

주파수-진공도를 이용한 3전극-1방전간극 무성방전형 오존발생기의 오존생성 상승 효과 특성

(The Characteristics of Ozone Generation Synergy Effect for 3 Electrode-1 Discharge Gap
Silent Discharge Type Ozonizer using Frequency-Vacuum)

송현직*

(Hyun-Jig Song)

요 약

본 논문에서는 3개의 전극(중심전극, 내부전극 및 외부전극)과 1개의 방전간극(내부전극과 외부전극 사이의 방전간극)으로 구성된 무성방전형 오존발생기를 설계·제작하였다. 진공방전관내에 장착한 중심전극과 내부전극에 2개의 교류 고주파 고전압을 각각 인가하고 외부전극을 공통접지함으로써 방전간극에서 무성방전에 의하여 오존이 생성되는 구조이다. 이때 방전관의 진공도, 전원장치의 주파수, 방전전력 및 산소원료가스 유량 변화에 따른 방전특성과 오존생성특성을 연구검토하였다. 그 결과 방전관의 진공도와 전원장치의 주파수가 높을수록 오존생성특성이 상승하였으며 최대 7,700[ppm], 460[mg/h] 및 70[g/kwh]의 오존을 얻을 수 있었다.

Abstract

The silent discharge type ozonizer with three electrodes(central electrode, internal electrode, and external electrode) and one discharge gap(discharge gap between internal electrode and external electrode) has been designed and manufactured. It is a silent discharge type ozonizer for which the AC high frequency voltages applied to the central electrode within vacuum discharge tube and the internal electrode for which the external electrode is a ground. Ozone is generated by silent discharge in discharge gap. At the moment, discharge characteristics and ozone generation characteristics were investigated in accordance with vacuum of discharge tube, frequency of AC power source, discharge power of ozonizer, and quantity of supplied oxygen gas. In consequence, ozone characteristics proportional to vacuum of discharge tube and frequency of AC power source. The maximum value of ozone can be obtained 7,700[ppm], 460[mg/h] and 70[g/kwh].

Key Words : Silent Discharge Type Ozonizer, High Frequency, Vacuum

* 주저자 : 영남대학교 전기공학과 전문위원
Tel : 053-810-4446, Fax : 053-810-4629
E-mail : song3288@yu.ac.kr
접수일자 : 2005년 9월 15일
1차심사 : 2005년 9월 23일
심사완료 : 2005년 9월 30일

1. 서 론

세계적으로 첨단 산업화에 따른 고도성장과 함께
환경 및 인체에 심각한 영향을 미치고 있는 환경오염

방지대책 기술에 대한 관심과 발전이 요구되고 있다.

특히 산성비, 온실효과 의한 지구온난화, 오존층 파괴를 유발하는 대기오염과 수질오염 등 생태계 파괴에 의한 환경대책기술에 관심이 고조되어 무성방전(silent discharge)과 같은 방전 플라즈마를 이용한 환경대책 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2].

1857년 독일의 Werner Von Siemens에 의하여 무성방전형 오존발생기가 최초로 개발된 이래 현재 까지도 오존의 강력한 산화력을 이용하여 환경오염 방지 및 개선을 위한 실용의 오존발생기로서 많이 사용되고 있다[1,3].

무성방전형 오존발생기는 1~3[mm]의 간극이 존재하는 대향전극 사이에 유리, 세라믹과 같은 유전체를 삽입하고 간극에 원료가스(산소 또는 공기)를 통과 시키면서 전극에 고전압을 인가하면 방전시 저온 플라즈마가 형성되어 전자와 원료가스 분자와의 충돌 반응에 의하여 오존이 생성되는 구조이다[3,4].

그러나 실용의 무성방전형 오존발생기는 원료가스가 산소 및 공기인 경우, 오존생성수율이 각각 220 및 90[g/kwh]정도로써 열화학반응식을 이용한 이론적인 오존생성수율 1,200[g/kwh]보다 대단히 낮기 때문에 오존생성수율의 향상이 필요한 실정이다[5].

이에 미국과 일본을 비롯한 선진국을 중심으로 오존생성수율을 향상시키기 위하여 혼합 원료가스를 사용한 무성방전형 오존발생기, 무성방전과 연면방전을 중첩한 복합방전형 오존발생기 등 소형이면서 고농도·고수율을 얻을 수 있는 오존발생기에 관한 연구를 진행하고 있다[6,7].

특히 무성방전형 오존발생기의 특성을 향상시키기 위해서는 오존이 생성되는 방전공간에 영향을 미치는 원료가스의 종류, 온도, 습도, 주파수, 전극간의 거리, 전극재료, 전류 및 소비전력 등의 제인자에 관한 연구를 통한 오존생성특성 연구가 필연적이라 할 수 있다[8,9,10].

본 논문에서는 주파수와 진공도를 가변가능한 무성방전형 오존발생기(Silent Discharge type Ozonizer, 이하 SDO)를 설계·제작하였다. SDO는 3개의 전극(중심전극(이하 전극 CE), 내부전극(이하 전극 IE) 및 외부전극(이하 전극 EE))과 1개의 방전간극(전극 IE와 전극 EE 사이의 방전간극)으로 구성되었

다. 진공도를 가변가능한 방전관내에 장착한 중심전극과 내부전극에 2개의 교류 고주파 고전압을 각각 인가하고 외부전극을 공통접지함으로써 방전간극에서 발생하는 무성방전에 의하여 오존이 생성되는 구조이다. 이때 방전관의 진공도, 전원장치의 주파수, 방전전력 및 산소원료가스 유량 변화에 따른 방전특성과 오존생성특성을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

그림 1은 2개의 유전체와 3개의 전극으로 설계·제작된 SDO의 단면도를 나타낸 것이다.

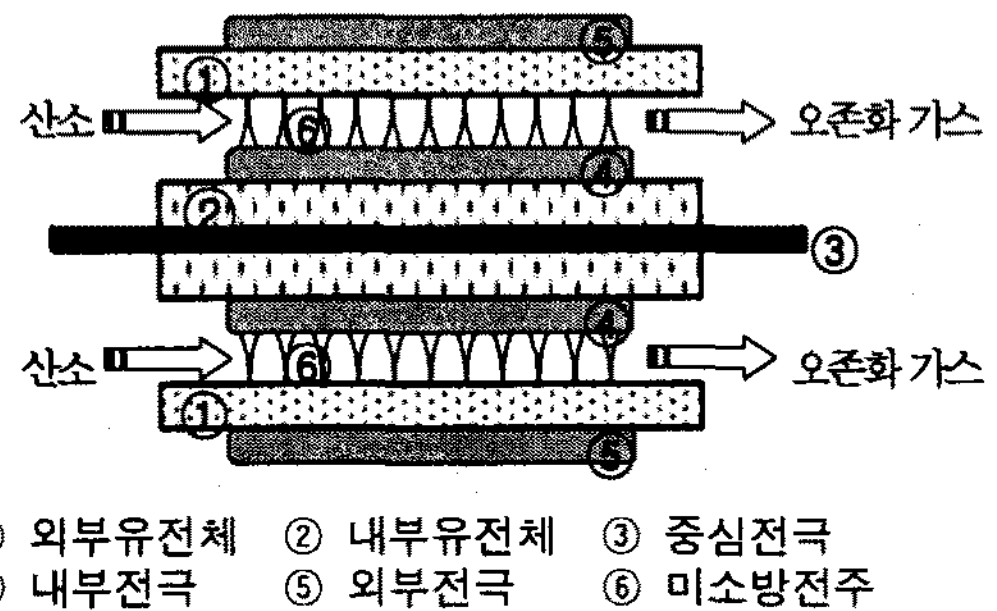


그림 1. SDO의 단면도
Fig. 1. The cross-sectional view of SDO

본 논문에서 사용된 방전관은 내부유전체로 사용된 원통형의 석영유리관(비유전율 : 3.8, 두께 : 1.1[mm], 외경 : 12.9[mm]) 내부에 중심전극(재질 : 텅스텐, 두께 : 1.0[mm], 길이 : 180[mm])을 장착한 후, 내부유전체의 내부를 진공도 0.1 및 760[Torr]로 변화시켰다. 이때 내부유전체인 석영유리관 외부에 감긴 내부전극은 두께가 0.5[mm]인 텅스텐 선을 3[mm] 간격으로 길이 130[mm] 범위 내에서 나선형으로 30회 감아 장착하였다. 외부유전체로는 pyrex glass관(비유전율 : 4.5, 외경 : 18.0[mm], 두께 : 2.0[mm], 길이 : 160[mm])을 사용하였으며, 외부유전체의 외부에 접지측인 외부전극(재질 : Cu 테이프)을 장착하여 오존발생기를 구성하였다.

그림 1과 같이 외부유전체와 내부유전체 사이에 구성되는 방전 간극은 0.5[mm]로 고정되어 있으며, 전극 CE와 전극 IE에 각각 교류 고주파 고전압이 인가되면, 전극 CE-전극 EE 및 전극 IE-전극 EE 사이

에 각각 발생된 무성방전이 방전 간극에서 발생되면서 오존을 생성하게 된다.

따라서 본 논문에서 설계 제작한 SDO는 2개의 고압측 전극(전극 CE 및 전극 IE)에 교류 고주파 고전압을 동시에 인가하여 각각 발생된 무성방전이 동일한 방전 공간내에서 중첩됨으로써 오존이 분해되는 비방전 구간이 단축되어 오존생성수율을 향상시킬 수 있는 구조이다.

그림 2는 오존발생기, 원료가스 공급장치, 전원장치, 계측장치 및 내부유전체를 배기시킬 수 있는 진공펌프 등으로 오존발생장치를 구성하여 방전특성 및 오존생성특성을 연구하기 위한 오존발생 시스템의 배치도를 나타낸 것이다.

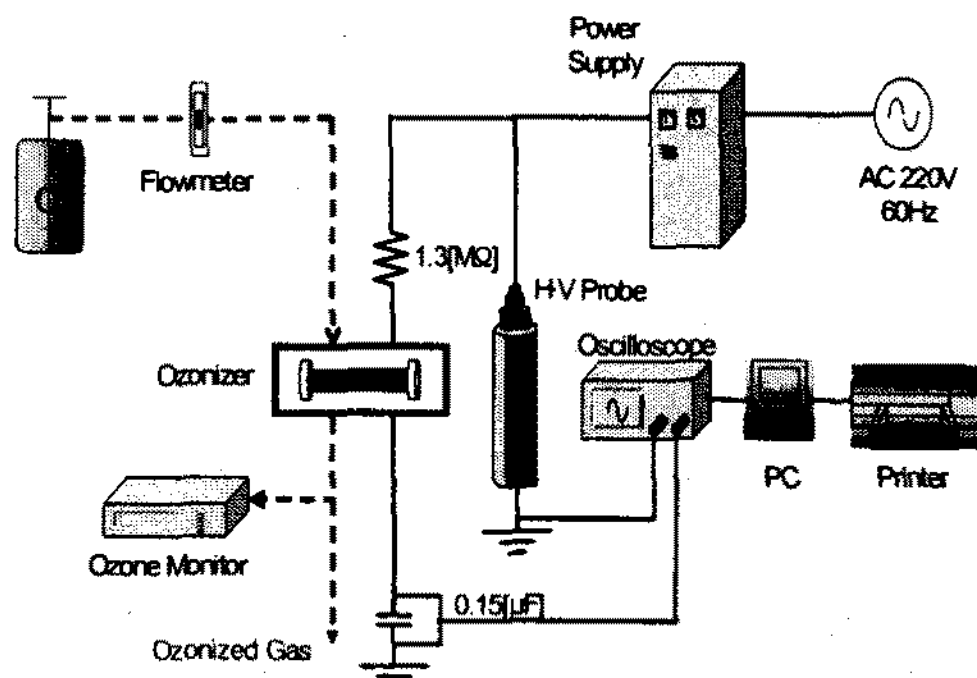


그림 2. SDO를 이용한 실험장치의 배치도
Fig. 2. The arrangement diagram of experimental apparatus using SDO

그림에서 실선은 오존발생기의 방전특성을 조사하기 위한 전원장치와 계측장치들을 연결한 회로이며, 점선은 오존발생기의 오존생성특성을 연구하기 위한 원료가스 공급 장치 및 계측장치들을 흐르는 산소 및 오존화 가스의 흐름을 나타내는 가스 흐름 선도이다. 그림 2에서 O₂ 챔버로부터 유출되는 원료가스인 상업용 산소(순도 : 99.99%, 온도 20±2[°C])의 유량을 Flowmeter(0~10[l/min])를 사용하여 조절하면서 오존발생기 내부로 유입시켰다.

또한 로타리 진공펌프(Ultimate Pressure : ~10⁻⁴[Torr])와 피라니형 진공게이지(Range : 1.3×10⁻¹[Pa]~1[atm])를 이용하여 SDO의 전극 CE가 장착된 방전관의 진공도 변화(0.1 및 760[Torr])에 따른 방전특성 및 오존생성특성을 연구하였다.

교류 전원장치(power : 300[W], Frequency : 0.5~2[kHz])의 주파수(f) 변화에 따른 방전특성과 오존생성특성을 연구검토하기 위하여 전극 CE와 IE에 인가한 전원장치의 주파수가 1.0, 1.5 및 2.0[kHz]일 때 방전전력(P) 및 오존생성특성을 연구검토하였다.

고전압 분압기(내압 50[kV], 분압비 = 2,000 : 1)와 무유도 저항(50[Ω]±0.1[%])을 이용하여 SDO로부터 출력되는 방전전압(V_d) 및 방전전류(I_d)를 digital storage oscilloscope(500[MHz], 4[Gs/s]), PC 및 프린터를 사용하여 측정 및 출력하였다.

그리고 SDO의 오존생성특성을 연구·검토하기 위하여 중심전극부의 진공도가 0.1 및 760[Torr]이고, 산소 원료가스의 유량(Q)이 0.5 및 4[l/min]일 때, f와 P 변화에 따른 오존생성농도(ozone concentration, O_{3con}), 오존생성량(ozone generation, O_{3g})과 오존생성수율(ozone yield, O_{3y})을 측정 및 계산하였다.

SDO의 P는 digital storage oscilloscope를 이용하여 방전전압(V_d)-방전전하(q) Lissajous 도형을 이용하여 측정 및 계산하였다[11].

O_{3con}은 오존발생기 내에서 발생한 오존화 가스를 매 실험마다 0.3[l/min]로 샘플링하여 자외선 흡수 방식의 기상용 ozone monitor(0~10,000[ppm])로 측정하였다.

매회 측정시 V_d, I_d, P 및 O_{3con}은 각각 5회 측정하여 그 평균치를 채택하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 방전특성

무성방전형 오존발생기의 P는 Lissajous 도형의 V_d-q 특성에 의하여 구할 수 있다[11].

교류 고전압 인가시 1주기의 순시전력을 p₁라고 정의하면, p₁은 부하에 가해진 전압 V_g(t)와 콘덴서에 흐르는 전류 I(t)의 곱으로 주어지므로 P는 식(1)로 구할 수 있다.

$$P = \frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=T} p_1 dt = \frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=T} V_g(t) \cdot I(t) dt \quad (1)$$

이때 1주기 에너지 W 는 식 (2)로 주어진다. 여기서, C_s 는 콘덴서 용량, V_c 는 콘덴서 양단의 전압이다.

$$W = \int_{t=0}^{t=T} V_g(t) \cdot C_s dV_c$$

$$= \int_{t=0}^{t=T} V_g(t) \cdot dq(t) \quad (2)$$

식 (2)에서 $C_s dv_c = dq(t)$ 이므로 W 는 Lissajous 도형의 V_d - q 궤적의 면적과 동일하므로 1주기 동안의 P 는 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$P = \frac{W}{T} = W \times f \quad (3)$$

그림 3과 그림 4는 진공방전관의 진공도가 각각 0.1 및 760[Torr] 인 경우, f 가 1.0[kHz]이고 Q 가 0.5 [ℓ /min]일 때, V_d 의 변화에 따른 P 를 Lissajous 도형으로 나타낸 것이다.

그림에서 Lissajous 도형의 X축(CH1)은 V_d , Y축(CH2)은 V_c 를 나타낸 것이다.

그림과 같이 V_d 가 증가할수록 SDO의 무성방전이 활성화되면서 원료가스내에 포함된 산소분자가 방전공간 내부에서 무성방전에 의하여 발생된 미소 방전주에 의하여 가속된 전자와의 충돌확률이 높아지면서 P 가 증가하는 것으로 나타났다.

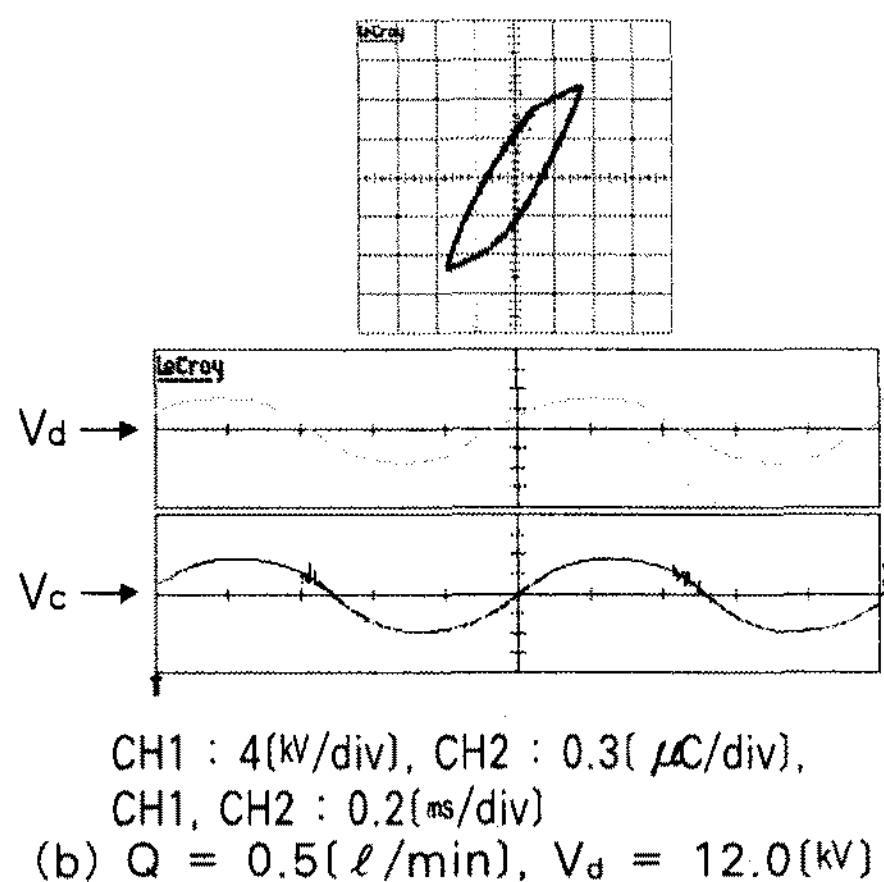
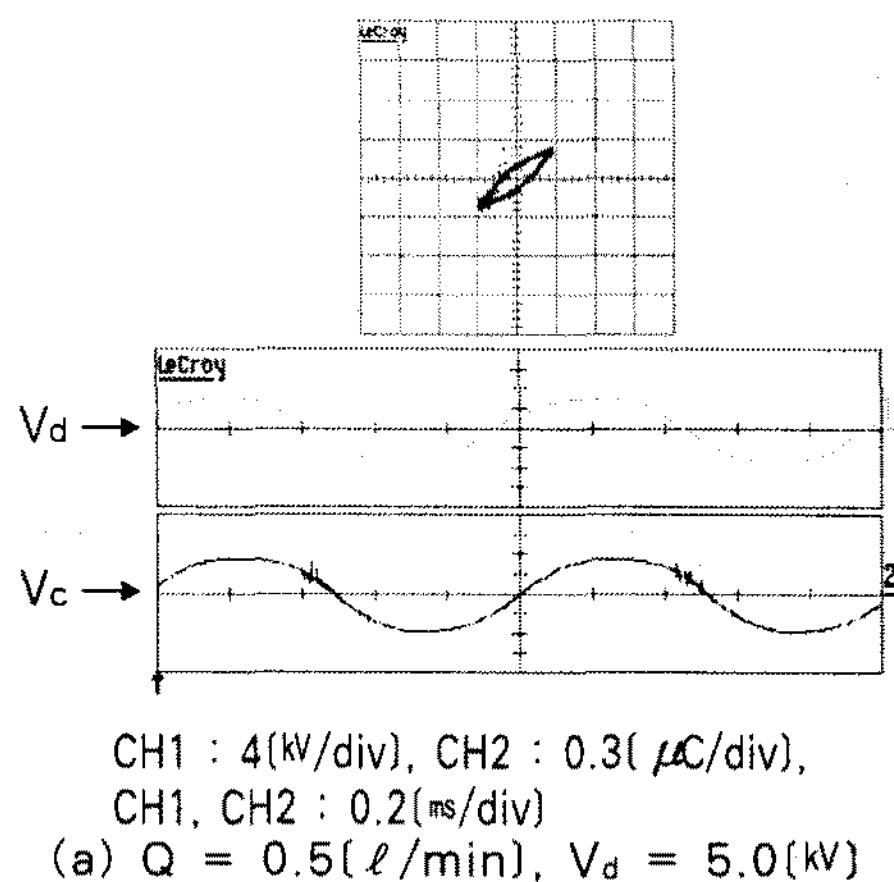


그림 3. 진공도 0.1(Torr)일 때, Q 와 V_d 의 변화에 따른 Lissajous 도형
Fig. 3. Lissajous figures in accordance with variation of Q and V_d at vacuum 0.1(Torr)

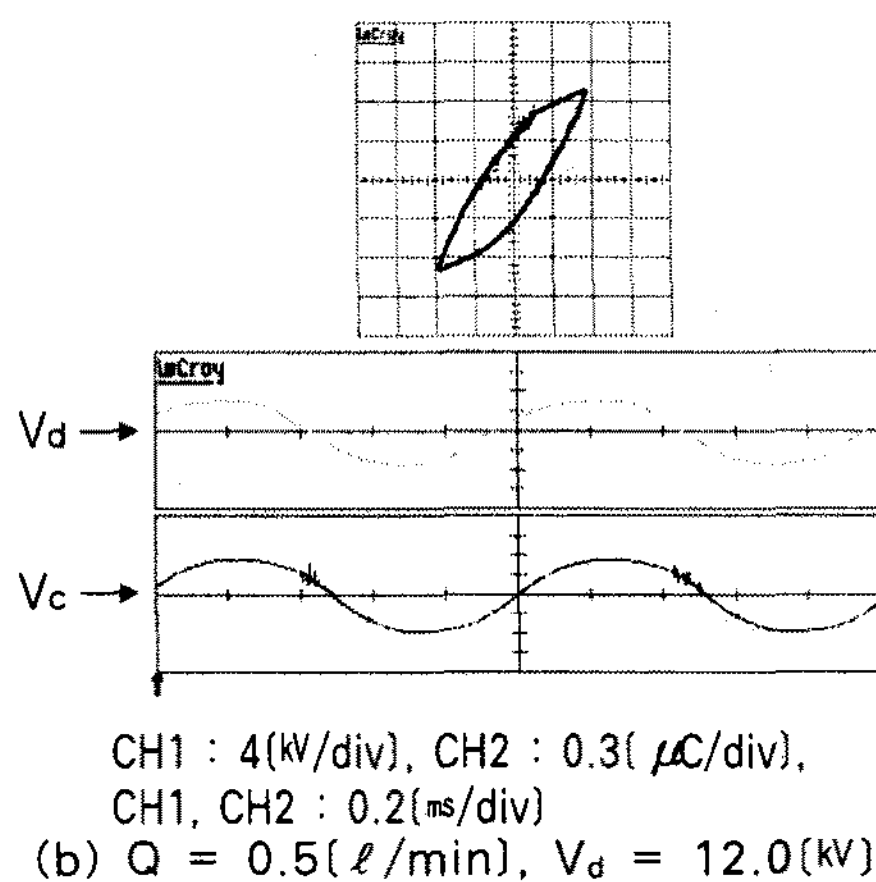
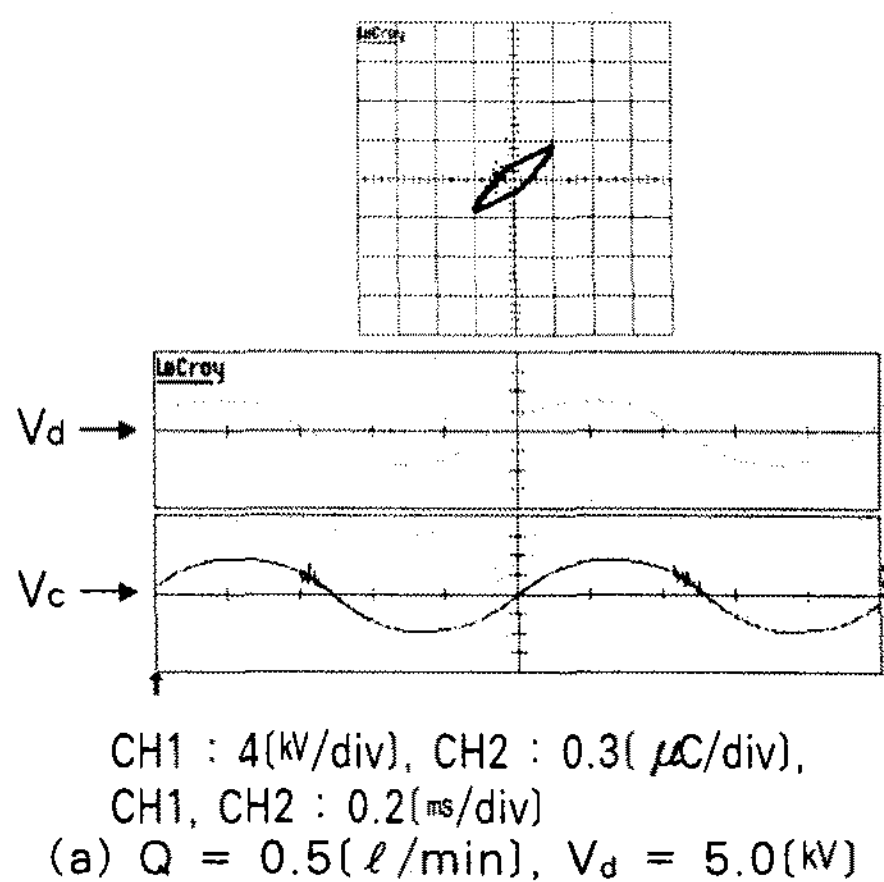
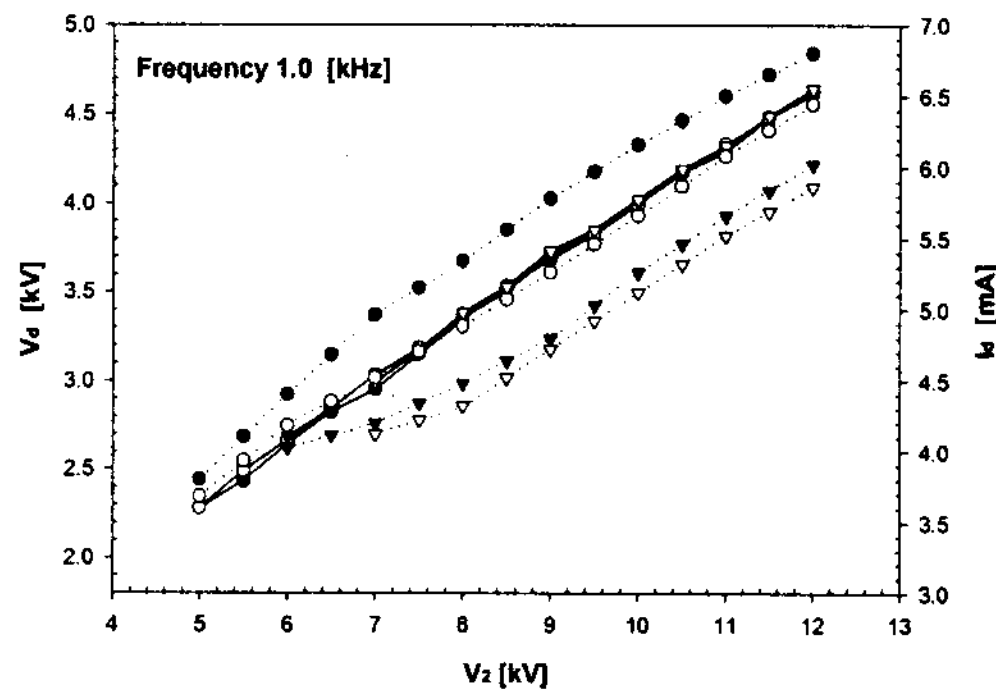


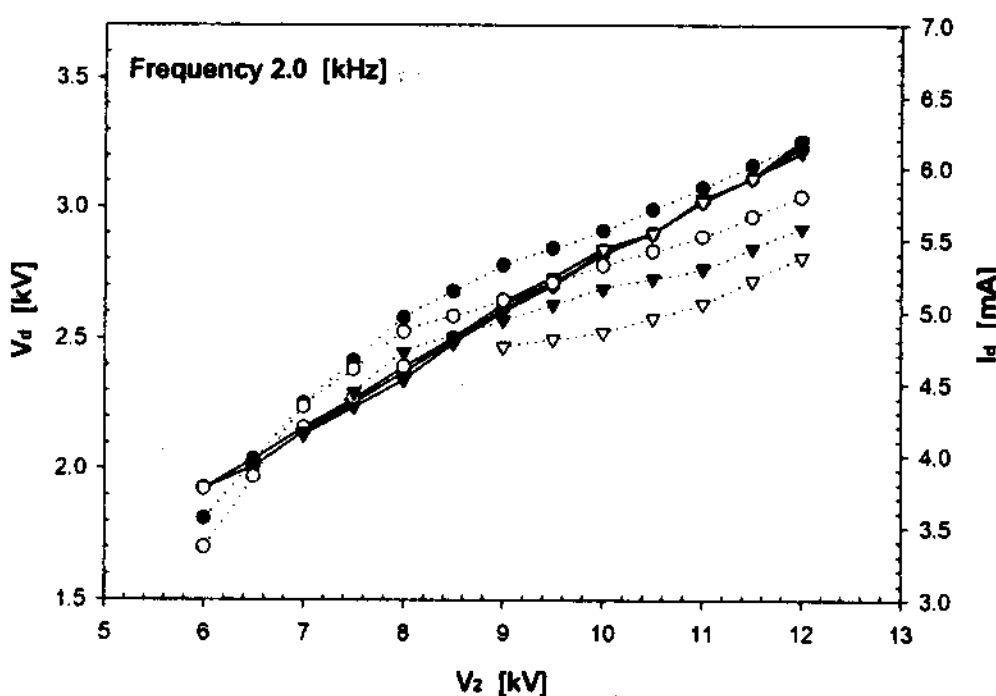
그림 4. 진공도 760(Torr)일 때, Q 와 V_d 의 변화에 따른 Lissajous 도형
Fig. 4. Lissajous figures in accordance with variation of Q and V_d at vacuum 760(Torr)

그림 5와 그림 6은 SDO의 진공도가 각각 0.1 및 760[Torr]인 경우, f 가 1 및 2[kHz]일 때 전원장치의 출력전압(V_2) 및 Q 의 변화에 따른 V_d 및 I_d 특성을 나타낸 것이다.

그림과 같이 V_2 가 증가함에 따라서 오존발생기의 방전 공간 내부의 전력밀도 증가에 따라서 V_d 및 I_d 가 상승하는 것으로 나타났다. 이것은 전극 CE와 IE에 각각 인가되는 고주파 교류 고전압에 의하여 V_2 가 증가됨에 따라 SDO의 방전간극에는 무성방전에 의한 방전면적이 확대되면서 V_d 및 I_d 가 상승하는 것이다.



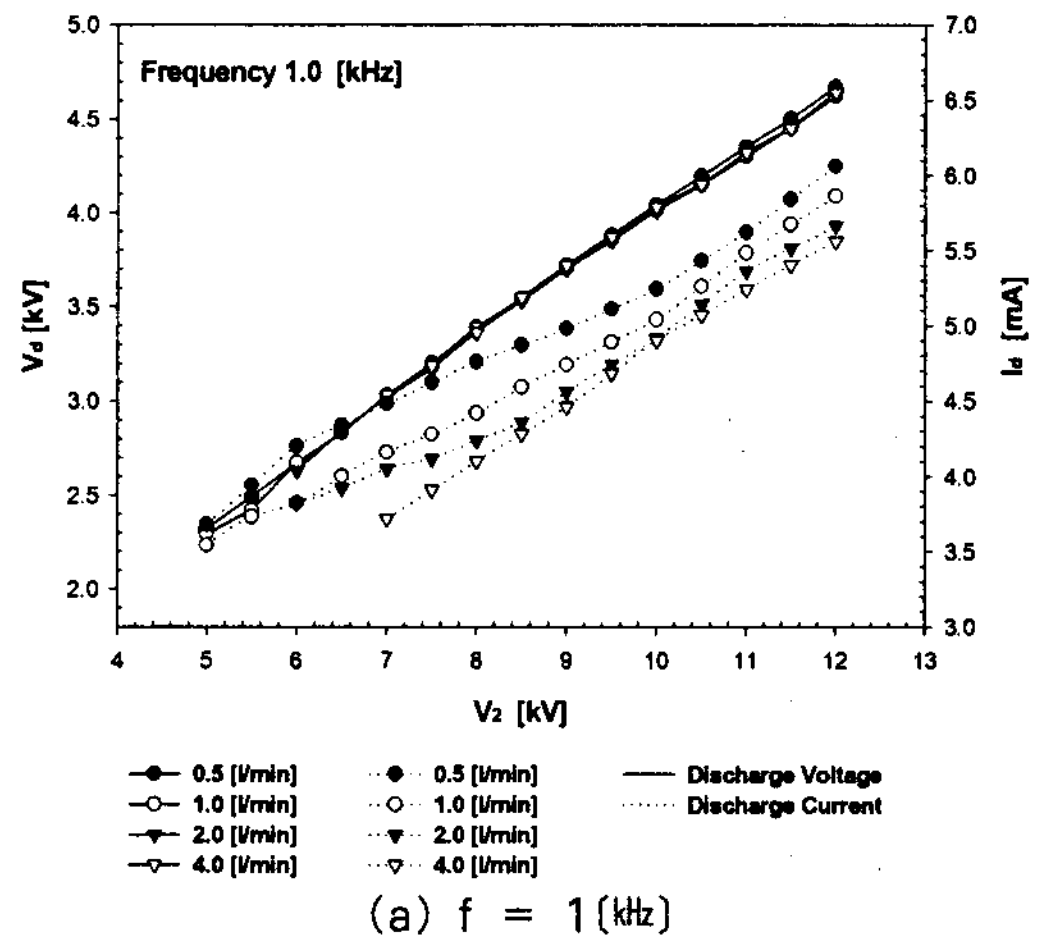
(a) $f = 1$ (kHz)



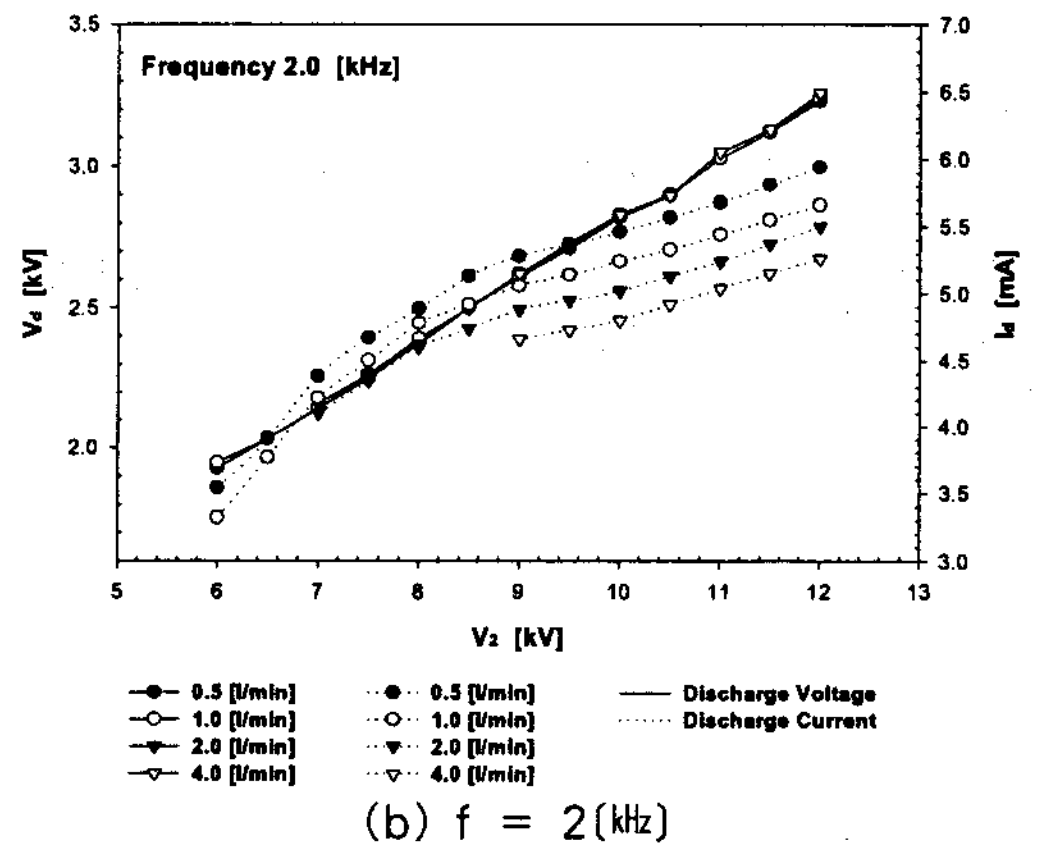
(b) $f = 2$ (kHz)

그림 5. 진공도 0.1(Torr)일 때, 주파수 변화에 따른 V_2 - V_d , I_d 특성
Fig. 5. The characteristics of V_2 - V_d , I_d with variation of frequency at vacuum 0.1(Torr)

또한 중심전극부의 진공도가 낮을수록(즉, 압력이 높을수록) 내부유전체 내부에 가스입자가 증가하게 되어 전극에서 방출된 전자의 평균자유행정이 짧아지게 되어, 전극 CE와 전극 IE 사이의 무성방전이 발생하기가 어렵게 된다. 따라서 진공도 760[Torr]의 경우는 방전개시전압이 높고, 방전 전류가 낮게 나타나게 된다.



(a) $f = 1$ (kHz)



(b) $f = 2$ (kHz)

그림 6. 진공도 760(Torr)일 때, 주파수 변화에 따른 V_2 - V_d , I_d 특성
Fig. 6. The characteristics of V_2 - V_d , I_d with variation of frequency at vacuum 760(Torr)

그리고 Q 가 낮을수록 원료가스 중에 포함된 산소 분자가 방전 공간 내에서 체류하는 시간이 길어짐에 따라서 무성방전에 의하여 생성된 전자와 원료가스

인 산소분자와의 접촉확률이 증가하게 되어 방전공간내의 산소분자의 전리확률이 높게된 결과 I_d 가 상승하는 것으로 나타났다.

3.2 오존생성특성

그림 7과 그림 8은 진공도가 0.1 및 760[Torr]인 경우, Q가 각각 0.5 및 4[l/min]일 때 f와 P의 변화에 따른 O_{3con} 및 O_{3g} 특성을 나타낸 것이다.

그림과 같이 Q가 일정한 경우, f가 낮고 P가 증가

할수록 O_{3con} 및 O_{3g} 이 상승하였다.

그 결과 진공방전관의 진공도가 0.1[Torr], Q = 0.5[l/min], P = 7.4[W]일 때, 최대 7,700[ppm] 및 460[mg/h]의 오존생성특성을 얻을 수 있었다.

오존발생기의 입력에너지가 상승함에 따라서 전극 CE와 전극 IE사이에서 발생된 무성방전의 미소방전주에 의하여 가속된 전자가 산소분자와 충돌하여 산소분자의 해리를 촉진시킨 결과이다.

또한 내부유전체의 진공도가 높아질수록 내부유전체 내부의 전자의 평균자유행정이 길어지게 되어

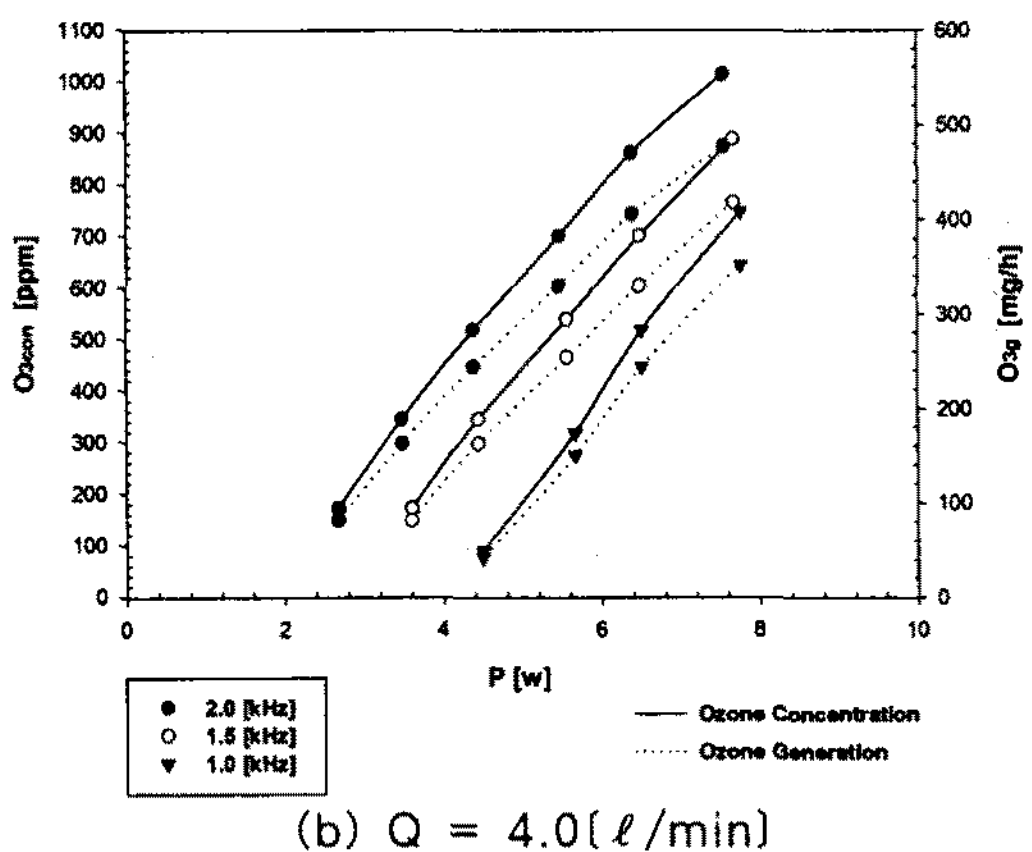
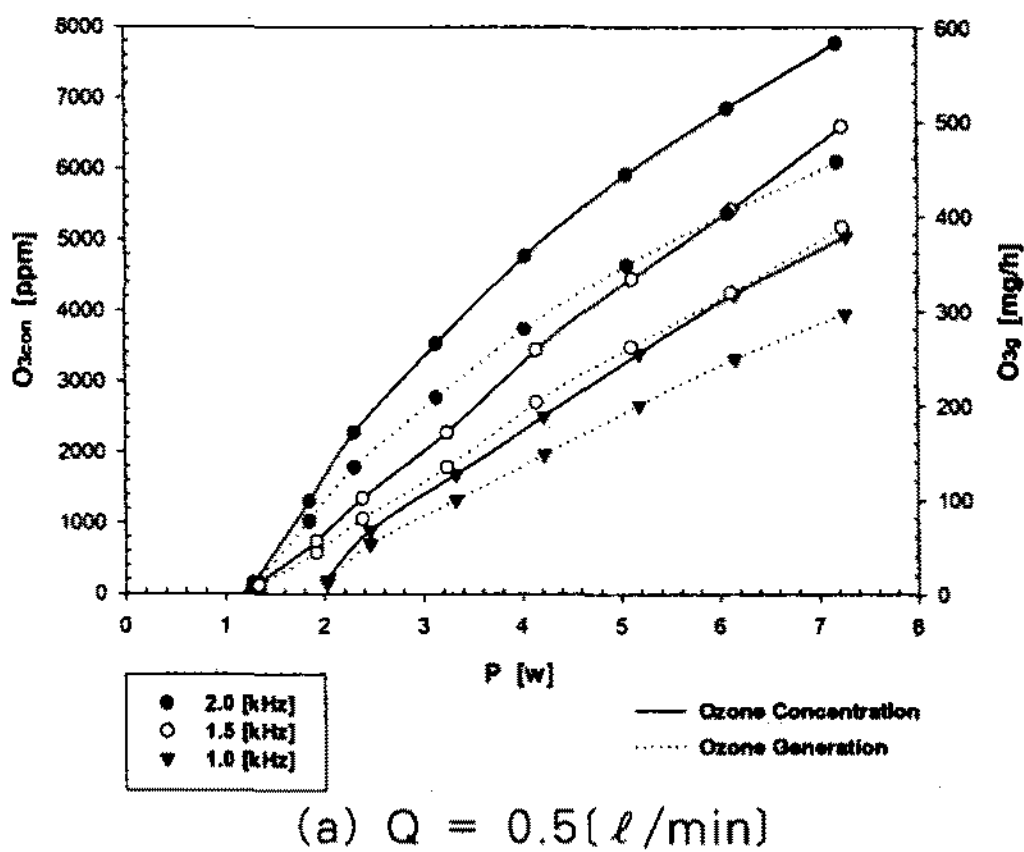


그림 7. 진공도 0.1(Torr) 일 때, P- O_{3con} , O_{3g} 특성
Fig. 7. The characteristics of P- O_{3con} , O_{3g} at vacuum 0.1(Torr)

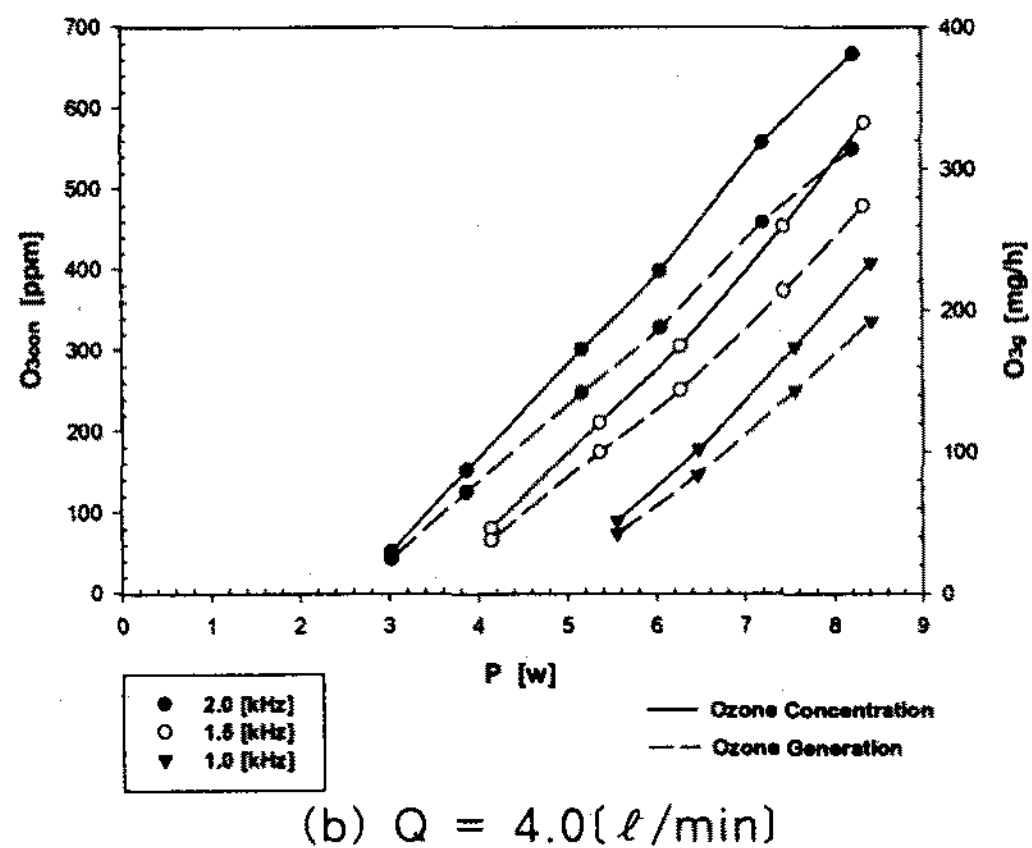
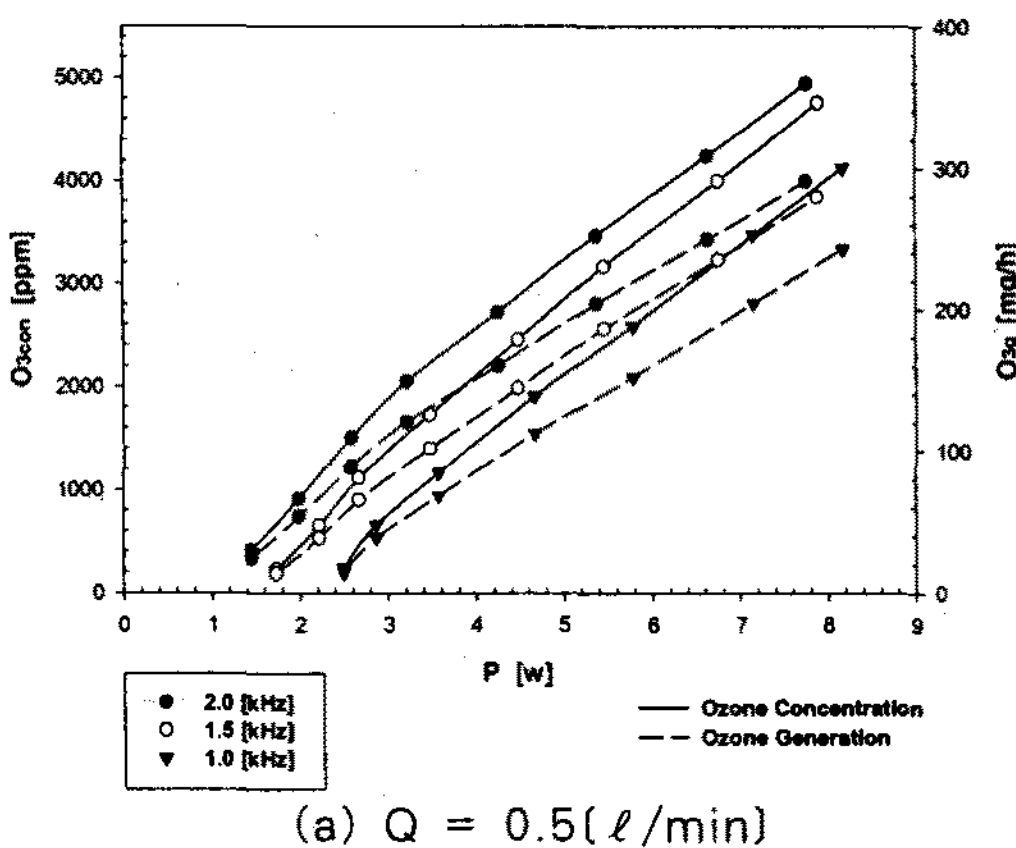


그림 8. 진공도 760(Torr) 일 때, P- O_{3con} , O_{3g} 특성
Fig. 8. The characteristics of P- O_{3con} , O_{3g} at vacuum 760(Torr)

내부유전체 전체가 하나의 전극으로 대전되는 효과를 가지게 된다. 따라서 전극의 면적이 넓어지는 효과를 가지므로 방전 공간 내부에서 발생하는 무성방전이 상대적으로 활성화되어 방전공간에서의 전리 확률이 상승하게 되어 O_{3con} 가 상승하게 된다.

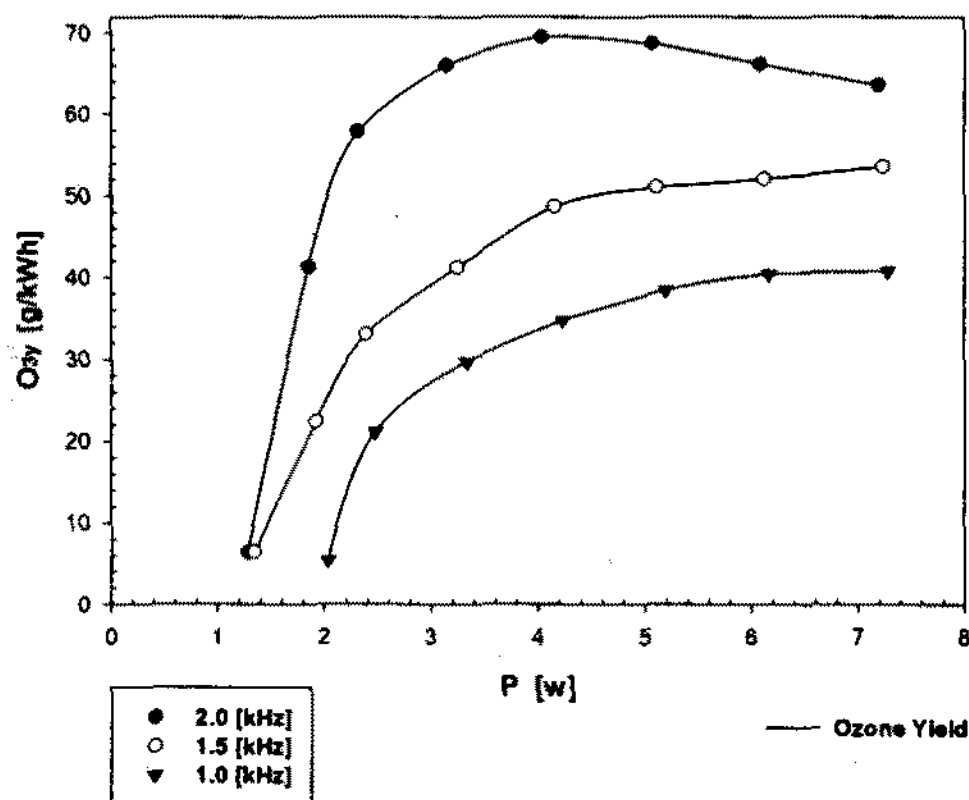
Q가 감소할수록 중첩 무성방전에 의해 가속된 전자와 원료가스중에 포함된 산소분자와의 충돌횟수가 증대되면서 오존을 생성하는 확률이 증대된 결과 O_{3con} 는 증가하게 된다. O_{3g} 은 원료가스의 유량과 O_{3con} 에만 관여함에 따라서 O_{3con} 증가에 따라 상승하

는 것으로 나타났다.

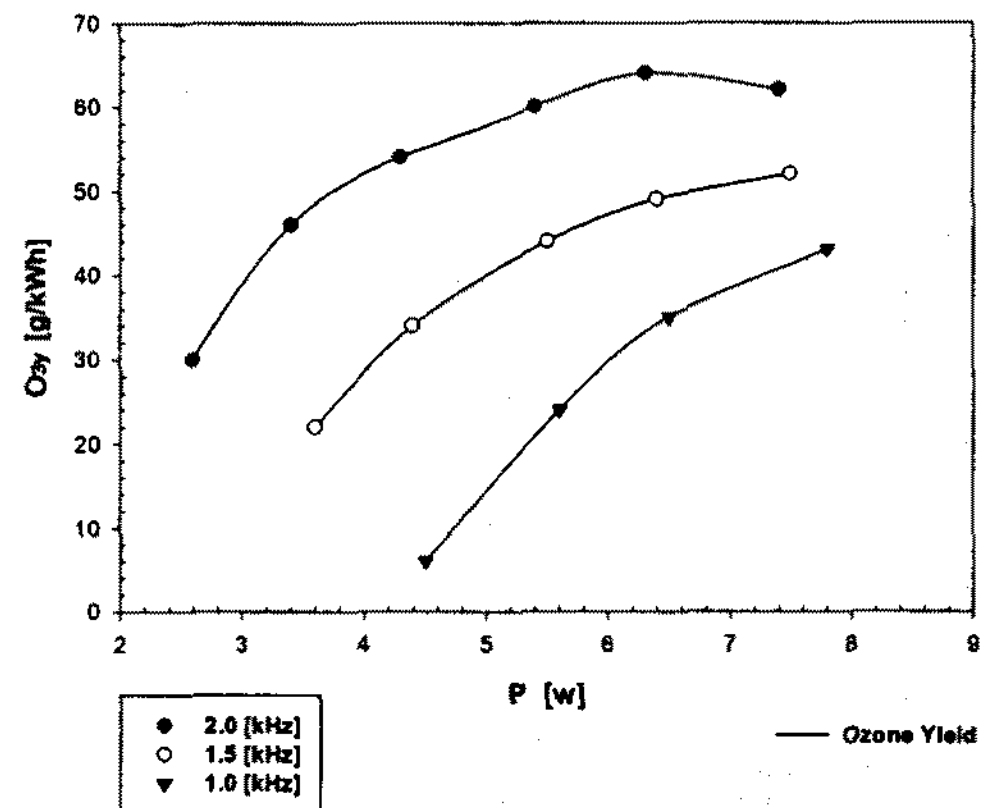
또한 f가 높을수록 O_{3con} 과 O_{3g} 이 상승하는 것으로 나타났다.

이것은 f가 높을수록 방전간극의 전력밀도 상승에 따라 SDO의 무성방전에 의하여 생성된 전자와 산소 원료가스중에 포함된 산소분자의 충돌 반응에 의한 오존생성반응이 생성된 오존의 분해작용보다 활발하게 진행된 결과 O_{3con} 과 O_{3g} 가 높아지게 되는 것이다.

그림 9와 그림 10은 SDO 방전관의 진공도가 각각

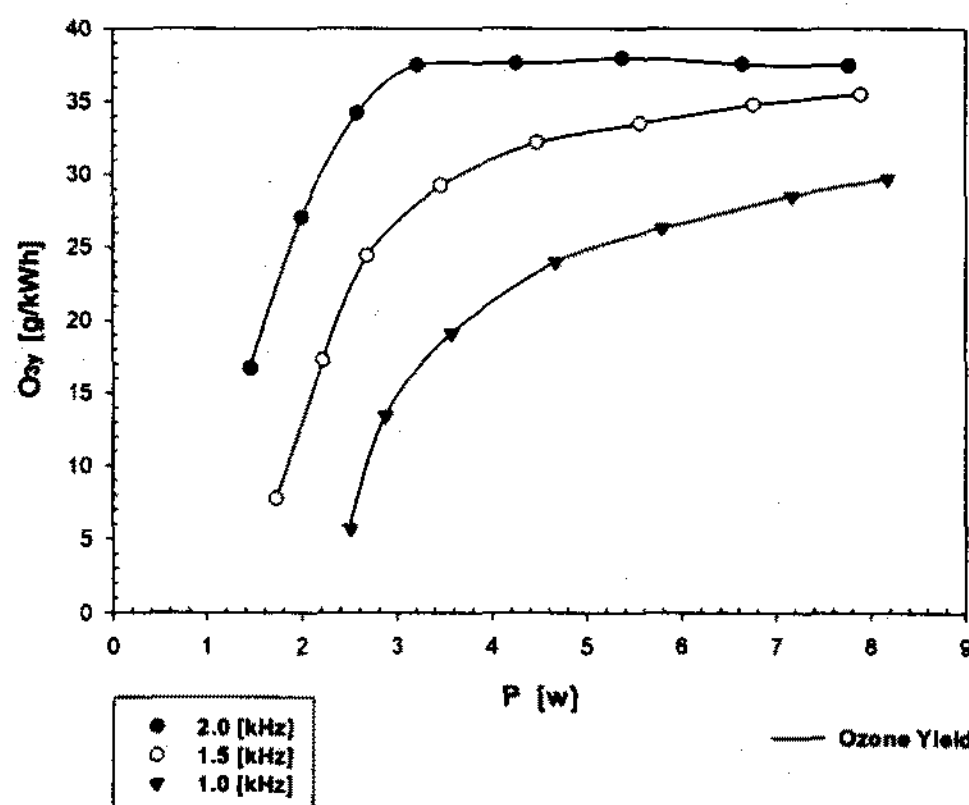


(a) Q = 0.5 (l/min)

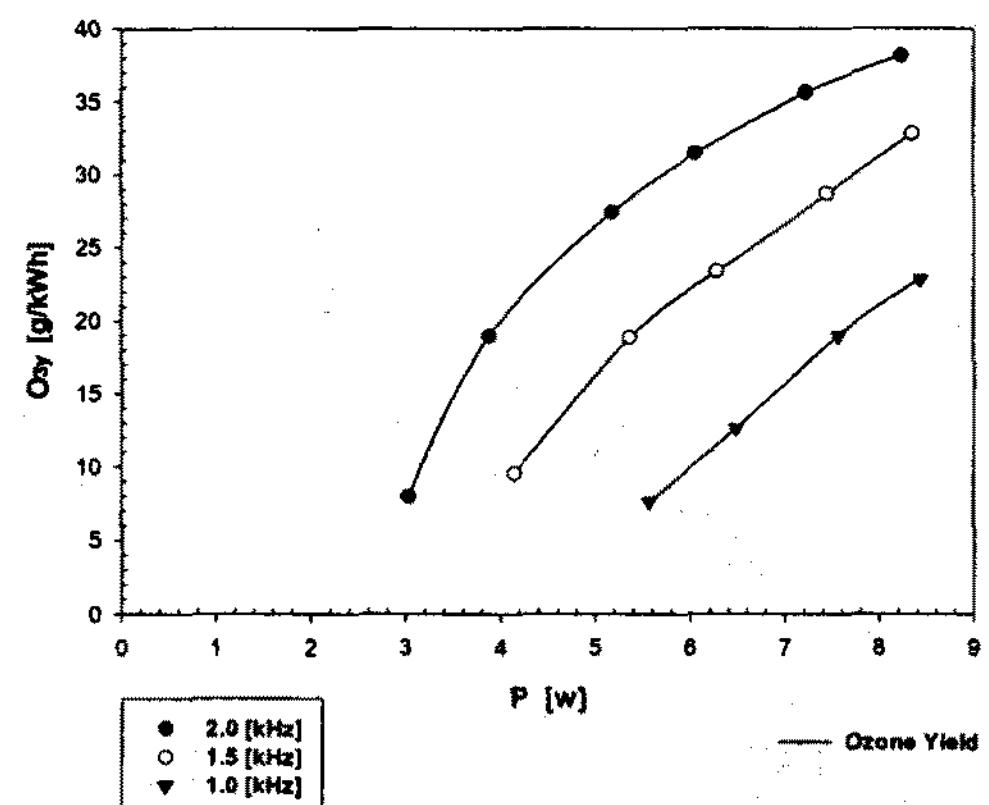


(b) Q = 4.0 (l/min)

그림 9. 진공도 0.1(Torr) 일 때, P-O_{3y} 특성
Fig. 9. The characteristics of P-O_{3y} at vacuum 0.1(Torr)



(a) Q = 0.5 (l/min)



(b) Q = 4.0 (l/min)

그림 10. 진공도 760(Torr) 일 때, P-O_{3y} 특성
Fig. 10. The characteristics of P-O_{3y} at vacuum 760(Torr)

0.1 및 760[Torr] 인 경우, Q가 0.5 및 4[ℓ/min]일 때 f와 P에 따른 O_{3y} 특성을 나타낸 것이다.

그림과 같이 f가 높을수록 O_{3y}가 상승하였으며, Q가 0.5[ℓ/min]인 경우는 P가 증가할수록 O_{3y}는 상승하다가 서서히 포화되지만, Q가 4[ℓ/min]인 경우는 P에 비례하여 상승하였다.

그 결과 진공방전관의 진공도가 0.1[Torr], Q=0.5[ℓ/min], P = 4.0[W]일 때, 최대 70[g/kwh]의 O_{3y}를 얻었다.

또한 O_{3g}와 1/P의 積으로 주어지는 O_{3y}는 f가 높을수록 방전공간의 높은 전력밀도에 의한 가속된 전자와 원료가스중에 포함된 산소분자와의 충돌횟수가 증대되면서 O_{3y}가 저하되는 것이다.

그리고 P가 낮을 때는 방전공간내의 전력밀도에 의한 오존의 생성비율이 오존의 분해반응보다 상대적으로 높게 되어 O_{3y}의 상승비율이 높지만, P가 높게 되면 P가 증가하는 비율과 높은 전력밀도로 인한 오존의 분해반응 때문에 O_{3y}의 상승비율이 둔화되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 3개의 방전전극과 1개의 방전간극이 장착한 무성방전형 오존발생기를 설계·제작하였다. 이때 전원장치의 주파수와 전극부의 진공도에 따른 방전특성 및 오존생성특성을 연구검토하였다.

1) 오존발생기의 입력전압이 증가할수록 무성방전이 활성화되면서 방전전류 및 Lissajous 도형에 의한 방전전력이 증가하였다.

2) 전극부의 진공도와 교류 전원장치의 주파수가 높을수록 방전전류가 상승하는 것으로 나타났다.

3) 전극부의 진공도와 교류 전원장치의 주파수가 높을수록 오존생성농도, 오존발생량 및 오존생성수율이 상승하였다.

4) 설계 제작한 무성방전형 오존발생기는 최대 7,700[ppm], 460[mg/h] 및 70[g/kwh]의 오존을 얻을 수 있었다.

이상과 같이 전원장치의 주파수와 전극부의 진공도를 이용하여 무성방전형 오존발생기의 오존생성특성을 상승 효과를 얻을 수 있었다.

추후, 전극부의 냉각장치 및 원료가스의 냉각을 통하여 무성방전형 오존발생기 방전공간의 높은 전력밀도에 의한 온도상승을 제어하면 오존생성특성을 더욱 향상시켜 수질환경개선 분야를 비롯한 오존을 활용한 다양한 분야로의 적용이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] 杉光英後, “오존의基礎と應用”, 光琳, 1996.
- [2] 米内伸一, “新版오존利用의新技術”, 三琇書房, 1993.
- [3] 石井啓夫, “오존利用의新技術”, 三琇書房, pp.152~153, 1991.
- [4] Kwang-Sik Lee, “Ozone Generation & Their applications by Gaseous Discharge”, KIEE, Proceedings of ED&HVE, pp.32~35, 1992.
- [5] Hyun-Jig et al, “Development of Ozone Generation Technology using Gaseous Electrical Discharge for Environment Improvement”, KIEE, Vol.15, No.3, pp.25~34, 2001.
- [6] Hyun-Jig Song et al, “The Characteristics of Ozone Generation in Superposed Discharge type Ozonizer”, Proceedings of 1998 Korea-Japan Joint symposium on ED and HVE, pp.99~102, 1998.
- [7] Kwang-Sik Lee et al, “A study on the high voltage nozzle type ozonizer”, Proceedings of the 11th International Conference on Gas Discharges and Their Applications, Vol.2, pp.320~323, 1995.
- [8] Hyun-Jig Song et al, “Improvement of Ozone Yield by a Multi-Discharge Type Ozonizer using Superposition of Silent Discharge Plasma”, JKPS, Vol.44, No.5, pp.1182~1188, 2004.
- [9] Hyun-Jig Song, “The Characteristics of a Superposed Discharge Type Ozonizer with Variation of Mesh in Internal Electrode”, KIEE, Vol.19, No.5, pp.87~93, 2005.
- [10] Hyun-Jig Song et al, “The Characteristics of a Superposed Discharge Type Ozonizer using Vacuum Discharge Tube”, KIEE, Vol.19, No.5, pp.60~67, 2005.
- [11] Kwang-Sik Lee et al, “The Basic of Energy Engineering”, Bookshill, pp.288~388, 2005.

◇ 저자소개 ◇

송현직 (宋炫直)

1968년 7월 30일생. 1991년 영남대학교 전기공학과 졸업(학사). 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001~2004년 구미1대학 컴퓨터응용전기전공 전임강사. 본 학회 평의원. 현재 영남대학교 전기공학과 전문위원.