

무성방전내에서 톨루엔 제거에 미치는 운전변수의 영향 Effects of Operating Parameters on Toluene Removal in Dielectric Barrier Discharge Process

정재우* · 이용환¹⁾ · 박경렬²⁾

진주산업대학교 환경공학과, ¹⁾포항공과대학교 환경공학부, ²⁾우송공업대학 환경공학과

(2002년 1월 24일 접수, 2002년 5월 28일 채택)

Jae-Woo Chung, Yong-Hwan Lee¹⁾ and Kyung-Lyoul Park²⁾
Department of Environmental Engineering, Jinju National University
¹⁾*School of Environmental Science and Technology, POSTECH*
²⁾*Department of Environmental Industry, Woosong Technical College*

(Received 24 January 2002, accepted 28 May 2002)

Abstract

We investigated the effects of operating variables, such as electrical, reactor and gas parameters on toluene removal and discharge property in the dielectric barrier discharge (DBD) process. The toluene removal was initiated with the energy transfer to the reactor by loading of voltages higher than the discharge onset value. The energy transfer and toluene removal increased with the applied voltage. Higher removal rate was observed with smooth surface electrode despite of lower energy transfer compared with the coarse electrode, because more uniform discharge can be obtained on smooth surface state. The decrease of dielectric material thickness enhanced the removal efficiency by increasing the discharge potential. The toluene removal efficiency decreased with the increase of the inlet concentration. The increase of gas retention time enhanced the removal efficiency by the increase of energy density. The oxygen and humidity contents seem to exert significant influences on the toluene removal by dominating the generation of electrons, ions, and radicals which are key factors in the removal mechanism.

Key words : dielectric barrier discharge (DBD), operating parameters, discharge property, toluene removal

1. 서 론

휘발성 유기 화합물 (Volatile Organic Compounds, VOCs)은 주로 도장산업, 석유 정제 및 저장시설, 화

학공업, 자동차 등으로부터 배출되며 대기중에서 광 화학적 산화물을 생성시킬 뿐만 아니라 성층권 오존층 파괴나 지구온난화에도 기여함으로써 환경에 악영향을 미치는 물질이다.

또한 대부분의 VOC가 인체에 유해하며 일부 물질들은 발암성을 가지는 것으로 평가되고 있어 배출이 엄격하게 규제되는 물질이다 (Lee and Jung,

* Corresponding author
Tel : +82-55-751-3348, E-mail: jwchung@jinju.ac.kr

2000). 현재까지 VOC를 처리하기 위해 흡착, 연소, 촉매연소, 생물학적 처리 등을 포함한 다양한 기술이 적용되어 왔으며 비교적 최근부터 비열 플라즈마(non-thermal plasmas)를 이용하는 기술들에 관한 연구가 강도 높게 진행되고 있다(신창섭 등, 2001; 정창훈 등, 2000; 허경욱 등, 2000). 기체 공간내에 플라즈마를 발생시키기 위해서 무성방전(dielectric barrier discharge, DBD), 유전체 충전 방전(dielectric pellet discharge), 펄스 코로나 방전(pulse corona discharge), 전자빔 공정(electron beam)과 같은 다양한 전기방전 공정들이 사용되어 왔다(Urashima and Chang, 2000). 이 중에서 DBD 공정은 방전의 균일성으로 인해 가장 많이 활용되고 있는 공정중의 하나이다. DBD 공정내에서 유전물질(dielectric material)은 플라즈마내의 전하량을 제한하여 필라멘트 방전 또는 아크 방전으로의 전이를 방지하는 역할을 하므로 안정적인 방전상태를 유지할 수 있다.

전기방전에 의한 VOC 처리에 관한 연구의 현황을 살펴보면, 국내외에서 다양한 오염물질 처리를 위한 연구들이 이루어지고 있으나 대부분이 실험실 규모로 진행되었으며 최근에 일부 연구기관 및 기업체에서 대규모 공정 적용을 위한 연구들을 진행 중에 있다(문승일과 채재우, 2001; 최연석 등, 2000; Urashima and Chang, 2000).

전기방전을 이용한 오염물질 제거 공정이 산업 현장에 적용되기 위해서 관련 연구가 두 가지 측면에 초점을 두고 이루어져야 할 것으로 사료된다. 첫째, 공정의 방전 특성과 관련된 측면으로 방전 특성은 오염물질의 제거 뿐만 아니라 에너지 소모량에도 영향을 주므로 매우 중요한 요소이다. 방전 특성은 전압, 전류, 전하량 등의 전기적 변수와 밀접하게 연관되어 있으므로 전기적 특성을 정확하게 측정하고 분석할 수 있는 기초 기술의 확립이 선행되어야 한다. 둘째, 오염물질 제거특성과 관련된 측면으로 제거 메커니즘, 다양한 운전변수에 따른 제거특성의 규명을 포함한다. 이러한 두 가지 측면은 서로 밀접하게 연관되어 있으며 상호간에 영향을 미치므로 종합적인 관점에서 접근함으로써 최적의 운전인자를 도출하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 향후 진행될 대규모 공정 연구의 기초자료로 활용할 목적으로 실험실 규모 연구를 통해 무성방전에서 방전 특성 및 톨루엔 제거에 미

치는 다양한 운전변수들의 영향을 평가하고자 하였다. 방전특성을 평가하기 위해 전압, 전류, 전하량을 측정하기 위한 회로를 구성하였으며 얻어진 자료로부터 에너지 및 에너지 밀도를 기준으로 평가하였다. 톨루엔 제거특성을 평가하기 위해 다양한 운전 조건에서 얻어지는 제거효율을 비교하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치는 그림 1에 나타낸 바와 같이 기체 유입부, 전원공급부, DBD 반응기 및 분석장치로 구성되어 있다. 반응기로 유입되는 기체의 유량을 조절하기 위해 MFC(mass flow controller, MKS 1179)를 사용하였으며 일정한 농도의 톨루엔을 반응기로 유입시키기 위해 유입공기의 일부분을 항온조내의 흡수병에 채워진 톨루엔을 통과시켜 혼합하였다. 반응기로 고전압을 인가하기 위해 220 V, 60 Hz의 교류 전압을 1:15000의 트랜스포머를 사용하여 증폭시켰다. 전압의 조절을 위해 슬라이드스를 사용하였다.

그림 2는 DBD 반응기의 구조를 나타내고 있다. 유전물질로는 길이 500 mm의 유리관을 사용하였다. 내부 전극으로 구리봉을 사용하였으며 외부전극은 유리관 외벽에 구리 테이프를 400 mm의 길이로 감아서 사용하였다. 따라서, 방전 영역의 길이는 400

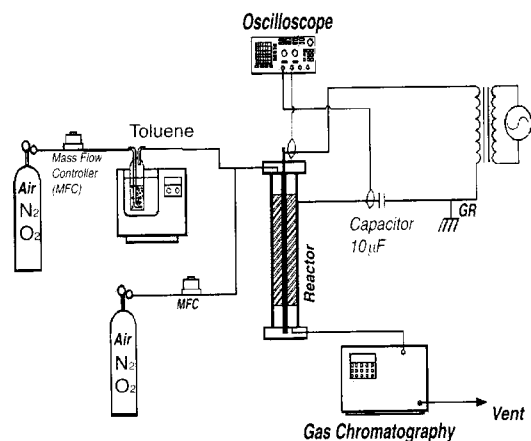


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

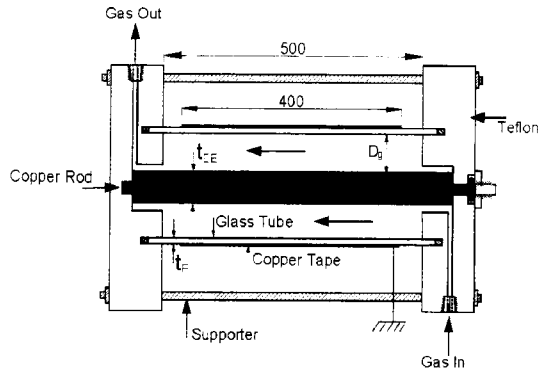


Fig. 2. Configuration of the DBD reactor.

mm이다. 전극의 절연과 기체의 차폐를 위해 유리관의 양단에 테프론으로 만들어진 덮개를 설치하였으며 반응기의 전, 후단에 가스 시료의 채취를 위한 채취구를 만들었다.

2.2 실험방법

전압, 전류 그리고 기체흐름으로 전달되는 에너지와 같은 방전의 전기적 특성을 관찰하기 위해 그림 1에 나타나 있는 전기 회로를 구성하였다. 반응기로 인가되는 고전압은 내부전극에 1000:1 고전압 프로브(High Voltage Probe, Tektronix P6015)를 연결하여 측정하였다. 무성방전 공정에서 방전 공간을 흐르는 전류는 미세한 양이므로 측정하기가 어렵다. 따라서, 방전 공간을 흐르는 전류와 전하량은 외부 전극에 직렬로 연결된 콘덴서(정전용량, 10 μF) 양단에 걸리는 전압을 100:1 프로브(Tektronix P5100)를 사용하여 측정하여 계산하였다. 한 시점에서의 전하량 및 전류의 값은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$Q = CV \tag{1}$$

$$I = \frac{dQ}{dt} \tag{2}$$

여기서, Q는 전하량, C는 정전용량(10 μF), V는 전압 그리고 I는 전류를 의미한다. 각각의 전압 프로브는 오실로스코프(Tektronix TDS 744A)에 연결하여 사용하였다. 이러한 과정을 통해 시간에 따른 전압, 전류, 전하량의 값을 구하게 되면 반응기로 전달되는 에너지는 전압 및 전류의 곱을 시간에 대

해 적분하거나 전하량-전압 그래프의 면적을 계산함으로써 쉽게 구할 수 있다(Carlins and Clark, 1982). 즉, 한 사이클의 전압 파형당 반응기로 전달되는 에너지는 다음의 관계를 가진다.

$$E = \int_{\text{cycle}} VI dt \tag{3}$$

$$E = \text{Area of parallelogram in } Q-V \text{ plot} \tag{4}$$

여기서, E는 전압파형 한 사이클당 반응기로 전달되는 에너지(J/cycle), V는 전압, I는 전류를 나타낸다. 한편, 오염물질 처리를 위한 전기방전 공정에서 주요 공정 파라미터로 사용되는 에너지 밀도는 다음과 같이 나타난다.

$$ED = \frac{Ef}{Q} \tag{5}$$

여기서, ED는 에너지 밀도(J/L), E는 한 사이클당 반응기로 전달되는 에너지(J), f는 주파수(hertz), 그리고 Q는 유속(Liter/min)을 나타낸다. 톨루엔 농도를 측정하기 위해 GC/FID(Varian Star 3600CX)를 사용하였다. 시료 기체는 반응기 후단으로부터 gas syringe로 5 mL를 채취하여 SPT(Sample Preconcentration Trap)을 통해 GC로 주입하였으며 운반기체로는 헬륨을 사용하였다. GC 검출기(detector)의 온도는 220°C, 오븐(oven)의 온도는 80°C에서 220°C로 분당 10°C의 속도로 상승시켰다.

표 1은 DBD내에서의 톨루엔 제거에 미치는 여러 가지 운전변수의 영향을 규명하기 위해 변화시킨 운전조건들을 나타내고 있다. DBD 공정의 전기적 운전변수는 0~24 kV의 첨두전압을 60 Hz로 인가하였으며 이때 얻어지는 한 사이클의 전압파형당 반응기로 전달되는 에너지는 0~500 mJ이었다. 톨루엔 제거에 미치는 전극 조건의 영향을 알아보기 위해 여러 가지 직경을 가진 내부전극을 제작하여 실험하였으며, 전극 표면상태의 영향을 관찰하기 위해 각각의 내부전극은 평면이 매끄러운 상태와 거친 표면을 가진 전극을 동시에 제작하여 실험하였다. 또한, DBD 공정에서의 유전물질층 두께의 영향을 관찰하기 위해 2.9, 3.8, 4.5 mm의 두께를 가진 유리관을 각각 사용하였다. 톨루엔 제거에 미치는 초기농도, 가스 체류시간과 조성의 영향을 알아보기 위해 표에 나타나 있는 범위에서 각각의 변수들을

Table 1. Major operating parameters and ranges.

	Parameter	Range	
Electrical parameter	voltage	0 ~ 24 kV peak	
	frequency	60 Hz	
	energy	0 ~ 500 mJ/cycle	
Reactor parameter	electrode surface	smooth, coarse	
	inner diameter of reactor	20 mm	
	inner electrode diameter	12, 16, 19 mm	
	dielectric thickness	2.9, 3.8, 4.5 mm	
Gas parameter	inlet concentration	90 ~ 230 ppm	
	gas retention time in the reactor	2, 3, 4 sec	
	gas composition	O ₂ (0 ~ 21%), H ₂ O (dry/wet) content	

조절하며 실험하였다. 실험을 시작하기전에 반응기에 의한 톨루엔 흡착정도를 파악하기 위한 흡착실험을 수행하였다. 일정한 농도의 톨루엔을 함유한 공기를 흘려주면서 반응기 후단의 농도를 측정함으로써 반응기 내벽 및 내부전극으로의 흡착정도를 분석하였다. 흡착실험 한 결과, 반응기로의 톨루엔 흡착은 무시할만한 것으로 나타났다. 그러나 각각의 실험조건에서 안정된 실험을 수행하기 위해 일정한 조성과 유량을 가진 기체를 30분 동안 흘린 후에 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 DBD 공정에서의 톨루엔 제거 경향

그림 3은 2.9mm의 반응기 두께와 직경 16mm의 매끈한 표면의 내부전극을 가진 반응기에서 90ppm의 톨루엔을 함유한 1.6 Liter/min의 기체가 흐르는 조건에서 식(3)과 (5)에 의해 얻어진 전압 인가에 따른 한 사이클의 전압 파형당 반응기로 전달되는 에너지(E)와 에너지 밀도(ED)를 나타내고 있다. 약 6~7kV의 첨두값을 가진 교류 전압이 인가되면 방전이 개시되며 반응기로 에너지 전달이 이루어지게 됨을 알 수 있다.

위와 같은 조건에서 톨루엔의 농도 및 제거효율에 미치는 인가전압의 영향을 그림 4에 나타내었다. 방전 개시전압보다 높은 전압이 인가되면서부터 톨루엔의 제거가 시작되며 전압이 증가함에 따라 제거효율이 증가하는 현상을 관찰할 수 있다. 실험

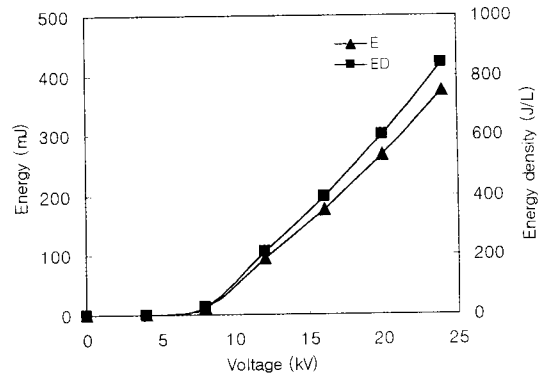


Fig. 3. Energy and energy density with applied voltages.

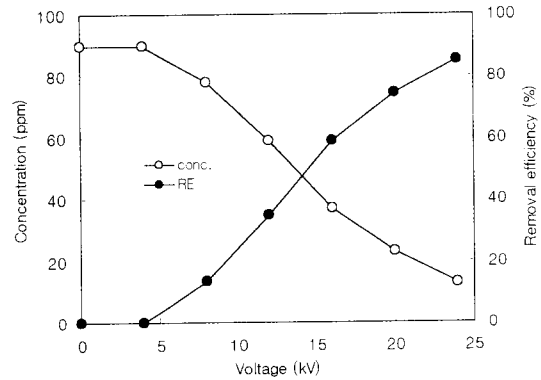


Fig. 4. Removal trend of toluene with applied voltages.

된 범위보다 높은 전압인 약 28kV의 전압을 인가하면 95% 이상의 제거효율을 얻을 수 있었으나 방전이 불안정해지며 MFC 등 주변 기기의 노이즈 현상이 자주 관찰되었다. 본 연구에서는 DBD 내에서 여러 가지 운전변수에 따른 톨루엔 제거 경향을 분석하는 것이 목표이므로 최대 24kV까지의 전압 범위내에서 실험을 수행하였다.

3.2 톨루엔 제거에 미치는 전극 조건의 영향

그림 3과 같은 반응기 조건에서 180ppm의 톨루엔을 함유한 1.6 Liter/min의 가스가 반응기로 흐를 때 방전으로 전달되는 에너지에 미치는 내부 전극 표면상태의 영향을 그림 5에 나타내었다. 매끈한 표면보다 거친 표면의 전극을 사용할 경우에 방전 개시전압이 약간 감소하며 반응기로 전달되는 에너지

가 약간 높은 것을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 거친 표면의 내부전극을 사용할 경우에 전극 표면의 곡률 반경이 감소하여 전극 주위의 전기장 강도가 증가하므로 나타나는 현상으로 사료된다. 그림 6은 톨루엔 제거에 미치는 내부 전극 표면상태의 영향을 나타내고 있다. 거친 표면의 전극을 사용할 경우보다 매끈한 표면을 가진 내부 전극을 사용할 경우에 낮은 에너지가 반응기로 전달되고 있음에도 불구하고 더 높은 제거효율이 얻어짐을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 DBD 공정에서의 NO 전환특성을 연구한 논문(이용환 등, 2002)에서도 관찰된 현

상으로 방전의 균일성과 관련되어 일어난 결과로서 판단된다. 즉, 매끄러운 표면의 내부전극을 사용하였을 때 모든 기체 영역에 걸쳐 방전이 균일하게 일어남으로써 오염물질의 제거효율이 높게 나타날 수 있다. 높은 인가전압에서 전극 표면상태에 따른 제거효율의 차이가 감소하는 것은 인가전압이 증가함에 따라 강한 방전이 생성됨으로써 표면상태의 변화에 따른 균일성의 차이가 감소되기 때문인 것으로 사료된다.

그림 7은 2.9mm의 반응기 두께와 직경 19mm의 매끈한 표면을 가진 내부전극을 가진 반응기에 160 ppm의 톨루엔을 함유한 1.6 Liter/min의 기체가 흐르는 조건에서 에너지 전달에 미치는 유전물질층(반응기) 두께의 영향을 나타내고 있다. 유전물질의 두께가 감소할수록 높은 에너지가 반응기로 전달되는데, 이러한 현상은 유전물질의 두께가 얇을수록 유전물질층의 정전용량(C_d)이 커지므로 방전공간의 양단에 인가되는 전위차(V_g)가 증가하기 때문이다. 유전물질층과 방전공간을 가진 DBD 반응기는 직렬로 연결된 두 개의 콘덴서로 회로화 할 수 있다. 이러한 회로에서 각각의 공간을 통해 흐르는 전하량(Q)은 같으므로 식 (6)~(8)의 관계가 성립한다. 식 (8)로부터 유전물질층의 정전용량(C_d)이 클수록 기체 공간을 통해 인가되는 전위차(V_g)가 높음을 알 수 있다.

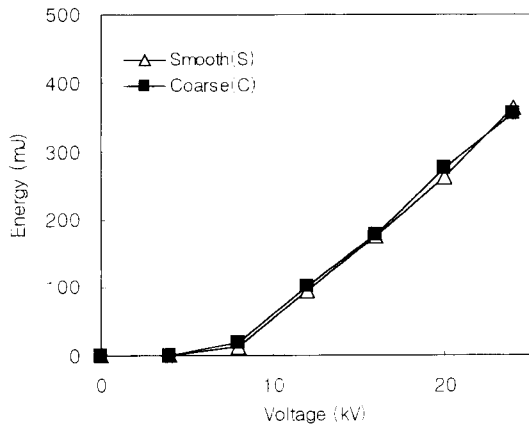


Fig. 5. Effect of the electrode surface roughness on energy transfer.

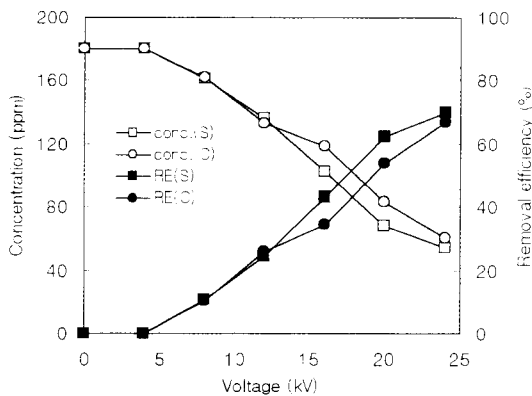


Fig. 6. Effect of the electrode surface roughness on toluene removal.

$$Q_d = Q_g \tag{6}$$

$$C_d V_d = C_g V_g \tag{7}$$

$$\frac{V_g}{V_d} = \frac{C_d}{C_g} \tag{8}$$

여기서, Q 는 전하량, C 는 정전용량, V 는 전위차를 의미하며 d 와 g 는 유전물질층과 기체 공간을 나타내는 첨자이다. 그림 8은 톨루엔 제거에 미치는 유전물질 두께의 영향을 나타내고 있다. 유전물질의 두께가 얇을수록 동일한 외부 인가전압 조건에서 기체 공간을 통해 높은 방전 전압이 인가됨으로써 톨루엔의 제거가 높게 이루어짐을 알 수 있다.

3.3 톨루엔 제거에 미치는 운전변수의 영향

그림 9는 2.9mm의 반응기 두께와 직경 16mm의 매끈한 표면을 가진 내부전극을 가진 반응기에 1.6

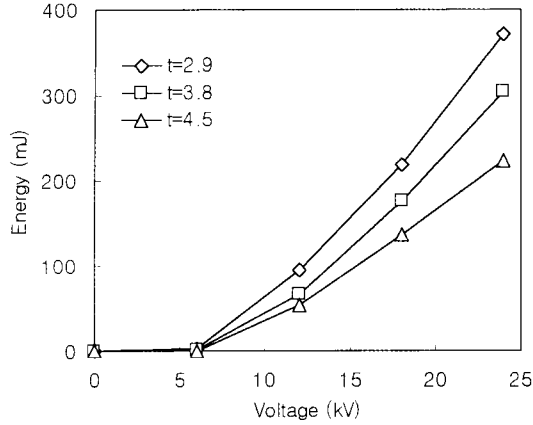


Fig. 7. Transferred energy as a function of dielectric material thickness.

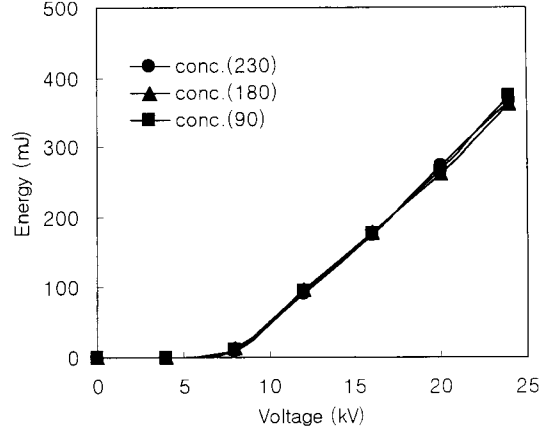


Fig. 9. Energy transfer vs. the inlet concentration as a function of applied voltage.

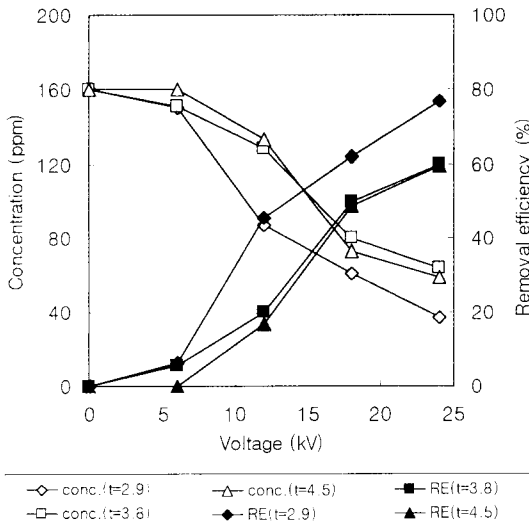


Fig. 8. Toluene removal vs. the dielectric material thickness.

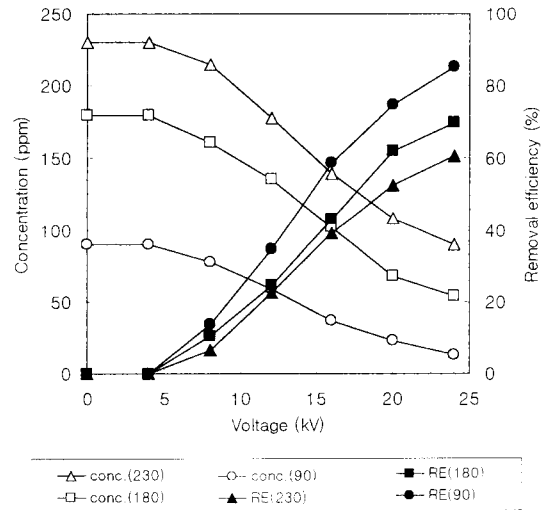


Fig. 10. Toluene removal vs. the inlet concentration as a function of applied voltage.

Liter/min의 가스 유량이 흐르는 조건에서 톨루엔 농도에 따른 반응기로의 전달 에너지를 나타내고 있다. 반응기로 전달되는 에너지는 유입농도의 변화에 의해 큰 차이를 보이지 않는데, 이는 실험에서 변화된 범위의 톨루엔 농도 변화가 방전현상에 미치는 영향이 무시할 수 있는 정도임을 나타낸다. 그림 10은 톨루엔 제거에 미치는 초기농도의 영향을

나타내고 있으며 농도가 낮을수록 DBD내에서 제거효율이 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 기존의 연구 (Chang and Chang, 1997)에서도 발표된 바 있으며, 제거효율 측면에서 낮은 농도일수록 톨루엔 제거를 위한 DBD 공정의 적용성이 뛰어난을 보여준다.

그림 11은 2.9 mm의 반응기 두께와 직경 12 mm

의 매끈한 표면을 가진 내부전극을 가진 반응기에 170 ppm의 톨루엔을 함유한 가스가 흐르는 조건에서 반응기로 전달되는 에너지와 에너지 밀도에 미치는 체류시간의 영향을 나타내고 있다. 체류시간을 변화시키기 위해서 동일한 조성을 가진 기체의 유량을 변화시켰다. 실험된 체류시간은 반응기 체적을 기준으로 2, 3, 4초였으며 방전체적을 기준으로 각각 1.6, 2.3, 2.9초이다. 그림 (a)로부터 실험된 범위 내에서의 기체 유량 변화가 방전상태에 미치는 영향은 거의 무시할 만한 수준임을 알 수 있다. 그러나 단위 유량의 기체에 전달되는 에너지를 나타내는 에너지 밀도는 그림 (b)에 나타나 있는 바와 같이 가스 유량에 따라 민감하게 변화하므로 톨루엔 제거에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 톨루엔 제거에 미치는 체류시간의 영향을 그림 12에 나타내었다.

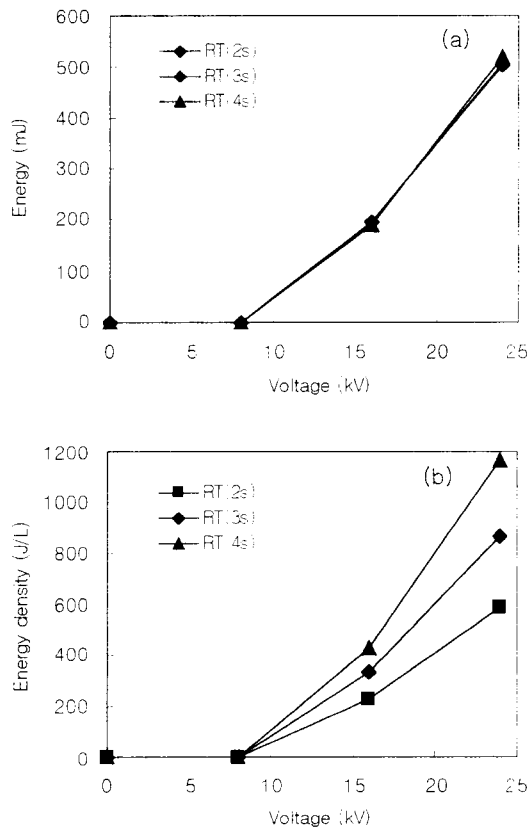


Fig. 11. Transferred energy (a) and energy density (b) with the gas retention time (RT).

체류시간이 증가함에 따라 톨루엔 제거효율이 증가하는 현상을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 체류시간이 증가함에 따라 높은 에너지가 기체 흐름에 전달되기 때문이다. 같은 조건에서 얻어지는 결과들을 에너지 밀도에 대하여 도시하면 그림 13과 같다. 에너지 밀도가 증가함에 따라 제거효율은 거의 선형적으로 증가하며 이러한 경향이 체류시간 변화에 큰 영향을 받지 않음을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 일정한 농도조건에서 톨루엔의 제거효율이 에너지 밀도의 주된 함수임을 나타낸다. 그러나 체류시간이 감소함에 따라(기체의 유량이 증가함에 따라) 기체에 전달할 수 있는 에너지의 양은 제한된

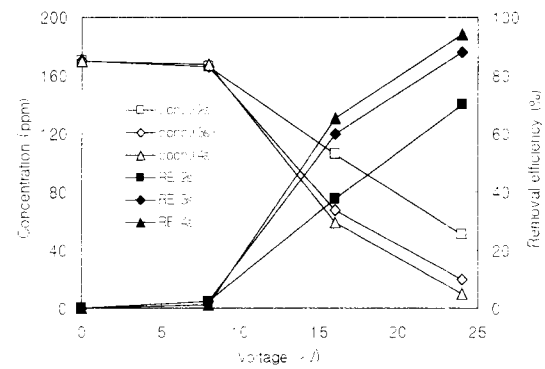


Fig. 12. Toluene removal vs. the gas retention time as a function of applied voltage.

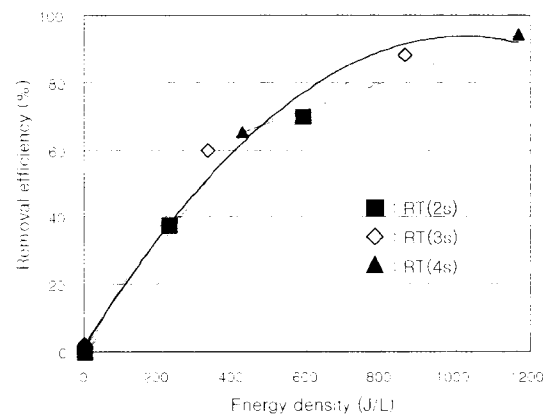


Fig. 13. Effect of the gas retention time on toluene removal with energy density.

다. 즉, 빠른 기체흐름에 높은 에너지를 전달하기 위해서는 높은 전압을 반응기로 인가하여야 하지만 앞에서 설명한 바와 같이 주어진 DBD 공정에서 안정적인 방전을 유지할 수 있는 전압에는 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 방전 및 톨루엔 제거에 미치는 산소 함량 및 수분의 영향을 알아보고자 하였다. 반응기로 전달되는 에너지와 톨루엔 제거에 미치는 산소 함량의 영향을 그림 14와 15에 나타내었다. 인가 전압을 0, 8, 12, 18, 24 kV로 증가시키면서 실험하였으며 산소의 함량은 질소와 산소의 혼합비를 변화 시킴으로써 조절하였다. 얻어진 결과로부터 순수한

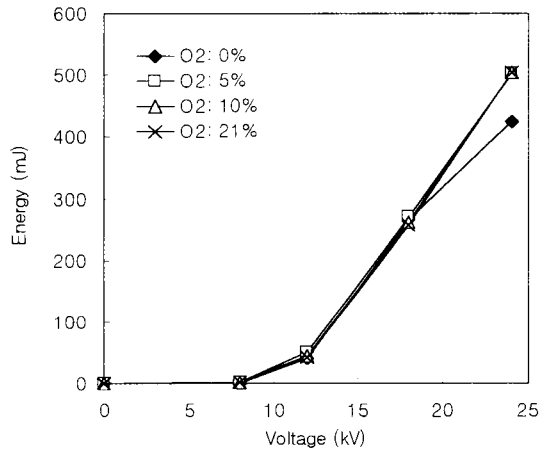


Fig. 14. Effect of the oxygen content on energy transfer.

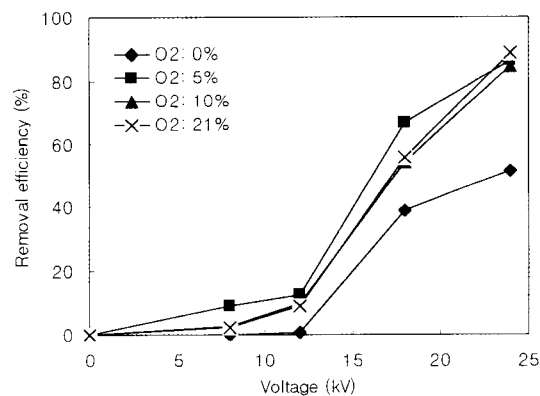


Fig. 15. Effect of the oxygen content on toluene removal.

질소 기체의 경우에 산소를 포함한 조성들에 비해 더 높은 전압에서 방전이 개시됨을 알 수 있다. 즉, 산소가 함유된 기체의 경우에 8 kV의 전압 조건부터 방전상태가 되어 반응기로 에너지가 전달되며 톨루엔의 제거가 이루어지나 순수 질소의 경우에는 12 kV의 전압 조건부터 톨루엔의 제거가 이루어지는 것을 알 수 있다. 방전이 개시된 후 전압의 증가에 따른 방전현상은 거의 비슷하게 유지되지만 실험된 최고 전압인 24 kV에서 순수 질소의 경우에 불안정한 방전현상이 일어남으로써 낮은 에너지가

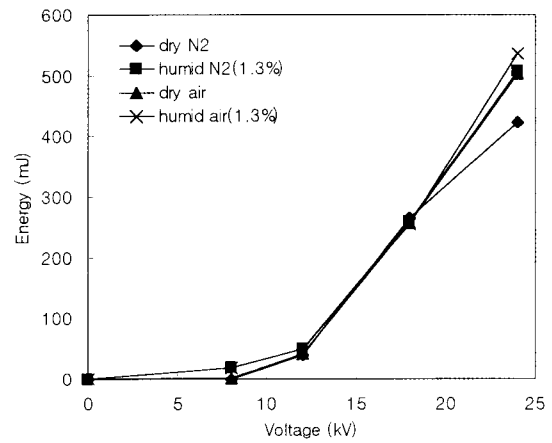


Fig. 16. Energy transfer vs. the humidity as a function of applied voltage.

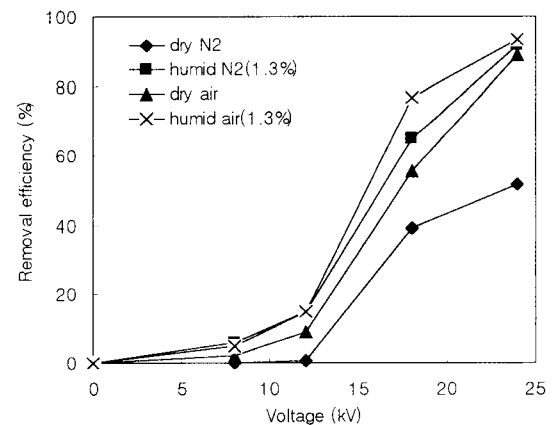


Fig. 17. Toluene removal vs. the humidity as a function of applied voltage.

반응기로 전달됨을 관찰할 수 있었다. 실험된 조건들중에서 산소 함량이 5%일때 가장 높은 제거효율이 얻어지며 그 이상의 함량 증가가 제거효율에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다.

반응기로 전달되는 에너지 및 톨루엔 제거에 미치는 수분의 영향에 관한 실험으로부터 얻어진 결과를 그림 16과 17에 나타내었다. 수분의 영향을 알아보기 위해 120 ppm의 톨루엔을 포함한 건조 질소 및 공기를 운반가스로 실험한 경우와 각각의 기체를 수분에 의해 포화시킨 상태에서 처리한 경우를 비교하였다. 그림으로부터 수분의 첨가로 인해 방전 현상이 원활하게 이루어지며 동일한 인가전압에서 높은 에너지가 반응기로 전달됨을 관찰할 수 있다.

톨루엔 제거효율에 미치는 산소 및 수분 함량의 영향에 관한 기존의 연구들과 본 연구의 결과를 비교하면 흥미로운 사실을 발견할 수 있다. Chang and Chang (1997)에 의해 수행된 연구에 의하면, 산소함량이 0~21%로 증가함에 따라 톨루엔 제거 효율은 증가한다. 그러나 0, 2, 20%의 산소함량 조건에서 실험한 Falkenstein (1999)에 의하면, 2, 0, 20%의 순서로 제거효율이 감소되는 현상이 나타난다. 톨루엔 제거에 미치는 수분의 영향은 Chang and Chang (1997)에 의해 이루어진 연구에서 수분함량이 0, 1.4, 1.8%로 증가함에 따라 제거효율이 증가하는 것으로 보고된 바 있다. Chang and Chang은 산소 및 수분의 영향에 대한 실험 결과를 방전에서 발생하는 라디칼 반응과 관련하여 해석하였다. 즉, 산소 및 수분의 존재 및 함량 증가는 방전내에서 O, O₃, OH 라디칼을 생성하는데 기여함으로써 톨루엔 제거효율을 상승시키게 된다. Falkenstein은 실험에서 얻어진 결과를 최적 라디칼 이용과 관련하여 해석하고 있다. 즉, 산소(O₂)는 톨루엔과 빠르게 반응하는 산소 원자(O) 라디칼의 발생원(source)일 뿐만 아니라 생성된 산소원자와 반응하여 상대적으로 느린 반응을 하는 오존(O₃)을 생성시키는 두 가지 역할을 동시에 갖는다. 따라서, 산소 원자 라디칼을 최대한 들 수 있는 최적 산소농도가 존재하며 이러한 최적 조건에서 가장 높은 톨루엔 제거효율을 얻을 수 있다.

방전내에서의 톨루엔 제거는 1) 전자와의 직접 충돌, 2) O⁺, O₃⁺, N⁺, N₂⁺와 같은 양이온 참여반응, 3) O, O₃, OH 라디칼에 의한 산화반응의 세 가지 주

요 메카니즘에 의해 이루어지며 반응의 상대적인 중요성은 전자, 양이온, 라디칼 참여 반응의 순서를 가지는 것으로 알려져 있다 (Urashima *et al.*, 1997). 산화성 라디칼과 톨루엔의 반응속도를 고려하면, OH 라디칼이 매우 중요하며 O 또는 O₃의 역할은 미미한 수준이다. 따라서, 건조공기내에서의 톨루엔 제거는 전자 및 양이온 참여반응이 매우 중요하다.

기존 연구들과 본 연구에서 얻어진 결과들에서 나타난 차이의 원인은 명확한 규명이 어렵지만 DBD 내에서 톨루엔 제거가 방전현상에 큰 영향을 받기 때문에 나타나는 것으로 사료된다. 전기방전 특성에 미치는 기체조성의 영향에 관한 연구(정재우와 조무현, 2001)에 따르면, 기체의 조성은 방전내에서 이온화 에너지 및 전기음성적 특성에 영향을 주어 방전상태에 영향을 미치며 질소 기체에 소량의 산소가 첨가되면 이온화 에너지를 낮추어 방전이 원활하게 이루어지게 한다. 이 연구에서 얻어진 결과에 의하면 배기가스의 이온화 경향은 5%까지의 산소 첨가로 인해 크게 증가하게 되며 지속적인 산소증가와 함께 감소한다. 또한, 일정한 산소농도에서 수분이 증가할수록 이온화 경향이 서서히 증가한다. 이 결과는 본 연구에서 나타난 결과들을 해석함에 있어 매우 중요한 정보를 제공한다. 즉, 본 연구의 실험조건에서 톨루엔의 최대 제거효율을 얻은 조건은 방전이 가장 원활하게 일어나는(이온화 경향이 가장 높은) 조건임을 알 수 있다. 따라서, 방전내에서 톨루엔 제거는 방전현상에 의존하며 원활한 방전으로 인해 전자 및 이온성 물질의 발생이 증가하고 수분으로부터 생성되는 OH 라디칼이 복합적으로 작용함으로써 본 연구의 결과가 얻어진 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 무성방전 공정에서 방전특성 및 톨루엔 제거에 미치는 여러 가지 변수들의 영향을 실험하였으며 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 기체흐름으로의 에너지 전달 및 톨루엔 제거는 방전 개시전압보다 높은 전압을 인가될 때 시작되었으며 실험된 전극(반응기) 조건에서의 방전 개시 전압은 침두치를 기준으로 약 6~7kV의 값을 가지

는 것으로 나타났다.

2. 거친 표면의 내부전극보다 매끄러운 표면의 전극을 사용할 경우에 균일한 방전을 생성시킴으로써 낮은 에너지 밀도에서도 높은 톨루엔 제거효율이 얻어지는 것으로 나타났다.

3. DBD 공정의 유전물질층의 두께가 얇을수록 방전내의 전위차가 증가하므로 강한 방전을 유발하며 높은 톨루엔 제거효율을 얻을 수 있다.

4. 공정내로 유입되는 기체에 포함된 톨루엔의 농도가 낮을수록 높은 제거효율을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

5. 가스 체류시간의 변화가 방전현상에 주는 영향은 무시할 만한 정도이나 에너지 밀도에 영향을 주므로 톨루엔의 제거효율에 중요한 영향을 미치며 체류시간의 변화에 따른 제거효율은 에너지 밀도의 주된 함수인 것으로 나타났다.

6. 수분 및 산소의 함량은 방전상태에 영향을 주며 톨루엔 제거 메커니즘에 중요하게 기여하는 전자, 이온성 물질, 그리고 라디칼 생성에 영향을 미치므로 DBD 공정의 매우 중요한 운전변수이다.

7. 실험된 모든 변수들은 DBD 공정의 방전현상에 영향을 미침으로써 톨루엔 제거에 중요한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

문승일, 채재우 (2001) 펄스방전 특성에 따른 톨루엔 제거에 관한 연구, 대한환경공학회지 23 (2), 243-250.
 신창섭, 김기환, 원정일 (2001) PCB 제조공정에서 발생하는 VOC를 위한 흡착제의 흡착특성, 한국대기환경학회지 17 (1), 67-74.
 이용환, 정재우, 조무현 (2002) 질소산화물 제거를 위한 무성 방전 공정의 전기 및 NO 전환 특성, 대한전기학회논문집 51 (1), 15-21.
 정재우, 조무현 (2001) 배기가스 조건에 따른 코로나 방전

현상 시뮬레이션, 한국대기환경학회지 17 (2), 797-805.

정창훈, 서정민, 김석택, 최금찬 (2000) 이산화 티타늄 (TiO₂) 광촉매 산화 반응을 이용한 트리클로로에틸렌 (TCE) 처리에 관한 연구, 한국대기환경학회지 16 (5), 521-528.

최연석, 송영훈, 김석준, 김부웅 (2000) 흡착성 유전체의 방전 플라즈마에 의한 톨루엔 분해에 관한 연구, 화학공학 38 (3), 423-428.

허경욱, 양성봉, 이상화, 홍영기, 신수연, 강정훈 (2000) 광촉매 플라즈마 반응에 의한 몇 가지 VOCs의 제거에 관한 연구, 한국대기환경학회지 16 (4), 373-380.

Carlins, J.J. and R.G. Clark (1982) Ozone generation by corona discharge, in *Handbook of Ozone Technology and Application*, Edited by R.G. Rice and A. Netzer, Ann Arbor Science Publisher, 1, 77-84.

Chang, M.B. and C.C. Chang (1997) Destruction and removal of toluene and MEK from gas streams with silent discharge plasmas, *AIChE Journal*, 43 (5), 1325-1330.

Falkenstein, Z. (1999) Effects of the O₂ concentration on the removal efficiency of volatile organic compounds with dielectric barrier discharges in Ar and N₂, *Journal of Applied Physics*, 85 (1) 525-529.

Lee, B.K. and K.R. Jung (2000) Removal of Volatile Organic Compounds by Photo-Catalytic Oxidation, *Journal of Korean Society of Atmospheric Environment*, 16 (E), 39-46.

Urashima, K. and J.S. Chang (2001) Removal of volatile organic compounds from air streams and industrial flue gases by non-thermal plasma technology, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 7 (5), 602-614.

Urashima, K., J.S. Chang, and T. Ito (1997) Destruction of volatile organic compounds in air by a superimposed barrier discharge plasma reactor and activated carbon filter hybrid system, *Proceedings of the 1997 Annual Meeting of IEEE Industry Applications Society*, New Orleans, LA. 1969-1974.