

대기압플라즈마 및 오존 분해촉매를 이용한 트리클로로에틸렌의 분해효율 증진 연구

(A Study for improving Decomposition Efficiency of Trichloroethylene using Atmospheric Plasma Reactor and Ozone Decomposing Catalyst)

한상보* · 박재윤 · 박상현

(Sang-Bo Han · Jae-Youn Park · Sang-Hyun Park)

요 약

본 논문은 비열평형 플라즈마와 촉매를 이용하여 트리클로로에틸렌의 효과적인 분해방법을 제안하였다. 이를 위하여 이산화망간과 알루미나 펠렛을 플라즈마 리액터 내부에 충전한 리액터를 설계하였다. 이산화망간 충전 리액터를 이용할 경우에는 산소를 포함한 가스중의 방전에 의해 발생된 오존이 촉매 표면에서 분해되는 동안에 발생된 산소원자 라디칼에 의하여 TCE의 분해율이 향상됨을 알 수 있었다. 그리고 알루미나를 충전한 경우에는 TCE는 DCAC로 산화되었으며, COx 및 Cl₂와 같은 저분자상으로 많이 분해되지 않았다. 그러나 알루미나 충전 리액터에 의한 플라즈마 처리된 가스를 리액터 후단에 설치한 이산화망간 촉매를 통과시킴에 의하여 분해율이 매우 향상됨을 알 수 있었다. 따라서, 플라즈마 프로세스에 이산화망간을 응용함에 의하여 오존 분해에 따른 촉매 표면의 산소원자 라디칼에 의하여 TCE 및 분해 생성물(DCAC)를 효율적으로 분해하는 것이 가능하다.

Abstract

This paper proposes an effective decomposition method of trichloroethylene using pellet packed-bed non-thermal plasma reactor and catalyst. For that, two types of reactors filled with manganese dioxide and alumina pellets are designed. When MnO₂ packed reactor is used, TCE decomposition rate is high due to the generation of oxygen atom radicals at the surface of catalyst during ozone decomposition. In addition, When Al₂O₃ packed reactor is used, TCE is oxidized into DCAC and it did not decomposed into small molecules such as COx and Cl₂. However, the plasma processed gas using Al₂O₃ packed reactor is passed through the MnO₂ catalyst reactor, which is placed at the downstream of plasma reactor, the decomposition rate increased as well due to oxygen atom radicals through ozone decomposition. Therefore, the adequate use of MnO₂ catalyst in the plasma process is very promising way to increase the decomposition efficiency.

Key Words : Manganese dioxide, Non-thermal plasma, Ozone, Trichloroethylene

* 주저자 : 경남대학교 전기공학과 교수
Tel : 055-249-2635, Fax : 055-249-2839
E-mail : hansangbo@kyungnam.ac.kr
접수일자 : 2008년 9월 22일
1차심사 : 2008년 10월 1일
심사완료 : 2008년 10월 22일

1. 서 론

산업의 급속한 발전에 따라서 대기중으로 방출되는 휘발성유기화합물(VOCs, Volatile Organic Compounds) 및 질소산화물(NOx: Nitric Oxides) 등 가스상 대기오염물질들은 직·간접적으로 인체에 악영향을 미치는 물론, 각종 환경문제들을 유발하고 있다. 특히, 이러한 대기오염물질들 중에서 VOCs는 오존층을 파괴하는 염소불화탄소(CFCs) 이외에 발암성, 지구온난화, 그리고 새집 증후군을 유발하는 물질 등 많은 유해성 물질들이 알려져 있다. 세계의 여러 나라들은 이러한 환경오염물질로 인한 제반 문제들을 해결하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있으며, 이들 환경오염물질들의 분해 및 제거를 목적으로 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.

특히, 염소계 휘발성유기화합물의 한 종류인 트리클로로에틸렌(Trichloroethylene, TCE, C_2HCl_3)은 반도체공장, 광학부품공장이나 세라믹스 산업, 그리고 세탁 공정 등 넓은 산업 전반 분야에서 탈지세정제나 용제 분해매체로서 사용되어지고 있다. 하지만, 이는 매우 유독한 신경 자극 및 발암성 물질로서, 수중에 녹아들어 마취 및 발암성 화합물($CHCl_3$, $CHBr_2Cl$, CCl_3COH , etc)을 형성하거나, 성층권 오존을 분해하여 오존홀을 초래하는 등 여러가지 사회적 문제를 유발하고 있다. 따라서, 대기중으로 배출되는 적절한 방법으로 제거해야만 한다. (허용농도: 50[ppm], TWA(Time weight average), ACGIH 2001(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)) 이러한 물질을 사용 후 대기중으로의 방출은 환경오염을 방지하기 위하여 가능한 줄일 필요가 있으며, 이를 위해 많은 화학적 프로세스들이 개발되고 있다[1-2,12-20].

또한, 반도체 프로세스에 있어서 클린 룸 내에서도 많은 유기용매들이 이용되고 있으며, 이러한 물질들이 작업자에 대한 영향 그리고 제품의 품질에 대한 영향 등 유기용매의 사용중에 발생하는 많은 제반 문제점들이 향후의 과제로서 남아 있다. 따라서 가스상 유기용매를 효율적으로 분해 및 제거하기 위하여 비열평형 플라즈마 프로세스를 이용한 연구가 1879년 독일 지멘스에서 오존나이저(Ozonizer)

개발을 시점으로, 전자빔 및 펄스 코로나 방전 등을 이용하여 많은 연구들이 진행되어 왔다[3-6].

특히, 대기압 비열평형 플라즈마는 방전에너지의 대부분을 전자가속에 사용하므로 가속된 전자는 중성기체와의 충돌에 의하여 기체들을 여기 및 전리시키고, 이로 인하여 많은 종류의 이온 및 라디칼들을 효율적으로 생성시킬 수 있다. 이러한 플라즈마 내부의 화학종들은 기존의 화학적 처리방법에서는 불가능한 새로운 화학반응을 저온에서 짧은 시간에 유도할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 특히, 배리어 방전 리액터는 아크로의 전이에 따른 내부 입자들의 가열손실을 최소화함으로써, 전력 손실을 최소화할 뿐만 아니라 오존을 효율적으로 생성시킬 수 있는 기법으로 널리 알려져 있다[7-11].

본 논문은 비열평형 플라즈마 프로세스를 이용하여 가스상의 저농도 트리클로로에틸렌의 분해처리에 있어서 촉매의 병용 효과에 대하여 실험적으로 평가한 것이다. 구체적으로 설명하자면, 배리어 방전 리액터 내부에 오존 분해에 높은 활성을 보이는 촉매인 이산화망간(MnO_2)과 오존 분해 작용이 없는 알루미늄(Al_2O_3) 구형 펠렛을 충전함에 따른 TCE 분해 특성 및 메커니즘에 대하여 조사하였다.

2. 본 론

배리어 방전 리액터는 오존을 생성하기 위한 비열평형 플라즈마의 대표적 리액터로서, 에어 분위기에서 가속전자와 산소분자의 충돌에 의해 산소원자 라디칼을 생성하고, 이러한 산소원자 라디칼은 제 3체 반응을 통하여 오존을 생성한다.

그림 1은 본 연구에서 사용된 플라즈마 리액터의 외관을 보인 것으로서, 석영관을 배리어로서 사용하였으며, 방전공간 내부에 펠렛을 충전하였다. 이 경우에는 일반적인 배리어 방전리액터의 경우와 비교하여 충전된 펠렛의 영향으로 내부 전계 분포의 변화를 비롯하여, 펠렛 표면에서의 잔존 전하 및 전자의 충방전 영향을 받기 쉬울 것으로 사료된다.

이처럼 펠렛을 충전한 배리어 방전리액터는 동일한 방전 공간내에 가스부(병렬저항(r_g), 정전용량(C_g))와 펠렛(병렬저항(r_p), 정전용량(C_p))들이 전기

적으로 직렬 연결되어 있다고 볼 수 있다. 즉, 펠렛 자체의 유전율이 증가함에 따라 펠렛의 전체 임피던스 크기는 감소한다.

따라서, 동일한 인가전압에서 가스부의 전계는 펠렛의 임피던스가 낮을수록 강하게 됨을 알 수 있다. 이러한 이유로 대다수 연구에서 배리어 방전 리액터에 고유전율의 펠렛을 충전하여 리액터 내부의 모든 공간에 플라즈마를 강력하게 생성하고 있다.

내부 전극 외경과 석영관 내경과의 간격은 8.4[mm]로서 이 공간에 두 종류의 펠렛(직경: 2[mm])을 각각 충전하였으며, 플라즈마의 발생 길이는 110[mm]로 고정하였다. 전원으로는 슬라이다스를 사용하여 교류 고전압을 약 30[kV](피크-피크)까지 승압하여 플라즈마를 발생하였다.

마이크로실린지 펌프를 이용하여 액상의 TCE를 실린지(gas-tight micro syringe)로 자동 공급되도록 하였으며, 이때 실린지 끝단에는 소형 히터(80[ohm])를 설치하여 공급된 액상 TCE를 모두 기

화되도록 온도제어를 실시하였다.(TCE boiling point : 87[°C])

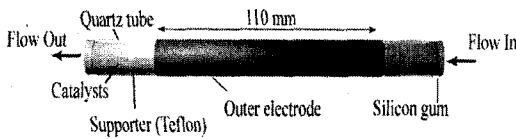
이때, 기화된 가스가 외부와의 온도차에 의해 관로상에서 응축되는 것을 최소화하기 위하여 반응기까지의 관로를 1[m] 이내로 하였으며, carrier gas에 의해 기상 TCE를 리액터로 운반되도록 구성하였다. TCE 농도 및 부산물의 농도는 GC-MS(Shimadzu, QP5050A), FT-IR(흡수길이=3[m], Shimadzu, Prestige 21), Ozone meter(Okitronics, OZM-700G)를 사용하여 분석하였다.

2.1 방전전력 및 오존 발생량 비교

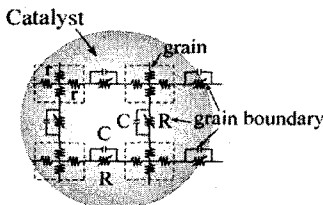
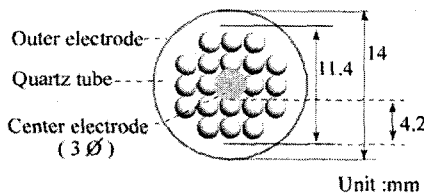
방전전력은 리사주 도형법에 의하여 방전전류에 의해 부하 콘덴서(0.67[μF])에 충전된 전하량과 인가전압을 사용하여 계산하였다. 그림 2는 알루미늄 펠렛을 충전한 경우의 방전 전류와 인가전압의 관계를 보인 것으로서, 인가전압이 0인 시점에서 방전 전류가 흐름을 알 수 있다. 이는 유전체 배리어의 충·방전, 펠렛 자체의 미소 입자계면에 존재하는 정전용량에 기인한 전하의 충·방전, 펠렛에 의한 미소 에어 갭의 충·방전에 의한 영향으로 사료된다.

그림 3은 에어 1[L/min]만을 공급하였을 때, 충전된 펠렛 종류에 따른 소비전력 및 오존 생성량의 변화를 나타내었다. 이산화망간(MnO₂)을 충전한 경우는 약 6[kV]에서 방전 개시하였으며, 알루미늄(Al₂O₃)을 충전한 경우는 약 8[kV]에서 방전이 개시되었다. 또한, 동일한 인가전압에서도 방전전력의 분포가 상이함을 알 수 있다. 이는 펠렛 자체의 저항과 정전용량의 차이에 따른 결과로서, 이산화망간을 충전한 경우는 펠렛 자체의 저항에 의한 주울 손에 의해 방전전력이 알루미늄 충전 리액터에 비하여 증가된다고 판단된다. 또한, 펠렛을 충전하지 않은 경우는 방전 갭이 4.2[mm]로 길기 때문에 약 20[kV] 부근에서 방전이 개시되었으며, 방전전력이 선형적으로 증가하였다.

이때, 각각의 리액터에서 발생하는 오존 농도는 알루미늄 충전 리액터가 동일 소비전력에 대하여 오존 생성량이 많음을 알 수 있다. 하지만, 이산화망간을 충전한 경우에 있어서 오존 농도가 낮은 것은 방



(a) 리액터의 구조



(b) 펠렛 충전 상태의 모식도

그림 1. 플라즈마 리액터의 구조
Fig. 1. The structure of plasma reactor

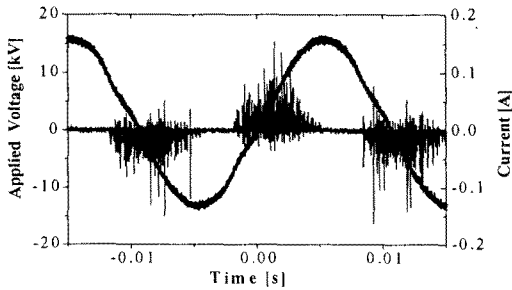
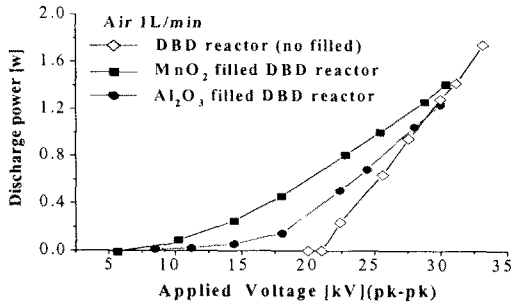
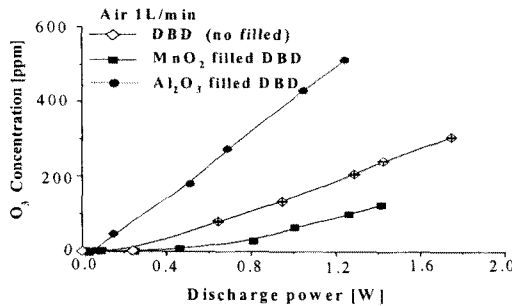


그림 2. 알루미나 펠렛 충전 리액터의 전류-전압파형
Fig. 2. Waveform of discharge current and applied voltage in the case of alumina-packed bed reactor



(a) 인가전압에 따른 방전 전력의 변화



(b) 소비전력에 대한 오존 발생량 변화

그림 3. 펠렛 종류에 따른 방전 전력 및 오존 발생량 비교
Fig. 3. Comparison of discharge power and ozone concentration according to pellets filled in the reactor

전 공간에서 발생한 오존이 이산화탄산 표면 화학반응에 의해서 자체적으로 분해됨에 따른 것으로 사료된다.

이처럼 방전공간에서 발생된 오존을 동일 공간내

에서 분해시킴에 따라 새로운 라디칼 종을 생성시키고, 이들을 효율적으로 활용할 수 있다면 유해물질을 단시간에 분해하기 위한 새로운 화학 메커니즘을 확립할 수 있다. 그 이유는 방전중에 발생한 산소원자 라디칼과 촉매 표면에서 오존 분해에 따른 산소원자 라디칼은 전자구조가 상이하므로 다른 화학반응을 유도할 가능성이 크기 때문이다.

2.2 리액터별 TCE 분해특성

그림 4는 플라즈마 리액터, 분석기기 배치, 가스의 흐름을 간략적으로 나타낸 것으로서, 플라즈마 리액터(DBD reactor) 후단에 MnO₂의 촉매층을 배치하였다.

이때, 가스의 유량 및 액체 공급량을 조절하면서 동일 농도하에서 비투입에너지의 변화에 따른 TCE의 분해특성을 조사하였다. TCE는 염소와 탄소의 결합체로서 CO_x(CO, CO₂) 및 Cl₂로 분해되는 것이 가장 이상적이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 아래의 식 (1), (2)에서와 같이 비투입에너지 및 CO_x 수율을 도입하여 실험결과를 분석하였다.

비투입에너지=

$$\frac{\text{Consumption power [w]} \times 60}{\text{flow rate [L/s]}} \text{ [J/L]} \quad (1)$$

CO_x 수율 (CO_x yield) =

$$\frac{\text{CO} + \text{CO}_2}{\text{Number of carbon(1molecules)} \cdot \{\text{initial coccentration}\}} \times 100 \quad (2)$$

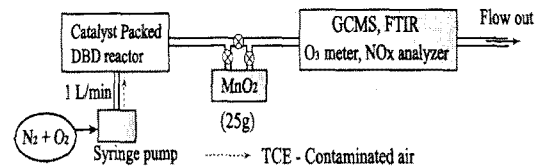
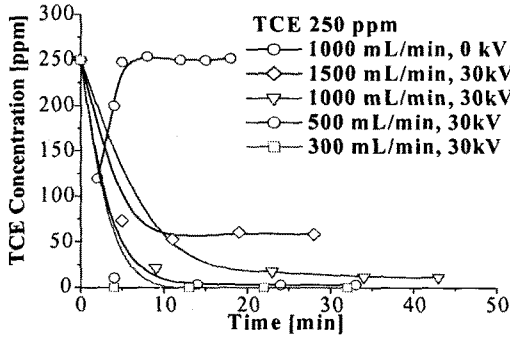


그림 4. 리액터 배치 및 가스 흐름의 모식도
Fig. 4. Schematics of gas flow with the arrangement of plasma reactor

2.2.1 이산화망간 충전 리액터의 특성

그림 5는 이산화망간을 충전시킨 리액터를 이용한 경우의 비투입에너지의 변화에 따른 TCE 분해 효율 및 CO_x 수율 변화를 나타내었다.

그림 5 (a)는 유량이 증가함에 따라 TCE 분해효율이 감소함을 나타내었다. 이는 유량의 증가에 따른 플라즈마 내부에 잔존하는 시간이 짧아지므로 전자충돌에 의한 분해작용이 활발하지 않기 때문으로 사료된다. 또한, 그림 5 (b)에서와 같이 비투입에너지가 약 300[J/L]인 경우, 100[%] 분해효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림 5 (c)에서 300[J/L]의 비투입에너지에서 약 82[%]내외의 CO_x 수율을 보였다. 이때의 부산물 중 염소화합물은 주로 Cl₂이지만, 그림 5 (d)에서와 같이 유량이 증가할수록 TCAA (trichloroacetaldehyde, CH₃-CHO)가 증가됨을 알 수 있다.



(a) 가스 유량에 따른 TCE 농도의 시간적 변화

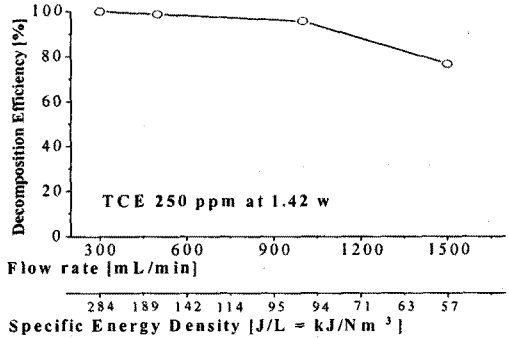
2.2.2 알루미늄 충전 리액터의 특성

그림 6은 알루미늄을 충전시킨 리액터를 이용하여 유량 변화에 따른 TCE 분해효율 및 부산물 분포를 나타내었다. 여기서 이산화망간의 유·무는 부산물 분해효율을 높이기 위하여 플라즈마 리액터 후단에 설치된 촉매 리액터 통과 유·무를 나타낸다.

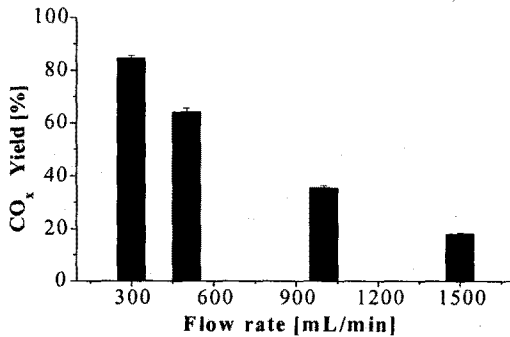
알루미늄 충전 리액터를 사용한 경우도 유량이 증가함에 따라서 분해효율이 감소함을 알 수 있다.

하지만, 이때의 주요한 분해 생성물로는 새로운 염소화합물인 DCAC(dichloroacetylchloride, CHCl₂-CClO)가 생성될 뿐, 실제적으로 TCE가 산화되었다고 볼 수 있다.

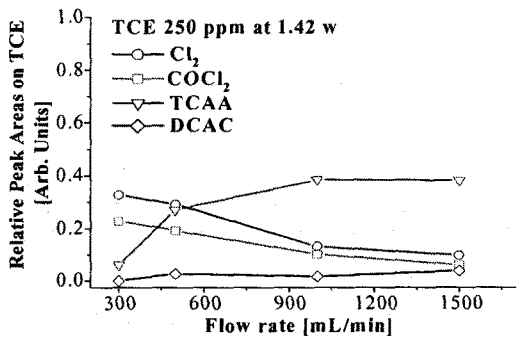
알루미늄 충전리액터를 이용하는 경우는 새로운 산화반응을 유발하여, DCAC로의 전환효율이 증가할 뿐 실제적으로는 TCE는 분해되지 않는다. 그러나 플라즈마 리액터 후단에 설치된 촉매반응기(이산



(b) 가스 유량에 따른 분해효율 변화



(c) 가스 유량에 따른 CO_x 수율 변화



(d) 가스 유량에 따른 염소화합물 부산물 분포

그림 5. 이산화망간 충전 리액터의 TCE 분해 및 부산물 분포

Fig. 5. STCE decomposition and by-products distribution using MnO₂-packed plasma reactor

화장간)을 통과함에 따라 플라즈마에 의해 발생된 다량의 오존이 촉매층에서 분해됨과 동시에 주요한 부산물이었던 DCAC가 Cl_2 와 CO_x 로 변환됨을 그림 6 (b)와 6 (d)에서 알 수 있다. 이때, 에너지 소모와 산화탄소 수율과의 관계로부터 알루미늄 펠렛을 이용한 방전 리액터와 하단에 촉매층을 병용한 경우가 약 240[J/L]에서 98[%]이상의 높은 산화탄소 수율을 보였다.

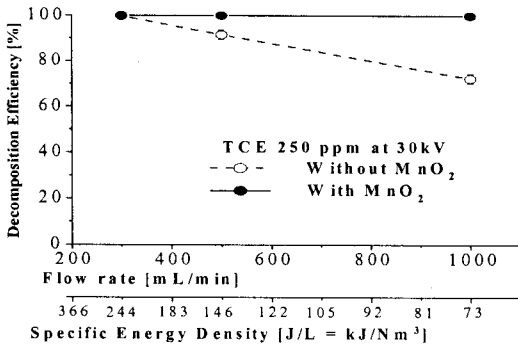
즉, 플라즈마 내부에서 발생된 산소원자 라디칼은 주로 TCE를 DCAC로 산화하는데 기여하고, DCAC는 촉매 반응기에서 오존 분해에 의해 생성된 촉매 표면상의 산소원자 라디칼에 의해 저분자량의 부산물로 분해됨을 예측할 수 있다.

3. 토 론

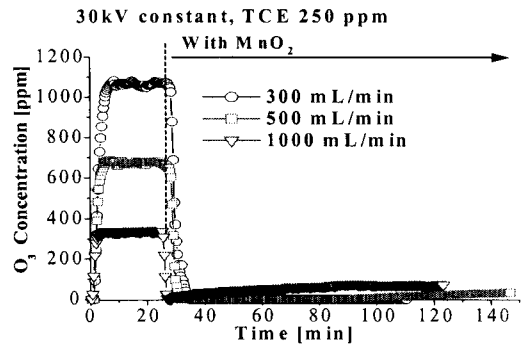
촉매표면의 오존분해에 의해 발생된 산소원자 라디칼을 이용하여 트리클로로에틸렌의 분해반응의 분해 특성을 평가하기 위하여 방전 리액터 내부에 구형 펠렛을 충전시켜 실험을 진행하였다.

이산화망간 촉매 펠렛을 충전한 경우에 비교하여, 알루미늄 펠렛만을 충전한 경우에는 오존 생성량이 많고, 트리클로로에틸렌의 분해부산물로서는 DCAC가 주요한 방전 부산물로서 생성되었다. 또한, 많은 오존 생성량에 기인한 방전 리액터 하류에 이산화망간 표면 화학반응을 병용함에 의하여 미분해 트리클로로에틸렌과 방전 플라즈마 내에서의 산화부산물 DCAC가 더욱 산화 분해되어 산화탄소로의 전환율이 증가함을 알 수 있었다.

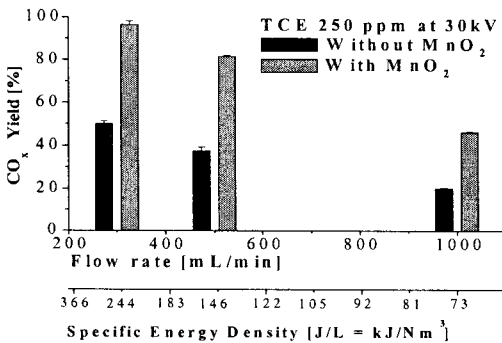
이산화망간 펠렛을 사용한 경우는 오존 생성량이



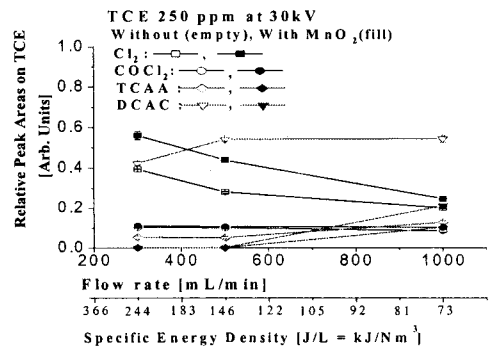
(a) 가스 유량에 따른 분해효율의 변화



(b) 오존 생성 및 분해 특성(촉매 통과 전후)



(c) 가스 유량에 따른 CO_x 수율



(d) 가스 유량에 따른 염소계 부산물 분포

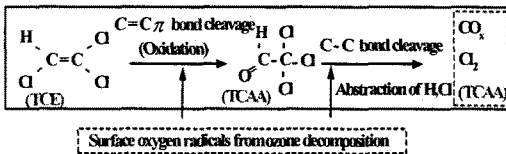
그림 6. 알루미늄 충전 리액터의 TCE 분해 및 부산물 분포(MnO₂는 플라즈마 리액터 후단에 배치한 촉매 리액터를 의미함)
Fig. 6. TCE decomposition and by-products distribution using alumina-packed plasma reactor

상당히 감소하고, 산화 탄소로의 변환율도 상승함을 보였지만, 알루미늄 펠렛만을 충전하여 후단에 이산화탄소를 병용한 경우에 비하여 에너지 효율적으로 좋은 결과를 보이지 않았다.

그러나 플라즈마 영역 내부에서 오존 분해 촉매를 응용하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 즉, 플라즈마 영역 내부에서 오존 분해에 따른 이산화탄소 표면화학반응을 통하여 트리클로로에틸렌이 TCAA 라는 C-C 단일결합의 부산물로 산화되고, 최종적으로 COx 및 Cl₂로 분해됨을 알 수 있다.

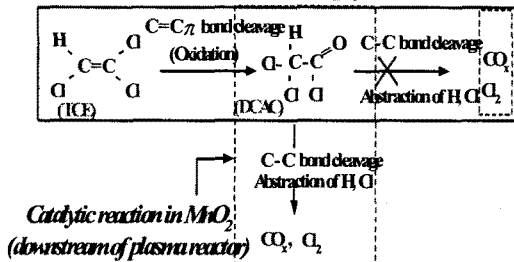
그림 7은 이산화탄소 및 알루미늄 충전 리액터에서 예측되는 주요한 화학반응 메커니즘을 나타내었다. 그림 7 (a)에서 보인바와 같이 TCE는 플라즈마 공간내에서 오존분해에 의해 발생된 산소원자 라디칼에 의하여 TCAA로 산화되고, 산화된 TCAA는 연속적으로 촉매표면 산소원자 라디칼에 의해 COx 와 Cl₂로 분해되는 것으로 사료된다.

Barrier discharge reactor filled with MnO₂



(a) 이산화탄소 충전 리액터의 주요한 화학반응

Barrier discharge reactor filled with Al₂O₃



(b) 알루미늄 충전 리액터의 주요한 화학반응

그림 7. 펠렛 충전 리액터들의 주요한 화학반응 비교
Fig. 7. Comparison of major chemical reaction according to pellets-packed reactors

그림 7 (b)에서는 플라즈마에 의해 TCE가 DCAC로 산화될 뿐 COx와 Cl₂로 분해가 매우 희박하였으

며, 플라즈마 리액터 후단에 설치된 MnO₂ 촉매를 통과함에 의하여 오존분해에 따른 촉매 표면에서의 산소원자 라디칼에 의하여 DCAC가 COx와 Cl₂로 분해되는 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 이산화탄소 및 알루미늄 구형 펠렛을 충전한 플라즈마 리액터를 사용하여 TCE의 분해 특성 및 분해 메커니즘에 대하여 조사하였다.

- (1) 이산화탄소 충전 리액터인 경우는 플라즈마 내부에서 발생된 오존이 촉매 표면에서 분해됨에 따라 TCAA라는 C-C 단일 결합의 부산물을 생성하고, 최종적으로 COx 및 Cl₂로 분해됨을 알 수 있었다.
- (2) 알루미늄 충전 리액터인 경우는 TCE의 대부분이 DCAC라는 C-C 단일결합 부산물로 산화될 뿐, 분해되지 않음을 알 수 있었다. 이때 후단에 설치된 이산화탄소 충전 리액터를 통과함에 따라 오존 분해시에 발생된 촉매표면의 산소원자 라디칼에 의하여 분해효율을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.
- (3) 이산화탄소 충전 리액터는 전체 리액터 크기를 소형화할 수 있을 뿐만 아니라 오존 분해에 따른 유해물질의 분해효율을 향상시킬 수 있는 좋은 리액터로서 사료된다. 그리고 알루미늄 충전 리액터인 경우는 반드시 후단에 이산화탄소 충전 리액터를 사용해야 효율이 향상됨을 알 수 있었다. 따라서 오존 분해에 따른 촉매 표면에서의 산소원자 라디칼을 이용하여 유해물질 분해시의 부산물의 분포를 제어할 수 있다는 면에서 오존 분해 촉매의 응용은 대기압 비열평형 플라즈마를 이용한 유해물질 분해에 있어서 매우 중요하다고 볼 수 있다.

감사의 글

이 연구결과물은 2008학년도 경남대학교 학술진흥연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

References

- [1] Shigeru Futamura, Toshiaki Yamamoto, "Byproducts Identification and Mechanism Determination in Plasma Chemical Decomposition of Trichloroethylene", IEEE Trans. Indus. App., Vol.33, No. 2 (1997). 447-453.
- [2] Theodore Mill et al., "E-beam Treatment of Trichloroethylene-air mixtures: products and rates", Radiat. Phys. Chem. Vol. 50, No. 3 (1997) 283-291.
- [3] Baldur Eliasson, Ulrich Kogelschatz, "Nonequilibrium Volume Plasma Chemical Processing", IEEE Trans. Plasma sci., Vol.19, No. 6 (1991) 1063-1077.
- [4] Toshiaki Yamamoto, "VOC Decomposition by Nonthermal Plasma Processing - A New Approach", J. Electro. 42 (1997) 227-238.
- [5] Tetsuji Oda, Tadashi Takahashi, and Shutaro Kohzuma, "Decomposition of dilute Trichloroethylene by Using Nonthermal Plasma Processing - Frequency and Catalyst Effects", IEEE Trans. Indus. App., Vol. 37, No. 4 (2001) 965-970.
- [6] Akira Mizuno et al. "Effect of Voltage Waveform on Partial Discharge in Ferroelectric Pellet Layer for Gas Cleaning", IEEE Trans. Indus. App., Vol. 29, No. 2 (1993) 262-267.
- [7] S. Yagi and M. Tanaka, "Mechanism of ozone generation in air-fed ozonizers", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 12 (1979) 1509-1520.
- [8] J. Kitayama and M. Kuzumoto, "Analysis of ozone generation from air in silent discharge", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 32 (1999) 3032-3040.
- [9] B. M. Penetrante, J. Norman Bardsley, "Kinetic Analysis of Non-Thermal Plasmas Used for Pollution Control", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 36 (1997) 5007-5017.
- [10] Seiichiro Imamura, Masaaki Ikebata, T. Ito, and T. Ogita, "Decomposition of Ozone on a silver Catalyst", Ind. Eng. Chem. Res. 1991, 30, 217-221.
- [11] B. Dhandapani, and S. Ted Oyama, "Gas phase Ozone Decomposition catalyst", App. Catal. B, environ. 11 (1997) 129-166.
- [12] Teruyuki Hakoda, Shoji Hashimoto, and Takuji Kojima, "Effect of water and Oxygen contents on the Decomposition of Gaseous Trichloroethylene in Air under Electron Beam Irradiation", Bull. Chem. Soc. Jpn., 75 (2002) 2177-2183.
- [13] 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 (2004) 121-128.
- [14] R. Rudolph, K-P. Franke, and H. Miessner, "Concentration Dependence of VOC decomposition by Dielectric Barrier Discharges", Plas. Chem. And Plas. Process., Vol. 22, No. 3 (2002) 401-412.
- [15] Atsushi Ogata, Daisuke Ito, Koich Mizuno, "Effect of coexisting components on aromatic decomposition in a packed-bed plasma reactor", Appl. Catal. A, General 236 (2002) 9-15.
- [16] Kuniko Urashima, Jen-Shih Chang, "Removal of Volatile Organic Compounds from Air Streams and Industrial Flue Gases by Non-Thermal Plasma Technology", IEEE Trans. Dielec. and Electri. Insul., Vol.7, No. 5 (2000) 602-614.
- [17] L. Bertrand et al., "The point of attack of a chlorine atom on trichloroethylene", J. Phy. Chem., (1968) 3926-3928.
- [18] 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 (2004) 121-128.
- [19] Sang-Bo Han, Tetsuji Oda, Jae-Youn Park, Sang-Hyun Park, and Hee-Seok Koh, "Study on Reactive Non-thermal Plasma Process combined with Metal Oxide Catalyst for Removal of Dilute Trichloroethylene", J. KIEEME, Vol. 19, No. 3, 2006, 292-300.
- [20] R. Hackam and H. Akiyama, "Air Pollution Control by Electrical Discharges", IEEE Trans. Dielec. Electri. Insul., Vol.7, No. 5 (2000) 654-683.

◆ 저자소개 ◆

한상보 (韓尙甫)

1972년 9월 22일생. 1998년 경남대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 일본 동경대학교 전자공학과 졸업(박사). 2005~2008년 한국전기연구원 선임연구원. 현재 경남대 공대 전기공학과 교수.

박재윤 (朴在潤)

1960년 4월 15일생. 1986년 경남대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996~1997년 캐나다 McMaster University 교환교수. 현재 경남대 공대 전기공학과 교수.

박상현 (朴相鉉)

1950년 1월 27일생. 1973년 경북대 물리학과 졸업. 1984년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003~2004년 미국 휴스턴 대학 방문교수. 현재 경남대 공대 전기공학과 교수.