

## W/TiO<sub>2</sub> 촉매의 NH<sub>3</sub> 단독 산화 반응 특성 연구

김거종 · 이상문 · 홍성창\* · †

경기대학교 일반대학원 환경에너지시스템공학과, \*경기대학교 환경에너지시스템공학과  
(2013년 8월 7일 접수, 2013년 9월 4일 심사, 2013년 9월 16일 채택)

### A Study on the Reaction Characteristics of the NH<sub>3</sub> Oxidation over W/TiO<sub>2</sub>

Geo Jong Kim, Sang Moon Lee, and Sung Chang Hong\* · †

Department of Environmental Energy Systems Engineering, Graduate School of Kyonggi University, Gyeonggi-do 442-760, Korea

\*Department of Environmental Energy Systems Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi-do 442-760, Korea

(Received August 7, 2013; Revised September 4, 2013; Accepted September 16, 2013)

본 연구에서는, 화력발전소 및 소각로 후단에서 발생하는 NH<sub>3</sub>를 제어하기 위한 W/TiO<sub>2</sub> 촉매의 NH<sub>3</sub> 산화 반응 특성 연구를 수행하였다. 그 결과, W/TiO<sub>2</sub> 촉매의 텅스텐 최적함량은 10 wt% 임을 도출하였으며, 그 이상의 텅스텐을 담지할 경우 비표면적의 감소로 인한 효율저하를 확인하였다. 또한, NH<sub>3</sub> 주입농도가 420 ppm 이상으로 주입될 경우 중·저온의 온도구간에서 효율저하를 나타냈으며, 수분이 존재할 경우 경쟁흡착으로 인한 효율저하가 발생하였고 산소농도가 증가할수록 NH<sub>3</sub>의 전환율은 우수해지지만 N<sub>2</sub>의 선택도가 낮아짐을 확인하였다.

In this study, we investigated the NH<sub>3</sub> oxidation reaction characteristic over W/TiO<sub>2</sub> catalyst in order to control NH<sub>3</sub> generated from a thermoelectric power plant or incinerator. As a result, it was found that the optimal content of tungsten in W/TiO<sub>2</sub> catalyst is 10 wt% and NH<sub>3</sub> removal efficiency decreased due to decreasing specific surface areas of catalyst with increasing tungsten contents. When NH<sub>3</sub> was injected more than 420 ppm, NH<sub>3</sub> conversion decreased at the middle temperature range. In addition, NH<sub>3</sub> conversion decreased due to the competitive adsorption of moisture and with increasing oxygen concentration, the NH<sub>3</sub> conversion increased while the N<sub>2</sub> selectivity decreased.

**Keywords:** W, TiO<sub>2</sub>, catalyst, NH<sub>3</sub>, Selectivity Catalytic Oxidation

## 1. 서 론

1970년 이래 중화학공업의 육성, 도시화 현상 등이 발생하면서 대기 오염이 가속화되고 1980년 이후에는 자동차 보급의 증가와 산업발달에 따른 각종 화학물질이 꾸준히 증가하고 있기 때문에 발생하는 대기오염물질의 양도 증가하고 있다. 이에 따라 대기오염을 유발하는 물질 중 가장 큰 비중을 차지하는 질소산화물을 제거하기 위한 기술개발은 활발히 진행되고 있어 배출량을 감소시키고 있는 추세이다. 반면, 오염물질의 배출비율이 적은 암모니아와 같은 질소화합물에 대해서는 그 중요성이 질소산화물에 비해 현저히 낮기 때문에 그 배출량은 점차 증가되고 있다[1].

현재 암모니아는 산업구조의 발달과 암모니아의 사용이 광범위 해지면서 그 배출원도 다양해지고 있다. 주로 암모니아는 요소(Urea)를 원료로 사용하는 각종 화학시설에서 배출되고 있으며, 암모니아를 암모늄 질산염, 요소, 암모늄 인산염 형태의 원료로 사용하는 석유 정련

소 또는 코크스 제조를 위한 화학공정, 반도체 제조공정에서 배출되고 있다. 또한, 암모니아는 화력발전소, 소각로 및 자동차 등에서 배출되는 질소산화물을 효과적으로 제거하기 위한 기술 중 선택적 촉매 환원법(Selective Catalytic Reduction, SCR)에서 환원제로 주입하게 되며, SCR 반응 중 질소산화물과 미 반응한 암모니아가 배기가스 내에 포함되어 대기 중으로 다량 배출되고 있는 실정이다[2,3].

암모니아의 배출량이 증가함에 따라 환경오염이 심화되고 있어 배출규제가 점차 강화되고 있으며, 이러한 규제에 만족을 위해 제어 기술이 필연적이라 할 수 있다.

현재, 암모니아 제거기술 중 기술적 경제적 측면을 고려해 볼 때, 가장 효과적인 기술로는 선택적 촉매 산화법(Selectivity Catalytic Oxidation, SCO)이 각광받고 있다[4]. 이러한 촉매 산화법 기술은 촉매를 이용하여 암모니아를 질소산화물이 아닌 인체에 무해한 질소성분으로 전환시켜 제거하는 방법으로써, 국내 및 국외에서 Pt, Pd 계열의 귀금속 촉매를 이용한 다양한 연구가 수행되고 있다. 하지만, 귀금속 촉매는 고온의 온도에서 전환된 암모니아가 대부분 질소산화물(NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O)로 산화되어 2차 오염물질을 유발시킬 가능성이 있으며, 고온의 온도에서 귀금속 입자들 간의 응집현상(agglomeration)으로 인한 열적안정성 문제점을 가지고 있다[5].

이에 본 연구에서는 다양한 산업공정에서 발생하는 암모니아의 제어와 화력발전소 및 소각로 후단에서 발생하는 미 반응된 암모니아

† Corresponding Author: Kyonggi University  
Department of Environmental Energy Systems Engineering  
94 San, Iui-dong, Youngtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 442-760, Korea  
Tel: +82-31-249-9733 e-mail: schong@kyonggi.ac.kr

## 2. 실험

### 2.1. 촉매 제조 방법

본 연구에서는 텅스텐(W)을 활성금속으로 사용하고, 지지체로는 다양한 물리화학적 성질을 가진 상용 TiO<sub>2</sub>를 사용하여 촉매를 제조하였다. 본 연구에서 사용된 촉매의 활성금속은 지지체에 대한 무게비로 담지하고, 이때의 무게비는 wt%로 나타내었으며 표기는 텅스텐의 담지량에 따라 W[10]/TiO<sub>2</sub>와 같이 표기하였다. 촉매를 제조하는 방법으로는 대표적인 촉매제조 방법인 함침법(wet impregnation method)을 이용하였으며, 촉매제조과정의 모식도는 Figure 1에 나타내었다.

먼저 지지체로 사용된 TiO<sub>2</sub>에 대하여 활성금속의 담지량을 무게비(5~20 wt%)로 결정한 후 계산한다. 계산된 활성금속의 양은 전구체를 제외한 순수 활성금속의 양만큼을 계산한 후 60 °C로 가열된 증류수에 녹인다. 이때 사용된 텅스텐의 전구체로는 암모늄텅스테이트((NH<sub>4</sub>)<sub>10</sub>H<sub>2</sub>(W<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)<sub>6</sub>)를 사용하였다. 텅스텐 전구체가 증류수에 완전히 용해되면 정량된 지지체를 천천히 텅스텐 수용액에 혼합한다. 슬러리 상태의 혼합용액을 1 h 이상 교반한 후 rotary vacuum evaporator (Eyela CO. N-N series)를 이용하여 70 °C에서 65 mmHg의 진공에 의하여 수분을 증발시킨다. 수분을 증발시킨 시료는 미세기공에 포함된 수분을 완전히 제거하기 위하여 110 °C dry oven에서 24 h 이상 건조시킨 후 tubular furnace에서 10 °C/min의 승온속도로 600 °C까지 상승시킨 후 600 °C에서 8 h air 분위기에서 소성하여 촉매를 완성하였다. 이렇게 제조된 촉매는 실험을 수행하기 위하여 40~50 크기의 mesh를 사용하여 sieving하여 얻었다.

### 2.2. 실험장치

본 연구의 암모니아의 선택적 산화 반응 실험에 사용한 고정층 반응기는 Figure 2에 나타내었다. 이 실험 장치는 가스주입부분, 반응기

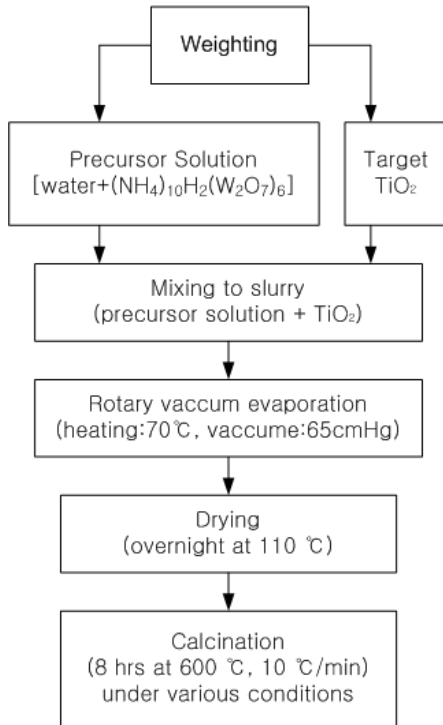


Figure 1. Flow diagram for the procedures of W/TiO<sub>2</sub> catalyst.

(NH<sub>3</sub>-slip)의 제어를 위해 열적안정성이 우수한 텅스텐을 활성금속으로 사용하여 300~500 °C에서 암모니아를 인체 및 환경에 무해한 질소성분으로 전환시켜 제거하는 방법인 선택적 촉매 산화법에 대한 연구를 수행하였다.

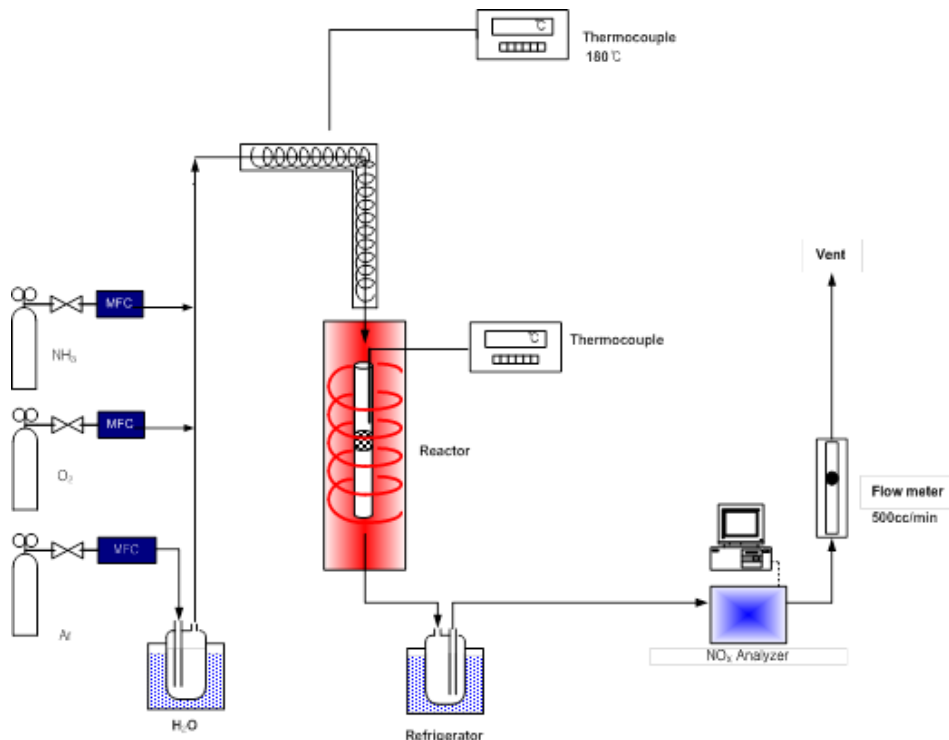


Figure 2. Schematic diagrams of a fixed bed NH<sub>3</sub> oxidation reaction system.

부분, 그리고 반응가스의 분석부분으로 구성하였다. 반응기에 공급되는 NH<sub>3</sub>와 O<sub>2</sub>는 Ar balance 가스를 사용하였으며, MFC (Mass Flow Controller, MKS Co.)를 이용하여 정량적으로 공급하였다. 또한, 2중 jacket 형태의 bubbler에 circulator를 이용하여 일정온도(40 °C)의 물을 순환시켜, Ar 가스가 bubbler를 통과하여 반응기에 수분을 공급하였다. 가스 공급관은 전체에 걸쳐 스테인레스 관으로 하였으며, 반응가스 중의 수분이 반응관에 응축되지 않기 위하여 heating band를 잡아 180 °C로 일정하게 유지하였다. 반응기는 연속 흐름형 고정층 반응장치로서, 내경 8 mm, 높이 600 mm인 석영관으로 제작하였으며 촉매층을 고정하기 위해 quartz wool을 사용하였다.

반응기의 온도는 고정층 상부에 장착된 K-type의 열전대를 이용하여 PID 온도 제어기로 조절하였으며, 가스 유입부분의 온도를 측정하기 위하여 촉매층 상부에 열전대를 설치하여 촉매층 온도를 측정하였다. 반응가스인 NH<sub>3</sub>와 O<sub>2</sub>가 반응하여 생성되는 NO의 농도를 측정하기 위하여 비분산 적외선 가스분석기(ZKJ-2, Fuji Electric Co.)를 사용하였다. NO<sub>2</sub>는 반응기 출구부에서 검지관(9L, Gas Tec. Co.)을 이용하여 측정하였으며, N<sub>2</sub>O의 농도는 비분산 적외선 가스분석기(ULTRAMAT 6, Siemens)를 이용하여 측정하였다. 또한, 암모니아의 농도는 검지관(3 M, 3 La, 3 L, Gas Tec. Co.)을 사용하였으며, 모든 가스는 분석기로 유입되기 전에 수분은 chiller 내의 수분 trap에서 제거시킨 후 유입하였다.

### 2.3. 실험방법

촉매의 층에서 발생할 수 있는 압력손실의 영향을 방지하기 위하여 제조된 촉매는 40~50 mesh 크기로 sieving하여 조정하였으며, 이렇게 얻어진 촉매를 사용하여 아래와 같은 방법으로 암모니아 산화 반응실험을 진행하였다.

- 1) 촉매를 일정량으로 정량하고 반응관을 이용하여 반응기 내에 충전한다.
- 2) 촉매의 불순물 및 수분을 제거하고 촉매의 산화상태를 유지하기 위하여 산소를 포함하는 Ar 분위기상에서 400 °C 온도로 30 min간 전처리한다.
- 3) 실험 온도가 정상상태에 도달하면 일정량의 가스를 반응기 내로 주입한 후 생성물의 농도가 일정해질 때까지 반응실험을 지속시켜 이때의 농도를 기록한다.

실험 전에 상기의 방법에 의해 NH<sub>3</sub>, O<sub>2</sub> 및 Ar을 주입하여 상기의 방법에 의해 정상상태에 도달하면 수분을 투입하고, 이후 생성물의 농도가 일정해질 때까지 지속시키고 농도변화를 측정하였다.

각 촉매의 반응활성은 NH<sub>3</sub> 전환율로 나타내었으며 다음과 같이 정의하였고, N<sub>2</sub>의 경우 다음 식을 통하여 산출하였다.

$$NH_3 \text{ conversion (\%)} = \frac{C_{\text{반응전}NH_3} - C_{\text{반응후}NH_3}}{C_{\text{반응전}NH_3}} \times 100$$

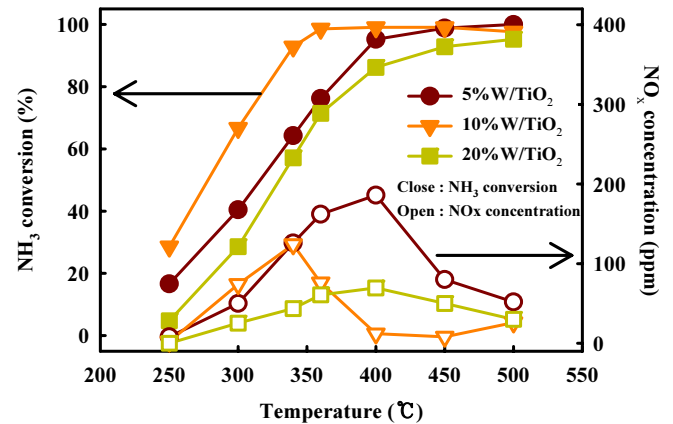
$$* C_{\text{반응후}NOx} = C_{\text{반응후}NO} + C_{\text{반응후}NO_2} + 2C_{\text{반응후}N_2O}$$

$$C_{N_2} = C_{\text{반응전}NH_3} + C_{\text{반응후}NH_3} - C_{\text{반응후}NOx}$$

또한, 본 연구에서 실시한 암모니아 선택적 산화반응 실험에 관한 운전변수를 Table 1에 나타내었다.

**Table 1. Experimental Conditions on Reaction System**

Temperature (°C)	200 ~ 500	
Inlet gas conc. (Ar balance)	NH <sub>3</sub> (ppm)	420 ~ 800
	O <sub>2</sub> (%)	3 ~ 15
	H <sub>2</sub> O (%)	6
Space velocity (hr <sup>-1</sup> )	60000 ~ 120000	
Total flow (cc/min)	500	



**Figure 3. The effect of W loadings on NH<sub>3</sub> conversion over W<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub> catalysts.**

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. W/TiO<sub>2</sub> 촉매의 W 함량에 반응특성연구

W/TiO<sub>2</sub> 촉매는 텅스텐(W)의 함량에 따라 활성에 차이를 나타낸다. 특히 텅스텐은 촉매 반응의 활성 site로서, 그 담지량이 매우 중요하게 작용한다. 이러한 텅스텐 담지량의 영향을 조사하기 위해 텅스텐의 함량을 각각 5, 10, 20 wt%로 TiO<sub>2</sub>에 담지한 후 촉매를 제조하였다. 제조된 촉매에 대하여 공간속도 60000 hr<sup>-1</sup>으로 하고, 촉매의 반응 온도범위는 200~500 °C의 온도로 선정하여 NH<sub>3</sub> 산화 실험을 수행하였으며, 텅스텐의 담지량에 따라 제조된 촉매에 대한 NH<sub>3</sub> 전환율 및 발생 NOx에 대하여 Figure 3에 나타내었다.

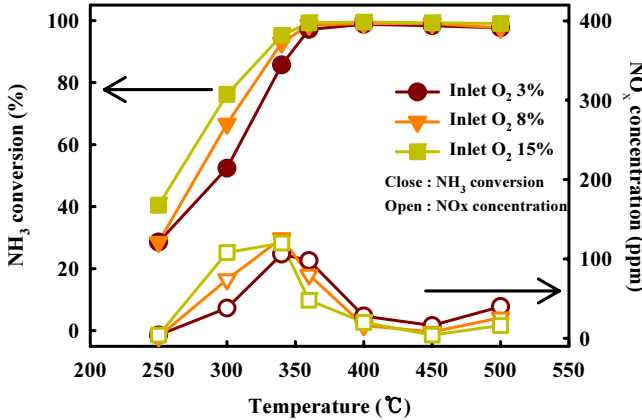
그 결과 텅스텐이 10 wt%로 담지된 W[10]/TiO<sub>2</sub> 촉매가 암모니아 전환율 측면에서 가장 우수하였다. 또한, 20 wt%의 텅스텐이 담지된 W[20]/TiO<sub>2</sub> 촉매의 경우 발생하는 NOx의 양이 W[10]/TiO<sub>2</sub> 촉매보다 적었지만 NH<sub>3</sub>의 전환율이 전 온도영역에서 낮음을 확인할 수 있었으며 5 wt%의 텅스텐이 담지된 W[5]/TiO<sub>2</sub> 촉매는 W[10]/TiO<sub>2</sub> 촉매보다 NH<sub>3</sub>의 전환율이 낮았으며 발생하는 NOx의 양 또한 세 촉매 중 가장 많은 양이 발생함을 확인할 수 있었다.

텅스텐 함량에 대한 연구 문헌 중 Yu 등[6]은 텅스텐 함량이 증가할수록 비표면적은 감소하게 되며, W이 많이 담지될수록 비표면적의 감소율은 더 크다고 언급하였다. 또한 Kim 등[7]도 W/TiO<sub>2</sub> 촉매의 구조와 표면의 산점과의 관계에 대한 연구를 수행한 결과 텅스텐 함량이 많아질수록 비표면적은 감소한다고 보고하였다.

이에 본 연구의 결과 또한 비표면적과 텅스텐 함량에 따른 활성과 상관관계가 존재할 것으로 판단하여 텅스텐 함량에 대한 비표면적을 조사하였으며 이를 Table 2에 나타내었다. 분석 결과, 텅스텐 함량이 증가함에 따라 비표면적이 감소하게 됨을 확인하였으며, 이러한 이유

**Table 2. Physical Properties of Various W[X]/TiO<sub>2</sub> Catalysts**

Catalysts	NH <sub>3</sub> conversion (%) at 360 °C	Surface area (m <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> )
W[5]/TiO <sub>2</sub>	76	72.5
W[10]/TiO <sub>2</sub>	98	69.38
W[20]/TiO <sub>2</sub>	71	54.17



**Figure 4. The effect of O<sub>2</sub> concentration on NH<sub>3</sub> conversion over W[10]/TiO<sub>2</sub> catalysts.**

로 상기 실험결과에서 많은 양의 텅스텐이 담지된 W[20]/TiO<sub>2</sub> 촉매가 텅스텐의 많은 함량으로 인해 비표면적이 감소하게 되어 W[10]/TiO<sub>2</sub> 촉매보다 NH<sub>3</sub>의 전환율이 낮았던 것으로 판단되어진다. 이러한 결과를 토대로 NH<sub>3</sub>를 N<sub>2</sub>로 선택적 산화시키는 촉매의 경우 텅스텐의 최적 담지량은 10 wt%로 나타났다.

**3.2. 산소농도 및 NH<sub>3</sub>의 주입농도에 따른 W/TiO<sub>2</sub> 촉매의 NH<sub>3</sub> 산화 반응 특성**

촉매 산화반응에 있어 산소가 반응에 결정적인 역할을 한다는 점은 기존의 많은 연구자들에 의해서 밝혀졌다[8,9].

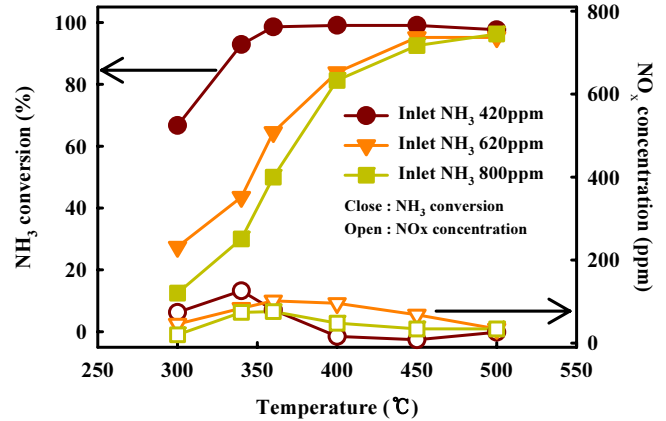
이에 따라, 본 연구에서도 W/TiO<sub>2</sub> 촉매의 NH<sub>3</sub> 산화반응에 있어 산소 및 NH<sub>3</sub> 주입농도가 미치는 영향을 조사하기 위해 주입되는 산소의 농도를 3, 8, 15%로 선정하여 비교실험을 수행하였으며 NH<sub>3</sub>의 초기 농도를 각각 420, 620, 800 ppm으로 선정하여 NH<sub>3</sub> 산화 반응 실험을 수행하였고 그 결과를 Figures 4 및 5에 나타내었다.

그 결과 Figure 4의 산소농도에 따른 실험 결과를 살펴보면 산소농도가 증가함에 따라 NH<sub>3</sub>의 전환율이 증가함을 확인할 수 있었다. 반면, Figure 5의 NH<sub>3</sub> 주입농도에 따른 실험 결과를 살펴보면 NH<sub>3</sub>의 농도가 증가함에 따라 전환율이 감소함을 확인하였다. 이러한 두 가지 시험 결과는 Lee 등[10]의 문헌에 의한 것과 같이, 촉매상에서 암모니아 제거 반응이 촉매표면의 산화·환원 반응에 있어 NH<sub>3</sub>의 주입농도와 산소의 주입농도가 매우 큰 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다.

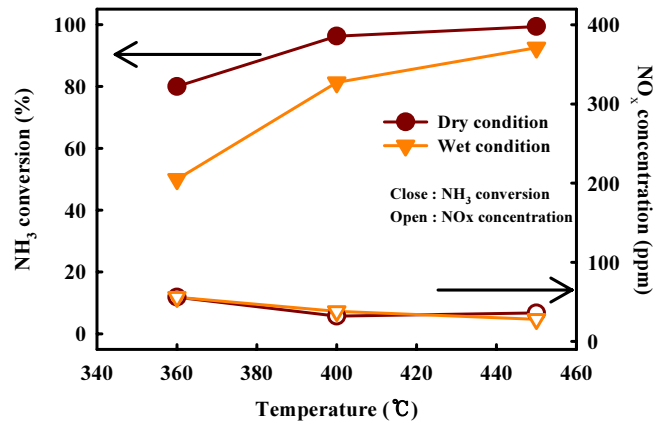
**3.3. 수분에 따른 W/TiO<sub>2</sub> 촉매의 NH<sub>3</sub> 산화 반응 특성**

고정원 배가스 중에는 일반적으로 2~20%까지의 수분이 포함되어 있으며 화력발전소 및 소각로 후단에서도 수분을 포함하고 있다. 촉매 반응활성에 있어 수분의 참여는 많은 연구들을 통해 중요한 인자로 보고되어지고 있다.

Akah 등[11]은 Fe-ZSM-5 촉매를 사용하여 수분 5%를 공급 시 활



**Figure 5. The effect of initial NH<sub>3</sub> concentration on NH<sub>3</sub> conversion over W[10]/TiO<sub>2</sub> catalysts.**



**Figure 6. The effect of H<sub>2</sub>O concentration on NH<sub>3</sub> conversion over W[10]/TiO<sub>2</sub> catalysts.**

성이 감소함을 보고 하였으며, 이러한 이유는 수분이 활성점에 암모니아와 경쟁흡착하기 때문이라고 보고하였다.

따라서 본 연구에서도 수분의 존재 유무가 W/TiO<sub>2</sub> 촉매의 NH<sub>3</sub> 산화에 미치는 영향을 조사하기 위하여 공간속도 120000 hr<sup>-1</sup>에서 수분이 존재하지 않는 조건과 수분(6%)이 존재하는 조건으로 각각 NH<sub>3</sub> 산화 실험을 수행하였으며 그 결과를 Figure 6에 나타내었다.

그 결과 온도가 낮은 360 °C의 중온 영역에서 그 영향이 약 30% 정도의 차이를 보이고 있지만 온도가 높은 450 °C의 고온 영역의 경우 수분의 존재 여부에 따라 약 10%의 차이가 발생하였다. 따라서 기존 연구 결과와 동일한 이유로 텅스텐 산화물에 수분이 암모니아와 경쟁 흡착하여 영향을 미치는 것으로 판단되며 온도가 높을수록 수분에 대한 영향은 점차 감소함을 확인할 수 있었다.

**3.4. 온도변화에 따른 W/TiO<sub>2</sub> 촉매의 N<sub>2</sub> Selectivity 특성**

NH<sub>3</sub> 산화 촉매에 있어 NH<sub>3</sub>의 전환율과 더불어 중요한 인자는 N<sub>2</sub> selectivity이다. 상기 결과들을 보면 반응 온도에 따라 NOx의 발생량이 변화됨을 확인할 수 있었다. 이러한 발생하는 물질의 성분에 대하여 자세히 조사하고자 활성이 우수하였던 W[10]/TiO<sub>2</sub> 촉매에 대하여 Quadruple Mass (Pfeiffer vacuum Co.)를 이용하여 NH<sub>3</sub> 산화 반응시 생성되는 물질을 Figure 7에 나타내었다. 실험은 상온에서 450 ppm의 암모니아와 8% 산소를 주입하고 steady state가 되었을 때 온도를 을

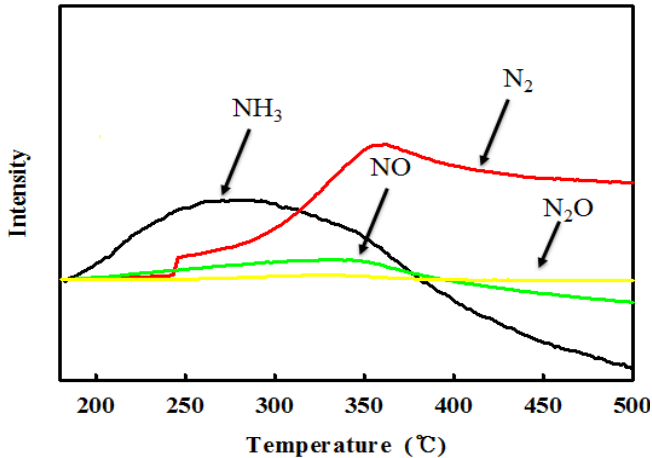


Figure 7. Intensity profile of NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO over W[10]/TiO<sub>2</sub> catalyst.

리면서 온도에 따른 암모니아와 산소의 산화반응에 의한 생성물의 변화를 추적하였다. 그 결과 온도가 올라가자 흡착된 암모니아가 탈착되기 시작하였으며 250 °C부터 N<sub>2</sub>가 생성되기 시작하여 고온 영역까지 암모니아가 산화되어 N<sub>2</sub>가 생성됨을 확인하였다. 또한 NO의 경우 200 °C의 온도에서부터 350 °C의 온도까지 발생하는 Peak가 존재함을 확인할 수 있었으나 N<sub>2</sub>O의 경우 전 온도 영역에서 관찰되지 않았다. 따라서 350 °C 이상의 고온영역의 온도에서는 NH<sub>3</sub>가 NOx로의 산화가 아닌 N<sub>2</sub>로의 산화가 이루어짐에 따라 우수한 N<sub>2</sub> selectivity를 나타냄을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

W/TiO<sub>2</sub> 촉매를 이용하여 NH<sub>3</sub> 산화 반응 특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) W/TiO<sub>2</sub> 촉매의 W의 함량에 따른 NH<sub>3</sub> 산화 반응 실험을 수행하였다. 그 결과 NH<sub>3</sub> 산화 반응을 위한 W/TiO<sub>2</sub> 촉매의 경우 텅스텐의 함량이 10 wt%로 담지된 촉매가 가장 우수하였으며, 텅스텐이 20 wt%로 담지된 촉매의 경우 비표면적의 감소로 인해 10 wt%로 담지된 촉매보다 전환율이 떨어짐을 확인하였다.
- 2) W/TiO<sub>2</sub> 촉매의 NH<sub>3</sub> 주입 농도 및 주입되는 산소에 따른 영향 실험을 수행하였다. 그 결과, 주입되는 산소농도의 증가에 따라 전환율이 증가되었으며 NH<sub>3</sub>의 주입농도가 증가되면 전환율이 감소함을 확인하였다.
- 3) W/TiO<sub>2</sub> 촉매의 경우 수분의 존재함에 따라 수분의 경쟁흡착으로 인한 효율 저하가 발생하였으며, 중온영역(360 °C)에서 고온영역(450 °C)

보다 수분참여에 민감하게 반응하는 것을 확인하였다.

- 4) W/TiO<sub>2</sub> 촉매의 N<sub>2</sub> selectivity를 확인하고자 mass spectrum을 이용하여 온도를 올리면서 반응물과 생성물을 확인한 결과 고온영역에서 NH<sub>3</sub>가 N<sub>2</sub>로 생성됨을 확인하였으며 250~350 °C의 온도구간에서 상대적으로 미량의 NO가 발생함을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

1. H. T. Jang, Y. K. Park, Y. S. Ko, and W. S. Cha, Selective Catalytic Oxidation of Ammonia in the Presence of Manganese Catalysts, *Korean Chem. Eng. Res.*, **46**, 498 (2008).
2. J. Walker and B. K. Sponello, Development of an ammonia/SCR NOx Reduction system for a Heavy Duty Natural Gas Engine, Society of Automobile Engineers Technical paper, 921673 (1992).
3. Y. H. Dong, J. H. Choi, Y. S. Cho, S. W. Lee, S. H. Lee, S. K. Oh, and H. D. Park, An Experimental Study on NOx Reduction Efficiency and NH<sub>3</sub> Conversion Efficiency under Various conditions of Reductant Injection on SCR and AOC, Trans, *Korean Society of Automotive Engineers*, **18**, 85 (2010).
4. E. Slavinskaya, S. Veniaminov, P. Notte, A. Ivanova, A. Boronin, Y. Chesalov, I. Polukhina, and A. Noskov, Studies of the mechanism of ammonia oxidation into nitrous oxide over Mn-Bi-O/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst, *J. Catal.*, **222**, 129 (2004).
5. S. D. Lin, A. C. Gluhoi, and B. E. Nieuwenhuys, Ammonia oxidation over Au/Mox/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> activity, selectivity and FTIR measurements, *Catal. Today*, **90**, 3 (2004).
6. X. F. Yu, N. Z. Wu, H. Z. Huang, Y. C. Xie, and Y. Q. Tang, A study on the monolayer dispersion of tungsten oxide on anatase, *J. Mater. Chem.*, **11**, 3337 (2001).
7. T. Kim, A. Burrows, C. J. Kiely, and I. E. Wachs, Molecular/electronic structure-surface acidity relationships of model-supported tungsten oxide catalysts, *J. Catal.*, **246**, 370 (2007).
8. M. J. Lippits, A. C. Gluhoi, and B. E. Nieuwenhuys, A comparative study of the selective oxidation of NH<sub>3</sub> to N<sub>2</sub> over gold, silver and copper catalysts and the effect of addition of Li<sub>2</sub>O and CeOx, *Catal. Today*, **137**, 446 (2008).
9. J. P. Ramirez and E. V. Kondratenko, Mechanism of ammonia oxidation over oxides studied by temporal analysis of products, *J. Catal.*, **250**, 240 (2007).
10. J. Y. Lee, S. B. Kim, and S. C. Hong, Characterization and reactivity of natural manganese ore catalysts in the selective catalytic oxidation of ammonia to nitrogen, *Chemosphere*, **50**, 1115 (2003).
11. A. Akah, C. Cundy, and A. Garforth, The selective catalytic oxidation of NH<sub>3</sub> over Fe-ZSM-5, *Appl. Catal. B*, **59**, 221 (2005).