Appl. Chem. Eng., Vol. 22, No. 3, June 2011, 249-254

SBT 강유전체 충전층 저온 플라즈마 반응기의 전기적 특성, 오존생성 및 휘발성유기화합물의 분해

어 준 · 김일원* · 박진도** · 이주영** · 이학성†

울산대학교 생명화학공학부, *울산대학교 물리학과, **울산과학대학 환경생활화학과
(2011년 2월 4일 접수, 2011년 3월 21일 채택)

Characteristics of Electrical Properties, Ozone Generation and Decomposition of Volatile Organic Compounds by Nonthermal Plasma Reactor Packed with SBT Ferroelectric

Joon Eo, Il Won Kim*, Jin Do Park, Joo Young Lee**, and Hak Sung Lee†**

School of Chemical Engineering & BioEngineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea
**Department of Physics, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea*
***Department of Environmental & life Chemistry, Ulsan College, Ulsan 680-749, Korea*
(Received February 4, 2011; Accepted March 21, 2011)

Ferroelectric의 강유전체 소구들을 충전한 원통형의 비열 방전 플라즈마 반응기를 설계 · 제작하였으며, 강유전체 층 방전 구조를 구성하는 평판(20 mm 간격) 금속망 전극 사이에 직경 2.0 mm인 $SrBiTaO_9$ (SBT) 소구들을 위치시키고 고압의 교류 전원을 인가하였다. SBT 소구는 상온(25 ℃)에서 150, 큐리온도(335 ℃)에서 500의 유전상수를 가졌다. 플라즈마 반응기에서 오존 생성속도는 거의 인가전압의 증가에 비례하였으며, SBT 소구들이 충전된 경우, 20 kV 이상의 인가전압에서 오존 생성속도는 급격하게 증가하였다. 부코로나 방전에서 오존 생성속도가 정코로나 방전에서의 경우보다 높았다. 그러나 톨루엔 및 메틸렌클로라이드의 분해율은 생성된 오존 농도에 비례하여 증가하지 않았다.

A nonthermal plasma reactor in conjunction with a tubular type with a ferroelectric (high-dielectric ceramic) pellet layer was designed and constructed. $SrBiTaO_9$ (SBT) pellets with 2.0 mm in diameter were held within the tube arrangement by two metal mesh electrodes (20 mm separation) connected to a high-voltage AC power supply. The dielectric constant of SBT pellets was 150 at room temperature and 500 at curie temperature (335 ℃). The generation rate of ozone in the plasma reactor almost linearly increased with increasing applied voltage. In the case of the plasma reactor packed with SBT pellets the generation rate of ozone sharply increased at the applied voltage more than 20 kV. The ozone generation rate at the negative corona discharge was higher than that of the positive corona discharge. However, the destruction efficiency of toluene and methylene chloride was not increased in proportion to ozone concentration.

Keywords: *ferroelectric pellet, $SrBiTaO_9$ (SBT), ozone, nonthermal plasma, VOCs*

1. 서 론

휘발성유기화합물(VOCs)은 최근 오존 등 광화학옥시던트로 인한 대기오염과 공단지역에서의 건강피해 등이 가시화됨에 따라 대기오염물질로서 관심이 증대되고 있다. 1969년 대기정화법을 제정한 미국은 광화학 옥시던트의 대기환경기준을 0.12 ppm으로 정하여 광화학 옥시던트의 억제를 위한 VOCs 규제가 세계 최초로 시작된 이래 미국과 유럽에서는 VOCs 배출방지를 위한 대책 및 저감기술 개발에 노력해오고 있다. 특히 일부 VOCs는 자체로서 유해할 수 있고 악취의 원인물질로서 주로 지역적인 오염물질로 다루어져 왔으나 오존형성의 광역성과 제품에 함유된 VOCs로 인한 피해가 무역을 통해 다른 나라에도 영향을 초래할 수 있어 점차 장거리 월경오염물질로서 국제 문제가 되고 있다.

VOCs는 석유정제, 석유화학, 선박 및 자동차산업 등 발생원이 다양하며, 각각의 발생원에 따라 농도, 조성 및 가스량, 온도 등의 조건이 크게 다르고, VOCs를 경제적이고 효율적으로 제어하기 위해서는 각각의 조건 및 처리목적에 따라 적절한 저감기술이 필요하다. 공단지역의 대형사업장은 대부분 촉매연소나 축열식 소각(Regenerative Thermal Oxidation)방법 및 바이오필터(biofilter)를 사용하고 있으며, 소규모 발생시설에는 활성탄소 흡착법을 채택하고 있는 실정이다. 그러나 자동차 배기가스, 반도체 공정 등 이동이 가능한 소형장치에 적용되는 기술로써 코로나 방전 또는 저온플라즈마 반응에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1,2]. 최근 비열 방전 플라즈마원으로 유효하게 쓰이고 있는 코로나 방전장치는 전극의 기하학적 구조에 따라 선 대 원통형,

† 교신저자 (e-mail: hslee@mail.ulsan.ac.kr)

Table 1. Manufacturing Condition of Ferroelectric Pellet (FEP)

SBT	Ball milling	Calcining	Binder addition	Molding	Sintering
Condition	24 h	1000 ℃, 24 h	4 wt%	500 kg/cm^2	1150 ℃, 3 h

유전체 장벽 방전형, 강유전체 층 방전형으로 크게 나뉘어 개발되어 왔다. 선 대 원통형 코로나 방전장치는 가는 선과 원통형의 두 전극사이에 고전압의 전원을 인가해 선과 원통전극사이에 코로나를 발생시키는 것으로, 배전 입자들을 하전시켜 집진전극에 집진하는 원리를 응용한 전기집진장치로 널리 사용되고 있다. 유전체 장벽 방전 장치는 한 쪽이 유리와 같은 얇은 유전체 장벽으로 덮인 두 개의 전극 사이에 교류 고전압이 인가된 것으로 무성 방전(silent discharge)장치라 부르기도 하는데 오존의 생성을 목적으로 지멘스(Simens)에 의해 처음 개발되어 대량의 오존발생, 유해가스의 제거 등 여러 산업분야에 응용되고 있다[3-5]. 강유전체 층 방전 장치는 원통형으로 된 장치 내부에 강유전체 소구들을 위치시키고 양쪽을 금속망 전극으로 고정시켜 고압의 교류 전원을 인가한 구조의 방전장치다. 높은 유전상수를 가진 유전체 층에 외부전압이 인가되면 강유전체 소구는 분극화되고 강한 전계가 각각의 강유전체 소구들의 접촉점간에 형성된다. 따라서 많은 펄스 방전이 접촉점 주위에 발생되며, 이때의 방전 에너지는 강유전체의 유전상수에 의해 변화시킬 수 있는 장점이 있다. 이상과 같은 강유전체 층을 이용한 코로나 방전은 유해가스 제거장치 등에 응용되고 있으며, 이와 같은 코로나 방전장치는 유전체 장벽 방전을 이용한 것이 주로 검토되고 있다[6-8].

본 연구에서는 상온(25 ℃)에서 150의 유전상수를 가지는 $SrBiTaO_9$ (SBT) 강유전체 소구를 제조[9,10]하여 강유전체 층 방전 구조를 구성하는 평판 대 평판형 방전 장치를 설계 · 제작하여 방전 및 오존 발생 특성에 미치는 강유전체 층의 영향과, 평판 대 평판형 강유전체구 층 방전에서 정 · 부 코로나, 인가전압의 변화, 강유전체구의 유전상수 및 완화시정수가 강유전체구 층의 코로나 하전, VOCs 저감 등에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. SBT 강유전체 제조

SBT 강유전체(FEP : Ferroelectric Pellet)는 Table 1에 나타낸 조건으로 전형적인 세라믹 제조 방법으로 제조하였다. SBT 세라믹 제조에 사용된 세 가지 원료 분말은 $SrCO_3$, Bi_2O_3 (고순도화학, 순도 99.9%), Ta_2O_5 (Cerac사, 순도 99.5%)이고, 화합물을 만들기 위하여 각 원료 분말을 1.0 : 2.0 : 1.0 mole%로 혼합하였다. 혼합된 SBT 분말에 메탄올과 세라믹 볼을 같은 부피로 섞어 세척된 유리병에 넣고 24 h 동안 볼밀을 실시하였다. 볼밀이 끝난 후 분말 속에 포함된 메탄올을 휘발시키기 위해 전기오븐에 넣어 80 ℃에서 12 h 동안 건조하였다. 하소는 1000 ℃에서 24 h 동안 하였다. 하소가 끝난 SBT 분말을 막자사발로 잘 분쇄한 후 성형하기 위하여 10% polyvinyl alcohol (PVA) 용액을 결합체(binder)로 4 wt% 혼합하여 2 h 동안 분쇄하였다. 분쇄가 끝난 SBT 분말을 지름 100 mm인 금형 틀에 채우고 500 kg/cm^{2}의 압력을 가하여 직경 약 2.0 mm의 크기로 성형하였다. SBT 성형체에 함유된 PVA를 제거하기 위하여 500 ℃에서 1 h 동안 열처리한 후 최종적으로 1150 ℃에서 3 h 동안 소결하여 세라믹을 완성하였다. 제조된 SBT 강유전체의 유전상수는 25 ℃에서 150, 큐리온도(335 ℃)에서 500이었다.

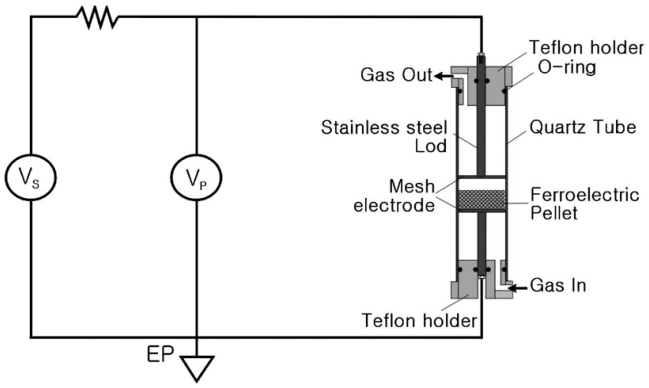

Figure 1. Plasma reactor packed with ferroelectric pellets.

2.2. 실험장치

Figure 1은 실험에 사용된 강유전체층 방전 구조의 코로나 방전장치를 나타내었다. 강유전체를 충진한 코로나 방전장치를 석영(quartz) 실린더(2 inch ID)의 상하를 합성수지로 고정시킨 후, 내부에 평판 대 평판구조의 방전장치를 설치한 것으로, 평판은 스테인레스 금속망으로 하고 이 금속망 전극상에 강유전체 세라믹 층을 상설시킨 구조로 이루어져 있다. 강유전체 펠릿(pellet) 충진식 반응기는 2개의 그물형상 전극사이에 SBT 강유전체 세라믹 입자를 차곡차곡 층으로 가득 채운 것으로, 전극 사이에 교류 전압을 인가하면 유전체 입자 사이의 접촉점에서 방전이 일어나고, 유전체 표면이나 입자들 사이에서도 방전이 일어난다. 세라믹 연면 방전형, 코일형 연면 방전형, 석영관을 이용한 동축형 반응 등은 냉각되기 쉬운데 반해 펠릿 충진식 반응기는 플라즈마에 의해 유전체 세라믹이 가열되기 때문에 오존 발생량도 많아지므로 오염된 가스의 처리(산화)도 용이하다. 또한 지금까지의 반응기는 보통 교류전압(수 kV에서 수십 kV)에서 구동되었으며, 펠릿 충진식 반응기는 작동시간 10~50 ns, 펄스폭 1 μs 이하의 고전압펄스에서 작동시키면 매우 강력한 비열 평형 플라즈마를 발생시킬 수 있다. 이것은 전압 인가 시간이 짧기 때문에 전자만이 강한 전기장 에너지를 받으며, 무거운 이온은 에너지를 받기 전에 전기장이 없어지기 때문이다. 강유전체 층을 이용한 플라즈마 발생 장치는 석영 실린더의 상하를 테프론(teflon)으로 고정시킨 후 내부에 평판을 대칭적으로 설치하였으며, 평판 전극상의 간격을 조절할 수 있도록 o-ring을 사용하여 상부 평판을 고정하였다. Figure 2에는 VOCs 제거 실험 개략도를 나타내었으며, 예비실험으로부터 전력소모를 작게 하기 위하여 전극간격을 20 mm로 유지하였다. 실험은 먼저 압축공기 실린더로부터 나오는 공기를 실리카겔 튜브를 통과시켜 수분을 제거하고, 유량계를 사용하여 원하는 농도의 VOCs를 발생시킨 후, 강유전체 펠릿 충진식 반응로에서 플라즈마를 발생시켜 VOCs를 제거한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 강유전체 Pellet 충진식 반응기의 방전

강유전체구 층을 금속망전극상에 설치한 평판전극형 구조에 교류전원을 인가함으로써 평판 사이의 부분방전과 강유전체구 층 상부에

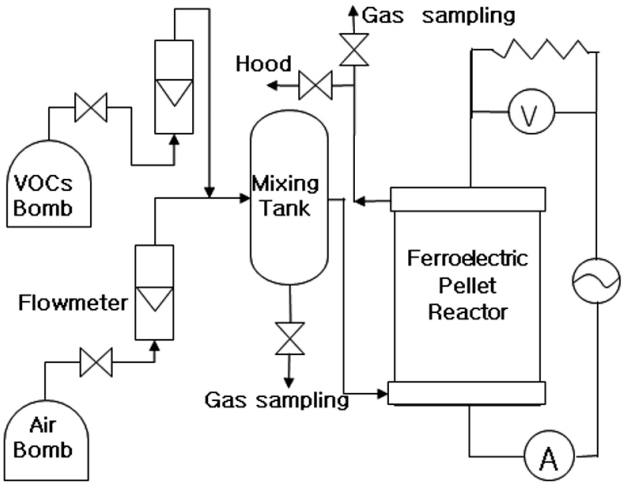

Figure 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

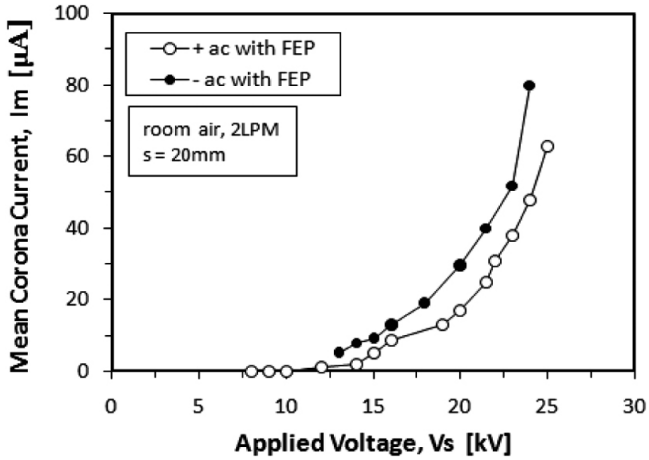

Figure 4. Effect of applied voltage on mean corona current according to SBT FEP.

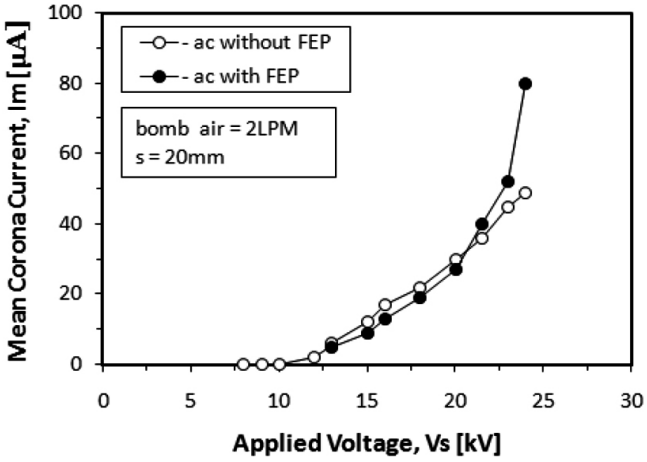

Figure 3. Effect of applied voltage on mean corona current at the negative corona discharge.

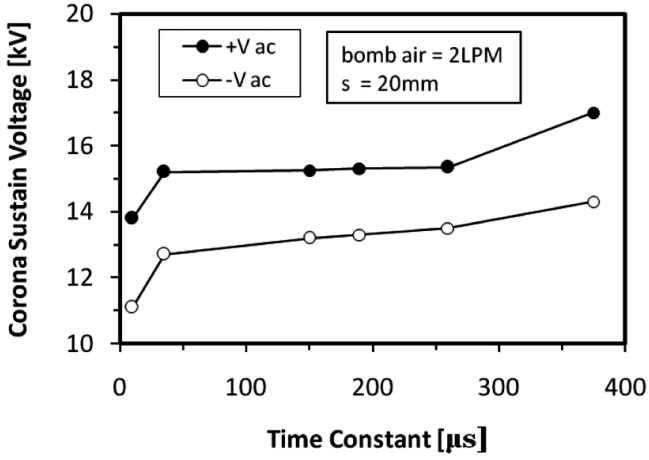

Figure 5. Effect of time constant on corona sustain voltage.

축적되는 공간전하들 간의 국부 방전을 복합적으로 이용하며, 불평등 고전계에서의 코로나 방전에 의해 생성된 공간전하들이 강유전체구의 표면에 축적되면, 강유전체구는 분극화되고, 강유전체구 층 사이에 강한 국부전계를 형성시킨다. 이러한 공간전계가 코로나방전에 의해 공간전하들이 계속 강유전체구 상에 축적됨으로써 임계치 이상(E ≥ 30 kV/cm)이 되면 강유전체구 층 사이에 표면방전을 일으키게 되며, 결국, 불평등 전계 사이의 코로나방전에 강유전체구 층 사이의 표면방전이 합쳐져 이중 방전의 효과를 가져 올 것으로 예상하였다.

Figure 3에는 강유전체 세라믹 단층의 유무에 따른 평균 코로나 전류 특성을 인가전압(applied voltage)을 변수로 하여 나타내었다. 평균 코로나 전류는 강유전체 세라믹 단층이 없는 경우, 인가전압의 증가에 따라 서서히 증가하는 전형적인 전류-전압(I-V) 특성을 보여주고 있다. 그러나 강유전체 세라믹 단층을 위치시킨 경우, 약 20 kV 이상에서 강한 코로나 방전이 발생하면서 방전전류가 급격히 증가하는데, 이는 강유전체 세라믹 층상에 대전되어 축적된 전하들에 의해 연면방전이 발생되고 있음을 보여주고 있다.

Figure 4에는 강유전체 세라믹 단층이 위치한 경우 정・부 코로나가 평균 코로나 전류 특성에 미치는 영향을 인가전압을 변수로 하여 나타내었다. 평균 코로나 전류는 정・부 코로나 모두 인가 전압의 증가에 따라 서서히 증가하였으며, 각각 12, 15 kV에서 서서히 증가하기 시작하여 18 kV 이후부터는 인가전압 증가보다 더 빠르게 증가함을 보여준다. 한편, 동일전압에서는 부코로나의 경우가 정 코로나의 경우에 비해 더 높은 평균 코로나 전류치를 나타냄을 알 수 있다.

Figure 5에는 강유전체 세라믹의 완화시정수(relaxation time constant) 변화가 최소 코로나 유지전압에 미치는 영향을 나타낸 것으로 완화시정수가 증가함에 따라 코로나 유지전압도 증가함을 알 수 있다. 이것은 강유전체 세라믹의 밀도(ρ)나 유전상수(ε)가 커서 완화시정수가 클수록, 강유전체 세라믹 층 상부에 축적된 전하의 방전시간이 느려지므로 코로나를 계속 유지하기 위한 인가전압이 증가해야 하기 때문으로 생각된다. 완화시정수가 작은 경우, 강유전체 층 상부에 축적된 전하의 충・방전 과정이 완화시정수가 큰 경우에 비해 빨리 진행되므로 비교적 낮은 인가전압에서도 코로나 방전이 유지될 수 있음을 보여준다. 또한, 정코로나의 경우, 부코로나에 비해 더 높은 코로나 유지전압(sustain voltage)이 필요하게 되는데 이것은 정코로나의 경우, 부코로나에 비해 상대적으로 강유전체 세라믹 층에서 전하의 이동속도가 느린 양전하의 충・방전으로 인해 코로나 유지를 위해서는 더욱 높은 인가전압이 필요한 것으로 사료된다.

Figure 6은 정코로나의 경우, 강유전체 세라믹의 유전상수 변화에 따른 강유전체 세라믹 사이의 코로나 시작전압을 나타낸 것으로 유전

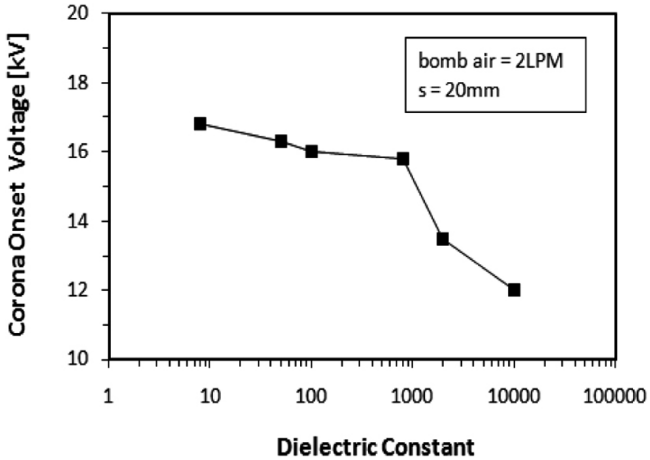

Figure 6. Onset voltage of positive corona according to dielectric constant of SBT FEP layer.

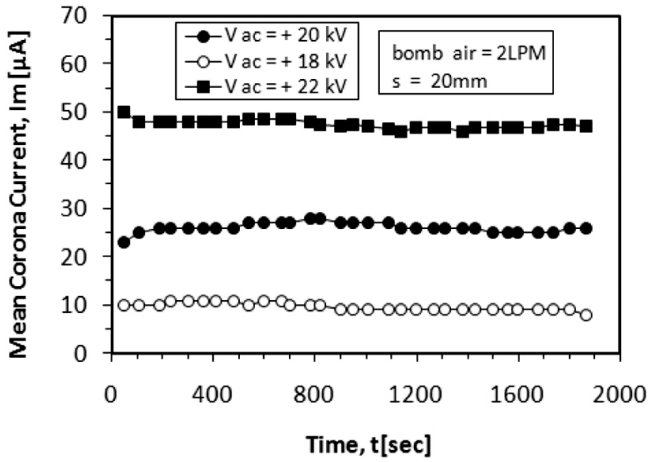

Figure 7. Effect of applied voltage on mean corona current with time at the negative corona discharge.

상수가 증가함에 따라 코로나 시작전압은 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상을 개념적으로 검토해보면 두 유전체 사이의 전속밀도의 경계조건으로 설명이 가능하다. 아래 식에서와 같이 공기와 유전체의 전기 선속은 경계조건에 의해 전기장의 관계식으로 나타낼 수 있다. 따라서 아래 식과 같이 상부 전극과 강유전체 세라믹 사이의 공기층에 인가되는 전기장의 세기는 강유전체 세라믹의 ε_r이 증가함에 따라 강유전체와 비교하면 더욱 큰 값을 갖게 되며, 따라서 방전은 공기층에서 쉽게 발생되어 코로나 발생 전압이 낮아지게 된다.

$$D_\alpha = D_f$$

$$\epsilon_0 E_0 = \epsilon_0 \epsilon_r E_f$$

$$E_\alpha = \epsilon_r E_f$$

여기서 D_α, D_f는 각각 공기층과 강유전체에서의 전기 선속 밀도이며, E_0, E_f는 각각 공기층과 강유전체 세라믹 층에서 전기장의 세기를 나타낸다.

Figure 7은 강유전체 세라믹 층이 설치된 반응기의 평균 코로나 전류 특성을 강유전체 층의 하전 시간의 변화와 인가전압의 크기에 따라 나타낸 것이다. Figure 7에서와 같이 인가전압의 크기가 증가할수록 평균 코로나 전류의 변화는 약 1000 s 이후에서도 명확하게 나타났다. 이러한 현상은 정 코로나의 경우, 부 코로나 경우에 비해 정극성의 공간전하를 발생시키므로 이동도가 비교적 느려 강유전체 세라믹 층의 상부에 공간전하가 축적되고, 축적 전하량이 절연파괴가 가능한 임계치 이상이 되면 강유전체 세라믹 층과 하부전극 사이에서 다시 국부 방전을 일으켜 이를 반복하기 때문이다. 그러므로 인가전압이 증가 할수록 더욱 많은 양의 공간 전하가 강유전체 세라믹 층에 축적되었다가 국부적으로 방전되는 현상이 빠르게 반복 진행되어, 평균 코로나 전류의 변화도 현저하게 나타난다. 반면, 부 코로나의 경우, 발생한 음의 극성을 가진 공간전하는 전자가 대부분이므로 정극성의 경우에 비해 빠른 이동도를 가져 강유전체 세라믹 층상에서의 축적 및 방전 과정이 급속하게 진행되므로 측정이 가능한 정도의 현저한 변화를 나타내지 않는 것으로 판단된다.

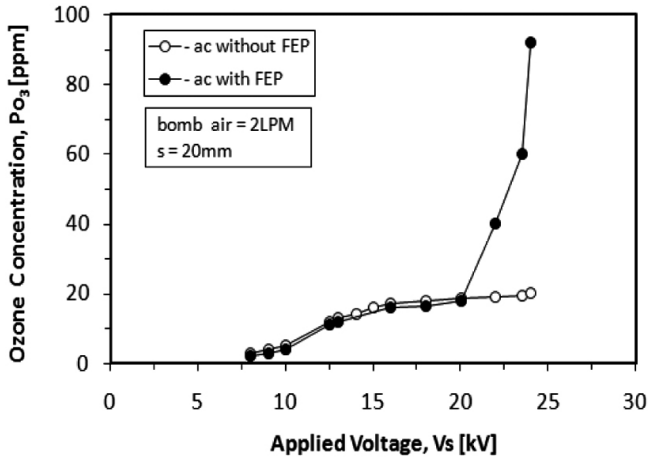

Figure 8. Effect of applied voltage on ozone generation according to SBT FEP.

3.2. 강유전체 펠릿 충진식 반응기의 오존발생 특성

Figure 8은 강유전체 세라믹 단층의 유무에 따른 오존발생 특성을 인가전압을 변수로 하여 나타낸 것이다. 강유전체 세라믹 단층을 위치시킨 경우, Figure 3의 경우와 같이 약 20 kV 이상에서 오존 발생량이 급격히 증가하는데 이는 강유전체 세라믹에 의한 연면 방전이 발생되었음을 보여준다.

Figure 9에는 강유전체 세라믹 단층이 위치한 경우 정 · 부 코로나가 오존 발생 특성에 미치는 영향을 인가전압을 변수로 하여 나타낸 것이다. 오존 발생량은 정 · 부 코로나 모두 인가 전압의 증가에 따라 서서히 증가하였으며, 특히 약 20 kV 이상에서 급격히 증가함을 보여주었다. 한편, 동일 전압에서는 부 코로나의 경우가 정 코로나에 비해 더 높은 오존 발생량을 나타내며, 20 kV 이상에서는 더욱 급격하게 오존 발생량이 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 강유전체 세라믹 층에서의 공간전하의 축적이라는 관점에서는 정 · 부 코로나에 의한 양 및 음 전하의 축적량과 이동도 등의 효과, 강유전체 세라믹층의 ε_r 및 배치 구조에 따른 극성효과 등에 따라 방전 및 오존발생 특성의 차이를 나타내기 때문이다. Figure 4에 나타낸 바와 같이, 정 코로나에서도 높은 코로나 전류를 발생시키므로 오존 발생량이 증가하고 있다.

Figure 10은 강유전체 세라믹 층이 설치된 반응기의 오존 발생 특성을 강유전체 층상의 하전 시간 변화와 인가전압의 크기에 따라 나타낸 것으로, 시간의 변화에 따른 오존 발생량도 Figure 7의 평균 코로나

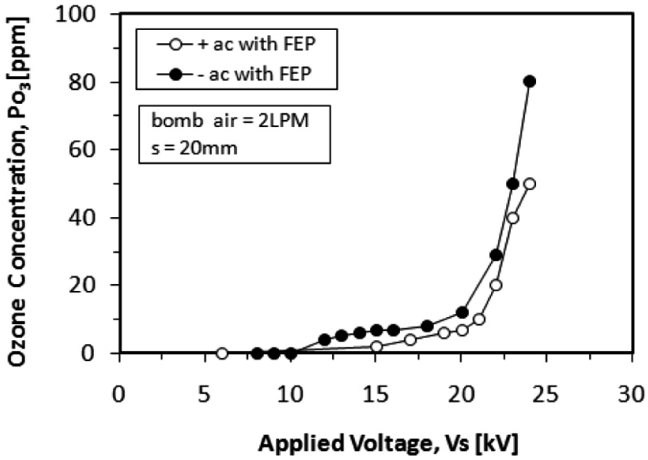

Figure 9. Effect of applied voltage on ozone generation according to positive-negative corona discharge.

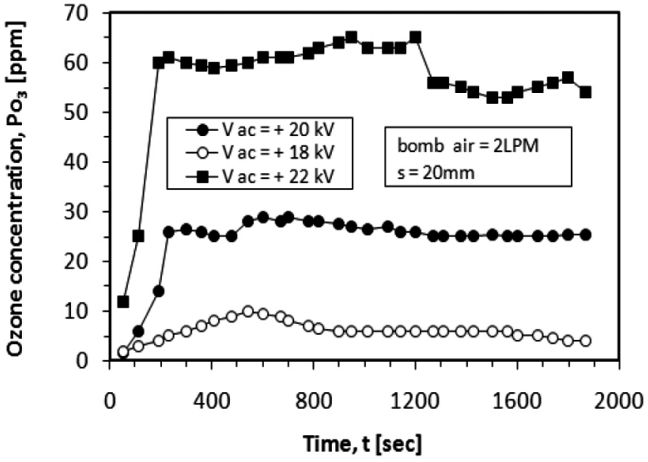

Figure 10. Effect of applied voltage on ozone generation with time.

전류의 변화 추이를 따르고 있다. 이는 코로나 전류가 강유전체 세라믹 표면과 연면을 따라 하부 접지 된 스테인레스 금속망 전극으로 흐르며, 이때 강유전체 세라믹 층과 이 층에 축적된 공간전하에 의한 전압(V = Q/C)이 공기의 절연파괴전압(E ≥ 30 kV/cm)보다 높게 되면 강유전체 세라믹 표면 주위의 공기층을 방전시켜 공기 중에 오존을 발생시키기 때문인 것으로 사료된다. 정 코로나인 경우, 인가전압의 크기가 증가할수록 시간에 따른 평균 코로나 전류도 Figure 7과 유사하게 변화하였으며, 오존 발생량도 평균 코로나 전류의 변화 추이를 따르고 있다. 따라서 강유전체 세라믹 층이 평판 전극 상에 설치되면 코로나 방전특성을 변화시킴을 알 수 있다.

3.3. VOCs 물질의 제거효율

SBT 강유전체 세라믹 충전식 반응기를 사용하여 제거실험을 한 VOCs 기체의 제거효율을 Figure 11에 나타내었다. 본 실험에서 선택된 methylene chloride (CH_2Cl_2)는 우레탄 발포소재의 이형제로 자주 사용되고, 톨루엔은 용매로서 중소 사업장에서 빈번하게 사용되고 있다. 동일한 인가전압에서 CH_2Cl_2 (유입 농도 : 80 ± 6 mg/m^3)의 제거율이 톨루엔(유입 농도 : 50 ± 4 mg/m^3)보다 높게 나타났으며, 강유전체 세라믹을 충전한 경우가 충전하지 않은 경우보다 약 22~37% 정도 제거효율이 높게 나타났다. 인가전압이 증가함에 따라 VOCs 제거효율이 거의 선형적으로 증가하고 있으며, 오존 발생량이 급격히 증가하는 20 kV 이상에서는 약간 가파르게 증가하였으나, 오존 발생량에 비례하여 VOCs 제거효율이 증가하지 않았다. 또한, Figure 8에 나타낸 바와 같이, 오존 발생량이 급격히 증가하는 20 kV 이상에서는 미반응 오존이 대기 중으로 배출될 수 있고, VOCs 제거효율보다 오존 발생량이 더 높게 증가하므로 SBT 강유전체 세라믹 충전식 반응기의 인가전압을 20 kV 이하로 유지하는 것이 바람직하다.

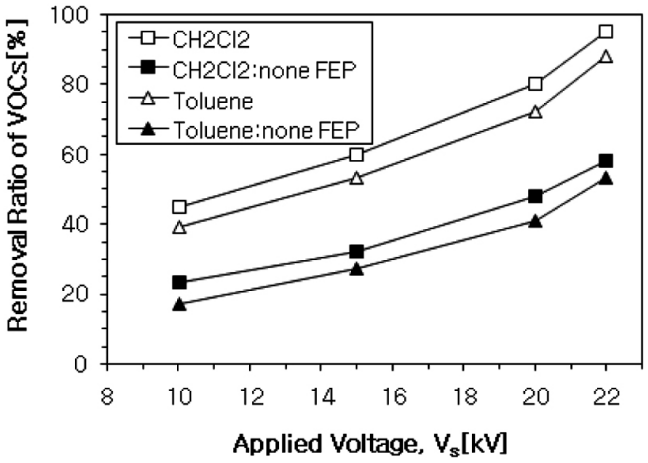

Figure 11. Effect of applied voltage on removal rate of VOCs.

고에너지 코로나 방전법은 전기방전 반응기에 사용되며 자유기(free radical)를 생성하는 기술로 자유기 산화는 중성의 기체분자로부터 전자를 이탈시켜 양이온으로 변화시키기 위해 전기장을 형성하는 것과 깊은 관련이 있다. 전자의 방출은 강한 전기장이 기체 내에 형성되어 기체분자를 이온화시키고 저온 플라즈마를 형성함으로써 이루어지며, 강한 전기장은 중성의 기체분자로부터 전자를 이탈시켜 양이온으로 만들어 전류를 흐르게 한다. 부분방출에 필요한 전압은 기체의 압력과 조성, 그리고 전기장 기하구조(field geometry)에 일차적으로 의존한다. 일부 문헌[11-13]에 의하면, 플라즈마 단독공정에서 VOCs의 분해정도는 분자에서 전자를 떼어내는데 필요한 에너지의 크기를 나타내는 이온화 전위(ionization potential)와 관련이 있는 것으로 보고하였다. 한편, 플라즈마 반응기에서 오존과 산화성 라디칼(O, OH, HO_2 등)은 구전자적(electrophilic) 특징을 가지기 때문에 전자를 쉽게 내어줄 수 있는 낮은 이온화 전위의 분자들과 쉽게 반응할 것으로 예상할 수 있으며, Kim[14] 등은 방향족 VOCs에 대한 O, OH 라디칼의 반응 속도상수와 이온화 전위 사이에 역의 상관관계가 존재한다고 보고하였다.

4. 결 론

SBT 강유전체 소구를 충전한 비열 방전 플라즈마 반응기의 오존 발생 및 전기적 특성을 조사하고 VOCs 제거실험을 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 인가전압을 증가함에 따라 20 kV까지는 평균 코로나 방전전류가 서서히 증가하는 전형적인 전류-전압(I-V) 특성을 나타내었지만, 20 kV 이상의 인가전압에서는 강한 코로나 방전이 발생하면서 방전전류가 급격히 증가하였으며, 이는 강유전체 세라믹 층상에 대전되어 축적된 전하들에 의해 연면 방전이 발생되었다.

2) 완화시정수(relaxation time constant)가 증가함에 따라 코로나 유지전압도 증가하였으며, 정코로나의 경우, 부코로나에 비해 더 높은

코로나 유지전압(sustain voltage)이 필요하였고, 이것은 정 코로나의 경우, 부 코로나에 비해 상대적으로 강유전체 세라믹 층에서 전하의 이동속도가 느린 양전하의 충 · 방전으로 인해 코로나 유지를 위해서는 더욱 높은 인가전압이 필요하였다.

3) 오존 발생량은 정 · 부 코로나 모두 인가전압의 증가에 따라 서서히 증가하였으며, 인가전압이 20 kV 이상으로 증가하면 오존 발생량이 급격하게 증가하였으며, 평균 코로나 방전전류와 유사한 양상을 나타내었다.

4) 인가전압이 증가함에 따라 VOCs 제거효율이 거의 선형적으로 증가하고 있으며, 오존 발생량이 급격히 증가하는 20 kV 이상에서는 약간 가파르게 증가하였으나, 오존 발생량에 비례하여 VOCs 제거효율이 증가하지 않았다.

감 사

본 연구는 울산지역환경기술개발센터의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Y. H. Song, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **17**, 1 (2006).
2. H. H. Kim, A. Ogata, and S. Futamura, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **38**, 1292 (2005).
3. T. Hammer and S. Broer, Plasma enhanced selective catalytic reduction of NOx for diesel cars, SAE 982,428 (1998).
4. J. D. Moon and S. T. Geum, *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, **34**, 1206 (1998).
5. D. Evans, J. J. Coogan, G. K. Anderson, L. A. Rosocha, and M. J. Kushner, *J. Appl. Phys.*, **74**, 5378 (1993).
6. P. M. Castle, I. E. Kanter, P. K. Lee, and L. E. Kline, Westinghouse Corp. Final Report, Contract DAAA 09-82-C-5396 (1984).
7. T. Yamamoto, P. A. Lawless, and L. E. Sparks, *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, **24**, 934 (1988).
8. T. Yamamoto, P. A. Lawless, and L. E. Sparks, *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, **25**, 743 (1989).
9. I. W. Kim, Plasma technology for the romoval of VOCs of Ulsan petrochemical complex, URETDC (2000).
10. J. F. Scott, Ferroelectric Memories, Springer, Berlin (2000).
11. C. M. Nunez, G. H. Ramsey, W. H. Ponder, J. H. Abbott, L. E. Hamel, and P. H. Kariher, *J. Air & Waste Manag. Assoc.*, **43**, 242 (1993).
12. A. Ogata, D. Ito, K. Mizuno, S. Kushiyama, A. Gal, and T. Yamamoto, *Appl. Catal. A*, **236**, 9 (2002).
13. A. Koutsospyros, S. M. Yin, C. Christodoulatos, and K. Becker, *Int. J. Mass Spectrom.*, **233**, 305 (2004).
14. H. H. Kim, S. M. Oh, A. Ogata, and S. Futamura, *Appl. Catal. B*, **56**, 213 (2005).