

# 유전체 볼 충전 배리어 방전을 이용한 오존 생성 및 TCE 분해처리에 관한 연구

## Study on the Ozone Generation and Decomposition of Trichloroethylene Using Dielectric Ball Materials filled Barrier Discharge

한 상 보\*★

Sang-Bo Han\*★

### Abstract

This work was carried out ozone generation and TCE decomposition characteristics using dielectric ball materials filled barrier discharge reactor and catalyst's reactor for ozone decomposition. Ozone concentration generated from  $Al_2O_3$  or  $TiO_2$  filled barrier discharge reactor was so high compared with non-filled discharge reactor. This reactor is good discharge structure for generating the high ozone concentration. In addition, TCE decomposition rate and COx conversion rate increased using  $MnO_2$  filled discharge reactor, because ozone was decomposed at the same discharge space on the surface of  $MnO_2$  catalysts. To identify the  $MnO_2$  catalytic effects, TCE decomposition rate reached to 100[%] by the decomposition of ozone at  $MnO_2$  catalyst's reactor by the arrangement of  $Al_2O_3$  filled discharge reactor and  $MnO_2$  catalyst reactor. Finally,  $MnO_2$  catalyst is good materials for the decomposition of ozone and this process will be useful for decomposing VOCs such as TCE.

### 요 약

논문은 유전체 볼 충전 배리어 방전 리액터를 이용하여 오존 생성 및 TCE 분해 특성에 대하여 논하였다. 오존 발생량은  $Al_2O_3$  또는  $TiO_2$  유전체 볼을 충전한 경우가 유전체 볼을 충전하지 않은 배리어 방전리액터에 비하여 크게 증가됨을 보였으며, 이러한 방전구조는 오존 생성량을 증가시키기에 적절한 것으로 판단되었다. 또한, TCE 분해효율과 COx 전환율은  $MnO_2$  충전 방전리액터를 사용한 경우가 높았으며, 이것은 방전공간에 위치한 촉매 표면에서 오존 분해에 따른 화학반응에 기인된 것으로 파악되었다. 촉매 표면 화학반응을 파악하기 위하여  $Al_2O_3$  유전체 볼 충전 방전리액터와 촉매 리액터를 직렬로 배치하여 TCE 분해 효율이 100[%]에 도달하였음을 확인하였으며,  $MnO_2$  촉매는 오존 분해에 매우 좋은 재료이며, 이러한 오존 분해 촉매 반응을 이용하여 TCE와 같은 VOCs 분해에 유용하게 활용될 것으로 사료된다.

*Key words* : Barrier discharge, Catalyst, TCE,  $MnO_2$ , Ozone

\* Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University

★ Corresponding author

E-mail : [hansangbo@uok.ac.kr](mailto:hansangbo@uok.ac.kr), Tel : +82-55-249-2635

※ Acknowledgment

Manuscript received Jun. 5, 2019; revised Jun. 24, 2019; accepted Jun. 24, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

높은 고전압을 기체에 인가하면 기체가 여기 또는 전리되면서 이온 또는 전리된 전자가 중성기체와의 충돌에 의해 다시 새로운 라디칼, 이온과 같은 반응성 높은 화학종 및 발광(빛)이 수 나노에서 수 마이크로 초(microseconds)까지 매우 짧은 시간 동안에 발생된다. 최근, 대기압 방전과 촉매를 혼합시켜 유해물질들을 분해하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다[1-7]. 특히, 대기압 방전은 외부에서 인가하는 전원의 주파수에 따라서 전극 사이에 유전체 계재 또는 전극과 전극을 직접 대향시키는 다양한 방전구조로 제작하는 것이 가능하다. 대기압 방전에는 코로나, 스트리머, 글로우, 아크 등의 상태가 단독 또는 혼재하도록 생성시키는 것이 가능하며, 그 내부에는 상당히 복잡한 물리·화학적 반응을 동반하고 있다.

특히, 유전체를 사용하여 외부 전극과 내부 전극을 절연하는 경우에는 방전부분의 소비전력을 감소시키고, 가스 온도를 높이지 않는 특징이 있으며, 이러한 방전방식을 배리어 방전이라고 한다. 본 연구에서는 유전체인 석영관을 이용하는 기존 배리어 방전 리액터 내부에 유전체 볼을 충전시켜 불접촉부 근처와 유전체인 석영관 표면에서 매우 많은 마이크로 방전이 발생되도록 제작하였다.

본 연구에서 제작한 방전리액터는 두 전극 중 한 쪽 전극을 절연시키지 않고 서로 대향시켜 그 사이에 유전체 볼을 충전한 경우와는 구조가 매우 다르며, 석영관과 충전한 유전체 볼 표면에 전하 충전이 발생되어 낮은 인가전압에서도 방전을 용이하게 발생시킬 수 있는 장점이 있다. 하지만, 충전한 유전체 볼의 종류에 따라서 표면에서의 도전을 변화 및 표면 화학반응으로 인하여 그 특성을 분석하기가 쉽지 않은 단점이 있다.

본 연구에서는 유전체 볼 충전 배리어 방전리액터를 이용하여 유전체 볼의 종류에 따른 방전특성, 오존 생성 및 분해 특성, 그리고, 제조업분야에서 세척액으로 널리 사용되고 있는 인체 유해한 트리클로로에틸렌(TCE, C<sub>2</sub>HCl<sub>3</sub>)의 분해처리 특성에 대하여 연구를 진행하였다.

또한, 본 방전 리액터에 의한 오존 분해 촉매의 영향에 대하여 분석을 진행하였다.

II. 본론

2.1 실험장치 구성도 및 방전특성 분석

그림 1(a)는 본 연구에서 제작한 유전체 볼 충전 배리어 방전 리액터를 나타낸 것으로서, 석영관 유전체의 내경 11.4[mm], 내부 전극 직경 3[mm], 외부전극 길이 110[mm]로서, 유전체 볼을 충전한 부분이 외부전극보다 양측으로 각각 30[mm]정도 길게하여 충전 볼 고정부(테프론)에서 방전이 발생되지 않도록 하였다. 또한, 유전체 볼을 충전하지 않은 배리어 방전 리액터는 나사형 내부 금속전극과 석영관과의 갭을 2.2[mm]로 유지되도록 하였다.

또한, 모든 방전리액터의 외부전극은 석영관과 밀착되도록 실버페이스트(Silver paste) 도포한 후 고온용 테이프를 사용하여 밀착·부착시켰으며, 끝단부에서의 코로나 발생을 억제하기 위하여 절연고무를 사용하여 마감 처리하였다. 가스유량 제어는 모의 공기(N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=80:20%)가 방전 리액터에 일정유량 흐르도록 MFC(Micro Flow Controller)를 사용하여 제어하였다.

방전 리액터 자체의 순수한 방전 전력은 리사쥬도형법(Lissajous's figure)[9]을 이용하여 방전전류에 의해 부하 콘덴서에 충전된 전하량과 인가전압, 주파수의 관계를 이용하여 계산하였다.

유전체 볼의 종류에 따른 오존 생성 및 TCE 분해에 대한 영향을 조사하기 위하여 아래 표 1에서와 같이 4가지 종류의 유전체 볼을 자체 제작하여 실험을 진행하였다.

Table 1. Specifications and kinds of dielectric ball materials. 표 1. 유전체 볼의 종류 및 제원

종류	특기사항
type 1 : 직경 2[mm] 알루미늄(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 볼	
type 2 : 동일 알루미늄 볼에 TiO <sub>2</sub> 분말 코팅 후 열처리	열처리 온도 및 시간 : 1000[°C], 3시간
type 3 : 동일 알루미늄 볼에 MnO <sub>2</sub> 분말 코팅	
type 4 : 동일 알루미늄 볼에 MnO <sub>2</sub> 분말 코팅 후 열처리	열처리 온도 및 시간 : 1000[°C], 3시간

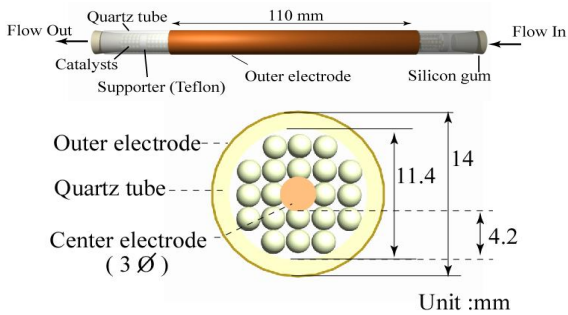
그림 1(b)의 방전 리액터 및 촉매 리액터 배치 구조의 가스 생성물의 변화는 출구 부분에 GCMS, FTIR, 오존 분석기를 배치하여 분석을 진행하였으며, 분해효율(η), COx 수율, CO<sub>2</sub> 선택도는 아래의

수식을 이용하여 계산하였다.

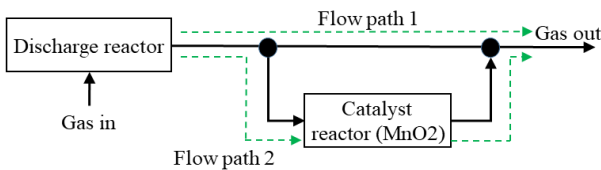
$$\eta [\%] = \frac{[C_0] - [C]}{[C_0]} \times 100 = \frac{\Delta[C]}{[C_0]} \times 100 \quad (1)$$

$$CO_x \text{ Yield} [\%] = \frac{[CO] + [CO_2]}{\text{Number of Carbon} \times [C_0]} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Selectivity of } CO_2 [\%] = \frac{[CO_2]}{[CO] + [CO_2]} \times 100 \quad (3)$$



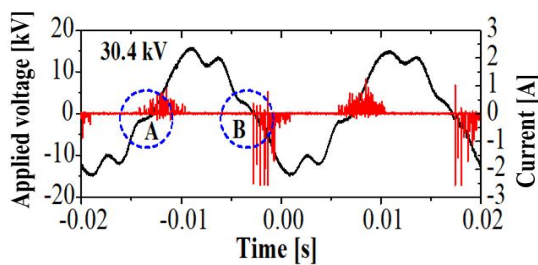
(a) 유전체 불 충전 배리어 방전 리액터의 구조



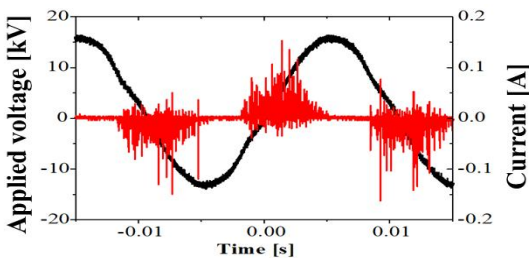
(b) 방전 리액터 및 촉매 리액터 배치구조

Fig. 1. Structure of dielectric materials filled barrier discharge reactor and arrangement of discharge and catalyst reactor.

그림 1. 유전체 불 충전 배리어 방전 리액터의 구조와 방전-촉매 리액터의 배치



(a) 유전체 불 충전하지 않은 배리어 방전 리액터



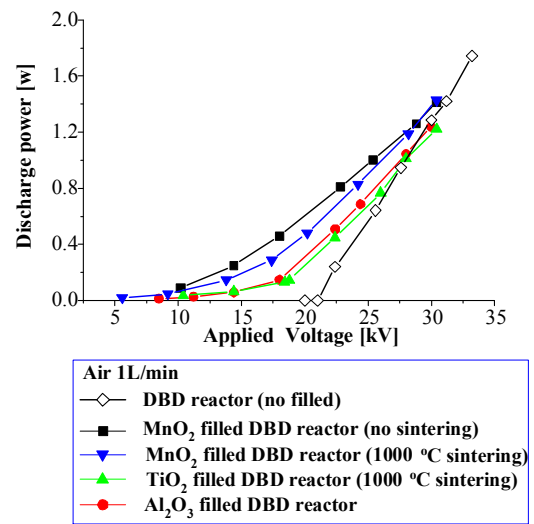
(b) 알루미늄 불 충전 배리어 방전 리액터

Fig. 2. Comparison of waveform about the applied voltage and discharge current.

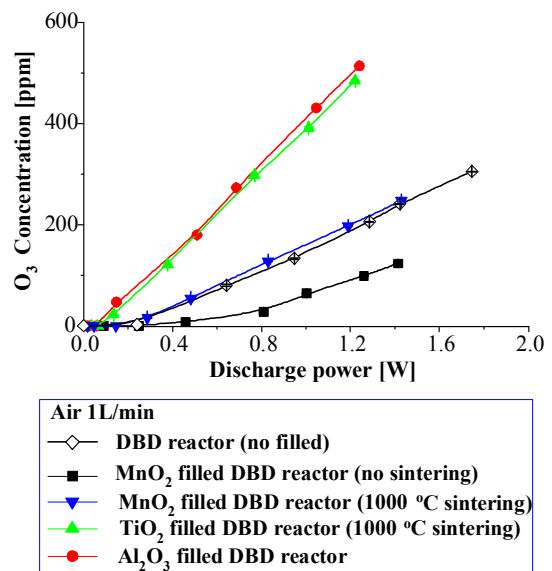
그림 2. 인가전압 및 방전전류 파형의 비교(직경 2[mm]의 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 불 충전)

그림 2는 유전체 불 충전 및 미충진 배리어 방전 리액터의 인가전압과 방전전류를 보인 것으로서, 그림 2(a)에서와 같이 인가전압 0[V] 부근에서 방전전류가 흐르는 것은 유전체인 석영관 표면에 전하 축적에 의하여 역방향 전압 인가시 충전된 전하에 의하여 방전이 발생됨을 의미하는 배리어 방전 리액터의 전형적인 파형이다.

알루미나 불을 충전한 경우인 그림 2(b)는 그림 2(a)에 비하여 방전전류의 크기가 1/10에 해당되지만 인가전압 0[V] 전후로 긴 시간 구간에 걸쳐서



(a) 인가전압에 따른 방전전력의 비교



(b) 방전전력에 따른 오존 생성 특성

Fig. 3. Comparison of ozone generation according to discharge power and the relation between the applied voltage and discharge power.

그림 3. 인가전압과 방전전력의 관계 및 방전전력에 따른 오존 생성 특성 비교

발생되는 것을 통해 수많은 마이크로 방전이 매우 긴 시간에 걸쳐서 발생됨을 알 수 있다. 이것은 충전된 유전체 볼들의 접촉부분 및 유전체 볼과 석영관 사이에 충전전하에 의해 긴 시간동안 발생하는 것으로 판단된다.

또한, TiO<sub>2</sub> 및 MnO<sub>2</sub> 유전체 볼을 충전한 경우에도 전류 크기에 있어서 차이가 있을 뿐 파형은 유사함을 보였다.

그림 3(a)에서와 같이 어떤 유전체도 충전하지 않은 경우에는 약 20[kV] 부근에서 전력이 선형적으로 증가하지만, 유전체 볼을 충전한 경우에는 10[kV] 이전부터 방전이 발생되어 소비전력이 증가함을 알 수 있다. 이것은 그림 2(b)에서와 같이 충전된 물질에 의하여 전계가 강화되어 낮은 전압에서도 방전이 많은 곳에서 긴 시간동안 발생되기 때문에 소비전력이 증가되는 것으로 사료된다. 또한 TiO<sub>2</sub> 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 충전한 경우에 비하여 MnO<sub>2</sub>를 충전한 경우가 낮은 전압에서 방전이 발생하는 것은 충전된 유전체 볼 표면의 도전율이 상대적으로 높기 때문으로 사료된다.

그리고, 그림 2(b)는 방전전력에 따른 오존 생성량의 비교를 보인 것으로서, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 또는 TiO<sub>2</sub> 유전체 볼을 충전한 경우가 유전체 볼을 충전하지 않은 경우에 비하여 오존 발생량이 매우 증가됨을 알 수 있으며, MnO<sub>2</sub> 유전체 볼을 충전한 경우에는 오존 발생량이 매우 감소됨을 알 수 있다. 이것은 표면 화학반응에 의하여 오존이 MnO<sub>2</sub> 표면에서 분해되어 산소 라디칼을 생성하거나, 전도전류 증가에 의하여 방전영역에서 오존의 열적 분해가 증가되어 감소되는 것으로 사료된다.

S. *Imamura et al.* [8]은 몇가지 촉매에서 오존 분해 동안에 도전율의 증가에 대하여 음극성 산소 화학종인 O<sup>-</sup>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, 및 O<sub>2</sub><sup>2-</sup>과 같은 억셉터 농도의 증가에 의한 전도도 증가에 의한다고 서술하였다. 하지만, 이러한 음극성 산소화학종의 실제 존재함을 밝힌 보고는 없는 상황이다.

하지만, 열처리한 MnO<sub>2</sub> 유전체 볼을 충전한 경우에는 열처리하지 않은 경우에 비하여 동일 소비 전력량에서 2배 이상의 오존이 발생되었다.

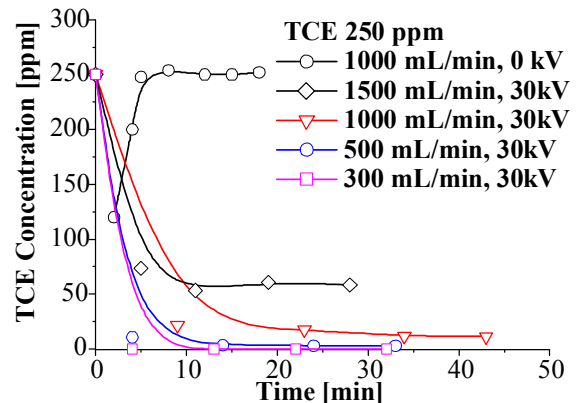
이것은 MnO<sub>2</sub> 열처리 하는 과정에서 Mn<sub>x</sub>O<sub>y</sub> (Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)처럼 표면결합 구조가 변화되어 오존분해 활성사이트가 감소됨에 따라 표면상에서 오존이 분해되지 않기 때문으로 사료된다.

## 2.2 TCE 분해처리 특성

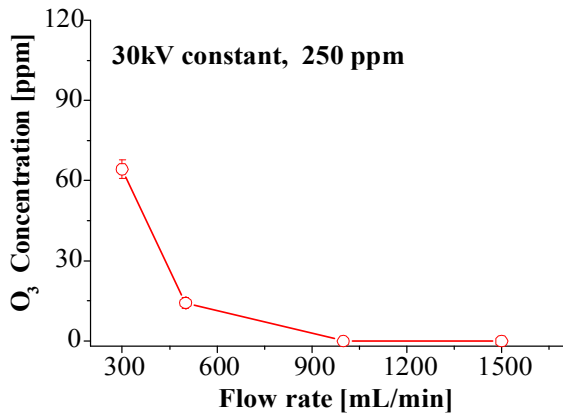
그림 4는 열처리하지 않은 MnO<sub>2</sub> 유전체 볼을 충전한 경우의 TCE 분해효율, 오존 농도의 변화, CO<sub>x</sub> 수율 및 선택도를 나타내었다. 그림 4(a)는 시간 경과에 따른 TCE의 농도 변화를 나타낸 것으로서 전압을 인가하지 않은 0[kV]에서는 5분 경과 후에야 초기 농도로 유지됨을 알 수 있다. 이것은 N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>(4:1) 가스 중에 포함되어 있는 TCE가 MnO<sub>2</sub> 유전체 볼에 흡착되는 현상에 기인되는 것으로서 일정시간 흡착이 완료된 이후에 초기 농도 250[ppm]으로 회복됨을 보인 것이며, 동일한 전압 30[kV]를 인가한 경우에는 가스 유량이 감소됨에 따라서 TCE 농도가 급격히 감소되어 0[ppm]에 도달함을 알 수 있다. 이것은 그림 4(b) 유량에 따른 TCE 분해 효율 그래프에서 유량이 낮은 경우 분해효율이 100%에 도달하였음을 알 수 있다.

또한, 그림 4(c)(d)에서 유량이 낮은 경우의 CO<sub>x</sub> 수율이 82%에 이르는 것은 TCE를 구성하고 있는 대부분의 탄소성분이 CO<sub>x</sub>로 전환되었음을 의미하며, 유량이 1500[mL/min]인 경우에는 분해율 80%에서 약 20%만이 CO<sub>x</sub>로 전환되었음을 알 수 있다. 유량에 따른 CO<sub>x</sub> 전환율 차이에서 중요한 것은 방전영역 내에 위치한 MnO<sub>2</sub> 표면에서 새로운 화학반응이 발생된다는 것을 유추할 수 있다.

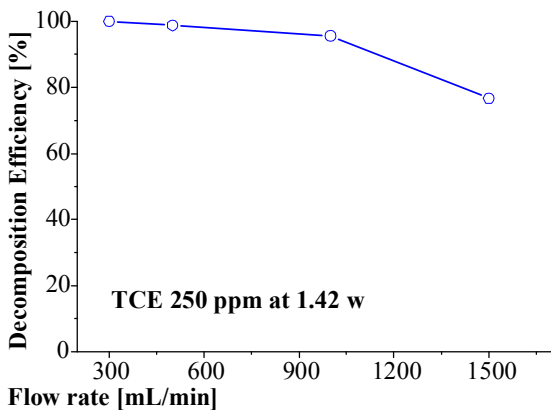
특히, 유량이 낮은 경우에는 TCE가 분해됨과 동시에 CO<sub>x</sub>로 전환되는 것은 방전영역에서 TCE의 분해와 더불어 생성된 오존이 근처 MnO<sub>2</sub> 표면에서 분해되면서 산소라디칼을 생성시키고, 이러한 산소 라디칼이 새로운 화학반응을 유발시켜 TCE 분해 및 부산물을 더욱 분해시키는 화학작용하기 때문으로 사료된다.



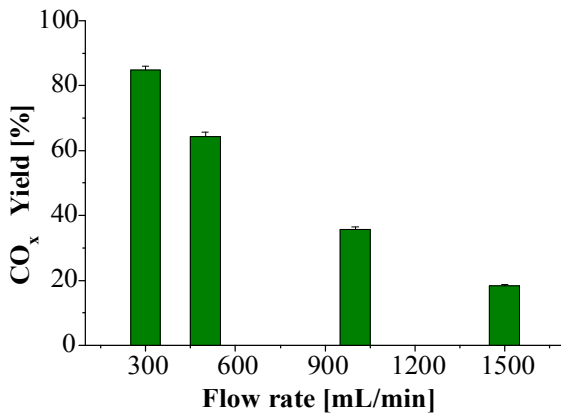
(a) 가스유량에 따른 인가전압별 TCE 농도의 시간 변화



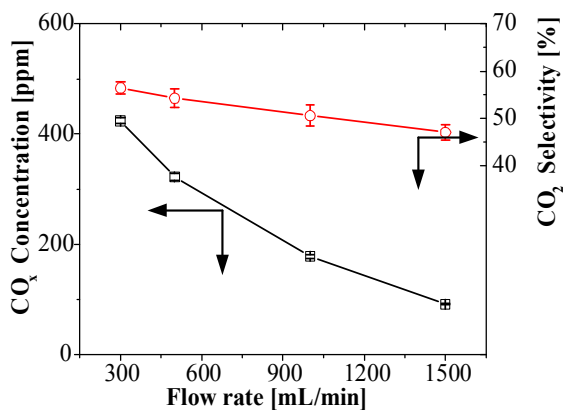
(b) 가스 유량에 따른 오존 농도의 변화



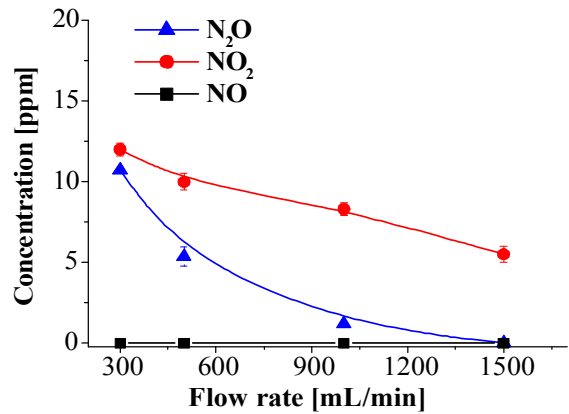
(c) 가스 유량에 따른 TCE 분해효율



(d) 가스 유량에 따른 CO<sub>x</sub> 수율



(e) 가스 유량에 따른 CO<sub>x</sub> 농도 및 CO<sub>2</sub> 선택도



(f) 가스 유량에 따른 질소산화물 생성량 변화

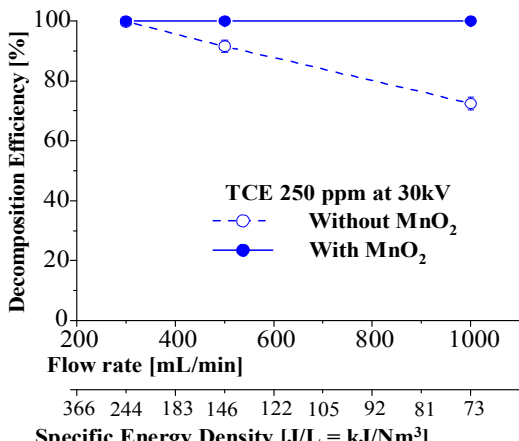
Fig. 4. Experimental results using MnO<sub>2</sub> materials filled barrier discharge reactor(No heat treatment).  
그림 4. 열처리 하지 않은 MnO<sub>2</sub> 유전체 볼을 충전한 배리어 방전 리액터의 실험 결과

하지만, 그림 4(f)에서와 같이 배리어 방전 리액터에 에어를 사용함에 따라 발생될 수 있는 NxOy (N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, NO)가 소량 발생됨을 알 수 있다. 이러한 NxOy 부산물 생성량을 감소시킬 수 있도록 추가적인 연구가 필요하다.

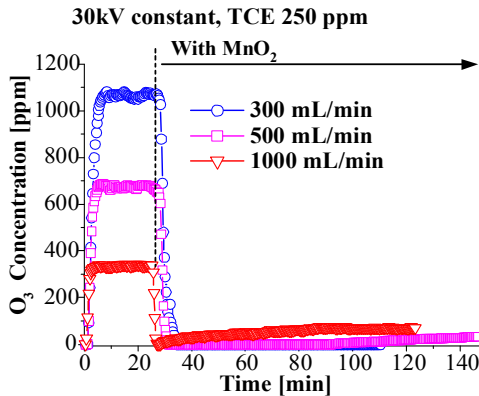
MnO<sub>2</sub> 표면에서 오존분해에 기인된 TCE 분해효율 및 부산물 분포 특성을 비교하기 위하여 그림 5에서와 같이 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 유전체 볼을 충전한 배리어 방전 리액터에 대하여 동일한 실험을 진행하였다. 유량이 낮은 경우 TCE 분해효율이 높았지만, 유량이 증가됨에 따라 72%까지 급격히 분해효율이 낮아졌으며, 오존 발생량도 매우 증가하였다.

따라서, 오존분해 촉매의 영향을 실험적으로 입증하기 위하여, 그림 1(b)에서와 같이 방전 리액터 후단에 촉매 리액터인 MnO<sub>2</sub> 리액터를 배치하여, MnO<sub>2</sub> 통과 여부에 따른 주요한 실험 결과를 그림 5에 함께 나타내었다. 특히, MnO<sub>2</sub> 촉매 리액터를 통과함에 따라 방전 리액터에서 발생된 오존이 분해됨과 동시에 TCE 분해효율 및 부산물 분포변화에 대하여 조사하였다.

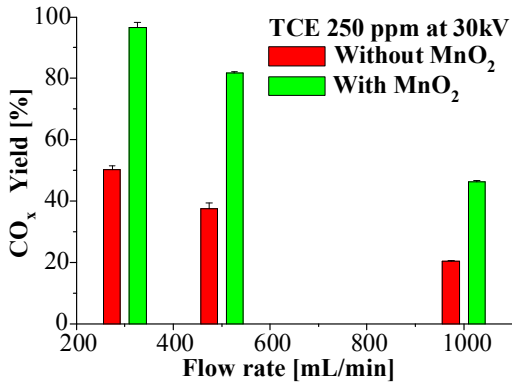
그림 5(a)(b)에서와 같이 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 유전체 충전 배리어 방전 리액터만을 이용하여 TCE를 분해한 경우에는 유량이 증가됨에 따라서 급격히 분해효율이 낮아졌으며, 오존 발생량은 유량이 감소됨에 따라 매우 증가됨을 알 수 있다. 하지만, 플라즈마 리액터 후단에 설치한 MnO<sub>2</sub> 촉매 리액터를 통과함에 의하여 생성된 오존이 대부분 분해되고, TCE 분해율도 100%로 대부분 분해됨을 알 수 있다.



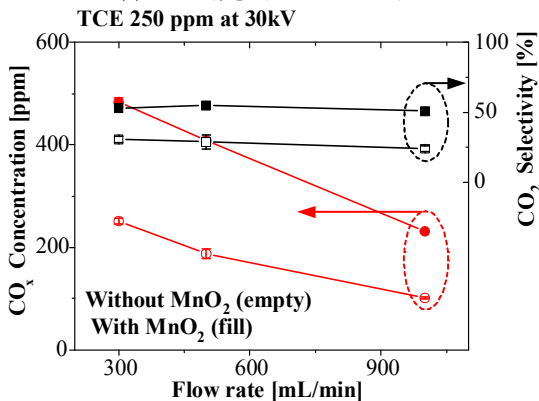
(a) 가스 유량에 따른 TCE 분해효율의 변화 (후단에 설치한 MnO<sub>2</sub> 통과 유무)



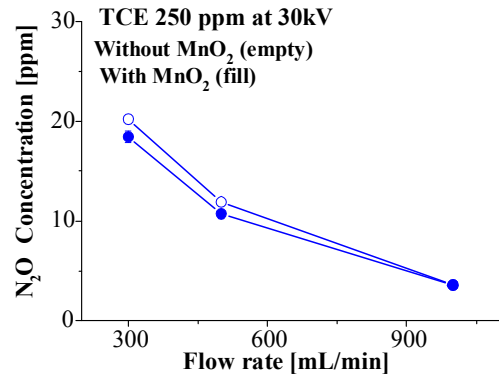
(b) 가스 유량별 오존 농도의 시간 변화 (수직 점선 이후는 플라즈마 리액터 후단의 MnO<sub>2</sub> 통과를 의미함)



(c) 가스 유량에 따른 CO<sub>x</sub> 수율



(d) 가스 유량에 따른 CO<sub>x</sub> 농도 및 CO<sub>2</sub> 선택도



(e) 가스 유량에 따른 질소산화물 생성량 변화

Fig. 5. Experimental results using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> materials filled barrier discharge reactor.

그림 5. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 유전체 충전 배리어 방전 리액터의 실험 결과

이것은 플라즈마 리액터에서 발생된 오존이 MnO<sub>2</sub> 표면에서 분해되면서 TCE 분해와 더불어 여러 가지 부산물을 추가적으로 분해시키는 촉매 표면화학반응에 기인하는 것으로 사료된다. 이것은 그림 5(c)-(d)에서와 같이 MnO<sub>2</sub> 통과함에 따라서 CO<sub>x</sub> 수율이 2배 이상 향상되고, CO<sub>2</sub> 선택도가 높아짐을 알 수 있다. 하지만, 질소산화물인 N<sub>2</sub>O는 MnO<sub>2</sub> 통과와 관계없이 일정함을 알 수 있다. 향후, 질소산화물을 제거하기 위해 새로운 촉매 또는 제거반응이 필요하다고 판단된다.

### III. 결론

본 논문은 유전체 볼 충전 배리어 방전 리액터를 이용하여 유전체 볼 재료에 따른 방전특성, 오존 생성 및 분해 특성, TCE의 분해처리에 대하여 진행하였으며, 주요한 결과는 다음과 같다.

- (1) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 또는 TiO<sub>2</sub> 유전체 볼을 충전한 경우가 유전체 볼을 충전하지 않은 배리어 방전리액터에 비하여 오존 발생량이 매우 많았으며, MnO<sub>2</sub> 유전체 볼을 충전한 경우에는 생성과 동시에 오존이 분해되어 발생량이 매우 감소됨을 알 수 있었음. 이를 통해 오존 생성량을 증가시키기 위해서는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 또는 TiO<sub>2</sub> 유전체 볼을 충전한 배리어 방전 리액터 접근법이 유리할 것으로 사료됨.
- (2) MnO<sub>2</sub> 유전체 충전 배리어 방전 리액터를 사용하여 TCE 분해처리한 경우, 유량이 낮은 경우에는 TCE 분해와 동시에 CO<sub>x</sub>로 전환을



이 높았으며, 이것은 방전공간에 생성된 오존이  $MnO_2$  표면에서 분해되면서 새로운 산소 라디칼을 생성시켜서 새로운 TCE 분해 화학 반응을 유발시키기 때문으로 사료됨.

- (3)  $Al_2O_3$  유전체 충전 배리어 방전 리액터와 후단에 설치한  $MnO_2$  촉매 리액터를 병용함에 의하여 방전리액터에서 생성된 오존이 촉매 표면에서 대부분 분해되고, TCE 분해율도 100%로 분 분해 제거됨을 보였으며, 이를 통해 오존 분해 촉매인  $MnO_2$ 의 표면화학반응에 의하여 TCE 및 부산물이 추가적으로 분해시킬 수 있음을 보인 중요한 결과를 도출하였음.

## References

- [1] B. Eliasson, M. Hirth and U. Kogelschatz, "Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges," *J. Phys. D:Appl. Phys.*, Vol.20 pp.1421-1437, 1987.  
DOI: 10.1088/0022-3727/20/11/010/meta
- [2] Sang-Bo Han and Tetsuji Oda, "Decomposition mechanism of trichloroethylene based on by-product distribution in the hybrid barrier discharge plasma process," *Plasma Sources Sci. Technol.*, Vol.16 413-421, 2007.  
DOI: 10.1088/0963-0252/16/2/026/meta
- [3] Muhammad Farooq Mustafa, Xindi Fu, Wenjing Lu, Yanjun Liu, Yawar Abbas, Hongtao Wang, Muhammad Tahir Arslan, "Application of non-thermal plasma technology on fugitive methane destruction: Configuration and optimization of double dielectric barrier discharge reactor," *J. Cleaner Produc.*, Vol.174, No.10, pp.670-677, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.283
- [4] V. Demidiouk, S.I. Moon, J. O. Chae, "Toluene and butyl acetate removal from air by plasma-catalytic system," *Catalysis communications 4* pp.51-56, 2003.  
DOI: 10.1016/S1566-7367(02)00256-X
- [5] higeru Futamura, Toshiaki Yamamoto, "Byproducts Identification and Mechanism Determination in Plasma Chemical Decomposition of Trichloroethylene," *IEEE Trans. Indus. App.*, Vol.33, No.2 pp.447-453, 1997. DOI: 10.1109/28.568009
- [6] Tochiaki Yamamoto, "VOC decomposition by nonthermal plasma processing - A new approach," *J. electrost.*, Vol.42 pp.227-238, 1997.  
DOI: 10.1016/S0304-3886(97)00144-7
- [7] Hidahiro Einaga and Shigeru Futamura, "Comparative study on the catalytic activities of Alumina-supported metal oxides for oxidation of benzene and cyclohexane with ozone," *React. Kinet. Catal. Lett.* Vol.81, No.1 pp.121-128, 2004.  
DOI: 10.1023/B:REAC.0000016525.91158.c5
- [8] Seiichiro Imamura, Masaaki Ikebata, T. Ito, and T. Ogita, "Decomposition of Ozone on a silver Catalyst," *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol.30, pp.217-221, 1991. DOI: 10.1021/ie00049a033
- [9] I. Nagao et al., "NOx removal using nitrogen gas activated by dielectric barrier discharge at atmosphere pressure," *Vacuum* 65, pp.481-487, 2002. DOI: 10.1016/S0042-207X(01)00460-2
- [10] Muhammad Farooq Mustafa, Xindi Fu, Yanjun Liu, Yawar Abbas, Hongtao Wang, Wenjing Lu, "Volatile organic compounds (VOCs) removal in non-thermal plasma double dielectric barrier discharge reactor," *J. Hazar. Mater.*, Vol.347, No.5, pp.317-324, 2018. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.01.021

## BIOGRAPHY

### Sang-Bo Han (Member)



1998 : BS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.  
2000 : MS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.  
2004 : PhD degree in Electronic Engineering, University of Tokyo.

2015.2~2016.2 : Visiting scholar, University of California at SanDiego, USA