

반응조건에 대한 Mn-Cu-TiO₂ 촉매와 V/TiO₂ 촉매의 탈질 특성

장현태¹, 차왕석^{2*}

¹한서대학교 화학공학과, ²군산대학교 환경공학과

NO_x removal of Mn-Cu-TiO₂ and V/TiO₂ catalysts for the reaction conditions

Hyun Tae Jang¹, Wang Seog Cha^{2*}

¹Department of Chemical Engineering, Hanseo University

²Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

요약 암모니아를 환원제로 사용하는 선택적 촉매 환원법에서 Mn-Cu-TiO₂ 촉매와 V₂O₅/TiO₂ 촉매를 사용하여 반응 조건에 따른 질소 산화물 전환 특성을 연구하였다. 반응 온도와 공간 속도를 변경시키면서 촉매의 질소 산화물 전환 효율 변화를 측정하였다. Mn-Cu-TiO₂ 촉매의 질소 산화물 제거 활성은 반응 온도와 공간 속도가 증가할수록 감소하였으나, V₂O₅/TiO₂ 촉매의 경우 반응 온도 증가에 따라 촉매의 질소 산화물 제거 활성 또한 증가하였다. Mn-Cu-TiO₂ 촉매의 경우 200℃ 이하의 온도에서 저온 활성이 우수하였으며, 이를 H₂-TPR 및 XPS 분석 실험을 통해 확인할 수 있었다. 초기 반응 온도의 변경 실험을 통해 Mn-Cu-TiO₂ 촉매의 경우 고온에서 열적 쇼크를 일부 받으나, V₂O₅/TiO₂ 촉매의 경우는 거의 영향을 받지 않음을 확인할 수 있었다. 공간 속도에 따른 질소 산화물 전환 효율 변화는 C 촉매의 경우 전 구간에 걸쳐 공간 속도가 증가할수록 질소 산화물 전환 효율도 감소하는 경향을 보였다. 그러나 D 촉매의 경우 공간 속도가 증가할수록 질소 산화물 전환 효율은 감소하였으나, 감소 정도가 C 촉매 보다는 훨씬 적었다.

Abstract The NO_x conversion properties of Mn-Cu-TiO₂ and V₂O₅/TiO₂ catalysts were studied for the selective catalytic reduction (SCR) of NO_x with ammonia. The performance of the catalysts was investigated in terms of their NO_x conversion activity as a function of the reaction temperature and space velocity. The activity of the Mn-Cu-TiO₂ catalyst decreased with increasing reaction temperature and space velocity. However, the activity of the V₂O₅/TiO₂ catalyst increased with increasing reaction temperature. High activity of the Mn-Cu-TiO₂ catalyst was observed at temperatures below 200°C. H₂-TPR and XPS analyses were conducted to explain these results. It was found that the activity of the Mn-Cu-TiO₂ catalyst was influenced by the thermal shock caused by the change of the initial reaction temperature, whereas the V₂O₅/TiO₂ catalyst was not affected by the initial reaction temperature. In the case of catalyst C, the NO_x conversion efficiency decreased with increasing space velocity. The decrease in the NO_x conversion efficiency with increasing space velocity was much less for catalyst D than for catalyst C.

Keywords : Mn-Cu-TiO₂ catalyst, V₂O₅/TiO₂ catalyst, NO_x conversion, reaction temperature, space velocity

1. 서론

석탄을 많이 사용하는 발전 및 산업용 보일러와 같은

고정오염원과 화석연료를 사용하는 자동차와 같은 이동
오염원에서 90% 가량 배출되는 NO, NO₂, NO₃, N₂O₃,
N₂O, N₂O₄, N₂O₅ 등과 같은 질소산화물(통상적으로

이 논문은 산업자원부 전략연구개발사업의 지원에 의해 이루어졌음.

*Corresponding Author : Wang Seog Cha(Kunsan National University)

Tel: +82-11-9641-4765 email: wscha@kunsan.ac.kr

Received May 19, 2016

Revised July 1, 2016

Accepted July 7, 2016

Published July 31, 2016

NO_x)는 대기오염의 주요 원인물질 중 하나로서 대기 중의 오존과 반응하여 광화학스모그를 포함하여 인체에 유해한 2차 유해물질을 생성하는 원인물질로 작용하기도 한다. 고정원에서 배출되는 질소산화물을 제거하는 공정에는 흡수, 흡착, 전환공정 등이 있으나, 고농도로 대량으로 배출되는 공정에는 일반적으로 암모니아를 환원제로 사용하는 선택적촉매환원법(NH₃-SCR)이 폭넓게 적용되고 있는데, 상기 공정의 경우 설치비용이 다소 비싸지만 적절한 공정조건에서 높은 NO_x 제거효율(90% 이상)을 달성한다는 장점이 있다. 고정원에서 발생하는 질소산화물을 제거하는 공정은 일반적으로 설비규모가 매우 커서 많은 양의 촉매가 필요한데, SCR 촉매의 수요 비중은 일반적으로 발전소용이 전체의 70%로 최대이며 소각로용이 15%, 기타 화학 플랜트용이 15%를 차지하고 있다. 최대용도인 발전소용은 1.5MW당 1m³가 소요되며, 지속적으로 전력수급의 증가로 인하여 화석연료를 이용한 발전소의 신증설은 불가피하여 향후 촉매의 수요량도 증가될 것으로 예상된다. 선택적촉매환원공정에서 가장 널리 적용되고 있는 촉매시스템은 V₂O₅/TiO₂ 촉매 시스템이며 상기 촉매시스템은 주로 300~400℃의 온도 영역에서 적용되고 있다. 촉매시스템이 비교적 고온인 300~400℃에서 성공적으로 작동하기 위해서는 배기가스 정제과정 즉 비산먼지를 제거하기 전의 upstream 공정에 설치되어야 하며, 상기의 위치에서는 탈질촉매에 비산먼지가 침적될 뿐만 아니라 장시간 노출로 인한 열적쇼크에 의해 촉매가 보다 빨리 비활성화되는 문제점이 발생하고 있다[1]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 배기가스내 비산분진 제거된 공정 즉 약 200℃의 온도를 유지하는 downstream 공정에서 적절한 활성을 보이는 저온 SCR(Low temperature SCR, LT-SCR) 촉매의 개발이 요구되고 있다. 가장 대표적으로 진행되고 있는 연구가 MnO_x를 이용한 촉매의 개발이며, 주로 연구방법은 MnO_x 촉매의 활성 증진을 위해 다양한 전이 금속산화물을 조촉매로서 첨가 또는 혼합하는 방법[2]이다. 적용된 촉매시스템은 Mn[3], Cu-Mn[4,5], Cr-MnO_x[6], MnO_x-CeO_x[7] 촉매들이 있으며, 이 중 MnO_x에 Cu가 포함된 촉매(이하 Mn-Cu)가 저온에서 우수한 활성이 있는 것으로 보고되고 있다. 그리고 암모니아를 사용한 탈질촉매시스템에서 탈질반응을 효과적으로 반응시키기 위해 monolith를 비롯한 다양한 지지체[8,9], 유동층반응기를 비롯한 여러 가능한 반응기형태[10,11]에 대한 연

구도 진행되고 있다.

본 연구는 저온에서의 활성이 우수한 것으로 알려진 Mn-Cu계 촉매에 촉매 지지체로 사용되는 Ti를 조촉매로 첨가하여 상용촉매인 V₂O₅/TiO₂ 촉매와 여러 공정조건에서의 질소산화물 제거특성을 연구하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 촉매제조

본 연구에 사용된 촉매는 공침법(co-precipitation)으로 제조하였으며, 제조방법은 먼저 Mn(NO₃)₂·xH₂O (Sigma≥98%)과 Cu(NO₃)₂·2.5H₂O(Sigma≥99%)과 TiCl₄(Sigma)를 Cu/Mn mole ratio는 1.0, Ti/Mn mole ratio는 0.2가 되도록 수용액을 혼합하였다. 이들 혼합된 용액에 NH₄OH(Sigma -Aldrich, 28.0-30.0% NH₃ basis)을 pH 10이 될 때까지 혼합한다. 이후 24시간 동안 실온에서 aging한 후 얻어진 슬러지는 증류수로 세척한 후 진공증발기를 통해 70℃에서 건조하였다. 건조된 촉매는 250℃에서 4시간 동안 공기분위기에서 소성하였으며 촉매 C로 하였다. Mn과 Cu의 산화 상태를 보다 자세히 조사하기 위해 상기의 방법에서 Ti를 혼합하지 않고 Mn과 Cu로 이루어진 촉매를 제조한 후 이를 촉매 A로 하였다.

비교 대조군으로서 V₂O₅/TiO₂촉매는 국내의 기업에서 제조된 상용촉매이며 촉매 D로 하였다.

2.2 촉매반응실험

SCR 활성실험을 위한 반응장치는 가스주입부분, 반응기부분, 그리고 반응가스분석부분으로 구성되었다. 가스주입부분은 N₂, O₂, NH₃, NO의 각 실린더로부터 MFC(Mass Flow Controller, MKS Co.)를 사용하여 유량을 조절하였다. 수분의 공급은 N₂를 버블러(Bubbler)를 통하여 수분을 공급하였다. 가스의 구성은 NO 800ppmv, NH₃/NO_x=1.0, O₂ 3vol.%, H₂O 6vol.%이었다. 실험시 촉매는 200mg을 충전 하였다. 가스공급관은 전체에 걸쳐 스테인레스관(SUS-316L)으로 하였으며 반응가스 중의 NO와 NH₃가 반응하여 생기는 염의 생성을 방지하고 수분이 응축되지 않기 위하여 150℃로 일정하게 유지하였다. 반응기부분은 연속흐름형 고정층반응장치로서 내경 8mm, 높이 600mm인 석영관으로 제작하였

으며, 촉매층을 고정하기 위해 quartz wool을 사용하였다. 그리고 반응가스분석부분은 NO는 비분산적외선가스분석기(ZKJ-2, Fuji Electric Co.)를 사용하였다. 모든 가스는 분석기로 유입되기 전에 수분은 냉각기 내의 수분 트랩에서 제거시킨 후 유입하였다.

모든 가스의 농도는 정상상태(steady-state)에서 측정하였다. 본 연구에 사용된 촉매의 NO_x 전환율(conversion, X (%))는 다음과 같이 계산하였다.

$$NO_x \text{ conversion (\%)} = \frac{[NO + NO_2]_{IN} - [NO + NO_2]_{OUT}}{[NO + NO_2]_{IN}} \times 100$$

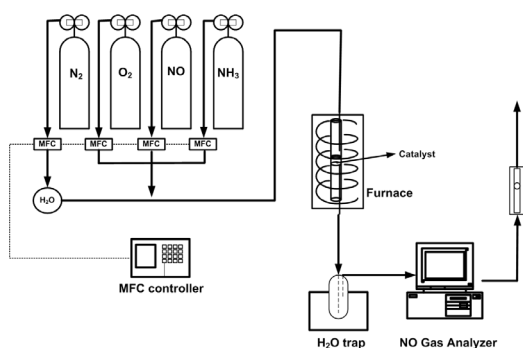


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental system.

2.3 촉매특성분석

촉매의 환원능력을 평가하기 위하여 H₂-TPR(Temperature Programmed Reduction)을 수행하였다. 분쇄된 50mg의 촉매를 충전 후 N₂와 O₂를 흘리며 30cc/min의 공기를 흘리며 350℃까지 10℃/min으로 승온한 다음 30분간 유지하여 촉매표면의 수분 및 기타 불순물을 제거하고 또한 촉매를 활성화시킨다. 이 후 시료를 상온(약 30℃)로 하강한 후 5% H₂/Ar 30cc를 흘리며 촉매표면의 흡탈착을 안정화시킨다. 이후 5% H₂/Ar 30cc지속적으로 흘리며 10℃/min의 속도로 900℃까지 승온하며 TCD(Temperature Conductivity Detector)로 H₂의 농도를 monitoring한다. TCD의 reference gas는 Ar로 하였으며, 이때 TCD로 수분의 유입을 막기 위하여 반응 후의 가스는 molecular sieve(4Å) trap을 거쳐 TCD로 유입된다.

촉매의 XPS분석은 VG Scientific사의 ESCALAB 210을 사용하였으며, Excitation source로써 Al Kα monochromatic(1486.6 eV)를 사용하였다. 촉매를 약 100℃의 온도에서 24시간 건조하여 포함되어 있는 수분

을 완전히 제거한 후 XPS 기기의 진공도를 10~12mmHg로 유지하기 위하여 표면 sputtering 및 etching을 하지 않고 분석하였다. 시료 내에 존재하는 Mn, Cu, Ti, V, O, C 원소는 wide scanning spectrum으로 분석하여 binding energy와 intensity를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

촉매반응에 있어 우선적으로 고려되어야 할 화학적 특성 중 하나는 촉매의 산소 사용능력이다. 촉매반응에 관여하는 여러 산소종 중 hydroxyl과 같은 표면의 산소종은 촉매반응에 있어서 산소를 쉽게 전달하는 능력을 가지고 있어 상기와 같은 표면산소종이 풍부할수록 낮은 온도에서 쉽게 산화환원 반응을 유도하는 것으로 알려져 있다. Mn-Cu-TiO₂로 구성된 C 촉매와 V/TiO₂로 이루어진 D 촉매의 H₂-TPR 분석을 통해 반응 가능한 산소량에 대하여 조사하여 [그림 2]에 나타내었다. 그림에서 C 촉매의 경우 2번째, 3번째 peak가 일반적으로 알려진 탈질촉매보다 비교적 낮은 온도인 150℃에서 환원되는 것을 확인할 수 있다. D 촉매의 경우 전형적인 V/TiO₂ 촉매의 H₂-TPR 형태로서 Mn-Cu-TiO₂ 촉매와는 매우 다른 형태를 보인다. Mn-Cu-Ti 탈질촉매인 C촉매의 H₂-TPR 결과를 Curve fitting을 이용해 분리하여 분석하였다. 첫번째 peak(~100℃)는 M-OH(M: Mn or Cu)으로 표면에 존재하는 수분에 의한 것이며 전처리를 하여도 500℃ 이상에서는 제거되지 않는다. 두번째 peak(~200℃)는 표면에 존재하는 Cu oxide가 환원된 것이라고 할 수 있다. 세 번째 peak 이후에서 나타나는 peak는 표면에서 존재하는 Mn oxide(MnO₂ → Mn₂O₃ → Mn₃O₄ → MnO)가 환원될 때 발생하는 peak이다. 그리고 450℃에서 하나의 peak가 관찰되는데 이는 표면이 아닌 bulk에 있는 TiO₂가 환원되어 발생하는 peak이다. 이들 peak를 각각 Curve fitting한 결과를 보면 TiO₂가 첨가된 C 촉매의 경우 Cu oxide와 Mn oxide가 환원되는 peak들이 저온으로 이동하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 첨가된 TiO₂와 Cu 그리고 Mn의 상호작용에 의해 oxygen bridge(Ti-O-Cu/Mn)를 형성하여 보다 낮은 온도에서 환원된 것으로 판단된다.

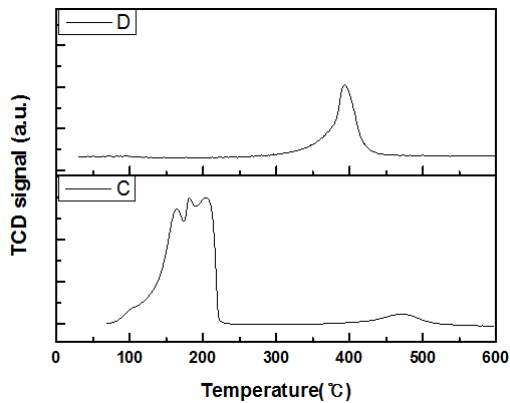


Fig. 2. H₂-TPR conversion of catalyst C and D.

XPS 분석은 광전자의 측정으로 에너지 준위를 결정함으로써 촉매의 화학결합상태 및 원소분석이 가능하며, 촉매에 다양한 금속물질들이 첨가됨에 따라 표면에 노출된 농도 이외에도 표면에 존재하는 산화상태 또한 달라질 수 있으며 이를 XPS 세부분석을 통해 각 촉매의 산화상태를 알 수 있다. [그림 3]은 A와 C 촉매를 XPS 분석한 결과이며, 여기서 A 촉매는 Mn과 Cu의 산화상태를 비교하기 위해 두 종류의 금속물질을 혼합한 촉매이다.

그림에서 O 1s를 Gaussian-Lorentzian curve fitting을 이용하여 분리한 결과 다음과 같이 3개의 peak로 분류할 수 있다[12]. 529.2eV는 Me-O를 나타내며 이는 Ti, Mn, Cu와 결합된 격자내의 산소를 의미한다[13]. 530.8 eV는 hydroxyl group(Me-OH)을 나타내는 피크

이며, 532eV는 화학흡착된 수분(Me-OH₂) peak이며 이렇게 화학흡착된 경우는 500°C 이하의 온도에서는 제거되지 않는 것으로 알려져 있다[14]. 상기의 산소종 중 hydroxyl과 같은 표면의 산소종은 촉매 반응에 있어서 산소를 쉽게 전달하는 능력을 가지고 있어 이러한 표면 산소종이 풍부할수록 낮은 온도에서 쉽게 산화환원반응을 유도하는 것으로 알려져 있다[15]. 촉매의 Me-O와 Me-OH의 비율을 측정하였을 때 C 촉매의 경우 0.79로 계산되어 Mn-Cu로 구성된 망간계 촉매[13]의 0.44보다 높아 C 촉매가 촉매의 산화환원반응에 있어서 유리할 수 있다.

Mn-Cu에 TiO₂(아나타제)가 첨가된 C 촉매, TiO₂에 V를 담지한 상용탈질촉매와 조성이 같은 D 촉매를 대상으로 반응온도에 따른 NO 전환효율을 측정하여 [그림 4]에 나타내었다. 실험조건은 NO 750ppm, NO₂ 48ppm, NH₃/NO_x=1.0, O₂ 3%, SV 60,000hr⁻¹이었다.

그림에서 전체적으로 D 촉매의 경우 반응온도가 증가할수록 NO 전환효율 또한 증가하다가 220°C부터는 일정해지는 경향을 보이고 있으며, C 촉매는 초기 반응 온도 180°C에서 최대 NO 전환효율인 약 85%를 나타내나, 반응온도가 증가함에 따라 전환효율도 지속적으로 감소하는 경향을 보인다. 그리고 반응 온도 200°C를 기점으로 낮은 반응 온도 영역에서는 C 촉매가 보다 높은 활성을 보이며, 높은 반응 온도 영역에서는 D 촉매가 상대적으로 높은 탈질효율을 보인다. 이는 반응 온도에 따른 촉매의 환원특성을 나타낸 [그림 3]의 H₂-TPR 분석결과

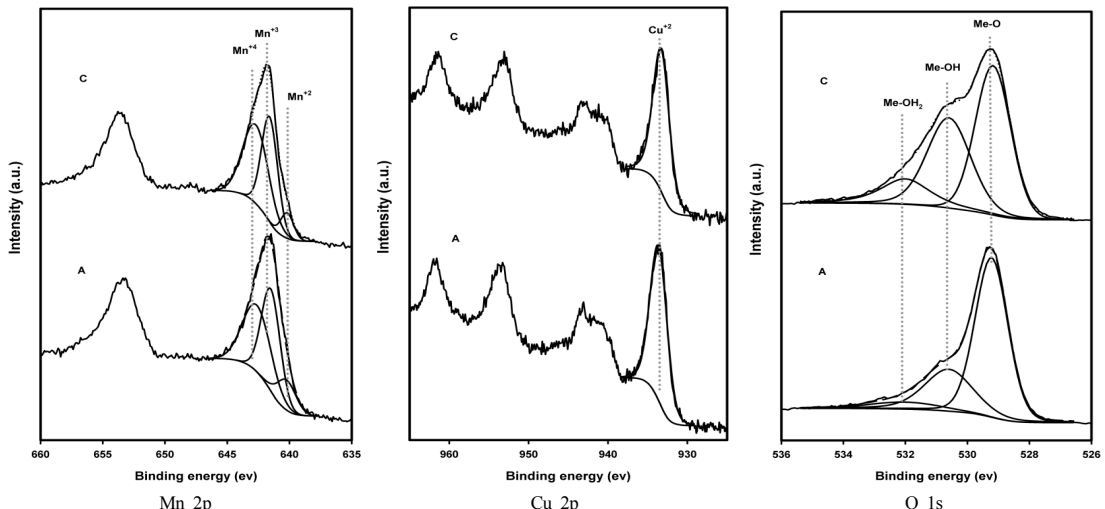


Fig. 3. XPS analysis results of catalyst A and C.

를 통해 확인할 수 있다. C 촉매는 상대적으로 낮은 온도에서 수소에 의해 환원되었으며, 반면 D 촉매의 경우는 높은 온도에서 수소에 의해 환원되었다.

일반적으로 온도가 증가함에 따라 쉽게 환원되는 촉매들은 저온에서는 높은 활성을 보이거나 반응온도가 증가함에 따라 전환효율이 감소하는 경향을 보이는데, 이는 고온영역에서 NO, NH₃를 보다 쉽게 산화시켜 선택적촉매환원반응이 아닌 부반응인 NH₃ 산화반응을 활성화시키는 경향이 있기 때문이다.

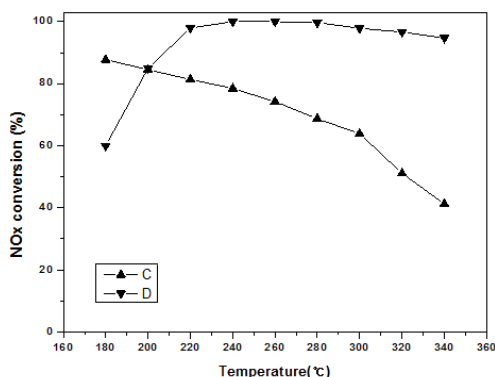


Fig. 4. NO_x conversion of catalyst C and D with reaction temperature.

저온에서 높은 활성을 보이는 촉매의 특성을 조사하기 위해 C, D촉매를 대상으로 반응온도에 따른 NH₃ 전환효율을 측정하여 [그림 5]에 나타내었다. 실험조건은 NH₃ 800ppm, O₂ 3%, SV 60,000hr⁻¹이었다. 그림에서 C 촉매의 경우 반응온도가 증가할수록 암모니아 전환효율은 높은 속도로 선형적으로 증가하는 경향을 보이다가 약 220°C부터는 거의 100% 전환되는 형태를 보인다. 반면 D 촉매의 경우 반응온도 180°C까지는 암모니아 산화반응이 거의 일어나지 않다가 반응온도 180°C에서 300°C의 범위에서 약 40%까지 급격한 증가가 일어났으나 암모니아 전환효율은 약 40% 수준이었다. 그리고 300°C 이상부터는 또다시 급격한 전환효율 증가가 있었으며 350°C에서의 전환효율은 약 70%이었다. 따라서 C 촉매의 200°C 이상의 고온에서 높은 탈질효율을 나타내기 위해서는 NH₃ 산화를 억제시키고 SCR 반응에 참여를 유도하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

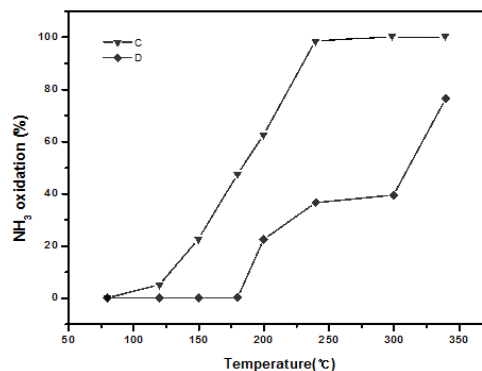


Fig. 5. NH₃ oxidation of catalyst C and D with reaction temperature.

촉매공정의 주요 변수 중의 하나가 공정의 온도범위와 촉매량을 결정하는 촉매의 성능과 그 형태이며, 여기서 특히 촉매량은 공정의 프로세스 크기와 비용을 결정짓는 중요한 요소이다. 촉매의 성능은 실험실에서 간접적으로 공간속도에 따른 질소화합물 전환효율로서 측정 가능하다.

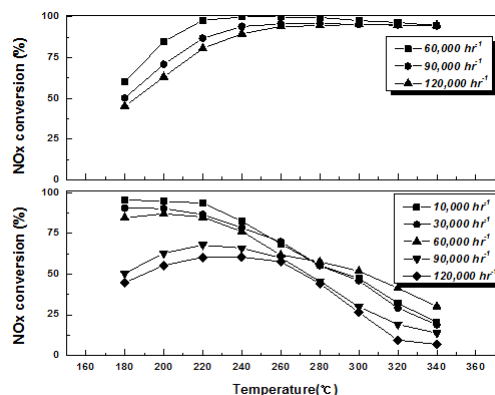


Fig. 6. NO_x conversion of catalyst C and D with space velocity.

[그림 6]은 C, D 촉매에 대한 공간속도별 NO_x 전환효율 변화를 측정된 그림이다. C 촉매는 SV 90,000h⁻¹ 이상부터 공간속도가 증가할수록 실험한 반응온도 전구간에 걸쳐 전환효율의 급격한 감소현상이 나타났으나, 반응온도 증가에 따른 전환효율 감소는 SV 60,000h⁻¹ 이하에서의 실험결과보다는 훨씬 적었다. 반응온도 260°C 이하의 일부 구간에서는 SV 90,000~120,000h⁻¹ 조건에서 반응

온도가 증가할수록 NO_x 전환효율이 증가하는 경향을 보였다. SV 6,000~120,000h⁻¹ 조건에서 실험을 수행한 D 촉매의 경우 전체적으로 300℃ 이하에서는 공간속도가 증가함에 따라 NO_x 전환효율이 감소하였으나, 그 이상의 반응온도에서는 공간속도가 증가하여도 NO_x 전환효율의 변화는 미미하였다.

4. 결론

본 논문은 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 초기 반응온도 변경을 이용한 촉매의 열적이력실험에서 Mn-Cu-TiO₂ 촉매의 경우 340℃ 이상 고온영역에서 열적변화에 의해 촉매의 물리화학적 특성이 일부 변화한 것으로 나타났으며, 전체적으로 반응온도가 증가함에 따라 전환효율도 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 이에 비해 V/TiO₂ 촉매의 경우 반응온도가 증가할수록 NO 전환효율 또한 증가하다가 220℃부터는 일정해지는 경향을 보이고 있다. Mn-Cu-TiO₂ 촉매의 경우 낮은 온도에서 비교적 높은 전환효율을 보이는데, 이는 H₂-TPR 결과로부터 확인할 수 있는 TiO₂와 Cu 그리고 Mn의 상호작용에 의해 oxygen bridge(Ti-O-Cu/Mn)를 형성하여 보다 낮은 온도에서 환원된다는 측면과 XPS분석을 통해 입증된 hydroxyl과 같은 표면의 산소종이 상대적으로 풍부하여 낮은 온도에서 산화환원반응을 보다 쉽게 유도하기 때문이다.

References

- [1] S. Yang, C. Wang, J. Li, N. Yan, L. Ma, H. Chang, "Low temperature selective catalytic reduction of NO with NH₃ over Mn-Fe spinel: performance, mechanism and kinetic study", *Appl. Catal., B: Environ.*, 110, 71-80, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.08.027>
- [2] Y. Wan, W. Zhao, Y. Tang, L. Li, H. Wang, Y. Cui, J. Gu, Y. Li, J. Shi, "Ni-Mn bimetal oxide catalysts for the low temperature SCR removal of NO with NH₃", *Appl. Catal. B: Environ.*, 148-149, 114-122, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.10.049>
- [3] T. S. Park, S. K. Jeong, S. H. Hong, S. C. Hong, "Selective catalytic reduction of nitrogen oxides with NH₃ over natural manganese ore at low temperature", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40, 4491-4495, 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie010218>
- [4] H. H. Lee, K. H. Park, W. S. Cha, "Characterization of low temperature selective catalytic reduction over Ti added Mn-Cu metal oxides", *Appl. Chem. Eng.*, 24(6), 599-604, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.14478/ace.2013.1057>
- [5] K. H. Park, S. H. You, Y. O. Park, S. W. Kim, W. S. Cha, "NO_x conversion of Mn-Cu catalyst at the low temperature condition", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 12(9), 4250-4256, 2011.
- [6] Z. H. Chen, X. H. Xi, C. P. Cen, X. Gao, L. F. Wang, "Selective catalytic reduction of NO_x on Cr-Mn mixed oxide at low temperature", *Advanced Materials Research*, 233, 1564-1567, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.233-235.1564>
- [7] G. Qi, R. T. Yang, "Performance and kinetics study for low-temperature SCR of NO with NH₃ over MnO_x-CeO₂ catalyst", *J. Catal.*, 217, 434-441, 2003.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0021-9517\(03\)00081-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0021-9517(03)00081-2)
- [8] X. Cheng, X. T. Bi, "A review of recent advances in selective catalytic NO_x reduction reactor technologies", *Particology*, 16, 1-18, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.partic.2014.01.006>
- [9] S. Y. Joshi, M. P. Harold, V. Balakotaiah, "Overall coefficients and controlling regimes in catalytic monoliths", *Chemical Engineering Science*, 65(5), 1729-1747, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2009.11.021>
- [10] F. Rahmaninejad, V. S. Gavaskar, J. Abbasian, "Dry regenerable CuO/gamma-Al₂O₃ catalyst for simultaneous removal of SO_x and NO_x from flue gas", *Appl. Catal. B: Environ.*, 119, 297-303, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.03.005>
- [11] W. Downs, S. B. Ghorishi, R. T. Bailey, K. J. Rogers, "Low-temperature, moving bed catalytic reactor for control of NO_x emission from combustion", *US patent 7,776, 293 B2*, 2010.
- [12] F. Kapteijn, L. Singoredjo, A. Andreini, J. Moulijn, "Activity and selectivity of pure manganese oxides in the selective catalytic reduction of nitric oxide with ammonia", *Applied Catalysis B: Environmental*, 3, 173, 1994.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0926-3373\(93\)E0034-9](http://dx.doi.org/10.1016/0926-3373(93)E0034-9)
- [13] M. C. Biesinger, L. W. M. Lau, A. R. Gerson, R. S. C. Smart, "Resolving surface chemical states in XPS analysis of first row transition metals, oxides and hydroxides: Sc, Ti, V, Cu and Zn", *Applied surface science*, 257 (3), 887-898, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.07.086>
- [14] F. L. Toma, G. Bertrand, S. Begin, C. Meunier, O. Barres, D. Klein, C. Coddet, "Microstructure and environmental functionalities of TiO₂-supported photocatalysts obtained by suspension plasma spraying", *Applied Catalysis B: Environmental*, 68, 74-84, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.07.009>
- [15] S. Watanabe, X. Ma, C. Song, "Characterization of Structural and Surface Properties of Nanocrystalline TiO₂-CeO₂ Mixed Oxides by XRD, XPS, TPR, and TPD", *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(32), 14249-14257, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/jp8110309>

장 현 태(Hyun-Tae Jang)

[정회원]



- 1986년 2월 : 고려대학교 화학공학과(공학사)
- 1991년 8월 : 고려대학교 화학공학과(공학석사)
- 1996년 2월 : 고려대학교 화학공학과(공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학과 교수

<관심분야>

흡착, 유동층반응

차 왕 석(Wang-Seog Cha)

[정회원]



- 1981년 8월 : 고려대학교 화학공학과(공학사)
- 1985년 2월 : 고려대학교 화학공학과(공학석사)
- 1993년 8월 : 고려대학교 화학공학과(공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 토목환경공학부 교수

<관심분야>

폐기물 가스화 및 열분해