

연면방전 플라즈마를 이용한 톨루엔 처리에 관한 연구

Toluene Removal Using Surface Discharge Induced Plasma Chemical Process

부 문 자 · 봉 춘 근 · 김 신 도
서울시립대학교 환경공학과
(1997년 6월 10일 접수, 1997년 8월 26일 채택)

Moon-Ja Boo, Choon-Keun Bong, Shin-Do Kim
Department of Environmental Engineering, The University of Seoul
(Received 10 June 1997; accepted 26 August 1997)

Abstract

The experimental study by use of SPCP was fulfilled to remove toluene emitted from various industrial processes. First of all, discharge characteristic was experimented as the change of applied voltage and frequency. Then toluene removal characteristic was tested with the analysis of by-products.

As a result, optimum electrical discharge condition was from 20.0 kHz to 25.0 kHz of frequency and from 3.5 kV to 4.0 kV of voltage range. The variation of applied voltage had a more important effect on the removal characteristic of toluene than the frequency variation. The toluene removal efficiency was proportioned to ozone concentration and retention time on discharge plate. It was dropped as increase of toluene concentration, but total treated volume of toluene per power consumption was high. The decomposed toluene was transformed to CO, CO₂ and particulates, and the rate of transformation to particulates was higher than CO and CO₂ at high toluene concentration. Particulates were increased from 0.017 μm to 0.3 μm range of size distribution.

Key words : plasma, VOCs, SPCP, discharge, toluene

1. 서 론

휘발성 유기화합물 (Volatile Organic Compounds : 이하 VOCs라 함)은 유기용제를 사용하는 각종 산업공정에서 배출되고 있으며, 암을 유발시키거나 만·급성의 건강장해를 일으키고, 대기 중에서는 광화학 반응을 유발시키는 전구물질로 알려져 있다 (김윤신 등, 1993).

유기용제를 사용하는 작업장에서 VOCs에 대한 문제가 가장 심각하게 대두되고는 있지만, 현재 그 대책은 물론 현황 조사조차도 제대로 이루어지지 않고 있는 실정이다. VOCs를 제거하기 위한 제어기술은 소각(열, 촉매), 유기용제를 회수하기 위한 흡착법, 흡수법, 응축법 이외에도 신기술인 막분리, 자외선 산화법, 코로나 기술 등이 있지만 이들은 대부분 비교적 대용량으로 비용이나 규모, 운영면에서 작업환경에 적용하기에는 곤란한 점이 있다. 따라서

작업장내에서의 VOCs 처리는 환기 및 후드를 사용한 국소배기 등의 소극적 방법과 활성탄을 이용한 흡착 및 흡수액을 이용하는 기술 등이 적용되고 있으며 이중 흡착법에 의한 필터류가 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 필터는 농도가 낮은 경우에는 효율적이거나, 수명이 짧아 필터를 자주 교체해야 하는 불편함과 아울러 유지비가 많이 소요된다는 단점이 있다. 따라서 이들의 단점을 보완하고, 처리효율도 향상된 보다 효과적인 처리방식이 필요하다.

비평형 저온 플라즈마를 이용한 처리방식은 실내 공간에서의 국부적인 처리에 적합한 기술로 기존의 처리방식에서 발생할 수 있는 압력손실 등의 문제를 해결할 수 있고, 고효율로 처리할 수 있는 처리 방식 중의 하나로서 운전 및 유지관리면에서 유리한 점을 가지고 있다(Masuda, 1992).

본 연구에서는 연면방전 처리방식(Surface Discharge Induced Plasma Chemical Process : SPCP)을 사용하여 연속 반응실험을 통한 연면방전체의 플라즈마 발생 특성에 따른 적절한 처리조건을 파악하고, 이를 토대로 하여 작업장 환경에서 문제시되는 유기용제 중 많이 사용되는 톨루엔에 대한 처리능력을 평가하였다. 특히, 처리 후 잔존하는 O₃ 및 기타 반응생성물을 분석하고 처리 메커니즘을 파악하여 VOCs 처리에 SPCP 방식의 실제 적용가능성을 검토하여 보고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 연면방전관은 92% 순도의 알루미늄 세라믹의 기판위에 Pt/Ag paste로 유도전극을 인쇄한 것으로 크기는 100 mm × 50 mm × 0.625 mm이다(그림 1). 실험에서는 이 방전관을 130 mm × 80 mm × 6 mm의 반응기 내부에 위치시켰으며, 반응기는 방전시 발생하는 열을 외부로 용이하게 방출시키도록 열전달율이 큰 알루미늄 재질을 사용하였다. 전원공급장치(power supply)는 방전시 스파크가 발생하지 않는 조건에 맞도록 설계하여 출력전압 0~10 kV, 전류 0~1.0 A, 주파수 20~40 kHz 범위에서 조절이 가능하도록 제작하였다. 전압을 측정하기 위해 1000 : 1 고전압 probe (JOHN FLUKE MFG. Co., INC., USA, Accuracy ±5%, MAX 40,000V)를 사용하였으며, 전류값의 측정은 multimeter (JOHN FLUKE MFG. Co., INC., FLUKE 75 SERIESE MULTIMETER, USA)를, 주파수 및 파형의 분석은 digital oscilloscope (200MHz, DSO 475, GOULD, ENGLAND)를 사용하였다. 그림 2에는 실험장치의 개요도를 나타냈으며, 표 1에는 분석에 사용된 기기의 종류 및 사양을 나타냈다.

2.2.1 최적 방전조건 선정

연면방전체의 최적 방전조건을 찾기 위해 실험용

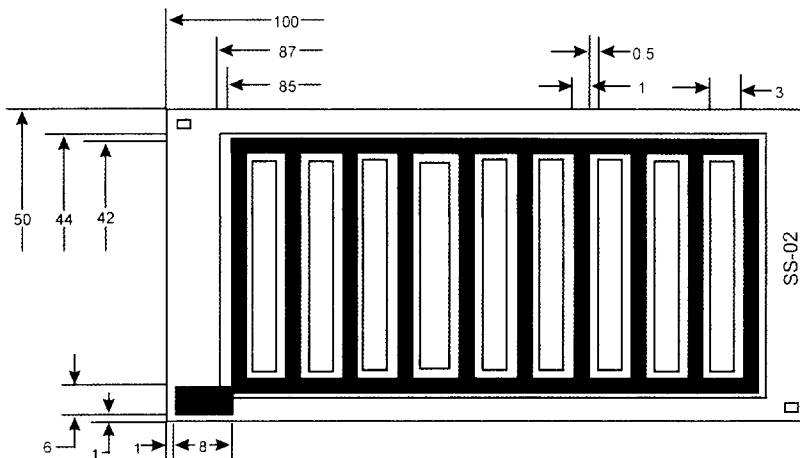


Fig. 1. The structure of SPCP plate.

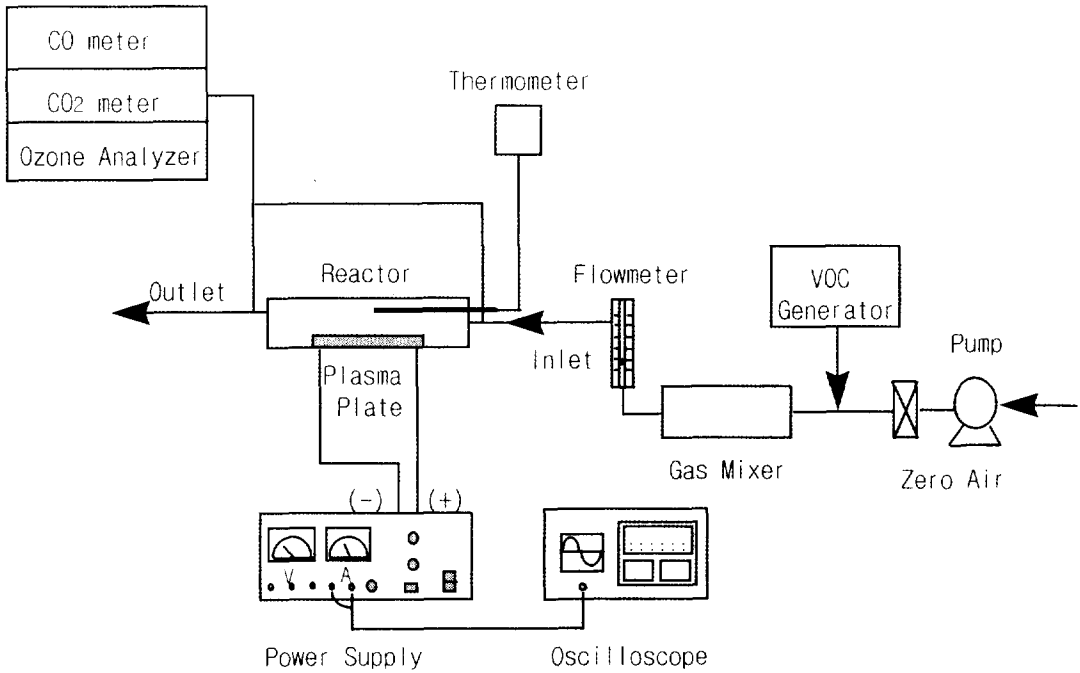


Fig. 2. Schematic diagram of experimental system.

Table 1. Measuring instrument list.

Item	Measuring Instruments	Measuring Principles & Range
Reactor Temperature	Digital thermometer, Antonics Co, Model T4L, Korea	Range : 0 ~ 399°C
Temperature & Humidity	Hygrometer (Dagatron)	-
Frequency	Digital Oscilloscope(200Ms/sec 200 MHz Oscilloscope (DSO) 475, Gould, England)	-
Voltage, Current	Power Supply (KSC Co.)	Range : Voltage : 0 ~ 10kV, Current : 0 ~ 1 A
Toluene	GC-MSD (HP 1800)	-
Ozone (O ₃)	API-400	Principle :UV Photometric method Range : 0 ~ 500 ppb, 0 ~ 500 ppm
CO	SIBATA CO-CO ₂ Meter	Principle : Electrostatic potential electrolysis method
CO ₂	SIBATA CO-CO ₂ Meter	Principle : NDIR Range : 0 ~ 2000 ppm (L), 0 ~ 5000 ppm (H)
Aerosol	DMPS (Differential Mobility Particle Sizer, TSI, MODEL 3932)	Principle : Electrical mobility detection Range : 0.0032 ~ 1.0 μm, 100 ~ 10 ⁷ count/cm ²

공기를 10 LPM의 유량으로 주입하고, 공급 전기 조건을 주파수는 20.0 ~ 35.2 kHz로, 전압은 0 ~ 5 kV로 변화시키면서 이에 따른 내부 온도변화, 소비전력량

등을 측정하고 O₃ 발생 및 변동 특성을 기초로 하여 최적 방전조건을 선정하였다. 이 때 공급 공기는 상온·상압하에서 온도가 20.0 ± 5°C, 습도가 50 ± 10%

였다.

2. 2. 2 처리대상물질의 선정 및 제조

처리대상물질은 유기용제 중 작업장에서 많이 사용하고 인체에 독성이 강한 톨루엔(고려대 환경화학 연구소, 1991)을 선정하였으며, 테프론 백에 일정량을 주입하고 실리카겔, molecular sieve, 활성탄을 통과시킨 건조공기를 이용, 희석하여 0~300 ppm의 일정 농도로 조절하였다.

2. 2. 3 분석 및 분석 대상물질의 선정

톨루엔의 정량분석은 미량펌프를 이용하여 100 ml/min의 유량으로 2분간 흡착튜브에 포집한 후 열탈착 장치를 연결한 GC-MSD를 이용하였다. 톨루엔의 처리 후 발생되는 물질은 O₃, NO_x 이외에 반응의 경로를 확인하기 위해 중간산물로 추정되는 HCHO를 공정시험법인 크로모트로핀산법과 검지관법을 병행하여 측정하였으며, 최종산물로 추정되는 CO, CO₂, 에어로졸 등의 물질도 병행하여 측정하였다. 플라즈마 처리 및 톨루엔 주입 전후의 입자상물질의 분포특성을 파악하기 위해 differential mobility particle sizer (DMPS, Model 3071, TSI, USA)를 사용하여 입자상물질의 개수농도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3. 1 방전특성 실험

연면방전판의 방전특성을 파악하기 위해 주파수를 20.0~35.2 kHz의 범위에서 변화시키고, 전압은 0~5kV로 변화시키면서 이에 따른 O₃의 발생량 및 내부 온도 변화, 소비전력량 등을 측정하였다.

전압을 더 높이면 방전판이 손상될 우려와 함께 전압, 전류가 매우 불안정하게 되므로 5kV를 한계 전압으로 하였다. 그림 3~그림 5에 방전특성을 파악하기 위한 실험결과를 나타냈다. 그림 3에서 보면 O₃이 생성되기 시작하는 개시전압과 O₃생성량이 최대가 되는 전압은 주파수를 20.0kHz에서 35.2 kHz로 증가시킬수록 3.5kV에서 2.5 kV로 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이때 O₃생성량은 방전시작 1~2분 정도 경과한 후에 최대값을 보이며, 주파수, 전압이 낮을 경우 O₃생성량은 일정하게 유지되나 주파수, 전압이 높아질수록 온도가 급격하게 상승하였고(그림 4), 이와는 반대로 O₃의 농도는 감소하는 경

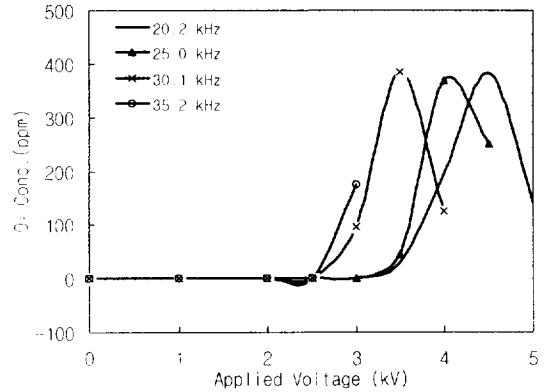


Fig. 3. O₃ concentration according to frequency & applied voltage.

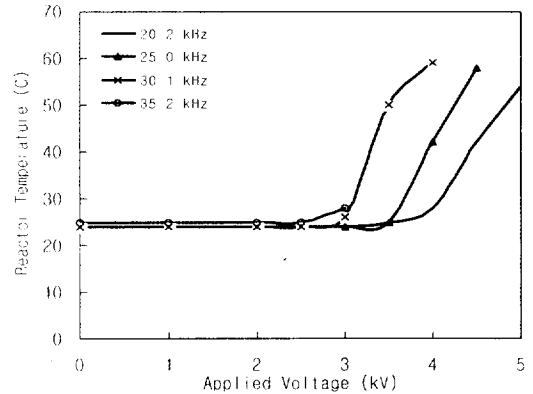


Fig. 4. The variation of inside temperature of reactor according to frequency & applied voltage.

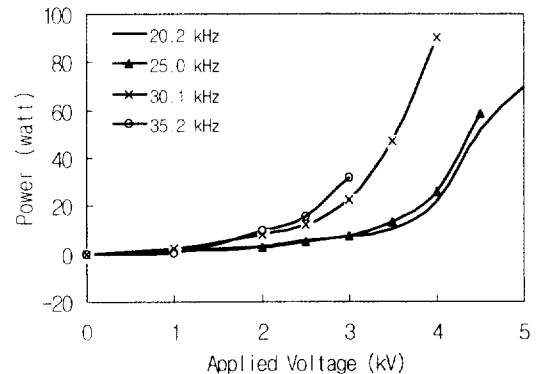


Fig. 5. Power consumption according to frequency & applied voltage.

향을 보였다. 이때 전류값은 0.02~1.0 Ampere 정도로 변화하였고, 전압과 전류값을 이용하여 소비전력을 산출하였을 경우 0.5~90.0 watt로 나타났으며, 방전전압이 상승함에 따라 전력소비량도 증가되었다(그림 5). 특성실험 결과 생성되는 O₃, 소비전력, 온도변화 등을 고려하여 볼때 주파수는 20.0~25.0 kHz 범위에서 방전전압 3.5~4kV의 범위에서 플라즈마를 안정하게 발생하는 것으로 생각되었다.

3.2 톨루엔의 처리실험 결과

3.2.1 톨루엔에 의한 오존의 발생특성

그림 6에는 톨루엔이 존재할 경우와 그렇지 않을 경우 O₃이 발생하는 경향을 나타냈다. 톨루엔을 주입하였을 경우에는 O₃의 농도가 높게 나타나는 경향을 볼 수 있는데, 이는 광화학반응과 유사하게 VOCs 존재시 O₂를 산화시키는 organic peroxy radical (RO₂)이 형성되어 O₃을 발생시키는 것으로 보인다(톨루엔의 경우 O₃의 생성능력을 표현하는 POCP(photochemical ozone creation potential)가 41~83 정도로 매우 높음, 대한석유협회, 1996). 또한 전압이 높을 때는 반응기내의 온도의 상승으로 인해 생성된 O₃가 분해되어 전체적인 O₃농도는 감소하는 것으로 생각된다.

3.2.2 전압에 따른 처리 특성

전압에 따른 처리특성을 파악하기 위하여 농도 100 ppm의 톨루엔을 유량 5 LPM으로 주입하였다.

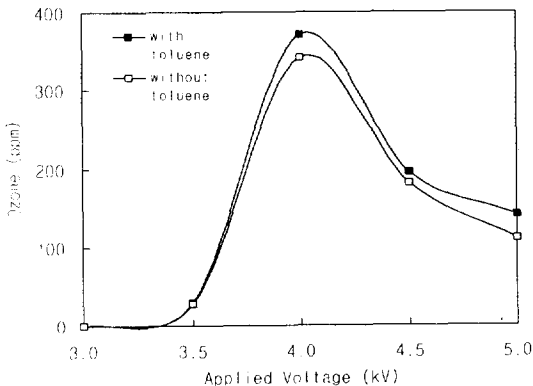


Fig. 6. The variation of O₃ production by toluene addition (at 5 LPM).

이때 주파수는 22.5 kHz로 고정하였으며, 전압은 플라즈마가 발생하기 시작하는 개시전압인 3.5 kV부터 5 kV까지의 범위에서 실험을 수행하였다. 그림 7에 전압의 변화에 따른 톨루엔의 처리율과 생성물 질인 O₃의 농도변화 특성을 나타냈다. 전압의 변화에 따라 처리효율은 크게 달라지는 경향을 보였으며, O₃의 발생이 최대(371 ppm)가 되는 4 kV에서 80% 이상의 높은 처리효율을 보였으나, 4 kV 이상의 고전압에서는 오히려 처리효율이 떨어지는 경향을 보였다. 그림에서 볼때 인가전압의 변화에 따른 전체적인 처리 경향은 O₃의 생성과 유사하게 변하고 있어 O₃에 의한 산화처리에 가장 많이 영향을 받는 것으로 사료된다.

그림 8은 플라즈마 처리시 발생하는 중간산물인 HCHO, 최종산물 CO, CO₂를 측정할 결과를 나타낸 것이다. CO는 처리효율과 유사한 경향을 보이면서 4.0 kV에서는 최대 224 ppm로 증가한 후 급격히 감소하였다. CO₂의 경우에는 그 증가량이 약 30 ppm 정도로 CO에 비해서는 작고, 거의 일정한 농도를 나타냈으며, 전압이 증가함에 따라 완만한 상승곡선을 보였다. 따라서 톨루엔은 분해되어 먼저 CO를 생성하고 이것이 CO₂로 서서히 변환되는 것으로 추정된다.

3.2.3 주파수에 따른 처리특성

그림 9~그림 10은 주파수에 따른 처리특성을 알아보기 위해 전압을 4 kV로 고정시키고, 유량 5 LPM, 톨루엔의 농도 100 ppm에서 주파수를 20.2~

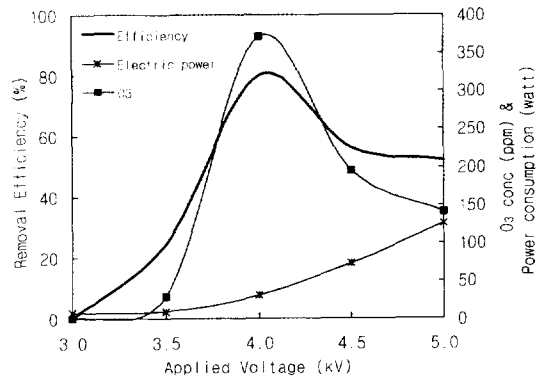


Fig. 7. The characteristics of removal efficiency, electric power, O₃ according to applied voltage.

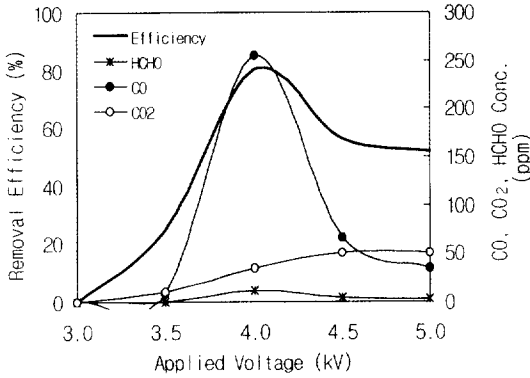


Fig. 8. The characteristics of by products according to applied voltage.

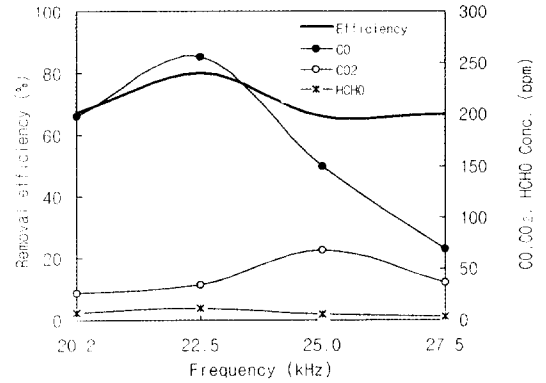


Fig. 10. The characteristics of products according to frequency.

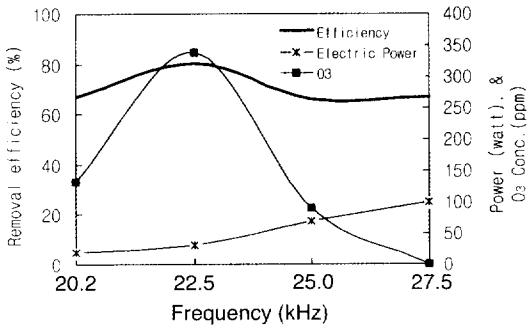


Fig. 9. The characteristics of removal efficiency, power consumption, O₃ according to frequency.

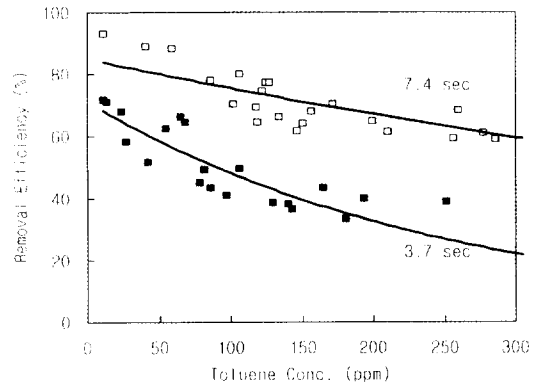


Fig. 11. The characteristics of removal efficiency according to concentration & residence time.

27.5 kHz로 변동시키면서 처리효율, O₃ 발생특성 및 기타 물질들의 농도를 나타낸 것이다. 처리효율의 경우 22.5 kHz에서 가장 높은 처리효율을 보이고는 있지만 비교적 주파수 변동에 따른 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. CO는 주파수가 27.5 kHz일 경우에 낮은 농도를 나타냈으며, CO₂와 HCHO는 전반적으로 유사한 값을 보이고 있었다.

3. 2. 4 농도 및 체류시간에 따른 처리특성

방향이 안정적으로 발생하는 상태인 주파수를 22.5 kHz로, 전압을 4 kV로 고정시키고, 주입공기 중의 톨루엔 농도를 50~300 ppm으로 변화시키면서, 유량을 5 LPM (7.4 sec)과 10 LPM (3.7 sec) 두가지로 조절하여 주입농도 및 체류시간에 따른 처리의 특

성을 검토하였다(그림 11, 그림 12). 그림에서 볼 때 농도가 높고, 유량이 많을수록 처리효율은 감소하는 것을 알 수 있다. 유입농도가 높을수록 처리효율은 낮아지지만 그림 12에서 볼 때 소비전력당 처리되는 톨루엔을 탄소량으로 산정하여 보았을 때 분해되는 총량은 증가하므로 농도가 높을수록 파괴된 양은 더욱 많은 것을 알 수 있다.

동일조건에서 체류시간을 7.4 sec (5 LPM), 3.7 sec (10 LPM)로 다르게 하면서 실험을 한 결과 체류시간을 길게 했을 때 더 높은 처리효율을 보였다. 처리효율은 체류시간 7.4 sec의 경우 $y=84.83C^{-0.0012x}$ ($R^2=0.6032$)의 식으로, 3.7 sec의 경우 $y=71.15C^{-0.0039x}$ ($R^2=0.8856$)의 식으로 나타낼 수 있으며, 소비전력

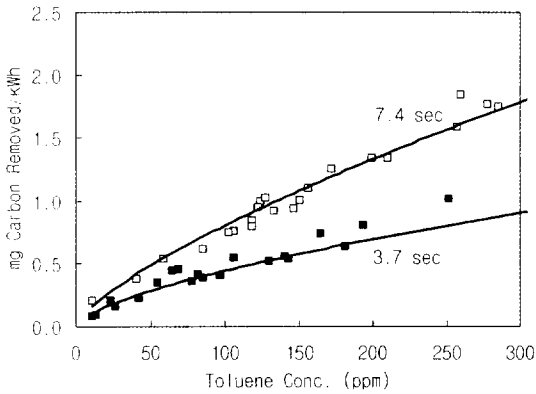
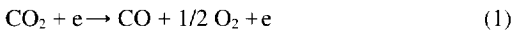


Fig. 12. The characteristics of removal carbon per power consumption according to concentration & residence time.

당 실제로 처리된 양을 탄소량으로 환산하여 보면 체류시간 7.4 sec의 경우 $y=0.0145C^{0.8558}$ ($R^2=0.9528$)의 식으로, 3.7 sec의 경우 $y=0.0229C^{0.6438}$ ($R^2=0.8591$)의 식으로 나타났다(그림 12).

톨루엔의 주입농도에 따른 생성물의 특성을 알아보기 위해 유량 5 LPM, 주파수 22.5 kHz, 전압 4 kV로 고정시키고, 농도 100, 200, 300 ppm에서 CO, CO₂의 농도를 측정하여 이를 기준으로 농도에 따라 톨루엔이 전환되는 특성을 파악하였다.

CO₂는 대기중에 약 350 ppm 정도 존재하고 있고, 식 (1)~식(2)에 따라 전환될 가능성이 있으므로 우선 톨루엔의 주입없이 플라즈마 공정에 통과시켰다. 그 결과 CO는 70 ppm 증가하였고, CO₂는 50 ppm 감소하였다.



CO₂ 배농도에 의한 CO, CO₂ 변화를 고려하여 CO와 CO₂로의 전환율을 보면 100 ppm과 200 ppm에서는 거의 절반인 45~53% 정도가 CO와 CO₂로 전환되었으나 300 ppm의 고농도에서는 약 17% 정도만이 CO와 CO₂로 전환된 것으로 나타났다(그림 13).

3.2.5 플라즈마 반응에 따른 입자상물질의 분포특성
플라즈마 반응에 따른 입자상물질로의 변환특성

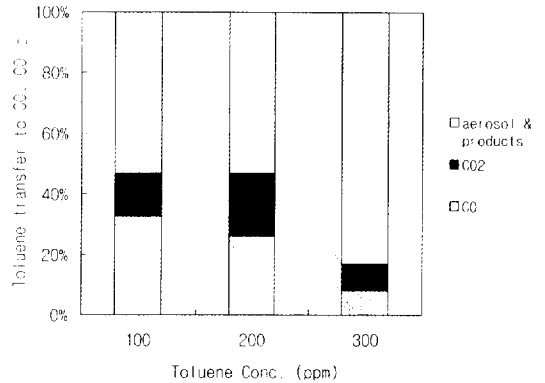


Fig. 13. Rate of transformation from toluene to CO, CO₂ and aerosol etc., according to toluene concentration.

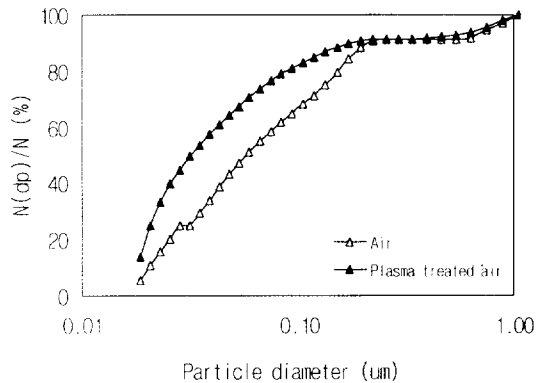


Fig. 14. The variation of accumulative particle size distribution in air by plasma treatment.

을 파악하기 위하여 공기 중에서의 방전 전후 및 톨루엔 주입 전후의 방전에 따른 입경범위 0.0032~1.0 μm에서 에어로졸의 입경별 개수농도의 변화를 측정하였다.

플라즈마에 의한 처리대상물질인 톨루엔의 주입 없이 공기만을 주입했을 때 에어로졸의 개수누적분포를 보면 그림 14와 같이 0.2 μm 이하의 입경이 약간 증가하는 경향을 보여 중앙입경(median diameter) D₅₀은 0.05 μm 부근에서 0.03 μm으로 변하고 있어 전반적으로 0.2 μm 이하의 미세입자가 증가하는 것으로 나타났다.

톨루엔 100 ppm을 유량 5 LPM으로 공급하면서 22.5 kHz, 4 kV의 전기조건으로 플라즈마 반응을 진

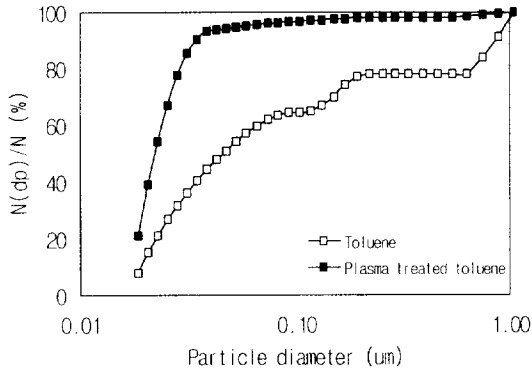


Fig. 15. The variation of accumulative particle size distribution in toluene contained air by plasma treatment.

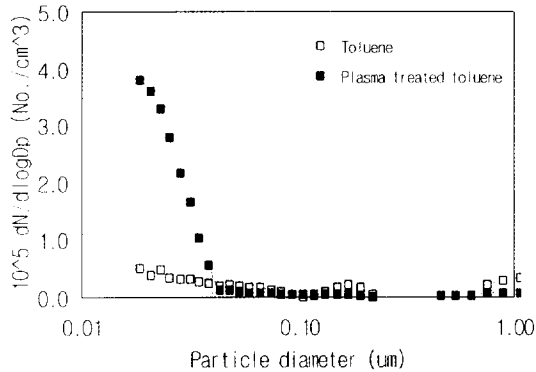


Fig. 16. The variation of particle size distribution by plasma treatment.

행시킨 결과 그림 15에서의 누적분포와 같이 D_{50} 이 $0.04 \mu\text{m}$ 에서 $0.02 \mu\text{m}$ 으로 변화하였으며, 입경이 $0.04 \mu\text{m}$ 보다 작은 입자가 90% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 입경에 따른 에어로졸의 농도 변화는 그림 16으로부터 명확하게 알 수 있는데, 특히 $0.3 \mu\text{m}$ 이하의 미세입자의 농도가 플라즈마 처리전의 $10,513 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 에서 $78,048 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 로 급증하였다. 이는 톨루엔이 플라즈마 반응으로 인해 입자상물질로 전환되었을 것으로 사료된다.

5. 결 론

연면방전 플라즈마를 이용한 톨루엔 처리실험을

통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

연면방전체의 최적 방전조건을 찾기 위해 전압을 $0 \sim 5 \text{ kV}$ 로, 주파수를 $20.0 \sim 35.2 \text{ kHz}$ 로 변화시키면서 발생하는 O_3 농도, 내부 온도 변화, 전력소비량 등을 고려하였을 때 주파수는 $20.0 \sim 25.0 \text{ kHz}$ 에서, 전압은 $3.5 \sim 4.0 \text{ kV}$ 범위에서 방전상태가 가장 좋은 것으로 판명되었다.

톨루엔의 처리는 전압의 변화에 따라 민감하게 변화하였고, 주파수의 변화에는 덜 민감한 반응을 보였다. 또한 오존의 농도가 높을수록 톨루엔의 처리는 높게 나타나는 경향을 보이고 있어 주로 오존에 의한 산화가 이루어지는 것으로 생각된다.

톨루엔의 처리효율은 농도를 $50 \sim 300 \text{ ppm}$ 으로 변화시켰을 때 농도에 반비례하였고, 체류시간을 7.4 sec 와 3.7 sec 로 하였을 때 체류시간이 긴 7.4 sec 에서의 처리효율이 높게 나타나고 있었다. 그러나, 소비전력당 처리되는 톨루엔 총량으로 보았을 경우에는 농도가 높을수록 처리 총량이 많은 것으로 나타났다.

톨루엔이 분해되어 CO 와 CO_2 를 최종산물로 보았을 때, 톨루엔의 농도에 따라 최종산물로 전환되는 비율이 다르게 나타났는데 $100, 200 \text{ ppm}$ 에서는 최종산물의 전환이 45% 정도이었는데 반해, 300 ppm 에서는 훨씬 작은 18% 정도가 최종산물로 전환되었다. 이는 고농도로 갈수록 완전 분해가 덜 일어나 중간산물로 머무르는 양과 함께 입자상물질로의 전환량이 많기 때문으로 생각되며, 따라서 농도가 높을 경우 입자상물질로의 전환이 용이한 것으로 추측된다.

플라즈마 반응으로 인해 톨루엔은 입자상 물질로 전환되는 것으로 나타났으며, 특히 $0.3 \mu\text{m}$ 이하의 입경범위에서 급증하는 경향을 보였다. 따라서 전반적인 처리도를 향상시키기 위해서는 플라즈마 처리 후 집진작용이 필요하다고 사료된다.

SPCP 기술에 의해 톨루엔은 잘 처리되고 있어 연면방전 플라즈마가 톨루엔의 처리에 효과적임을 알 수 있었으나, 반응 후 잔존하는 O_3 에 대한 문제가 먼저 해결되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

강성규(1993) 유기용제의 위해도 평가 및 일부 유기용제

- 의 생물학적 폭로지표, 충남대 박사학위논문.
- 고려대학 환경의학 연구소(1991) 작업환경보고서.
- 신혜수, 김윤신, 허귀석(1993) 실내외 공기중 휘발성 유기 화합물질의 농도조사에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(4), 310-319.
- 김현하(1995) 강유전체 pellet 충전층 플라즈마 반응기를 이용한 VOCs의 제어에 관한 연구, 동아대학교 석사학위논문.
- 대한석유협회(1996) VOC 배출원별 배출량 산정 및 저감 기술 연구.
- 봉춘근(1995) 연면방전 플라즈마를 이용한 연소가스 중의 SO₂ 처리에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위논문.
- 신경아(1995) 도시의 도로변 및 주유소에서의 대기 중 휘발성 유기화합물의 정성적 분석 및 정량화 연구, 서울시립대학교 석사학위논문.
- 이주상(1995) 고주파 연면방전 플라즈마를 이용한 NH₃, H₂S, CH₃SH의 약취처리에 관한 연구, 서울시립대학교 박사학위논문.
- 정해동(1995) 복합유기용제에 노출된 호흡보호구용 정화통의 파과에 관한 연구, 서울대 보건대학원 석사학위논문.
- 정혜선(1995) 영세사업장 보건관리 지원사업실시 전후의 산업보건 수준 비교·분석, 서울대 보건대학원 석사학위논문.
- 한화진(1994) 유해대기오염물질 규제에 관한 국내대응방안 연구, 한국환경기술개발원.
- Smirnov, B.M., S. Chomet, and H.S.W. Massey (1982) *Negative ions*, Mcgraw-Hill Inc.
- Chapmann, B.(1992) *Glow discharge processes*, John Wiley & Sons Inc., New york.
- Corlos, M.N., H.R. Geddes, H.P. Wade, and H.A. Jamed (1993) Corona Destruction : An innovative control technology for VOCs and air toxics, J. Air & Waste, 43, 242-247.
- Eliasson, B., M. Hirth, and U. Kogelschatz (1987) Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges, J. phys. D : Appl. phys. 20.
- Paur, H.R.(1992) Removal of volatile hydrocarbons from industrial off-gas, NATO advanced research workshop on non-thermal plasma techniques for pollution control, Part. B, pp.77-89.
- Chang, M.B. M.J. Kushner, and M. J. Rood (1993) Removal of SO₂ and NO from gas streams with combined plasma photolysis, J. of Env. Eng., 119(3), 414-423.
- Simonaitis, R. and J. Heicklen (1987) Reaction of CH₃, CH₃O, and CH₃O₂ radicals with O₃, The journal of physical chemistry, 91(8), 298-302.
- Masuda, S., S. Hosokawa, X.L. Tu, Sakakibara, S. Kitoh, and S. Sakai (1993) Destruction of gaseous pollutants by surface-induced plasma chemical process (SPCP), IEEE, Ind. Appl., 29(4), 781-786.
- Masuda, S.(1992) Destruction of gaseous pollutants and air toxics by surface discharge induced plasma chemical process (SPCP) and pulse corona induced plasma chemical process (PCP), NATO advanced research workshop on non-thermal plasma control, pp.199-210.
- Yanaguma, S., A. Ohsawa, T. Kodama, and Y. Tabata (1992) Decomposition of volatile organic compounds by plasma chemical process, 靜電氣學講習論文集, pp.103-106.
- Yamamoto, T., K. Ramanathan, P.A. Lawless, D.S. Ensor, J.R. Newsome, N. Plaks, G.H. Ramsey (1992) Control of volatile organic compounds by an ac energized ferroelectric pellet reactor and a pulsed corona reactor, IEEE Ind. Appl., 28, 528-534.
- Oda, T., T. Takahashi, H. Nakano, and S. Masuda (1994) Decomposition of fluorocarbon gaseous contaminants by surface discharge-induced plasma chemical processing, IEEE Transaction on Industry Applications, 29(4), 787-792.