

# Ag-V/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매상에서 탄화수소-Selective Catalytic Reduction에 의한 질소산화물 저감

김문찬<sup>†</sup> · 이철규

청주대학교 이공대학 환경학부 환경공학전공  
(2004년 9월 30일 접수, 2005년 4월 19일 채택)

## DeNO<sub>x</sub> by Hydrocarbon-Selective Catalytic Reduction on Ag-V/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst

Moon-Chan Kim<sup>†</sup> and Cheal-Gyu Lee

Department of Environmental Engineering, Division of Environmental Science Chongju University  
(Received September 30, 2004; accepted April 19, 2005)

본 연구에서는 배출가스 중에 포함된 NO를 비선택적 촉매환원법으로 환원시켜 제거하기 위하여 Ag와 V의 함량을 여러 가지로 달리하여 v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 담지한 촉매를 제조하였고, 제조한 촉매에 대하여 온도, 산소농도, 아황산가스농도의 변화에 따른 NO<sub>x</sub>의 전환율에 대하여 연구하였다. 또한 제조한 촉매의 물성분석을 통하여 촉매의 상태와 NO<sub>x</sub>의 전환율과의 관계를 알아보았다. AgV/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매의 경우에는 고온에서는 Ag/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매보다 낮은 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타내는 반면에 저온에서는 Ag/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매보다 높은 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타내었고, 반응가스 중에 SO<sub>2</sub>가 함유되어 있어도 NO<sub>x</sub>의 전환율이 낮아지지 않았다. 반응실험 전·후의 촉매에 대하여 X-ray Diffraction, X-ray Photo electron Spectroscopy, Temperature Programmed Reduction, Ultraviolet-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy 등의 분석결과와 반응실험 결과를 비교하여 볼 때 V가 포함됨으로 인하여 Ag의 산화상태가 잘 유지되지 못하여 고온에서는 NO<sub>x</sub> 전환율이 낮아지며, 300 °C 이하의 저온에서는 V의 촉매작용으로 인하여 NO<sub>x</sub> 전환율이 높아진 것으로 나타났다.

In order to remove the NO contained in exhaust gas by the non-selective catalyst reduction method, the catalysts were prepared by varying the loading amount of Ag and V into v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The conversion of NO<sub>x</sub> using the prepared catalysts was studied by varying the temperatures, O<sub>2</sub> concentrations and SO<sub>2</sub> concentrations using. The influence of the catalyst structure on NO<sub>x</sub> conversion was studied through the analysis of the physical properties of the prepared catalysts. In the case of AgV/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst, the NO<sub>x</sub> conversion was lower than that of Ag/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at higher temperatures but higher than that of Ag/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at lower temperatures. Even though SO<sub>2</sub> was contained in the reaction gas, the NO<sub>x</sub> conversion did not decrease. Based on the analysis including XRD, XPS, TPR, and UV-Vis DRS before and after the experiments, the experimental results were examined. The results indicated that, NO<sub>x</sub> conversion decreased at higher temperatures since Ag oxide could not be maintained well due to the addition of V, whereas it increased at temperatures lower than 300 °C due to the catalytic action of V.

**Keywords:** DeNO<sub>x</sub>, SCR, Ag-V/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Vanadium

### 1. 서 론

최근들어 전 세계적으로 대기오염에 대한 대책 마련이 심각하게 요구되고 있다. 우리나라의 경우에는 1960년대 이후 산업의 급격한 발전으로 인하여 대도시와 공업단지를 중심으로 대기오염이 심화되고 있다. 대기오염물질 중에서 질소산화물(NO<sub>x</sub>)은 토양과 수중미생물의 작용, 번개 등을 통하여 자연적으로 발생하기도 하고, 공장이나 발전소 기타 산업시설 등의 고정원과 자동차와 같은 이동원에서 인위적으로 배출되기도 한다[1].

연료의 연소열을 이용하는 공정에서는 연소 효율을 증가시키면 필

연적으로 NO<sub>x</sub>의 발생량이 증가한다. 배출가스를 통해서 배출되는 NO<sub>x</sub>는 대부분 NO로 존재하지만 대기중에서 인체에 유해한 NO<sub>2</sub>로 쉽게 산화되어 오존의 생성을 촉진시키거나, 탄화수소 및 태양광중의 자외선과 작용하여 광화학스모그를 일으키는 원인물질로 작용한다. 또한, 인간을 비롯한 동물의 체내에 흡입되면 호흡기에 독성을 일으켜 만성호흡기질환 등의 피해를 가져오기 때문에 NO<sub>x</sub>는 대기중으로 배출하기 전에 반드시 제거하여야 한다[2].

NO<sub>x</sub>의 제어방법으로는 연료를 전처리하거나 연소설비를 개선하는 등의 전처리방법과 배출가스중에 포함된 NO<sub>x</sub>를 제거하는 후처리방법이 있는데 NO<sub>x</sub>는 특성상 전처리방법으로는 만족할만한 효과를 기대하기 어렵기 때문에 후처리방법을 많이 사용한다.

<sup>†</sup> 주 저자(e-mail: mckim@cju.ac.kr)

연소가스의 후처리방법은 크게 습식법과 건식법으로 나눌 수 있으며, 세부적으로 촉매분해, 촉매환원, 흡수, 흡착 등을 들 수 있다. 촉매를 이용하여 NO<sub>x</sub>를 N<sub>2</sub>와 O<sub>2</sub>로 직접 분해시키는 촉매분해법은 매우 바람직한 방법이지만 상당한 고온에서도 분해율이 아주 낮아 널리 쓰이지 못하고 있다[3,4]. 흡수나 흡착에 의한 처리법은 다량의 약품과 흡착제를 사용하여야 하기 때문에 경제적인 면에서 문제가 될 뿐만 아니라 폐수나 폐기물 등과 같은 2차 오염물질이 발생되어 문제가 된다.

근래에는 가격이 저렴하며, 활성이 우수한 촉매에 대한 연구가 많이 이루어지고 있고, 금속산화물이나 제올라이트계 촉매가 각광받고 있으며, 현재 미국과 일본의 고정원에서 발생하는 NO<sub>x</sub>를 저감하는 공정의 많은 부분을 선택적 촉매환원법이 차지하고 있다[3].

최근 Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매에 의한 DeNO<sub>x</sub>의 연구경향은 반응물을 메탄 또는 수소로 사용하는 연구가 발표되고 있으며[4,5] 수소와 프로판올 반응물로 사용한 연구도 발표되고 있다[6]. 본 연구에서는 반응물은 상대적으로 가격이 저렴한 에탄올을 사용하고 기존의 Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매를 개량하여 온도에 따른 변화와 피독물질인 아황산가스에 대한 내피독성 등을 보고자 바나듐을 조촉매로 첨가하여 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 배출가스 중에 포함된 NO를 비선택적 촉매환원법으로 환원시켜 제거하기 위하여 은(Ag)과 바나듐(V)의 함량을 여러 가지로 달리하여 v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 담지한 촉매를 제조하였고, 제조한 촉매에 대하여 온도, 산소농도, 아황산가스농도의 변화에 따른 NO<sub>x</sub>의 전환율에 대하여 연구하였다. 또한 제조한 촉매의 물성분석을 통하여 촉매의 상태와 NO<sub>x</sub>의 전환율과의 관계를 알아보았다.

## 2. 실험

### 2.1. 촉매의 제조

본 연구에서는 NO의 환원반응을 위해서 v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 Ag와 V를 담지한 촉매를 제조하여 반응실험을 하였다. 촉매를 제조하기 위해서 사용한 원료염으로는 silver nitrate (AgNO<sub>3</sub>, Junsei, extra pure), vanadium (III) chloride (Cl<sub>3</sub>V, Acros, 99%)를 사용하였다.

각각의 촉매는 v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 담체로 사용하였으며, v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 금속을 담지시키기 전에 120 °C에서 충분히 건조시킨 후 사용하였다. 제조한 촉매 중에서 Ag/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매는 Ag의 함량이 0.6, 1.0, 1.4, 2.0 wt%가 되도록 각각 초기함침하였고, 120 °C에서 24 h 건조한 후 450 °C에서 공기 흐름중에 2 h 소성하였다.

AgV/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매는 먼저 Ag를 v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 2.0 wt%가 되도록 함침하여 120 °C에서 24 h 건조시킨 후 V의 함량이 각각 0.6, 0.8, 1.0, 1.2

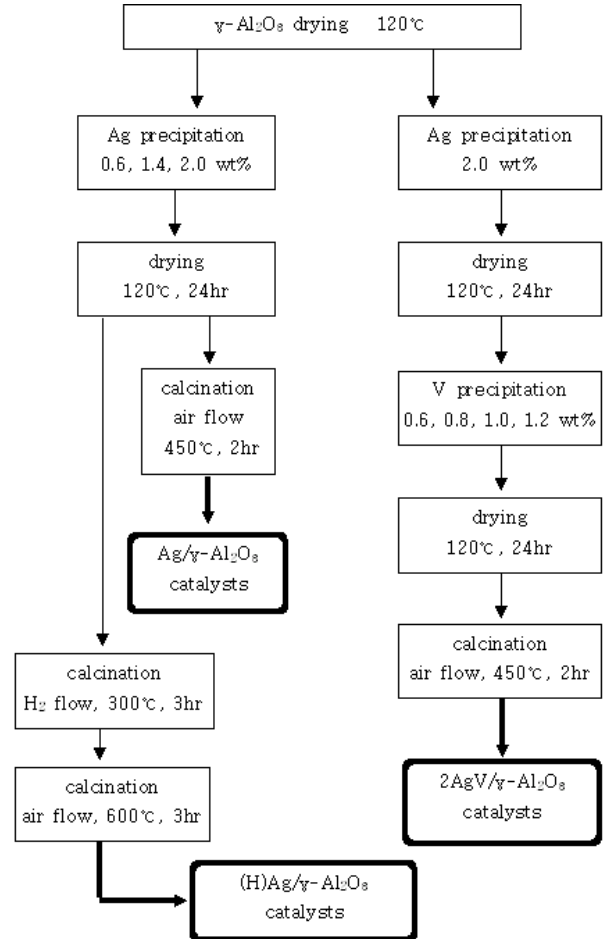


Figure 1. Preparation of catalysts.

wt% 되도록 함침하였고, 다시 120 °C에서 24 h 건조, 450 °C에서 공기 흐름중에 2 h 소성하는 이단함침법으로 제조하였다.

또한 소성과정에서 수소-산소 처리를 하여 2.0 wt%의 Ag/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 제조하기도 하였는데, 수소-산소 처리는 300 °C에서 H<sub>2</sub>를 100 mL/min으로 흘려 보내 주면서 3 h 동안 소성하여 환원시킨 후, 다시 600 °C에서 공기를 흘려 보내 주면서 3 h 동안 소성하여 산화시키는 방법으로 제조하였다.

위에서 설명한 촉매의 표기를 Table 1에 나타내었고, 제조 순서를 정리하여 Figure 1에 나타내었다.

Table 1. List of Prepared Catalysts and Notations

Catalyst	Notation
Ag 0.6 wt% with v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6Ag/v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ag 1.0 wt% with v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0Ag/v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ag 1.4 wt% with v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.4Ag/v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ag 2.0 wt% with v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.0Ag/v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ag 2.0 wt%, V 0.6 wt% with v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2Ag0.6V/v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ag 2.0 wt%, V 0.8 wt% with v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2Ag0.8V/v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ag 2.0 wt%, V 1.0 wt% with v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2Ag1.0V/v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ag 2.0 wt%, V 1.2 wt% with v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2Ag1.2V/v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ag 2.0 wt% with v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> treatment	(H)2.0Ag/v-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

**Table 2. Variables of TPR Experiment**

Item	Operating conditions
initial temperature	300 °C
heating rate	15 °C/min
reduction gas	12% H <sub>2</sub> (N <sub>2</sub> balance)
flow rate	35 mL/min
sample weight	0.3 g

## 2.2. 촉매의 특성분석

### 2.2.1. XRD 분석

제조한 각각의 촉매에 대하여 반응실험을 하기 전과 반응실험을 한 후의 결정구조를 파악하기 위하여 X-ray Diffraction (XRD) 분석을 하였으며, 분석기로는 Rigaku사의 D/MAX-II A를 사용하였다.

### 2.2.2. TPR 분석

화학적 상태분석을 하기 위하여 Temperature-Programmed Reduction (TPR; TPD/TPR 2900, Micromeritics) 실험을 하였다. TPR 실험에서 초기온도는 300 °C이고, 15 °C/min으로 승온하였다. 환원가스로는 N<sub>2</sub>를 balance로 한 12%의 H<sub>2</sub>를 사용하였고, 유량은 35 mL/min로 하였으며, 촉매는 각각 0.3 g을 사용하였다. TPR 실험의 조건은 Table 2에 나타내었다.

### 2.2.3. XPS 분석

촉매의 산화상태를 X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)를 이용하여 분석하였다. XPS는 Fisons사의 ESCALAB 220I-XL (AlK<sub>α</sub> excitation, 10 kV, 15 mA, 2~8×10<sup>-8</sup> mbar, fixed analyzer transmission)을 사용하였고, C1s (284.6 eV)를 기준 피크로 하여 charging effect 등에 의한 shift를 고려하여 측정자료를 보정하였다. XPS 분석 프로그램중의 하나인 XPSPEAK로 피크분석 및 면적계산을 하였다.

### 2.2.4. UV-Vis DRS 분석

Ag의 표면구조에 대한 특성을 분석하기 위하여 Ultraviolet-Visible Ray Diffuse Reflectance Spectroscopy (UV-Vis DRS; UV-3101PC scanning spectrophotometer, W, D<sub>2</sub> lamp, Shimadzu)를 이용하여 220~900 nm의 범위에서 분석하였다. 보정은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 하였으며, reflectance %를 Cubelka-Munk transform하여 absorbance로 변환하였다.

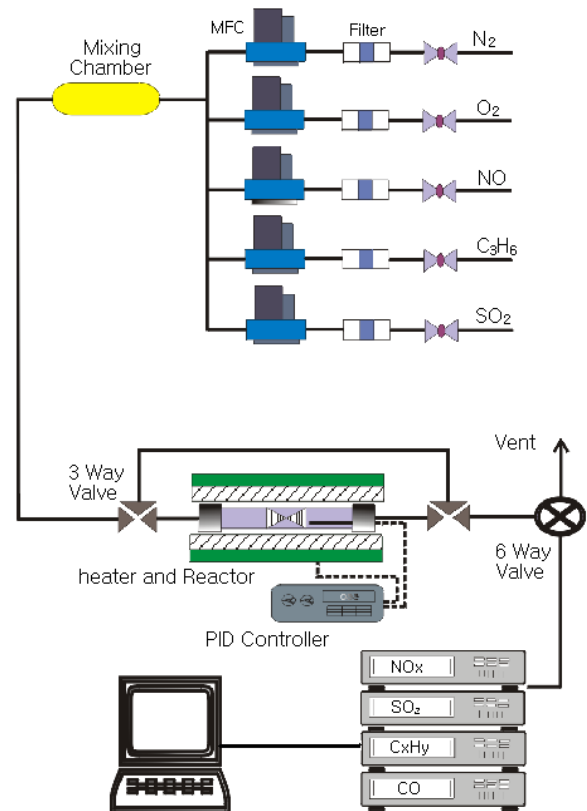
## 2.3. 실험장치

반응실험을 하기 위하여 Mass Flow Controller (MFC), 반응기, 히터, PID controller, analyzer 등을 설치하였다. 각종 가스의 유량과 농도는 MFC로 조절하여 배출가스 조성을 모사하였다. MFC는 Bronkhorst사의 제품을 사용하였다. 사용한 가스 중에서 NO는 함량 15% (Ar balance)의 것을 사용하였고, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>도 함량 15% (Ar balance)의 것을 사용하였으며, SO<sub>2</sub>는 함량 10% (N<sub>2</sub> balance)의 것을 사용하였다. NO, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, SO<sub>2</sub> 가스는 유니온가스(주)의 제품을 사용하였고, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 가스는 삼성산소(주)의 제품을 사용하였다. 반응실험에 있어서 O<sub>2</sub>의 농도는 10% 및 5%로 조절하여 실험하였고, NO와 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>는 1000 ppm으로 맞추었으며, SO<sub>2</sub>는 200 ppm으로 맞추어 실험하였다. 반응기를 통과하는 가스의 총 유량은 400 mL/min으로 조절하여 촉매의 공간속도를 28000 hr<sup>-1</sup>으로 하였다.

실험에 사용된 반응기는 고정층반응기의 형태를 가진 반응기를 사

**Table 3. Operating Conditions of NO<sub>x</sub> Reduction**

Item	Operating conditions
Temperature	200~500 °C (step 50 °C)
Catalyst loading weight	0.6 g
Space velocity	28,000 hr <sup>-1</sup>
Total flow	400 mL/min
Gas concentration	
NO	1000 ppm
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1000 ppm
SO <sub>2</sub>	0, 200 ppm
O <sub>2</sub>	5, 10%
N <sub>2</sub>	balance gas

**Figure 2. Schematic diagram of experimental apparatus.**

용하였다. 반응기에는 유리솜과 스테인레스 망을 이용하여 입상의 촉매를 0.6 g씩 충전하여 반응실험을 하였다. PID controller를 이용하여 반응기의 온도를 200~500 °C 범위에서 50 °C씩 단계적으로 승온하면서 NO<sub>x</sub>의 전환율을 조사하였다. 반응실험 조건을 Table 3에 나타내었다.

각 장치들간의 가스 연결관은 모두 스테인레스 혹은 테프론 재질을 사용하였다. 가스 농도를 분석하기 위한 가스분석기는 Italy의 Eurotron에서 제작한 Green Line MK2를 사용하였다.

반응장치의 전체적인 모식도는 Figure 2에 나타내었다.

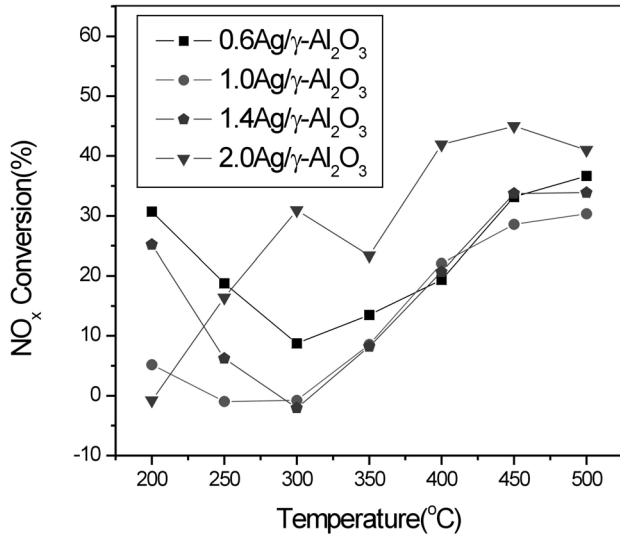


Figure 3. Effect of silver loading on the conversion of NO<sub>x</sub> over Ag/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at 10% O<sub>2</sub>.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 반응실험 결과

##### 3.1.1. 은 함량에 따른 영향

Figure 3에는 반응가스중의 산소농도가 10%일 때 V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 Ag를 각각 0.6, 1.0, 1.4, 2.0 wt% 담지시켜 제조한 촉매의 온도에 따른 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타내었다.

전체적으로 볼 때 NO<sub>x</sub> 전환율은 30~40% 정도로 나타났으며, Ag의 함량이 증가함에 따라서 NO<sub>x</sub>의 전환율이 높아지는 것으로 나타났다. 이것은 T. Miyadera가 Ag의 함량을 변화시켜가면서 실험하였을 때 2 wt%에서 가장 활성이 뛰어나다고 한 것과 일치하며[7,8], 또한 촉매의 반응온도가 450 °C 근처일 때 NO<sub>x</sub>의 전환율이 가장 높은 것으로 나타났는데 이것도 역시 다른 많은 연구자들의 결과와 일치한다[8-10].

##### 3.1.2. 바나듐의 영향

Ag/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매와 같은 방법으로 제조한 V/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매의 NO<sub>x</sub> 전환율을 2Ag/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 비교하여 Figure 4에 나타내었다. 1.2V/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매는 넓은 온도 범위에서 NO<sub>x</sub> 전환율이 높고, 고온 영역에서는 2Ag/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매보다 전환율이 낮으나, 250 °C 이하의 저온 영역에서는 2Ag/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매보다 더 높은 전환율이 나타났다.

V를 촉매로 사용할 경우 저온에서 활성이 좋기 때문에 고온에서 활성이 좋은 Ag와 함께 사용하면 저온 및 고온에서 높은 활성을 갖는 촉매가 만들어 질 것으로 예상하고 반응실험을 하였다. 5%의 O<sub>2</sub> 농도에서 2 wt%의 Ag와 함량을 여러 가지로 달리한 V를 이단함침시킨 2AgV/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매의 V 함량에 따른 NO<sub>x</sub> 전환율을 Figure 5에 나타내었다.

Figure 5의 결과를 볼 때 전체 반응온도 범위에서 V의 함침량이 증가함에 따라 NO<sub>x</sub>의 전환율은 낮아지는 것으로 나타났다. 그리고 2AgV/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매를 2Ag/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>나 1.2V/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 비교해본 결과 고온과 저온의 두 가지 영역에서 서로 다른 양상을 보였다.

250 °C 이상의 고온영역에서는 2AgV/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매에서 V의 함량이 증가함에 따라서 촉매의 NO<sub>x</sub> 전환율이 낮아지는 것으로 나타났다.

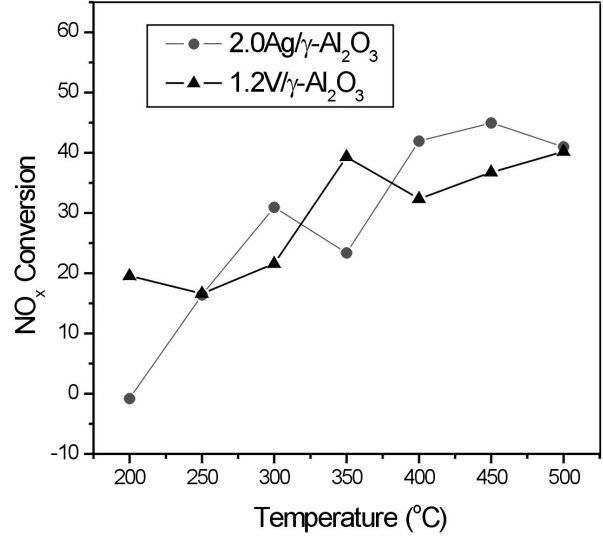


Figure 4. Comparison of NO<sub>x</sub> conversion with 2Ag/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 1.2V/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at 10% O<sub>2</sub>.

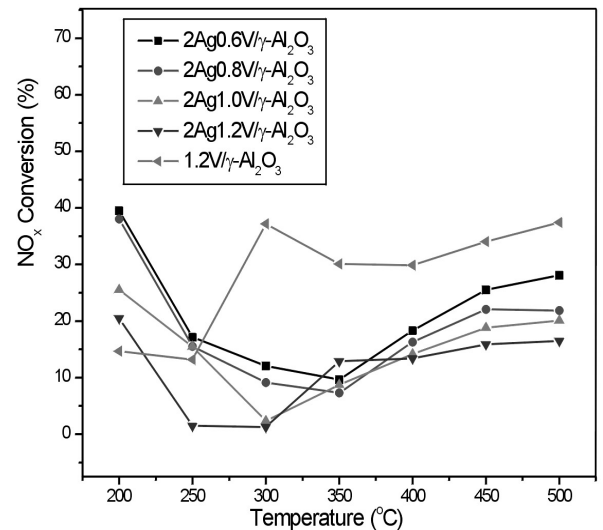


Figure 5. Effect of vanadium loading on the conversion of NO<sub>x</sub> over 2Ag/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at 5% O<sub>2</sub>.

또한 V를 Ag 없이 단독으로 V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 담지시켰을 때보다 전환율이 낮았다. 따라서 고온영역에서는 Ag/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>나 V/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매를 단독으로 사용하는 것이 Ag와 V를 함침하여 제조한 AgV/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 촉매로 사용하는 것보다 NO<sub>x</sub>의 환원에 있어서 더 유리한 것으로 나타났다.

250 °C 이하의 저온영역에서는 AgV/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매가 V/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매보다 높은 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타냈고, Ag/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매보다는 약간 높거나 비슷한 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타내었다.

또한 2Ag1.2V/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매의 활성이 더 떨어졌는데, V의 첨가가 1.0 wt% 이상이 되면 오히려 주촉매인 은 촉매의 활성점에 영향을 주어 활성이 감소하는 것으로 사료되며, V의 함량에 따른 결과를 볼 때 V를 0.6 wt% 함침시킨 촉매는 본 연구의 반응온도범위 전체에서 NO<sub>x</sub>의 전환율이 가장 우수함을 보여주었다.

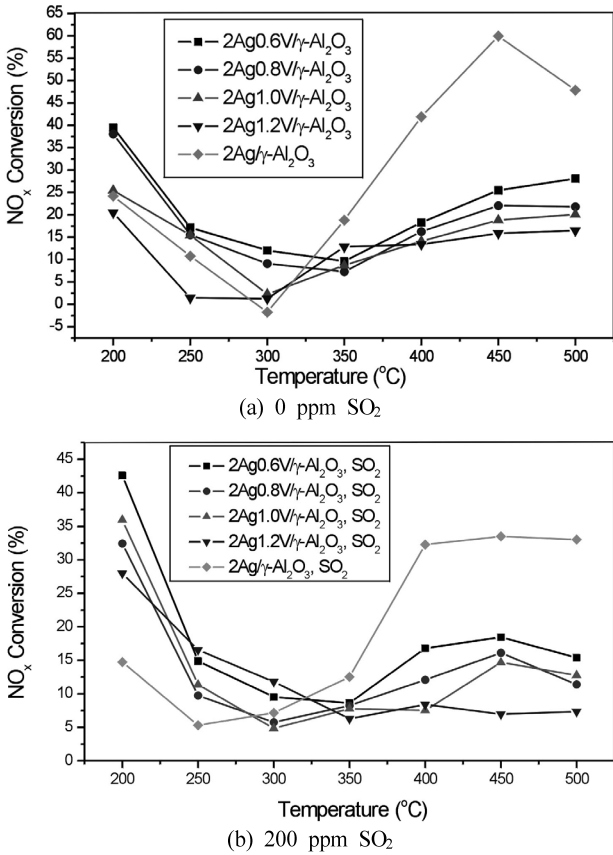


Figure 6. Effect of SO<sub>2</sub> on the conversion of NO<sub>x</sub> over 2AgV/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

3.1.3. 아황산가스의 영향

배기가스에 존재하는 SO<sub>2</sub>에 의한 영향을 알아보기 위하여 2.0Ag/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (H)2.0 Ag/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매에 대하여 반응가스중의 O<sub>2</sub> 농도를 5%로 고정하고 SO<sub>2</sub>를 200 ppm으로 혼합하여 실험하고, SO<sub>2</sub>가 혼합되지 않았을 때와 활성을 비교하였을 때 SO<sub>2</sub>에 의한 영향을 살펴본 결과 반응가스중에 200 ppm의 SO<sub>2</sub>가 함유됨으로 인하여 NO<sub>x</sub>의 전환율이 매우 낮아졌으며, SO<sub>2</sub>의 영향이 T. Miyadera 등의 연구결과보다 더 뚜렷이 나타났다.

반응가스 중에 SO<sub>2</sub>가 200 ppm 함유되어 있을 때 수소-산소 처리한 촉매와 처리하지 않은 촉매의 NO<sub>x</sub> 전환율을 비교해보면 반응가스 중에 SO<sub>2</sub>가 포함되어 있을 때 (H)2.0Ag/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매는 SO<sub>2</sub>가 없을 때보다 NO<sub>x</sub> 전환율이 낮아지기는 하지만 2.0Ag/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매보다는 높은 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타내었다.

G. C. Bond 등은 VO<sub>x</sub> 촉매가 NO의 환원에 효과적이며, SO<sub>2</sub>를 비롯하여 배출가스에 존재하는 다른 성분들에 대한 저항이 매우 뛰어나다고 했다. 본 연구에서는 V가 함유된 촉매가 반응가스 중에 SO<sub>2</sub>가 존재하는 경우에 NO<sub>x</sub>의 환원에 얼마나 효과가 있는지 비교하여 보았다.

Figure 6(a)에는 2AgV/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매에서 반응가스에 SO<sub>2</sub>가 포함되어 있지 않을 때의 NO<sub>x</sub> 전환율을, Figure 6(b)에는 SO<sub>2</sub>가 200 ppm 포함되어 있을 때의 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타내었다.

반응가스 중에 SO<sub>2</sub>가 포함되어 있지 않은 Figure 6(a)의 경우에는 전체적인 온도 범위에서 V의 함량이 증가함에 따라 NO<sub>x</sub> 전환율이 낮아지는 것으로 나타났다. 또한 250 °C 이하의 저온영역에서는 V이 함침된 2AgV/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매가 V이 함침되지 않은 2Ag/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 그리고

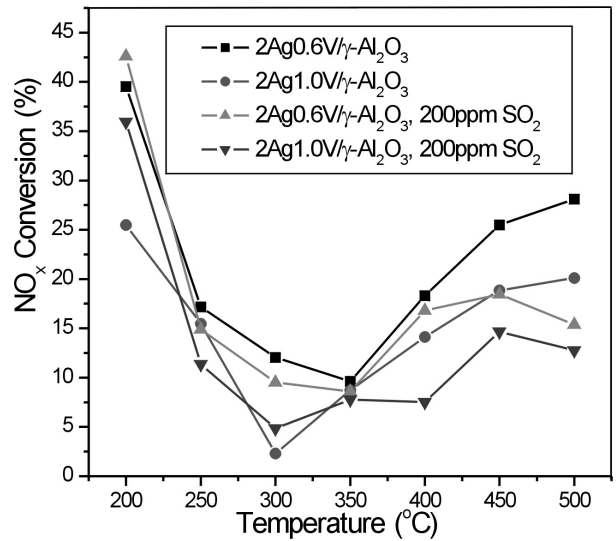


Figure 7. Effect of 200 ppm SO<sub>2</sub> on the conversion of NO<sub>x</sub> over 2Ag0.6V/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 2Ag1.0V/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

(H)2.0Ag/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매보다 약간 높거나 비슷한 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타내는 반면에 대부분의 온도 범위에서는 2Ag/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매보다 월등히 높은 NO<sub>x</sub> 전환율을 보여주었다.

반응가스중에 SO<sub>2</sub>가 포함되어 있는 Figure 6(b)의 경우에는 300 °C 이상의 온도 범위에서는 SO<sub>2</sub>의 영향을 받아 NO<sub>x</sub>의 전환율이 매우 낮아지는 것을 볼 수 있다. 그러나 250 °C 이하의 저온영역에서는 2Ag/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매의 경우 SO<sub>2</sub>가 존재함으로 인하여 NO<sub>x</sub>의 전환율이 낮아진 반면에 2AgV/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매에서는 SO<sub>2</sub>의 존재로 인하여 오히려 NO<sub>x</sub>의 전환율이 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

Figure 7에는 2Ag0.6V/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매와 2Ag1.0V/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매에서 SO<sub>2</sub>가 포함되어 있지 않을 때와 SO<sub>2</sub>가 200 ppm 포함되어 있을 때의 NO<sub>x</sub> 전환율을 비교하여 나타내었다. Figure 6과 Figure 7에 나타난 결과를 볼 때 반응가스 중에 SO<sub>2</sub>가 포함되어 있는 조건에서 Ag/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매는 NO<sub>x</sub> 전환율이 전체적인 온도 범위에서 낮아지는 반면에 AgV/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매는 저온영역에서는 NO<sub>x</sub> 전환율이 약간 높아지고 고온영역에서는 NO<sub>x</sub> 전환율이 낮아졌다. 따라서 본 연구에서 제조한 AgV/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매는 배출가스 중에 SO<sub>2</sub>가 존재하고, 배출가스의 온도가 낮은 공정에 적용하면 만족할만한 NO<sub>x</sub> 환원효과를 기대할 수 있다.

3.1.4. 산소의 영향

Ag/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매와 (H)Ag/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매에서 O<sub>2</sub> 농도에 따른 NO<sub>x</sub> 전환율을 Figure 8에, 2AgV/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매의 산소 농도에 따른 NO<sub>x</sub> 전환율을 Figure 9에 나타내었다. NO<sub>x</sub>의 환원반응을 위해서는 O<sub>2</sub> 농도가 희박한 환원조건이 적당하다. 그러나 본 실험에서는 온도에 따라 약간 편차가 있었으며 O<sub>2</sub>의 농도가 5%일 때 NO<sub>x</sub> 전환율은 저온에서 낮았으며 10%일 때의 NO<sub>x</sub>의 전환율은 고온에서 약간 높았다.

3.2. 촉매의 물성실험

3.2.1. XRD 분석

N. Aoyama 등은 Ag/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 산화상태와 NO<sub>x</sub> 전환율에 대하여 연구한 결과  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 담지시킨 Ag가 Ag<sub>2</sub>O의 산화상태에 있을 때 NO<sub>x</sub> 전환율이 높게 나타난다고 말했다. 따라서 Ag가 산화상태를 잘 유지해야 높은 NO<sub>x</sub> 제거 효과를 기대할 수 있다.

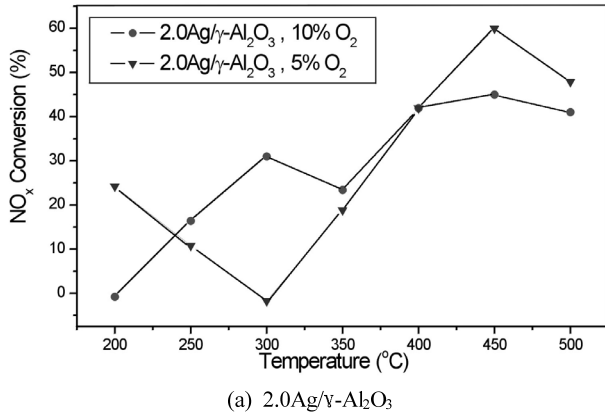
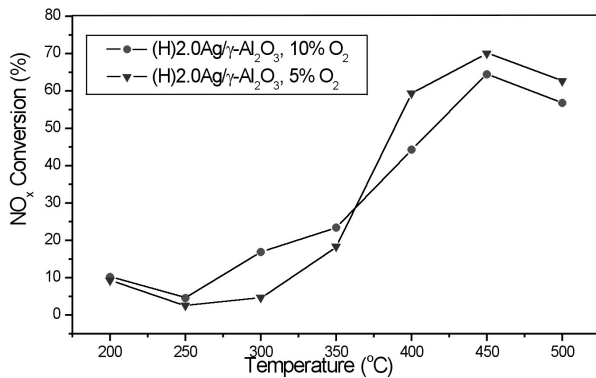
(a) 2.0Ag/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(b) (H)2.0Ag/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Figure 8. Effect of O<sub>2</sub> concentration on the conversion of NO<sub>x</sub> over Ag/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and (H)Ag/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

반응실험을 하기 전의 v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Ag/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 XRD spectra를 Figure 10에 나타내었다. 그림에서 v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 전형적인 피크가 뚜렷이 관찰되었다. 그러나 XRD에서는 함량이 대략 8 wt% 이상이 되어야 제대로 특성피크가 나타나기 때문에 Ag metal 및 Ag oxide의 피크는 v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 피크와 비교해 볼 때 거의 구분되지 않았다.

반응실험을 하기 전의 2AgV/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 XRD spectra를 Figure 11에 나타내었다. 이 그림에서 V metal 및 VO<sub>x</sub>에 의한 피크는 찾을 수 없었으며, V가 첨가되면서 2θ = 27.4° 부근과 32.0° 부근에서 피크가 생성된 것을 볼 수 있다. 산화 은, 산화 바나듐 및 은과 바나듐의 화합물에 대한 XRD 피크를 조사해본 결과 이러한 두 부근에서 피크가 나타나는 물질은 Ag<sub>1-x</sub>V<sub>x</sub>O<sub>5</sub>이었다.

고온영역에서 반응실험을 하였을 때 Ag/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매보다 AgV/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매의 NO<sub>x</sub> 전환율이 낮은 것으로 나타났는데, XRD 분석 결과로 볼 때 Ag가 V와의 화합물을 형성하였기 때문에 고온에서 활성이 뛰어난 Ag/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 양이 상대적으로 줄어들었기 때문으로 판단된다.

Figure 12에는 2Ag/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매에 대하여 각각 반응실험을 하기 전과 5%의 O<sub>2</sub>, 200 ppm의 SO<sub>2</sub> 조건에서 반응실험을 한 후의 XRD 피크를 나타내었다. 그림에서 보듯이 반응실험 후에 Ag metal의 피크가 뚜렷이 나타났다. 반응실험에서 SO<sub>2</sub>가 반응가스에 포함됨으로 인하여 NO<sub>x</sub>의 전환율이 낮아지는 것으로 나타났는데 이것은 산화상태의 Ag가 환원상태의 metallic Ag로 바뀌었기 때문이다.

Figure 13에는 2AgV/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매의 반응후 XRD spectra를 나타내었다. 그림을 보면 V의 양이 증가할수록 급속 Ag의 피크가 높아지는 경향이 있다. 반응실험 결과를 볼 때 고온영역에서 V의 양이 증가할

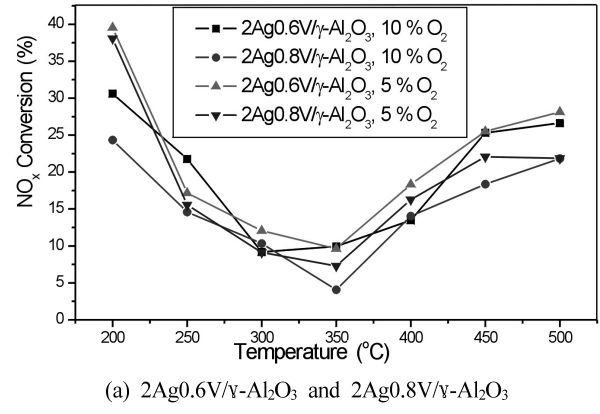
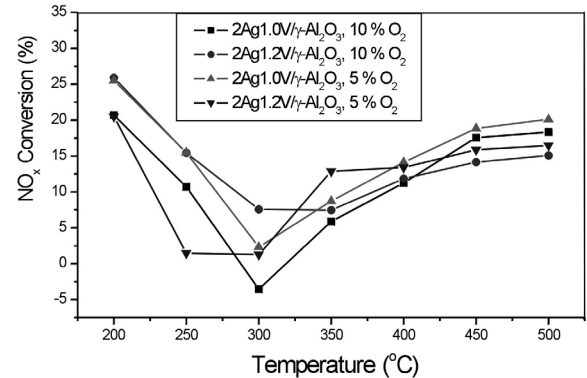
(a) 2Ag0.6V/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 2Ag0.8V/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(b) 2Ag1.0V/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 2Ag1.2V/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Figure 9. Effect of O<sub>2</sub> concentration on the conversion of NO<sub>x</sub> over 2AgV/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

수록 NO<sub>x</sub>의 전환율이 낮아지는 결과를 얻었는데, 이것 역시 V의 양이 증가함에 따라서 silver oxide가 metallic silver로 즉, 산화상태의 Ag가 환원상태의 Ag metal로 바뀌어서 나타나는 현상이라고 사료된다.

반응실험결과에서 저온영역에서는 AgV/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매가 Ag/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매보다 높은 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타냈고, 특히 반응가스 중에 SO<sub>2</sub>가 포함되어 있을 때에도 높은 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타냈는데 이것은 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 촉매작용으로 인한 것으로 판단되나 XRD 분석 결과에서는 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 피크가 관찰되지 않았다.

### 3.2.2. TPR 분석

제조한 촉매중에서, 2Ag/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2Ag0.8V/v-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 대하여 Temperature Programmed Reduction (TPR) 실험을 한 결과를 Figure 14에 나타내었다. 앞서서도 기술한 바와 같이 NO<sub>x</sub>의 전환율은 Ag의 산화상태에 따라 크게 달라지며, Ag<sub>2</sub>O의 상태에서 높은 NO<sub>x</sub>의 전환율을 기대할 수 있다. AgO의 상태에서는 결합력이 약해 낮은 온도에서도 쉽게 환원되어 Ag metal로 되기 때문에 촉매의 산화상태가 AgO의 상태로 존재하면 높은 NO<sub>x</sub>의 전환율을 기대하기 어렵다[11].

TPR 실험 결과 100~250 °C 근처에서 네 가지 촉매 모두에 AgO에 의한 것으로 보이는 높은 피크가 나타났다. AgO의 피크가 나타나는 위치를 보면 V를 포함한 촉매는 Ag만 단독으로 존재하는 촉매보다 더 높은 온도에서 피크가 나타났다. 따라서 V를 포함한 촉매는 AgO의 상태가 더 안정되어 있는 것으로 보인다.

Ag의 산화상태 중에서 NO<sub>x</sub>의 환원반응에 효과가 있는 Ag<sub>2</sub>O 상태에 의한 피크는 350~500 °C 근처에서 나타났다. Ag<sub>2</sub>O의 피크에서도

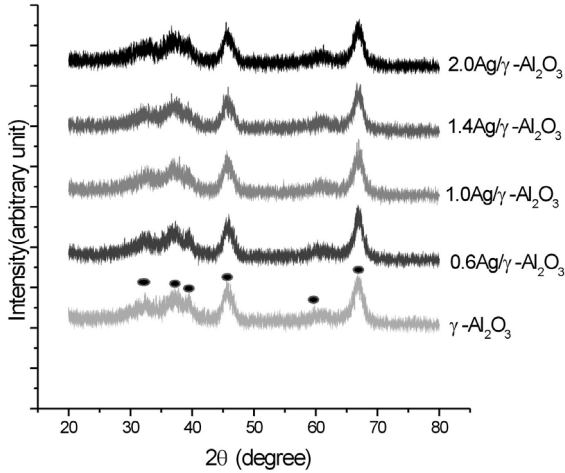


Figure 10. XRD spectra of the fresh Ag/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. (●) γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

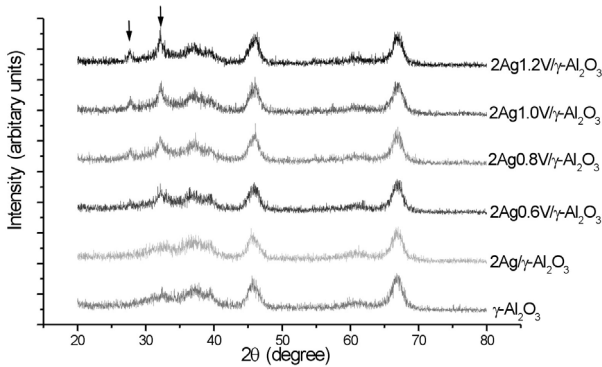


Figure 11. XRD spectra of the fresh AgV/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. (↓) Ag<sub>1-x</sub>V<sub>x</sub>O<sub>5</sub>.

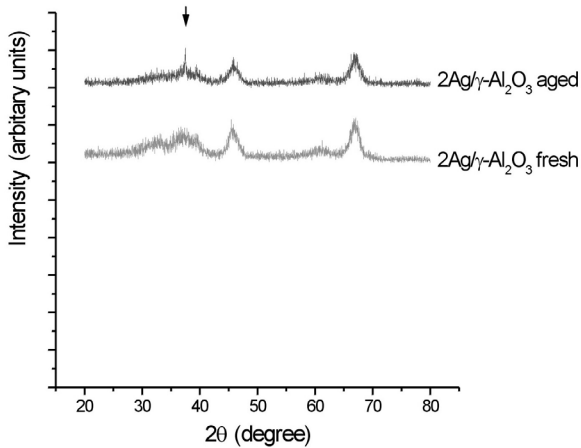


Figure 12. XRD spectra of the fresh and the aged Ag/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. (↓) Ag metal.

V를 함침한 촉매가 더 높은 온도에서 Ag<sub>2</sub>O의 피크가 나타나는 것으로 보아 V를 함침한 촉매에서는 AgO나 Ag<sub>2</sub>O와 같은 산화상태의 Ag가 V의 영향으로 안정하게 존재하는 것으로 판단된다.

V를 함침한 촉매에서는 V를 함침하지 않은 촉매에서보다 Ag<sub>2</sub>O의 피크면적이 더 넓게 나타났다. 따라서 Ag<sub>2</sub>O의 피크면적이 넓은 만큼 NO<sub>x</sub>를 더 잘 환원시킬 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 또한 V가 포

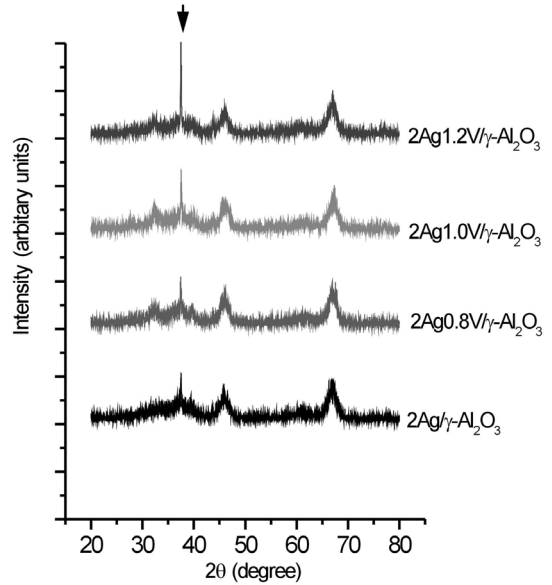


Figure 13. XRD spectra of the aged 2AgV/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. (↓) Ag metal.

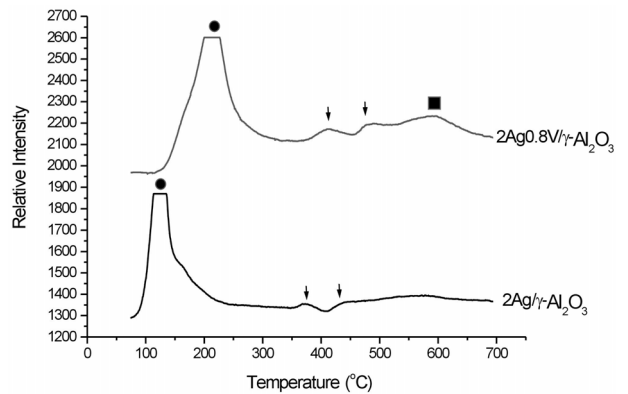


Figure 14. H<sub>2</sub> TPR of AgV/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. (●) AgO, (↓) Ag<sub>2</sub>O, (■) V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

함된 촉매의 경우에는 약 600 °C 근처에서 vanadium oxide에 의한 피크가 나타났다.

V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매는 NO<sub>x</sub>의 환원에 있어서 저온에서 효과가 높고, 특히 SO<sub>2</sub>를 비롯해서 배출가스에 존재하는 다른 성분들에 대한 저항이 큰 것으로 알려져 있다. 본 연구의 반응실험 결과에서도 Ag 없이 제조한 V/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매에서 NO<sub>x</sub>의 전환율이 높게 나타났다.

반응실험 결과에서 AgV/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매는 Ag/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매보다 고온 영역에서는 낮은 NO<sub>x</sub> 전환율을, 저온영역에서는 높은 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타내었다. TPR 실험 결과를 볼 때 저온영역에서 반응가스중에 SO<sub>2</sub>가 존재할 때 높은 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타낸 것은 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 촉매작용에 의한 것이며, 고온영역에서 Ag/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매보다 낮은 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타낸 것은 Ag와 V의 촉매반응 메커니즘이 서로 다르기 때문에 V에 의하여 Ag의 촉매작용이 방해받았기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.2.3. XPS 분석

반응실험을 하기 전의 2AgV/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매의 Ag3d 궤도에 대한 XPS 피크를 Figure 15에 나타내었다. Ag3d에 대한 XPS 피크에서는 스핀 5/2 및 3/2에 대한 피크가 특성적으로 나타나며, 결합에너지는

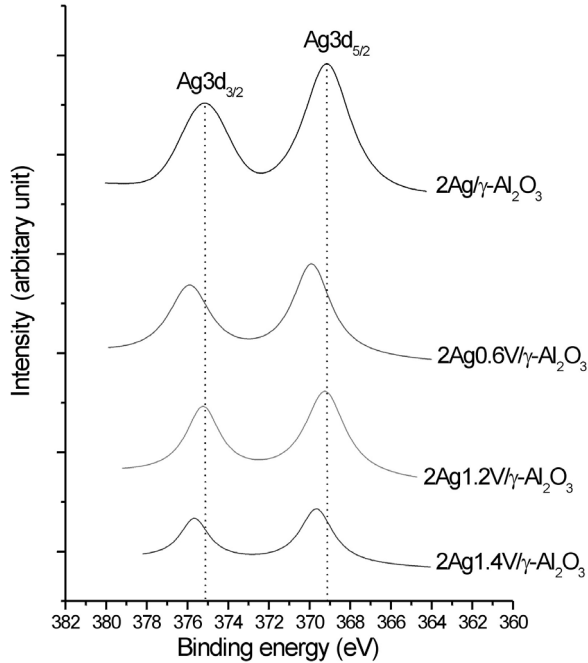


Figure 15. XPS spectra of Ag3d from the fresh AgV/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

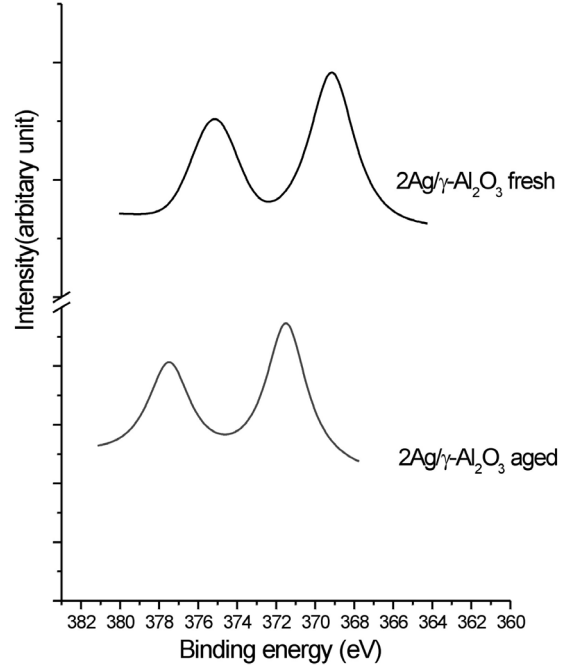


Figure 17. XPS spectra of Ag3d from the fresh and the aged 2Ag/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

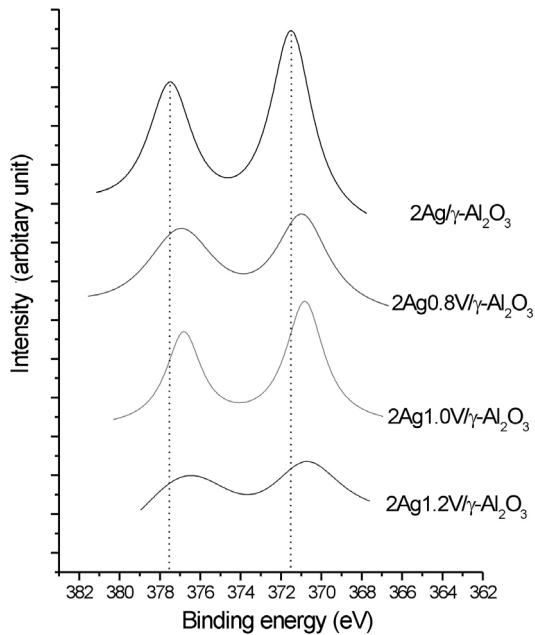


Figure 16. XPS spectra of Ag3d from the aged AgV/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Ag3d<sub>5/2</sub>가 Ag3d<sub>3/2</sub>보다 6 eV 만큼 낮은 특징이 있다. 또한 그림에서 보면 V의 함침량이 증가함에 따라서 피크의 위치가 결합에너지가 높은 쪽으로 약간 이동하고, 면적이 줄어드는 것으로 나타났다. 반응실험결과에서 V의 함침량이 증가함에 따라 고온에서 NO<sub>x</sub>의 전환율이 낮아지는 것으로 나타났는데 XPS 분석 결과와 비교해볼 때 이것은 주로 고온에서 NO<sub>x</sub>의 환원작용을 하는 Ag가 V의 함침량이 증가함으로 인하여 산화상태를 유지하지 못하고 환원상태로 존재하며, 또한 V가  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 표면을 점유하는 만큼 Ag가 표면에 고르게 분산되지 못하였기 때문으로 생각된다.

Figure 16에는 반응 후 촉매의 XPS 분석결과를 나타내었다. 그림에서 볼 때 전체적인 피크의 위치가 거의 비슷하게 metallic Ag의 피크로 나타난 것은 산화상태의 Ag가 SO<sub>2</sub>에 의해서 metallic Ag로 환원되었기 때문이다.

Figure 17에는 2Ag/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매에 대하여 반응실험을 하기 전과 반응실험 후의 Ag3d XPS 피크를 나타내었다. 반응실험 후의 촉매가 반응실험 전의 촉매보다 결합에너지가 더 높은 쪽으로 피크가 크게 이동하였다.

XPS 분석 결과에서 볼 때 전체적으로 반응실험을 하기 전보다 반응실험을 한 후의 Ag3d 피크의 위치가 높은 결합에너지 쪽으로 이동하였는데 이것은 반응 후에 SO<sub>2</sub>의 작용으로 Ag의 산화상태가 저하되어 metallic Ag로 바뀌었기 때문이라는 보고가 있으나[12], 전반적으로 Ag의 결합세기가 강해진 것으로 판단할 수 있다.

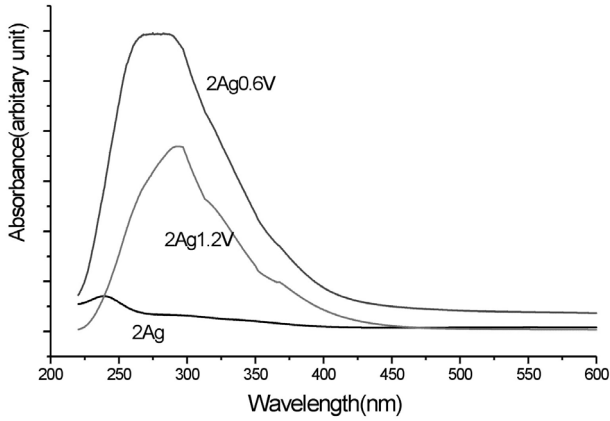
### 3.2.4. UV-Vis DRS 분석

Ultraviolet-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy (UV-Vis DRS)를 이용하여 반응 전의 촉매와 SO<sub>2</sub>가 반응물에 포함된 반응 후의 상태특성을 분석한 결과를 Figure 18과 Figure 19에 나타내었다. Ag에 대해서 UV-Vis DRS 분석을 하면 270~290 nm와 370~390 nm에서 Ag<sup>δ+</sup>에 의한 피크가 나타나며, 315 nm에서는 metallic Ag 막에 의한 피크가, 그리고 420~460 nm에서는 metallic Ag 집합체에 의한 피크가 나타난다.

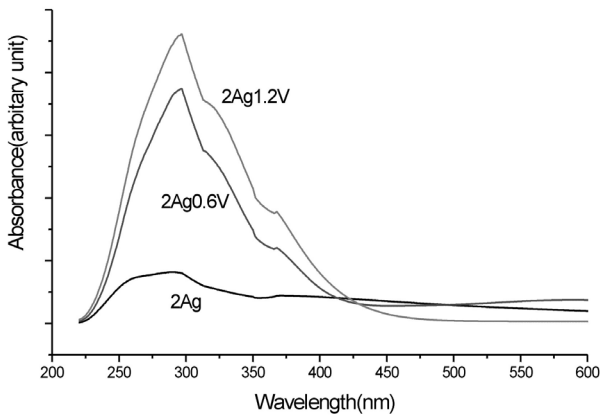
분석결과를 볼 때 Figure 18(a)에서 보는 것과 같이 반응 전의 촉매에서는 V의 첨가로 인하여 270~300 nm의 Ag<sup>δ+</sup>의 피크가 높게 나타난다. 그리고 반응 전의 촉매에서는 2Ag0.6V/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매가 2Ag1.2V/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매보다 Ag<sup>δ+</sup>의 상태를 더 잘 유지하고 있다.

2Ag/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 250 nm 이하의 산화 Ag의 피크가 반응실험 후에 약 300 nm의 metallic Ag로 이동한 것을 볼 수 있다. 또한 Figure 18의 (a)와 (b)를 비교하여 볼 때 반응 전의 촉매에서는 Ag<sup>δ+</sup>의 상태로





(a) fresh catalysts



(b) aged catalysts

**Figure 18.** UV-Vis diffuse reflectance spectra of 2Ag/ $\gamma$ - $Al_2O_3$ , 2Ag0.6V/ $\gamma$ - $Al_2O_3$  and 2Ag1.2V/ $\gamma$ - $Al_2O_3$ .

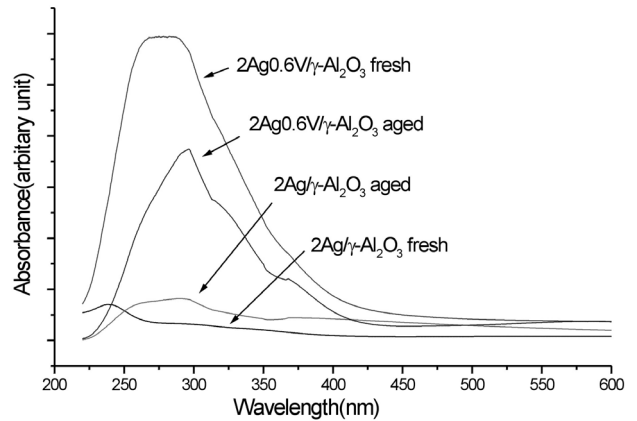
2Ag0.6V/ $\gamma$ - $Al_2O_3$ 보다 낮은 피크를 보이고 있던 2Ag1.2V/ $\gamma$ - $Al_2O_3$ 가 반응 후에 metallic Ag로 이동하면서 피크의 높이도 2Ag0.6V/ $\gamma$ - $Al_2O_3$ 보다 높게 나타났다. 이는 V가 첨가된 촉매는 반응에 참가하면서 Ag의 상태가 산화상태를 유지할 수 없게 되고 쉽게 metallic Ag로 이동하기 때문으로 생각된다. 그러므로 AgV/ $\gamma$ - $Al_2O_3$  촉매에서는 V의 함량이 증가함에 따라서  $NO_x$ 의 전환율이 낮아졌던 것으로 판단된다.

### 4. 결 론

배출가스 중에 존재하는 유해성분인 NO를 무해한  $N_2$ 로 환원시키기 위하여 AgV/ $\gamma$ - $Al_2O_3$  촉매를 제조하고, 배출가스 조성을 모사하여 반응실험을 하였으며, 반응실험을 하기 전과 후의 촉매에 대하여 XRD, TPR, XPS, UV-Vis DRS 실험을 하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1)  $\gamma$ - $Al_2O_3$ 에 Ag를 0.6, 1.0, 1.4, 2.0 wt% 담지시켜 반응실험을 한 결과 Ag의 담지량이 2.0 wt%일 때, 그리고 반응온도가 약 450 °C 일 때  $NO_x$ 의 전환율이 가장 높게 나타났다.

(2) Ag와 V를  $\gamma$ - $Al_2O_3$ 에 이단함침하여 제조한 AgV/ $\gamma$ - $Al_2O_3$  촉매는 Ag/ $\gamma$ - $Al_2O_3$  촉매에서의 경우와 같이 450 °C 근처에서  $NO_x$ 의 전환율이 가장 높게 나왔으며, V의 함침량이 증가함에 따라 Ag가 Ag metal 쪽으로 많이 환원되었고, 300 °C 이상의 고온에서는  $NO_x$  전환율이 낮아지는 것으로 나타났다.



**Figure 19.** UV-Vis diffuse reflectance spectra of 2Ag/ $\gamma$ - $Al_2O_3$  and 2Ag0.6V/ $\gamma$ - $Al_2O_3$ .

(3) 소성과정에서 수소-산소 처리를 한 (H)Ag/ $\gamma$ - $Al_2O_3$  촉매는 수소-산소 처리를 하지 않은 Ag/ $\gamma$ - $Al_2O_3$  촉매보다  $NO_x$ 의 환원에 더 효과적이었다.

(4) 250 °C 이하의 저온영역에서 AgV/ $\gamma$ - $Al_2O_3$  촉매는 Ag/ $\gamma$ - $Al_2O_3$  촉매나 V/ $\gamma$ - $Al_2O_3$  촉매보다 높거나 비슷한  $NO_x$  전환율을 나타냈다. 특히 저온영역에서 반응가스중에  $SO_2$ 가 포함되어 있을 때에는 Ag/ $\gamma$ - $Al_2O_3$  촉매는  $SO_2$ 의 영향으로  $NO_x$ 의 전환율이 매우 낮아졌으나, AgV/ $\gamma$ - $Al_2O_3$  촉매는 거의 변함이 없거나 오히려 약간 높은  $NO_x$  전환율을 나타내어  $SO_2$ 에 의한 영향이 적은 것으로 나타났다.

(5) 반응가스중의 산소농도에 따른  $NO_x$  전환율을 볼 때 산소의 농도가 낮은 환원분위기에서  $NO_x$ 가 잘 환원되는 것으로 나타났다.

(6) 생성물 분포를 볼 때 저온영역에서는  $NO_2$ 가 NO로 쉽게 환원되는 것에 비하여 NO가  $N_2$ 로 쉽게 환원되지 못하기 때문에 저온부근에서는 NO의 농도가 높게 나타났다. 그러나 반응온도가 높아짐에 따라서 NO의 전환율이 높게 되는 것으로 나타났다.

(7) 제조한 촉매에 대한 반응 전·후의 물성실험 결과와 반응실험 결과를 비교할 때, Ag가 산화상태를 잘 유지하고 있는 촉매들은 모두 고온에서 높은  $NO_x$  전환율을 나타냈다.

### 참 고 문 헌

1. Airpollution Research Associate, Donghwa Kisol, p.67 (1996).
2. C.-Y. Lee, Master Thesis, Hanyang Univ., Seoul, Korea (1991).
3. B.-H. Kim, Master Thesis, Konkook Univ., Seoul, Korea (1992).
4. S. Satokawa, J. Shibata, K.-I. Shimizu, A. Satsuma, and T. Hattori, *Appl. Catal. B*, **42**, 179 (2003).
5. C. Shi, M. Cheng, Z. Qu, and X. Bao, *Appl. Catal. B*, **51**, 171 (2004).
6. M. Richter, U. Bentrup, R. Eckelt, M. Schneider, M.-M. Pohl, and R. Fricke, *Appl. Catal.*, **51**, 261 (2004).
7. T. Miyadera, *Appl. Catal. B*, **2**, 199 (1993).
8. T. Miyadera, *Appl. Catal. B*, **13**, 157 (1997).
9. S. Kameoka, T. Chafik, Y. Ukisu, and T. Miyadera, *Catal. Lett.*, **51**, 11 (1998).
10. T. E. Hoost, R. J. Kudla, K. M. Collins, and M. S. Chattha, *Appl. Catal. B*, **13**, 59 (1997).
11. K. A. Bethke and H. H. Kung, *J. Catal.*, **172**, 93 (1997).