

V₂O₅-TiO₂ 촉매 담지된 세라믹 폼 필터를 이용한 NO_x 제거 특성

Characteristics of NO_x Reduction Using V₂O₅-TiO₂ Catalyst Coated on Ceramic Foam Filters

한 요 섭 · 김 현 중¹⁾ · 박 재 구*

한양대학교 지구환경시스템공학과, ¹⁾(주)마이크로포어

(2004년 8월 3일 접수, 2004년 11월 29일 채택)

Yoseop Han, Hyunjung Kim¹⁾ and Jaikoo Park*

Department of Geoenvironmental System Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

¹⁾Micropore Co., Ltd, Science & Technology B/D S-110, Hanyang University, Seoul, Korea

(Received 3 August 2004, accepted 29 November 2004)

Abstract

Ceramic foams prepared from silica-clay were coated with TiO₂ and V₂O₅ catalysts for selective catalytic reduction of NO_x with NH₃. The effects of V₂O₅ loading, reaction temperature, space velocity, and oxygen content on NO_x reduction with NH₃ were mainly investigated. Also, the NO_x reduction characteristics of V₂O₅ and V₂O₅-TiO₂ filters were compared when sulfur dioxide exists. From the results, the optimal NO_x reduction with the maximum reduction efficiency of 91% could be performed under the condition with V₂O₅ loading 6.0 wt.%, reaction temperature 350°C, space velocity 6,000 h⁻¹, and oxygen content 5%. And, the V₂O₅-TiO₂ filters have shown higher NO_x reduction efficiency and acid resistance against sulfur dioxide than the V₂O₅ filters.

Key words : Ceramic foam, V₂O₅-TiO₂ catalyst, NO_x reduction with NH₃, SO₂

1. 서 론

선택적 촉매 환원법 (Selective Catalytic Reduction, SCR)에서 암모니아를 환원제로 사용하는 방법은 고정상 오염원에서 나오는 NO_x 제거방법 중 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다 (Kim and Nam, 2001; Bosch and Janseen, 1988). SCR용 촉매로는 NO_x 처리 효율이 뛰어나고 배가스에 포함된 이산화황에 강한

저항성을 가지는 허니컴 형의 V₂O₅-TiO₂ 계 촉매가 가장 많이 사용되고 있다 (Lee *et al.*, 2002; Heck, 1999).

이때 담체로서 사용되는 TiO₂에 비해 Al₂O₃와 SiO₂는 기계적 강도가 높으며, 열적으로 안정성이 있을 뿐만 아니라 Brønsted 산점을 갖고 있는 이점이 있다 (Economidis *et al.*, 1998; Clarebout *et al.*, 1991; Hadjiivanov and Klissurski, 1991; Wauthoz *et al.*, 1991; Rajadhyaksha *et al.*, 1989). 그러나 Al₂O₃를 지지체로 사용하였을 때는 오염가스 중에 이산화황 존재시 피독현상이 생겨 활성을 떨어뜨리며 촉매의 수

* Corresponding author

Tel : +82-(0)2-2290-0416, E-mail : jkpark@hanyang.ac.kr

명도 단축시킨다. 또한 SiO₂를 단일 지지체로 사용하였을 때는 활성이 낮은 것으로 알려져 있다(Soh and Nam, 2003; Nam *et al.*, 1986; Shkada *et al.*, 1983; Bauerle *et al.*, 1978).

본 연구에서는 실리카 계 세라믹 폼 지지체를 제조한 후 TiO₂ 및 V₂O₅를 지지체 표면 및 내부에 균일하게 코팅하여 NO_x 제거용 촉매 필터로서 연구를 진행하였다. 제조된 촉매 필터의 NO_x 제거 특성은 V₂O₅ 농도, 반응온도, 공간속도 및 산소농도의 변화에 따라 조사하였다. 또한, TiO₂ 코팅층의 형성에 따른 NO_x 제거 성능 및 배가스내에 이산화황 존재 시 촉매 필터의 활성에 대해 조사하여 V₂O₅-TiO₂ 코팅된 필터가 암모니아 SCR법에서 NO_x 제거용 필터로의 적용 가능성을 검토하였다.

Table 1. Chemical components of ceramic foam.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	Ig. loss
wt.%	86.5	7.60	0.44	0.20	1.12	3.38	0.16	0.48	0.52

2. 실험 방법

2.1 세라믹 폼 지지체 제조

원료는 실리카와 점토를 사용하였으며, 이 원료를 각각 6:4의 부피비로 혼합 후 회분식 교반밀을 이용하여 슬러리를 제조하였다. 제조된 슬러리의 농도는 45 vol.%였으며, 제조된 슬러리는 발포 공정을 거친 후 젤-캐스팅법을 이용하여 디스크형으로 성형하였다(Park and Lee, 2003). 이 성형체를 60°C에서 24시간 동안 건조한 후 전기로에 1,200°C에서 2시간 동안 소성하여 세라믹 폼 지지체를 제조하였다. 표 1은 지지체의 화학조성을 나타낸 것이다.

2.2 촉매 필터 제조

그림 1은 V₂O₅ 및 TiO₂ 촉매를 세라믹 폼 지지체에 코팅하는 제조 공정을 나타낸다. 먼저 세라믹 폼 지지체에 졸-겔법을 이용하여 TiO₂를 지지체 표면

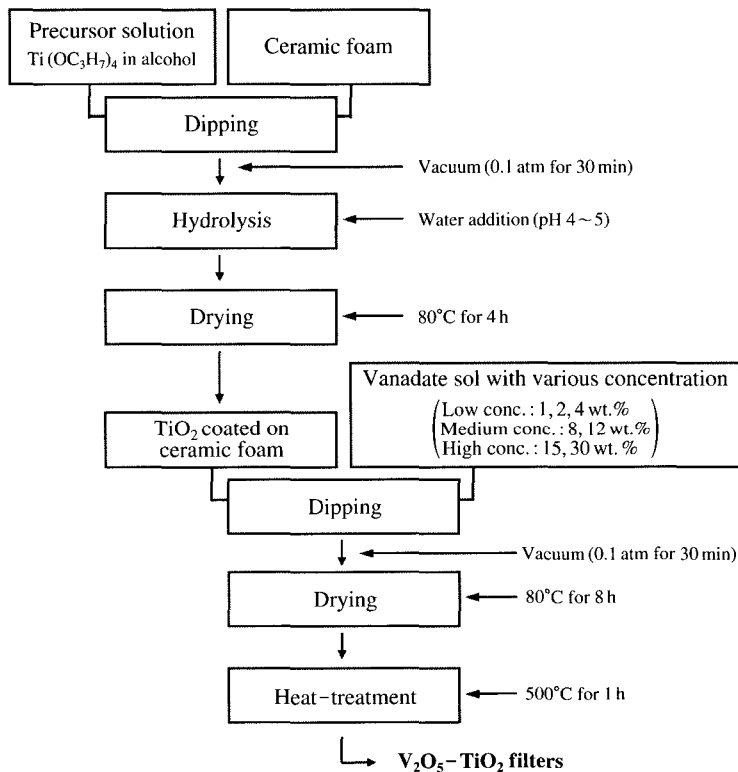


Fig. 1. Flow chart of the preparation for V₂O₅-TiO₂ filters.

및 내부에 코팅하였다. TiO₂ 전구체 용액은 titanium tetraisopropoxide (TTIP, Ti [(CH₃)₂CHO]₄, Aldrich Chemical Co.)이며, 이를 무수알코올 (C₂H₅OH)에 용해하여 사용하였다. TiO₂의 코팅은 TTIP:C₂H₅OH를 1:30 몰 비율로 하여, 제조된 졸 용액에 지지체를 담그어 0.1 atm 상태에서 30분간 감압하여 내부기공까지 졸 용액을 침투 시킨 후 가수분해하는 방법으로 진행하였다. 가수분해는 pH 4~5의 증류수를 사용하였으며 질소 분위기 챔버에서 0.1 atm의 실온 상태로 약 10분 동안 진행되었다. 가수분해 후에는 80°C에서 4시간 동안 건조하여 TiO₂가 코팅된 지지체를 얻을 수 있었다.

이후 TiO₂ 코팅 지지체에 V₂O₅ 촉매를 담지하는 방법은 다음과 같다. 우선 ammonium metavanadate (NH₄VO₃, Aldrich Chemical Co.) 및 oxalic acid (H₂C₂O₄ · 2H₂O, Aldrich Chemical Co.)를 50~60°C의 증류수에 첨가하여 pH 2.5인 바나듐 수용액을 제조하였다. 다양한 농도(1~30 wt.%)로 제조된 각각의 바나듐 수용액에 TiO₂ 코팅 지지체를 함침하여 0.1 atm 상태에서 30분간 감압하여 V₂O₅의 농도를 달리 담지시켰다. 이후 지지체를 꺼낸 후 80°C에서 8시간 동안 건조시킨 후, 500°C에서 1시간 동안 열처리하

였다.

2. 3 물성 평가 및 NO_x 제거 실험

촉매 필터의 미세구조는 전자 주사 현미경 (SEM, JSM-6300, JEOL, Japan)을 이용하여 관찰하였으며, 기공크기 분포는 화상해석기 (Image-Pro Plus ver. 4.0, I & G Plus, USA)를 이용하여 측정하였다 (Park and Lee, 2001). 지지체에 담지된 V₂O₅, TiO₂ 촉매의 농도는 원자 흡광 광도계 (AAS, SOLAAR989, UNICAM, England)를 이용하여 측정하였다. 촉매의 결정 구조 변화는 X선 회절기 (XRD, DMAXIII, Rigaku, Japan)를 통해 측정하였으며, 필터의 비표면적은 BET법 (ASAP 2010, Micromeritics, USA)으로 각각 측정하였다.

그림 2는 NO_x 제거 실험을 하기 위한 SCR 반응기 모식도를 나타낸다. NO_x 제거 실험의 환원제는 암모니아를 사용하여 연속적 반응으로 진행하였다. 가스 반응부분은 내경 35 mm, 길이는 300 mm인 석영관으로 되어 있으며, 사용되는 가스는 정제된 NO 1,000 ppm, NH₃ 1,000 ppm, O₂ 그리고 N₂를 사용하였다. 가스의 유량은 유량계 (Mass Flow Controller, MKS Co.)를 이용하여 조절하였으며, NH₃와 SO₂ 접

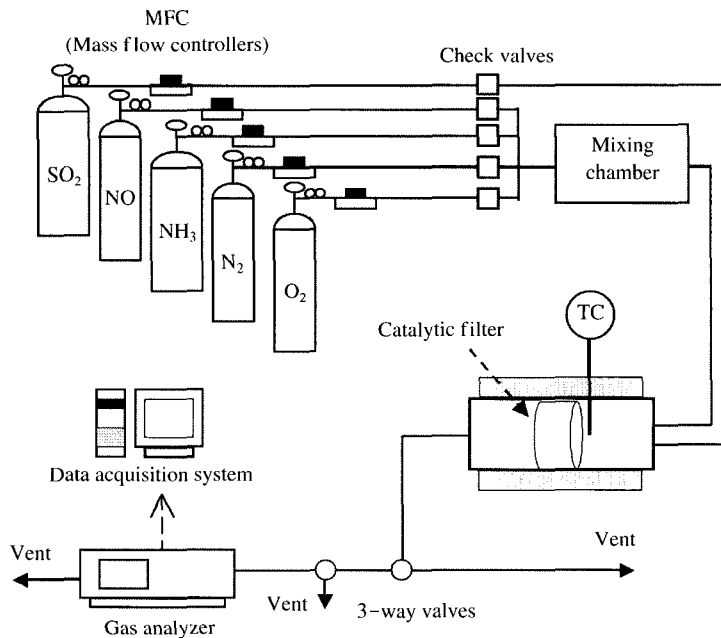


Fig. 2. Schematic flow diagram of SCR reactor.

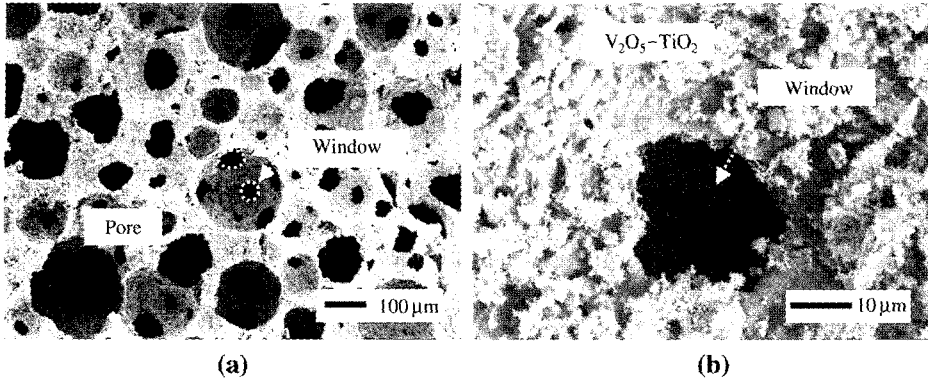


Fig. 3. SEM photographs of V_2O_5 - TiO_2 filter.

측 시 염의 생성을 방지하기 위해 SO_2 주입은 반응기에 직접 주입하였다. 배출되는 NO_x 농도, 온도, 유량 그리고 차압의 모든 데이터는 Flue Gas Analyzer (GreenLine MK2, eurotron, Italy)에 의하여 실시간 모니터링 되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 촉매 필터의 기공구조

그림 3은 본 실험에서 제조된 촉매 필터의 단면 사진을 나타낸 것이다. 그림 (a)에서 보는 것과 같이 필터는 기공과 기공이 윈도우를 통해 서로 연결된 연속성 기공구조를 가지는 것을 알 수 있다. 그림 (b)는 윈도우를 확대해서 나타낸 그림이다. 윈도우 주변, 즉 지지체 골격(strut)에 V_2O_5 - TiO_2 촉매가 넓게 코팅되어 있는 것을 확인 할 수 있었다.

그림 4는 촉매 필터의 기공크기 분포를 나타낸 그래프이다. 촉매 필터의 기공크기 분포는 약 45~300 μm 의 기공이 존재하며, 평균기공 크기가 약 135 μm 임을 알 수 있다. 또한, 기공들을 연결하고 있는 윈도우의 크기분포는 약 20~70 μm 로써 이러한 창들이 유체의 투과를 용이하게 할 것으로 판단되어지며, 3차원 망상구조로써 유체와 내부표면에 코팅된 촉매와의 접촉면적이 높을 것으로 사료된다.

3.2 촉매 필터의 표면 특성

제조된 세라믹 폼 지지체의 비표면적은 2.8 m^2/g 이

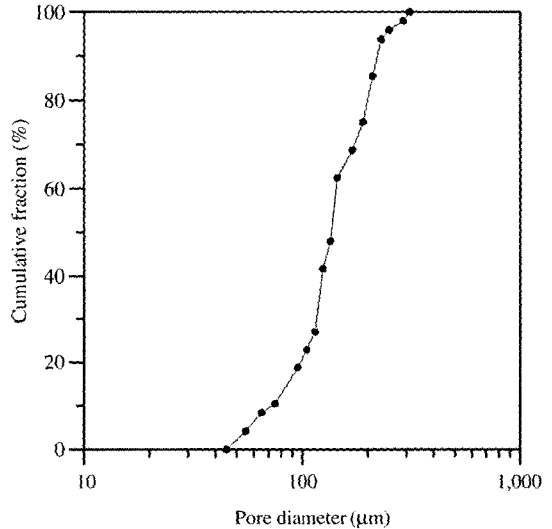


Fig. 4. Pore size distribution of V_2O_5 - TiO_2 filter.

며, TiO_2 코팅 후 500°C에서 열처리 한 지지체의 경우 8.6 m^2/g 비표면적을 가졌다. 표 2에 지지체에 침적된 촉매의 농도를 나타내었으며 그에 따른 필터의 비표면적을 각각 표시하였다.

지지체에 침적된 V_2O_5 농도는 0.87~12.4 wt.%이었으며, V_2O_5 - TiO_2 필터가 V_2O_5 필터에 비해 비표면적이 크게 나타났다. 또한, V_2O_5 농도가 증가될수록 비표면적이 서서히 감소하였지만, 농도가 6.0 wt.% 이상에서는 오히려 비표면적이 증가하였다. 따라서 비표면적은 표면에 TiO_2 코팅된 필터의 경우 더 크게

Table 2. Physical and chemical properties of catalytic filters.

	Catalytic filter				Catalytic filter	
	V ₂ O ₅ loading (wt.%)	TiO ₂ loading (wt.%)	Specific surface area (m ² /g)		V ₂ O ₅ loading (wt.%)	Specific surface area (m ² /g)
VTL-1 ¹⁾	0.87	4.08	4.1	VL-1 ²⁾	0.86	2.1
VTL-2	1.50	4.18	3.8	VL-2	1.52	1.4
VTL-4	2.44	3.98	3.4	VL-4	2.45	1.5
VTM-8 ³⁾	4.10	4.13	3.1	VM-8	4.07	0.9
VTM-12	6.00	4.18	4.5	VM-12	6.02	1.9
VTH-15	7.25	3.85	5.2	VH-15 ⁴⁾	7.22	3.5
VTH-30	12.40	4.03	7.1	VH-30	12.44	5.1

¹⁾VTL-1 (V₂O₅/TiO₂/Low conc., 1 wt.%); ²⁾VL-1 (V₂O₅/Low conc., 1 wt.%); ³⁾VTM-8 (V₂O₅/TiO₂/Medium conc., 8 wt.%); ⁴⁾VH-15 (V₂O₅/High conc., 15 wt.%)

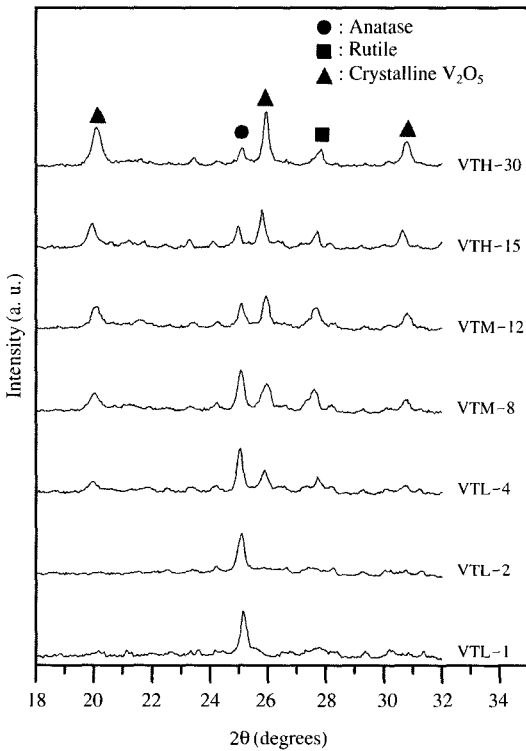


Fig. 5. XRD patterns of V₂O₅-TiO₂ filters.

나타났다. 이후 V₂O₅ 촉매를 담지할 때는 6.0 wt.% 이상이 유리한 것으로 보인다.

V₂O₅ 농도별로 담지된 필터의 X-선 회절 패턴을 그림 5에 나타내었다. 농도가 낮은 VTL-1 (V₂O₅/TiO₂/Low conc., 1 wt.%), VTL-2 (V₂O₅/TiO₂/Low

conc., 2 wt.%) 필터에서는 anatase상만이 나타났으며, 농도가 증가될수록 rutile상과 결정화된 V₂O₅도 나타나기 시작하였다. TiO₂는 VTM-12 (V₂O₅/TiO₂/Medium conc., 12 wt.%) 필터까지 상전이가 일어나 rutile상이 증가하였고, 그 이상의 농도에서는 결정화된 V₂O₅만이 점차적으로 증가하였다. 열처리 온도 500°C일 때 V₂O₅ 농도가 1.5 wt.% 이상에서부터 V₂O₅가 불순물로 작용하여 TiO₂의 상전이를 일으킨 것으로 생각된다 (Reddy *et al.*, 1998).

4. 3 NOx 제거 특성

4. 3. 1 V₂O₅ 농도의 영향

V₂O₅ 농도가 다르게 담지된 필터를 이용하여 NOx 제거 특성을 알아보았다. 그림 6은 V₂O₅의 농도와 반응온도에 따른 NOx 제거율을 나타내었다. 필터에 담지된 V₂O₅ 농도가 6.0 wt.%까지 증가할 시, 반응온도에 상관 없이 전체적으로 NOx 제거율이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 그 이상의 V₂O₅ 농도에서의 NOx 제거 효율은 300°C 이하에서는 증가하였지만, 상대적으로 고온인 350°C 이상에서는 감소하는 경향을 보였다. 따라서, V₂O₅ 농도에 따른 NOx 제거율 실험 결과 담지된 농도가 6.0 wt.%를 기준으로 농도가 낮을 때는 모든 온도범위에서 제거율이 증가하였지만, 농도가 높을 때는 350°C 이상에서는 제거율의 감소가 나타났으며, 300°C 이하에서는 제거율의 증가하는 경향을 보였다.

4. 3. 2 반응온도 및 공간속도의 영향

그림 7은 반응온도 250~450°C 범위에서 NOx 제

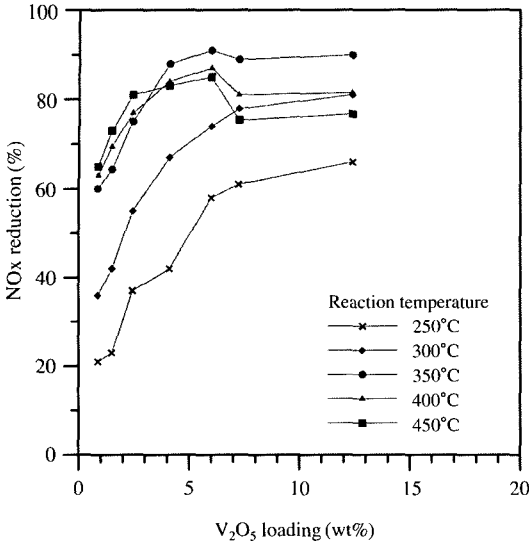


Fig. 6. The correlation between V₂O₅ loading and NOx reduction at various reaction temperatures (NH₃/NO = 1.0, oxygen ratio = 5%, space velocity = 6,000 h⁻¹).

거울을 다양한 공간속도에 따라 나타내었다. 측정 결과 350°C에서 최상의 효율을 나타냈으며, 공간속도 6,000 h⁻¹, 반응온도 350°C에서는 약 91%의 NOx 제거율을 나타내었다. 일반적으로 공간속도가 낮을 때 높은 효율을 나타내는 것으로 알려져 있다 (Tian *et al.*, 2002). 더욱이, 다른 반응온도 범위 내에서 최상의 반응온도 또한 가장 낮은 공간속도에서 나타남을 확인할 수 있었다. 그리고 공간속도가 증가될수록 제거율이 감소하며, 특히 12,000 h⁻¹에서는 제거율이 상대적으로 크게 떨어짐을 확인할 수 있었다.

4. 3. 3 산소의 영향

선택적 촉매 환원 공정 시 산소의 역할은 이미 많은 연구가 진행되어 있으며, 산소 존재 시 촉매의 활성이 상당히 증가한다고 알려져 있다 (Pinaeva *et al.*, 1996). 따라서 산소 농도를 1%, 5% 그리고 21%로 달리하여 반응온도에 따라 NOx 제거 성능 실험을 수행하였다. 산소 농도가 1%일 때를 저농도로 설정하였고, 5%는 현재 화력발전소에 배출되는 배가스의 산소농도이며, 21%는 대기에 존재하는 산소 농도의 조건으로 실험하였다. 또한, 산소의 농도에 따라 발생하는 NO₂의 농도도 함께 측정하여 나타내었다.

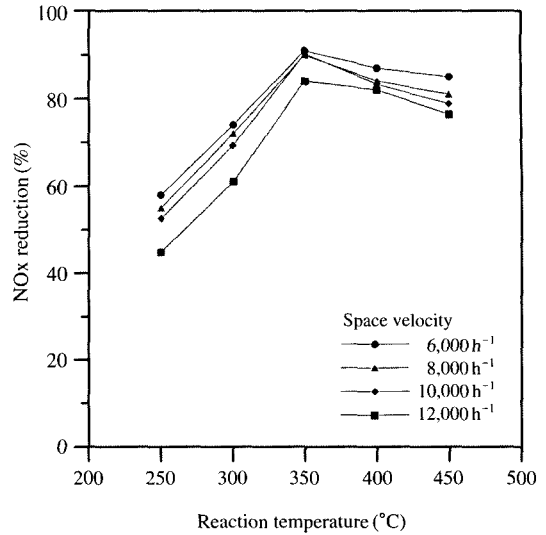


Fig. 7. The correlation between reaction temperature and NOx reduction at various space velocities for VTM-12 filter (NH₃/NO = 1.0, oxygen ratio = 5%).

그림 8은 다양한 산소농도에서 반응온도에 따른 NOx 제거율을 나타내었다. 산소 농도 5%인 경우가 1%보다 NOx 제거율이 증가하였지만, 고농도인 21%에서는 오히려 1% 산소 농도보다 제거율이 떨어짐을 확인할 수 있었다. 또한, 배출되는 NO₂는 1%와 5%에서는 서서히 증가하였지만, 21%에서는 고온인 350°C 이상의 온도로 갈수록 NO₂의 발생이 상대적으로 크게 증가함을 알 수 있었다. 상기 결과로부터 고온 및 고농도의 산소 상태에선 환원제인 암모니아와 촉매의 산화환원 반응이 우선적으로 일어나지 않고, 일산화질소 또는 암모니아가 먼저 산소와 반응하여 산화를 일으켜 NOx 제거율을 감소시켰다고 판단된다.

4. 3. 4 이산화황의 영향

암모니아 SCR법에서는 배가스 내에 존재하는 이산화황에 의하여 비활성 (deactivation)을 일으키는 것으로 알려져 있다. 이산화황은 SCR법에서 산화하여 SO₃로 존재하고 암모니아 및 수분 등과 결합하여 황산 암모늄염 (ammonium sulfate salt)을 형성한다. 이 염은 두 가지 형태로 존재하는데 ammonium bisulfate (NH₄HSO₄)와 ammonium sulfate ((NH₄)₂SO₄)로 존재하며, 이 염들은 촉매표면에 침적하여 기공

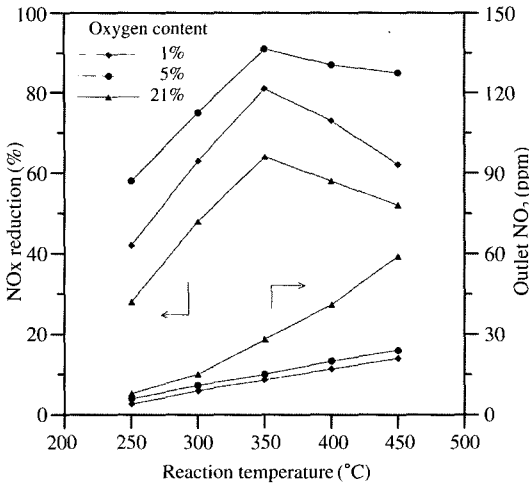


Fig. 8. Effect of oxygen contents on NO_x reduction for VTM-12 filter (NH₃/NO = 1.0, space velocity = 6,000 h⁻¹).

및 표면을 덮어 유체 흐름을 막거나 촉매를 상하게 하여 촉매의 성능을 저하시키는 주 원인 물질로 알려져 있다 (Ham et al., 1992).

따라서 이산화황이 존재하는 경우 V₂O₅만 담지된 필터 VM-12 (V₂O₅/Medium conc., 12 wt.%)와 V₂O₅-TiO₂ 담지된 필터 VTM-12를 이용하여 NO_x 제거율을 비교하였다. 그림 9는 우선 이산화황을 주입하지 않은 경우 두 촉매 필터의 NO_x 제거율을 나타내었다. 두 촉매 필터 모두 350°C에서 가장 높은 제거율이 나타났으며, 반응온도 250~450°C 모든 범위에서 VTM-12 필터가 VM-12 필터 보다 제거 성능이 우수하였다. 상기 결과는 두 가지로 해석할 수 있었다. 첫째, 필터의 비표면적 차이가 NO_x 제거율에 영향을 주었다고 판단하였으며, 둘째, 실리카 지지체의 특성에 의해 NO_x 제거율이 낮아졌다고 판단하였다. 두 번째의 경우 원인은 실리카 표면에 vanadia 종의 흡착력이 낮아 분산성을 떨어뜨려 불안정하게 담지되기 때문인 것으로 사료되었다. 이에 필터의 표면 특성을 V₂O₅ 담지 농도를 변화시켜가며 살펴보았다. 표 2를 보면 다른 농도의 vanadate 용액을 이용해 코팅한 필터들의 담지농도의 차이가 나타나지 않았다. 따라서 두 필터의 NO_x 제거율은 지지체의 실리카 특성보다는 비표면적의 차이가 주된 원인인 것으로 판단된다.

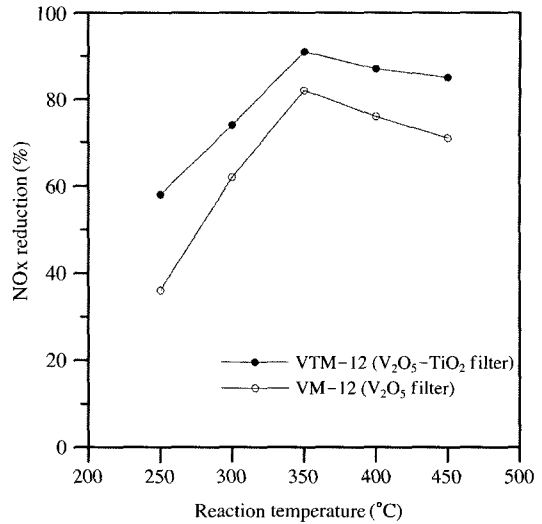


Fig. 9. The correlation between reaction temperature and NO_x reduction for VTM-12 filter and VM-12 filter (NH₃/NO = 1.0, oxygen ratio = 5%, space velocity = 6,000 h⁻¹).

가스에 포함된 이산화황의 영향을 알아보기 위해 두 촉매 필터를 이용하여 이산화황 존재시 NO_x 제거 성능을 비교하였다. 반응온도는 250°C와 400°C에서 진행하였고 다른 운전조건은 제거율이 가장 우수하였던 조건과 동일하게 진행하였다. 이때 이산화황 1,000 ppm을 주입하였다. 그림 10(a)은 반응온도 250°C에서의 NO_x 제거율을 나타내었다. VTM-12 필터는 오랜 운전시간에도 제거율이 일정하게 유지됨을 확인하였으나, VM-12 필터는 이산화황 첨가시 운전시간이 증가할수록 제거율이 감소함을 알 수 있었다. 또한, 오랜 운전시 제거율이 계속적으로 감소하였다. 그러나, 반응온도가 고온인 400°C에서의 NO_x 제거율 평가에서는 그림 10(b)에 보듯이 VM-12 필터의 제거율이 약간 감소하였지만 반응온도 250°C처럼 큰 폭으로 변하지 않았으며, 대략 80시간 이상부터는 거의 일정하게 유지되었다.

VM-12 필터에서는 암모니아 SCR법 경우 반응온도가 저온 부근에서 비활성을 일으키는 암모늄 염이 생겨 담지된 촉매 표면에서 피독현상을 일으켜 NO_x 제거율을 저하 시킨 것이라고 생각된다 (Nam et al., 1986). 따라서 V₂O₅ 단독 필터보다 V₂O₅-TiO₂ 필터가 이산화황에 강한 저항성을 가지는 것을 확인 할

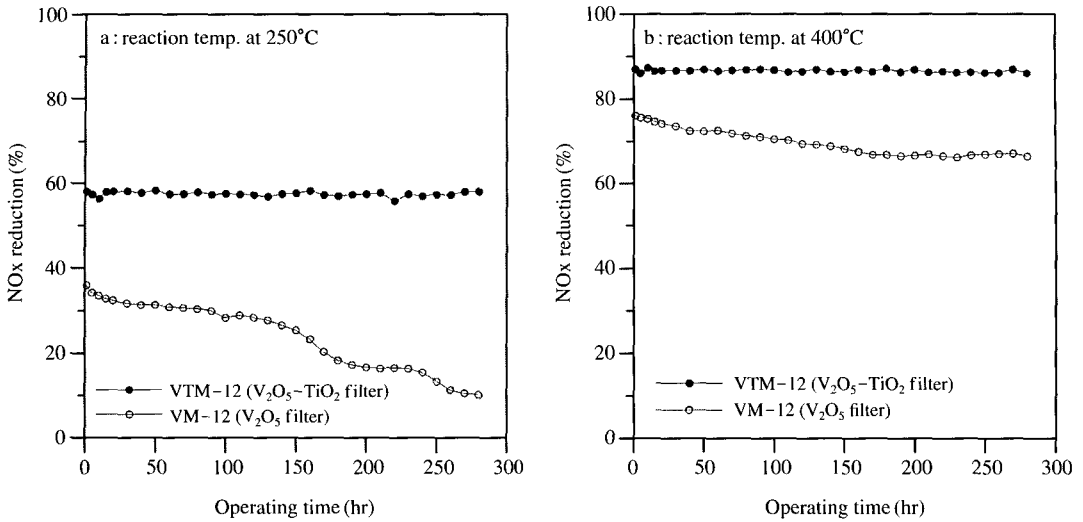


Fig. 10. Effect of sulfur dioxide on NOx reduction for VTM-12 filter and VM-12 filter (NH₃/NO = 1.0, SO₂ = 1,000 ppm, oxygen ratio = 5%, space velocity = 6,000 h⁻¹).

수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 실리카와 점토를 원료로 세라믹 폼 지지체를 제조하였으며, V₂O₅-TiO₂를 지지체 표면 및 내부에 코팅하여 NOx 제거하기 위한 촉매 필터를 제조하였다. 제조된 촉매 필터의 물성 평가 및 이를 암모니아 SCR법에 적용하여 NOx 제거 특성 실험을 수행하였다. 이하 결론은 다음과 같다.

제조된 촉매 필터는 135 μm의 평균기공 크기를 가졌으며, 기공구조는 원형이며 윈도우를 통해 연결된 연속성 기공구조를 가지고 있었다. 또한, V₂O₅-TiO₂ 촉매가 지지체 내부 및 표면에 코팅되어 있음을 알 수 있었다. 이 촉매 필터를 암모니아 SCR법에 적용하여 NOx 제거 실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 촉매 필터 경우 6.0 wt.% V₂O₅ 농도, 반응온도 350°C, 공간속도 6,000 h⁻¹ 및 산소농도 5%일 때 가장 높은 91%의 NOx 제거율을 가졌다. 또한 지지체와 V₂O₅ 촉매 사이에 TiO₂를 코팅할 시 NOx 제거 성능이 증가하는데, 이는 비표면적의 증가로 판단된다. 그리고 V₂O₅-TiO₂ 필터의 경우 배가스 중에 이

산화황 존재 시, 오랜 운전시간에도 NOx 제거율이 일정하게 유지되었다. 따라서 본 연구에서 제조된 V₂O₅-TiO₂가 담지된 필터는 이산화황 존재시에 강한 저항성을 가짐이 확인되었다.

참 고 문 헌

Bosch, H. and F. Janssen (1988) Catalytic Reduction of Nitrogen Oxides, *Catal. Today*, 2, 369.
 Kim, M.H. and I.S. Nam (2001) Water Tolerance of DeNOx SCR Catalysts Using Hydrocarbons: Finding, Improvements and Challenges, *Korean J. Chem. Eng.*, 18, 725.
 Heck, R.M. (1999) Catalytic Abatement of Nitrogen Oxides-Stationary Applications, *Catal. Today*, 53, 519-523.
 Lee, I.Y., D.W. Kim, J.B. Lee, and K.O. Yoo (2002) A Practical Scale Evaluation of Sulfated V₂O₅/TiO₂ Catalyst from Metatitanic Acid for Selective Catalytic Reduction of NO by NH₃, *Chem. Eng. J.*, 4000, 1-6.
 Rajadhyaksha, R.A., G. Hausinger, H. Zeilinger, A. Ramstetter, H. Schmetz, and H. Knozinger (1989) Vanadia Supported on Titania-Silica; Physical Characterization and Activity for the Selective Reduction on

- Nitric Oxide, *Appl. Catal.*, 51, 67-79.
- Hadjivanov, K.I. and D.G. Klissurski (1991) Surface Chemistry of Titania (Anatase) and Titania-Supported Catalysts, *Chem. Soc. Rev.*, 61.
- Wauthoz, P., M. Ruwet, T. Machej, and P. Grange (1991) Influence of the Preparation Method on the V₂O₅/TiO₂/SiO₂ Catalysts in Selective Catalytic Reduction of Nitric Oxide with Ammonia, *Appl. Catal.*, 69, 149-167.
- Economidis, N., R.F. Coil, and P.G. Smirniotis (1998) Catalytic Performance of Al₂O₃/SiO₂/TiO₂ Loaded with V₂O₅ for the Selective Catalytic Reduction of NO_x with Ammonia, *Catal. Today.*, 40, 27-37.
- Clarebout, G., M. Ruwet, H. Matralis, and P. Grange (1991) Selective Catalytic Reduction of Nitric Oxide with Ammonia on Vanadium Oxide Catalysts Supported on Titania-Alumina, *Appl. Catal.*, 76, L9-L14.
- Bauerle, G.L., S.C. Wu, and K. Nobe (1978) Parametric and Durability Studies of NO_x Reduction with NH₃ on V₂O₅ Catalysis, *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*, 17, 117.
- Nam, I.S., J.W. Eldridge, and J.R. Kittrell (1986) Deactivation of a Vanadia-Alumina Catalyst for NO Reduction by NH₃, *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*, 25, 192.
- Shkada, T., K. Fudimoto, T. Kunugi, and H. Tominaga (1983) Reduction of Nitric Oxide with Ammonia on Silica-Supported Vanadium Oxide Catalysts, *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, A33, 446.
- Soh, B.W. and I.S. Nam (2003) Effect of Support Morphology on the Sulfur Tolerance of V₂O₅/Al₂O₃ Catalyst for the Reduction of NO by NH₃, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, 2975-2986.
- Park, J.K. and J.S. Lee (2003) Preparation of Porous Cordierite Using Gelcasting Method and its Feasibility as a Filter, *J. Porous Mater.*, 9, 203-210.
- Park, J.K. and S.H. Lee (2001) Observation and Segmentation of Gray Images of Surface Cells in Open Cellular Foams, *J. of Ceram. Soc. of Jpn.*, 109, 7.
- Tian, L., D. Ye, and H. Liang (2002) Catalytic Performance of a Novel Ceramic-Supported Vanadium Oxide Catalyst for NO Reduction with NH₃, *Catal. Today*, 2822, 1-12.
- Pinaeva, L.G., A.P. Suknev, A.A. Budneva, E.A. Paukshtis, and B.S. Balzhinimaev (1996) On the Role of Oxygen in the Reaction of NO Reduction by NH₃ over Monolayer V₂O₅-TiO₂ Catalyst, *J. Molecular Catal.*, 112, 115.
- Ham, S.W., H. Choi, I.S. Nam, and Y.G. Kim (1992) Deactivation of Copper-on-Exchanged Hydrogen - Mordenite-Type Zeolite Catalyst by SO₂ for NO Reduction by NH₃, *Catal. Today*, 11, 611-621.
- Nam, I.S., J.W. Eldridge, and J.R. Kittrell (1986) Model of Temperature Dependence of a Vanadia-Alumina Catalyst for NO Reduction by NH₃: Fresh Catalyst, *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*, 25, 186-192.
- Reddy, B.M., I. Ganesh, and V.R. Reddy (1998) Influence of V₂O₅ and Nb₂O₅ on Thermal Stability of TiO₂-Anatase, *J. Mater. Sci. Lett.*, 17, 1913-1915.