.40
MVW3.5-C	39.96~56.85	7.32~8.57	28.22~34.98	2.21~3.47	1.95~3.61
MVW4-A	33.07~49.84	10.86~12.11	29.42~42.13	2.65~4.09	2.71~4.19
MVW4-B	33.81~50.31	10.54~12.26	27.85~41.67	2.49~3.92	2.64~4.11
MVW4-C	34.19~48.92	10.61~12.69	29.91~40.96	2.74~4.10	2.82~4.04

촉매의 표면 성분분석을 위하여 촉매 코팅하기 전에 slurry를 소성하여 준비된 샘플을 대상으로 EDX와 ICP 분석을 수행하여 그 결과를 Table 4 ~5에 나타내었다. SEM 분석결과 바인더의 첨가량이 증가할수록 표면 성분의 크기가 커짐을 확인하였고, 주 활성성분인 V의 함침량은 MVW4-A

촉매가 가장 높게 나왔지만 NO_x 저감 성능 결과를 확인하면 V의 함침량과 관계없이 MVW3.5-A 촉매가 NO_x 저감 성능이 가장 높게 나왔으나, MVW3.5-B 및 MVW3.5-C 촉매는 MVW3.5-A 촉매보다 NO_x 저감 성능이 조금씩 낮게 나왔다. 이는 온도 영역에 따라 촉매

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

Element	Catalyst	Si	Ti	V	W
	MVW3-A	11.04	49.32	2.88	3.29
	MVW3-B	14.98	47.62	2.91	3.14
	MVW3-C	20.93	43.94	2.99	3.17
	MVW3.5-A	10.85	48.78	3.49	3.59
	MVW3.5-B	15.12	47.26	3.52	3.62
	MVW3.5-C	20.42	43.39	3.55	3.54
	MVW4-A	11.24	49.19	4.01	3.95
	MVW4-B	15.09	47.09	3.91	4.02
	MVW4-C	19.98	43.02	3.97	4.09

활성성분의 함량이 다르게 요구되지만 같은 양의 촉매 활성성분이라도 바인더의 첨가량이 증가하면 촉매 표면이 바인더에 의해 점유되어 반응하는 활성점의 수가 줄어들어 NO_x 저감 성능에 영향을 준 것으로 보이며 본 연구에서 수행한 NO_x 저감 성능 측정 결과와도 부합됨을 확인하였다.

3.5. 촉매의 실체현미경 분석

바인더 첨가량별로 코팅된 촉매의 표면 상태의 변화를 구체적으로 관찰하기 위하여 실체현미경 분석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 16에 나타내었다. NO_x 저감 성능이 높았던 MVW-A 촉매들의 코팅 상태를 보면 코팅이 불균일하게 된 것을 볼 수 있으며, 촉매 성분이 떨어져 나간 것을 볼 수 있다. 이는 NO_x 저감 성능이 우수하여도 촉매의 내구성이 떨어짐으로 시간이 흐름에 따라 NO_x 저감 성능에 문제가 될 수 있다. MVW-C의 촉매는 표면 상태가 매우 균일하게 코팅되었지만 NO_x 저감 성능이 다른 촉매에 비해 매우 떨어지는 것을 본 연구에서 확인하였다. MVW-B 촉매는 MVW-A 촉매보다 NO_x 저감 성능은 미미하게 떨어지지만 표면의 코팅 상태가 MVW-A 촉매보다 안정적이므로 촉매의 내구성과 NO_x 저감 성능을 만족시키기 위해서는 바인더 첨가량 조절도 필요함을 알 수 있었다.

4. 결론

Metal foam 지지체를 사용하여 V₂O₅ 및 WO₃ 함침량과 바인더 첨가량에 따른 촉매의 물성평가

및 NO_x 저감 성능을 열병합발전소 배가스 조건에서 공간속도에 따라 확인함으로써 아래와 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) EDX와 ICP의 결과로 주 활성성분인 V의 함침량은 MVW4 촉매들이 가장 높게 나왔지만 NO_x 저감 성능 결과를 확인하면 V의 함침량에 관계없이 본 연구의 온도영역인 270~310 °C에서 MVW3.5 촉매들이 가장 좋은 NO_x 저감 성능을 보여주었다. 또한, MVW3.5 촉매 중에서도 바인더의 함량이 가장 적었던 MVW3.5-A 촉매가 가장 좋은 NO_x 저감 성능을 보여주었다. 이는 온도영역에 따라 촉매의 활성 성분 함량이 다르게 요구되지만 같은 양의 활성 성분이라도 바인더의 첨가량이 증가하면 촉매 표면의 활성점이 바인더에 의해 점유되어 반응하는 활성점의 수가 줄어들어 NO_x 저감 성능이 낮아진 것으로 추정할 수 있다.
- 2) 실체현미경의 결과로 촉매의 표면 코팅 상태는 활성 성분의 함량과 관계없이 바인더의 첨가량이 가장 많았던 MVW-C 촉매들이 균일하게 코팅된 것을 알 수 있었고, MVW-B 촉매는 MVW-C 촉매보다 균일성이 미미하게 떨어졌다. 또한, NO_x 저감 성능이 가장 높았던 MVW-A 촉매들은 표면 코팅 상태가 균일하지 못하고 코팅 성분도 떨어져 나간 것을 볼 수 있었다. 이는 촉매의 내구성과 NO_x 저감 성능을 만족시키기 위해서는 바인더의 첨가량도 적절히 조절해야 됨을 알 수 있었다.

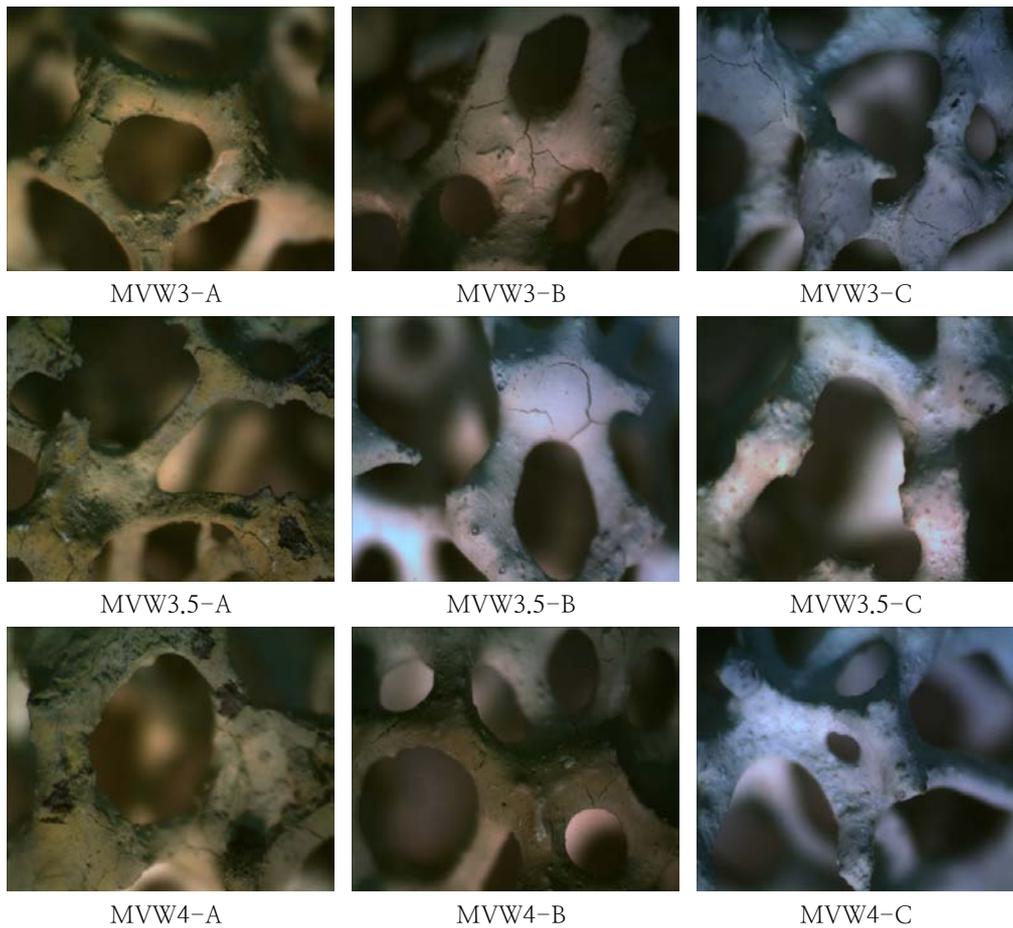


Fig. 16. Stereomicroscope analysis results of the prepared catalysts.(×60)

3) Metal foam 촉매는 다른 SCR 촉매보다 충전 부피를 획기적으로 줄일 수 있으며, 구조적인 특성으로 인해 공간속도가 증가하여도 우수한 NO_x 저감 성능을 보여주었다. 이는 촉매 설치 공간이 협소한 노후화된 열병합발전소에 적합한 SCR촉매로 이용 가능성은 충분할 것으로 사료된다.

References

1. S. J. Lee, S. C. Hong, "Deactivation and Regeneration of a Used De-NO_x SCR Catalyst for Wastes Incinerator," *J. Korean Ind. Eng. Chem*, Vol.19, No.3 pp. 259-263, (2008).
2. J. B. Lee, D. W. Kim, C. Y. Lee, "Deactivation of SCR Catalysts Applied in Power Plants," *Appl. Chem. Eng*, Vol.21, No.1 pp. 104~110, (2010).
3. 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, (2011).
4. M. A. L. Vargas, M. Casanova, A. Trovarelli, G. Busca, "An IR Study of

- Thermally Stable V₂O₅-WO₃/TiO₂ SCR Catalysts Modified with Silica and Rare-earths (Ce, Tb, Er),” *Appl. Catal. B : Environ*, Vol.75, pp. 303-304, (2007).
5. M. Kobayashi, K. Miyoshi, “WO₃-TiO₂ Monolithic Catalysts for High Temperature SCR of NO by NH₃ : Influence of Preparation Method on Structural and Physico-Chemical Properties, Activity and durability,” *Appl. Catal. B : Environ*, Vol.72, pp. 253-261, (2007).
 6. H. Bosch, F. Janssen, “Catalytic Reduction of Nitrogen Oxides—a Review on the Fundamentals and Technology,” *Catal. Today*, Vol.2, pp. 369-532, (1988).
 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, (2005).
 8. L. Lietti, “Reactivity of V₂O₅-WO₃/TiO₂ de-NO_x Catalysts by Transient Methods,” *Appl. Catal. B : Environ*, Vol.10, pp. 281-297, (1996).
 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, pp. 185-206, (1995).
 10. M. Inomata, K. Mori, A. Miyamoto, T. Ui, Y. Murakami, “Structures of Supported Vanadium Oxide Catalysts. 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. 754-761, (1983).
 11. B. J. Jang, “The Research of Reaction Characteristic and the Improvement of Efficiency of TiO₂ Catalyst for SCR in High Temperature,” *M.S. Thesis, Kyonggi University, Suwon*, (2009).
 12. S. M. Lee, “A Study on the Reaction Characteristics and Mechanism of the SCR over W/TiO₂ Catalyst at High Temperature,” *M.S. Thesis, Kyonggi University, Suwon*, (2010).
 13. 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. 225-261, (2007).
 14. C. M. Kim, G. B. Cho, D. S. Kim, Y. I. Jeong, K. O. Oh, B. S. Shin, M. Y. Kim, “A Study on the NO_x Reduction Performance of a Metal foam SCR Catalyst,” *KSAE 2009 Annual Conference*, pp. 701-706, (2009).
 15. J. K. Oh, J. M. Lee, E. S. Lee, M. H. Park, K. O. Oh, B. H. Lee, “A Study on Prediction of Pressure Drop of Metal Foam,” *KSAE 2009 Annual Conference*, pp. 782-786, (2009).
 16. J. Kryca, M. Iwaniszyn, M. Piatek, P. J. Jodlowski, R. Jedrzejczyk, R. Pedrys, A. Wrobel, J. Lojewska, A. Kolodziej, “Structured Foam Reactor with CuSSZ-13Catalyst for SCR of NO_x with Ammonia,” *Top Catal*, Vol.59, pp. 887-894, (2016).
 17. Y. Liu, J. Xu, H. Li, S. Cai, H. Hu, C. Fang, L. Shi, D. Zhang, “Rational Design and *in situ* Fabrication of MnO₂@NiCo₂O₄ Nanowire Arrays on Ni Foam as High-Performance Monolith de-NO_x Catalysts,” *J. Mater. Chem. A*, Vol.3, pp. 11543-11553, (2015).
 18. L. C. Almeida, F. J. Echave, O. Sanz, M. A. Centeno, M. A. G. Arzamendi, L. M. Gandia, E. F. Sousa-Aguiar, J. A. Odriozola, M. Montes, “Fischer-Tropsch Synthesis in MicroHannels,” *Chem. Eng. J*, Vol.167, pp. 536-544, (2011).
 19. A. Montebelli, C. G. Visconit, G. Groppi, E. Tronconi, C. Cristiani, C. Ferreiram and S. Kohler, “Method for the Catalytic Activation of Metallic Structured Substrates,” *Catal. Sci. Technol*, Vol.4, pp.

- 2846–2870, (2014).
20. S. Katheria, G. Deo, D. Kunzru, “Washcoating of Ni/MgAl₂O₄ catalyst on FeCralloy Monoliths for Steam Reforming of Methane,” *Energy Fuels*, Vol.31, pp. 3143–3153, (2014).
21. L. A. Truter, P. R. Makgwane, B. Zeelie, S. Roberts, W. Bohringer, J. C. Q. Fletcher “Washcoating of HZSM-5 Zeolite onto Steel Microreactor Plates – Filling theVoid Space between Zeolite Crystallite Agglomerates Particles,” *Chem. Eng. J*, Vol.257, pp. 148–158, (2014).