

촉매-플라즈마 반응 시스템을 이용한 황화수소의 처리특성 연구

Characteristics of Hydrogen Sulfide Removal by a Catalyst-assisted Plasma System

이정근 · 김혁규 · 봉춘근¹⁾ · 박성진¹⁾ · 이명화²⁾ · 황의현³⁾ · 김종호*

한서대학교 환경공학과, ¹⁾(주)그린솔루스

²⁾한국생산기술연구원 에너지시스템연구그룹, ³⁾경북도립대학 토목과

(2011년 6월 9일 접수, 2011년 7월 11일 수정, 2011년 7월 28일 채택)

Jeong-Keun Lee, Hyeok-Gyu Kim, Choon-Keun Bong¹⁾, Seong-Jin Park¹⁾,

Myong-Hwa Lee²⁾, Ui-Hyun Hwang³⁾ and Jong-Ho Kim*

Department of Environmental Engineering, Hanseo University

¹⁾Green Solus, Ltd.

²⁾Energy System R & D Group, Korea Institute of Industrial Technology

³⁾Department of Civil Engineering, Gyeongbuk Provincial College

(Received 9 June 2011, revised 11 July 2011, accepted 28 July 2011)

Abstract

Catalyst-assisted plasma system with a DBD (Dielectric Barrier Discharge) reactor was used to remove hydrogen sulfide, which is one of the odorous species in this study. The γ -Al₂O₃ and β -Zeolite catalysts impregnated by Ag, Cu and Mn species were employed as catalysts and their H₂S removal characteristics under plasma irradiation were investigated. From the experimental study, we found that the H₂S removal efficiency increases with decreasing space velocity in the system and increasing specific input energy. Furthermore, β -Zeolite catalysts are efficient to remove H₂S than γ -Al₂O₃ catalysts. Especially, the catalysts impregnated by Ag have higher removal efficiency than other catalysts (Cu, Mn).

Key words : Hydrogen sulfide, Plasma, Catalyst, Specific input energy, Space velocity

1. 서 론

대기오염물질중 암모니아, 아민류, 황화수소, 알데하이드류, 메틸머캅탄 등 자극성이 강한 기체상의 물

질은 사람의 후각을 자극하여 불쾌감을 주거나, 인체에 직접적으로 피해를 준다. 최근 들어 이러한 악취 물질이 생활주변에서 많이 발생되어 문제가 되고 있다(Cho and Park, 2009; Lee and Kang, 2007; Jeon *et al.*, 2006; Song *et al.*, 2004). 특히, 수도원은 인구밀집으로 인해 도시중심의 식당가, 아파트 하수관로 등에서 악취가 발생하여 주변의 생활환경에 악영향을 미치고 있다. 이러한 환경 문제들을 제어하기 위해서는

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)41-660-1431, E-mail : kimjh@hanseo.ac.kr

효율적인 악취 처리 방법에 대한 연구가 필요하다.

악취물질을 처리하는 일반적인 방법으로는 활성탄 흡착법, 약액세정, 연소 등의 물리화학적 처리와 토양 탈취 등의 생물학적 처리가 있다. 물리화학적 처리방식은 악취의 부하변동에 대응하기 쉽다는 장점이 있으나, 경제적인 측면에서 불리하며, 생물학적 탈취방법인 토양탈취는 설치면적 및 압력 손실로 인한 동력비용이 크고, 대용량 처리가 어렵다는 문제점이 있다(Park *et al.*, 2003; Lee, 2001).

최근에는 플라즈마 기술이 악취처리에 이용되고 있으며(Hwang *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2006; Cheon *et al.*, 2005; Masuda *et al.*, 1993), 특히 저온 플라즈마 반응 시스템은 전자충격이나 이온화를 통해 플라즈마를 발생시키기 때문에 오존과 산화성 라디칼(O, OH, HO₂ 등)이 많이 생성되어서 낮은 이온화 전위 분자들과 쉽게 반응하는 특성이 있다(Kim, 2000; Penetrante *et al.*, 1996). 또한 상온 대기압 조건에서 운전이 가능하며, 반응 활성이 높은 자유라디칼(free radicals) 종들을 이용하기 때문에 짧은 체류시간으로 처리가 가능해 장치를 소형화할 수 있는 장점이 있다(Park *et al.*, 2005). 그 뿐만 아니라 악취제거에 촉매를 추가할 수 있는데, 이는 여러 반응경로 중에서 원하는 물질의 활성화에 에너지를 낮춤으로서 반응을 선택적으로 제어할 수 있다. 촉매는 담지되는 지지체의 종류와 전이금속의 종류에 따라 촉매의 기능과 성능이 달라진다(Kim and Park, 2007; Mok *et al.*,

2003). 아울러 이러한 촉매와 플라즈마를 결합하여 주로 벤젠, 톨루엔 같은 휘발성 악취물질을 제어하는 연구가 보고되고 있다(Holzer *et al.*, 2002; Ogata *et al.*, 2001; Francke *et al.*, 2000).

본 연구에서는 아파트 정화조와 하수관로에서 발생하는 대표적인 악취물질인 황화수소를 촉매-플라즈마 반응시스템을 이용하여 처리하고자 하였다. 그 중에서도 최적의 담지체와 전이금속 촉매에 대한 물성을 파악하고, 촉매의 종류별로 비투입에너지(Specific input energy), 공간속도(Space velocity) 변화에 따른 처리효율을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치의 구성

본 연구에서 사용된 실험장치의 구성은 그림 1과 같으며 황화수소 가스 발생장치, 촉매-플라즈마장치, 반응 전후의 가스 측정장치로 구성되어 있다. 시료가스는 가스발생장치에서 가스상태로 유입되어 질량유량조절기(MFC)에서 주입량이 조절되며, 챔버에서 희석되어 약 5 ppm의 농도를 유지하도록 하였다.

촉매-플라즈마 장치는 촉매 부분이 플라즈마 발생 영역에 위치되어 있는 1단 형태의 DBD(Dielectric-Barrier Discharge) 반응기로 제작하였다. 촉매는 γ -Al₂O₃, β -제올라이트에 Ag, Cu, Mn을 함침시켜 일정

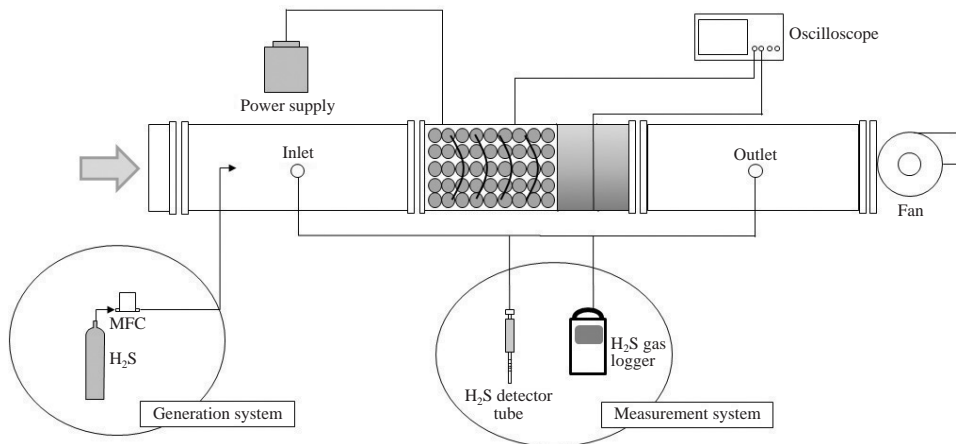


Fig. 1. Experimental setup to remove H₂S using a catalyst-assisted plasma process.

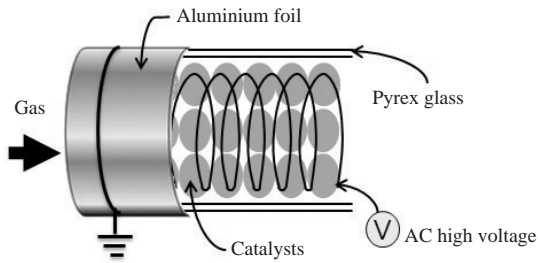


Fig. 2. Internal structure of a discharge tube.

한 중량비를 갖도록 제조하였다. 그림 2에 나타난 DBD 반응기는 유전체로 내부직경 46 mm, 길이 120 mm의 Pyrex관으로 제작하였다. 내부에는 직경 1 mm의 텅스텐 와이어를 삽입하여 방전전극으로 사용하였다. 플라즈마를 발생시키기 위한 전원공급장치는 360 W급 고전압 교류(AC) 전력공급장치(인가전압: 0~18 kV, 주파수: 60 Hz)를 사용하였다.

황화수소 측정에는 초단위로 농도를 측정할 수 있는 미국 APP-Tek사의 Odalog L2 H2S-50을 사용하였으며, 표준가스(H₂S 31.6 ppm)를 이용하여 수시로 기기의 보정을 하였다.

교류전압의 측정은 전원 장치에 연결된 고전압 프로브(Tektronix, P6015A, USA)를 디지털 오실로스코프(Tektronix, TDS2014B, USA)에 연결하여 그 파형을 측정하였다.

저온플라즈마에 사용되는 에너지는 적산전력계를 이용하여 측정하였으며, 비투입에너지(SIE)로 환산하여 나타내었다. 비투입에너지는 처리 가스 유량에 대한 투입 전력의 비로 다음과 같이 정의하였다(Yamamoto, 1997).

$$SIE (Wh/m^3) = \frac{\text{Discharge power (W)}}{\text{Gas flow rate (m}^3/\text{hr)}}$$

2. 2 촉매제조

담지체로는 직경 3~4 mm의 구형 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (414069, Sigma-Aldrich, USA)와 β -제올라이트(H형, Cosmo chemical, Korea)를 사용하였으며, 0.5 M 염산용액에 약 1시간 세정하고, 2차 증류수로 다시 세척하였다. 약 450°C의 공기분위기에서 4시간 동안 소성하여 불순물 제거 및 활성화 처리를 하였다. 담지체 단위 질량에 대하여 전이금속(Ag, Cu, Mn)의 함침함량을 5wt%로 하기 위하여 일정량의 전이금속 전구체

Table 1. Experimental conditions for H₂S removal.

| Items | Values and materials |
|--|--|
| Inlet concentration of H ₂ S (ppm) | 5 |
| Space velocity (hr ⁻¹) | 30,000~90,000 |
| Specific input energy (Wh/m ³) | 0.15~1.8 |
| Specific Surface Area | Ag/Cu/Mn $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, Ag/Cu/Mn $\beta\text{-Zeolite}$ |
| Support media | $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\beta\text{-Zeolite}$ |
| Transition Metals | Ag, Cu, Mn |
| Catalyst (support media+ transition metal) weight (g) | 40~100 |

(AgNO₃, CuNO₃, MnCl₂)를 증류수에 분산시키고, 그 용액을 활성담지체에 투입하여 상온에서 30분간 교반한 후 50°C의 진공회전증발기에서 2시간 증발시켰다. 건조된 촉매를 유리병에 넣고 입구를 알루미늄 호일로 덮어 약 105°C에서 24시간 건조하고, 제조된 촉매를 500°C 공기분위기에서 약 19시간 소성하였다.

제조된 촉매의 물리적 특성은 BET (BELSORP-mini II, BEL, Japan)를 이용하여 비표면적을 측정하였으며, SEM (JEOL, JSM-5600, Japan), EDX (Noran, Noran SII-1609, USA)로 표면형상과 성분분석을 하였다.

2. 3 실험방법

민원이 발생하는 아파트 단지 인근 하수관로 및 단독정화조의 일반적인 황화수소 농도인 5 ppm을 촉매-플라즈마 반응 장치를 이용하여 처리하였다(Jeon *et al.*, 2006). 준비된 각 촉매에 대하여 공간속도, 비투입에너지를 변화시켜가면서 연속실험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 촉매의 특성분석

그림 3은 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, β -제올라이트 담지체에 전이금속인 Ag, Cu, Mn을 각각 함침한 촉매의 미세구조를 나타낸 전자현미경사진이다. 담지체의 결정상의 모양은 거의 비슷하지만, 전이 금속의 종류에 따라 공극이 달라진 것을 볼 수 있다. 이것은 담지체의 기본구조에 변화가 생긴 것이라기보다는 전이금속이 함침되면서 공극구조에 영향을 미친 것으로 판단된다. Park *et al.* (2003)은 이러한 공극구조의 변화가 악취 제거 효율에 영향을 미친다고 보고하였다.

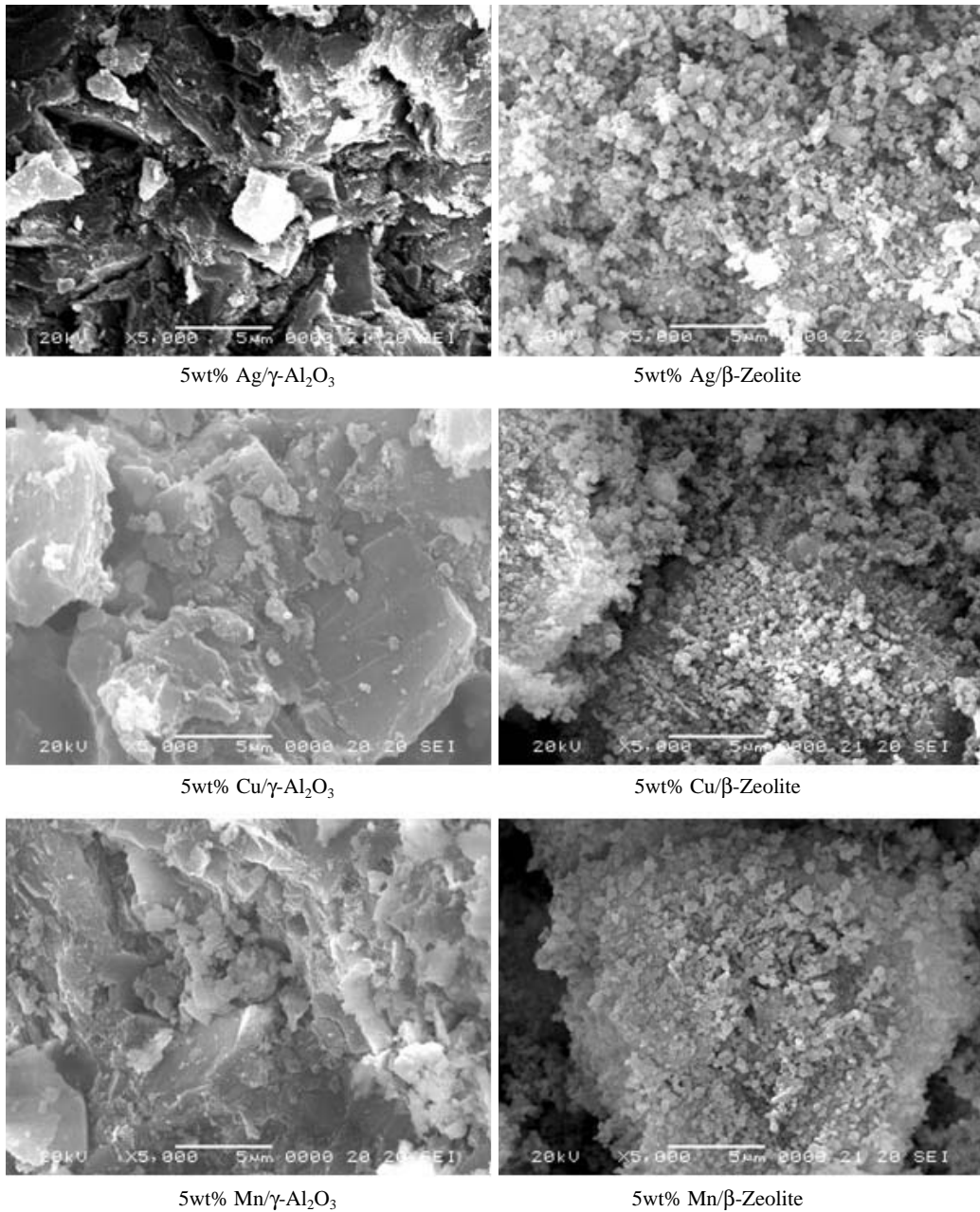


Fig. 3. SEM images of various catalysts (Magnification: $\times 5,000$).

표 2는 제조한 촉매의 비표면적(BET) 값을 나타낸 것이다. γ -Al₂O₃와 β -제올라이트의 비표면적은 각각 315 m²/g, 550 m²/g (제조업체 제시)이다. 함침한 전이금속인 Ag, Cu, Mn별로는 각각 291, 208, 200

m²/g을 나타냈었고, β -제올라이트에 전이금속을 함침한 경우에는 Ag, Cu, Mn별로 각각 480, 462, 403 m²/g로 나타났다. 함침된 금속에 의해 비표면적이 감소되었음을 알수 있으며, 함침한 금속성분 중 Ag를

함침한 촉매의 비표면적이 가장 크게 나타났는데, 이는 Ag가 다른 금속에 비해 이온교환성이 좋아 담지체 표면에서 다른 금속성분 보다 잘 분산이 되어 비표면적이 큰 것으로 판단된다(Jung *et al.*, 2001).

제조된 촉매의 표면성분을 알아보기 위해 EDX를 분석하였고 그 결과를 그림 4에 나타내었다. γ - Al_2O_3 는 주성분인 Al, O가 가장 큰 피크치로 관찰되었고, β -제올라이트는 150 SiO_2 : 1 Al_2O_3 의 몰 구성비로 이루어진 NH_4 형 담지체를 사용하여 주성분 Si, O, Al

이 큰 피크치로 관찰되었다. 또한 함침물질로 사용한 전이금속인 Ag, Cu, Mn의 성분도 관찰되었다.

3. 2 황화수소의 처리효율

촉매와 플라즈마를 동시에 사용하여 황화수소를 제거할 경우, 흡착과 플라즈마에 의한 제거가 동시에 이루어지게 된다. 반응 초기에는 황화수소가 흡착되기 때문에, 반응기 출구에서 농도가 낮아 플라즈마의 영향을 파악하기 어렵다. 본 연구에서는 촉매-플라즈마만의 효과를 나타내기 위하여 약 20분 동안 황화수소를 흡착시킨 후에 실험을 수행하였다.

그림 5에 촉매(Ag/ β -제올라이트)-플라즈마 반응기 출구에서의 시간에 따른 황화수소 농도변화와 그 생성물인 이산화황의 농도변화를 나타내었다. 5 ppm의 황화수소가 반응기에 유입되어 초기에는 촉매에 의해 흡착이 이루어지다가 20분 정도가 경과되면 과과 되어 출구농도가 인입농도와 같아짐을 알 수 있으며,

Table 2. Specific surface areas of the catalysts.

| Catalyst | BET surface area (m ² /g) |
|--------------------------|--------------------------------------|
| Ag/ γ - Al_2O_3 | 291 |
| Cu/ γ - Al_2O_3 | 208 |
| Mn/ γ - Al_2O_3 | 200 |
| Ag/ β -Zeolite | 480 |
| Cu/ β -Zeolite | 462 |
| Mn/ β -Zeolite | 403 |

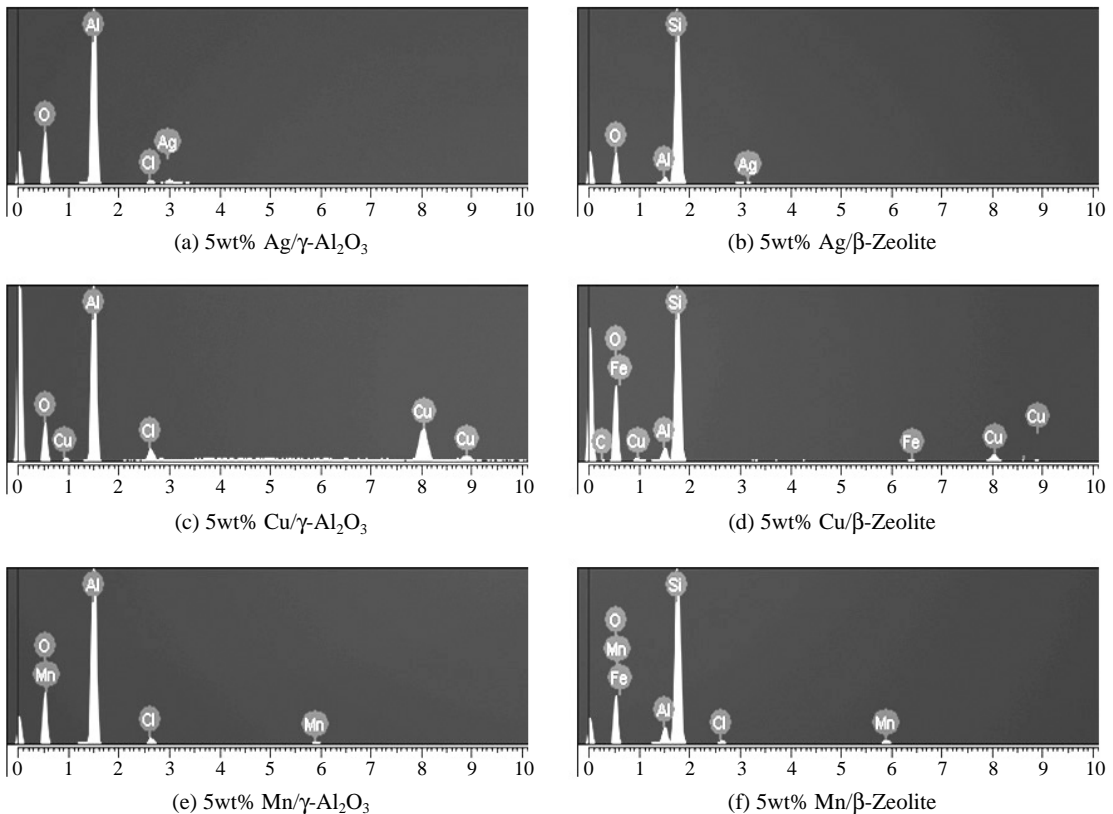


Fig. 4. Qualitative analysis of prepared catalysts by an energy dispersive X-ray spectrometer.

20분이 경과한 후 플라즈마를 구동시키면, 촉매-플라즈마 반응에 의해 황화수소의 농도가 급격히 감소하고, 이산화황의 농도가 급격히 증가함을 알 수 있다.

황화수소를 처리하기 위해서 사용한 본 연구의 촉매-플라즈마 방법이 비록 이산화황을 생성시키게 되지만, 황화수소보다 이산화황이 물에 용해성이 크기 때문에 후단에 습식 스크리버를 설치함으로써 보다 쉽게 제거할 수 있는 장점이 있다.

그림 6은 상온에서 단일 플라즈마 반응, 담지체-플라즈마 반응, 촉매-플라즈마 반응별로 황화수소의 제거효율을 나타낸 것이다. 촉매-플라즈마 반응이 단일

플라즈마 반응보다 처리효율이 현저히 높게 나타나고 있다. Moon (2003)은 플라즈마에 의해 발생된 활성분자와 라디칼이 촉매의 활성화에 큰 영향을 준다고 보고하였으며, 촉매와 플라즈마의 반응시스템이 황화수소를 처리하는 데 있어 효과적이다.

β -제올라이트가 γ - Al_2O_3 를 사용했을 때보다 황화수소 제거효율이 더 높은 것을 나타내는데, 이는 제올라이트가 γ - Al_2O_3 보다 큰 표면적을 가져 황화수소를 처리하는 데 있어 활성라디칼을 쉽게 흡착하여 산화시키기 때문인 것으로 판단된다.

또한 금속촉매의 종류에 따라 제거효율이 달라진다는 것을 알 수 있는데, 두 담지체 모두 Ag가 높은 효율을 나타내고 있으며, Mn, Cu의 순으로 나타났다. Kim *et al.* (2009)은 금속촉매의 플라즈마 발생영역을 ICCD 카메라를 통하여 관찰하고, Ag가 Cu보다 플라즈마 발생영역이 우수하기 때문에 뛰어난 촉매활성 특성을 가진다고 보고하였다. 또한 Mn과 Cu의 비교 시 Mn이 좋은 효율을 보이고 있는데, 이는 Mn계열 촉매가 산소를 저장하는 능력이 우수하여 산화기에 따른 활성이 크기 때문에 좋은 효율을 나타내고 있다 (Jang *et al.*, 2008; Stobbe *et al.*, 1999).

반응물의 전환율은 촉매층에서의 체류시간에 따라 영향을 받게 되는데, 체류시간은 촉매의 양과 유속의 함수이고, 체류시간의 역수인 공간속도가 촉매층에서 반응물의 체류시간을 설명하는데 주로 사용된다 (Lee *et al.*, 2001).

가장 높은 H_2S 제거효율을 보인 5wt% Ag/ β -제올

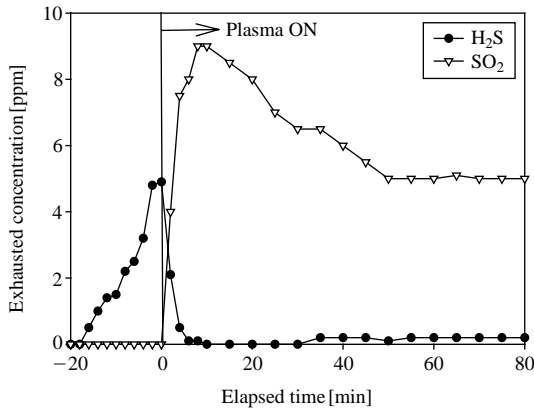


Fig. 5. Exhausted gas concentrations of H_2S and SO_2 over time (catalyst: Ag/ β -zeolite, space velocity: 60000 hr^{-1} , SIE: 1.2 Wh/m^3)

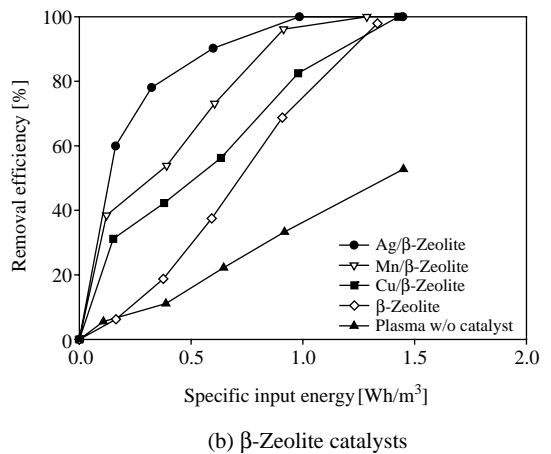
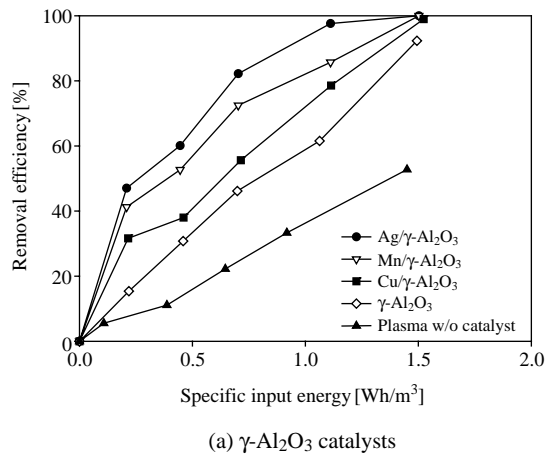


Fig. 6. H_2S removal efficiency as a function of specific input energy (space velocity: 60000 hr^{-1}).

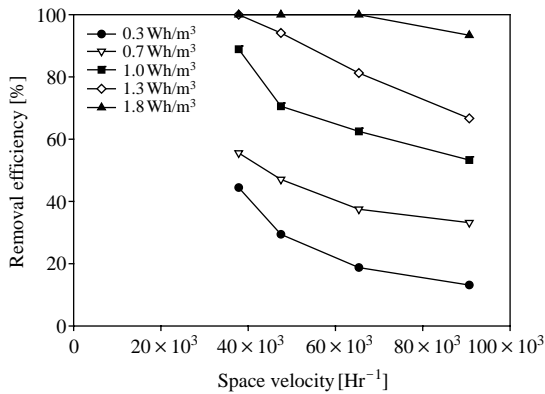


Fig. 7. Change in H₂S removal efficiency by space velocity and specific input energy.

라이트 촉매에 대하여 그 활성과 공간속도와의 관계를 알아보기 위해 유량을 일정하게 한 상태에서 촉매의 양을 변화시켜, 공간속도를 35000, 45000, 65000, 90000 hr⁻¹로 설정한 후 처리효율을 측정하는 것을 그림 7에 나타내었다. 실험결과, 촉매의 양이 증가함에 따라 황화수소의 처리가 활발히 진행되며, 공간속도가 적을수록 촉매의 효율이 증가되는 것으로 나타났다.

또한 각 촉매별로 5단계의 투입 에너지를 변화시켰는데, 이는 인가전압이 7.5, 9.5, 11, 13, 14.5 kV일 때의 값이다. 플라즈마 반응기에서 전극간의 거리 1.1 cm를 고려한 전기장의 세기로 표현하면, 각각 6.8, 8.6, 10, 11.8, 13.2 kV/cm가 되는데 전기장의 세기가 증가함에 따라 기체분자가 보다 쉽게 활성화 및 이온화되어 황화수소처리에 영향을 주는 것으로 사료된다(Mok et al., 2003). 그러므로 공간속도가 높아도, 비투입 에너지를 적절히 조절하면 원하는 효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

촉매-플라즈마장치를 이용하여 악취물질인 황화수소를 처리하는 데 있어서 촉매종류에 따른 플라즈마 비투입에너지 및 공간속도가 처리효율에 미치는 영향을 검토하였다.

단일 플라즈마 반응보다 촉매-플라즈마반응에 의한 황화수소 처리효율이 좋은 것으로 나타났으며, 이

는 촉매와 플라즈마 반응간의 시너지효과라 판단된다.

또한 촉매 중에서는 β-제올라이트가 γ-Al₂O₃보다 높은 처리효율을 나타냈으며, 함침된 전이금속에 따른 처리효율은 Ag, Mn, Cu 순으로 나타났다. 아울러 공간속도가 적을수록 처리효율은 높은 일반적인 특성을 나타냈다.

플라즈마반응의 비투입에너지가 높아질수록 제거 효율도 높게 나타냈는데, 공간속도와 비투입에너지를 조절하면 원하는 처리효율을 효과적으로 달성할 수 있으리라 판단된다.

대부분의 악취발생원은 처리시설을 설치할 공간이 충분하지 못한 경우가 대부분인데, 촉매-플라즈마 반응시스템은 비투입에너지를 크게하여 짧은 체류시간에 악취를 효과적으로 처리할 수 있는 실용화 가능성이 높은 처리방법이라 할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업(031-091-015)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Cheon, T.J., S.W. Choi, and C.S. Lee (2005) Decomposition of toluene over transition metal oxide catalysts, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 27(6), 651-656. (in Korean with English abstract)

Cho, E.S. and Y.-S. Park (2009) Adsorption characteristics of H₂S on adsorbent made by sewage sludge, Odor Research and Engineering, 8(2), 78-84. (in Korean with English abstract)

Holzer, F., U. Roland, and F.-D. Kopinke (2002) Combination of non-thermal plasma and heterogenous catalysis for oxidation of volatile organic compounds: 1, Applied Catalysis B: Environmental, 38(3), 163-181.

Hwang, H.J., H.-Y. Ann, S.-K. Shin, and J.-H. Song (2010) Application of non-thermal plasma for the simultaneous removal of odor and sludge, Journal of Korean Society of Water and Wastewater, 24(1), 85-92. (in Korean with English abstract)

- Francke, K.P., H. Miessner, and R. Rudolph (2000) Cleaning of air streams from organic pollutants by plasma-catalytic oxidation, *Plasma Chem. Plasma Process.*, 20(3), 393-403.
- Jang, H.T., Y.K. Park, Y.S. Ko, and W.S. Cha (2008) Selective catalytic oxidation of ammonia in the presence of manganese catalysts, *Korean Chem. Eng. Res.*, 46(3), 498-505. (in Korean with English abstract)
- Jeon, E.C., J.H. Sa, S.T. Kim, J.H. Hong, and K.H. Kim (2006) Odorous emissions from household-related sources: a case study on a sewage treatment plant, *Journal of Korean Society Atmospheric Environment*, 22(3), 337-351. (in Korean with English abstract)
- Jung, S.H., B.R. Kim, G.H. Kum, Y.G. Seo, and J.H. Ahn (2001) A study on the ion-exchange characteristics of zeolites (4A, 13X), *Journal of Institute of Environmental Protection*, 9, 29-38. (in Korean with English abstract)
- Kim, B.S. and Y.-S. Park (2007) VOCs oxidation characteristics of transition metals/ γ - Al_2O_3 catalyst, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 29(4), 444-451. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.-H., A. Ogata, and S. Futamura (2006) Nonthermal plasma-driven catalysis of benzene and toluene, *Journal of Korean Society Atmospheric Environment*, 22(1), 43-51. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.H., J.H. Kim, and A. Ogata (2009) Interaction of nonthermal plasma with catalyst and its application to VOC decomposition, *Proceeding of the 49th Meeting of KOSAE, Korean Soc. Atmos. Environ.*, 587-588.
- Kim, S.T. (2000) A study on installation of treatment equipment of malodorous substances using the O_3 , *Korean J. Sanitation*, 15(3), 70-74. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.H. and S.H. Kang (2007) The foul smelling from sewer pipe near large apartment complexes and its countermeasures 1: characteristics of the foul-smelling sewer pipe in residential areas, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 21(5), 621-629. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.S. (2001) Removal technology of odors gases by surface discharge induced plasma, *Journal of Korean Society of Environmental Administration*, 7(1), 69-75. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.B., Y.S. Yoon, I.K. Hong, and J.D. Lee (2001) Kinetics prediction of binary aromatic solvent mixtures in catalytic oxidation process, *Korea J. Sanit.*, 16(1), 66-71. (in Korean with English abstract)
- Masuda, S., S. Hosokawa, X. Tu., M. Tsutsumi., T. Ohtani, T. Tsukahara, and N. Natsuda (1993) The performance of an integrated air purifier for control of aerosol microbial and odor, *IEEE Trans. Lnd Appl.*, 29(4), 774-780.
- Mok, Y.S., H.-C. Kang, H.-W. Lee, and I.-S. Nam. (2003) Effect of plasma discharge on selective catalytic reduction of nitrogen oxides, *Korean Chemical Engineering Research*, 41(2), 256-263. (in Korean with English abstract)
- Moon, S.I. (2003) A study on plasma/catalytic synergy effect for VOCs removal, *J. of KSEE*, 25(7), 810-815. (in Korean with English abstract)
- Ogata A., D. Ito, K. Mizuno, S. Jushiyama, and T. Yamamoto (2001) Removal of dilute benzene using a zeolite-hybrid plasma reactor, *IEEE Tran. Indust. Appl.* 37(4), 959-964.
- Park, J.O., K.-C. Dhoi, H.-H. Kim, A. Ogata, and S. Futamura (2005) Removal of styrene using different types of non-thermal plasma reactors, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 27(2), 215-223. (in Korean with English abstract)
- Park, Y.-G., S.-H. Kim, and J.-C. Ko (2003) Effects of alumina-biofilter for treatment of foul odor, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, 14(1), 109-112. (in Korean with English abstract)
- Penetrante, B.M., M.C. Hsiao, B.T. Merritt, G.E. Vogtlin, P.H. Wallman, M. Neiger, O. Wolf, T. Hammer, and S. Broer (1996) Pulsed corona and dielectric-barrier discharge processing of NO in N_2 , *Applied Physics Letters*, 68(26), 3719-3721.
- Song, B.J., J.-E. Jeong, S.-Y. Jeong, and J.-G. Won (2004) A study of odorous compounds in the food waste Treatment Processing, *J. Korean Society of Waste Management*, 21(2), 107-116. (in Korean with English abstract)
- Stobbe, E.R., B.A. de Boer, and J.W. Geus (1999) The reduction and oxidation behaviour of manganese oxides, *Catalysis Today*, 47(1-4), 161-167.
- Yamamoto, T. (1997) VOC decomposition by nonthermal plasma processing—a new approach, *Journal of Electrostatics*, 42(1-2), 227-238.