

소성 및 산소농도 조건에 대한 Mn-Cu-TiO₂ 촉매의 탈질 특성

장현태¹, 차왕석^{2*}

¹한서대학교 화학공학과, ²군산대학교 환경공학과

NO_x removal of Mn-Cu-TiO₂ catalyst for the calcination and oxygen concentration conditions

Hyun Tae Jang¹, Wang Seog Cha^{2*}

¹Department of Chemical Engineering, Hanseo University

²Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

요약 본 Mn-Cu-TiO₂ 촉매를 이용하여 질소산화물을 제거하는 NH₃-SCR 공정에서 소성조건 및 산소농도에 대한 영향을 연구하였다. 소성된 촉매시료를 사용하여 H₂-TPR 시스템에서 반응온도에 따른 수소전환특성을 조사하였으며, 소성 조건에 대한 비표면적변화도 측정하였다. 실험결과 적합한 소성온도는 약 300°C이며, 소성온도가 500°C 이상일 경우 Mn, Cu 성분의 저온활성이 크게 감소함을 알 수 있었다. SCR 반응에서 기상산소는 중요한 반응변수이며 반응에 적합한 농도는 약 8vol%이었다.

Abstract DeNO_x catalysts composed of Mn, Cu and TiO₂ were prepared and tested for NH₃-SCR. The performance of each catalyst was studied for the NO_x removal efficiency while changing the calcination temperature, reaction time, and oxygen concentration. The hydrogen conversion efficiency of a calcined catalyst was measured at the H₂-TPR system. The change in the specific surface area of catalyst according to the calcination temperature was analyzed. As a result, the proper calcination temperature was approximately 300°C. If the calcination temperature is increased to 500°C, the NO_x removal efficiency of Mn and Cu constituents is largely decreased at the low temperature range. Oxygen in flue gas is an important parameter in the SCR reaction and optimal oxygen concentration is approximately 8 vol.%.

Key Words : Mn-Cu-TiO₂ catalyst, DeNO_x, calcination, oxygen concentration

1. 서론

질소산화물에는 NO, NO₂, NO₃, N₂O₃, N₂O₄, N₂O₅ 등이 존재하는 것으로 알려져 있으나 통상적으로 질소산화물이라고 할 때에는 NO와 NO₂를 뜻하며 구성비는 90~95% NO와 5~10% NO₂이다. 여기서 NO는 무색·무취의 기체로서 대기 중에서 쉽게 황갈색의 NO₂로 전환되는 특성을 가지고 있다[1].

NO_x 제어기술은 연소 전 탈질법, 연소 중 탈질법, 연소 후 탈질법으로 크게 나눌 수 있는데 현재 가장 널리

적용되고 있는 기술이 연소 후 탈질법인 선택적 촉매환원(selective catalytic reduction:SCR)법이다. SCR법은 고정자산 투자와 운전비가 저렴하고, ammonia 공급기와 반응기만이 필요한 단순공정이며, 90% 이상의 높은 NO_x 전환율을 얻을 수 있고, 또한 폐수 등의 부산물이 없다는 장점을 가지고 있다[2].

현재 SCR공정에서 가장 널리 적용되고 있는 촉매시스템은 V₂O₅-WO₃/TiO₂(anatase)촉매시스템이며 상기 촉매시스템은 주로 300~400°C의 온도영역에서 적용되고 있다. 촉매시스템이 300~400°C의 고온에서 장시간

이 논문은 산업자원부 전략연구개발사업의 지원에 의해 이루어졌음.

*Corresponding Author : Wang-Seog Cha(Kunsan National Univ.)

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

Received October 10, 2014

Revised October 30, 2014

Accepted January 8, 2015

사용하게 되면 열적피로에 의해 촉매활성이 저하되는 문제점이 일어나고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 비교적 저온영역인 250℃ 이하에서 사용 가능한 촉매의 개발이 요구되고 있다. 전이금속을 사용하여 저온에서도 효율적으로 작용하는 촉매시스템이 보고되고 있다[3]. 최근의 연구결과 중 Mn계를 단독으로 사용한 경우[4], Mn계에 Ni, Ce, Fe 등을 첨가한 2성분 또는 복합산화물촉매[5-8], 지지매리아를 혼합한 금속산화물촉매[9,10] 등이 있다. 여기서 Ni-MnO_x/TiO₂[5], Sn-MnO_x-CeO₂[8], Cu-Mn[11] 등과 같은 복합망간산화물계 촉매의 경우 저온에서 높은 질소산화물 제거효율을 보임을 보고하였다.

산화물 형태의 촉매를 다양한 온도에서 소성시키는 연구를 통해 적절한 소성온도조건을 얻어 촉매의 안정성을 유지할 수 있음을 보고하였으며[12,13], 또한 탈질반응과정에서 기상산소의 역할 및 농도에 관한 연구도 수행하여 탈질공정의 조건을 최적화하기도 하였다[14].

따라서 본 연구에서는 저온에서 높은 활성을 보이는 Mn-Cu-TiO₂촉매를 사용하여 소성온도에 따른 탈질특성과 물리적 특성변화를 조사하였다. 또한 탈질반응에서 주요 반응변수인 산소농도의 영향도 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 촉매제조

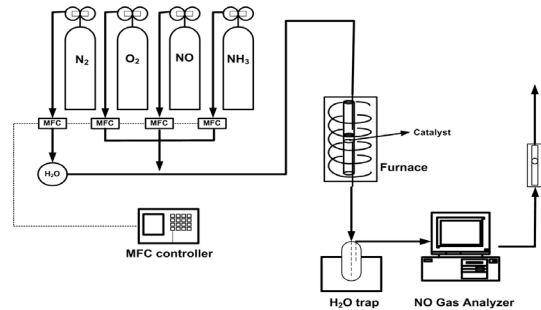
본 연구에서 사용된 Mn-Cu촉매는 공침법(co-precipitation method)으로 제조되었다. Mn과 Cu의 원자비를 1.0으로 하여 Mn(NO₃)₂·xH₂O(Sigma-Aldrich, purity: ≥98%)과 Cu(NO₃)₂·2.5H₂O(Sigma-Aldrich, purity: ≥99%)수용액을 준비하고 혼합하였다. 이 혼합용액의 pH는 NH₄OH를 적정하여 10으로 조절하였으며, 상온에서 24시간동안 보관한 후 pH가 중성이 될 때까지 여과와 세정을 반복하였다. 이 혼합 슬러리는 70℃ 회전진공증발기(Eyela Co. N-N series)를 이용하여 건조시켰다. Ti가 첨가된 촉매는 TiCl₄(Sigma-Aldrich, purity: ≥99%)를 Mn-Cu혼합용액에 Ti와 Mn의 비를 0.2로 하여 상기와 같은 방법으로 건조하였다. 최종적으로 건조된 시료들은 공기분위기에서 10℃/min의 승온속도로 200~500℃의 온도에서 각각 4시간동안 소성하여 촉매를 제조하였다. 여기서, 제조된 촉매들은 B와 C로 표기하였으며, 기재된 숫자는 소성온도를 의미한다.

2.2 촉매반응실험

촉매의 SCR 반응활성을 확인하기 위한 반응기는 연속흐름형 고정층 반응기로서 [그림 1]과 같다. 내경 8mm, 높이 600mm인 석영관을 사용하였고, 촉매층을 고정하기 위해 Quartz wool을 사용하였다. 반응기에 공급되는 가스는 N₂, O₂, NH₃, NO가 각각의 실린더로부터 MFC(Mass Flow Controller, MKS Co.)을 사용하여 유량을 조절하였다. 또한, 수분의 공급은 공기가 Bubbler를 통하여 수분을 함유하도록 하여 반응기내로 주입시켰다. 가스공급관은 반응기로 유입되는 NO와 NH₃가 반응하여 생성되는 염의 생성을 방지하고 반응가스 중의 수분이 응축되지 않도록 180℃를 일정하게 유지하여 예열하였다. 반응물과 생성물의 농도를 측정하기 위하여 NO의 농도는 비분산 적외선 가스분석기(ZKJ-2, Fuji Electric Co.)로 측정하고, NO₂의 농도와 미반응하여 배출되는 NH₃의 농도는 각각 검지관(NO₂:9L, NH₃:3M, 3La, 3L, Gas Tec. CO.)을 사용하여 측정하였으며, 해당 반응온도에서 30분 동안 유지한 후 측정하였다.

촉매층에 의한 NOx의 전환율은 다음과 같이 계산하였다[17].

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



[Fig. 1] Schematic diagram of the experimental system.

2.3 촉매특성분석

촉매의 비표면적 분석은 Micromeritics Co.의 ASAP 2010C를 사용하였다. 촉매의 흡착된 산소의 환원특성을 알아보기 위하여 H₂-TPR를 실시하였으며 과정은 다음과 같다. 100μm이하로 분쇄된 0.3g의 촉매를 충전한 다음 5% O₂/Ar 가스를 300cc/min의 유속으로 주입하였으며 촉매표면의 수분제거 및 촉매의 활성화를 위해 상기의

유속 조건에서 300℃에서 30분간 유지하였다. 상온(약 30℃)으로 하강한 후 5% H₂/Ar가스를, 30cc/min의 유속으로 주입하여 촉매표면에 수소를 흡착시키며, 충분히 흡착될 때까지 monitoring하였다. 이후 5% H₂/Ar가스를, 30cc/min의 유속으로 지속적으로 주입하며 10℃/min의 승온속도로 600℃까지 승온하면서 H₂ 농도의 변화를 측정하였다. 분석기는 2920 Autochem(Micromeritics)를 사용하였으며, 농도 측정을 위해 detector는 TCD(Thermal Conductivity Detector)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

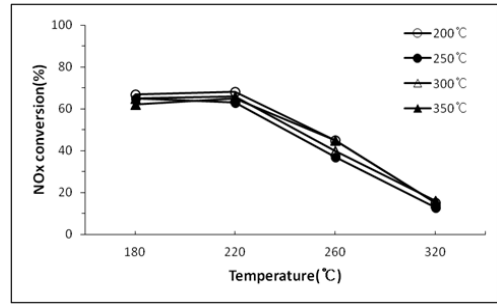
3.1 소성온도의 영향

탈질촉매는 효율증진을 위해 다양한 물질을 혼합하거나 또는 주요 지지체에 활성물질을 담지하는 과정을 통해 제조된다. 제조된 촉매는 일반적으로 소성과정을 거쳐 최적화 및 안정화 된다. 소성과정에서의 변수들은 소성시간, 소성온도, 소성분위기 등인데 이 중에서 특히 촉매구성을 위해 혼합된 일부 물질들은 일정 온도이상에서 결정구조 등이 변하는 과정을 거치게 된다. 망간산화물은 570~600℃ 온도구간에서 망간의 산화도가 변하며 티타니아는 온도증가에 따라 몽침현상이 발생하며 결정성이 증가한다.

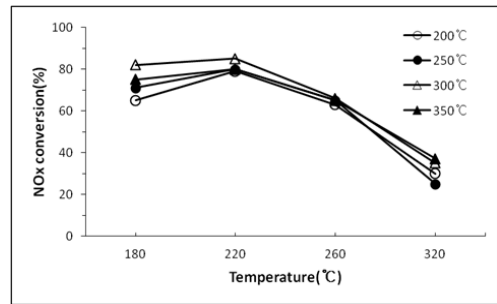
[그림 2]는 소성온도의 영향을 조사하기 위해 Mn-Cu로 구성된 탈질촉매 B와 Mn-Cu-TiO₂로 구성된 탈질촉매 C를 대상으로 200, 250, 300, 350℃에서 각각 8시간씩 공기 분위기에서 소성하여 얻은 각 촉매를 사용하여 다양한 반응온도에서의 탈질효율을 측정한 그림이다. 실험 조건은 NO 750ppm, NO₂ 48ppm, NH₃/NO_x=1.0, O₂ 8%, H₂O 6%, SV 60,000hr⁻¹이었다. 그림에서 전체적으로 Mn-Cu촉매(B)에 TiO₂가 첨가된 Mn-Cu-TiO₂촉매(C)가 전반온도에 걸쳐 탈질효율이 우수하였다. 촉매 B의 경우 220℃ 반응온도까지 일정한 탈질효율을 유지하다가 반응온도 증가에 따라 급격하게 감소하는 경향을 보이며, 소성온도를 달리하여도 반응온도에서의 탈질효율에서의 변화는 매우 적음을 알 수 있다. 촉매 C의 경우 180℃에서 220℃까지 반응온도가 증가함에 따라 탈질효율 또한 증가하는 경향을 보이다가 반응온도 220℃ 이후부터는 촉매 B와 유사하게 탈질효율이 급격하게 감소하였다. 그리고 촉매 C는 촉매 B의 경우와 달리 비교적 저온영역인 반응온도 220℃ 범위에서 소성온도가 증가할수록 탈질효

율 또한 증가하여 300℃ 소성온도에서 최대 85%의 탈질효율을 보였다.

소성온도에 따른 탈질촉매의 물리적 특성변화를 조사하기 위해 먼저 가장 대표적인 물리적 특성치인 비표면적 변화를 측정하였다. 소성된 각 촉매를 110℃에서 5시간동안 진공상태로 탈기한 후 분석을 실시하였다.

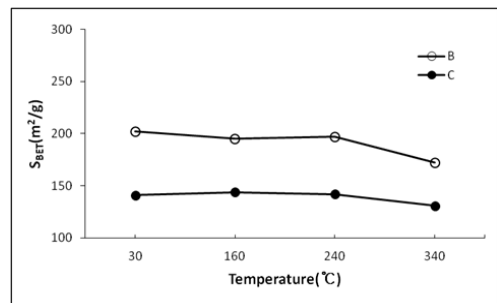


(1) Catalyst B



(2) Catalyst C

[Fig. 2] NO_x conversion of catalyst B and C according to the calcination temperature.

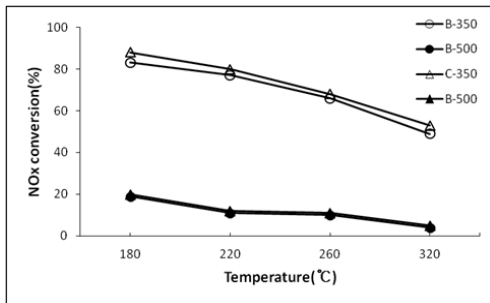


[Fig. 3] Specific surface area of catalyst B and C according to calcination temperature.

[그림 3은] 소성온도에 따른 각 촉매의 비표면적변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 전체적으로 Mn-Cu 촉매(B)에 TiO₂를 첨가한 경우인 C촉매의 경우 B촉매보다

비표면적이 감소하였다. 소성전 원시료를 비교하였을 경우 B촉매의 경우 202m²/g이었으나 C촉매의 경우 141m²/g이었다. B, C촉매 공히 소성온도를 240°C까지 상승시켜도 비표면적에서의 변화가 없었으나 340°C에서 소성한 경우는 비표면적에서 다소의 감소가 있었다.

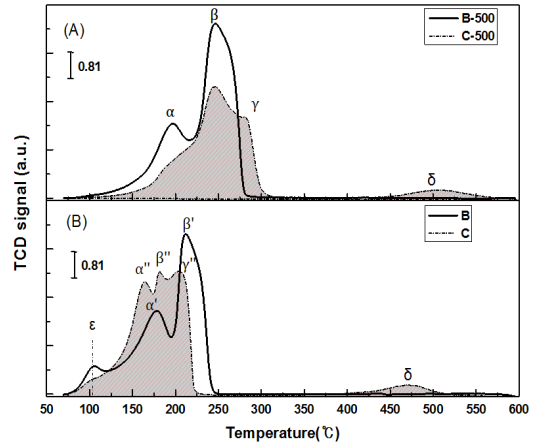
B, C 촉매의 소성온도에 대한 영향을 보다 상세히 알아보기 위하여 두 촉매 공히 350°C와 500°C에서 소성한 후 각 소성 촉매의 반응온도별 탈질효율 변화를 측정하여 [그림 4]에 나타내었다. 실험조건은 NO 750ppm, NO₂ 48ppm, NH₃/NO_x=1.0, O₂ 12%, H₂O 6%, SV 20,000hr⁻¹이었다. 그림에서 전체적으로 촉매 C가 촉매 B보다 탈질효율에서 다소 높은 수준을 나타내며, 반응온도가 증가할수록 탈질효율을 또한 감소하였다. B, C촉매를 500°C에서 소성한 경우 공히 매우 낮은 탈질효율을 보이며 반응온도가 증가할수록 탈질효율을 또한 감소하였다. C촉매를 500°C에서 소성하면 350°C에서 소성한 경우보다 약 77%의 탈질효율 감소가 있었다.



[Fig. 4] NO_x conversion of catalyst B and C calcinated at 350°C or 500°C.

소성하기 전과 소성한 후 각 탈질촉매의 구조변화를 조사하기 위해 각 촉매를 대상으로 H₂-TPR 분석을 실시하여 [그림 5]에 나타내었다. 소성한 시료는 500°C에서 공기분위기에서 4시간 소성하였다. 촉매 B의 경우 소성하기 전과 소성한 후의 피크변화를 살펴보면 소성한 후 ε피크가 없어졌음을 알 수 있다. ε피크는 표면에 존재하는 수분을 나타내는 것으로 촉매를 소성함으로써 인해 수분이 없어짐을 알 수 있다. Cu oxide가 환원된 피크인 α와 Mn oxide가 환원된 피크인 β는 소성하지 않은 촉매보다 높은 온도에서 환원되는 것을 확인할 수 있다. 촉매 C의 소성하기 전과 소성한 후의 결과를 살펴보면 B촉매와 유사하게 α와 β피크 그리고 bulk상에 있는 TiO₂가 환

원되어 발생하는 δ 피크 모두 높은 온도에서 환원되었다. 이러한 결과로부터 저온에서 반응성이 높은 Mn과 Cu가 구조적으로 변형되어 탈질효율을 상당부분 상실함을 알 수 있다.



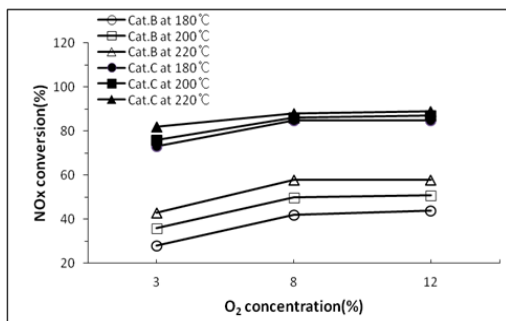
[Fig. 5] H₂-TPR of catalyst B and C calcinated at 500°C or not.

3.2 산소농도의 영향

일반적 형태의 발전소를 포함한 연소시설에서 배출되는 배기가스의 산소농도는 연소조건에 따라 다르나 통상적으로 최소 3vol% 이상이다. 이는 다양한 연소조건에 따라 산소가 넓은 농도범위로 배출될 수 있음을 의미한다. SCR반응에 참여하는 산소는 격자산소와 기상산소가 있으며, 이 중 기상의 산소는 SCR반응에 중요한 역할을 수행하는 것으로 알려져 있다. 많은 연구자들이 SCR반응 메카니즘 연구를 통해 기상산소의 중요 역할에 관해 상당부분 입증한 바 있다. SCR반응에 있어 산소는 중요한 산화제로서 산소가 존재하지 않을 때 반응속도는 두드러지게 낮아지나 1% 이상의 기상산소가 존재할 경우 NO-NH₃ 반응에서 반응속도는 빠르게 가속화된다. 250°C에서 기상산소농도를 0%에서 3%로 변화시켰을 때 반응생성물인 질소의 생성속도는 기상산소농도가 1% 수준에 도달할 때까지 선형적 증가하다가 그 이상의 기상산소농도부터는 질소의 생성속도가 일정해진다고 하였다. 이때 N₂O의 생성속도는 매우 낮으며 기상산소농도 변화에 거의 영향을 받지 않음을 보고하였다[15]. 즉 기상산소가 배기가스에 포함되지 않을 경우 활성화 에너지는 16.7kcal/mol이나 1.3%의 기상산소가 포함될 경우 활

성화 에너지는 11.7kcal/mol로 감소하며 이로부터 기상 산소는 SCR반응 즉 NO-NH₃ 반응에 있어 중요한 반응 변수임을 알 수 있다.

SCR반응에서 기상산소의 영향을 조사하기 위해 기상 산소의 농도를 3, 8, 12%로 변화시킨 후 각 기상산소 농도에서의 탈질효율을 측정하여 [그림 6]에 나타내었다. 실험조건은 NO 750ppm, NO₂ 48ppm, NH₃/NO_x=1.0, H₂O 6%, SV 60,000hr⁻¹이었다. 그림에서 B, C촉매 공히 소성 온도가 증가할수록 탈질효율이 증가하였으나, B와 C촉매 각각에 대해 탈질효율을 비교하였을 경우 C촉매가 전체적으로 산소농도에 관계없이 탈질효율이 우수하였다. 그리고 각 촉매의 기상산소농도에 대한 영향을 살펴보면 B와 C촉매 모두 8vol% 기상산소농도인 경우가 3vol%인 경우에 비하여 높은 탈질효율을 보였다. 그러나 기상산소농도가 8vol% 이상인 경우 기상산소의 농도가 증가하여도 각 촉매의 탈질효율 증가는 거의 없었다. 따라서 SCR반응에서 기상산소는 중요한 반응변수이며 반응에 적합한 적정농도가 존재하며 적정농도는 약 8vol%이었다.



[Fig. 6] NO_x conversion of catalyst B and C according to the oxygen concentration.

4. 결론

SCR촉매를 이용하여 전처리과정인 소성조건에 대한 탈질효율 변화, 그리고 SCR반응의 주요 변수인 기상산소의 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 전체적으로 Mn-Cu-TiO₂촉매(C)가 Mn-Cu(B)촉매보다 탈질효율이 우수하였으며 촉매C의 경우 소성온도가 증가할수록 탈질효율 또한 증가하여 300°C 소성온도에서 최대의 탈질효율을 나타내었다. 그러나 두 촉매 공히 500°C에서 소성시키면 탈질효

율에서의 급격한 감소가 있었다.

2. B, C촉매 모두 소성온도 240°C까지는 비표면적에서의 변화가 없었으나 340°C에서부터 비표면적에서 다소의 감소가 있었다.
3. SCR반응에서 기상산소는 중요한 반응변수이며 반응에 적합한 적정농도가 존재하며 적정농도는 약 8vol%이었다.

References

- [1] J. R. Gilbert, J. H. Thomas, "Chapter 2 reactions of the oxides of nitrogen", *Comprehensive Chemical Kinetics*, 6, 139-200, 1972.
- [2] H. Bosch, F. Janssen, "Catalytic reduction of nitrogen oxides, a review on the fundamentals and technology", *Catal. Today*, 2, 369-375, 1998.
- [3] K. H. Park, W. S. Cha, "NO_x removal of NH₃-SCR catalysts with operating conditions", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 13(11), 5610-5614, 2012.
- [4] M. Kang, E. D. Park, J. M. Kim, J. E. Yie, "Manganese oxide catalysts for NO_x reduction with NH₃ at low temperatures", *Appl. Catal. A: Gen.*, 327, 261-269, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcata.2007.05.024>
- [5] B. Thirupathi, P. G. Smirniotis, "Nickel-doped Mn/TiO₂ as an efficient catalyst for the low-temperature SCR of NO with NH₃: Catalytic evaluation and characterizations", *Journal of Catalysis*, 288, 74-83, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcat.2012.01.003>
- [6] 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)
- [7] B. Jiang, Z. Li, S. C. Lee, "Mechanism study of the promotional effect of O₂ on low-temperature SCR reaction on Fe-Mn/TiO₂ by DRIFT", *Chemical Engineering Journal*, 225, 52-58, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2013.03.022>
- [8] H. Chang, J. Li, X. Chen, L. Ma, S. Yang, J. W. Schwank, J. Hao, "Effect of Sn on MnO_x-CeO₂ catalyst for SCR of NO_x by ammonia: Enhancement of activity and remarkable resistance to SO₂", *Catalysis Communications*, 27, 564-57, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catcom.2012.06.022>
- [9] L. Singoredjo, R. Korver, F. Kapteijn, J. Moulijn, "Alumina

- supported manganese oxides for the low-temperature selective catalytic reduction of nitric oxide with ammonia”, *Appl. Catal. B: Environ.*, 1, 297-316, 1992.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0926-3373\(92\)80055-5](http://dx.doi.org/10.1016/0926-3373(92)80055-5)
- [10] 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>
- [11] 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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.9.4250>
- [12] X. Lou, P. Liu, J. Li, K. He, “Effects of calcination temperature on Mn species and catalytic activities of Mn/ZSM-5 catalyst for selective catalytic reduction of NO with ammonia”, *Applied Surface Science*, 307, 382-387, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.04.041>
- [13] S. M. Lee, H. H. Lee, S. C. Hong, “Influence of calcination temperature on Ce/TiO₂ catalysis of selective catalytic oxidation of NH₃ to N₂”, *Applied Catalysis A: General*, 470, 189-198, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcata.2013.10.057>
- [14] K. H. Chuang, Z. S. Liu, M. Y. Wey, “Catalytic activity of copper-supported catalyst for NO reduction in the presence of oxygen: Fitting of calcination temperature and copper loading”, *Materials Science and Engineering B*, 175, 100-107, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mseb.2010.07.011>
- [15] V. I. Marshneva, E. M. Slavinskaya, O. V. Kalinkina, G. V. Odegova, E. M. Moroz, G. V. Lavrova, A. N. Salanov, “The influence of support on the activity of monolayer vanadium-titania catalysts for selective catalytic reduction of NO with ammonia”, *J. of Catalysis*, 155, 171-180, 1995.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jcat.1995.1201>

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

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