

ORIGINAL ARTICLE

악취물질인 유기산 제거를 위한 DBD 플라즈마 촉매 복합공정의 적용

홍은기 · 서정민¹⁾ · 최금찬*

동아대학교 환경공학과, ¹⁾부산대학교 바이오환경에너지학과

Application of DBD Plasma Catalysis Hybrid Process to remove Organic Acids in Odors

Eun-Gi Hong, Jeong-Min Suh¹⁾, Kum-Chan Choi*

Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

¹⁾Department of Bio-Environmental Energy, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea

Abstract

Odor control technology include absorption, adsorption, incineration and biological treatments. But, most of processes have some problems such as secondary organic acids discharge at the final odor treatment facility. In order to solve the problems for effective treatment of organic acids in odor, it is necessary to develop a new type advanced odor control technology. Some of the technology are plasma only process and plasma hybrid process as key process of the advanced technology. In this study, odor removal performance was compared DBD(Dielectric Barrier Discharge)plasma process with PCHP(plasma catalysis hybrid process) by gaseous ammonia, formaldehyde and acetic acid. Plasma only process by acetic acid obtained higher treatment efficiency above 90%, and PCHP reached its efficiency up to 96%. Acetic acid is relatively easy pollutant to control its concentration other than sulfur and nitrogen odor compounds, because it has tendency to react with water quickly. To test of the performance of DBD plasma process by applied voltage, the tests were conducted to find the dependence of experimental conditions of the applied voltage at 13 kV and 15 kV separately. With an applied voltage at 15 kV, the treatment efficiency was achieved to more higher than 13 kV from 83% to 99% on ammonia, formaldehyde and acetic acid. It seems to the odor treatment efficiency depends on the applied voltage, temperature, humidity and chemical bonding of odors.

Key words : Odor, Organic acids, Plasma Catalysis Hybrid Process(PCHP)

1. 서론

악취 중에는 다양한 오염물질을 포함하고 있으며 최근 생활주변에서 악취 등 민원의 발생이 증가하고 있다. 황화수소, 머크탄류, 아민류 등 일반적인 악취나 대기

오염물질은 산업공정이나 생활환경에서 비교적 처리가 잘 되고 있으나 황계열 화합물이나 유기산 등은 아직도 그 처리에 어려움을 겪고 있어 기술적인 개발이 더욱 필요하다. 이들 유기산들은 음식물 등이 분해되면서 장치 등에 잔류하기 쉽고 배출구 출구 쪽에 부착되어 민원을

Received 4 August, 2014; Revised 12 September, 2014;

Accepted 16 September, 2014

*Corresponding author : Kum-Chan Choi, Environmental Engineering, Dong-A University, Saha-Gu, Busan, 604-714, Korea

Phone: +82-51-200-7674

E-mail: kcchoi@dau.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

유발하기도 한다. 악취는 발생원이 다양하고 화학적인 성상에 따라 냄새특성이 각기 다르며, 대부분이 매우 낮은 농도에서 냄새가 감지되기 시작한다. 특히, 유기산류 같은 악취물질들은 대부분 최소감지값이 낮기 때문에 악취측정을 하여도 농도로서 쉽게 검출되지 않으며 지속적으로 냄새를 발생하므로 그 처리에 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다(Kim 등, 1996).

환경부에서는 22개의 물질을 지정악취물질로 정하고 2005년부터 acetaldehyde, propionaldehyde, n-butyraldehyde, n-valeraldehyde를 지정악취물질 지정하여 관리되고 있다. 특히 알데히드류나 유기산류는 주로 도장공장, 기타금속 제조공장, 자동차 수리공장, 인쇄공장, 생선류 처리장, 유기계 식품품 제조공장, 수송용 기계기구 제조공장 등에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있다(Liu, Y. 등, 2008). 대기 중에서의 carbonyl compounds는 인체의 돌연변이와 눈의 자극, 발암물질로 의심되고 있으며, 유해공기 오염물질과 광화학적으로 중요한 역할을 하는 물질로서 지속적인 관심을 받고 있다. Carbonyl compounds 중 formaldehyde와 acetaldehyde는 도시의 광화학 스모그를 발생시키는 주요한 물질로서 알려져 있다(Calvalcante 등, 2006).

악취의 처리방식은 다양하며 보통은 흡수나 흡착방식이 널리 이용되고 있다. 그러나 유기산 등 미처리 악취물질은 잔류성분을 제거하기 위하여 더 고급적 산화방식이 필요하게 된다. 따라서 이들 미처리된 유기산들을 처리하기 위해서는 전단계의 강력한 산화방식과 후단의 흡착을 이용한 복합방식의 처리기술을 필요로 한다. 이들 문제점들을 보완하기 위한 방식 중 하나로서 최근 광촉매나 전자빔공정, 플라즈마와 촉매공정을 결합한 복합공정의 기술들이 연구되고 있으며 산업현장에도 적용이 시작되고 있다(Ichiura 등 2003 ; Zhu 등, 2013). 촉매공정을 결합한 복합공정은 기존의 악취제거 기술의 문제점인 유기산 등의 2차 오염물질의 발생을 효과적으로 제어할 수 있으며 여러 종류의 악취물질을 동시에 처리할 수 있어 경제적인 운영이 가능한 장점을 가지고 있다(Ichiura과 Tanaka, 2003 ; Chen 등, 2010).

플라즈마 공정들에 의한 대기오염물질의 처리는 비교적 잘 되고 있으나 분해 후 2차 오염물질을 발생하는 등의 단점을 가지고 있다. 기존 연구들에서는 이와 같은 플라즈마 단독처리의 단점을 보완하고자 하였으며,

Kim 등(2011)은 제올라이트 촉매에 담지시킨 나노미터 크기의 각종 금속촉매와 저온 플라즈마 사이의 상호작용을 연구하였다. 이 연구에서는 촉매활성의 화학적인 관점의 평가와 플라즈마의 물리적인 특성사이의 상호연관성에 관련한 기초연구 과정에서 광학적, 전기적 방전 특성 등을 검토하였다. Lee 등(2011)은 황화수소를 대상으로 아파트 정화조와 하수관로에서 발생하는 악취를 촉매 플라즈마 반응시스템을 이용하여 처리하고자 하였다. 이 연구에서는 최적의 담체와 전이금속 촉매에 대한 물성을 파악하였고, 촉매의 종류별로 비 투입에너지, 공간속도 변화에 따른 처리효율을 평가하였다.

본 연구에서는 산업현장 등에서 발생하는 악취물질을 처리할 목적으로 플라즈마에 촉매를 복합하여 처리하는 방식을 개발하였다. 연구의 구체적인 방법은 암모니아, 포름알데히드, 아세트산 등 2차 오염물질을 제거 대상물질로 선정하고 DBD(Dielectric Barrier Discharge) 플라즈마 공정을 적용하였다. 플라즈마 단독 공정 및 촉매를 결합한 복합공정에 의한 이들 악취물질의 처리효율과 전압의 변화에 따른 처리효율을 각각 비교하고 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 실험장치의 구성

본 연구에서는 플라즈마와 촉매 복합공정에 의한 악취물질의 처리효율을 장치별로 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 챔버 형태의 실험장치를 구성하였다. 챔버 내부에는 플라즈마 단독공정의 효율과 촉매를 결합한 복합공정에 의한 처리효율을 각각 검토하기 위하여 플라즈마 반응기와 촉매반응기를 탈부착이 가능하도록 설계하였다. 플라즈마 촉매 반응기를 1m³의 챔버 내에 설치하고 일정한 농도의 ammonia, formaldehyde, acetic acid을 회분식(batch type)으로 주입하여 일정농도를 유지한 후 시간에 따른 농도의 변화를 조사하였다. 전단의 플라즈마 반응기에 기체상의 악취물질을 통과시켜 1차적으로 악취물질을 분해시키고 후단의 촉매 반응기는 두 개의 촉매층 패킷을 설치하여 플라즈마 반응기에서 생성된 2차 부산물질이 촉매층을 통과하면서 흡착반응에 의한 잔여의 유기산 처리를 위한 목적으로 장치를 구성하였다.

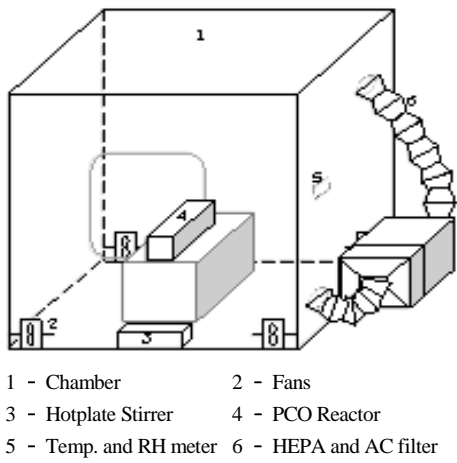


Fig. 1. Experimental set up of plasma and catalytic reactor.

실험장치는 시료가스의 발생부와 교반부, 고전압 발생부, 플라즈마 반응기, 촉매 반응기, 시료채취부, 분석부로 구성하였다. 실험용 악취가스는 발생부와 교반부에서 일정한 농도로 조정하고 micro syringe를 이용하여 액상의 시료를 챔버 내로 주입한 후 hot plate를 사용하여 기체화시킨 후 magnetic stirrer와 챔버 내의 순환팬을 이용하여 충분히 혼합한다. 챔버 내 플라즈마 및 촉매 반응기는 각각 아크릴로 제작되었으며, 촉매 반응기의 촉매부는 제올라이트(Y사, Korea)를 패킷 형태로 충전하여 사용하였으며 사용된 제올라이트의 특성은 Table. 1 에 나타내었다.

플라즈마 발생을 위한 고전압 발생부는 고주파 스위

Table 1. Chemical specification of zeolite

| Chemical Name | Clinoptilolite | |
|----------------------|---|-------------|
| Chemical Formular | Ca ₂ Na ₂ (Al ₂ Si ₇ O ₁₈)6H ₂ O | |
| pH | 6.5-7.5 | |
| Solubility | - | |
| Boiling point | - | |
| Melting point | 1920℃ | |
| Explosion Hazards | - | |
| Density | 1.91-2.91gm/cm ² | |
| Color | White Gray | |
| Oder | - | |
| Chemical Composition | Ingredient | Content (%) |
| | SiO ₂ | 66.50 |
| | Al ₂ O ₃ | 14.70 |
| | K ₂ O | 3.25 |
| | MgO | 1.25 |
| | CaO | 1.82 |
| | Na ₂ O | 1.90 |
| | Fe ₂ O ₃ | 1.68 |
| | P ₂ O ₅ | 0.04 |
| H ₂ O | 8.04 | |

칭 방식으로 직류고전압을 최대 50 kV, 전류 10 mA까지 조절할 수 있는 고전압 발생기를 제작하여 실험을 수행하였다. DBD 플라즈마 반응기는 내부직경 3.7 mm, 두께 2.3 mm, 길이 250 mm의 acryl 재질로 제작하였다. 내부전극은 5 mm stainless steel 재질로 사용하였으며,

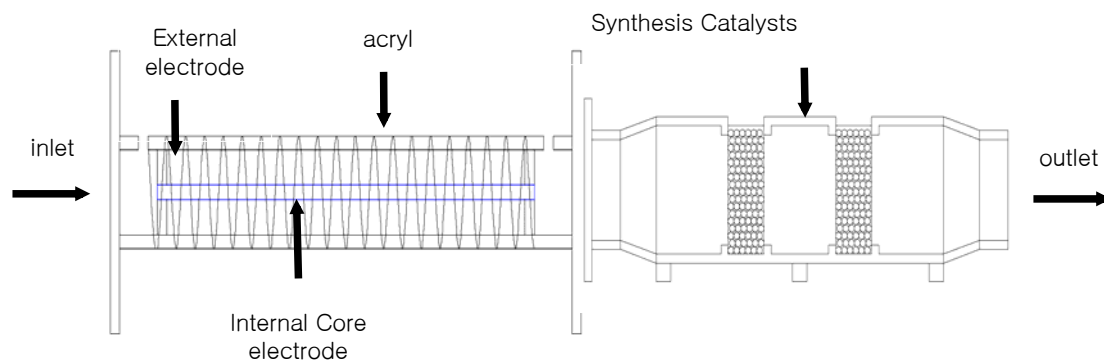


Fig. 2. Schematics diagram of the plasma catalytic reactor.

반응기의 외부표면에 stainless foil 로 감아서 외부전극으로 이용하였다. 촉매반응기는 와류를 방지하기 위하여 입구 폭 65 mm, 촉매영역은 폭 100 mm, 길이 200 mm 로 제작하였다. 본 실험에서 사용된 플라즈마 반응기 및 촉매 반응기의 개략도는 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 실험방법 및 조건

플라즈마 공정에 의한 악취물질 처리 실험은 플라즈마 단독공정과 촉매를 결합한 복합공정에 의한 악취물질 처리효율을 검토하기 위한 실험으로 나누어 진행하였다. 실험을 진행하기 전 플라즈마 장치의 작동여부를 위해 오존발생기를 사용하여 오존의 농도를 측정하였다. Ammonia, formaldehyde, acetic acid는 검지관식 가스측정기(Gastec Co. 실린더형 IRM, GV-100S)를 사용하여 측정하였다. 또한 촉매 반응부는 2개의 패킷이 탈부착이 가능하도록 설계하였으며 플라즈마 반응기 후단에 촉매 반응기를 장착하여 단독공정에 의해 생성된 2차 부산물질의 효과적인 처리가능성에 대한 실험을 진행하였다. 실험조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Experimental conditions in this experiment

| Items | | Range |
|---------------------------|-----------------|--------------|
| Ambient condition | Temperature | 23~27 °C |
| | Humidity | 50 ± 20% |
| Experimental condition(1) | Applied Voltage | 13.2 kV |
| | Current | 0.03~0.1 mA |
| | Input conc. | 0.5~10 ppm |
| Experimental condition(2) | Applied Voltage | 11 kV |
| | Current | 0.28~0.37 mA |
| | Input conc. | 0~1 ppm |

3. 결과 및 고찰

3.1 DBD 플라즈마 단독공정과 촉매 복합 공정에 의한 악취물질 처리효율의 비교

Fig. 3에는 DBD 플라즈마 단독공정과 촉매를 결합한 복합공정에 의한 ammonia, formaldehyde, acetic acid의 처리효율을 각각 비교하여 나타내었다. 여기서 ammonia의 초기농도를 10 ppm으로 설정하고 시간에 따른 처리효율을 검토하였다. Ammonia는 10분 경과

후 플라즈마 단독공정에서 40% 복합공정에서 50%의 처리효율을 각각 나타내었다. 20분 경과 후에는 플라즈마 단독공정에서 55%, 복합공정에서 60%, 30분 경과 후 플라즈마 단독공정과 복합공정이 70%로 동일한 처리효율을 나타내었다. 마지막 40~60분 경과 후에는 플라즈마 단독공정에서 80%, 복합공정이 83%로 복합공정에서 약간 높은 처리효율을 나타내었다. 플라즈마에 의한 ammonia 처리효율은 단독공정과 복합공정이 그다지 차이를 나타내지 않았으며, 암모니아는 일반적으로 플라즈마 단독공정만으로도 분해가 잘되어 촉매에 의한 복합공정을 적용하지 않아도 동일한 효율을 나타내는 것으로 파악되었다.

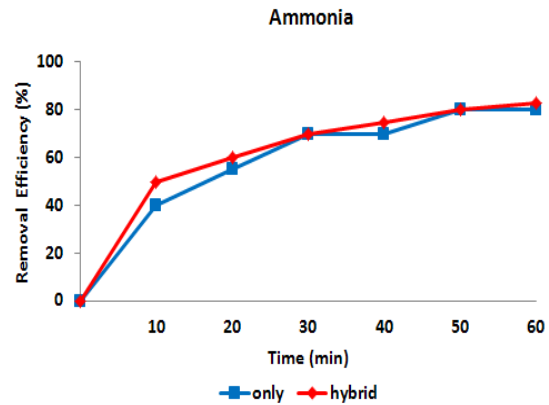


Fig. 3. Comparison of removal efficiency for ammonia by plasma only and hybrid process.

Fig. 4는 상기의 두 공정을 적용하여 formaldehyde의 처리효율을 비교한 것으로 formaldehyde의 초기농도는 5 ppm으로 설정하여 실험을 진행하였다. 10분 경과 후 처리효율은 플라즈마 단독공정에서 14% 복합공정에서 40%의 처리효율을 각각 나타내었다. 20분 경과 후 플라즈마 단독공정에서 36%, 복합공정에서 55%로 처리효율의 차이가 더욱 확연하게 나타났다. 마지막 40분 경과 후 부터는 두 공정이 비슷한 처리효율을 나타냈으며, 최종 처리효율은 플라즈마 단독공정에서 80%, 복합공정에서 78%로 거의 동일한 수준으로 나타났다.

Formaldehyde는 비교적 광촉매나 플라즈마 등에 의해 분해가 잘 되는 물질로 알려져 있으며, 온도와 습도에 의한 영향이 큰 물질로 거의 동일한 수준의 처리효율

이 나타낸 것으로 파악된다. 실험초기에 복합공정의 처리효율이 급격히 상승하는 경향은 다른 물질과 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 그 이유는 초기에 플라즈마에 의해 빨리 분해된 후 제올라이트 등의 촉매 층에 흡착되었다가 이후 플라즈마에 생성된 오존 등 다수의 전하에 의해 다시 분해되는 것으로 추측된다(Penetrante, 1996).

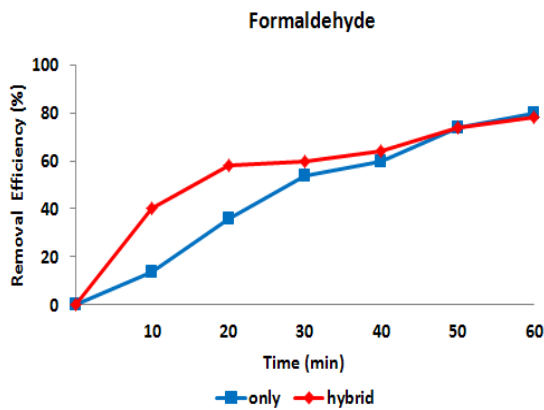


Fig. 4. Comparison of removal efficiency for formaldehyde by plasma only and hybrid process.

Fig. 5는 인가전압을 13 kV를 가하였을 때 acetic acid의 플라즈마 단독공정과 복합공정의 처리효율을 비교하였다. Acetic acid의 초기농도는 ammonia와 동일하게 10 ppm으로 설정하여 실험하였다.

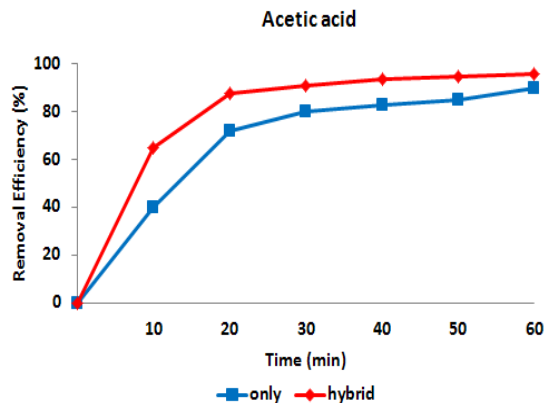


Fig. 5. Comparison of removal efficiency for acetic acid by plasma only and hybrid process.

Acetic acid는 10분 경과 후 플라즈마 단독공정에서 40% 복합공정에서 65%로 처리효율의 큰 차이를 보였으며, 20분경과 후 단독공정에서 72%, 복합공정에서 88%로 처리되었다. 최종 처리효율에서 단독공정이 90%, 복합공정이 96%로 플라즈마 단독공정에 비해 처리효율이 다소 높게 나타났다. Fig. 5에서 나타낸 것과 같이 플라즈마 단독공정과 복합공정에 의한 acetic acid의 처리효율은 10~20분 후에 급격히 상승하였고, 30분 경과 후부터 서서히 증가하여 60분 경과 후 90% 이상의 처리효율을 보였다.

복합공정에 의한 처리효율은 플라즈마 단독공정에 비해 acetic acid의 안정적인 처리가 가능하였다. 김(2011)등은 촉매와 플라즈마를 결합한 반응기를 사용하여 반응기의 방전특성과 제올라이트에 담지된 활성 금속의 활성화에 대하여 연구하였으며 Ag, Au, Cu, Pt 등 금속들과 결합되었을 때, 더 높은 제거효율을 나타냄을 보고하고 있다(Kim 등, 2011). 또한, Lee 등(2011)에 의하면 황화수소 처리를 위하여 플라즈마 촉매 복합방식의 공정을 사용하였다. 이 연구에서는 Ag, Mn, Cu 순으로 합침된 전이금속에 따라 제거효율이 나타났으며 β제올라이트가 우수한 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서도 플라즈마 촉매 복합공정에 의한 악취물질 제어는 acetic acid 등의 유기산 종류의 악취물질이 ammonia, formaldehyde 등 다른 악취물질들에 비해 더 빠르고 보다 높은 처리효율을 나타내었으며, 실제 플랜트 등에 적용 시에 높은 처리효율과 안정적 운전이 가능할 것으로 생각된다(Xia 등, 2013).

3.2 플라즈마 인가 전압의 변화 따른 DBD 플라즈마 복합공정에 의한 악취물질 처리효율 비교

DBD 플라즈마 촉매를 결합한 복합공정에서 인가전압의 변화에 따른 효과를 파악하기 위하여 처리효율을 각각 비교해 보았으며, 인가전압은 13 kV와 15 kV로 변화시켜 실험을 진행하였다. Fig. 6은 플라즈마 복합공정에서 전압에 따른 ammonia의 처리효율을 비교한 결과이다. 플라즈마 반응기에 인가전압은 13 kV, 15 kV로 고정하고 각각의 전압에서의 처리효율을 검토하였다. 이 때, ammonia의 초기농도를 10 ppm으로 설정하고 시간에 따른 처리효율을 검토하였다.

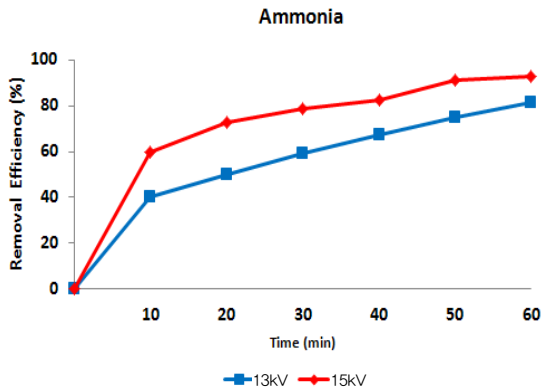


Fig. 6. Comparison of removal efficiency for ammonia by hybrid process varied with high voltage.

전체적으로 인가전압의 변화에 따른 ammonia의 처리특성은 13 kV보다 15 kV에서 높은 처리효율을 나타내었다. Ammonia는 10분 경과 후 전압 13 kV에서 처리효율은 40%, 15 kV에서 60%의 처리효율을 나타냈었고, 20분 경과 후 전압 13 kV에서 50%, 15 kV에서 72.5%의 처리효율을 각각 보였다. 최종 60분 경과 후, 전압 13 kV에서 처리효율은 81.5%, 15 kV에서 92.5%으로 나타났다. Ammonia는 일반적으로 플라즈마 등에 의한 분해가 잘되는 물질이며, 초기 10분 경과 후부터 60분 경과 후까지 전압에 관계없이 꾸준히 처리되는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 formaldehyde의 초기농도를 5 ppm으로 설정하여 시간에 따른 처리효율을 나타낸 결과이다. Formaldehyde 역시 전압의 변화에 따른 처리효율 비교에서 13 kV보다 15 kV에서 전체적으로 높은 처리효율을 나타내었다. 앞서 ammonia 보다는 그 처리효율이 다소 낮으나 10분 경과 후 전압 13 kV에서 처리효율은 31%, 15 kV에서 43%의 처리효율을 나타내었다. 최종 60분 경과 후에는 전압 13 kV에서 74%, 15 kV에서 83%의 처리효율을 보였다. Formaldehyde는 플라즈마 단독공정에서와 같이 ammonia 보다는 처리효율은 낮지만 초기에는 좀 더 안정적인 처리효율을 나타내었다.

마지막으로 Fig. 8은 플라즈마 복합공정에서 전압에 따른 acetic acid의 처리효율을 비교하였다. Acetic acid의 초기농도는 10 ppm으로 설정하여 시간에 따른 처리효율을 검토하였다. 10분 경과 후 전압 13 kV에서 처리

효율은 64%, 15 kV에서 80%로 뚜렷한 차이를 보였으며, 20분 경과 후 전압 13 kV에서 88%, 15 kV에서 83.5%로 다소 13 kV에서 처리효율이 높았다. 최종 60분 경과 후, 전압 13 kV에서 96.5%, 15 kV에서 99%의 높은 처리효율을 나타내었다. Acetic acid는 ammonia나 formaldehyde와는 달리 높은 처리효율을 나타내었으며 앞의 플라즈마 단독공정의 비교에서도 동일한 결과를 나타내었다. 아세트산은 구조적으로 이중결합을 가지고 있으며 외부 에너지에 의해 쉽게 분해되며 물과의 반응도 잘되어 상기의 다른 물질에 비해 더 높은 효율로 처리되는 것으로 판단된다.

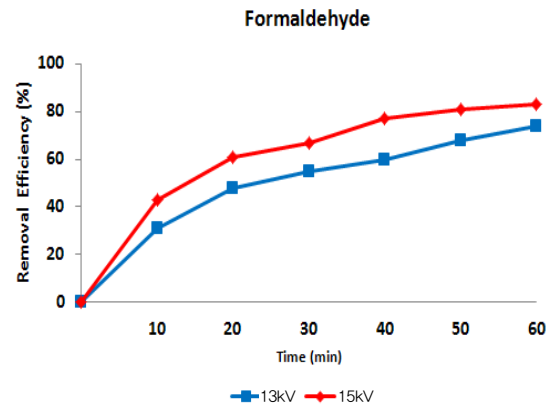


Fig. 7. Comparison of removal efficiency for formaldehyde by hybrid process varied with high voltage.

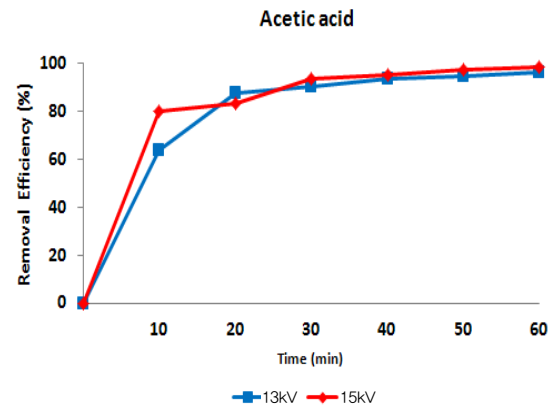


Fig. 8. Comparison of removal efficiency for acetic acid by hybrid process varied with high voltage.

4. 결론

본 연구에서는 악취발생시설의 미처리 유기산을 대상으로 선정하고 DBD 플라즈마 공정을 이용하여 플라즈마 단독 및 촉매를 결합한 복합공정에 의한 처리효율과 전압의 변화에 따른 처리효율을 각각 비교 및 검토하였다.

DBD 플라즈마 단독공정과 촉매 복합공정에 의한 악취물질 처리효율의 비교에서 ammonia는 촉매 복합공정이 83%로 플라즈마 단독공정보다 처리효율이 약간 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 암모니아는 플라즈마 공정에 의해 분해가 잘되는 물질이며 촉매에 의한 복합공정을 적용하지 않아도 동일한 효율을 나타내는 것으로 파악되었다.

Formaldehyde는 플라즈마 단독공정이나 촉매 복합공정에서 처리효율이 거의 동일하게 나타났으나, 실험 초기에 복합공정의 처리효율이 급격히 상승하는 경향은 다른 물질과 비슷한 경향을 나타내었다. Acetic acid는 최종 처리효율에서 단독공정이 90%, 복합공정이 96%로 플라즈마 단독공정에 비해 처리효율이 다소 높게 나타났다. Acetic acid 등의 유기산 종류의 악취물질은 다른 악취물질들에 비해 분해속도가 빠르고 더 높은 처리효율을 나타내었다.

플라즈마 인가 전압의 변화 따른 DBD 플라즈마 복합공정에 의한 악취물질 처리효율 비교에서는 ammonia의 경우, 최종 60분 경과 후 전압 13 kV에서 처리효율은 81.5%, 15 kV에서 92.5%로 높게 나타났다. Formaldehyde는 최종 60분 경과 후, 전압 13 kV에서 74%, 15 kV에서 83%의 처리효율을 각각 보였다. Acetic acid는 최종 60분 경과 후, 전압 13 kV에서 96.5%, 15 kV에서 99%의 높은 처리효율을 나타내었다. Acetic acid는 ammonia나 formaldehyde와는 달리 높은 처리효율을 나타내었으며, 앞의 플라즈마 단독공정의 비교에서도 동일한 결과를 나타내었다. Acetic acid는 분자 구조적으로 이중결합을 가지고 있으며 외부 에너지에 의해 쉽게 분해되며 물과의 반응도 잘되어 다른 물질에 비해 더 높은 효율로 처리되는 것으로 판단된다.

DBD 플라즈마 촉매 복합공정은 플라즈마 단독공정에 비해 유기산 등 악취물질의 제거효율이 더 높은 것으로 나타났으며 안정적인 처리가 가능함을 알 수 있었다.

향 후 악취물질인 유기산 제거를 위한 구체적인 물질별 처리효율과 플라즈마 등 복합 악취 처리 장치의 개발이 더욱 필요한 것으로 보이며 악취방지시설 등에서 처리에 어려움을 겪고 있는 유기산의 처리에 그 적용이 더욱 확대될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

Benjamin O., Silcock, P., Leus, M., Everett, D. W., 2012, Multilayer emulsions as delivery systems for controlled release of volatile compounds using pH and salt triggers, *Food hydrocolloids*, 27, 109-118.

Cavalcante M. R., Campelo C. S., Barbosa, M. J., Silveira, E. R., Carvalho, T. V., Nascimento, R. F., 2006, Determination of carbonyl compounds in air and cancer risk assessment in an academic institute in Fortaleza, Brazil, *Atmospheric Environment*, 40, Issue 29, 5701-5711.

Chen, J., Yang J., Pan H., Su Q, Liu Y., Shi Y., 2010, Abatement of mal-odorants from pesticide factory in dielectric barrier discharges, *Journal of hazardous materials*, 177, 1-3, 908-913.

Durme J. V., Dewulf, J., Demeestere, K., Leys, C., Langenhove, H. V., 2009, Post-plasma catalytic technology for the removal of toluene from indoor air; Effect of humidity, *Applied Catalysis B: Environmental*, 87, 78-83.

Ichiura, H., Kitaoka, T., Tanaka, H., 2003, Removal of indoor pollutants under UV irradiation by a composite TiO₂-zeolite sheet prepared using a paper making technique, *Chemosphere*, 50, 79-83.

Izadkhan B., Nabavi, S. R., Niaei, A., Salari, Badiki, D. M., Caylak, M., 2012, Design and Optimization of Bi-Metallic Ag-ZSM5 catalysts for catalytic oxidation of volatile organic compounds, *Journal of industrial and engineering chemistry*, 18, Issue 6, 2083-2091.

Kim H. H., Choi K. C., Ju Y. K., Sagong K., 1996, Control

- of VOCs by an Ferroelectric Pellet Bed Plasma Reactor, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 18, 5, 543-550.
- Kim H. H., Negishi N., Ogata A., 2011, Discharge Characteristics and Catalytic Activity in Catalyst-Packed Plasma Reactor, *Proceedings of Fall Annual Meeting of Korean Society of Atmospheric Environment*, 321.
- Kumar, B., Park, Y. T., Castro, M., Grunlan, J. C., Feller, J. F., 2012, Fine control of carbon nanotubes - polyelectrolyte sensors sensitivity by electrostatic layer by layer assembly (eLbL) for the detection of volatile organic compounds, *Talanta*, 88, 396-402.
- Lee J. K., Kim H. G., Bong C. K., Park S. Jin., Lee M. H., Hwang U. H., Kim J. H., 2011, Characteristics of Hydrogen Sulfide Removal by Catalyst-assisted Plasma System, *Journal of Korean Society of Atmospheric Environment*, 27, 4, 379-386.
- Liu Y., Shao M., Fu M., Lu S., Zeng L., Tang D., 2008, Source profiles of volatile organic compounds measured in China : Part I, *Atmospheric Environment*, 42, 25, 6247 - 6260.
- Liu Z., H., Qiu J. R., Liu H., Tan Z. Q., Yan Z. Q., Zhang M. L., Zeng H. C., Yang H., 2012, Effects of SO₂ and NO on removal of VOCs from simulated flue gas by using activated carbon fibers at low temperatures, *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, Volume 40, Issue 1, 93-99.
- Penetrante, B. M., Hsiano, M. M., Bardsley, J. N., Merritt, B. T., Vogtin, G. E., Kuthi, A., Burkhardt C. P. and Bayless J. R., 1996, Basic energy efficiency of plasma production in electrical discharge and electron beam reactor, *Proceedings NEDO Symposium Non-Thermal Plasma Technology Air Contaminant Control*, 69-87.
- Xia L., Huang L., Shu X., Zhang R., Dong W., Hou H., 2008, Removal of ammonia from gas streams with dielectric barrier discharge plasmas, *Journal of Hazardous Materials* 152, 1, 113-119.
- Yamamoto, T., 1997, VOC Decomposition by nonthermal plasma processing - A New Approach, *Journal of Electrostatics*, 42, Issue 1-2, 227-238.
- Zhu C., Wang X., Huang Q., 2013, Removal of gaseous carbon bisulfide using dielectric barrier discharge plasmas combined with TiO₂ coated attapulgite catalyst, *Chemical Engineering Journal*, 225, 567-573.