

## 동축형 전극구조 변화시의 오존생성 특성

(Ozone Generation Characteristics by according to the Coaxial Electrode Geometry)

조국희\* · 이홍식\*\* · 이형호\*\*

(Kook-Hee Cho · Hong-Sik Lee · Hyeong-Ho Lee)

### 요 약

본 논문에서는 동축형 전극구조 변화시의 중첩방전에 의해 발생하는 오존의 농도, 효율 및 발생량 특성에 대해서 논했다. 오존생성을 향상시키기 위해 오존방전관의 새로운 형태를 제안하였으며 연면방전과 무성방전이 동시에 분리된 방전공간내에서 발생하도록 하였다. 전극구조에 대한 오존발생 의존성을 조사하기 위해 구조가 다른 형태( 2전극-1갭, 3전극-2갭 및 3전극-3갭형)인 방전관을 설계·제작하였고 실험은 오존발생특성을 살펴보기 위하여 60[Hz] 전원을 사용하여 무성방전과 연면방전을 같은 갭내에 중첩시켜 측정된 결과 무성방전을 이용한 전극구조보다 중첩방전을 이용한 전극에서 오존의 농도, 효율 및 발생량이 향상됨을 확인할 수 있었다.

### Abstract

In this paper the concentration, yield and generation quantity of the ozone by the superposition discharge according to the coaxial electrodes geometry is described. In other to improve the ozone generation, a new type of ozonizer is proposed, where a silent discharge and a surface discharge are generated in the separated discharge spaces at the same time. To investigate the ozone generation dependency on electrode geometry, a few discharge tubes with different geometry were fabricated.

In our experiment, the 60[Hz] one phase voltage is applied to the discharge tube which has three electrodes. And three kinds of discharges, two silent discharges and a surface discharge are superposed in the same space of the ozonizer. As a result, the followings are obvious. When two kinds of discharges are superposed under the condition using 3electrode-3gap discharge tube, the maximum ozone efficiency is obtained.

### 1. 서 론

최근의 수질오염, 대기 오염 등에 의한 환경악화는 중대한 사회문제가 되고 있어 고도의 공해처리기술의 급속한 개발이 요구되고 있다. 오존은 자연에 존재하는 산화제 중에서 불소 다음으로 강한 산화력을 지니

고 있어 수처리, 악취제거, 탈색, 유기물제거, 살균 등의 분야에 이용이 가능하다, 경제적 이유에 의해 제한되어 있었다[1,2].

그러나, 최근 하천수의 오염이 가속화되면서, 고도의 무공해 처리기술이 요구되고 있고, 오존처리는 그 요청을 만족시켜 주므로 미국은 1977년 이후, 환경청(EPA)이 중심이 되어, 유기염소를 규제하여 왔다. 그 결과 1978년이래 상하수의 오존처리가 급속하게 증가하였고, 국내외적으로 수처리에 관련된 기술도 크게 증가되고 있는 추세이다.

\* 정희원 : 한국전기연구소 선임연구원

\*\* 정희원 : 한국전기연구소 책임연구원

\*\* 정희원 : 한국전기연구소 책임연구원

접수일자 : 2000년 1월 17일

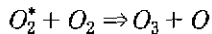
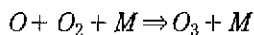
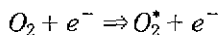
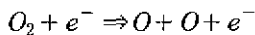
오존의 생성에서는 보통 무성방전에 의한 방전반응이 이용되고 있지만 다량의 전력을 필요로 하면서도 생성효율이 낮은(공기원료의 경우, 약 5%) 원인은 무성방전의 방전기구가 복잡, 방전반응의 미세한 미해명 등을 들 수 있다[3,4,5].

따라서 오존수율을 향상시킬 목적으로 무성방전을 이용한 기존형의 오존방전관을 개량하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 오존생성효율의 향상, 즉 고 효율 오존나이지의 개발은 환경개선 등에서 사회적 요청에 따라 저 에너지의 견지에서 크게 기대되며 있다. 이러한 필요성에서, 본 논문에서는 동축형 전극구조인 3Electrode-3Gap, 3Electrode-2Gap, 2Electrode-1Gap 형태의 방전관을 개발하여 오존생성특성을 연구한 결과 원료가스, 방전관 구조 및 인가전원 등을 고려해야 하는 결론을 얻었고, 무성방전보다 무성방전과 연면방전을 중첩시킨 방전이 오존의 농도, 효율 및 발생량이 향상됨을 확인할 수 있었다.

## 2. 오존발생시스템 원리

### 2.1 오존생성과 분해

무성방전형 오존발생기는 1쌍의 전극사이에 유리 또는 세라믹 같은 유전체를 끼우고 1~3[mm] 정도의 갭을 유지하도록 설치한 후 산소 또는 공기를 불어넣으면서 전극에 교류고전압을 인가하면, 방전공간에서 원료가스중에 포함된 산소의 일부가 무성방전으로 인하여 화학작용을 일으켜 오존을 생성하게 된다[6~9].



여기서 M은 제 3의 물질로서 O, O<sub>2</sub>이다.

그림 1과 같이 방전공간에서는 상용주파 교류고전압에 의한 전계로부터 생성된 전자가 스트리머로 진전하여 전극간에 방전주를 형성하며, 스트리머내에 존재하는 전자가 새로운 전하를 형성하고, 방전공간의 인가전계 약화로 스트리머가 소멸되는 과정을 되풀이 하므로서 미세한 펄스방전이 형성된다.

즉 무성방전에 사용된 유전체에 의해 방전이 절연

파괴로 진전되는 것을 억제하고, 특정장소에서 방전이 집중되는 것을 방지하게 된다.

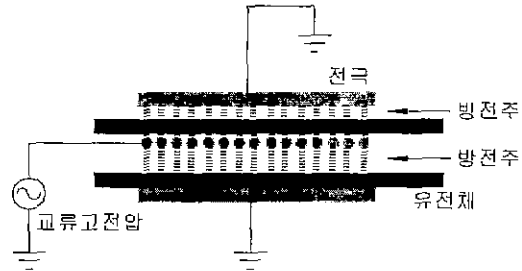


그림 1. 오존발생기의 원리  
Fig. 1. The principle of ozone generator

이와 같이 무성방전은 미세한 펄스적인 방전의 집합체로 방전공간에서 생성된 전자와 산소분자의 충돌에 의해 오존이 생성되는 화학작용을 이용하므로 매우 유용한 방전이라 할 수 있으나 오존의 농도가 높아질수록 오존의 분해반응이 활발해지는 단점도 있다 [10~12].

무성방전에 의해 생성되는 오존은 생성된 오존의 농도가 높아질수록 오존의 분해반응도 활발하게 진행되어 고농도 오존의 생성을 곤란하게 한다. 산소를 원료가스로 사용하는 경우, 방전공간에서 오존분해반응의 원리는 다음과 같다.



### 2.2 오존발생에 영향을 미치는 요인

오존발생특성에 영향을 미치는 각종요인에 대해 파악할 항목은 다음과 같다[13~16].

1) 방전관의 유전체 재질 : 유전율, 유전체 손실(절연내력 및 온도특성)

2) 원료가스성분 : 대기중의 공기보다 순수한 산소를 사용하면 오존발생기의 크기와 소비되는 관련 에너지[kwh/kg]를 줄일 수 있으며 또한 에너지 단위당 발생된 오존의 발생량을 증가시킬 수 있고 주어진 일정 조건하에서 에너지는 낮아 질 수 있으며, 높은 오존 농도를 생산 할 수 있다.

원료가스 중의 존재하는 수분은 에너지 효율을 감소시키고 질산을 형성시키는 요소가 된다. 더구나 오

온 농도(%중량)가 클수록 그림 2에서 보여지는 바와 같이 보다 정확한 발생 현상이 나타나게 된다

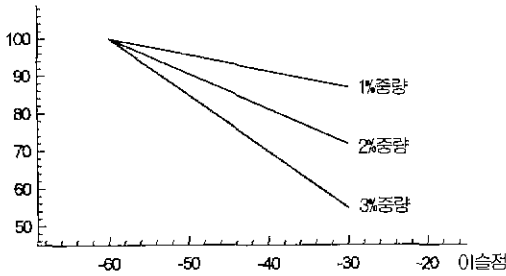


그림 2. 이슬점에 따른 오존 감소율 (원료 가스 : 공기)  
Fig. 2. The ozone generation efficiency of dew point

그러므로 원료 가스는 매우 건조해야 하는데 이것이 바로 공기가 원료 가스로 사용되기 위해 동기화된 알루미늄이나 또는 분자 분리기의 건조부를 통해 탈 수분화 되는 이유이다. 발생기로 통하는 원료 가스의 이슬 점은 지속적으로  $-60[^\circ\text{C}]$  이하로 유지해야 하고, 순수 산소원료기체는 극적인 파정 및 PSA과정을 통해 산출되어야 한다.

- 3) 방전갭 : 방전갭간 거리(G)  
방전갭내의 압력(P)  
방전의 균일성

4) 온도상승 및 냉각 : 오존은 불안정한 가스로서 가스의 온도가 상승 시 오존의 분해가 가속화되므로 방전관의 냉각은 필수적으로 따라야만 하는 중요성이 있고 가능한 한 냉각 될 수 있는 최고치의 냉각수가 사용되어야 한다. 만약 사용할 냉각수가 다소 따뜻한 상태이고 고농도 생산이 필요하면 냉각수를  $5\sim 10[^\circ\text{C}]$ 로 유지하기 위한 냉각기를 설치하는 것이 효율적이다.

- 5) 인가전압 : 전압파형 및 주파수

원료가스 성분은 건조하고 깨끗하며, 낮은 온도에서 오존발생기로 공급하면서 효율적으로 열을 제거하면 다음 식에 의해 최적조건의 오존발생효율을 얻을 수 있다.

$$V \propto PG \text{ -----(1)}$$

$$Y/A \propto f \epsilon V^2/d \text{ -----(2)}$$

여기서,

V : 적용전압[V], P : 방전전극의 기체압력[kg/cm<sup>2</sup>]

G : 방전갭간 거리[mm],

Y/A : 방전관 면적당 발생오존량[g/m<sup>3</sup>]

f : 적용전압의 주파수[Hz],

$\epsilon$  : 방전관 유리의 유전율,

d : 방전관 유리의 두께[mm]

### 3. 실험방법 및 장치

본 연구에서는 방전관의 구조가 오존발생에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 3Electrode-3Gap, 3Electrode-2Gap 및 2Electrode-1Gap 전극의 오존발생기를 각각 제작한 후 각각의 오존발생기로 유입되는 산소의 유량(5, 10, 15, 20[l/min])과 인가전압(6~15[kV])을 변화시키면서 오존발생기에서 발생하는 오존농도를 측정하여 발생량과 수율을 계산하였다.

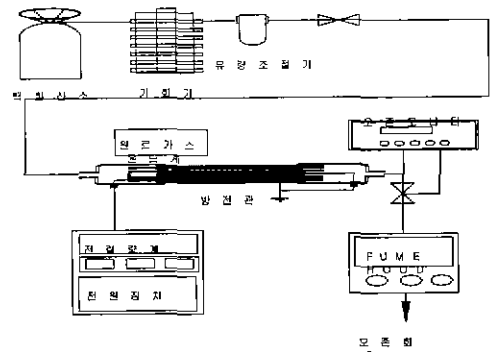


그림 3. 실험장치의 개략도  
Fig. 3. Experimental arrangement

그림 3은 중첩방전형 전극구조인 3Electrode-3Gap 및 3Electrode-2Gap와 무성방전 전극구조인 2Electrode-1Gap에 원료가스인 산소를 이용하여 방전특성 및 오존생성특성을 연구하기 위한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 산소는 압축된 원료가스로서 유량을 조절하여 유입하였으며 전원장치는 용량 15[kVA], 출력전압 15[kV], 주파수 60[Hz]인 전원으로 원료가스 온도와 전력을 측정할 수 있도록 구성되어 있다.

오존생성농도를 측정하기 위하여 오존발생기내에서 발생한 오존화 가스를 매 실험마다 0.5[l/min]으로 sampling 하여 자외선 흡수방식의 기상용 오존 monitor로 측정하였고, 유량, 전극길이 및 방전전력의 변화에 따른 오존생성농도, 오존발생량 및 오존생성수

을 등을 측정 및 계산하였다.

매회 측정시 방전전압과 방전전류는 고전압 분압기와 분류기를 이용하여 방전전력을 측정하였고 오존생성농도도 각각 5회 측정하여 그 평균치를 채택하였으며, 중첩방전형 오존발생기의 방전공간 내에 존재하는 불순물을 제거하고, 방전환경을 일정하게 하기 위해 전압을 인가하지 않고 유량을 일정하게 하여 3분 정도 강제 배기시킨 후 측정을 하였다.

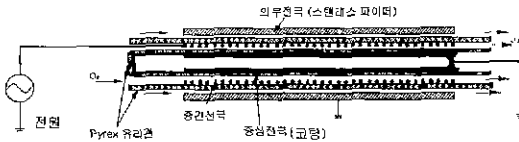


그림 4. 중첩방전형 3Electrode-3Gap 전극구조  
Fig. 4. Superposition discharge type with 3Electrode-3Gap

본 실험에서 사용한 방전관은 그림 4는 동축 이중 원통구조로 3개의 전극(중심전극, 중간전극, 외부전극)으로 구성되어있으며, 스테인레스 관으로 내부유리관에 삽입하여 중심전극으로 사용하였으며, 중간전극으로는 스테인레스 와이어로 피치 5[mm] 간격으로 유지하였고, 내부유전체와 갭 거리는 약 0.4[mm]이내이다. 또한, 외측에 외부 유전체도 파이렉스 유리이고 외부전극은 스테인레스 파이프로 하였다. 내부 유전체와 외부 유전체 갭 거리는 2.5[mm]이고 외부유전체와 외부전극간의 갭은 1.5[mm]로서 이 공간에 원료가스가 균일하게 공급되도록 구성하였다. 그림 4의 방전구조는 외부유전체와 중심전극사이의 연면방전과 무성방전을 중첩시킨 중첩방전과 외부유전체와 외부전극사이의 무성방전이 결합되어 있는 형태이다.

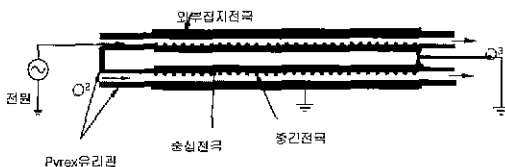


그림 5. 중첩방전형 3Electrode-2Gap 전극구조  
Fig. 5. Superposition discharge type with 3Electrode-2Gap

그림 5는 그림 4처럼 전극과 갭이 같으나 외부전극을 구리 테이프로 붙여 갭이 없도록 하였으며, 내부유

전체에 스테인레스 와이어가 감겨져 있는 것으로서 중간전극에 전원을 인가했을 때 중첩방전 효과를 가지도록 구성되어 있다.

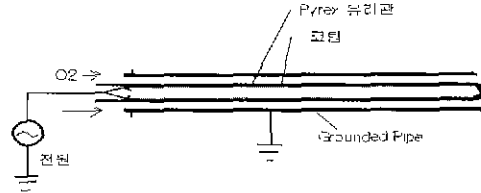


그림 6. 무성방전형 2Electrode-1Gap 전극구조  
Fig. 6. Silent discharge type with 2Electrode-1Gap

그림 6은 현재 주로 사용되고 있는 2Electrode-1Gap 형태로 3Electrode-3Gap과 비교하기 위해 본 연구에서 제작한 방전관으로 2개의 전극(내부전극, 외부전극)과 1개의 유전체로 구성되어 있는 무성방전이다.

스테인레스 관을 유전체 내부에 삽입하여 전압인가용 전극인 내부전극으로 사용하였으며, 외부전극으로는 오존의 강력한 산화력을 견딜 수 있는 스테인레스 파이프를 접지용 전극이다. 유전체와 외부전극의 갭 거리는 25[mm]이며 이 공간에 원료가스가 균일하게 공급되도록 구성하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

3Electrode-3Gap 전극형상의 오존생성특성을 측정한 결과는 그림 7과 같다.

그림 7(A)(B)(C)는 3Electrode-3Gap의 전극구조에서 원료가스의 유량과 인가전압의 변화에 따른 (A)전압-농도, (B)전압-발생량, (C)전압-수율의 그래프를 나타낸 것이다.

측정된 그래프와 같이 유량은 적을수록 농도가 상승하였고 발생량은 감소하는 경향을 보였으며, 수율은 큰 차이가 나타나지 않았다.

이것은 유량이 증가함에 따라 방전공간 내에서 오존의 생성에 영향을 미치는 여기산소분자의 수는 증가하지만, 산소분자가 방전영역에서 체류하는 시간이 짧아지면서 중첩무성방전에 의해서 발생된 전자와의 접촉시간 감소로 인하여 충돌확률이 작아져 오존농도의 상승률이 떨어진 것이다. 또한, 오존발생량의 증가는 방전공간내에 가해지는 전력밀도에 대해 충분한 양의 산소원자가 공급되어 오존생성에 필요한 여기산

동축형 전극구조 변화시의 오존생성 특성

소분자를 충분히 공급하기 때문에 발생량이 증가하는 것으로 사료된다.

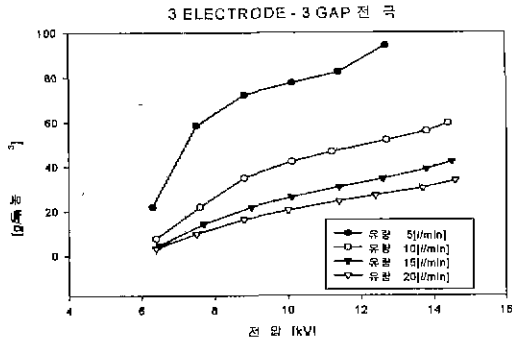


그림 7(A). 3Electrode-3Gap의 전압에 따른 농도  
Fig. 7(A). Ozone concentration characteristics with variance of applied voltage (3Electrode-3Gap)

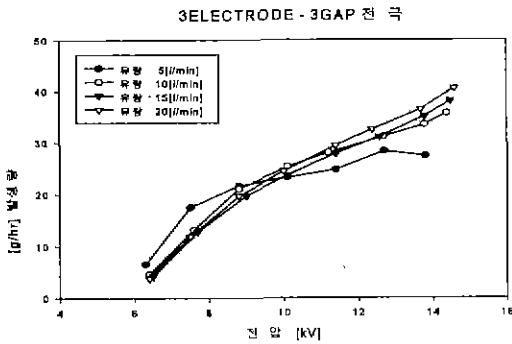


그림 7(B). 3Electrode-3Gap의 전압에 따른 발생량  
Fig. 7(B). Ozone generation quantity characteristics with variance of applied voltage (3Electrode-3Gap)

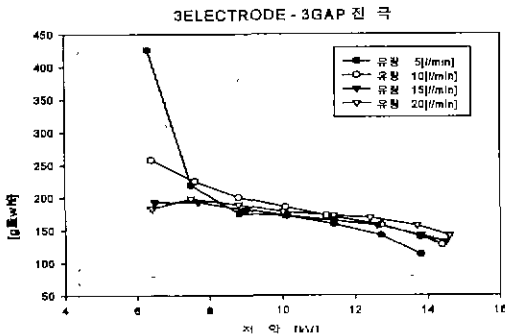


그림 7(C). 3Electrode-3Gap의 전압에 따른 수율  
Fig. 7(C). Ozone efficiency characteristics with variance of applied voltage (3Electrode-3Gap)

그림과 같이 전압이 상승함에 따라 오존농도는 증가하나, 수율은 약간 감소하는 경향이 나타났고, 높은 전압에서 유량이 증가함에 따라서는 수율이 상승하는 효과를 얻을 수 있었다. 유량 10[l/min] 및 전압 12[kV]에서 측정된 결과를 보면 농도가 50[g/m<sup>3</sup>], 발생량이 30[g/hr], 수율이 165[g/kWh]로 측정되었음을 알 수 있다.

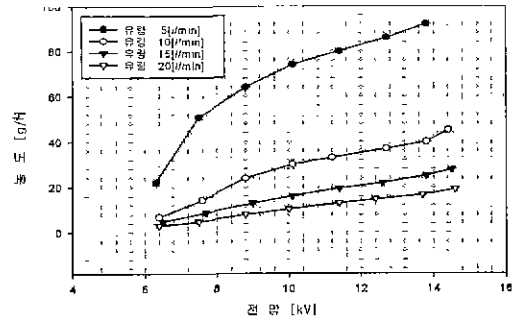


그림 8(A). 3Electrode-2Gap의 전압에 따른 농도  
Fig. 8(A). Ozone concentration characteristics with variance of applied voltage (3Electrode-2Gap)

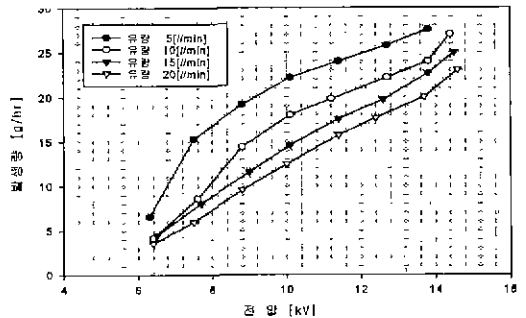


그림 8(B). 3Electrode-2Gap의 전압에 따른 발생량  
Fig. 8(B). Ozone generation quantity characteristics with variance of applied voltage (3Electrode-2Gap)

그림 8(A)(B)(C)는 3Electrode-2Gap의 전극구조에서 원료가스의 유량과 인가전압의 변화에 따른 (A)전압-농도, (B)전압-발생량, (C)전압-수율의 그래프를 나타낸 것이다

전극구조를 보면 3E-3G는 내부유리와 외부유리 사이의 중첩방전과 외부유리와 외부전극사이의 무성방전을 이용한 것이며, 3E-2G는 단지 중첩방전만을 발생시켰다. 측정된 그래프를 보면 전체적으로 그림 7(A)(B)(C)와 같은 경향을 나타냈으나, 유량 5[ l

/min]인가전압 8[kV] 이상일 때 오존발생량의 증가에 비해 수율의 감소폭이 크게 나타났다.

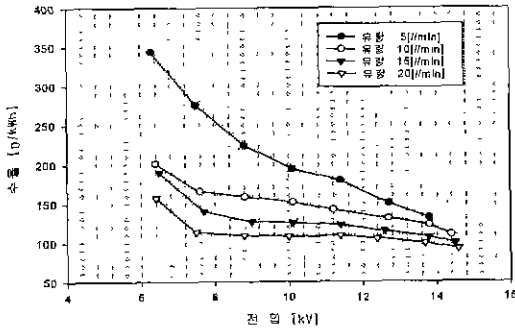


그림 8 (C). 3Electrode-2Gap의 전압에 따른 수율  
Fig. 8 (C). Ozone efficiency characteristics with variance of applied voltage (3Electrode-3Gap)

이것은 유량이 작고, 방전을 발생시킬 수 있는 전압이 일정 이상이 되면 오존농도가 계속 상승하는 것이 아니라 포화상태에 도달해 가는 과정이 된다. 따라서 방전관 구조, 형태, 유량, 인가전압에 따라 최적 오존생성이 결정되는 것이다. 10[ l/min] 및 전압12[kV]에서 측정된 결과를 보면 농도가 38[g/m<sup>3</sup>], 발생량이 21[g/hr], 수율이 140[g/kWh]으로 나타났다.

그림 9(A)(B)(C)는 2Electrode-1Gap에서 원료가스의 유량과 인가전압의 변화에 따른 (A)전압-농도, (B)전압-발생량, (C)전압-수율의 그래프를 나타낸 것이다.그림 7 및 그림 8과 같이 농도, 발생량 및 수율은 경향이 거의 같은 것으로 나타났다.

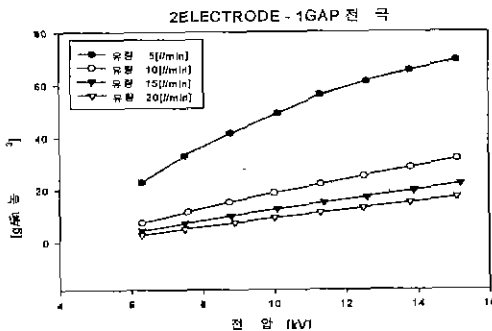


그림 9 (A). 2Electrode-1Gap의 전압에 따른 농도  
Fig. 9 (A). Ozone concentration characteristics with variance of applied voltage (2Electrode-1Gap)

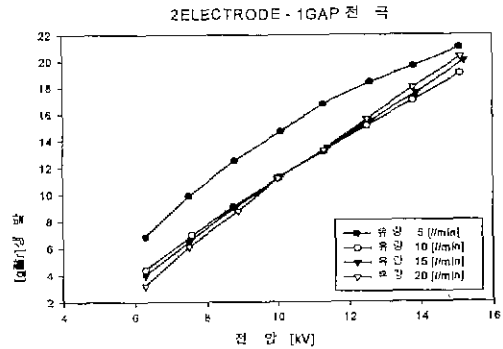


그림 9 (B). 2Electrode-1Gap의 전압에 따른 발생량  
Fig. 9 (B). Ozone generation quantity characteristics with variance of applied voltage (2Electrode-1Gap)

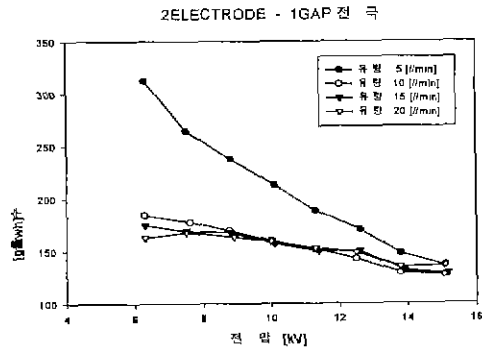


그림 9 (C). 2Electrode-1Gap의 전압에 따른 수율  
Fig. 9 (C). Ozone efficiency characteristics with variance of applied voltage (2Electrode-1Gap)

오존농도는 유량 및 인가전압에 따라 어느 정도 차이를 가졌고, 발생량과 수율은 유량 5[ l/min]를 제외한 10[ l/min]이상에서 인가전압이 8[kV]일 때 거의 같은 분포 형상을 보였으며, 이것은 2E-1G 전극구조에서 발생량을 크게 하기 위한 조건이 되는 유량을 증가시키는 방법은 별로 효과가 없는 것으로 사료되며, 유량 10[ l/min] 및 인가전압 12[kV]에서 측정된 결과를 보면 농도가 24[g/m<sup>3</sup>], 발생량이 14[g/hr], 수율이 150[g/kWh]으로 나타났음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

유량 10[ l/min] 및 전압 12[kV]을 인가할 때 측정된 결과를 보면 전극형상이 3E-3G는 농도가 50[g/

동축형 전극구조 변화시의 오존생성 특성

m<sup>3</sup>], 발생량이 30[g/hr], 수율이 165[g/kWh]이고, 3E-2G는 농도가 38[g/m<sup>3</sup>], 발생량이 21[g/hr], 수율이 140[g/kWh]이며, 2E-1G는 농도가 24[g/m<sup>3</sup>], 발생량이 14[g/hr], 수율이 150[g/kWh]으로 측정되었다. 이것을 3E-3G 전극구조에서 측정된 농도, 발생량 및 수율을 100[%]로 했을 때 다른 전극구조를 백분율로 나타내면 다음과 같다.

오존생성 특성 전극형태	오존 농도	오존 발생량	오존 수율
3E-3G	100	100	100
3E-2G	76	67	85
2E-1G	48	47	91

이와 같은 수치로 볼 때 3E-3G 전극구조가 3E-2G 및 2E-1G 전극구조보다 성능이 더 우수하다는 것이 입증되었으며 전극구조에 대한 중요한 결과는 다음과 같다.

① 오존발생농도는 유량이 적을수록 증가하는 경향이 일정하게 상승하였으나 오존발생량은 유량 10[l/min]이상에서는 차이가 없었다.

② 3E-3G 전극구조는 2E-1G보다 농도와 발생량이 2배이상이고, 3E-2G보다 약 1.5배정도 크게 나타났다.

③ 3E-2G 및 2E-1G 전극구조는 유량 10[l/min] 이상에서는 인가전압의 차이가 있음에도 수율은 거의 같은 경향을 나타내었다.

④ 오존농도, 오존수율 및 발생량은 원료가스량에 무관하게 주파수 60[Hz]인 인가전압 12~13[kV]에서 최적조건임을 보여주었다.

참 고 문 헌

[1] 服部 仁, "오존생성에ける放電의重量效果", T.IEE Japan, Vol.112-A, No.1, pp.41 ~ 46, 1992.  
 [2] 岸田 治夫, "放電重量法によるオゾン生成の高効率化", T.IEE Japan, Vol.117-A, No.11, pp.1103 ~ 1108, 1997.  
 [3] Moo Been Chang, "Experimental Study on Ozone Synthesis via Dielectric Barrier Discharges", Ozone Science and Engineering, Vol.19, pp.241 ~ 254, 1997.  
 [4] 田畑則一, "放電によるオゾン發生法に関する考察", T. IEE Japan, Vol.117-A, No.12, pp.1200 ~ 1206, 1997.  
 [5] 吐合一徳, "二重放電方式を用いた大氣壓擴散形グロー放電によるオゾン生成特性", T.IEE Japan, Vol.117-A, No.12, pp.1194 ~ 1199, 1997.

[6] 山部長兵衛, "沿面放電型オゾンナイズの放電およびオゾン生成特性", ED-94-14, pp.63 ~ 69, 平成6年.  
 [7] 井關昇, "オゾンナイズにおけるオゾン生成機構と今後の課題", 静電氣學會誌, Vol. 7, No. 3, pp.142 ~ 149, 1993.  
 [8] 조국희, 이형호, 이광식, "오존발생기를 이용한 고도정수 처리기술 동향 및 전망", 한국조빙·전기설비학회 학술 발표회 논문집, pp.242 ~ 244, 1998.  
 [9] R Peyrou, "The Effect of Relative Humidity on Ozone Production by Corona Discharge in Oxygen or Air", Ozone Science and Engineering, Vol.12, pp.19 ~ 40, 1990.  
 [10] 조국희, 이형호, "중점방전형 오존발생기의 오존농도의 수율의 관계", 대한전기학회 경남지부 추계학술발표 논문집, pp.67 ~ 70, 1998.  
 [11] 이형호, 김영배, 서길수, 조국희, "수처리용 고농도/고수율 오존발생시스템 설계기술", 대한전기학회 방전 및 고전압연구회 추계학술연구 발표회, D-2, pp.79 ~ 82, 1999, 5. 8.  
 [12] 井關昇, "オゾンナイズのオゾン収率におよぼす原料ガス中水分の影響", ED-86-86, pp.9 ~ 15, 1986.  
 [13] 조국희, 김영배, 서길수, 이형호, "3전극-3แกน 전극구조를 이용한 고농도 오존발생기술", 대한전 기학회 '99학계학술대회, pp. 2176 ~ 2178, 1999 7. 20.  
 [14] 이형호, 조국희, 김영배, 서길수, "Development of Ozone Generation System with High Concentration for Water Treatment", 1999 Japan-Korea Joint Symposium on ED & HVE, pp.29 ~ 32, 1999. 10. 25.  
 [15] H. Sugimitsu, "Measurement of the Rate of Formation in an Ozonizer", Journal de Chemie physique, Vol. 79, No. 9, pp.655 ~ 660, 1982.  
 [16] 조국희, 김영배, 서길수, 이형호, "동축형 전극길이 변화시의 연면무성방전에 의한 오존발생특성", 대한전기회 논문지 제 48권, 제 12호, pp.791 ~ 797, 1999.

◇ 저자소개 ◇

조 국 희 (趙國熙)

1960년 1월 13일생. 1987년 숭실대 전기공학과 졸업, 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학), 현재 한국전기연구소 산업전기연구단 전기물리연구그룹 선임연구원.

이 흠 식 (李弘植)

1953년 9월 13일생. 1975년 서울대 전기공학과 졸업, 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학), 현재 한국전기연구소 산업전기연구단 전기물리연구그룹 책임연구원.

이 형 호 (李亨浩)

1953년 3월 16일생. 1979년 서울대 전기공학과 졸업, 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1993년 일본 큐우슈우대(九州大) 대학원 전기공학과 졸업(공학), 현재 한국전기연구소 산업전기연구단 전기물리연구그룹 책임연구원.