

수표면 방전에 투입된 유전체의 유전율에 따른 방전 및 오존발생특성

(Discharge and Ozone Generation Characteristics by Permittivity of Dielectric Material installed in Water Surface Discharge)

박승록 * · 김진규 · 김형표

(Seung - Lok Park · Jin - Gyu Kim · Hyung - Pyo Kim)

요 약

수표면을 전극으로 사용한 무성방전형 오존발생기를 제안하고 수표면의 바로 아래에 유전체구를 설치함으로써 오존발생특성을 향상시킬 수 있었다. 이때, 서로 다른 유전율을 갖는 유전체구를 사용하여 수표면에 형성되는 방전조건을 변화시키고자 하였다. 전류-전압특성과 오존발생특성을 조사하였고 방전현상을 관찰하기 위해 유리구슬 유전체를 사용한 경우의 방전모양을 사진 촬영하여 분석하였다. 수표면에 발생하는 수돌기의 크기는 교락현상(breakdown)의 원인이 될 수 있고 따라서 오존발생량을 감소시킨다. 본 연구에서는 수표면 바로 아래에 서로 다른 유전율을 갖는 유전체구를 투입함으로써 과도한 크기의 수돌기(Taylor cone)의 높이를 제한할 수 있었다. 이에 따라, 유전체구를 사용하지 않은 경우보다 많은 양의 오존을 발생시킬 수 있었다. 수중에 투입되는 유전체의 유전율이 증가함에 따라 방전이 시작되는 전압을 앞당길 수 있었고 강유전체구를 사용한 경우 최대 110 [ppmv]의 오존발생량을 얻을 수 있었다.

Abstract

A silent type ozone generator using water surface has been studied and improved its ozone generation characteristics by installing dielectric beads in the just under the surface of the water. At this time, different permittivitis of dielectric beads were used to change the discharge condition of water surface. The current-voltage characteristics and characteristics of ozone generation quantity of the test system were investigated and discharge photos of glass beads were observed. The height of Taylor cone may be the cause of the discharge bridge to decrease the ozone generation on the discharge spacing. In this study, the hight of Taylor cone could be controlled greatly by installing dielectric beads just under the water surface. Therefore a higher ozone generation also could be obtained. As the permittivity of dielectric material increased, discharge starting voltage was advanced and maximum 110 ppmv of ozone was generated by

* 주저자 : 국립금오공과대학교 전자공학부 BK21
계약교수
Tel : 054-467-4412, Fax : 054-467-4270
E-mail : parkssi@hanmail.net

접수일자 : 2003년 2월 4일
1차심사 : 2003년 2월13일
심사완료 : 2003년 3월19일

using the ferroelectric ball.

key words : ozone, Taylor cone, water surface discharge, glass beads, permittivity of dielectric beads

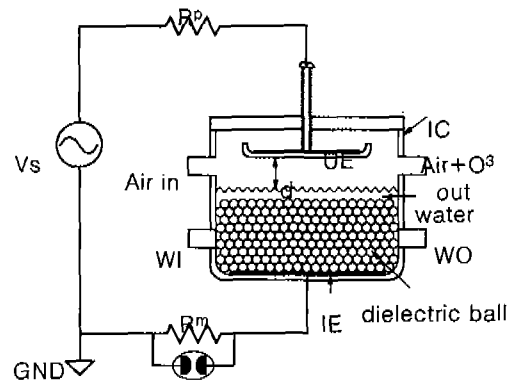
1. 서 론

오존은 강력한 산화력을 가지고 있어서 수처리등 환경 및 산업계의 여러분야에서 크게 주목되고 있다. 따라서, 고효율의 오존발생장치의 개발, 새로운 영역에서의 응용과 적용연구가 국내외에서 활발히 수행되고 있는 실정이다[1,2,3,4]. 수처리에 사용하는 상용의 오존발생기는 무성방전형 또는 유전체 장벽 방전형을 주로 사용하고 있다[5,6]. 공기중의 산소로부터 만들어진 오존을 수처리에 이용하기 위해 수중으로 용해시키는 과정에서 용해효율이 낮아서 다시 공기중으로 유출되어 환경공해를 유발시키는 문제점이 있다. 따라서 오존을 수중으로 효과적으로 용해시키기 위한 여러 연구가 행해지고 있고, 수중에서 직접 오존을 발생시키는 방법[7]과 수표면을 전극으로 이용하는 방법[8,9] 등이 연구되고 있다. 특히 수표면을 전극으로 이용하는 오존발생방법은 공기중 오존발생방법에 비해 수표면을 방전전극으로 사용함으로써 오존발생시 문제가 되는 방전전극의 과도한 온도상승을 막을 수 있다. 또한 수표면상의 방전에 의해 발생된 많은 작은 수돌기들에 의해 오존의 일부가 수중에 직접 용해되도록 할 수 있는 이점이 있다.

본 연구는 수표면의 수돌기(Taylor cone)를 이용한 유전체 장벽방전형 오존발생장치에 관한 기초연구로서 수표면의 과도한 유동현상에 의해 오존발생에 미치는 비효율적인 방전현상을 개선하여 오존발생에 유리한 방전을 발생시킬 수 있는 방법에 중점을 두고 연구하였다. 즉 수표면을 전극으로 사용할 때 강한 교류전계에 의해 수표면에서 발생하는 과도한 크기의 수돌기(Taylor cone)[10,11,12]가 발생되고 이렇게 발생된 수돌기가 장벽으로 사용되는 유전체까지 근접하여 방전공간을 단락시킴으로써 효과적인 방전을 일으키지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 교류전계에 의해 발생된 수돌기의 높

이를 조절하여 안정된 방전을 일으키고자 하였다. 즉, 유전체를 수도수 표면의 아래부분까지 투입함으로써 수중전계의 형태를 변화시켜서 수표면 방전과 수돌기의 모양을 제한시키고자 하였다. 또한, 이때 투입되는 유전체의 유전율을 변화시켜 방전조건에 미치는 영향을 검토하였으며 수표면 방전의 모양을 관찰하기 위해 도전성유리를 사용하여 사진촬영을 하였다. 제안한 실험장치에 대한 실험의 결과를 전압-전류특성, 오존발생량특성을 통해 비교 검토하였다.

2. 실험방법 및 장치



Vs	voltage source	IC	insulator case
Rp	protection resistor	WI	water inlet
Rm	measuring resistor	WO	water outlet
UE	upper electrode	d	air gap spacing
SA	surge arrester	GND	ground
IE	induction electrode		

그림 1. 수표면 방전장치의 개략도.
Fig. 1. Schematic of water surface discharge system.

그림 1은 실험에 사용된 수표면을 전극으로 이용한 유전체 장벽방전형 오존발생장치와 실험장치의 개략도이다. 오존발생장치는 그림 1과 같이 유리용기

수표면 방전에 투입된 유전체의 유전율에 따른 방전 및 오존발생특성

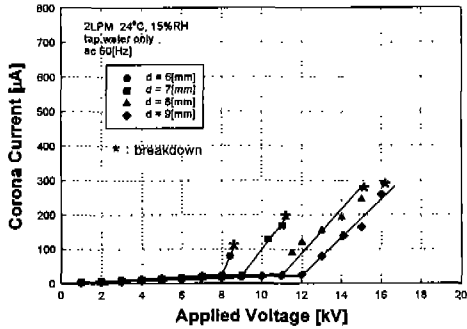


그림 2. 방전공간간격변화에 따른 수도수의 전류-전압 특성.
Fig. 2. Current-voltage characteristics for different air gap spacings of tap water.

(pyrex, 두께 : 2 mm, 지름 : 60 mm)의 윗면에 원형의 전극(UE : upper electrode, 재질 : SUS304, 지름 : 45 mm, 두께 : 0.1 mm)을 설치하고 나사를 부착하여 그 피치로써 수표면과의 거리(d)를 적절히 조절할 수 있도록 하였다. 이 때 수표면방전의 형태를 결정짓기 위해 물 속에 작은 유리구슬 유전체(구직경 : 약 2 mm, glass beads : $\epsilon_r=6$)을 투입하거나, 서로 다른 유전율을 가지는 두 종류의 유전체구슬(구직경 : 약 2 mm, TiO_2 ($\epsilon_r=90$), $\text{FEB}(\epsilon_r=11000)$)을 각각 투입하여 실험하였다. 방전현상을 관찰하기 위해 유리용기의 윗면에 도전성 유리(ITO glass)를 설치하여 사진촬영을 하였다. 또한 수중의 하면에 유도전극(IE : Induction Electrode)을 설치하여 실험하였다. 이때, 인가 고전압 전원장치는 상용 고전압 변압기(출력 최대 전압 : 20 kV, 최대 전류 : 100mA)를 사용하였다. 본 실험의 방전전류 및 전압은 실효치로써 측정형오실로스코프(Tektronix Model TDS 360A)와 고주파 고전압 프로브(Tektronix, P6015A)를 사용하여 측정하였으며, 정밀저항의 양단에 계기 보호용 충격전류흡수 장치(surge arrester, 250V)를 삽입하여 측정계기를 보호하는 동시에 방전전류를 측정할 수 있도록 하였다. 실험에서 발생된 오존은 오존모니터(Dasibi, Model 1108)를 사용하여 측정하였다. 인입기체로는 공업용 공기를 유량 2 LPM으로

고정하여 사용하였다. 모든 실험장치는 전자 차폐된 철제함 내에 설치하여 실험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

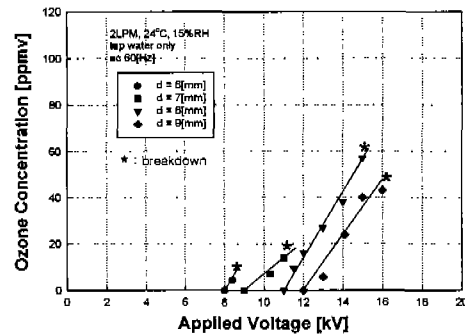


그림 3. 방전공간 간격변화와 인가전압에 따른 수도수의 오존발생량특성.
Fig. 3. Ozone generation characteristics for different air gap spacings of tap water.

그림 2는 수도수를 사용하고 유전체장벽과 수표면사이의 거리 즉, 공간간격(air gap spacing, d)을 6~9 [mm]로 변화시켰을 때의 전류-전압 특성을 나타낸 것이다. 전압이 인가되면 작은 변위전류가 흐르고 전압이 증가함에 따라 수표면이 유동하기 시작하고 물결모양을 형성하는 것을 관찰할 수 있다. 인가전압이 더욱 높아지면 방전이 개시되고 수표면에는 수돌기인 원추모양의 작은 물기둥들이 수직 방향으로 형성된다. 이때, 각각의 공간간격에서 전압이 일정한 값 이상 되면 수표면에는 크고 높은 수돌기가 생성되어 심한 유동현상이 발생하고, 수돌기 끝부분이 유전체 장벽으로 사용된 유리그릇의 표면에 이르게 되고 공간간격이 단락됨으로써 교락(breakdown)현상이 발생한다. 공간간격이 6, 7 [mm]인 경우에는 8, 9 [mm]에 비해 낮은 전압에서 교락현상이 발생하고 공간간격이 8, 9 [mm]인 경우에는 15 [kV] 이상까지 교락현상이 발생하지 않고 6, 7 [mm]인 경우보다 안정된 방전현상을 보여준다.

그림 3은 수도수를 사용하고 공간간격을 6~9 [mm]로 변화시켰을 때의 오존발생량특성을 나타낸 그림이다. 공간간격이 6, 7 [mm]인 경우 인가전압이

낮을 때는 소량의 오존이 발생되나, 인가전압이 증가하여 각각 8.3 [kV] 및 11 [kV]에서는 그 길이가 6[mm]이상의 과도한 크기의 물기둥이 유전체 장벽으로 사용된 유리그릇의 표면에 부착됨으로써 교락현상이 발생한다. 따라서 오존이 발생할 수 있는 공간간격이 없어지고 더 이상 오존은 발생하지 않게 된다. 공간간격이 8, 9 [mm]인 경우에는 약 15 [kV] 이상까지 물기둥의 길이가 유리그릇과 닿지 않는 7 [mm]이하로 공간간격보다 작아서 교락현상이 발생하지 않고 이때 발생하는 최대오존발생량 역시 공간간격이 6, 7 [mm]일 때 보다 많은 57 [ppmv] 및 43 [ppmv]를 나타내었다.

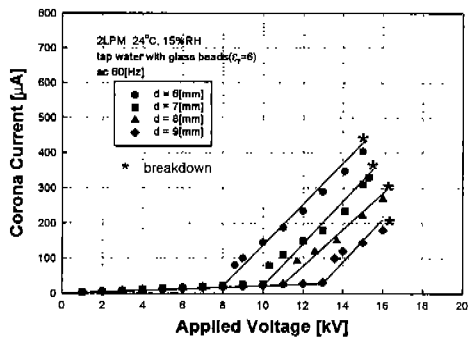


그림 4. 유리구슬 유전체($\epsilon_r=6$)가 충전된 수도수의 방전공간간격변화에 따른 전류-전압 특성.
Fig. 4. Current-voltage characteristics for different air gap spacings of tap water with glass beads ($\epsilon_r=6$).

그림 4는 비유전율이 물에 비해 매우 작은 유리구슬 유전체구(glass beads, 직경 약 2 mm, $\epsilon_r=6$)를 수 표면 하부(수표면에서 약 5 mm)에 투입했을 때의 전류-전압 특성을 나타낸 그림이다. 투입된 유전체구는 수표면의 유동현상을 줄여서 방전에 영향을 줄 것으로 생각된다. 그림에서 알 수 있듯이 방전개시 전까지는 공간간격에 상관없이 일정량의 변위전류가 흐르는 것을 볼 수 있다. 방전이 시작되면 공간간격이 6, 7 [mm]인 경우 그림 2의 경우와는 달리 인가전압 15.0 [kV] 및 15.3 [kV]까지 교락현상없이 안정된 방전특성을 보임으로써 각각 최대 403 [μA] 및 330 [μA]의 전류를 흘릴 수 있었다.

이러한 현상은 수도수 속에 유전체구를 투입함으로써 수도수의 유동성을 적게 하고 또한 도전을 감소와 상대적인 수중전계의 증대 및 집중화로 말미암아 수표면의 과도한 유동현상을 줄일 수 있었기 때문에 미시적인 현상은 앞으로 더욱 세밀한 연구가 요구된다.

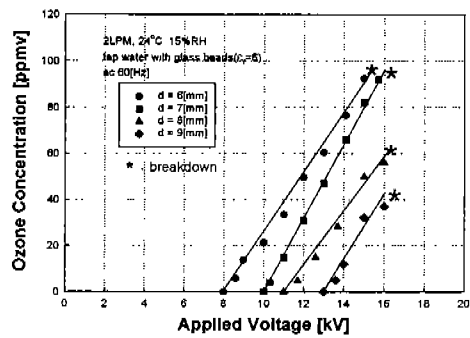


그림 5. 유리구슬 유전체($\epsilon_r=6$)가 충전된 수도수의 방전공간간격변화에 따른 오존발생량특성.
Fig. 5. Ozone generation characteristics for different air gap spacings of tap water with glass beads ($\epsilon_r=6$).

그러나 공간간격이 8, 9 [mm]일 경우 그림 2의 경우와 유사하게 공간간격에 높은 전압이 인가됨으로써 방전개시 후 즉시 교락현상으로 진전되는 것을 보여준다.

그림 5는 수도수내에 유리구슬 유전체구(glass beads, 직경 약 2 mm, $\epsilon_r=6$)를 투입했을 때의 오존 발생량특성을 나타낸 것이다. 공간간격이 6, 7 [mm]인 경우 방전개시후 인가전압의 증가에 따라 급격한 오존발생량의 증가를 보이고 인가전압 약 15 [kV]까지 안정된 방전특성을 보임으로써 92 [ppmv] 및 95 [ppmv]의 최대오존발생량을 나타내었다. 이는 수도수만의 경우에 비해 유전체구를 투입 설치함으로써 약 2배 정도의 많은 오존발생량을 얻을 수 있음을 보여준다. 반면, 공간간격이 8, 9 [mm]인 경우 방전개시후 인가전압의 증가에 따라 급격한 오존발생량의 증가를 보이지만 인가전압 약 16 [kV] 이상에서는 수표면에 과도한 유동현상을 보이고 교락현상이 발생함으로써 오존은 더 이상 발생하기 어렵게 됨을 보

수표면 방전에 투입된 유전체의 유전율에 따른 방전 및 오존발생특성

여준다.

그림 6과 그림7은 수도수내의 유전율이 유리보다 큰 유전체($TiO_2, \epsilon_r=90$)를 사용했을 때의 전류-전압 특성 및 오존발생량특성을 나타낸 그림이다. 수표면 방전에 직접 관여하는 주요인자로서 공기중의 이온, 수중의 이온, 물속의 극성분자등의 입자요소들과 수중에 형성되는 전계에 영향을 줄 수 있는 투입 물질을 들 수 있다. 공기중의 유전체 방전에서는 방전에 사용되는 유전체의 유전율이 높을수록 유전체구들의 접촉면에 형성되는 전계는 강해지게 된다[13].

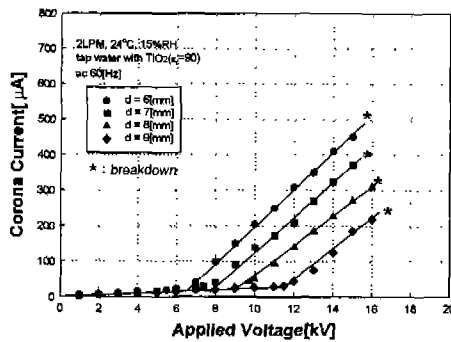


그림 6. 유전체구슬이($TiO_2, \epsilon_r=90$) 충전된 수도수의 방전공간간격변화에 따른 전류-전압 특성
Fig. 6. Current-voltage characteristics for different air gap spacings of tap water with dielectric beads ($TiO_2, \epsilon_r=90$)

그림 6에서 볼 수 있듯이 방전개시전압이 유전율이 작은 유리구슬 유전체를 사용했을 때의 약 8 [kV] 보다 낮은 7 [kV] 에서 발생한 것을 볼 수 있다. 이것은 이미 설명한 것과 같이 유전율이 높은 유전체를 사용함으로써 수중의 전계집중이 용이했던 것으로 사료된다.

그림 7의 오존발생량특성은 방전개시전압이 그림4와 5의 특성에 비해 비교적 낮은 전압인 약 6.5 [kV]를 지나면서 오존이 발생하기 시작한다. 그러나 최대오존발생량은 그림 5에 비해 큰 차이를 보이지 않았다.

그림 8과 9는 수도수내의 유전율이 앞서 사용한

유전체구($TiO_2, \epsilon_r=90$)보다 큰 강유전체구(Ferroelectric ball, $\epsilon_r=11000$)를 사용했을 때의 전류-전압 특성 및 오존발생량특성을 나타낸 그림이다.

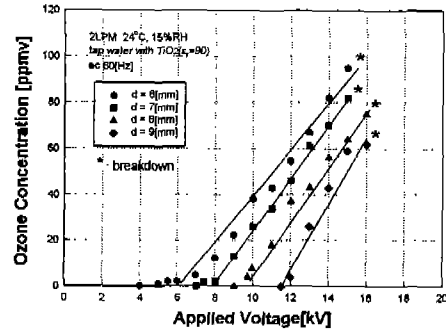


그림 7. 유전체구슬이($TiO_2, \epsilon_r=90$) 충전된 수도수의 방전공간간격변화에 따른 오존발생량특성
Fig. 7. Ozone generation characteristics for different air gap spacings of tap water with dielectric beads ($TiO_2, \epsilon_r=90$)

그림 8은 그림 6의 전류-전압특성과 큰 차이를 보이지 않으나 인가전압 15 kV에서 흐르는 방전전류가 500 μA 에 근접함으로써 공간간격에서 흐르는 최대방전전류는 조금 증가한 것을 볼 수 있다.

그림 9의 오존발생량특성은 그림 7의 유전율이 90인 유전체를 사용한 경우와 비슷하나 최대 오존발생량이 조금 증가한 약 110 [ppmv]를 발생시킨 것을 볼 수 있다.

그림 10은 인가전압을 변화시켜가면서 유리용기의 윗면에서 도전성 유리덮개(ITO glass)를 사용해 방전의 모양을 촬영한 그림이다. 사진촬영은 외부의 빛이 완전히 차단된 암실에서 행하였다.

이때, 방전에 의한 수표면의 유동을 줄이기 위해 유리구슬 유전체($\epsilon_r=6$)를 사용하였으며 방전공간간격은 6 [mm]로 하였다. 그림 10(a)는 인가전압이 10 [kV]일 때의 방전모양으로써 비교적 방전초기이다. 사진에 보이는 흰색의 점들은 방전 수들기의 끝부분에서 발생한 방전불꽃이 유리용기의 윗면에 설치한 도전성 유리에 비친 것들이다. 그림에서 보듯이 비교적 작은 여러개의 방전불꽃들이 발생하며 가끔씩 불규칙하게 다른 불꽃들보다 큰 방전불꽃을 관찰할

수 있다. 이것은 수표면의 성질과 수중의 이온량 및 종류에 따라서 발생하는 수돌기의 크기와 모양은 각각 다르고 이에 따라 수돌기의 끝부분에 생기는 방전의 세기와 방전주의 크기도 각각 다르기 때문으로 사료된다.

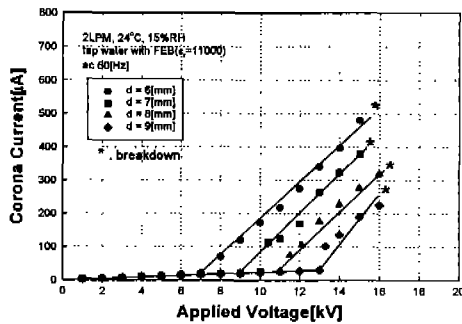


그림 8. 유전체구슬이(Ferroelectric ball, $\epsilon_r=11000$) 충전된 수도수의 방전공간간격변화에 따른 전류-전압 특성.
 Fig. 8. Current-voltage characteristics for different air gap spacings of tap water with dielectric beads bed(Ferroelectric ball, $\epsilon_r=11000$)

그림 10(b)는 방전이 진행되고 있는 인가전압 13 [kV]일 때의 방전사진이다. 그림의 전부분에 고루 방전불꽃이 분포되어있음을 볼 수 있고 방전불꽃의 세기도 인가전압 10 [kV]일 때 보다 더 커진 것을 알 수 있다. 이때의 방전현상은 수표면 전반에 걸쳐 수돌기가 발생하고 그 크기도 도전성유리에 닿을 만큼 크게 신장하게 된다.

그림 10(c)는 교락현상(breakdown)이 발생하기 직전의 인가전압 16 [kV]일 때의 방전사진이다. 그림 10의 (a)또는 (b)와는 다르게 방전불꽃이 일부분에 뭉쳐진 것을 볼 수 있다. 이것은 형성된 방전수돌기가 인가전압의 증가에 따라 신장하여 사진촬영을 위해 설치된 도전성유리부분에 거의 닿아서 도전통로를 형성함으로써 수표면의 일부분에 방전이 집중됨으로써 발생하는 현상이다. 이 시점이 되면 방전은 불규칙하게 되고 수돌기가 유전체 표면에 부착함으로써 안전된 방전을 발생시킬 수 없게 되어 오존

발생량도 급격히 떨어지게 된다.

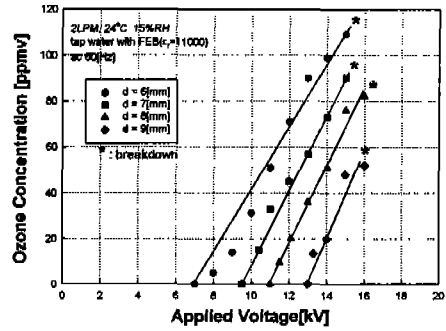


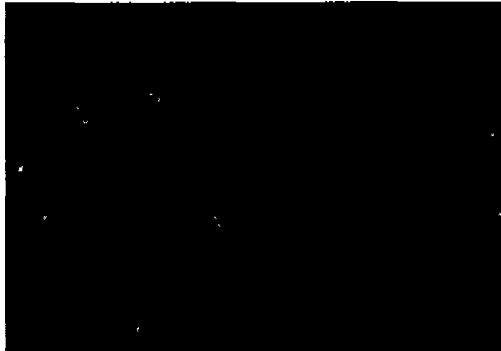
그림 9. 유전체구슬이(Ferroelectric ball, $\epsilon_r=11000$) 충전된 수도수의 방전공간간격변화에 따른 오존발생량특성.

Fig. 9. Ozone generation characteristics for different air gap spacings of tap water with dielectric beads (Ferroelectric ball, $\epsilon_r=11000$)

4. 결 론

본 논문은 수표면을 전극으로 이용한 새로운 형태의 유전체 장벽방전형 오존발생장치에 관한 논문으로써 수표면의 과도한 유동현상에 의한 오존발생에 비효율적인 방전현상을 개선시키고자 하였다. 이를 위해 교류전계에 의해 수표면에 발생된 수돌기의 크기를 제한할 수 있을 것으로 사료되는 유전체를 수도수중에 투입하고 이때, 서로 다른 유전율을 갖는 유전체를 투입함으로써 수중에 형성되는 전계의 모양을 변화시켜 방전의 특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수도수를 사용한 경우 특정한 전압이상이 공간간격사이에 인가될 때 수표면상의 과도한 유동현상에 의해 방전공간을 단락시키는 정도의 매우 큰 수돌기가 발생하며, 이로 말미암아 방전이 불규칙하며, 따라서 방전공간간격이 6, 7 [mm]인 경우 각각 5 [ppmv] 및 13 [ppmv]의 매우 작은 오존발생량을 얻을 수 있었다.
2. 수도수($\epsilon_r=80$)내에 비유전율이 현저히 작은 유리구슬 유전체구(glass beads, $\epsilon_r=6$)를 투입한



(a) Applied Voltage 10 [kV], d=6 [mm]



(b) Applied Voltage 13 [kV], d=6 [mm]



(c) Applied Voltage 16 [kV], d=6 [mm]

그림 10. 인가전압에 따른 방전사진
Fig. 10. Discharge Photos by Applied Voltage

경우 인가전압 약 15 [kV]까지 안정된 방전을 얻을 수 있었고, 방전공간간격이 6, 7 [mm]의 경우 각각 92 [ppmv] 및 95 [ppmv]의 매우 큰 오존발생량을 얻을 수 있었다.

3. 수도수내에 유전율이 유리보다 큰 유전체구 (TiO_2 , $\epsilon_r=90$, 및 Ferroelectric ball, $\epsilon_r=11000$) 를 사용한 경우 유리구슬 유전체구(glass beads, $\epsilon_r=6$)를 사용한 경우에 비해 방전개시 전압을 1[kV] 낮출 수 있었다. 그리고 유전율이 가장 큰 강유전체구를 사용한 경우 최대 110 [ppmv]의 오존발생량을 얻을 수 있었다.
4. 유리구슬 유전체구를 투입한 경우 방전모양을 사진 촬영한 결과 방전초기에는 방전수돌기가 수표면 전반에 걸쳐 발생하고 그 세기도 약하여 작은 흰색의 방전불꽃을 관찰할 수 있었다. 그러나 인가전압이 증가함에 따라 방전수돌기가 신장함으로써 방전불꽃의 세기도 강해지고 방전이 일부분에 집중됨을 확인할 수 있었다.

References

- (1) 池畑昭, "오존의 환경오염への應用", 日本靜電氣學會誌, 7. 3, pp 167-175, 1983.
- (2) B. S. Kirk and R. McNabney, "Ozone in Water and Wastewater Treatment", Ann Arbor Science, Ann Arbor, Michigan, 1972.
- (3) 官田定次郎: 水處理技術, 21, 129, 1980.
- (4) Hitachi UV/ozone asher, UA-5200, HITACHI, JAPAN and Fusion 200AC-II Asher System, Fusion Semiconductor Systems, USA.
- (5) S. Masuda, K Akutsu, M Kuroda, Y. Awatsu, and Y. Shibuya, "A ceramic based ozonizer using high-frequency discharge", IEEE Ind. Appl., vol IA-24, no. 2, pp 223-231, Mar./Apr. 1988.
- (6) Yukiharu Nomoto, Toshikazu Ohkubo, Seiji Kanazawa and Takayoshi Adachi, "Improvement of Ozone Yield by a Silent-Surface Hybrid Discharge Ozonizer", IEEE Ind. Appl., vol 31, no. 6, pp 1458-1462, Nov./Dec. 1995.
- (7) Heinz P. Fritz, Jordanis C. G. Thanos, and Dietrich W. Wabner, "Electrochemical Synthesis, XV II[1] Ozone Synthesis by Electrolysis of Water", pp 1617-1627, 1979.
- (8) James A. Robinson, Maurice A. Bergougnou, William L. Cairns, G. S. Peter Castle, and Ion I. Inculet, "A New Type of Ozone Generator Using Taylor Cones on Water Surfaces", IEEE Ind. Appl., vol. 34, no. 6, pp 1218-1223, Nov./Dec. 1998.
- (9) Ion I. Inculet, "Method and Apparatus for Ozone

- Generation and Treatment of Water", U. S Patent, 5478533, Dec. 26, 1995.
- [10] Sir Geoffrey Taylor, F.R.S, "Disintegration of water drops in an electric field", Proc. R. S. Lond. A, Math. Phys. Sci., vol. 280, pp 383-397, Aug. 1964.
- [11] G. A. Dawson, "Eclectical Corona from Water-Drop Surfaces", J. Geophys. Res., vol. 75, no. 12, pp 2153-2158, Apr 20, 1970.
- [12] Masanori Hara and Masanori Akazaki, "Onset Mechanism and Development of Corona Discharge on Water Drops Dripping From A Conductor Under High Direct Voltage", Journal of Electrostatics, vol. 9, pp 339-353, 1981.
- [13] Jae-Duk Moon, Sang-Taek Geum, Geun Taek Lee, "Corona Discharge and Ozone Generation Characteristics of a Point-Plate Type Nonthermal Plasma Reactor with Ferroelectric Pellet Barrier", Journal of the Korean Physical Society, vol. 38, 6, pp 680-685, June 2001,

◇저자소개◇

박승록(朴勝祿)

1971년 2월 2일생. 1995년 경북대학교 공과대학 전기공학과 졸업(학사). 1997년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 2002년~현재 국립금오공과대학교 전자공학부 BK21계약교수.

김진규(金振圭)

1967년 2월 24일생. 1990년 경일대학교 공과대학 전기공학과 졸업(학사). 1994년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 2000년 경북대학교 전자전기공학부 BK21조교수, 현재 상주대학교 전자전기공학부 전임강사.

김영표(金亨杓)

1967년 2월 5일생. 1992년 경북대학교 공과대학 전기공학과 졸업(학사). 1994년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1996년 보국전기공업(주) 기술연구소, 현재 상주대학교 전자전기공학부 조교수.