

# 아세트알데히드와 오존 복합악취 저감을 위한 망간기반 촉매 성능 연구

서민혜<sup>\*,\*\*</sup> · 이민석<sup>\*</sup> · 이수영<sup>\*</sup> · 조성수<sup>\*</sup> · 엄성현<sup>\*,†</sup>

<sup>\*</sup>고등기술연구원 신소재공정센터, <sup>\*\*</sup>아주대학교 에너지시스템학과  
(2016년 12월 30일 접수, 2017년 1월 23일 심사, 2017년 1월 26일 채택)

## A Study on the Removal of Complex Odor including Acetaldehyde and Ozone Over Manganese-based Catalysts

Minhye Seo<sup>\*,\*\*</sup>, Minseok Lee<sup>\*</sup>, Sooyoung Lee<sup>\*</sup>, Sungsu Cho<sup>\*</sup>, and Sunghyun Uhm<sup>\*,†</sup>

<sup>\*</sup>Advanced Materials and Processing Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin 17180, Korea

<sup>\*\*</sup>Department of Energy system Research, Ajou University, Suwon 16499, Korea

(Received December 30, 2016; Revised January 23, 2017; Accepted January 26, 2017)

### 초 록

본 연구에서는 대형 직화구이 음식점으로부터 배출되는 유증기 및 미세먼지 제거를 위해 습식 플라즈마 전기집진 공정을 적용할 경우, 집진공정 후단에서 나오는 잔여 오존을 활용하여 제거되지 않은 아세트알데히드와 오존을 제거함으로써 복합악취를 저감할 수 있는 오존 산화 촉매 공정을 개발하였다. 망간산화물 기반 촉매는 분말 촉매 제조 후 압출하여 펠렛 형태로 성형하였으며, 성형촉매 상에서 아세트알데히드와 오존 모두 높은 제거율을 나타낼 수 있도록 최적 조건을 도출하고자 하였다. 제조한  $Mn_2O_3$ 와  $CuMnO_x$  촉매는 각각의 성능을 평가하였으며, 이 두 가지 촉매를 2단으로 적용하였을 때 공간속도  $10,000\text{ h}^{-1}$ , 반응온도  $100\text{ }^\circ\text{C}$ 인 조건에서 아세트알데히드는 85% 이상, 오존은 100% 저감시킬 수 있었다.

### Abstract

In this study, we report on the catalyst process installed in conjunction with a wet plasma electrostatic precipitator to remove the oil mist and fine dust emitted from large-size grill restaurants. The multi-stage catalyst module reduced odor through catalytic reaction of acetaldehyde on catalysts even at an ambient temperature with ozone as an oxidant readily produced in a wet plasma electrostatic precipitator. Two types of manganese-based catalysts,  $Mn_2O_3$  and  $CuMnO_x$  were fabricated by extrusion molding for structured catalysts in practical applications, and the optimum conditions for high removal efficiencies of acetaldehyde and ozone were determined. When two optimized catalysts were applied in a two-stage catalyst module, the removal efficiency of acetaldehyde and ozone were  $\geq 85\%$  and  $100\%$  respectively at the space velocity of  $10,000\text{ h}^{-1}$  and the reaction temperature of  $100\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Keywords:** complex odor, wet plasma electrostatic precipitator, acetaldehyde, ozone catalytic oxidation, manganese oxide catalyst

## 1. 서 론

산업 및 생활환경으로부터 배출되는 악취물질은 단일 또는 다양한 혼합물 상태로 존재하며, 알코올류, 알데히드류, 황화수소류, 케톤류 등을 포함한 냄새를 가진 화합물은 약 40만 종 존재한다[1]. 국내에서는 복합악취 뿐 아니라 암모니아, 메틸메르캅탄, 알데히드류 등 총 22종의 화합물질을 지정 악취물질로 규제하고, 각각의 배출허용농도 기준을 제정하고 있다. 그러나 악취는 감각공해로, 허용치 이하로 배출하는 사업장에서도 악취를 인지하는 주관적인 개인차로 인해 발생되

는 민원이 잦으며, 음식점 및 하수관 등의 생활악취 민원은 매년 증가 추세에 있다. 특히 서울시의 경우 악취 민원 중 85.2%는 비규제 대상의 사업장이며, 그중 음식점이 약 40%를 차지하고 있다[2]. 현재 비규제 대상 사업장의 생활악취 기준에 대한 명확한 규정이 없어 관리가 어려운 실정이며, 이에 따라 악취물질의 체계적 규제 및 구체적인 관리방안이 부재하다는 문제점이 대두되고 있다.

직화구이 음식점으로부터 배출되는 유증기는 미세입자 뿐 아니라 다양한 휘발성 유기화합물을 포함하고 있다. 최근 환경부는 직화구이 음식점을 미세먼지 배출 생활오염원으로 보고, 향후 규제안 및 효율적 관리 방법을 모색하고 있으며, 그에 따라 유증기 및 미세입자 제거를 위한 다양한 연구가 진행 중이다. 미세입자를 저감할 수 있는 후처리 기술은 전기집진, 여과집진, 습식세정, 촉매산화기술 등이 있으며, 하이브리드 방법으로 전기집진과 여과집진을 결합하여 집진효율을

† Corresponding Author: Advanced Materials and Processing Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin 17180, Korea  
Tel: +82-31-330-7494 e-mail: laminat@hanmail.net

**Table 1. Characterization of Acetaldehyde and Ozone Removal Catalyst (unit : wt%)**

	Mn	Cu	Ti	Si
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	92.2	-	4.6	3.2
CuMnO <sub>x</sub>	54.3	39.1	-	0.8

높이고자 한 기술 또한 보고되고 있다.

습식 전기집진 기술은 전기집진과 습식세정의 하이브리드 기술의 한 형태로서 전기적 인력에 의한 입자상 물질의 제거 뿐 아니라 미세 액적의 표면 접촉을 통해 입자상 물질의 세정·제거 및 수용성 가스상 물질을 함께 처리할 수 있다. 이에 습식 전기집진기술을 적용하여 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, 다이옥신류 등의 수용성 및 비수용성 오염물질의 저감을 유도하는 연구가 진행된 바 있다[3,4]. 또한 습식방법을 적용할 경우 화재에 대한 위험성이 적고, 집진 전극 표면의 수막 형성으로 포집 먼지 제거를 위한 별도의 세정 공정이 필요 없다는 장점이 있다. 그중 플라즈마를 이용한 습식 집진 기술은 미세먼지 하전에 유리하여 집진효율이 우수하고, 고농도의 대기오염물질을 저감할 수 있다는 장점이 있어 일부에서는 산업용으로 사용하고자 하는 연구가 진행 중이다.

그러나 습식 플라즈마 집진기술은 입자상 물질의 제거율이 높지만 일부 가스상 악취 유발 물질의 제거가 용이하지 않다. 또한 방전 시 생성되는 오존은 일부 습식공정의 가습 분위기에서 제거되고 남은 약 10 ppm 이하의 잔여 오존이 배출되어 복합악취를 상승시킬 수 있다는 단점이 있어 플라즈마 적용 시 오존 및 가스상 물질을 효과적으로 처리할 수 있는 촉매 등의 후처리 공정이 수반되어야 한다고 보고된 바 있다[5,6].

휘발성 유기화합물 처리기술은 직접연소 및 축열식 연소법, 촉매 산화, 응축, 바이오필터, 막 분리, UV 산화법 등이 있다[7]. 그중 유해 물질의 완전한 제거를 위해서는 800 °C 이상의 연소방법이나 300~400 °C 내외의 온도에서 반응이 진행되는 촉매 산화법이 유리한 것으로 알려져 있으나, 중·고온의 온도에서 반응하므로 에너지비용이 과다 소요되기 때문에 저온 작동 촉매 개발의 필요성이 대두되었다. 휘발성 유기화합물 분해에 주로 사용되는 촉매는 Pt, Pd 등의 귀금속 촉매와 Cu, Mn, Ni, Cr 등의 전이금속 산화물 촉매, 페로브스카이트 산화물 촉매 등이 있다. Tichenor와 Palazzolo의 연구에 의하면[8], 모노리스 세라믹에 Pt/Pd bimetallic 촉매를 적용하였을 때, 휘발성 유기화합물의 경우 반응온도 260~425 °C, 공간속도 15,000~80,000 h<sup>-1</sup>에서 89~99%의 전환율을 보이며, 알코올, 알데히드, 방향족, 케톤 등의 순서대로 반응성이 높은 것으로 보고되었다. 촉매산화기술 중 오존을 이용한 촉매 산화는 비교적 저온 또는 상온에서도 반응이 가능하다는 장점이 있으며, 벤젠의 경우 제올라이트(Y, beta, Mordenite)에 Mn을 담지한 촉매[9]와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> 등의 담체에 Mn을 담지하여 제조한 촉매[10]에서 최대 95% 이상의 제거율을 나타내었다. D.-Z.Zhao et al.[11]에 따르면, 포름알데히드의 오존 산화반응에서 오존 및 수분 처리한 망간산화물 촉매의 경우 저온 영역(≤ 100 °C)의 활성이 증가한다고 연구된 바 있어 저온 영역에서의 망간 촉매의 성능은 매우 우수한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서 대상으로 하는 아세트알데히드는 국내 지정 악취물질 22종 중 하나로 규정되어 있다. 직화구이 음식점으로부터 배출되는 아세트알데히드의 농도는 음식점에서 사용하는 숯의 종류, 직화구이 대상 물질 및 양 등에 따라 배출되는 농도가 상이하다. 이에 발생하는 아세트알데히드와 오존의 산화반응 및 미반응 오존의 분해를 효과적

으로 유도할 수 있는 촉매 및 촉매 반응기의 구성이 중요하다.

본 연구에서는 습식 플라즈마 전기집진을 통한 유증기 및 미세먼지 제거 공정 후단에서 배출되는 아세트알데히드와 플라즈마 사용으로 인해 필연적으로 발생하는 오존을 활용하여 저온 영역의 반응성이 우수한 망간 산화물 기반 촉매 상에서 아세트알데히드를 분해하고, 잔여 오존 또한 제거가 가능한 복합악취 제거용 촉매 시스템을 설계하고 성능을 평가하고자 하였다.

## 2. 실험

망간 촉매는 MnCO<sub>3</sub> (Samchun chemicals) 분말 시약을 이용하였고, 무기바인더로써 0.8 μm 입자 크기의 SiO<sub>2</sub> (Kojundo chemical) 4 wt%와 TiO<sub>2</sub> (Degussa, P-25) 5 wt%를 혼합하여 제조하였다. 습식 집진기 후단에 적용해야 하는 촉매이기 때문에 일정한 형태를 지니고 있어야 하므로, 혼합한 분말에 증류수를 주입하면서 혼련한 후 직경 3 mm 크기의 펠렛 형태로 압출성형하여 구조체 촉매로 제조하였다. 성형한 촉매는 110 °C에서 12 h 동안 건조한 후 600 °C에서 4 h 소성하였다.

구리 망간 합금 촉매는 공침법(co-precipitation)으로 제조하였다. Mn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · xH<sub>2</sub>O (Sigma-Aldrich)와 Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 2.5H<sub>2</sub>O (Sigma-Aldrich) 시약을 이용하였으며, 1M의 NH<sub>4</sub>OH를 첨가하여 pH 10으로 조절하여 공침하였다. 여과 후 110 °C에서 12 h 동안 건조하여 제조한 분말 촉매에 무기바인더 SiO<sub>2</sub> 1 wt%를 첨가하였으며, 혼련 및 압출성형을 통해 펠렛 형태로 제조한 후 110 °C에서 12 h 동안 건조하고 350 °C에서 4 h 소성하였다. 제조한 촉매의 성분은 XRF (X-ray fluorescence spectroscopy, SHIMADZU XRF-1800)를 이용하여 정량 분석하였으며, BET 분석기(Micromeritics, Tristar II 3020)로 촉매의 비표면적을 분석하였다.

촉매는 직경 10 mm, 높이 700 mm의 석영 반응기 내 Quartz wool로 고정하여 장착하였으며, 촉매반응 전단 및 후단의 아세트알데히드와 오존 농도를 분석하여 제거 효율을 계산하였다. 아세트알데히드 가스는 10 ppm/N<sub>2</sub> balance (Rigas사)로 제조하여 사용하였고, 오존은 오존 발생기(Ozonetech, LAB-1)를 이용하여 일정 농도로 공급하였다. 반응가스는 아세트알데히드 5 ppm, 오존 3 ppm으로 촉매층에 주입하였으며, 반응온도는 30, 70, 100, 150 °C로 각각 제어하였고, 공간속도는 5,000~20,000 h<sup>-1</sup>까지 단계적으로 변화시키면서 성능을 평가하였다. 아세트알데히드는 GC-FID (Younglin, YL6500)와 DS-5 capillary 컬럼을 사용하여 농도를 분석하였고, 오존 농도는 온라인 오존분석기 (2B Technology, Inc., UV-106)를 이용하여 모니터링하였다.

## 3. 결과 및 고찰

망간 기반 촉매는 저온에서 유기화합물 제거에 탁월한 것으로 알려져 있으며, Cu 등의 금속을 도입하였을 때 spinel lattice 내에서 구리와 망간 사이에서 electronic transfer가 일어나 촉매 성능이 우수하다 [12,13]. 오존 및 아세트알데히드의 저감 성능이 우수한 Cu-Mn 촉매 [14]와 가습 조건에서도 저온 활성의 유지가 가능한 것으로 알려져 있는 Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 적용하여 오존 및 아세트알데히드를 제거함으로써 궁극적으로는 이 둘 화학종으로부터 발생하는 복합악취를 감소시키고자 하였다.

아세트알데히드와 오존 분해 반응을 위해 제조한 2종의 촉매 성분 분석결과를 Table 1에 나타내었다. MnCO<sub>3</sub>를 기본 성분으로 제조한 망간 촉매는 Mn 함량이 92.2 wt%이었고, Si 3.2 wt%, Ti 4.6 wt%이었

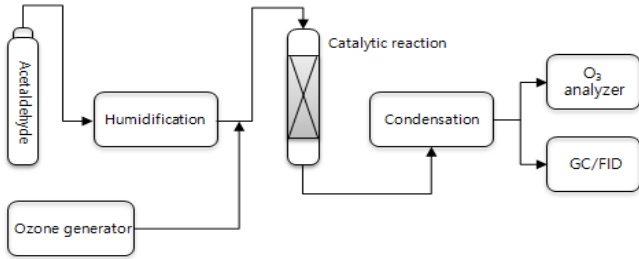


Figure 1. Schematic diagram of the catalytic reaction for acetaldehyde and ozone removal.

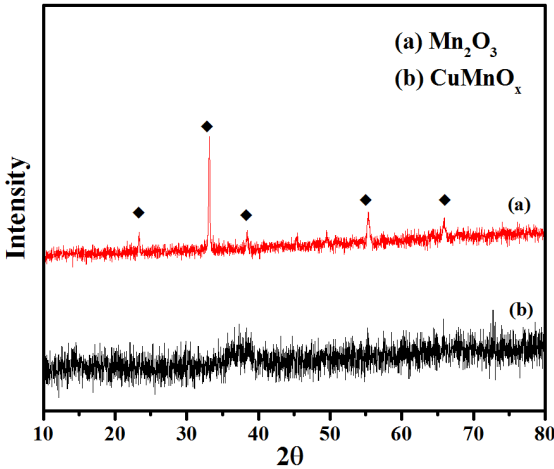


Figure 2. XRD profile of Mn-based catalyst.

으며, 구리망간 합금 촉매는 Mn의 함량 54.3%, Cu는 39.1 wt%이었다.  $Mn_2O_3$ 과  $CuMnO_x$  촉매의 비표면적은 각각  $< 10 \text{ m}^2/\text{g}$ ,  $158 \text{ m}^2/\text{g}$ 이었다.

촉매의 결정 구조를 규명하기 위한 Figure 2의 XRD 분석결과,  $MnCO_3$  형태의 원료에 바인더를 혼합하여 제조한 촉매는  $Mn_2O_3$  결정 구조를 지니고 있었다. 망간촉매의 경우  $MnO_2$ ,  $Mn_2O_3$  형태 모두 저온에서 유기화합물과 오존을 분해하는 성능을 나타내지만, 수분이 있는 조건에서는  $Mn_2O_3$ 가 성능이 우수한 것으로 알려져 있어, 습식 플라즈마 집진기 후단의 배기가스에 적용하기 위한 구조로  $Mn_2O_3$ 가 적합할 것이라 판단하였다. 그리고 공침을 통해 제조한  $CuMnO_x$  촉매의 경우 비정질 구조로, 결정성이 나타나지 않았다. 이는 소성온도가  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 비교적 낮아 비정질 구조를 보이는 것으로 판단되어[15], 촉매 표면의 Mn과 Cu의 산화 상태 및 결정 구조를 판단하기 위해 XPS spectra 분석을 수행하였고, Figure 3에 Mn 2p, Cu 2p 스펙트럼을 나타내었다.

Mn은 결합에너지 641.7 eV 위치의 Mn(IV) peak가 보여 Mn의 산화 상태가 비화학양론적 산화종인  $Mn^{4+}$  형태로 존재하는 것을 알 수 있었다[13,16]. 또한 Cu는 932.5 eV의 Cu(I) peak로 1가의 산화상태로 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 구조는 오존의 분해 성능 결과와 일치하는 것으로, 오존 분해능은 p-type 산화물을 적용하였을 때 성능이 향상되었으며, 그중  $MnO_2$ 의 결정일 때 매우 우수한 것으로 보고된 바 있다[17]. 본 연구에서 제조한  $CuMnO_x$  촉매 또한 XPS 결과를 통해 p-type의  $MnO_2$  및  $Cu_2O$  형태로 존재하여 비교적 저온에서도 오존 분해 성능이 높을 것이라 판단하였다.

Figure 4는 2종의 촉매상에서 아세트알데히드와 오존의 제거 성능

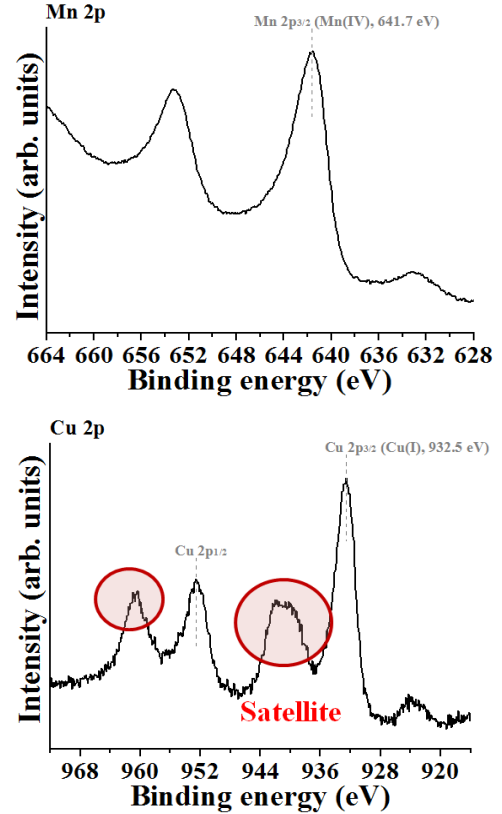


Figure 3. Mn  $2p_{3/2}$ , Cu  $2p_{1/2}$  core level XPS spectra of  $CuMnO_x$  catalyst.

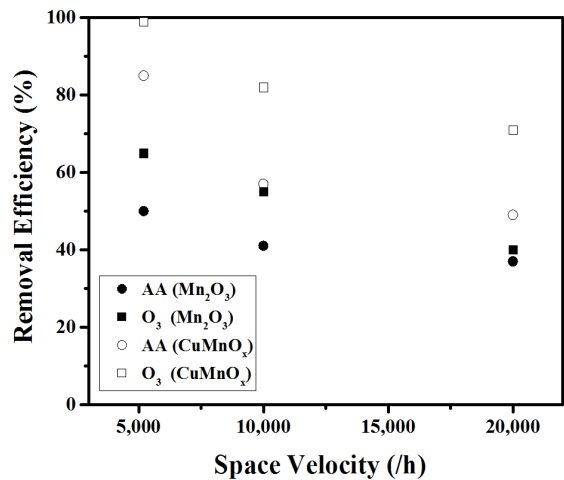


Figure 4. Acetaldehyde and ozone removal efficiency over Mn oxide based catalysts at  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

을 나타낸 그래프이다. 공간속도  $5,000 \text{ h}^{-1}$ , 반응온도  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 인 조건에서  $CuMnO_x$  촉매의 경우 오존은 99% 이상 제거되었으며, 아세트알데히드는 약 85%의 저감율을 보였다. 동일한 조건에서  $Mn_2O_3$  촉매는 오존 65%, 아세트알데히드 50%의 저감율을 나타내,  $CuMnO_x$  촉매의 성능이 상대적으로 더 우수한 것으로 나타났다. 공간속도의 증가에 따라 촉매 표면 반응 후 제거되는 오존과 아세트알데히드의 양이 감소되었는데,  $20,000 \text{ h}^{-1}$ 의 조건에서  $CuMnO_x$ 는 오존 약 71%, 아세트알데히드 약 49%의 성능을 보였으며,  $Mn_2O_3$ 는 오존과 아세트알데히

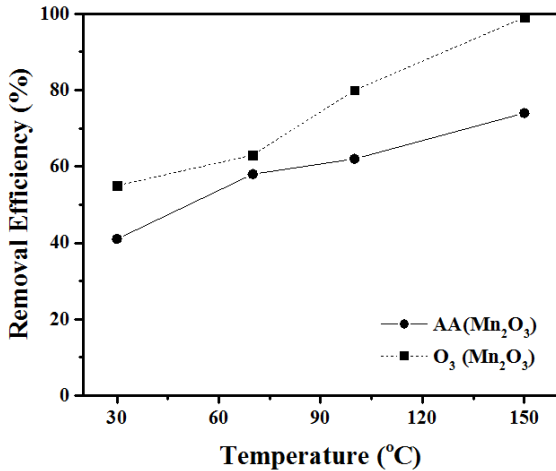


Figure 5. Acetaldehyde and ozone removal efficiency over Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst at space velocity 10,000 h<sup>-1</sup>, as a function of reaction temperature.

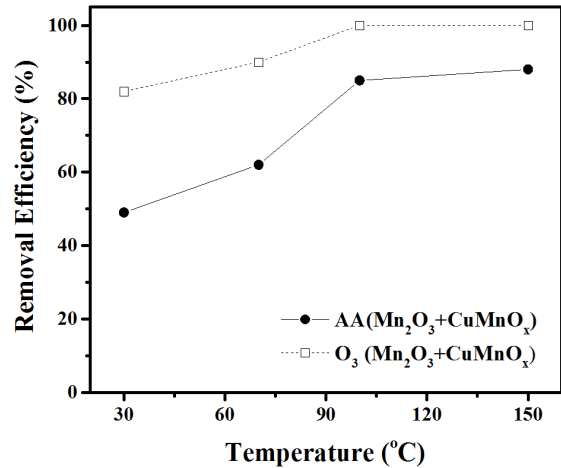


Figure 7. Acetaldehyde and ozone removal efficiency over Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CuMnO<sub>x</sub> catalysts at space velocity 10,000 h<sup>-1</sup>, as a function of reaction temperature.

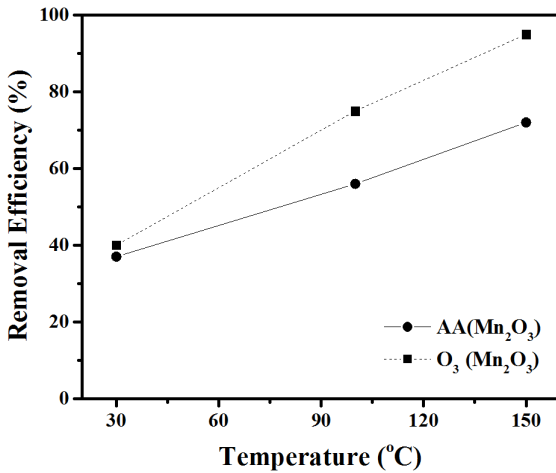


Figure 6. Acetaldehyde and ozone removal efficiency over Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst at space velocity 20,000 h<sup>-1</sup>, as a function of reaction temperature.

드 각각 약 40, 37%의 효율을 나타내었다. 공간속도 차이에 의한 성능을 비교해보았을 때, 5,000 h<sup>-1</sup>과 20,000 h<sup>-1</sup>의 조건에서 CuMnO<sub>x</sub>의 경우 아세트알데히드의 저감율이 85%에서 49%로, 약 36%의 큰 폭으로 효율이 감소되는 반면, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매의 경우 49%에서 37%로 약 10% 내외의 효율 변화가 있는 것으로 보아, 촉매 표면의 흡착 특성이 성능을 좌우하는 것으로 사료되었다.

이에 촉매의 단위 비표면적 당 아세트알데히드에 대한 흡착 및 반응성이 우수한 촉매는 Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>라고 판단되어 Figure 4의 결과와 같이 잔존하는 미반응 O<sub>3</sub>를 충분히 활용하여 Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매상에서 아세트알데히드의 저감율을 높일 수 있는 촉매 설계 및 운전조건을 도출하고자 하였다.

공간속도 10,000 h<sup>-1</sup>인 조건에서 반응온도를 30, 70, 100, 150 °C으로 각각 변화시켜 Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매의 성능을 평가하였다. Figure 5를 보면, 온도 증가에 따라 성능이 증가되며, 오존의 경우 150 °C에서는 100% 제거되는 것을 볼 수 있다. 이는 온도가 증가함에 따라 촉매 표면에서의 분해속도가 증가하기 때문인 것으로 판단되며, 아세트알데히드와

의 반응성을 증가시키고 에너지 비용의 상대적 절감이 가능한 100 °C 조건에서는 오존 약 80%, 아세트알데히드 약 62%의 제거효율을 나타내었다. 또한 Figure 6의 공간속도 20,000 h<sup>-1</sup>, 반응온도 100 °C에서는 이보다 낮은 저감율인 오존 75%, 아세트알데히드 56%의 저감율을 보이는 것으로 나타나, 본 연구에서 제조한 Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매 단독으로는 상기 조건에서 오존과 아세트알데히드 모두 제거가 가능한 bifunctional한 효과를 기대하는 것이 용이하지 않은 것으로 판단되었다. Mn-Cu 촉매의 경우 아세트알데히드의 제거율이 120 °C에서는 약 61% 내외인 것으로 보고된 바 있고[14], 특히 오존 제거 성능이 높은 것으로 판단되어 1단의 Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매 상에서 1차적으로 오존과 아세트알데히드를 반응시켜 제거하며 2단의 CuMnO<sub>x</sub> 촉매를 추가로 구성하여 잔여 오존의 제거 및 아세트알데히드를 동시에 제거하고자 하였다.

공간속도 10,000 h<sup>-1</sup>, 반응온도 100 °C의 동일한 조건에서 Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 CuMnO<sub>x</sub> 촉매를 다단으로 구성하여 성능을 평가하였다. 먼저 Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매와 반응 후 CuMnO<sub>x</sub> 촉매층을 지날 수 있도록 반응기를 구성하였으며, 각각의 촉매의 부피를 1/2로 감소시켜 공간속도를 10,000 h<sup>-1</sup>으로 동일하게 제어하였다.

Figure 7의 실험결과, 기존 결과와 같이 반응온도 증가에 따라 성능이 증가되며, 100 °C 조건에서는 오존 100%, 아세트알데히드 약 85% 이상의 제거효율을 나타내, 1단계에서 제거되지 않은 오존과 아세트알데히드를 2단계의 CuMnO<sub>x</sub> 촉매 상에서 효과적으로 제거할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 망간산화물 기반 촉매를 제조하여 직화구이 음식점의 입자성 물질 및 악취물질 처리를 위한 습식 플라즈마 집진시설 후단에서 배출되는 오존과 아세트알데히드를 동시에 저감시킬 수 있는 공정을 개발하고자 하였다.

Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 CuMnO<sub>x</sub> 촉매를 1, 2단으로 두어 반응시켰을 때 공간속도 10,000 h<sup>-1</sup> 및 반응온도 100 °C인 조건에서 아세트알데히드 85%, 오존 100%의 제거효율을 나타내었다. 1단의 Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매상에서 미반응된 오존과 아세트알데히드를 2단의 CuMnO<sub>x</sub> 촉매를 거치며 효과적으로 제거할 수 있었다.

습식 플라즈마 전기집진방법을 적용할 경우 필연적으로 오존이 발생되기 때문에 이를 활용하면 집진공정에서 제거되지 않는 아세트알데히드를 효과적으로 저감할 수 있으며, 본 연구에서 제조한  $Mn_2O_3$  촉매의 비표면적을 향상시킬 경우 아세트알데히드의 제거율이 크게 증가할 것으로 예측된다. 이는 곧 악취물질 배출로 인해 민원 발생이 잦은 직화구이 음식점의 대안 기술이 될 수 있다.

## 감 사

이 연구는 2016년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(과제번호 '10050851').

## References

1. D. W. Hong, S. J. Kim, D. H. Moon, C. H. Joo, and J. P. Lee, Emission characteristics of odor compounds from a livestock wastewater treatment process. *J. Korean Soc. Odor Res. Eng.*, **6**(1), 1-9 (2007).
2. Y. M. Cho, Y. J. Choi, and M. J. Hong, *Study on the Management of Odor Emission in Seoul*, Research Report 2013-PR-76, The Seoul Institute, Seoul (2014).
3. J. Chaichanawong, W. Tanthapanichakoon, T. Chariinpanitkul, A. Eiad-ua, N. Sano, and H. Tamon, High-temperature simultaneous removal of acetaldehyde and ammonia gases using corona discharge, *Sci. Tech. Adv. Mater.*, **6**, 319-324 (2005).
4. H. H. Kim, I. Yamamoto, K. Takashima, S. Katsura, and A. Mizuno, Incinerator flue gas cleaning using wet-type electrostatic precipitator, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **33**(4), 669-674 (2000).
5. J. V. Durme, J. Dewulf, K. Demeestere, C. Leys, and H. V. Langenhove, Post-plasma catalytic technology for the removal of toluene from indoor air: Effect of humidity, *Appl. Catal. B*, **87**, 78-83 (2009).
6. J. Van Durme, J. Dewulf, C. Leys, and H. V. Langenhove, Combining non-thermal plasma with heterogeneous catalysis in waste gas treatment: A review, *Appl. Catal. B*, **78**, 324-333 (2008).
7. S. H. Park, J. K. Jeon, S. C. Kim, S. C. Jung, and Y. K. Park, Recent trends on catalytic oxidation of benzene without or with ozone over Mn-based catalysts, *Appl. Chem. Eng.*, **25**(3), 237-241 (2014).
8. B. A. Tichenor and M. A. Palazzolo, Destruction of volatile organic compounds via catalytic incineration, *Environ. Prog.*, **6**(3), 172-176 (1987).
9. H. Einaga and S. Futamura, Catalytic oxidation of benzene with ozone over Mn ion-exchanged zeolites, *Catal. Commun.*, **8**, 557-560 (2007).
10. H. Einaga and A. Ogata, Benzene oxidation with ozone over supported manganese oxide catalysts: Effect of catalyst support and reaction conditions, *J. Hazard. Mater.*, **164**, 1236-1241 (2009).
11. D.-Z. Zhao, C. Shi, X.-S. Lin, A.-M. Zhu, and B. W.-L. Jang, Enhanced effect of water vapor on complete oxidation of formaldehyde in air with ozone over  $MnO_x$  catalysts at room temperature, *J. Hazard. Mater.*, **239-240**, 362-369 (2012).
12. F. C. Buciuman, F. Patcas, and T. Hahn, A spillover approach to oxidation catalysis over copper and manganese mixed oxides, *Chem. Eng. Processes.*, **38**, 563-569 (1999).
13. M. Kang, E. D. Park, J. M. Kim, and J. E. Yie, Cu-Mn mixed oxides for low temperature NO reduction with  $NH_3$ , *Catal. Today*, **111**, 236-241 (2006).
14. S. C. Jung and S. H. Lee, Practical application of Mn-Cu metal catalyst for the removal of acetaldehyde, *Digit. Policy Res.*, **10**(8), 201-210 (2012).
15. H. H. Lee, K. H. Park, and 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).
16. J. Papavasiliou, G. Avgouropoulos, and T. Ioannides, Combined steam reforming of methanol over Cu-Mn spinel oxide catalysts, *J. Catal.*, **251**, 7-20 (2007).
17. F. Kapteijn, L. Singoredjo, M. Vandriel, A. Andreini, J. A. Moulijn, G. Ramis, and G. Busca, Alumina-supported manganese oxide catalysts: II. Surface characterization and adsorption of ammonia and nitric oxide, *J. Catal.*, **150**(1), 105-116 (1994).