

## 평판형 전극으로 구성된 유전체 배리어 방전 반응기를 이용한 톨루엔 저감 특성

### Removal of Gaseous Toluene using a Plate-type Dielectric Barrier Discharge Reactor

박재홍 · 조윤신 · 윤기영 · 변정훈<sup>1)</sup> · 황정호\*  
연세대학교 기계공학과, <sup>1)</sup>삼성전자주식회사 디지털프린팅사업부  
(2008년 7월 18일 접수, 2008년 11월 21일 채택)

Jae-Hong Park, Yoon-Shin Jo, Ki-Young Yoon,  
Jeong-Hoon Byeon<sup>1)</sup> and Jung-ho Hwang\*  
*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University*  
<sup>1)</sup>*Digital Printing Division, Samsung Electronics Co., Ltd.*

(Received 18 July 2008, accepted 21 November 2008)

#### Abstract

A plate-type dielectric barrier discharge (DBD) reactor was designed and tested for removal of gaseous toluene. The DBD reactor consisted of 9 parallel plate electrodes, four of which were grounded. An AC voltage of rectangular waveform (5 ~ 8.5 kV, 60 ~ 1,000 Hz), was applied to the other five electrodes. The gaseous toluene passed through the DBD reactor and its concentration was measured by a real-time gas analyzer. The carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) which were produced by decomposition of toluene in the DBD reactor, were sampled and analyzed by a micro gas chromatography. The maximum toluene removal efficiency was 51.4%.

**Key words** : Dielectric barrier discharge, Toluene, Plate type electrode

#### 1. 서 론

공기 중의 휘발성 유기화합물(VOC: volatile organic compound)은 인체에 악영향을 주고 광화학 스모그나 오존을 생성하는 원인물질이기 때문에 이를 제거하기 위한 노력은 산업적으로나 사회적으로나 많은 이슈가 되고 있다. VOC 제거를 위해서 일반적인

로 흡착(adsorption), 촉매(catalyst) 반응, 저온플라즈마(nonthermal plasma) 기술이 사용되고 있다(김상국과 장예림, 2008; 김상환 등, 2006). 이 중 저온플라즈마 기술은 흡착재나 촉매 사용 기술과 다르게 수명이 반영구적이며 교환주기가 없어 연속적으로 사용 가능한 장점이 있다. 저온플라즈마 기술 중의 하나로 유전체 배리어 방전(DBD: dielectric barrier discharge)은 일정 간격 떨어져있는 유전체로 둘러싸인 도체전극에 교류, 또는 펄스(pulse)형 고전압을 인가하여 발생한다(Falkenstein, 1998). 전압이 인가되면 전극

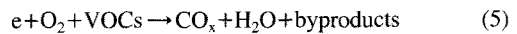
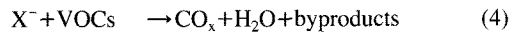
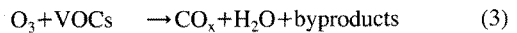
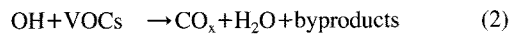
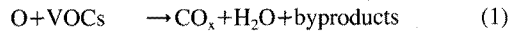
\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)2-2123-2821, E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

주변을 감싸고 있는 유전체 배리어로 인한 전하축적 (build-up) 현상으로 쌓여있던 전자가 한 번에 나오면서 전극들 사이에는 많은 수의 마이크로 방전이 형성된다. 마이크로 방전을 형성하고 있는 고농도 전자들에 의해 전극 사이를 통과하는 기체는 반응 활성종 및 이온 가스들로 분해된다 (Abdel-Salam *et al.*, 2003; Mizuno, 2000; 이주상 등, 1995). DBD는 전자 밀도와 전자에너지가 높기 때문에 이로 인해 발생하는 반응 활성종 및 이온의 농도가 높다. 이와 같은 이유로 DBD를 이용해서 가스분해에 대한 많은 연구들이 진행됐다. 김관태 등 (2004)은 유해가스인  $CH_4$ 를 DBD 방전을 이용해서 저감하는 연구를 수행하였다. Yamamoto *et al.* (2004)은 DBD 반응기를 이용해서  $NO_x$ 를 제거하는 실험을 수행하였고, Higashi *et al.* (1992)은 DBD로 디젤엔진 배출 가스에 포함되어 있는  $NO_x$ ,  $CO_x$ ,  $SO_x$  등의 유해가스와 soot 등의 입자상 물질의 저감을 시도하였다. Yamamoto *et al.* (2000)은 DBD와 화학 반응기를 복합 사용하여  $NO_x$ ,  $SO_x$ 를 저감하는 연구를 수행하였고 Guo *et al.* (2006)은 DBD와 촉매를 사용하여 톨루엔을 제거하는 연구를 수행하였다. Rosocha *et al.* (1994)는 VOC 제거에 적용한 연구를 수행하였으며, Lu *et al.* (2006)은 DBD 반응기에  $MnO_2$ 와  $TiO_2$ 를 함께 사용하여 벤젠 (benzene)을 저감하는 연구를 수행하였다. 정재우 등 (2002)은 DBD 반응기의 운전조건에 따른 톨루엔 분해성능에 대한 연구를 수행하였다.

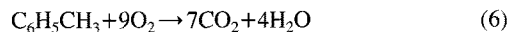
이들 연구에서 사용된 DBD 전극은 주로 한쪽은 와이어 (wire)나 봉 (rod), 반대편은 평판 (plate)이나 실린더 (cylinder)로 구성되어 있다. 이와 같은 경우 와이어나 봉과 같이 상대적으로 면적이 작은 전극을 중심으로 방전이 형성되게 된다. 따라서 와이어나 봉 주변에서는 화학반응이 활발하게 일어나지만 평판이나 실린더 주변에서는 방전 밀도가 작아 화학반응이 상대적으로 활발하지 않게 되며 대상가스의 처리 효율 감소를 가져오게 된다. 이를 개선하기 위해서 최근에는 방전공간 전체에 균일한 방전 형성을 위해 전극을 평판대 평판 (plate to plate)으로 구성하는 방법을 사용하고 있다. 평판대 평판으로 구성된 DBD의 경우 균일한 방전구간을 형성하며 동일 반응기 부피에서 투입할 수 있는 전력량이 와이어 또는 로드를 이용한 전극으로 구성된 DBD에 비해서 많기 때문에 상대적으로 많은 유량을 처리하는 것이 가능

하다. 박재윤 등 (2005)은 평판대 평판 전극으로 구성된 DBD를 이용해서 자동차 배출 오염가스인  $SO_x$ , soot, CO 저감에 대한 연구를 수행하였고, 전상구 등 (2004)은 DBD/촉매 시스템을 이용하여 톨루엔과 NO 저감에 대한 연구를 수행하였다.

VOC는 DBD 반응기 내부에서 공기, 수분 등의 분해로 생성된 O,  $O_3$ , OH와 같은 반응 활성종 및 이온들에 의해 산화되어 제거된다. 반응과정은 다음과 같이 나타난다 (최영석 등, 1999).



여기서  $X^-$ 는 음이온을 나타내고 e는 전자를 나타낸다. VOC의 대표적 물질 중 하나인 톨루엔인 경우 DBD 내부에서 산화될 경우 위 반응식에 따라 최종적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.



따라서 톨루엔이 산화되었을 경우 톨루엔 농도의 7배에 해당하는  $CO_2$ 가 생성되게 된다.

본 연구에서는 평판형 전극을 9단으로 수직 적층한 구조로 된 DBD 반응기를 이용하여 다양한 운전 조건에서 톨루엔을 저감하는 실험을 수행하였고 톨루엔과 CO,  $CO_2$  측정을 통해서 이를 평가하였다.

## 2. 실험 방법

실험장치의 구성을 그림 1에 나타냈다. 실험장치는 DBD 반응기가 설치된 평가 덕트와 톨루엔을 적정농도로 공급하는 시스템과 성능평가 덕트의 내부의 톨루엔 및 일산화탄소 ( $CO$ )와 이산화탄소 ( $CO_2$ ) 농도를 측정하는 시스템으로 구성되었다. 성능평가 덕트는 단면적 40 cm × 40 cm, 길이 1 m의 덕트로 내부에 DBD 전극으로 구성된 카트리지 (cartridge)가 중앙에 삽입된 형태로 되어있다. DBD 전극은 0.03 mm 두께의 구리박 (copper foil)이 0.25 mm 두께의 알루미늄

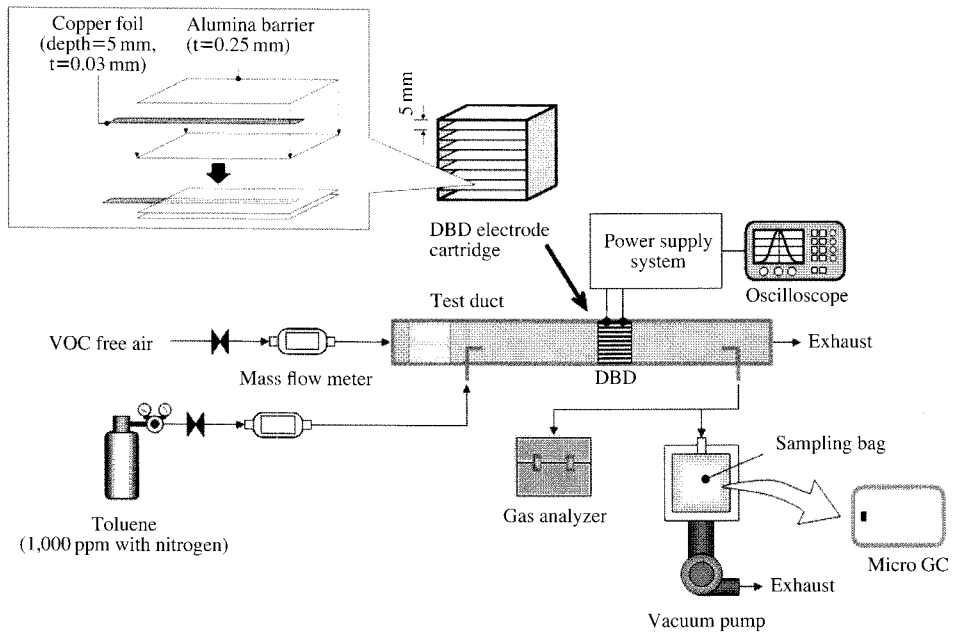


Fig. 1. Experimental setup.

(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 평판 사이에 삽입된 구조로 되어 있다. DBD 전극은 각 전극의 중심 간격 5 mm로 9개가 수직으로 적층되어 DBD 전극 카트리지를 구성한다. 이때 유동 방향으로 구리박의 깊이 (depth)는 5 mm이며 실제 방전이 일어나는 구간이 된다. DBD에 인가되는 전압은 AC 사각파 (rectangular wave form)를 5~8.5 kV (RMS voltage), 60~1,000 Hz의 범위에서 인가하였다. 그림 2에는 DBD에 인가되는 전압, 주파수에 대한 전류를 나타내었다. DBD에 인가되는 전압에 따라 전류는 선형적인 증가를 보였으며 주파수가 증가될수록 전류 역시 증가하였다. 이는 주파수 증가에 따라 단위 시간당 방전횟수도 증가하여 전류 역시 증가했기 때문이다. DBD에 인가되는 전압과 전류 조건을 통해서 이온 발생농도를 다음 식에 의해 산출할 수 있었다.

$$N_{ion} = I / (eZEA) \tag{7}$$

N<sub>ion</sub>은 방전 시 발생된 이온의 농도, I는 방전시 흐르는 전류, e는 기본전하량 (elemental charge), Z는 이온의 전기적 이동도 (electrical ion mobility)로 1.6 × 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/V · s로 가정하였으며 (Hinds, 1999), E는 전기장의 세기, A는 방전전극의 면적을 나타낸다. 계산

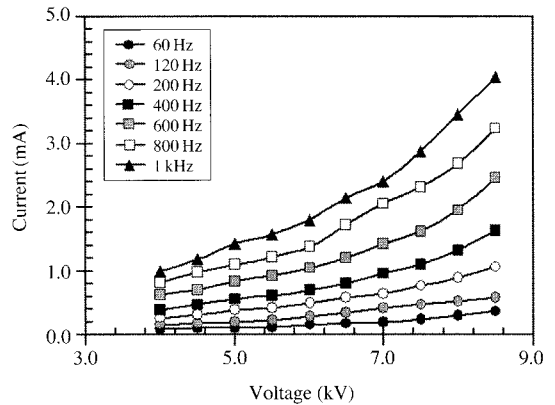


Fig. 2. I-V characteristics of DBD.

결과 본 연구에서 사용된 DBD 반응기의 경우 표 1에 정리된 바와 같이 1.343~2.908 × 10<sup>10</sup>개/cm<sup>3</sup>의 농도로 이온이 발생된 것으로 산출되었다.

톨루엔의 공급은 질소로 희석된 1,000 ppm의 톨루엔 가스가 충전된 가스용기에서 일정 유량을 제어하여 성능평가 덕트 내부로 공급하였고 이를 다시 VOC가 제거된 청정공기로 희석하여 적정농도를 맞추는 방법으로 이루어졌다. 성능평가 덕트 내부로 공

Table 1. Ion generation with electrical operation condition of DBD.

Voltage (kV)	Ion generation (ions/cm <sup>3</sup> )						
	Frequency (Hz)						
	60	120	200	400	600	800	1000
5.0	1.343 × 10 <sup>9</sup>	2.441 × 10 <sup>9</sup>	4.639 × 10 <sup>9</sup>	6.714 × 10 <sup>9</sup>	1.025 × 10 <sup>10</sup>	1.343 × 10 <sup>10</sup>	1.733 × 10 <sup>10</sup>
5.5	1.443 × 10 <sup>9</sup>	2.552 × 10 <sup>9</sup>	4.661 × 10 <sup>9</sup>	6.769 × 10 <sup>9</sup>	1.021 × 10 <sup>10</sup>	1.354 × 10 <sup>10</sup>	1.742 × 10 <sup>10</sup>
6.0	1.526 × 10 <sup>9</sup>	2.848 × 10 <sup>9</sup>	4.883 × 10 <sup>9</sup>	7.019 × 10 <sup>9</sup>	1.068 × 10 <sup>10</sup>	1.394 × 10 <sup>10</sup>	1.831 × 10 <sup>10</sup>
6.5	1.596 × 10 <sup>9</sup>	3.287 × 10 <sup>9</sup>	5.352 × 10 <sup>9</sup>	7.512 × 10 <sup>9</sup>	1.127 × 10 <sup>10</sup>	1.615 × 10 <sup>10</sup>	2.019 × 10 <sup>10</sup>
7.0	1.744 × 10 <sup>9</sup>	3.575 × 10 <sup>9</sup>	5.580 × 10 <sup>9</sup>	8.283 × 10 <sup>9</sup>	1.247 × 10 <sup>10</sup>	1.787 × 10 <sup>10</sup>	2.093 × 10 <sup>10</sup>
7.5	1.953 × 10 <sup>9</sup>	3.825 × 10 <sup>9</sup>	6.185 × 10 <sup>9</sup>	8.952 × 10 <sup>9</sup>	1.318 × 10 <sup>10</sup>	1.888 × 10 <sup>10</sup>	2.344 × 10 <sup>10</sup>
8.0	2.289 × 10 <sup>9</sup>	4.044 × 10 <sup>9</sup>	6.714 × 10 <sup>9</sup>	1.007 × 10 <sup>10</sup>	1.488 × 10 <sup>10</sup>	2.045 × 10 <sup>10</sup>	2.632 × 10 <sup>10</sup>
8.5	2.657 × 10 <sup>9</sup>	4.165 × 10 <sup>9</sup>	7.611 × 10 <sup>9</sup>	1.178 × 10 <sup>10</sup>	1.759 × 10 <sup>10</sup>	2.327 × 10 <sup>10</sup>	2.908 × 10 <sup>10</sup>

급되는 전체유량은 1~5 LPM의 범위로 조절하였으며 DBD 방전구간에서의 체류시간은 0.096~0.48초의 범위가 되었다. 측정을 위해서 DBD 전극 카트리지가 후단 15 cm 떨어진 지점에 샘플링 포트를 설치하여 성능평가 덕트 내부의 공기를 샘플링 할 수 있도록 했다. 측정은 탄화수소, CO, CO<sub>2</sub> 세 가지 가스에 대해서 이루어졌다. 탄화수소의 측정은 가스분석기 (Greenline 9000, Eurotron Instruments S.p.A.)를 이용하였고 CO, CO<sub>2</sub>의 측정은 샘플링 백을 이용하여 성능평가 덕트 내부의 공기를 채취한 후 소형 가스 크로마토그래피 (3000 Micro GC, Agilent)로 분석하였다. 실험은 평균온도 22.5°C, 평균상대습도 50%의 실내 공간에서 진행했다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 DBD인가 전원에 따른 톨루엔 저감특성

DBD 반응기의 전압, 주파수 조건에 따라 톨루엔 저감효율을 알아보았다. 톨루엔의 저감효율은 다음 식에 나타냈다.

$$\eta_{\text{toluene}} = 1 - C_{\text{on}}/C_{\text{off}} \quad (8)$$

$\eta_{\text{toluene}}$ 은 톨루엔의 저감효율을 나타내며,  $C_{\text{on}}$ ,  $C_{\text{off}}$ 은 DBD의 가동 유무에 따른 톨루엔 농도를 나타낸다. 그림 3에는 DBD에 인가한 전압에 따른 톨루엔 저감효율을 나타내었다. DBD에 800, 1,000 Hz의 주파수 조건에서 5.0~8.5 kV 범위의 전압을 인가하였다. 성능평가 덕트 내부로 공급되는 전체 유량은 1 LPM, 공급된 톨루엔의 농도는 100 ppm이었다. 5.0

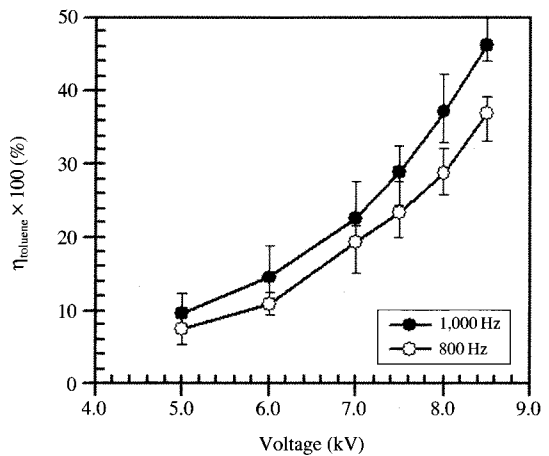


Fig. 3. η<sub>toluene</sub> with voltage (100 ppm, 1 LPM).

kV에서 톨루엔 저감효율은 800 Hz에서 7.4%, 1,000 Hz에서 9.5%였으나 전압이 증가함에 따라 톨루엔 저감효율도 증가하여 8.5 kV 일 때 36.9%, 1,000 Hz 일 때 46.2%로 증가하였다.

주파수에 따른 톨루엔 저감효율을 그림 4에 나타냈다. DBD에 인가되는 전압은 7.5, 8.5 kV로 고정된 각 상황에서 60~1,000 Hz의 범위에서 톨루엔 저감효율을 나타내었다. 덕트 내부로 공급되는 전체 유량은 1 LPM이었으며, 톨루엔 초기농도 100 ppm에 대해서 실험을 수행하였다. 60 Hz에서의 톨루엔 저감효율은 7.5 kV에서 2.6%, 8.5 kV에서는 4.7%로 나타났으며 주파수가 높아짐에 따라 증가한다. 전압에 따른 톨루엔 저감효율과 비슷하게 선형적인 증가를 보이며 1,000 Hz에서는 7.5 kV의 조건에서 28.0%, 8.5 kV의 조건에서 46.2%의 톨루엔 저감효율을 보였다. 주

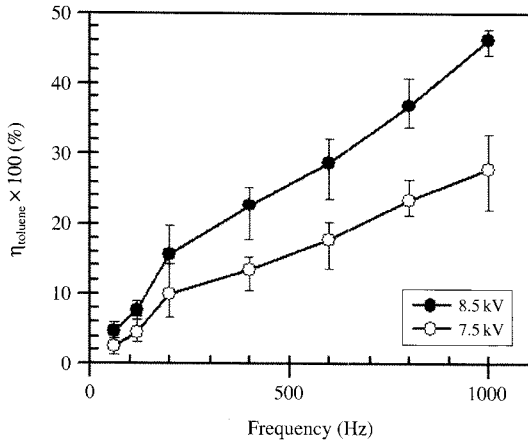


Fig. 4. η<sub>toluene</sub> with frequency (100 ppm, 1 LPM).

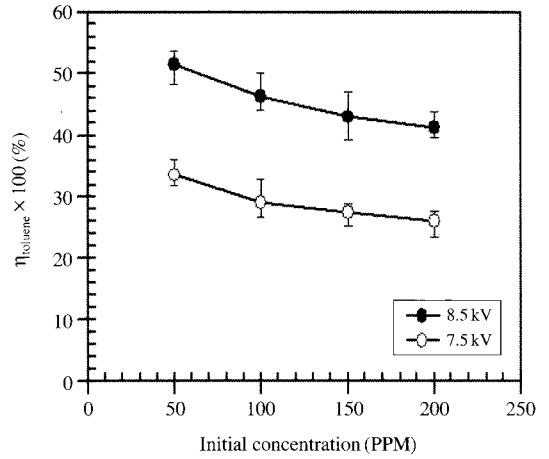


Fig. 6. η<sub>toluene</sub> with initial toluene concentration (1,000 Hz, 1 LPM).

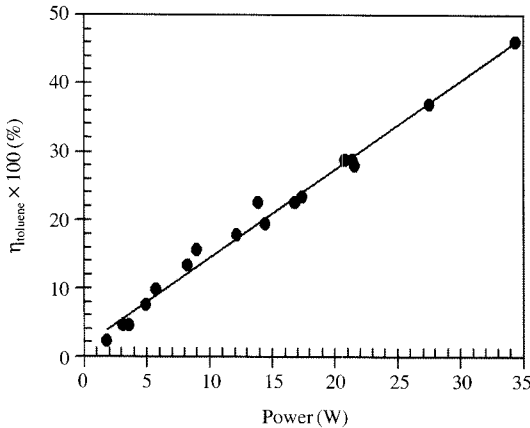


Fig. 5. η<sub>toluene</sub> with power (100 ppm, 1 LPM).

파수 증가에 따라 단위 시간당 방전횟수도 증가하여 DBD 전극들 사이에 흐르는 전류 역시 증가하게 된다. 이는 식(7)에 나온 바와 같이 전류의 증가에 따라 이온의 발생량도 증가하게 되며 이에 따라 톨루엔 저감효율 역시 증가하게 된다.

DBD에 인가되는 전압, 주파수의 증가는 DBD에 인가되는 전력의 증가로 이어진다. 따라서 앞의 전압, 주파수에 따른 톨루엔 저감효율은 DBD에 인가되는 전력에 대한 저감효율로 나타낼 수 있다. 그림 5는 성능평가 덕트로 내부로 공급되는 전체 유량이 1 LPM, 톨루엔의 초기농도 100 ppm인 조건에서의 DBD 인가전력에 대한 톨루엔 저감효율 결과를 정리

해서 나타내고 있다. DBD에 공급되는 전력에 따라 톨루엔 저감 효율은 선형적인 증가를 보이며 DBD에 인가되는 전력이 1 W 증가 될 때, 톨루엔 저감효율은 약 1.3% 증가하는 것으로 나타났다.

### 3. 2 초기농도 및 처리유량 따른 톨루엔 저감 특성

DBD에 인가되는 전원 조건 외에도 초기농도, 처리 유량에 대해서도 실험을 수행하였으면 결과는 다음과 같다. 초기농도 조건에 따른 톨루엔 저감효율을 그림 6에 나타냈다. 톨루엔의 초기농도를 50, 100, 150, 200 ppm의 경우에 대해서 DBD에 인가되는 전압이 7.5 kV와 8.5 kV, 주파수는 1,000 Hz로 고정된 조건에서 실험을 수행하였으며 성능평가 덕트 내부로 공급되는 전체 유량은 1 LPM이었다. 7.5 kV의 조건에서 초기농도 50 ppm의 톨루엔 저감효율은 33.5%로 나타났으며 초기농도가 증가함에 따라 저감효율은 감소하여 200 ppm의 초기농도에서는 26.1%로 나타났다. 8.5 kV 조건에서는 50 ppm의 초기농도에 대해서 51.5%의 톨루엔 저감효율을 나타냈고 7.5 kV 조건에서의 결과와 마찬가지로 초기농도가 높아질수록 톨루엔 저감효율도 감소하여 200 ppm에서 41.3%를 나타냈다. 8.5 kV에서는 7.5 kV에서의 결과와 비교해서 15~18% 높은 톨루엔 저감효율을 나타냈다.

처리유량에 따른 톨루엔 저감효율은 그림 7에 나

타났다. DBD에 인가되는 전압은 1,000 Hz에서 7.5 kV, 8.5 kV의 두 가지 경우를 인가하여 실험을 수행하였고, 톨루엔의 초기농도는 각 유량에 대해서 모두 100 ppm으로 고정하여 공급하였다. 1 LPM의 경우 DBD 반응기 내부의 방전구간에서의 체류시간이 0.48초이며 5 LPM에서는 0.096초가 된다. 7.5 kV 조건에서는 1 LPM 공급 시에 29%의 톨루엔 저감효율을 나타냈고, 처리유량이 늘어남에 따라 저감효율은 감소하여 5 LPM 공급 시 15.7%의 효율을 나타냈다. 8.5 kV 조건에서는 7.5 kV 조건보다 12~17%정도 효율이 증가하였지만 처리 유량이 증가함에 따라 저감효율이 감소하는 경향은 7.5 kV 조건에서의 결과와 비슷하게 나타났다.

**3.3 톨루엔 분해에 따른 CO, CO<sub>2</sub> 발생 특성**

표 2에는 톨루엔 저감에 따른 CO, CO<sub>2</sub>의 발생량

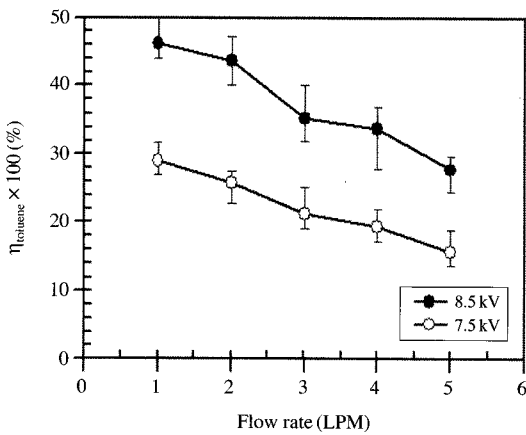


Fig. 7. η<sub>toluene</sub> with flow rate (1,000 Hz, 100 ppm).

측정결과를 정리하였다. 성능평가 덕트로 1 LPM이 공급되는 조건에서 DBD로 1,000 Hz, 8.5 kV의 전압이 인가되었다. 초기농도가 증가할 수록 CO, CO<sub>2</sub>의 발생량은 증가하였으나 CO<sub>2</sub>의 이론적 최대 발생량에 대한 비율로 나타낸 CO<sub>2</sub> 변환율의 경우 초기농도가 증가할 수록 감소하는 경향을 보이고 있었다. 이는 초기농도 증가에 따라 톨루엔 저감효율이 감소하기 때문에 나타난 결과로 보인다. 톨루엔 저감효율을 통해서 저감된 톨루엔의 양으로 CO<sub>2</sub> 발생량을 예측하였으나 측정결과와 차이가 나타났다. 이는 톨루엔 저감효율의 측정에 사용된 계측기와 CO, CO<sub>2</sub> 계측에 사용된 장비의 측정방법이 서로 다르고, 톨루엔 계측 시 발생한 오차와 CO, CO<sub>2</sub> 계측 시 발생한 각각의 오차들에 의해서 나타난 결과로 생각된다. 표 2에 나타난 바와 같이 톨루엔 저감효율의 경우 ±5%의 오차가 있었으며, CO와 CO<sub>2</sub> 측정기의 경우 각각 ±1 ppm, ±100 ppm의 오차가 있었다. 이들을 고려한다면 계산결과와 측정결과 사이의 차이는 줄어들 것으로 생각된다.

**3.4 톨루엔 분해성능 비교**

본 연구에서 사용된 DBD 반응기의 경우 기존 연구결과와 비교하여 비교적 높은 효율을 나타내고 있었다. 기존 연구내용과의 비교결과를 표 3에 정리하였다. 기존 연구결과에 의하면 Guo *et al.* (2006)의 경우 반응기 내부에서 가스의 체류시간이 27초인 조건에서 최대 62%의 효율을 보였으며 Delagrange *et al.* (2006)와 Magureau *et al.* (2005)의 연구결과에서는 수초~10초의 체류시간에서 각각 최대 효율이 67%, 25%로 나타났다. 그러나 본 연구에서는 0.5초 이하의 짧은 반응기 내부에서의 체류시간에도 불구하고

Table 2. CO, CO<sub>2</sub> conversion from toluene (1,000 Hz, 8.5 kV, 1 LPM).

Initial concentration of toluene (ppm)	η <sub>toluene</sub> × 100 (%)	<sup>a</sup> CO <sub>2</sub> generation (maximum, ppm)	<sup>b</sup> CO <sub>2</sub> generation (ppm)	CO <sub>2</sub> concentration (measurement, ppm)	CO concentration generation (ppm)	CO+CO <sub>2</sub> (measurement, ppm)	<sup>c</sup> CO <sub>2</sub> conversion rate (%)
50	48.2~53.7	350	168.7~188.0	230 ± 100	46 ± 1	276	65.7
100	44.1~50.0	700	308.7~350.0	420 ± 100	112 ± 1	532	60.0
150	39.2~47.0	1050	411.6~493.5	590 ± 100	190 ± 1	780	56.2
200	39.7~44.0	1400	555.8~616.0	600 ± 100	308 ± 1	908	42.9

<sup>a</sup>CO<sub>2</sub> generation=initial concentration of toluene × 7

<sup>b</sup>CO<sub>2</sub> generation=initial concentration of toluene × η<sub>toluene</sub> × 7

<sup>c</sup>CO<sub>2</sub> conversion rate={CO<sub>2</sub> concentration/(initial concentration of toluene × 7)} × 100

**Table 3. Comparison of toluene removal.**

Contents	Initial concentration (ppm)	Flow rate (LPM)	Residence time (sec)	Power/Flow rate (J/L)	$\eta_{\text{toluene}}$ (%)	$\eta_{\text{toluene}}/\text{Power}$ ( $\mu\text{g}/\text{W}$ )
Our study	50~200	1~5	0.096~0.48 <sup>a</sup> (+2.88~14.4)	259~2064	15~51	14.2~17.9
Guo <i>et al.</i> (2006)	50	0.1	27	200~750	20~62	10.2~12.4
Delagrance <i>et al.</i> (2006)	240	0.315	more than 10	172	36	12.4
Magureanu <i>et al.</i> (2005)	560	0.05~0.15	2.21~6.36	900~2700	5~25	6.3~12.3

<sup>a</sup>residence time from DBD reactor to sampling port

최대 51%의 효율을 나타냈다. Delagrance *et al.* (2006) 와 Magureanu *et al.* (2005)의 경우 플라즈마 외에도 촉매를 같이 사용했음에도 불구하고 본 연구결과보다 효율이 낮았다. 이는 DBD 전극의 형상에 기인한 것으로 보인다. 전극 구성이 와이어대 평판(wire to plate), 또는 와이어대 실린더(wire to cylinder)일 경우 와이어 주변에서만 국부적으로 방전이 형성되기 때문에 평판대 평판 전극에 비해서 가스의 처리 가능한 구역이 작다. 평판대 평판 전극의 경우 방전구역이 넓고 공간 전체에 균일하게 형성되기 때문에 표 3에 나타난 바와 같이 유량대비 공급할 수 있는 전력이 크다. 따라서 네 연구결과 모두 전력 대비 톨루엔 저감량이 비슷한 점을 감안하면 동일 처리유량에 대해서 높은 전력을 공급할 수 있기 때문에 반응활성종 및 이온의 발생 농도가 상대적으로 높게 발생할 수 있고 이는 곧 톨루엔 저감효율의 상승으로 이어진 것으로 보인다. 식(7)을 이용하여 Magureanu *et al.* (2005)의 연구에서 사용된 DBD의 이온 발생량을 계산한 결과  $8.59 \times 10^8/\text{cm}^3$ 로 나타났으며 이는 본 연구에서 사용된 DBD에서 발생된 이온의 농도인  $1.343\text{-}2.908 \times 10^{10}\text{개}/\text{cm}^3$ 의 약 1/15~1/30에 해당한다.

#### 4. 결 론

평판형 전극을 9단으로 수직 적층한 구조로 된 DBD 반응기를 이용하여 톨루엔을 저감하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) DBD 인가전압에 따른 실험결과 5.0 kV에서 8.5 kV까지 증가하는 동안 800 Hz 조건에서는 톨루엔 저감효율이 7.4%에서 36.9%로, 1,000 HZ 조건에

서는 9.5%에서 46.2%로 상승하였다.

(2) DBD에 인가되는 주파수에 대한 실험에서는 60 Hz에서 1,000 Hz로 증가하는 동안 톨루엔 저감효율은 7.5 kV 조건에서는 2.6%에서 28.0%, 8.5 kV 조건에서는 4.7%에서 46.2%로 증가하였다.

(3) 전력대비 톨루엔 저감효율은 1 W증가 시 1.3%의 톨루엔 저감효율이 향상되었다. DBD에 공급되는 전력이 많을 수록 톨루엔 저감효율도 선형적으로 증가하였다.

(4) 초기농도가 증가할 수록 톨루엔 저감효율은 감소하였으며 7.5 kV의 조건에서 50 ppm에서 200 ppm으로 초기농도가 증가하는 동안 톨루엔 저감효율은 33.5%에서 26.1%로 감소하였고, 8.5 kV 조건에서도 51.5%에서 41.3%로 감소하였다.

(5) 처리유량이 증가할 수록 톨루엔 저감효율은 선형적으로 감소하였다. 7.5 kV 조건에서 1 LPM에서 5 LPM으로 처리유량이 증가할 수록 29%에서 15.7%로 감소하였고, 8.5 kV 조건에서는 7.5 kV 조건보다 12~17% 정도 효율이 증가하였지만 감소하는 경향은 비슷하게 나타났다.

(6) 톨루엔 저감에 따른 CO, CO<sub>2</sub>의 증가량도 실험적으로 확인하였으며 변환율은 최대 65.7%로 나타났다.

수직적층으로 구성된 9단 평판 전극은 기존 와이어대 평판, 또는 와이어대 실린더 형상의 전극에 비해서 방전이 형성되는 체적이 크고 균일하며, 처리유량에 비해 공급할 수 있는 전력도 높아 톨루엔 저감 효율 또한 높게 나타났다. 이는 DBD 반응기에서 발생하는 반응 활성종 및 이온 가스의 농도가 상대적으로 높게 나타났기 때문으로 볼 수 있다.

향후 연구를 통해서 톨루엔 분해에 따른 반응 생성물에 대한 조사가 필요하다. 이를 통해서 유해가스

저감을 위한 DBD의 사용 시 실내 공간, 산업 후처리 사용 등 목표공간의 적용 가능성을 파악하여 그 응용을 넓힐 수 있을 것이라 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 서울시 산학협력사업 (Grant No. 10593) 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

김관태, 김용호, 차민석, 송영훈, 김석준, 류정인 (2004) DBD 반응기에서 플라즈마 방전형태에 따른 PFCs 가스의 분해 특성, 한국대기환경학회지, 20(5), 625-632.

김상환, 강태성, 양희성, 브트린뉴이, 박형상 (2006) 알루미늄에 담지한 백금 촉매상에서 휘발성 유기화합물 톨루엔 및 톨루엔+자일렌의 저온산화, 한국대기환경학회지, 22(6), 799-807.

김상국, 장예림 (2008) 활성탄소섬유 흡착bed에서의 톨루엔 흡착특성, 한국대기환경학회지, 24(2), 220-228.

박재운, 정장근, 김종석, 하현진 (2005) 고주파 플라즈마 시스템에 의한 디젤기관의 배기가스 특성, 한국조명·전기설비학회논문지, 19(5), 109-113.

이주상, 김신도, 김광영, 김종호 (1995) 연면방전의 플라즈마 화학처리에 의한 유해가스제어 성능에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 11(2), 185-190.

전상구, 신대현, 문승현 (2004) 저온 플라즈마/촉매 복합 시스템을 이용한 유해가스물질들의 저감, 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, 1, 221-226.

정재우, 이용환, 박경렬 (2002) 무성방전내에서 톨루엔 제거에 미치는 운전변수의 영향, 한국대기환경학회지, 18(3), 173-182.

최영석, 서동범, 이원남, 송영훈 (1999) 저온 플라즈마 반응기의 톨루엔, 프로판 및 에틸렌 제거 특성 및 반응 메커니즘, 대한기계학회 추계학술대회논문집, B, 145-150.

Abdel-Salam, M., A. Hashem, A. Yehia, A. Mizuno, A. Turkey, and A. Gabr (2003) Characteristics of corona and silent discharges as influenced by geometry of the discharge reactor, J. Phys. D: Appl. Phys.,

36, 252-260.

Delagrang, S., Pinard, L., and Tatibouet, J.M. (2006) Combination of a non-thermal plasma and a catalyst for toluene removal from air: Manganese based oxide catalysts, Applied Catalysis B: Environmental 68, 92-98.

Falkenstein, Z. (1998) Application of dielectric barrier discharge, 12th Int. Conf on High-Energy Particle Beams, Beams'98, Haifa, Israel, June pp. 7-12, 117-120.

Guo, Y.F., D.Q. Ye, K.F. Chen, J.C. He, and W.L. Chen (2006) Toluene decomposition using a wire-plate dielectric barrier discharge reactor with manganese oxide catalyst in situ, Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 245, 93-100.

Higashi, M., S. Uchida, N. Suzuki, and K. Fujii (1992) Soot elimination and NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> reduction in diesel-engine exhaust by a combination of discharge plasma and oil dynamics, IEEE Trans. Plasma Sci., 20 (1), 1-12.

Hinds W.C. 1999. Aerosol technology. New York: John-Wiley & Sons.

Lu, B., X. Zhang, X. Yu, T. Feng, and S. Yao (2006) Catalytic oxidation of benzene using DBD corona discharges, J. Hazard. Mater., 137, 633-637.

Magureanu, M., N.B. Mandache, P. Eloy, E.M. Gaigneaux, and V.I. Parvulescu (2005) Plasma-assisted catalysis for volatile organic compounds abatement, Applied Catalysis B: Environmental, 61, 12-20.

Mizuno, A. (2000) Electrostatic precipitation, IEEE Trans. Dielectrics Electrical Insulation, 7, 615-624.

Rosocha, L.A., J.J. Coogan, and M. Kang (1994) Use of silent electrical discharges for environmental remediation, IEEE Int. Conf., 88, IE4.

Yamamoto, K., M. Yukimura, S. Kambara, H. Moritomi, T. Yamashita, and T. Maruyama (2004) Effect of O<sub>2</sub> on NO removal by ammonia radical injection using one-cycle sinusoidal power source, Thin Solid Films, 457, 39-43.

Yamamoto, T., M. Okubo, T. Nagaoka, and K. Hayakawa (2000) Simultaneous removal of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> in flue gas emission using plasma-chemical hybrid process, Ind. Appl. Conf., Conf. Rec. 2000, IEEE, 1, 641-647.