

플라즈마를 이용한 악취물질 분해 특성

강석원, 이재식, 이강산, 임희아, 김지성, 이정대, 박월수, 박영구*
강원대학교 공학대학 지구환경시스템공학과

Decomposition of odor using atmospheric-pressure plasma

Seok-Won Kang, Jae-Sik Lee, Kang-San Lee, Hee-Ah Lim, Ji-Seong Kim,
Jeong-Dae Lee, Wol-Su Park, Young-Koo Park*

Dept. of Earth and Environmental Engineering, College of Engineering, Kangwon National University

요약 대기오염 중 악취는 인간의 생활이나 활동, 건강에 직·간접적으로 영향을 주어 사회적 환경문제로 인식되고 있다. 악취물질 중 NH_3 (암모니아), H_2S (황화수소), C_6H_6 (벤젠)은 석유화학공장, 공공하수처리시설 및 분뇨처리시설, 가축 분뇨 처리시설, 폐기물 처리시설과 음식물류 처리시설에 등에서 대량으로 발생하므로 효율적인 악취 제거가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 대기압 플라즈마를 이용한 악취 제거와 제거효율을 연구하였다. 가스크로마토그래피(Gas Chromatography, GC)와 악취측정장치를 이용하여 대기압 플라즈마와 악취물질 반응 전후의 농도를 측정하였다. 측정 결과를 백분율로 환산하여 효율을 평가하였다. 플라즈마를 이용한 악취 분해는 플라즈마를 방전시킬 때 생성된 활성라디칼과 O_3 (오존)을 이용하여 악취물질을 중화처리 및 광화학적으로 산화하는 기전을 이용한 것으로 상온에서 악취 물질의 처리가 가능하며, 2차 오염물질의 발생이 없다는 장점이 있다. NH_3 , H_2S , C_6H_6 3가지 악취 물질 모두 대기압 플라즈마의 출력을 500 W로 방전시켜 반응시켰을 때 모두 1분 내로 악취 물질이 완전히 분해되었다. 따라서 고농도의 악취 물질과 두 종류 이상의 냄새유발 물질이 반응할 때 발생한 복합악취 또한 대기압 플라즈마를 이용하여 제거할 수 있다고 판단된다.

Abstract Offensive odor is recognized as a social environmental problem due to its olfactory effects. Ammonia(NH_3), hydrogen sulfide(H_2S) and benzene(C_6H_6) are produced from various petrochemical plants, public sewage treatment plants, public livestock wastes, and food waste disposal facilities in large quantities. Therefore efficient decomposition of offensive odor is needed. In this study, the removal efficiency of atmospheric-pressure plasma operating at an ambient condition was investigated by evaluating the concentrations at upflow and downflow between the plasma reactor. The decomposition of offensive odor using plasma is based on the mechanism of photochemical oxidation of offensive odor using free radical and ozone(O_3) generated when discharging plasma, which enables the decomposition of offensive odor at ordinary temperature and has the advantage of no secondary pollutants. As a result, all three odor substances were completely decontaminated within 1 minute as soon as discharging the plasma up to 500 W. This result confirms that high concentration odors or mixed odor materials can be reduced using atmospheric-pressure plasma.

Keywords : Decomposition of Odor, NH_3 , H_2S , C_6H_6 , Atmospheric-Pressure Plasma, GC, FID

*Corresponding Author : Young-Koo Park(Kangwon Univ.)

email: ygpark@kangwon.ac.kr

Received April 8, 2020

Accepted July 3, 2020

Revised April 28, 2020

Published July 31, 2020

1. 서론

1970년대에 기술과 자본을 바탕으로 철강, 배, 자동차, 기계, 석유 화학과 같은 중화학공업이 발전하였다. 중화학공업 공장들에서 배출되는 오염물질과 처리시설들이 모여 형성된 공업지역과 인구 밀집과 급격한 도시화로 생성된 대도시에서 배출되는 대기오염물질, 휘발성 유기화합물(VOCs)과 악취물질 등의 배출량은 과도하게 증가하였으며, 국지적인 모습을 보여주고 있다. 배출되는 대기오염물질은 SO_x (황산화물)과 NO_x (질소산화물) 등의 1차 오염물질과 광화학반응으로 생성된 2차 오염물질은 광화학스모그, 오존층파괴, 지구온난화 등에 영향을 미치고, VOC(휘발성유기화합물)과 악취물질은 인간의 건강에 직·간접적으로 악영향을 미치고 있다[1]. 악취 물질은 호흡 리듬의 변화를 주며, 심장박동수의 증가, 혈압의 상승 등을 유발하며, 자율신경의 불완전한 기능 수행으로 두통, 현기증, 불면, 스트레스, 소화불량 등에 영향을 주게 되는 것으로 알려져 있다[2]. 대기오염물질의 경우 활발한 연구와 법률제정을 통한 규제로 대기오염물질의 영향을 줄여가는 추세이나 휘발성유기화합물과 악취물질의 경우 관련 연구와 관리가 소홀하여 배출시설 및 사업장과 인근 주민들과의 갈등이 이어지고 있으며 이러한 문제가 공단지역을 중심으로 전국적으로 확산되어 대기오염관리에 있어 악취물질의 중요성이 부각되는 추세이다[3].

정부는 산업활동 등으로 인해 발생하는 악취를 방지함으로써 국민이 건강하고 쾌적한 환경에서 생활할 수 있게 함을 목적으로 하는 악취방지법을 제정하여 악취물질 그 자체와 악취물질의 발생원을 체계적으로 관리, 규제하여 악취를 원인으로 한 지역주민들의 건강, 생활 환경상의 피해를 줄이려 하고 있으나 오히려 관련 민원이 증가하는 추세이다[4]. 인천과 시화공단 지역의 사업장과 지역주민들 간의 갈등이 여전하다. 지역 내에서 악취로 인해 주민의 건강상, 생활 환경상 피해를 가하는 악취 발생원으로는 석유화학공장, 제지공장, 식품가공공장, 공공하수처리시설 및 분뇨처리시설, 가축분뇨의 공공처리시설, 공공폐수처리시설, 폐기물처리시설과 음식물류폐기물을 처리하는 시설 등이 대표적이다[5]. 이러한 시설들은 해당 지역의 유지와 지역주민들의 생활에 필수적인 시설이 대부분인 것에 반해 악취에 대한 구체적인 대안이 없는 상태이다.

플라즈마를 이용한 악취 분해는 플라즈마를 방전시킬 때 생성된 활성라디칼과 O_3 (오존)을 이용하여 악취물질을 중화처리 및 광화학적으로 산화하는 기전을 이용한

것으로 상온에서 악취물질의 처리가 가능하며, 생성된 O_3 은 악취물질 분해 후 O_2 로 환원되어 2차 오염물질의 발생이 없다는 장점이 있다. 하지만 고농도 대용량 조건에서의 황 계열 악취물질의 처리에는 제한적이며, 당량비가 맞지 않을 경우에 배출가스에서 O_3 이 섞여 배출될 수 있고 체류시간의 충분한 확보가 필요하며, 먼지 및 수분이 포함된 가스의 처리시 플라즈마 방전의 장애 요인이 될 수 있다[1].

본 연구에서는 악취물질 중 NH_3 (암모니아), H_2S (황화수소), C_6H_6 (벤젠)을 대기압 플라즈마를 이용하여 분해하였다.

1.1 악취물질의 주요 발생원

악취물질의 발생원은 자연적 발생원과 인위적 발생원으로 구분할 수 있다. 자연적 발생원은 자연계에서 동식물에 있는 단백질 성분 같은 것이 미생물이나 박테리아의 대사활동에 의해 호기성과 혐기성 상태로 분해되는 과정에서 발생하는 악취물질을 의미하며, 인위적 발생원은 인간의 생활 활동과 관련이 있으며, 가정에서부터 산업시설에 이르기까지 발생원의 규모 및 물질의 종류가 매우 다양하다.

전체적인 악취 발생 절대량은 자연적인 발생량이 인위적인 발생량에 비해 압도적으로 크다. 하지만 자연적 배출원의 경우에는 배출원이 지구적 규모로 흩어져 있어 평균적인 발생량은 낮은 수준이다. 반면, 인위적 발생원에서 발생하는 악취물질은 특정 지역에서 지속적으로 고농도의 악취가 발생하므로 문제가 될 수 있다.

인위적 발생원의 종류를 생활계 발생원과 산업계 발생

Table 1. Main source and characteristic of odor

Chemical Formula	Compounds	Odor Characteristic	Main Source
NH_3	Ammonia	Urine	Chemical and petrochemical industry, Livestock, Fertilizer, Waste treatment, Excrement treatment, Wastewater treatment, Line Source, Sewerage, Private house
H_2S	Hydrogen sulfide	Rotten Egg	Chemical and petrochemical industry, Livestock, Fertilizer, Waste treatment, Excrement treatment, Wastewater treatment, Line Source, Sewerage, Private house
C_6H_6	Benzene	-	Chemical and petrochemical industry

원으로 구분할 수 있다. 우리나라의 대기환경보전법에서 생활계 발생원과 22가지의 주요 악취물질을 지정하여 발생하는 악취물질을 관리하고 있으며, 산업계 발생원에서 발생하는 대기오염물질을 규제하고 있다. 8가지 주요 악취물질 중 본 연구에서 다뤄질 NH_3 , H_2S 의 발생원과 C_6H_6 의 발생원을 조사했다[8].

Table 1은 악취 물질별 특징과 주요 발생원을 정리한 것이다.

2. 실험

2.1 플라즈마(Plasma)

대기압 플라즈마는 일종의 고전압 글로우 방전 플라즈마 발생 장치(High voltage glow discharge Plasma)이다. 고압의 전기를 Head 내부에 특수 설계된 전극에 인가하면 전자가 고밀도로 이동하게 되고, 이때 Head 내부를 통과하는 가스가 지나가는 전자와의 충돌을 일으켜 플라즈마를 발생 및 확산시키게 된다. 가스와 이동하는 전자의 충돌로 생성된 플라즈마는 활성라디칼 및 O_3 (오존)을 생성하며, 생성된 활성라디칼과 O_3 이 악취물질을 산화(Oxidation)시켜 무취의 다른 물질로 변환하여 악취물질을 제거한다. 본 실험에서는 대기압 플라즈마를 이용하여 NH_3 , H_2S , C_6H_6 가스의 제거 분석을 수행하였다. 대기압 플라즈마의 출력 범위는 500~1200 W이며, 실험은 500 W에서 수행하였다. 압축가스를 사용하였으며, 압축가스는 공기압축기(Air compressor)를 이용하여 사용하였다. 압축가스의 압력은 1.16 Bar에서 수행하였다.

Fig. 1은 반응기를 포함한 분해 장치를 사진으로 나타냈다.



Fig. 1. Plasma reactor.

NH_3 실험에는 $NH_3 + N_2$ 혼합가스(혼합가스, Union Gas, Korea)를 사용하였다. 악취 측정 장치를 이용하여 연속으로 NH_3 가스와 air를 봄베에서 반응기에 직접 주입하였으며, 유량계를 사용하여 농도를 설정하였다. 또한, H_2S 실험에는 $H_2S + N_2$ 혼합가스를 사용하였다. 악취 측정 장치를 이용하여 연속으로 H_2S 가스와 air를 봄베에서 반응기에 직접 주입하였으며, 유량계를 사용하여 농도를 설정하였다.

C_6H_6 실험에는 C_6H_6 용액(Benzene 500 ml, Matsunoen Chemicals LTD, Japan)을 사용하였으며, 99.5 %의 C_6H_6 용액을 70~80 °C로 가열하여 기화된 기체를 포집하였다. 포집한 기체와 air를 tedlar bag(PVF Flim)을 이용하여 희석하였다. 희석된 시료를 안정시킨 후 검지관(Benzene detector tube, GASTEC, Japan)을 이용하여 시료의 농도를 측정하였다. 제조된 시료를 바탕으로 자체적으로 표준물질을 만들었으며 GC/FID를 이용하여 검량선을 작성하였다. 실험을 수행할 때는 동일 조건에서 tedlarbag에 포집한 기체를 사용했으며, 반응기에 연결하여 수동으로 직접 주입하였다. 반응기에 시료를 실린더로 취하여 GC/FID를 이용하여 농도를 설정하였다.

2.2 악취물질 분해 장치

Fig. 2.는 악취물질 분해장치이다. 분해장치를 사용하여 대기압 플라즈마를 이용한 악취 물질의 제거효율을 평가하였다. 반응장치는 가스 주입부, 반응조, 반응 가스 분석 부분으로 구성하였다. 반응조에 공급되는 가스는 air, NH_3 , H_2S , C_6H_6 을 사용하였으며, 유량계를 사용하였다. NH_3 , H_2S , C_6H_6 시료는 air와 반응조에 직접 주입하였다. NH_3 , H_2S 의 경우 악취측정장치로 연속 측정하여 반응기 농도를 설정하였다. NH_3 의 초기농도는 50 ppm, 42 ppm, 30 ppm, 20 ppm, 15 ppm으로 설정하였다. H_2S 의 초기농도는 71 ppm, 50 ppm, 41 ppm, 30 ppm, 21 ppm으로 설정하였다. C_6H_6 의 경우 초기농도는 실험 수행 전 GC/FID를 이용하여 만든 검량선으로 계측하였으며, C_6H_6 의 초기농도는 33.93 ppm, 16.80 ppm, 12.72 ppm으로 설정하였다. 반응기는 외부크기가 가로 245 mm, 세로 235 mm, 높이 255 mm인 acrylic로 제작하였으며, 상부에 크기에 맞는 구멍을 내어 플라즈마 head를 설치하였다. 실험은 실온에서 수행하였다. 가스 분석은 반응 전후의 농도를 악취측정장치와 GC/FID를 이용하여 측정하였으며, 측정된 NH_3 ,

H_2S , C_6H_6 의 농도를 백분율로 환산하여 제거효율을 평가하였다.

악취제거 효율은 다음과 같은 식 (1)로 계산하였다.

$$\text{제거효율}(\eta) = \frac{in - out}{in} \times 100(\%) \quad (1)$$

Where, *in* denote initial concentration in reactor, *out* denote post-response concentration in reactor.

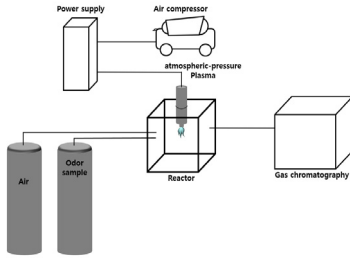


Fig. 2. Schematic diagram of plasma reactor.

2.3 악취측정 및 분석

실험에 사용한 C_6H_6 의 반응 전후의 농도를 분석하기 위하여 가스크로마토그래피(YL6500GC, Young In Chromass, Korea)를 이용하여 분석하였으며, Table 2의 조건으로 분석을 수행하였다.

Table 2. Operating conditions of gas chromatography(GC)

Descriptions	Analytical conditions
Instrument	YL6500GC
Detector	FID, 220 ℃
Column	HP-1(30 m × 0.320 mm × 4.00 μm) Agilent Technologies, USA
Column Flow	N_2 , 3 ml/min
Injector temperature	Capillary, 230 ℃.
Oven temperature	50 ℃(3min) → 20 ℃/min → 250 ℃(3min)
Split ratio	1:10

실험에 사용한 NH_3 와 H_2S 의 반응 전후의 농도를 측정하기 위하여 악취측정장치(IQ-610XTRA, GrayWolf Sensing Solutions, USA)를 이용하여 측정하였다. 악취 측정 장치의 주요 센서로는 CO_2 , PM-10, NO_2 센서 등이 있으며 NH_3 , H_2S 센서를 추가한 장비를 이용하여 측

정하였다. NH_3 센서의 측정 가능 농도 범위는 1~1000 ppm이며, H_2S 센서의 측정 가능 농도 범위는 0.1~80 ppm이다.

본 장비는 국립환경과학원의 환경측정기기 승인을 받은 장비로 공인측정오차범위(재현성)는 0.6 %이다. 측정은 실온에서 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 플라즈마 분해기구

플라즈마는 우주를 구성하고 있는 가장 큰 물질상태이며, 1910년대 미국 물리학자 랑뮤르(Langmuir)에 의해 플라즈마(Plasma)라고 명명되었다. 어떠한 물질에 에너지를 가하면 플라즈마 상태가 되며, 이를 현대물리학에서는 물질의 제 4상태라 부른다. 플라즈마 내부는 매우 높은 반응성을 가지며 불안정한 상태이다. 이러한 불안정한 상태에 놓여있는 플라즈마의 특성을 이용하여 악취 물질에 대한 화학적 처리한다. 기체는 대기 상태에서는 절연체로 다룰 수 있으나 특정 조건에서 도체적 성질을 갖게 된다. 기체가 전도성을 갖는 것은 기체 중에 전자나 이온과 같은 하전입자가 존재하기 때문이며, 플라즈마 상태가 된 물질 중 대부분은 기존 물질과는 다른 성질을 보인다. 불활성 기체 중 Ar(아르곤)의 경우 플라즈마 상태가 되어도 화학적으로는 다른 물질과 크게 결합하는 특성은 보이지 않지만, O_2 (산소)의 경우 플라즈마 상태가 되었을 때 다른 물질과 화학적으로 결합할 수 있는 성질이 우수하다. 이러한 특성을 이용하여 여러 공정에 사용되고 있다[6].

Fig. 3은 에너지에 따른 물질의 상태 변화를 나타낸 것이다.

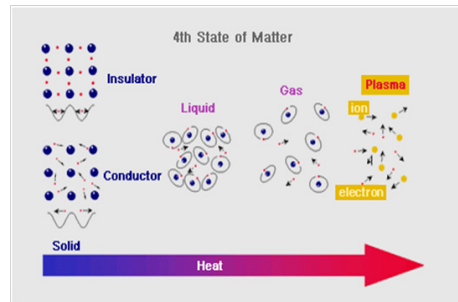


Fig. 3. Changes in state of matter by energy.

산업현장에서 사용되는 플라즈마 장비는 플라즈마 핵융합 개시 시스템이 가장 고온으로 사용되고, 다음으로 플라즈마 절단기, 용접기, 용사 코팅 순이다. 본 실험에 사용된 플라즈마는 저온 플라즈마라고 불리며, 그 온도 범위는 1000~2000 °C 정도이다.

본 실험에 사용했던 대기압 플라즈마(AP-3000, Advanced Engineering Technology Provider, Korea)장비는 저온 플라즈마의 범주에 속하며, 대기압에서 압축공기를 고전압을 이용하여 플라즈마 상태로 만들어 준다. 만들어진 플라즈마는 노즐을 통하여 빔 형태로 분사되어 처리 대상에 화학적인 변화를 일으킨다. 만들어진 플라즈마 빔은 불꽃처럼 보이지만 실제 불꽃과는 다르며, 이온과 전자, 들뜬상태의 분자 등이 혼합되어 존재하며 에너지를 받은 가스분자 또는 원자는 최외각 전자를 잃게 되고 방출된 전자는 빛에 가까운 속도로 계안을 이동하며 다른 가스분자 또는 원자들과 충돌하게 된다. 이러한 반복적인 현상들이 순간적인 시간으로 연속되며 특히 들뜬상태의 분자와 원자는 바닥 상태로 돌아가고 가지고 있던 에너지를 빛의 형태로 방출하게 되어 플라즈마는 고유의 색상을 나타내게 된다[6].

Fig. 4은 플라즈마 Head의 단면을 나타낸 것이다.

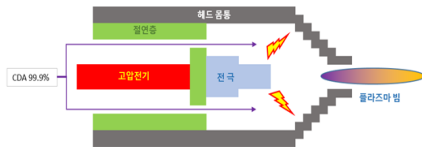
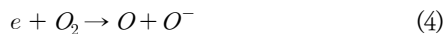


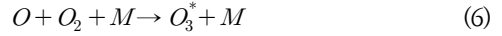
Fig. 4. AP-4000 Head section.

이를 기반으로 실험에 사용된 대기압 플라즈마의 방전극에 일정 전압을 가하면, 글로우 방전이 일어나며, 이때 주입된 압축공기의 수분과 산소의 분해로 인해 활성라디칼을 발생하고, 발생한 활성라디칼은 O^* , H^* , OH^* , HO_2^* 이다. 이중 O^* 이 O_2 와 반응하여 O_3 을 생성한다.

본 실험에 사용된 대기압 플라즈마의 글로우 방전시 O 라디칼이 생성되는 반응은 식 (2)~(5)와 같다.



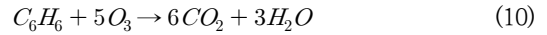
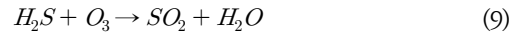
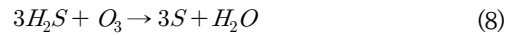
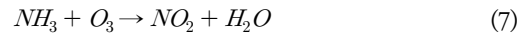
O 라디칼로 인해 생성되는 O_3 의 반응은 식 (6)과 같다.



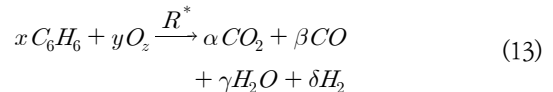
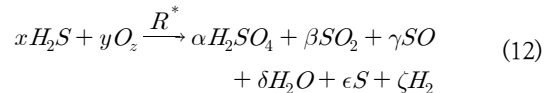
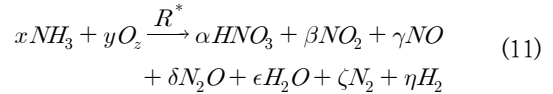
Where, M denote oxygen, ozone, nitrogen

생성된 O_3 가 NH_3 , H_2S , C_6H_6 가스를 산화(Oxidation)시켜 무취의 다른 물질로 변환하여 악취물질을 분해한다.

O_3 로 인한 악취물질의 산화 반응은 식 (7)~(10)과 같다[7,8].

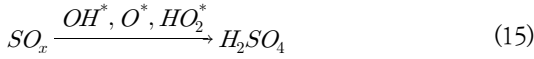
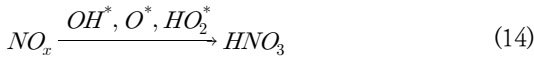


실험에 사용된 대기압 플라즈마의 방전극에 일정 전압을 가하면, 글로우 방전이 일어나며, 이때 주입된 압축공기의 수분과 산소의 분해로 인해 활성라디칼을 발생하고, 발생한 활성라디칼은 O^* , H^* , OH^* , HO_2^* 이다. NH_3 , H_2S 와 C_6H_6 를 플라즈마에 의해 생성된 활성라디칼로 중화처리하는 반응기전은 식 (11)~(13)과 같다.



Where, R^* denote Free radical

결과적으로 활성라디칼, O_3 에 의해서 분해된 NH_3 , H_2S , C_6H_6 은 HNO_3 (질산)과 H_2SO_4 (황산), H_2O (물), S (황), H_2 (수소) 등으로 전환된다. 중간물질인 질소산화물(NO_x)과 황산화물(SO_x)은 다시 활성라디칼과 반응하여 최종적으로 HNO_3 와 H_2SO_4 으로 전환되며, 활성라디칼 중 특정 라디칼과 선택적으로 반응할 경우 플라즈마 방전의 에너지에 의해 단원자 분자인 N_2 (질소), O_2 , S 으로 환원된다. 이를 식 (14)와 (15)에 나타내었다[1,9].



3.2 NH₃ 분해 결과

반응기에 연결된 대기압 플라즈마의 출력은 500 W로 하였으며, 압축가스의 압력은 1.16 Bar로 하였다. 대기압 플라즈마를 이용하여 반응기에서 분해하여 악취 측정 장치로 연속 측정하였다.

Table 3은 NH₃와 플라즈마의 반응 후 시간에 따른 NH₃의 농도를 나타낸 것이다.

초기농도 50 ppm인 반응조 내의 NH₃는 연결된 대기압 플라즈마와 12초 반응시켰을 때 34 ppm으로 감소하였고, 30초 반응시켰을 때 11 ppm으로 감소하였으며, 42초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다. 초기농도 42 ppm인 NH₃는 12초 반응시켰을 때 32 ppm으로 감소하였고, 30초 반응시켰을 때 16 ppm으로 감소하였으며, 48초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다. 초기농도 30 ppm인 NH₃는 12초 반응시켰을 때 24 ppm으로 감소하였고, 30초 반응시켰을 때 13 ppm으로 감소하였으며, 48초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다. 초기농도 20 ppm인 NH₃는 12초 반응시켰을 때 14 ppm으로 감소하였고, 30초 반응시켰을 때 7 ppm으로 감소하였으며, 48초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다. 초기농도 15 ppm인 NH₃는 12초 반응시켰을 때 12 ppm으로 감소하였고, 30초 반응시켰을 때 6 ppm으로 감소하였으며, 48초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다.

Table 3. Ammonia removal results(ppm)

Time (sec) NH ₃ (ppm)	0	6	12	18	24	30	36	42	48
50	50	42	34	25	18	11	3	0	
42	42	37	32	26	21	16	11	6	0
30	30	27	24	20	16	13	9	6	0
20	20	17	14	12	9	7	5	2	0
15	15	13	12	10	8	6	3	1	0

Table 4는 Table 3.를 NH₃ 농도별 반응시간에 따른 제거효율을 식 (1)를 이용하여 나타낸 것이다.

초기농도 50 ppm인 반응조 내의 NH₃는 연결된 대기압 플라즈마와 12초 반응시켰을 때 32 % 분해되었고, 30초 반응시켰을 때 78 % 분해되었으며, 42초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다. 초기농도 42 ppm인 NH₃는 12초 반응시켰을 때 23.81 % 분해되었고, 30초 반응시켰을 때 78 % 분해되었으며, 42초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다. 초기농도 30 ppm인 NH₃는 12초 반응시켰을 때 20 % 분해되었고, 30초 반응시켰을 때 56.67 % 분해되었으며, 48초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다. 초기농도 20 ppm인 NH₃는 12초 반응시켰을 때 30 % 분해되었고, 30초 반응시켰을 때 65 % 분해되었으며, 48초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다.

Table 4. Ammonia removal efficiency results(%)

Time (sec) NH ₃ (ppm)	0	6	12	18	24	30	36	42	48
50	0	16.00	32.00	50.00	64.00	78.00	94.00	100	
42	0	11.90	23.81	38.10	50.00	61.90	73.81	85.71	100
30	0	10.00	20.00	33.33	46.67	56.67	70.00	80.00	100
20	0	15.00	30.00	40.00	55.00	65.00	75.00	90.00	100
15	0	13.33	20.00	33.33	46.67	60.00	80.00	93.33	100

Fig. 5는 Table 4를 NH₃ 농도별 반응시간에 따른 제거효율을 그래프로 나타낸 것이다.

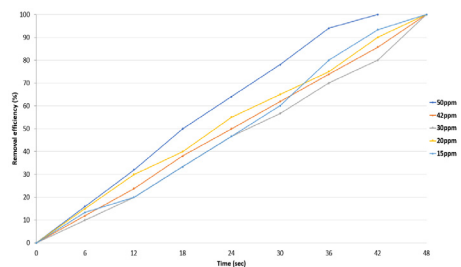


Fig. 5. Ammonia removal efficiency in terms of initial concentration.

NH₃는 초기농도 15~50 ppm까지 대기압 플라즈마와 반응시켰을 때 6초 후부터 빠르게 제거되었으며, 24초에서 15 ppm은 46.67 %, 20 ppm은 55 %, 30 ppm은 46.67 %, 42 ppm은 50 %, 50 ppm은 64 % 분해되었다. 초기농도 50 ppm의 제거효율이 가장 높았으며, 초기농도가 높을수록 제거효율이 높은 경향을 보인다. 초

기농도 50 ppm 경우 42초에서 완전히 분해되었으며, 초기농도 15 ppm, 20 ppm, 30 ppm, 42 ppm은 48초에서 완전히 분해되었다.

3.3 H₂S 분해 결과

반응기에 연결된 대기압 플라즈마의 출력은 500 W로 하였으며, 압축가스의 압력은 1.16 Bar로 하였다. 플라즈마를 이용하여 반응기에서 H₂S를 반응시켰다. 악취 측정장치를 이용하여 연속측정을 하였다. H₂S의 양은 유량계를 이용하여 조절하였으며, 실험 시 마스크를 착용하여 수행하였다. 초기농도의 경우 1014 ppm의 황화수소 기체를 봄베에서 반응기에 직접 주입하였으며, 동시에 악취 측정장치를 이용하여 연속측정을 하면서 설정하였다.

Table 5는 플라즈마에 의해 H₂S가 반응기에서 시간에 따른 농도를 나타낸 것이다.

초기농도 71 ppm인 반응조 내의 H₂S는 연결된 대기압 플라즈마와 12초 반응시켰을 때 53 ppm으로 감소하였고, 30초 반응시켰을 때 26 ppm으로 감소하였으며, 42초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다. 초기농도 50 ppm인 H₂S는 12초 반응시켰을 때 36 ppm으로 감소하였고, 30초 반응시켰을 때 17 ppm으로 감소하였으며, 48초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다. 초기농도 41 ppm인 H₂S는 12초 반응시켰을 때 31 ppm으로 감소하였고, 30초 반응시켰을 때 16 ppm으로 감소하였으며, 48초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다. 초기농도 30 ppm인 H₂S는 12초 반응시켰을 때 22 ppm으로 감소하였고, 30초 반응시켰을 때 11 ppm으로 감소하였으며, 48초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다. 초기농도 21 ppm인 H₂S는 12초 반응시켰을 때 14 ppm으로 감소하였고, 30초 반응시켰을 때 6 ppm으로 감소하였으며, 48초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다.

Table 5. Hydrogen sulfide removal results(ppm)

Time (sec) H ₂ S(ppm)	0	6	12	18	24	30	36	42	48
71	71	62	53	44	35	26	17	8	0
50	50	43	36	29	23	17	10	4	0
41	41	36	31	26	21	16	11	6	0
30	30	26	22	18	14	11	7	3	0
21	21	18	14	11	9	6	4	1	0

Table 6은 Table 5.를 H₂S 농도별 반응시간에 따른 제거효율을 식 (1)를 이용하여 나타낸 것이다.

초기농도 71 ppm인 반응조 내의 H₂S는 연결된 대기압 플라즈마와 12초 반응시켰을 때 25.35 % 분해되었고, 30초 반응시켰을 때 63.38 % 분해되었으며, 42초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다. 초기농도 50 ppm인 H₂S는 12초 반응시켰을 때 28 % 분해되었고, 30초 반응시켰을 때 66 % 분해되었으며, 42초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다. 초기농도 41 ppm인 H₂S는 12초 반응시켰을 때 24.39 % 분해되었고, 30초 반응시켰을 때 60.98 % 분해되었으며, 48초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다. 초기농도 30 ppm인 H₂S는 12초 반응시켰을 때 26.67 % 분해되었고, 30초 반응시켰을 때 63.33 % 분해되었으며, 48초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다. 초기농도 21 ppm인 H₂S는 12초 반응시켰을 때 33.33 % 분해되었고, 30초 반응시켰을 때 71.43 % 분해되었으며, 48초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다.

Table 6. Hydrogen sulfide removal efficiency results(%)

Time (sec) H ₂ S (ppm)	0	6	12	18	24	30	36	42	48
71	0	12.68	25.35	38.03	50.70	63.38	76.06	88.73	100
50	0	14.00	28.00	42.00	54.00	66.00	80.00	92.00	100
41	0	12.20	24.39	36.59	48.78	60.98	73.17	85.37	100
30	0	13.33	26.67	40.00	53.33	63.33	76.67	90.00	100
21	0	14.29	33.33	47.62	57.14	71.43	80.95	95.24	100

Fig. 6은 H₂S 농도별 반응시간에 따른 제거효율을 그래프로 나타낸 것이다.

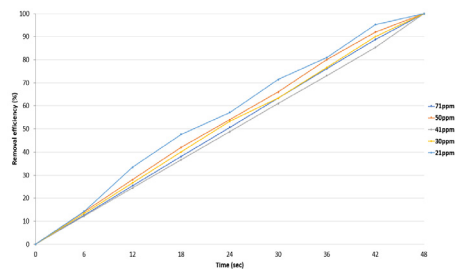


Fig. 6. Hydrogen sulfide removal efficiency with time.

H₂S는 초기농도 21~71 ppm까지 대기압 플라즈마와 반응시켰을 때 6초 후부터 빠르게 제거되었으며, 24

초에서 21 ppm은 57.14 %, 30 ppm은 53.33 %, 41 ppm은 48.78 %, 50 ppm은 54 %, 71 ppm은 50.70 % 분해되었다. 초기농도 21 ppm이 제거효율이 가장 높았으며, 대부분 비슷한 경향을 보였다.

3.4 C₆H₆ 분해 결과

반응기에 연결된 대기압 플라즈마의 출력은 500 W로 하였으며, 압축가스의 압력은 1.16 Bar로 하였다. 반응기에 C₆H₆ 시료를 일정 시간 주입하고 반응기 내의 초기 농도를 GC/FID를 이용하여 계측하였다. 대기압 플라즈마를 이용하여 반응시켰으며 반응 중 실린더로 시료를 포집하여 GC/FID를 이용하였다.

Table 7은 플라즈마와 C₆H₆를 반응으로 반응기 내의 농도를 나타낸 것이다.

초기농도 33.93 ppm인 반응조 내의 C₆H₆는 연결된 대기압 플라즈마와 8초 반응시켰을 때 15.82 ppm으로 감소하였고, 16초 반응시켰을 때 6.75 ppm으로 감소하였으며, 24초 반응시켰을 때 3.69 ppm으로 감소하였다. 초기농도 16.80 ppm인 C₆H₆는 8초 반응시켰을 때 6.30 ppm으로 감소하였고, 16초 반응시켰을 때 3.20 ppm으로 감소하였으며, 24초 반응시켰을 때 1.46 ppm으로 감소하였다. 초기농도 12.72 ppm인 C₆H₆는 8초 반응시켰을 때 3.42 ppm으로 감소하였고, 16초 반응시켰을 때 0.88 ppm으로 감소하였으며, 24초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다.

Table 7. Benzene removal results(ppm)

Time (sec) C ₆ H ₆ (ppm)	0	4	8	12	16	20	24
33.93	33.93	25.03	15.82	11.34	6.75	4.57	3.69
16.80	16.80	10.96	6.30	4.02	3.20	1.45	1.46
12.72	12.72	6.20	3.42	1.51	0.88	0.28	0.00

Table 8은 Table 7.을 C₆H₆ 농도별 반응시간에 따른 제거효율을 식 (1)를 이용하여 나타낸 것이다.

초기농도 33.93 ppm인 반응조 내의 C₆H₆는 연결된 플라즈마와 8초 반응시켰을 때 53.37 % 분해되었고, 16초 반응시켰을 때 80.11 % 분해되었으며, 24초 반응시켰을 때 89.14 % 분해되었다. 초기농도 16.80 ppm인 C₆H₆는 8초 반응시켰을 때 62.48 % 분해되었고, 16초 반응시켰을 때 80.94 % 분해되었으며, 24초 반응시켰을

때 91.31 % 분해되었다. 초기농도 12.72 ppm인 C₆H₆는 8초 반응시켰을 때 73.11 % 분해되었고, 16초 반응시켰을 때 93.08 % 분해되었으며, 24초 반응시켰을 때 완전히 분해되었다.

Table 8. Benzene removal efficiency results(%)

Time (sec) C ₆ H ₆ (ppm)	0	4	8	12	16	20	24
33.93	0.00	26.24	53.37	66.57	80.11	86.53	89.14
16.80	0.00	34.74	62.48	76.04	80.94	91.39	91.31
12.72	0.00	51.28	73.11	88.10	93.08	97.82	100

Fig. 7은 C₆H₆ 농도별 반응시간에 따른 제거효율을 그래프로 나타낸 것이다.

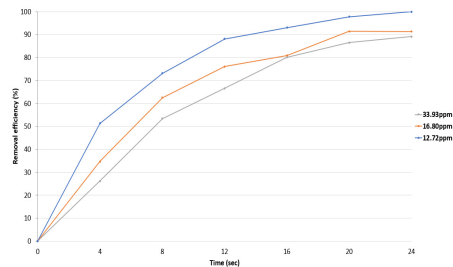


Fig. 7. Benzene removal efficiency with time.

C₆H₆는 초기농도 12.72~33.93 ppm까지 대기압 플라즈마와 반응시켰을 때 4초 후부터 빠르게 제거되었으며, 12초에서 12.72 ppm은 88.10 %, 16.80 ppm은 76.04 %, 33.93 ppm은 66.57 % 분해되었다. 초기농도 12.72 ppm이 제거효율이 가장 높았으며, 농도가 낮을수록 제거효율이 높았다. 초기농도 12.72 ppm의 경우 24초에서 완전히 분해되었으며, 초기농도 16.80 ppm, 33.93 ppm은 24초 이후에 완전히 분해되었다.

4. 결론

악취 발생원으로는 석유화학공장, 공공하수처리시설 및 분뇨처리시설, 폐기물처리시설과 음식물류폐기물을 처리하는 시설 등이 대표적이며, 악취방지법을 제정하여 악취로 인한 피해를 줄이려 하고 있으나 민원이 증가하는 추세이다.

본 실험에서는 악취물질 중 NH₃(암모니아), H₂S(황화

수소), C_6H_6 (벤젠)을 대기압 플라즈마를 이용하여 분해 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) NH_3 는 초기농도 15~50 ppm까지 대기압 플라즈마와 반응시켰을 때 6초 후부터 빠르게 제거되었으며, 24초에서 15 ppm은 46.67 %, 20 ppm은 55 %, 30 ppm은 46.67 %, 42 ppm은 50 %, 50 ppm은 64 % 분해되었다. 초기농도 50 ppm의 제거효율이 가장 높았으며, 초기농도가 높을수록 제거효율이 높은 경향을 보인다. 초기농도 50 ppm 경우 42초에서 완전히 분해되었으며, 초기농도 15 ppm, 20 ppm, 30 ppm, 42 ppm은 48초에서 완전히 분해되었다.
- 2) H_2S 는 초기농도 21~71 ppm까지 대기압 플라즈마와 반응시켰을 때 6초 후부터 빠르게 제거되었으며, 24초에서 21 ppm은 57.14 %, 30 ppm은 53.33 %, 41 ppm은 48.78 %, 50 ppm은 54 %, 71 ppm은 50.70 % 분해되었다. 초기농도 21 ppm이 제거효율이 가장 높았으며, 대부분 비슷한 경향을 보였다. 초기농도 21 ppm, 30 ppm, 41 ppm, 50 ppm, 71 ppm 모두 48초에서 완전히 분해되었다.
- 3) C_6H_6 는 초기농도 12.72~33.93 ppm까지 대기압 플라즈마와 반응시켰을 때 4초 후부터 빠르게 제거되었으며, 12초에서 12.72 ppm은 88.10 %, 16.80 ppm은 76.04 %, 33.93 ppm은 66.57 % 분해되었다. 초기농도 12.72 ppm이 제거효율이 가장 높았으며, 농도가 낮을수록 제거효율이 높았다. 초기농도 12.72 ppm의 경우 24초에서 완전히 분해되었으며, 초기농도 16.80 ppm, 33.93 ppm 은 24초 이후에 완전히 분해되었다.

NH_3 , H_2S , C_6H_6 모두 저농도에서 분해를 실시하였으며, 1분 이내의 시간에 제거되었다. 따라서 고농도의 악취오염에서도 대기압 플라즈마를 이용한 악취 제거가 가능할 것으로 판단되며, 대기압 플라즈마의 방전 출력을 증가시킨다면 악취 분해가 더욱 빠르게 가능할 것으로 판단된다. 또한, 두 가지 이상의 악취 물질이 섞여서 발생하는 복합악취에 대해서도 악취 분해도 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] C. Jang, "Decomposition of odor by plasma discharge and filter", Ph.D. dissertation, Incheon National University, pp.1-61, 2018.
- [2] I. S. Kim, "Research on Tracking system of Odor Emission by Real-time Odor Monitoring System", Ph.D. dissertation, Korea Polytechnic University, pp.1-32, 2009.
- [3] H. H. Kim. "A. Ogata, S. Futamura, "Nonthermal Plasma-Driven Catalysis of Benzene and Toluene", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, VOL.22, No.1, pp.43~51, 2006.
- [4] J. S. Jeong, "A Study on the Odor Characteristics per Source Category and the Odor Acceptance by the Public", Ph.D. dissertation, Korea National University of Transportation, pp.17-33, 2017.
- [5] H. J. Kang, "A study of octanal and nonanal analysis method using HPLC/UV and TD/GC/FID system", Master's thesis, Korea Polytechnic University, pp.1-5, 2014.
- [6] . C. H. Lee, "Study of eco-friendly NTAP(non-thermal atmospheric plasma) surface treatment process for polyolefin resin", Master's thesis, Kangwon National University, pp.1-10, 2019.
- [7] P. S. Kim, "Oxidation of Carbon Particles by O Radicals Generated in a AC Corona Discharge", Master's thesis. dissertation, Yonsei University, pp.24-27, 2002.
- [8] J. H. Park, "Catalytic Oxidation with or without Ozone at Low Temperature of Benzene over Mn Based Mesoporous Catalysts", Master's thesis, The University of Seoul, pp.12-15, 2012.
- [9] J. H. LEE, "A Study on VOCs and Odor Removal Processes bt Plasma", Ph.D. dissertation, Inha University, pp.51-56, 2012.

강 석 원(Seok-Won Kang)

[준회원]



• 2014년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 환경공학과 (학사)

<관심분야>
대기오염방지기술

이 재 식(Jae-Sik Lee)

[준회원]



- 2017년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 지구환경시스템공학과 (학사)

<관심분야>
대기오염방지기술

김 지 성(Ji-Seong Kim)

[준회원]



- 2016년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 지구환경시스템공학과 (학사)

<관심분야>
대기오염방지기술

이 강 산(Kang-San Lee)

[준회원]



- 2015년 2월 : 강원대학교 환경공학과 (공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 강원대학원 환경해양건설공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>
대기오염방지기술

이 정 대(Jeong-Dae Lee)

[준회원]

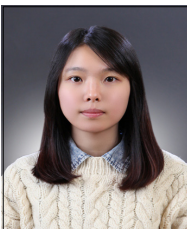


- 2007년 2월 : 강원대학교 환경방재공학과 (공학사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 강원대학교 강원대학원 지구환경시스템공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>
대기오염방지기술

임 희 아(Hee-Ah Lim)

[정회원]



- 2016년 2월 : 강원대학교 환경공학과 (공학사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 강원대학원 지구환경시스템공학과 석·박 통합과정 재학 중

<관심분야>
대기오염방지기술

박 월 수(Wol-Su Park)

[준회원]



- 2018년 2월 : 강원대학교 환경공학과 (공학사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 강원대학원 지구환경시스템공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>
대기오염방지기술

박 영 구(Young-Koo Park)

[정회원]



- 1989년 8월 : 홍익대학교 홍익대학원 화학공학과 (화학공학석사)
- 2002년 2월 : 홍익대학교 홍익대학원 화학공학과 (화학공학박사)
- 2008년 2월 ~ 현재 : 강원대학교 지구환경시스템공학과 교수

〈관심분야〉

대기오염방지기술