

전처리 조건 및 황산화물에 대한 Mn-Cu계 촉매의 탈질특성

박광희¹, 유승한², 박영옥³, 김상웅⁴, 차왕석^{2*}
¹경기대학교 환경에너지시스템공학과, ²군산대학교 토목환경공학부
³한국에너지기술연구원, ⁴(주)리드제닉스

NO_x Removal of Mn Based Catalyst for the Pretreatment Condition and Sulfur Dioxide

Kwang Hee Park¹, Seung Han You², Young Ok Park³,
Sang Wung Kim⁴ and Wang Seog Cha^{2*}

¹Department of Environmental Energy Systems Engineering, Kyonggi University

²School of civil and Environmental Engineering, Kunsan National University

³Clean Fossil Fuel Research Center, Korea Institute of Energy Research

⁴Leadgenex, Co

요 약 Mn-Cu계 촉매를 사용하여 암모니아 SCR(Selective catalytic Reduction)공정에서 질소산화물 제거능을 측정하였다. 반응온도를 3가지 형태로 변화시키는 조건에서 촉매에 대한 초기반응온도의 영향을 조사하였다. 200, 300 그리고 340℃에서 소성한 촉매를 사용하여 온도변화에 따른 질소산화물 전환율, 그리고 H₂-TPR 시스템에서 온도변화에 따른 수소소모율을 측정하였다. 이산화황가스 공급유무를 조절함으로써 촉매에 대한 이산화황가스의 불활성화 효과를 파악하였다. 340℃ 이상의 온도에서 소성한 촉매는 열적쇼크에 의해 일부 불활성화되며, 이러한 불활성화 원인은 비표면적과 수소 전환율 결과로부터 추론할 수 있다.

Abstract Mn-Cu catalysts were tested for selective catalytic reduction of NO_x with NH₃. Influence of initial reaction temperature was studied for NO_x conversion in which reaction temperature was changed three patterns. NO_x conversion of catalysts calcined at 200, 300 and 340℃ was measured during the changing temperature. Hydrogen conversion efficiency of calcined catalysts was also measured in the H₂-TPR system. The deactivation effect of SO₂ on catalyst was investigated with the on-off control of SO₂ supply. The catalyst which calcined above 340℃ was somewhat deactivated with thermal shock. The reason of deactivation was draw from the results of surface area and hydrogen conversion.

Key Words : Catalyst, Sulfur Dioxide

1. 서론

화학공장, 대형 발전소, 대형 보일러 등에서 주로 사용하는 연료는 화석연료이며 화석연료는 연소시 필연적으로 질소산화물(NO_x)이 발생된다. 질소산화물은 주로 고온의 연소과정에서 공기 중에 포함되어 있는 산소와 질

소성분의 반응으로 생성되며 질소산화물은 시정장애, 온실효과(N₂O) 뿐만아니라 산성비의 원인으로 작용하며, 오존, HCHO, PAN 등의 각종 산화제를 생성하여 2차오염을 유발시킨다. 연소 후 발생하는 질소산화물을 효과적으로 처리할 수 있는 기술로는 촉매와 환원제를 이용하는 선택적 촉매환원기술(SCR: Selective Catalytic Reduction)

본 연구는 지식경제부 전력·원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Wang Seog Cha

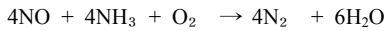
Tel: +82-11-9641-4765 wscha@kunsan.ac.kr

접수일 11년 12월 15일

수정일 (1차 12년 03월 09일, 2차 12년 04월 10일)

게재확정일 12년 04월 12일

과 촉매 사용없이 환원제만을 사용하는 선택적 무촉매 환원기술(SNCR: Selective Non Catalytic Reduction)이 있다. 이 중에서 선택적 촉매환원기술이 제거효율이 우수하고 2차오염 발생가능성이 적어 가장 효과적인 기술로 알려져 있다. 선택적 촉매환원법은 촉매상에서 아래와 같은 반응을 거쳐



질소산화물을 무해한 N₂와 H₂O로 분해하는 기술을 말한다.

선택적 촉매환원공정에서 사용되는 상용화촉매는 높은 촉매활성, N₂로의 높은 선택도, 배출가스 중 유해가스에 대한 높은 내구성 등의 특성을 가지는 바나듐-티타니아계이다[1-3]. 바나듐-티타니아계 촉매는 최적의 조업온도인 300~400℃에서 운전되고 있으며 SO₂에 대한 내구성이 우수한 편이지만 집진과 탈황 설비 후단에 선택적 촉매환원공정이 설치될 경우 이들 촉매들의 최적의 제거효율을 나타낼 수 있는 조업온도를 맞추기 위해서는 배기가스의 재가열이 요구된다.

상기의 이유로, 250℃ 이하의 낮은 온도에서 사용할 수 있는 촉매에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 이러한 촉매를 저온 SCR 촉매(Low temperature SCR catalyst)라고 명명하기도 한다[4].

많은 연구자들이 단일계 금속산화물계열[5-7], 복합금속 산화물계열[8-10], 담지된 금속산화물계열[11-14], 구리와 철 2가 양이온이 이온 교환된 제올라이트(zeolite) 계열[15,16] 등과 같은 저온 SCR 촉매에 관한 연구를 수행해 왔다. 이 중 망간산화물(MnOx)을 활성물질로 사용한 촉매 MnOx/Al₂O₃[14], MnOx/TiO₂[17,18], MnOx - CeO₂[9,10], MnOx/Active-Carbon[19,20] 등이 저온에서 높은 SCR 활성을 나타내 주목을 받았다.

일반적으로 탈황설비 후단에 선택적 촉매환원공정이 설치된다. 탈황설비에서 SO₂를 제거하더라도 일부 SO₂는 남아 있다. 이러한 SO₂는 이슬점이하에서 조업되면 배가스 중 SO₃와 암모니아가 반응하여 NH₄HSO₄와 (NH₄)₂SO₄와 같은 황산암모늄들의 형성으로 인해 촉매활성을 저하시킬 우려가 있다. 저온영역에서 생성된 황산암모늄염은 분말상의 형태이며 촉매층과 덕트 등에 침적되며 점성을 지녀 촉매활성점의 masking, 촉매기공의 plugging 현상을 유발하여 촉매활성을 심각한 수준으로 감소시키는 것으로 알려져 있다[21-23].

한편 배기가스의 온도는 보일러의 부하량과 가동중지 등 외부 조건에 따라 변화가 있을 수 있다. 이러한 선택적 촉매환원법의 조업온도가 변함에 따라 촉매의 탈질효

율의 변화가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 저온촉매로 알려진 Mn-Cu 촉매를 사용하여 전처리 조건 및 황산화물에 대한 탈질특성을 조사하였다. 탈질촉매의 특성 변화는 H₂-TPR, XRD, 비표면적 분석 등으로 확인하였다.

2. 실험 장치 및 촉매제조

2.1 촉매제조

본 연구에 사용된 촉매는 공침법(co-precipitation)으로 제조하였으며, 제조방법은 먼저 Mn(NO₃)₂·x H₂O(Sigma-Aldrich ≥ 98%) 수용액과 Cu(NO₃)₂·2.5H₂O(Sigma-Aldrich ≥ 99%) 수용액을 제조한 후 Mn/Cu atom ratio가 1.7~2.0 수준이 되도록 두 수용액을 혼합하였다. 이들 혼합된 용액에 NH₄OH(Sigma-Aldrich, 28.0-30.0% NH₃ basis)을 pH 10이 될 때까지 혼합한다. 이 후 24시간 동안 실온에서 aging한 후 얻어진 슬러지는 수차례 증류수로 세척한 후 진공증발기를 통해 70℃에서 건조하였다. 건조된 촉매는 250℃에서 4시간 동안 공기분위기에서 소성하였다. 제조한 촉매의 성분을 표 1에 나타내었으며, 두 촉매 공히 Mn, Cu로 혼합된 산화물이 주성분을 이루고 있음을 알 수 있다.

전처리에 따른 영향을 조사하기 위하여 #1, #2 두 촉매에 대하여 1분 당 10℃씩 온도를 상승하여 160, 240, 340℃의 온도에서 각각 8시간 동안 공기분위기에서 소성하였다.

[표 1] 촉매#1, #2의 EDS 분석

[Table 1] EDS of catalyst #1, #2

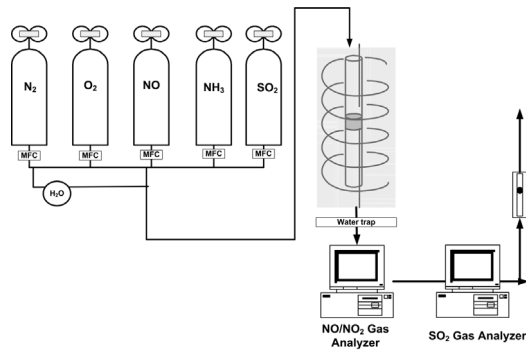
	O (wt.%)	Mn (wt.%)	Cu (wt.%)	Others (wt.%)	Total (wt.%)
#1	36.27	34.94	19.27	9.52	100
#2	40.09	36.64	20.64	2.63	100

2.2 실험방법

담체 및 촉매의 탈질반응 실험에 사용한 고정층 반응기를 그림 1에 나타내었다. 이 실험장치는 크게 가스주입 부분, 반응기부분, 그리고 반응가스분석부분으로 구성하였다.

반응기는 연속흐름형 고정층 반응장치로서 내경 8mm, 높이 600mm인 석영관으로 제작하였으며 촉매층을 고정하기 위해 quartz wool을 사용하였다. 반응기의 온도는 고정층 하부에 장착된 K-type의 열전대를 이용하여 PID 온

도제어기로 조절하였으며 가스유입부분의 온도를 측정하기 위하여 촉매층 상부에도 동일한 형태의 열전대를 설치하여 촉매층 전·후의 온도 차이를 측정하였다. 물리적 변화(mass and heat transfer limitation)가 없는 영역에서 실험을 하기 위하여 40 - 50 mesh (0.359 mm) 크기로 촉매를 분리하여 실험에 사용하였다.



[그림 1] 촉매활성실험장치 개략도
[Fig. 1] Schematic diagram of equipment for catalyst activity test

반응기에 공급되는 가스는 NO, N₂, O₂, NH₃의 각 실린더로부터 MFC(Mass Flow Controller, MKS Co.)를 사용하여 유량을 조절하였다. 또한 수분의 공급은 N₂가 bubbler를 통해 수분을 함유하여 반응기에 주입되도록 하였으며, 이 때 공급되는 양을 일정하게 유지하기 위하여 이중 jacket 형태의 bubbler 외부에 항온 순환조를 사용하여 일정온도의 물을 순환시켰다. 가스공급관은 전체에 걸쳐 스테인레스관으로 제작하였으며 NO와 NH₃가 반응하여 생기는 NH₄NO₃, NH₄NO₄와 같은 염의 생성을 방지하고 반응가스 중의 수분이 응축되지 않기 위하여 heating band를 감아 180℃로 일정하게 유지하였다.

반응물과 생성물의 농도를 측정하기 위하여 NO와 NO₂의 NO_x 분석은 화학발광분석기(42C High Level, Thermo Ins.)를 사용하였으며 NO₂는 5ppm이하가 배출되는 부분은 검지관(9L, Gas Tec. Co.)을 이용하여 교차 분석하였다. 암모니아(NH₃)의 농도는 검지관(3M, 3La, 3L, Gas Tec. Co.)을 사용하여 분석하였다.

각 촉매의 반응활성은 NO_x의 전환율로 나타내었으며 다음과 같이 정의하였으며, 정상상태에 측정된 값을 사용하였다.

$$NO_x \text{ (conversion, \%)} = \frac{C_{\text{반응전 } NO_x} - C_{\text{반응후 } NO_x}}{C_{\text{반응전 } NO_x}} \times 100$$

2.3 촉매의 특성분석

촉매의 성분을 분석하기 위하여 JEOL사의 JSM-6500F을 사용하여 EDX 분석을 수행하였다.

촉매의 환원능력을 평가하기 위하여 H₂-TPR (Temperature Programmed Reduction)을 수행하였다. 분쇄된 50 mg의 촉매를 충전 후 N₂와 O₂를 흘리며 30 cc/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 30cc 지속적으로 흘리며 10℃/min의 속도로 900℃까지 승온하며 TCD(Temperature Conductivity Detector)로 H₂의 농도를 monitoring한다. TCD의 reference gas는 Ar으로 하였으며, 이때 TCD로 수분의 유입을 막기 위하여 반응 후의 가스는 molecular sieve(4 Å) trap을 거쳐 TCD로 유입된다.

촉매의 비표면적 측정은 Micromeritics Co.의 ASAP 2010C를 사용하였으며 BET (Brunauer- Emmett-Teller)식을 이용하여 비표면적을 구하였다. 공극크기분포 (Pore size distribution)는 Kelvin식을 통해 유체의 meniscus의 평균반경과 상대압력에서의 흡착층의 두께를 이용하여 세공의 크기를 계산하는 방법인 BJH (Barrett - Joyer-Hanlenda)법에 의하여 계산하였다. 이 때 각각의 시료는 110℃에서 3~5시간 동안 진공상태로 degassing한 후 분석하였다.

촉매의 결정구조를 관찰하기 위하여 실시되었으며 MAC Science Co.의 MX18X HF-SRA에 의하여 분석되었다. Radiation source로는 Cu Kα (λ = 1.5056 Å)가 사용되었으며, X-ray generator는 18 kW이고, monochromator는 사용하지 않았다. 2θ는 10~90°의 범위에서 6°/min의 주사속도에 의하여 측정되었다.

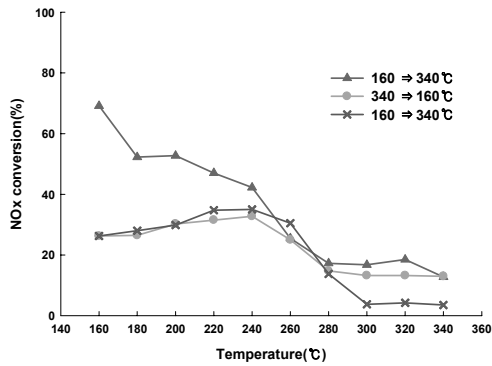
3. 실험결과 및 고찰

3.1 초기반응온도의 영향

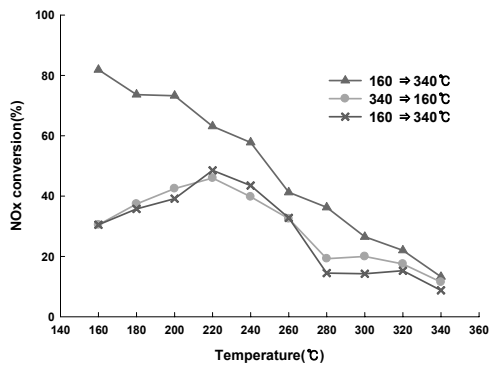
초기반응온도에 대한 Mn-Cu계 #1, #2 탈질촉매의 탈질특성을 조사하기 위해 3가지 조건에서 실험을 수행하였다. 먼저 초기반응온도 160℃에서 시작하여 최종적으로 340℃까지 온도를 상승시키면서 탈질특성을 파악한 후(I), 동일한 시료를 340℃에서 시작하여 160℃로 온도를 감소시키면서 탈질특성을 측정하였다(II). 그리고 상기의 시료 즉 조건 II에서 실험한 시료를 다시 반응온도

160℃에서 시작하여 최종적으로 340℃까지 온도를 상승시키면서 탈질효율을 측정하였으며(III) 이에 대한 실험 결과를 그림 2에 나타내었다. 탈질반응조건은 NO 750 ppm, NO₂ 48 ppm, NH₃/NO_x=1.0, O₂ 8%, H₂O 6%, SV 60,000hr⁻¹ 에서 각각 실험을 수행하였다.

#1, #2 촉매 모두 실험방법 II와 III의 경우가 실험방법 I에 비해 전체적으로 반응온도에 따른 탈질효율이 감소되었으며 특히 220℃이하의 저온영역에서 효율감소가 두드러짐을 알 수 있다. 그리고 이러한 경향은 그림 3에서와 같이 동일한 탈질반응 조건에서 공간속도가 30,000hr⁻¹ 으로 감소한 실험에서도 동일한 형태를 유지함을 확인할 수 있다. 이는 340℃ 이상의 고온에서 촉매의 물리·화학적 특성이 일부 변한 것으로 판단된다.



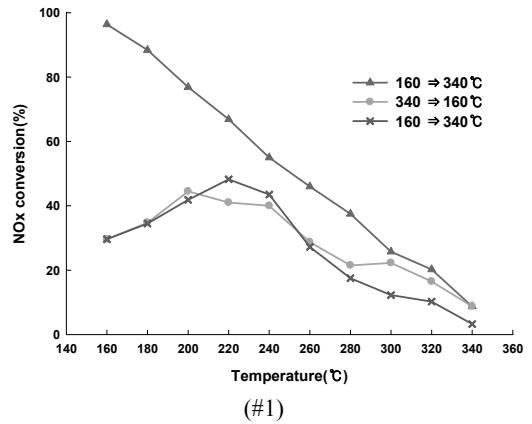
(#1)



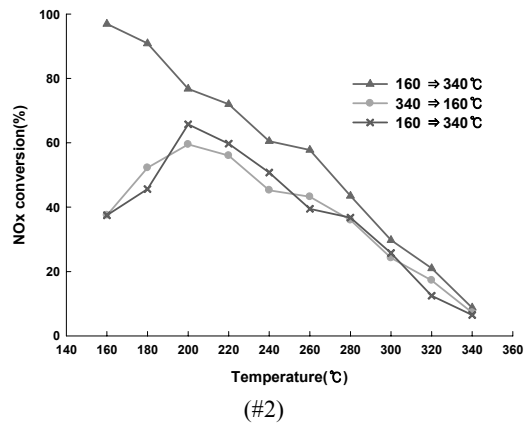
(#2)

[그림 2] #1, #2 탈질촉매의 초기 반응온도에 따른 탈질효율의 영향(실험조건 : NO 750 ppm, NO₂ 48 ppm, NH₃/NO_x=1.0, O₂ 8%, H₂O 6%, SV 60,000hr⁻¹).

[Fig. 2] NO_x removal of catalyst on the initial reaction temperature(Condition : NO 750 ppm, NO₂ 48 ppm, NH₃/NO_x=1.0, O₂ 8%, H₂O 6%, SV 60,000hr⁻¹).



(#1)



(#2)

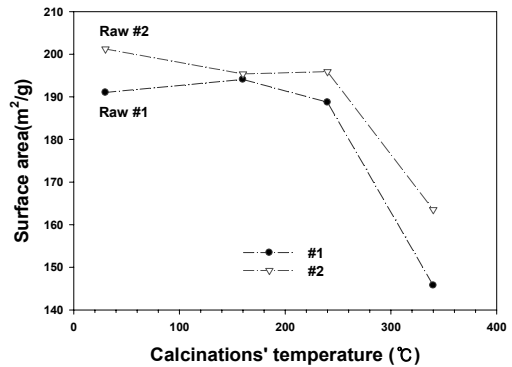
[그림 3] #1, #2 탈질촉매의 초기 반응온도에 따른 탈질효율의 영향(실험조건 : NO 750 ppm, NO₂ 48 ppm, NH₃/NO_x=1.0, O₂ 8%, H₂O 6%, SV 30,000hr⁻¹).

[Fig. 3] NO_x removal of catalyst on the initial reaction temperature(Condition : NO 750 ppm, NO₂ 48 ppm, NH₃/NO_x=1.0, O₂ 8%, H₂O 6%, SV 30,000hr⁻¹).

#1, #2 촉매의 초기반응온도 영향을 조사하기위해 소성시키지 않은 원시료와 원시료를 160, 240, 340℃에서 각각 8시간씩 공기분위기에서 소성한 시료를 XRD로 분석하였으며 분석결과를 그림 4에 나타내었다.

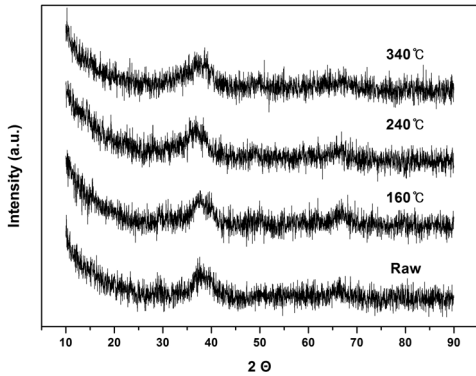
그림에서 원시료를 포함하여 각 온도에서 소성한 촉매 시료 모두 XRD에서의 차이점은 없는 것으로 나타났다. 다양한 망간산화가를 가지는 물질로 구성된 NMO(Natural Manganese Oxide : 천연망간광석)의 경우 망간산화물 중 MnO₂의 형태가 Mn₂O₃ 형태로 변이되는 온도는 575℃ 이후에서 시작되며 600℃ 이후에서는 완전한 Mn₂O₃의 형태를 이룬다고 알려져 있다[5]. 따라서 본 실험에 사용

한 망간계 촉매의 경우 구조상 상변이가 일어나는 600°C 이하인 340°C에서 소성이 이루어져 촉매 상에서의 뚜렷한 구조상의 변화는 일어나지 않은 것으로 나타났다. 소성온도에 따라 망간계 촉매의 물리적 특성변화를 조사하기 위해 160°C, 240°C 그리고 340°C에서 소성된 촉매의 비표적을 측정하여 그림 5에 나타내었다. 촉매의 비표면적은 Micromeritics사의 ASAP 2010C를 사용하였으며 BET (Brunauer Emmett -Teller)식을 이용하여 비표면적을 구하였다. 그림에서 촉매의 비표면적은 소성온도 240°C까지에서는 거의 변화가 없었으나 340°C 부근에서는 크게 감소함을 알 수 있다. 따라서 상기의 결과들로부터 340°C이상에서 소성한 촉매의 경우 저온에서의 활성과 촉매의 비표면적이 감소함을 알 수 있다.

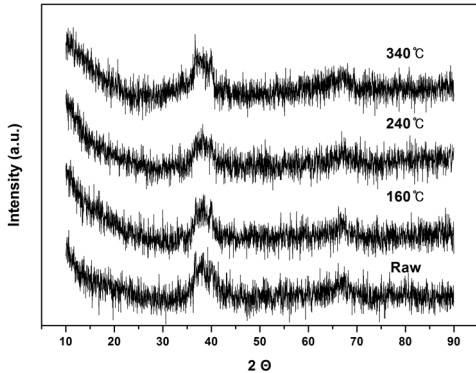


[그림 5] 소성온도에 따른 #1, #2 탈질촉매의 비표면적의 변화

[Fig. 5] Change of surface area of catalyst #1, #2 with calcination temperature.

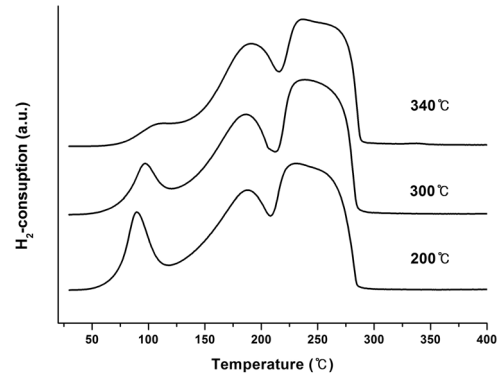


(#1)

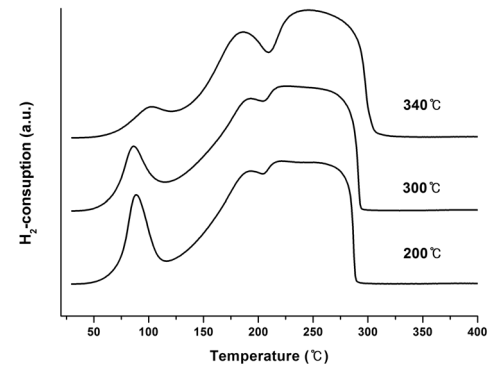


(#2)

[그림 4] 소성온도에 따른 #1, #2 탈질촉매의 XRD
[Fig. 4] XRD of catalyst #1, #2 with calcination temperature.



(#1)



(#2)

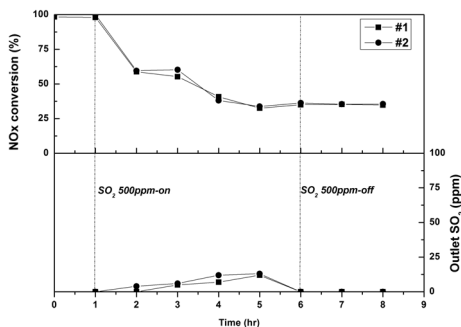
[그림 6] 소성온도에 따른 #1, #2 탈질촉매의 H₂-TPR(10% H₂/Ar 조건에서 분당 10°C 상승).
[Fig. 6] H₂-TPR of catalyst #1, #2 with calcination temperature(10% H₂/Ar 50cc/min reduction with heating rate 10°C/min).

소성온도에 따른 촉매의 환원특성을 조사하기 위해 H₂-TPR을 측정하였으며 H₂-TPR 실험조건은 10% H₂/Ar의 환원분위기에서 분당 10°C의 속도로 상승시켰다. 그리고 촉매는 산소분위기에서 200, 300, 340°C의 조건에서 약 8시간 소성시켰다.

H₂-TPR 실험결과를 나타낸 그림 6에서 첫번째 발생한 피크는 촉매에 결합되어 있는 Hydroxyl(Me-OH)에 의하여 발생한 것으로 이는 일반적으로 400°C 이하에 온도에서는 완벽히 제거되지 않는 것으로 알려져 있다[4]. 두번째 발생하는 피크는 표면에 존재하는 Cu⁺²가 Cu⁰로 환원됨에 따라 발생하는 피크이며[24], 세 번째 peak는 망간 산화물(MnO₂ → Mn₂O₃ → Mn₃O₄→MnO)이 환원되면서 발생한 피크이다. 촉매 #1, #2 공히 200°C 이상에서는 전체적으로 그래프의 형태가 매우 유사함을 보여주고 있으나 120°C 이하의 온도에서는 소성온도가 증가할수록 피크가 상당히 감소함을 알 수 있다.

3.2 SO₂에 대한 영향

탈질촉매의 황산화물에 대한 영향을 조사하기 위해 먼저 탈질촉매 #1, #2를 250°C의 반응온도에서 약 2시간 이상 유지시켜 반응기내의 조건이 정상상태에 도달하였을 때 SO₂를 주입하였다. SO₂를 주입하기전 탈질조건은 NO 750ppm, NO₂ 48ppm, NH₃/NO_x=1.0 O₂ 8%, H₂O 6%, 공간속도 30,000hr⁻¹이었다. SO₂를 주입한 후 반응기 배출부에서 연속적으로 NO_x와 SO₂ 농도를 측정하여 SO₂ 주입에 따른 탈질촉매의 탈질특성을 조사하였다. 그리고 on-line으로 측정된 NO_x와 SO₂ 값을 통해 탈질촉매의 활성변화가 크게 일어나는 시점에 SO₂ 주입을 중단시킨 탈질조건에서 피독된 촉매의 탈질능도 측정하여 그림 7에 나타내었다.



[그림 7] 탈질촉매 #1, #2의 SO₂에 대한 영향(실험조건: NO 750ppm, NO₂ 48 ppm, NH₃/NO_x=1.0, SO₂ 500ppm, O₂ 8%, H₂O 6%, SV 30,000hr⁻¹)

[Fig. 7] Effect of SO₂ on the catalyst #1, #2 (conditions: NO 750ppm, NO₂ 48 ppm, NH₃/NO_x=1.0, SO₂ 500ppm, O₂ 8%, H₂O 6%, SV 30,000hr⁻¹)

그림에서 SO₂가 주입되기 전에는 일정 수준의 탈질효율을 보였으나 SO₂가 주입되고 난 후 탈질촉매의 탈질효율은 급격히 감소함을 보여주고 있다. 이는 Mn-Cu인 #1, #2 촉매의 경우 탈질반응 중 SO₂가 주입되면 먼저 촉매 중 Mn성분들이 SO₂와 흡착반응이 일어나 MnSO₄등의 형태로 전환되기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 사실은 탈질반응기 출구 부분의 SO₂ 농도를 측정된 실험결과로부터 일부 확인할 수 있다. 그림에서 출구부분 SO₂의 농도가 탈질반응이 진행되는 동안 지속적으로 10ppm미만 수준을 유지하고 있음을 알 수 있다. 그리고 SO₂ 주입을 중단시켜도 탈질촉매의 효율 상승을 일어나지 않는 것으로 나타났다. 이는 SO₂와 흡착반응한 촉매는 탈질조건에서 SO₂와 탈착하지 않고 계속 SO₂와 결합한 형태로 유지하고 있기 때문인 것으로 판단된다[1].

4. 결론

본 연구에서는 저온에서 비교적 높은 활성을 나타내는 Mn-Cu계 #1, #2 촉매를 사용하여 소성온도 등의 전처리 조건과 반응온도, 대표적 산성가스인 황산화물에 대한 반응조건에 대한 탈질영향을 조사하였다.

1. 약 300°C 이상의 온도에서 열적 shock을 받은 촉매의 경우 전체적으로 열적 shock을 받지 않은 촉매에 비해 탈질능이 감소하였으며 특히 저온영역에서의 감소폭이 두드러짐을 알 수 있었다.
2. Mn-Cu계 촉매의 소성조건에 따른 탈질능 변화를 분석한 H₂-TPR과 비표면적 분석자료로부터 약 340°C 반응온도부터 촉매의 환원능력과 비표면적에서의 감소가 있음을 확인할 수 있었다.
3. Mn-Cu계 탈질촉매는 황산화물에 민감하였으며 피독된 촉매의 경우 황산화물이 존재하지 않은 조건에서 재생되지 않음을 알 수 있었다.

References

- [1] Taek-Sung Hwang, Myung-Kuy Park, Young-Woo Rhee, Hee-Gweon Woo., "A study on the activity of V₂O₅/TiO₂ catalyst for NO_x removal", J. Korean Ind. Eng. Chem., Vol. 14, 2, 202-207, 2003.
- [2] A. P. Walker, "Mechanistic studies of the selective reduction of NO_x over Cu/ZSM-5 and related system", Catalyst Today, 26, 107-116, 1995.
- [3] H. Bosch and F. Janssen, "Catalytic reduction of nitrogen oxides, A review on the fundamentals and technology", Catal. Today, 2, 369-375, 1988.

- [4] J. Li, H. Chang, L. Ma, J. Hao and R.T. Yang, "Low-temperature selective catalytic reduction of NOx with NH₃ over metal oxide and zeolite catalysts-A review", *Catalysis today*, 175, 147-156, 2011.
- [5] F. Kapteijn, L. Singoredjo, A. Andreini and J. Moulijn, "Activity and selectivity of pure manganese oxides in the selective catalytic reduction of nitric oxide with ammonia", *Applied Catalysis B: Environmental*, 3, 173-189, 1994.
- [6] T.S. Park, S.K. Jeong, S.H. Hong and S.C. Hong, "Selective catalytic reduction of nitrogen oxides with NH₃ over natural manganese ore at low temperature", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40, 4491-4495, 2001.
- [7] X. Tang, J. Hao, W. Xu and J. Li, "Low temperature selective catalytic reduction of NOx with NH₃ over amorphous MnOx catalysts prepared by three methods", *Catalysis Communications*, 8, 329-334, 2007.
- [8] M. Kang, E.D. Park, J.M. Kim and J.E. Yie, "Cu-Mn mixed oxides for low temperature NO reduction with NH₃", *Catalysis today*, 111, 236-241, 2006.
- [9] G. Qi and R.T. Yang, "Performance and kinetics study for low-temperature SCR of NO with NH₃ over MnOx-CeO₂ catalyst", *Journal of Catalysis*, 217, 434-441, 2003.
- [10] G. Qi, R.T. Yang and R. Chang, "MnOx-CeO₂ mixed oxides prepared by co-precipitation for selective catalytic reduction of NO with NH₃ at low temperatures", *Applied Catalysis B: Environmental*, 51, 93-106, 2004.
- [11] M. Kang, E.D. Park, J.M. Kim and J.E. Yie, "Manganese oxide catalysts for NOx reduction with NH₃ at low temperatures", *Applied Catalysis A: General*, 327, 261-269, 2007.
- [12] W.S. Kijlstra, J.C.M.L. Daamen, J.M. van de Graaf and B. van der Linden, E.K. Poels, A. Bliet, "Inhibiting and deactivating effects of water on the selective catalytic reduction of nitric oxide with ammonia over MnOx/Al₂O₃", *Applied Catalysis B: Environmental*, 7, 337-357, 1996.
- [13] L. Singoredjo, R. Korver, F. Kapteijn and J. Moulijn, "Alumina supported manganese oxides for the low-temperature selective catalytic reduction of nitric oxide with ammonia", *Applied Catalysis B: Environmental*, 1, 297-316, 1992.
- [14] W. Sjoerd Kijlstra, M. Biervliet, E.K. Poels and A. Bliet, "Deactivation by SO₂ of MnOx/Al₂O₃ catalysts used for the selective catalytic reduction of NO with NH₃ at low temperatures", *Applied Catalysis B: Environmental*, 16, 327-337, 1998.
- [15] A.Z. Ma and W. Grunert, "Selective catalytic reduction of NO by ammonia over Fe-ZSM-5 catalysts", *Chemical Communications*, 71-72, 1999.
- [16] G. Qi and R.T. Yang, "Ultra-active Fe/ZSM-5 catalyst for selective catalytic reduction of nitric oxide with ammonia", *Applied Catalysis B: Environmental*, 60, 13-22, 2005.
- [17] Z. Wu, B. Jiang, Y. Liu, W. Zhao and B. Guan, "Experimental study on a low-temperature SCR catalyst based on MnOx/TiO₂ prepared by sol-gel method", *Journal of hazardous materials*, 145, 488-494, 2007.
- [18] Z. Wu, R. Jin, Y. Liu and H. Wang, "Ceria modified MnOx/TiO₂ as a superior catalyst for NO reduction with NH₃ at low-temperature", *Catalysis Communications*, 9, 2217-2220, 2008.
- [19] G. Marban, T. Valdes-Solis and A.B. Fuentres, "Mechanism of low-temperature selective catalytic reduction of NO with NH₃ over carbon-supported Mn₃O₄: Role of surface NH₃ species: SCR mechanism", *Journal of Catalysis*, 226, 138-155, 2004.
- [20] T. Valdes-Solis, G. Marban and A.B. Fuentres, "Low-temperature SCR of NOx with NH₃ over carbon-ceramic supported catalysts", *Applied Catalysis B: Environmental*, 46, 261-271, 2003.
- [21] H. Niiyama, K. Maruta and E. Echigoya, "The mechanism of the reaction of NO with NH₃ over Cr₂O₃/Al₂O₃ and Cr₂O₃ catalysts; Part II. Isotope labelling studies", *Journal of Catalysis*, 48, 201-207, 1997.
- [22] S. J. Lee and S. C. Hong, "Deactivation and regeneration of a used de-NOx SCR catalyst for wastes incinerator", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 19, No. 3, 259-263, 2008.
- [23] Jong-Sun Lim, Tae-Won Kim, Hea-Kyung Park, Man-Sik Yoo., "A study on the deactivation of commercial SCR catalyst(V₂O₅-WO₃/TiO₂) for the reduction of NOx", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 1125-1130, 2004.
- [24] J. Papavasiliou, G. Avgouropoulos and T. Ioannides, "Combined steam reforming of methanol over Cu - Mn spinel oxide catalysts.", *Journal of Catalysis*, 251 (1), 7-20, 2007.
- [25] R. Craciun, B. Nentwick, K. Hadjiivanov and H. Knözinger, "Structure and redox properties of MnOx/Yttrium-stabilized zirconia (YSZ) catalyst and its used in CO and CH₄ oxidation.", *Applied Catalysis A: General*, 243, 67-79, 2003.

박 광 희(kwang-Hee Park)

[정회원]



- 2006년 2월 : 경기대학교 환경공학(공학사)
- 2008년 2월 : 경기대학교 환경공학(공학석사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 환경공학과 박사과정

<관심분야>
질소산화물 제거기술

김 상 응(Sang Woong Kim)

[정회원]

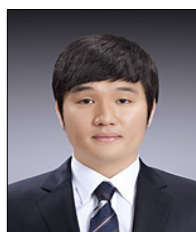


- 1985년 2월 : 경북대학교 화학과(이학사)
- 1987년 2월 : 경북대학교 화학과(이학석사)
- 1993년 7월 : 텍사스공과대학교 화학과(이학박사)
- 1995년 7월 : UCLA화학과(박사후 연구원)
- 2000년 9월 : LG화학기술연구원 책임연구원
- 2000년 10월 ~ 현재 : 주식회사 리드제믹스 대표이사

<관심분야>
환경관련 촉매 및 부품소재, CO2저장기술

유 승 한(Seung-Han You)

[준회원]



- 2010년 2월 : 군산대학교 환경공학(공학사)
- 2010년 2월 ~ 현재 : 군산대학교 환경공학과 석사과정

<관심분야>
이산화탄소 포집기술

차 왕 석(Wang-Seog Cha)

[정회원]



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

<관심분야>
폐기물 가스화 및 열분해

박 영 옥(Young-Ok Park)

[정회원]



- 1976년 8월 : 성균관대학교 화학공학과(공학사)
- 1982년 3월 : 성균관대학교 화학공학과(공학석사)
- 1990년 8월 : 성균관대학교 화학공학과(공학박사)
- 1991년 7월 ~ 1993년 8월 : 미네소타대학교 Post-Doc.
- 1999년 7월 ~ 2004년 8월 : 국가지정연구실장
- 1999년 12월 ~ 2004년 12월 : 한국에너지기술연구원 청정에너지연구부부장
- 1982년 3월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원, 책임연구원

<관심분야>
다기능 여과기술, 융합형 배가스 처리기술, 오염촉매 현장재생기술, 악취/VOC 처리기술, 고도 미세입자상물질 처리기술