

Sliding Arc Plasma를 이용한 석유공장에서의 BTX 처리효율에 관한 연구

권우택 · 권이승* · 이우식*†

울지대학교 보건환경안전학과, *가톨릭관동대학교 의료경영학과, **가천대학교 화공생명공학과

BTX Treatment of a Petrochemical Plant by Sliding Arc Plasma

Woo-Taeg Kwon · Lee-Seung Kwon* · Woo-Sik Lee*†

Dept. of Environmental Health and Safety, Eulji University

*Dept. of Health Care Management, Catholic Kwandong University

**Dept. of Chemical & Biological Engineering, Gachon University

(Received October 15, 2015; Revised November 25, 2015; Accepted December 2, 2015)

요 약

본 연구는 울산소재 석유공장의 건조시설에서 발생하는 가스를 스크러버(Scrubber)로 최종 처리하여 배출되는 저 농도의 유해가스와 산 처리 시설에서 발생하는 고 농도로 발생하는 유해가스를 대상으로 연구하였다. 공정별로 벤젠(Benzene), 톨루엔(Toluene), 자일렌(Xylene) 및 총휘발성유기화합물(TVOCs)을 대상으로 측정하였으며 농도 측정은 TVOCs 측정기와 GC-MSD를 이용하여 SAP 전·후단의 TVOCs와 BTX의 농도를 측정, 분석하여 제거효율을 평가하였고, SAP 반응기는 5 단계로 구성하여 실험을 수행하였다. 슬라이딩 아크 플라즈마(sliding arc plasma) 반응기의 단수별에 따른 TVOCs 농도 변화는 유입 TVOCs 농도의 변화에 따른 처리효율 결과 481 ppm 미만에서 94.83%, 481 ppm 이상일 경우에는 1단에서는 89.07% 2단에서는 약 91% 이상으로 처리되는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과는 석유화학공장 및 제조시설에서 SAP 공정을 통한 VOCs 제거에 대한 연구 및 기술개발의 기초가 되어 VOCs의 보다 안정적인 처리와 다양한 기술개발에 효과가 있을 것으로 기대해 본다.

ABSTRACT

This research examines the removal efficiency of benzene, toluene, xylene (BTX) and total volatile organic compounds (TVOCs) by flowing VOCs, which are generated at a petrochemical complex in the Ulsan area, in a sliding arc plasma (SAP) reactor. The SAP reactor process is composed of 5 steps and the analysis was conducted using a BTX detector and TVOC measuring instrument. The removal efficiency of BTX was better at high concentration than at low concentration and the emitted TVOC concentration increased in later steps of the reactor. In addition, the removal efficiency improved, as the flow velocity increased. The maximum permissible concentration of TVOCs in the first step was about 481 ppm and showed over 94.83% efficiency when it was operated in the 2nd step at concentrations beyond 481 ppm. Therefore, there are many factors for improving the removal efficiency of SAP reactors at low concentration and measures should be prepared according to the application method for the various types of industrial reactors.

Keywords : Sliding arc plasma, TVOCs, Benzen, Toluene, Xylene

1. 서 론

산업의 발전 및 산업구조의 고도화로 인하여 사람들은 과거에 비해 윤택한 환경을 누릴 수 있게 되었으나, 이에 따른 환경문제⁽¹⁾는 20세기 후반에 들어서 긴급히 해결해야 할 문제로 부각되고 있다⁽²⁾. 다양한 사업장에서는 많은 대기오염물질이 배출되고 있으며 특히 화학공장과 반도체 공장 등의 제조공정에서 발생하는 수많은 배출가스는 대기 중으로 배출되어 여러 환경문제를 일으키고 있는 실정

이다^(3,4).

특히 대기오염의 뿐만 아니라 주된 악취 유발물질로 잘 알려진 휘발성 유기화합물(VOCs, volatile organic compounds)에 대한 관심은 날로 증가하고 있는 추세이다.

휘발성 유기화합물(VOCs)이란 증기압이 높아 대기 중으로 쉽게 증발되어 질소산화물과 공존 시 태양광의 작용에 의해 광화학반응을 일으켜 Ozone과 Peroxyacetyl nitrate 등 2차 오염물질의 원인이 되는 물질을 말한다. 한국의 경우 대기환경보전법에 따라 VOCs를 탄화수소류 중 석유화

†Corresponding Author, E-Mail: leews@gachon.ac.kr
TEL: +82-31-750-5594, FAX: +82-31-750-8839

ISSN: 1738-7167

DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2015.29.6.065>

학제품, 유기용제 및 그 밖의 물질로서 환경부 장관이 관계 중앙행정기관의 장과 협의하여 고시하는 것으로 규정하고 있다. 선진국에서는 ISO 등 각종 국제협약에 의거하여 기준치를 이미 설정하고 제어시설의 설치를 의무화하거나 장기적인 계획에 따라 발생량의 감소대책을 마련하여 실행하고 있다.

이러한 휘발성 유기화합물은 연료의 불완전연소와 석유류제조 및 제품, 유기용제사용, 자동차, 주유소, 세탁소, 도료제조시설, 인쇄 및 출판시설, 각종 도장시설 등이 주요 배출원으로 알려져 있다⁽⁵⁾.

또한, 광화학 스모그의 주범이며 물질에 따라 심한 악취를 동반하며 눈과 피부 그리고 호흡기 등에 자극을 주어 근로자들의 작업 능력을 저하시키며, 장기적인 피해로 직업병과 정서 불안 등을 유발시킨다.

악취 및 VOCs 처리에 대한 다양한 공법 중에서 플라즈마 공법은 최근 다양하게 개발 연구⁽⁶⁾되고 있으며, 효율적인 측면에서도 입증되고 있다. 하지만 에너지와 경제성 그리고 안정적 측면 등에서는 아직 풀어야 될 과제들이 많은 것으로 알려져 있다.

미국의 Sematech의 경우 Silent Discharge Plasma (SDP)를 이용하여 IPA, Acetone, PGMEA, Methanol 등을 제거하는 실험을 실시하여 90% 이상의 효율을 얻었음을 보고⁽⁷⁾하고 있다. 이 방법은 에너지 소비량이 많고 반응기 내의 차압이 높으며, 방전관의 오염 등에 따른 효율 저하의 단점을 가진다.

Lee와 Park⁽⁸⁾은 전자빔 플라즈마를 이용하여 도장 공장의 VOCs를 제거하고 소용량 Lab 실험으로 90% 이상의 효율을 얻었으나 산업에 적용하기에는 설비적인 측면에서 어려운 점으로 검토된다. 또 유전체장벽 방전을 이용하여 톨루엔을 30~40% 제거한 연구결과⁽⁹⁾도 있으며, 저온 플라즈마를 이용하여 VOCs 및 유해가스를 처리하는 보고서⁽¹⁰⁾도 있다. 그러나 유전체장벽 방전방식은 본 연구의 슬라이딩 아크 플라즈마(sliding arc plasma)에 비하여 에너지 사용량이 10배 이상이며, 전극에 Carbon black 등의 탄화 물질의 오염으로 인하여 유지보수 및 설치의 안정성에 있어 보완될 부분이 상당히 많다⁽¹¹⁾.

이에 비하여 슬라이딩 아크 방전 탈취법은 특정 라디칼과 이온은 유해가스 속의 수분과 반응해서 강력한 산화력을 가지는 OH 라디칼로 전환된다. 공기 중에서 OH 라디칼의 산화력은 오존보다 1,000배 이상이기 때문에 유입되는 잔류 유해 오염가스 속에 포함된 냄새, 세균, 곰팡이 및 다양한 오염물질들은 OH 라디칼에 의해 쉽게 산화되어 무해한 CO₂와 H₂O로 전환되기 때문에 강력한 탈취, 살균, 멸균효과를 일으킨다. 플라즈마 반응기 방전관의 조건변경에 따른 연구 개발을 진행하여 최적의 방전관 조건을 확립하고, 고효율의 방전관 시스템 구성에 대한 연구⁽¹²⁾를 한 바 있다.

따라서 본 연구에서 이용한 슬라이딩 플라즈마 공정 장치⁽¹³⁾는 유해가스를 직접 아크와 접촉 반응시켜도 전극 냉

각이 필요 없고, 전극소모가 거의 없으며 플라즈마 아크 반응온도를 쉽게 조절할 수 있는 기술적 특징을 가지고 있는 장점을 이용하여 SAP의 검증 차원과 휘발성유기화합물 중 벤젠(Benzene), 톨루엔(Toluene), 자일렌(Xylene) 및 총휘발성유기화합물(TVOCs)의 처리효율에 대하여 연구하고자 한다.

2. 연구 대상 및 장치

2.1 연구 대상

본 연구는 울산소재 석유공장의 건조시설에서 발생하는 가스를 스크러버(Scrubber)로 최종 처리하여 배출되는 저농도의 유해가스와 산 처리시설에서 고농도로 발생하는 유해가스를 대상으로 연구하였다. 두 처리시설에서 발생하는 물질 중에서 발암성 물질이며, 실내공기질에서 문제시 되는 벤젠(Benzene), 톨루엔(Toluene), 자일렌(Xylene) 및 총휘발성유기화합물(TVOCs)을 대상으로 측정하였으며, 농도 측정은 TVOCs 측정기(성화전자, RAE 3000)와 GC-MSD(GC: Agilent, HP 6890, MSD: Agilent, 5973N)를 이용하여 SAP 전·후단의 TVOCs와 BTX의 농도를 측정, 분석하여 그 처리효율을 평가하였다.

2.2 SAP 반응기

2.2.1 방전관

판넬형(Funnel-type)의 두 개 이상의 전극 사이에 고전압과 저전류가 통과할 때 전극 사이에서 아크 불꽃 방전이 발생되면서 플라즈마가 생성되고, 이를 빠른 유속의 유체가 밀어주면서 슬라이딩 되는 방법이다. 이것은 고온의 플라즈마 아크 특성과 저온의 플라즈마 아크 특성을 동시에 가지고 있어 BTX 제거에 필요한 플라즈마 활성 입자 즉, 라디칼, 이온, 원자, 전자 등을 쉽게 얻을 수 있다. SAP 장비는 총 5단으로 구성되며 50 A 방전관을 사용하였다.

2.2.2 반응촉진용 필터

반응 촉진을 돕는 촉매 층은 허니콤 형태의 반도체 촉매로 구성되어 있으며, 공극 크기는 200 cpsi(cells per square inch)이고 셀 내부는 TiO₂ 용액으로 코팅되어 있다. 촉매의 주 역할은 미 사용된 플라즈마 활성 입자와 미처리된 유해가스간의 접촉시간을 늘려주어 안전한 물질로 최종 배출시켜주는 역할을 한다. 이때 촉매의 활성원은 플라즈마 방전관에서 공급되는 빛(파장)이다.

2.2.3 플라즈마 발생장치

플라즈마를 발생시키기 위해 플라즈마 반응기 안의 방전관에 공급되는 전원은 교류, 고주파, 고전압 전원 등이 사용된다. 전기공급장치는 주파수 변환장치(인버터)와 승압 변압기로 구성되어 있고 가스 처리용량, 물질의 성질 및 농도에 따라 아크 주파수, 전류 및 전압이 결정된다.

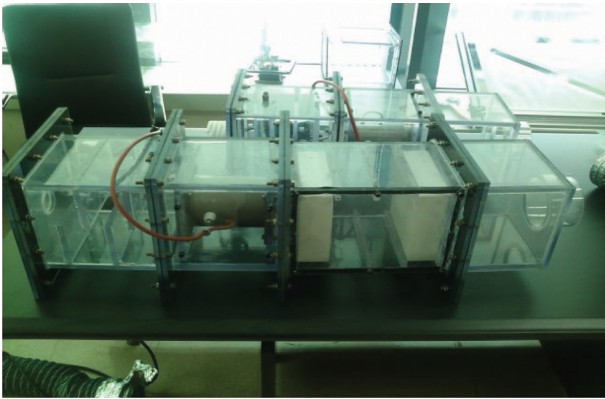


Figure 1. Structure of reactor.

2.2.4 플라즈마 공기유입장치

공기유입장치는 방전관의 하부에 위치하며 플라즈마 공급 송풍기를 이용하여 일정공기를 유입시켜 방전관에서의 유속을 10 m/s 이상으로 유지시켜 아크를 안정적으로 유도한다.

2.3 실험방법

2.3.1 건조시설 후단을 통한 Scrubber 배출 가스분석 (Case 1)

건조시설로부터 배출되어 최종적으로 스크러버에서 외기로 배출되는 저농도 VOCs의 측정은 스크러버의 stack 측정구에 SAP duct를 Tie-In 시킨 후 저농도 VOCs를 SAP 장치에 통과시키면서 검지기를 통한 분석을 실시하였다. 이때 유량을 6.92 CMM으로, SAP의 전단 유입 온도는 8.5 °C, 출구 온도는 27.4 °C이며 SAP 운전 단수는 1 단을 기본으로 설정하여 분석하였다. 또한 TVOCs 검출기

를 통해 단수와 유량의 변화를 주어 TVOCs의 변화량도 측정하였다.

2.3.2 산 처리시설 후단의 활성탄 흡착탑을 통한 배출 가스분석(Case 2)

산 처리시설에서 배출되는 고농도의 VOCs의 측정 분석은 유량을 6.97 CMM으로, SAP의 전단 유입 온도는 12.4 °C, 출구 온도는 27 °C이었다. SAP 단수는 1단을 기본으로 설정하여 분석하였으며, 단수의 변화와 TVOCs의 농도 변화에 따른 처리효율을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 건조시설 후단의 Scrubber 배출가스(Case 1)의 경우

3.1.1 처리효율의 측정

SAP 전단에서의 BTX 농도를 GC-MSD로 분석한 결과, Table 1과 같이 1차 측정시에는 벤젠 0.05 ppm, 톨루엔 2.5 ppm, 자일렌 2.1 ppm, 2차 측정시에는 벤젠 0.4 ppm, 톨루엔 3.5 ppm, 자일렌 4.0 ppm으로 측정되었으며, SAP 반응기를 통해 처리된 BTX의 N.D.는 검출한계(벤젠 5 ppb, 톨루엔 7 ppb, 자일렌 7 ppb) 이내로 검출된 것을 의미한다.

SAP 반응기를 통해 저농도의 BTX 처리효율은 GC-MSD를 이용하여 측정하였으며 그 변화량은 Table 2와 같다.

벤젠의 경우에는 인입 농도보다 배출 농도가 높게 측정되는 현상을 확인 할 수 있었으며, 톨루엔의 경우 83.3%로 높은 처리효율을 나타냈으며, 자일렌은 44.7%의 낮은 처리효율⁽¹⁴⁾을 보였다.

이는 플라즈마로 인한 오염물질이 분해하는 과정으로

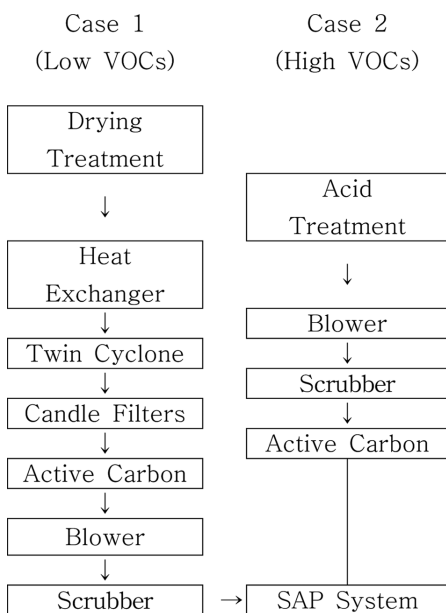


Figure 2. Scheme of exhaust gas flow.

Table 1. Detection Amount of BTX

VOCs Comp.		SAP Inlet Conc. (ppm)	SAP Outlet Conc. (ppm)
Benzene	1st	0.05	N.D.
	2nd	0.40	N.D.
Toluene	1st	2.50	N.D.
	2nd	3.50	N.D.
Xylene	1st	2.10	N.D.
	2nd	4.00	N.D.

Table 2. Analysis of Removal Efficiency of BTX

VOCs Comp.	SAP Inlet (ppm)	SAP Outlet (ppm)	Removal Efficiency (%)
Benzene	0.150	0.180	-
Toluene	0.078	0.013	83.3%
Xylene	0.150	0.083	44.7%

인해 고분자의 VOCs 가스들이 완전히 분해되지 않고 저분자 형태의 VOCs 성분으로 변환된 것으로 판단된다.

일반적으로 SAP 반응기에 오존을 투입하여 방전관에서 산화 라디칼인 $-OH$, $O^{\cdot-}$ 을 대량 발생시켜 악취 및 VOCs를 산화시키는데, 본 연구에서는 연구대상 건조시설의 오존사용에 따른 위험성을 감안하여 오존을 사용하지 않으므로 산화 라디칼의 부족으로 분해된 VOCs 성분이 안전한 물질로 변환되지 못한 것으로 판단된다.

3.1.2 단수 변화에 따른 TVOCs 제거효율

건조시설의 Scrubber에서 배출되는 저농도 가스를 SAP 반응기에 유입시켜 SAP 반응기의 단수별로 유입 및 배출 가스에 대한 TVOCs 농도 변화를 측정 한 결과는 Figure 3과 같다. SAP 반응기로 유입되는 TVOCs의 평균 유입농도는 1단 26.3 ppm, 2단 26.5 ppm, 3단 26.2 ppm, 4단 26.6 ppm, 5단 26.4 ppm으로 확인하였으며, 배출구에서의 TVOCs의 농도는 Figure 4와 같이 평균적으로 1단 6.2

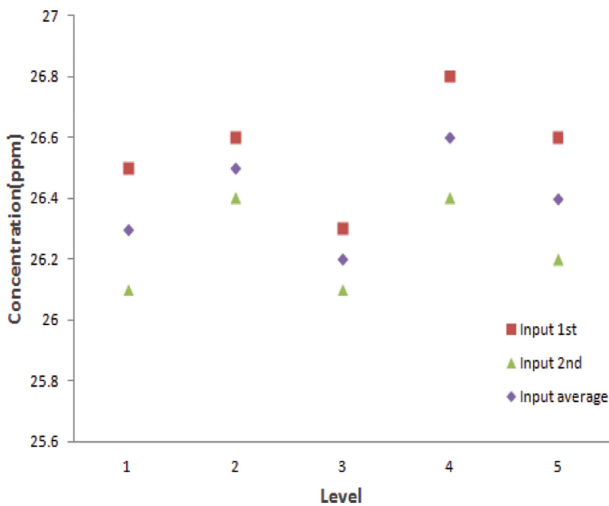


Figure 3. TVOCs inflow concentration.

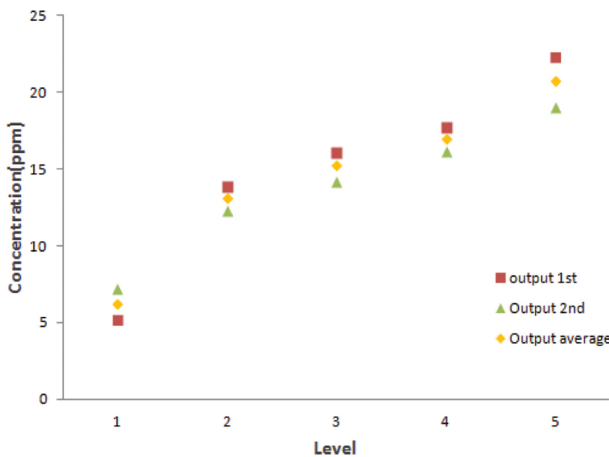


Figure 4. TVOCs outflow concentration.

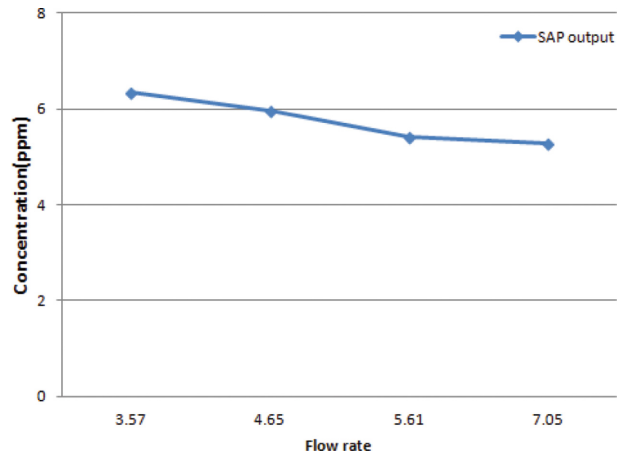


Figure 5. TVOCs emission concentration of flow.

ppm, 2단 13.1 ppm, 3단 15.2 ppm, 4단 17.0 ppm, 5단 20.7 ppm으로 SAP 반응기로 유입되는 TVOCs의 농도는 비슷하였으나, 단수가 증가할수록 배출되는 TVOCs의 농도가 증가하는 경향을 확인하였다. 단수에 따른 TVOCs의 제거효율은 1단 76.4%, 2단 50.7%, 3단 42.0%, 4단 36.1%, 5단 21.6% 나타났으며, 단수가 증가할수록 TVOCs의 제거효율이 감소하는 경향을 확인하였다.

이는 플라즈마로 인하여 VOCs 성분이 분해되어 새로운 형태의 VOCs 성분을 생성한 것으로 판단된다. 즉 단수가 증가하면서 유입되는 에너지의 양이 증가하여 VOCs 성분들이 다른 형태의 VOCs로 전환될 확률이 높아지는 것으로 판단된다.

3.1.3 유량 변화에 따른 TVOCs 제거효율

유량의 변화에 따른 TVOCs 농도 변화는 Figure 5와 같다. SAP 반응기로 유입되는 유량이 적을수록 TVOCs 농도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 SAP 단수 조절과 동일한 원인으로 SAP로 유입되는 가스의 속도가 느릴수록 SAP 내에 체류시간이 증가함으로써, 플라즈마 접촉시간이 증가하여 VOCs 성분이 변형된 것으로 판단된다.

3.2 산 처리시설 후단에 활성탄 흡착탑을 통한 배출가스(Case 2)의 경우

3.2.1 처리효율의 측정

GC-MSD를 이용하여 분석한 BTX의 변화량은 Table 3과 같으며, SAP 반응기를 통해 고농도의 BTX의 처리효율은 벤젠은 89.9%, 톨루엔은 88.6%, 자일렌은 84.3%로 높은 처리효율을 나타냈다.

이는 VOCs의 분해속도와 농도는 지수함수적 관계가 있어 고농도의 VOCs는 어느 정도의 농도까지는 급격히 제거가 된다는 연구결과⁽¹⁵⁾와 비슷한 결론을 얻을 수 있었다.

저농도와 고농도의 처리효율의 결과를 비교하여 볼 때, 저농도의 가스 처리효율보다 고농도의 가스 처리효율이

Table 3. Analysis of Removal Efficiency of BTX

VOCs Comp.	SAP Inlet (ppm)	SAP Outlet (ppm)	Removal Efficiency (%)
Benzene	16.61	1.690	89.8%
Toluene	4.92	0.564	88.6%
Xylene	1.22	0.192	84.3%

더 높게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이는 동일 에너지를 투입할 때 VOCs의 분해량이 동일하다고 하면 저 농도의 처리효율(Table 2)이 높아야만 하지만 검출기의 감지 농도 범위 및 실험적 오차 또는 공정에서 발생하는 가스의 성상 및 특성을 파악하는데 어려움이 있어 이를 정확하게 평가할 수 없다고 판단된다.

3.2.2 단수 변화에 따른 TVOCs 처리효율

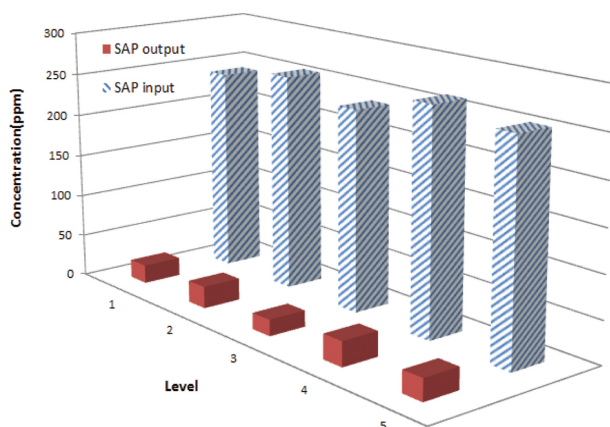
SAP 반응기로 유입되는 TVOCs 값은 평균 250 ppm으로 측정되었으며, 단수에 따른 TVOCs의 제거효율은 Figure 6에 나타내었다.

건조시설 후단의 Scrubber 배출가스(Case 1)의 경우는 에너지 소모량이 증가할수록 TVOCs 농도가 상승하였고, 1단 운전시 약 95%의 처리효율이 나타났다.

또한 산 처리시설 후단에 활성탄 흡착탑을 통한 배출가스(Case 2)의 경우 소각로 By-Pass 가스를 이용하여 SAP 반응기(유입 TVOCs 240~772 ppm)로 처리 후 배출되는 TVOCs의 농도 변화에 따른 처리효율 결과는 Table 4와 같이 SAP 반응기로 유입되는 TVOCs 농도가 증가함에 따라 배출가스의 농도가 상대적으로 증가하는 것으로 확인하였다.

처리효율은 1단에서의 TVOCs 값이 481 ppm 미만에서는 평균 94.83%의 효율을 나타내었지만, 481 ppm 이상에서는 평균 89.07%로 효율이 떨어졌다.

2단에서의 처리효율은 2번의 측정밖에 수행하지 못했으

**Figure 6.** TVOCs emission concentration with the number of SAP.**Table 4.** Efficiency of Change According to input TVOCs Concentration

No	SAP Input (ppm)	SAP Output (ppm)	Efficiency (%)
1	240	10	95.8
2	256	12	95.3
3	303	15	95.0
4	326	17	94.8
5	419	21	95.0
6	481	33	93.1
7	511	47	90.8
8	543	58	89.3
9	578	66	88.6
10	627	71	88.7
11	739	85	88.5
12	772	89	88.5

나, 700 ppm, 780 ppm의 TVOCs 농도가 유입되었을 때 제거효율이 약 91% 이상으로 처리되는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 통해서 볼 때 유입가스 농도가 240 ppm 이상의 농도가 유입될 경우에 플라즈마의 에너지 발생량을 증가시키면 TVOCs의 처리효율이 향상될 것으로 보인다.

산 처리시설 후단(Case 2)의 경우에는 By-Pass를 이용하여 SAP 반응기로 유입되는 가스는 VOCs 투입 농도가 일정하지 않고 연속적으로 hunting을 하였기 때문에 결과에 약간의 실험적 오차를 감안하고 해석하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 석유화학공장에서 배출되는 저 농도(건조시설)와 고 농도(산 처리시설) 처리시설로 나누어 Sliding Arc Plasma (SAP) 공정을 적용하여 벤젠, 톨루엔, 자일렌 등의 유해가스 제거 효율의 특성을 평가하고 플라즈마 공정 개발을 위한 기초 자료의 수집 방안으로 실험하였다. 이에 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 저 농도의 처리시설에서 SAP를 통해 배출된 BTX를 측정된 결과 모두 검출되지 않았다. 또한 TVOCs의 양을 통해 BTX 농도를 산정한 결과 톨루엔의 경우 83.3%, 자일렌은 44.7%, 벤젠의 경우에는 농도가 오히려 증가하였으며 이는 플라즈마로 인한 오염물질이 분해하는 과정으로 인해 고분자의 VOCs 가스들이 완전히 분해되지 않고 저분자 형태의 VOCs 성분으로 변환된 것으로 판단된다.

2) 고 농도의 처리시설에서 SAP를 통해 배출된 BTX 농도를 산정한 결과 벤젠 89.9%, 톨루엔이 88.6%, 자일렌 84.3%의 높은 제거효율을 나타냈다.

3) SAP 반응기의 단수에 따른 TVOCs 농도 변화를 측정된 결과 저 농도일 때 SAP 반응기로 유입되는 TVOCs

의 농도는 비슷하였으나, 단수가 증가할수록 배출되는 TVOCs의 농도가 점차적으로 증가하는 경향을 확인하였으며, 1단에서는 95% 이상 제거되는 것을 확인하였다. 고농도일 때는 SAP 반응기로 유입되는 TVOCs 농도가 증가함에 따라 배출가스의 농도가 상대적으로 증가하는 것으로 확인하였으며, by-pass 가스를 통해 유입된 TVOCs 농도의 변화에 따른 처리효율 결과 481 ppm 미만에서 94.83%, 481 ppm 이상일 경우에는 1단에서는 89.07%, 2단에서는 약 91% 이상으로 처리되는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해서 제조공정마다 차이가 있으나 고농도의 VOCs를 발생시키는 공정 및 시설에서는 SAP를 통한 VOCs 저감기술이 매우 실용적일 것이라 판단되며 추가로 SAP 공정에 촉매탑 또는 약액세정 등의 공정을 설치하여 저농도의 VOCs 처리효율⁽¹⁶⁾도 높일 수 있을 것으로 사료된다.

이러한 연구가 석유화학공정 및 제조시설에서 SAP 공정을 통한 VOCs 제거에 대한 연구 및 기술개발의 기초가 되어 VOCs의 보다 안정적인 처리와 다양한 기술개발에 효과가 있을 것으로 기대해 본다.

References

1. Ministry of Environment, "Improving Comprehensive Measure of Odor Prevention" (2012).
2. J. C. No, "History of Environmental Problems: Industrial Pollution, Environmental Damage and Environmental Risks, Korean Sociological Association", pp. 47-68 (2008).
3. D. G. Kim, E. J. Lee, S. J. Lee, J. S. Kim, J. S. Cha, D. G. Lee, Y. S. Uhm, S. A. Bang, et al., "A Study on the Emission Characteristics and the Estimation of Emission Factor for Air Pollutants in Semiconductor Manufacturing, Proceeding of the 38th Meeting of KOSAE (2004)", Korean Society for Atmospheric Environment, pp. 143-144 (2004).
4. D. H. Cho, I. S. Song, I. G. Kim, W. S. Kim, J. B. Kim, T. H. Kim, S. M. Hwang and W. K. Nam, "The Emission Characteristics of Odor Compounds from Chemical Industry in the Ban-Woll & Shi-Wha Industrial Complex", Korean Journal of Odor Research and Engineering, Vol. 5, No. 4, pp. 207-216 (2006).
5. J. H. Hong, J. S. Han, C. Yu, Y. A. Lee and J. H. Cho, "Air Emission Source Survey" (2012).
6. H. G. Kim, T. I. Park and N. S. park, "The Plasma System for Removal Of VOCs/Odor", Proceedings of Spring Conference (2005), Korean Society of Odor Research and Engineering, pp. 177-179 (2005).
7. J. J. Coogan and A. S. Jassal, "Silent Discharge Plasma (SDP) for Point-of-use (POU) Abatement of Volatile Organic Compound (VOC) Emissions": Final Report (ESH003). SEMATECH Technology Transfer Document 97023244A-ENG (1997).
8. J. H. Lee, J. R. Park, B. S. Han, J. C. Kim, J. G. Kim, J. C. Kim, B. Y. Nam and J. Y. Koh, "Development of Removal Technology for Odor and VOC using Electron Beam Irradiation", Proceedings of Autumn Conference (2002), Korean Society of Odor Research and Engineering, pp. 163-166 (2002).
9. J. H. Park, Y. S. Jo, K. Y. Yoon, J. H. Byeon and J. H. Hwang, "Removal of Gaseous Toluene using a Plate-type Dielectric Barrier Discharge Reactor", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 26, No. 6, pp. 641-648 (2008).
10. S. J. Kim, "Emission Control Technology Development using Non-thermal Plasma" (2004).
11. Z. Bo, J. H. Yan, X. D. Li and K. Cen, "Scale-up Analysis and Development of Gliding Arc Discharge Facility for Volatile Organic Compounds Decomposition", Journal of Hazardous Materials, Vol. 155, pp. 494-501 (2008).
12. W. S. Lee and W. T. Kwon, "A Study on Ammonia Removal by Sliding Arc Plasma", Korean Journal of Odor Research and Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 180-183 (2011).
13. W. T. Kwon and W. S. Lee, "A Study on Combined Processes of Sliding Arc Plasma and Corona Dielectric Barrier Discharge for Improve the Efficiency Treatment of Harmful Substance", Fire Science and Engineering, Vol. 28, No. 6, pp. 108-113 (2014).
14. M. J. Park and Y. M. Jo, "Plasma Decomposition of Organic Odors in a Pilot Scale", Proceedings of Autumn Conference (2014) Korean Society of Odor Research and Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 151-153 (2014).
15. K. W. hep, S. B. yang, S. H. Lee, Y. K. Hong, S. Y. Shin and J. H. Kang, "Study on the Decomposition of Some Volatile Organic Compounds by Photocatalyst Plasma Reaction", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 16, No. 4, pp. 163-166 (2000).
16. S. Y. Han, Y. H. Song, M. S. Cha, S. J. Kim, K. I. Choi and D. J. shin, "Characteristics of Toluene Destruction by Non-thermal Plasma in Packed with Catalyst Reactor", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 18, No. 1, pp. 51-58 (2002).