

## 오존발생기의 특성 연구 및 모니터링 시스템 구축

金容徹, 金奎植\*, 崔宙燁

A Study on the Characteristics of Ozonizers  
and Implementation of a Monitoring System

Yong-Cheol Kim, Gyu-Sik Kim, and Ju-Yeop Choi

## 요 약

오존의 산화력은 상용의 산화제중에서 가장 강력하고 따라서 수처리에서 염소를 대체해 가고 있다. 또한, 수처리 시 효율적인 에너지절감을 위해서도 고농도의 오존이 요구되고 무성방전 오존발생기가 산업체에서 효과적이고 가장 널리 사용된다. 본 연구에서 오존방전전압, 주파수, 오존방전관 내의 온도등이 오존발생율을 결정짓는 주요한 변수임을 확인하였다. 이들 변수들을 효과적으로 제어하기 위해 그래픽사용자 인터페이스를 갖는 모니터링 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 윈도우 98에서 C++ 과 LabView로 프로그램 하였다.

## ABSTRACT

The oxidizing power of ozone is the greatest of all commercially available oxidizers and thus ozone is taking the place of chlorine for water treatment. For energy-effective treatment of water, ozone should be generated in high concentration. A silent glow discharge ozonizer is high effective in industrial aspect and thus is the most widely used. We found that the key parameters associated with the ozone generation rate are the driving voltage of the discharger, the discharge rate and the temperature of the ozone generation tube. For an easy control of these parameters, we build a monitoring system with graphical user interface. This system is based on Windows-98 PC, programmed with C++ and LabView.

**Key Words** : ozone, discharge rate, ozone generation tube, monitoring system

## 1. 서 론

오존(O<sub>3</sub>)은 산소(O)원자 3개가 결합된 분자로서 분자량 48, 융점 251.5°C, 비중 1.7, 결합각도는 116.8°, O-O결합거리는 1.278Å이며, 수중 용해상태에서는 4개

의 공명구조를 기체상태로는 담청색, 액체는 흑청색, 고체는 암자색을 나타내는 특성을 가지고 있다. 오존을 발생시키기 위한 방법에는 여러 가지가 있으며 대표적인 방법으로는 자외선식, 전기분해식, 고압무성방전식 등이 있으며 공업용으로 효율이 우수하고 경제적인 방법은 고압 무성방전식이다. 오존 발생량은 전압과 주파수에 의해 동력밀도를 변화시켜 제어하는데 상용주파수(50/60Hz)의 고전압(14KV이상)을 인가하는 방식과 이보다 두세배 이상의 오존을 발생하는 중주파수(500Hz이상)의 저전압(10KV이하)을 인가하는 방식으로 나뉜다<sup>[1,2]</sup>. 고순도의 알루미늄 세라믹을 유전체로

\*서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수

E-mail : gskim318@chollian.net

접수일자 : 2001. 7.30

1차심사요청일 : 2001. 8.21

심사완료일 : 2001. 9.13

이용한 오존발생기의 특성을 연구한 논문<sup>[3]</sup> 과 무성방전과 표면방전의 이중구조를 갖는 방전기에 관한 연구<sup>[4]</sup> 도 있었다. 그 외에도 효율적인 오존발생을 위한 많은 연구들이 있었다<sup>[5,6]</sup>.

본 논문에서는 오존방전전압, 주파수, 오존방전관 내의 온도등이 오존발생율을 결정짓는 주요한 변수임을 확인하였다. 또한, 이들 변수들을 효과적으로 제어하기 위해 그래픽사용자 인터페이스를 갖는 모니터링 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 윈도우 98에서 C++ 과 LabView<sup>[7]</sup> 로 프로그램하였다.

## 2. 오존발생기의 특성분석

유전체를 삽입시켜서 일어나는 교류방전(무성방전)의 경우, 전압원을 사용하면 전압원의 상승에 의하여 공간전압이 방전개시전압  $V_s$  에 이르면 방전이 일어난다. 또한 공간전압이 방전소멸전압  $V_e$  에 이르면 방전이 중지된다. 전원전압의 상승에 의해서 다시 공간전압이  $V_s$  에 이르면 방전을 되풀이한다. 한편, 방전면적이 클 때는 전체방전면적이 한번에 방전하느냐 혹은 부분적으로 시간차를 갖고 방전하느냐 하는 정도의 차이는 있으나 전압원에서는 어느 경우에도 임펄스방전이 된다. 전류원을 사용하면 전체방전면적이 동시에 방전하는 경우와 부분적으로 시간차를 갖고 방전하는 경우가 양상이 다르다. 전체방전면적이 동시에 방전하면 전원특성에 의하여 전류가 일정한 값으로 제어되기 때문에 공간전압이 방전소멸전압  $V_e$  에 도달할 정도의 급격한 전하축적이 유전체표면에 일어나지 않기 때문에 정상적인 방전이 지속하게 된다. 이때 공간전압은 방전유지전압  $V_d$  를 유지한다. 방전면이 부분적인 시간차를 갖고 방전하면 전류가 일정하게 제어되어 있어도 미소방전부에서는 임펄스방전도 가능하다. 전방전면(全放電面)이 동시에 방전하느냐 부분적으로 시간차를 갖고 방전하느냐는 공간의 길이, 기체압력, 유전체의 표면상태등에 의하여 결정된다. 따라서, 등가회로는 두가지로 나누어 생각해 본다.

첫째, 전방전면이 동시에 방전하는 경우에 그림 1에 나타난 전극의 구성에 대하여 등가회로를 생각한다.  $C_g$  와  $C_a$ 는 각각 유전체와 공간의 단위면적당의 정전용량이다. 전방전면이 동시에 방전하는 경우의 등가회로는 그림 2와 같다. 여기서 S는 전체방전면적이 된다. 공간방전이 안 일어날 때의 등가회로는  $C_gS$  와  $C_aS$  가 직렬 접속되어 있는 것으로 모델링될 수 있고 전극간의 정전용량을 C 라 하면 다음과 같다.

$$C = C_a C_g S / (C_g + C_a) \quad (1)$$

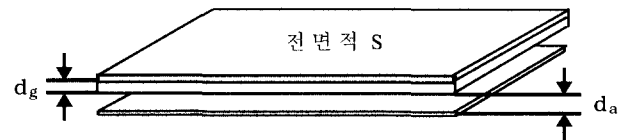
방전시는 공간전압이 방전유지전압  $V_d$  로 일정하게 유지되기 때문에 양전극간의 전압 V 는 다음과 같다.

$$V = \int_0^t (I_d / C_g S) dt + V(0) \quad (2)$$

$$dV/dt = I_d / C_g S \quad (3)$$

따라서, 방전시 전극간의 정전용량 C' 은 다음과 같다.

$$C' = C_g S \quad (4)$$



- 유전체두께 :  $d_g$                       공극두께 :  $d_a$
- 전체유전율 :  $\epsilon_g \epsilon_o$                 공극유전율 :  $\epsilon_o$
- 단위면적당 유전체의 정전용량 :  $C_g = \epsilon_g \epsilon_o / d_g$
- 단위면적당 공극의 정전용량 :  $C_a = \epsilon_o / d_a$

그림 1 무성방전전극  
Fig. 1 Electrode of a silent glow discharge

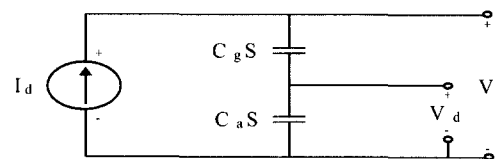


그림 2 연속방전시의 무성방전회로  
Fig. 2 Continuous silent glow discharge circuit

두 번째로, 국부적인 임펄스방전이 일어나는 경우 즉, 전체 방전면적 S 의 내부중 임의의 미소면적  $\Delta S$  에서 국부적인 임펄스방전이 일어나는 경우를 고려한다. 방전시의 등가회로를 구하기 위하여 그림 3(a)에서 공극의 전압이  $V_s$  에 도달하여 방전이 일어나서 전압이  $V_e$  까지 내려 갈 때의 양전극간의 전압 V 를 구한

다. 그림 3(a) 의 전압  $V$  는 중첩정리에 의해 그림 3(b)와 그림 3(c)도의 각각의 전압  $V_1$  과  $V_2$  의 합이 된다. 한편, 미소 방전면적  $\Delta S$  가 한번 방전하면  $V_2$  는  $\Delta V_2$  만큼 변화한다.

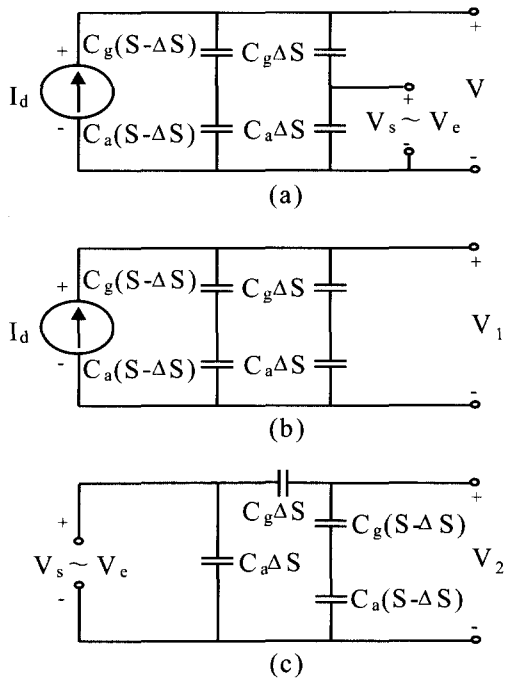


그림 3 국부적인 임펄스 방전시의 무성방전회로  
Fig. 3 Local impulse silent glow discharge circuit

$$\Delta V_2 = -\frac{C_g \Delta S}{C} (V_s - V_e) \quad (5)$$

다음에는 한번에 발생하는 방전에 의해 공극을 이동하는 전하량  $Q$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q &= C_a \Delta S (V_a - V_e) + \\ &C_g \Delta S \{ (V - V_e) - (V - V_s) \} \\ &= (C_a + C_g) \Delta S (V_s - V_e) \end{aligned} \quad (6)$$

이  $Q$ 가 전원으로부터 공급되는 시간 ( $\Delta t$ ) 동안 한번의 방전이 일어나므로,

$$\Delta t = (C_a + C_g) \Delta S (V_s - V_e) / I_d \quad (7)$$

와 같고 방전시의 등가회로는  $C_g S$  이므로 다음 식을 얻는다.

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{\Delta V_2}{\Delta t} = -\frac{I_d}{C_a S} \quad (8)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV_1}{dt} + \frac{dV_2}{dt} = \frac{I_d}{C_g S} \quad (9)$$

지금까지는 미소부분만이 국부적인 임펄스방전을 되풀이한다고 언급하였으나 전체방전이 시간차를 갖고 임펄스방전을 한다고 해도 같은 결과가 된다. 결국, 전류원에 의한 무성방전의 등가회로는 전체 방전면이 정상으로 방전하는 경우뿐만 아니라 시간차를 갖고 국부적으로 임펄스방전을 할 경우도 비방전시는  $C_g S$  와  $C_a S$  의 직렬용량으로 방전 시는  $C_g S$  와 같다. 한편, 전류형인버터에 의한 구형과전류원이 실현된 경우에 대해 알아본다. 주파수가  $f$ , 피크치전류  $I_d$  인 구형과전류가 양전극간을 흐를 때의 유기전압  $V$ 는 비방전영역 ( $0 < \theta < \theta'$ ) 에서는 다음 식 (10)과 같다.

$$V = -V_m + \frac{I_d}{\omega C} \theta \quad (10)$$

방전영역 ( $0' < \theta < \pi$ ) 에서는 다음 식 (11)과 같다.

$$V = V_m - \frac{I_d}{\omega C} (\pi - \theta) \quad (11)$$

단,  $V_m$  은 피크치 전압으로 방전시 발생한다.  $V_b$  를 전류와 극성이 반전하여 방전이 정지한 경우의 공간전압  $-V_e$  와 극성이 반전한 상태에서 방전이 시작되는 공간전압  $V_s$  의 전압변화로 정의한다면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$V_b = (1 + C_a/C_g) (V_s + V_e) \quad (12)$$

( $V_s + V_e$ ) 는 공극두께  $d_a$  및 공극에 흐르는 기체의 종류, 기체의 압력에 의해 결정되며 이 값을 파라미터  $v$  로 놓으면 다음과 같다.

$$V_s + V_e = v d_a \quad (13)$$

식 (12)와 식 (13)에서 알 수 있듯이  $V_b$  는 전극과 기체에 따라 결정되는 상수이다. 이  $V_b$  를 이용하여 전압의 최고치  $V_m$  과 방전개시위상  $\theta'$  는 다음과 같이 구해진다.

$$V_m = \frac{1}{2} \left\{ \frac{C' - C}{C'} V_b + \frac{I_d}{2fC'} \right\} \quad (14)$$

$$\theta' = \omega C V_b / I_d \quad (15)$$

한편, 방전동력  $W$  는 다음과 같다.

$$W = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\pi/\omega} V I_d dt = I_d V_b / 2 - 2fC V_m V_b$$

$$= fC_g S (V_s + V_e) \{ 2V_m - (1 + C_d/C_g)(V_s + V_e) \}$$

[ W ] (16)

식 (16)에서 알 수 있듯이 주파수  $f$  와 전압의 피크치  $V_m$  이 클수록 방전동력  $W$  는 커지고 따라서 오존발생기에 유입되는 방전에너지는 증가한다. 이로 인해 오존발생량이 증가하게 된다.

### 3. 모니터링 시스템 구축

현재 사용되고 있는 오존발생장치들은 구동 전압(혹은 전류)과 주파수등의 구성방식이 각각 다르며 이러한 파라미터들의 결정은 대부분 제한된 환경에서 수행된 실험적 결과에 의존해왔다. 그러나 최근 들어 고동력 반도체 소자와 고효율 방전관의 개발에 따라 보다 다양한 환경에서 매개변수들의 최적 동작조건이 결정될 수 있는 오존발생 실험장치와 이를 효율적으로 관리할 수 있는 시스템이 필요하게 되었다.

본 연구에서 사용한 오존발생장치는 중주파수, 저전압(혹은 저전류) 인가방식의 오존발생기로서 인버터에서 일정 이상의 전압(혹은 전류)을 인가하면 방전관 내부의 열로 인해 오히려 오존발생량과 오존농도에 역효과를 일으킬 가능성이 있다. 따라서 시스템 관리자에겐 오존발생기에 어떠한 전압(혹은 전류)과 주파수가 인가되느냐에 따라 방전관에서 방출되는 온도의 변화와 또한 그에 따른 오존발생량과 오존농도에는 어떠한 영향이 있는지 쉽게 알 수 있는 시스템에 대한 필요성이 제기된다.

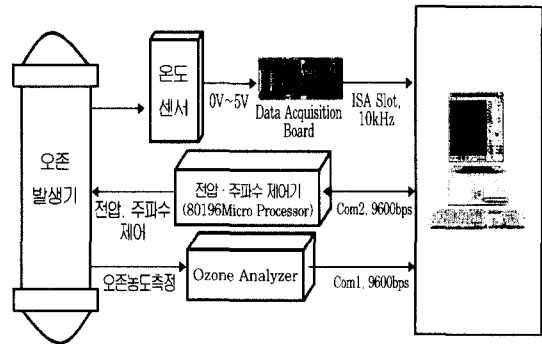


그림 4 오존발생기 모니터링 시스템  
Fig. 4 Ozonizer monitoring system

따라서 오존발생장치의 성능을 실시간으로 나타낼 수 있는 모니터링 시스템을 그림 4와 같이 구축한다.

모니터링 시스템은 Pentium 133MHz 환경의 PC에서 National Instrument사의 LabVIEW 5.0을 사용하여 구현하고, A/D Conversion Board인 DaqBoard 100A를 PC에 부착하여 방전관 내부의 온도 측정을 위해 사용하였다.

### 4. 실험 및 결과

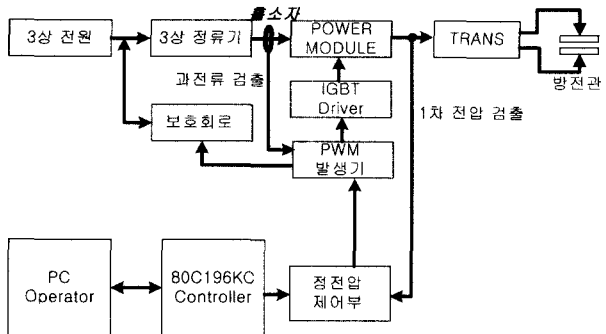
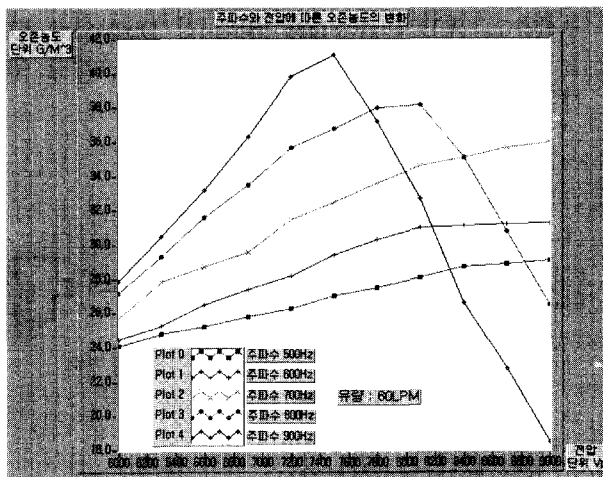


그림 5 오존발생제어 시스템의 블록선도  
Fig. 5 Block diagram of ozonizer control system

본 논문에서 오존농도 및 오존발생량등을 제어하기 위한 전체 시스템에 대한 블록선도가 그림 5에 있다.

PC 와의 인터페이스 및 제어입력 명령은 80C196KC로 실현하였다. 인버터는 PWM방식의 전압형인데 크게 컨버터부, 평활회로부, 인버터부, 제어회로부로 나누어진다. 인버터용량은 30kVA 정도이고 시스템 입력 전압은 380V/440V 겸용이다.

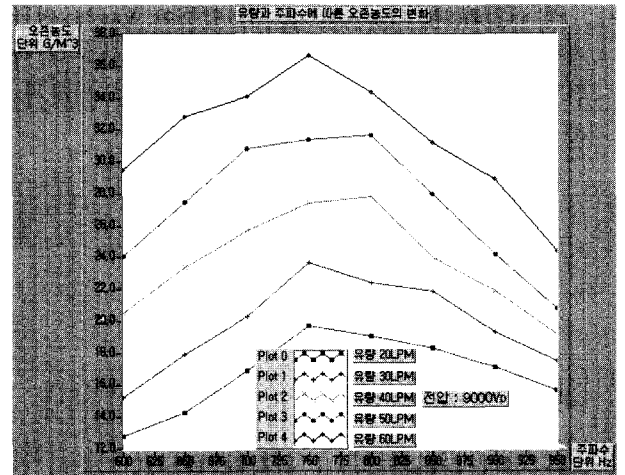
첫 번째 실험으로, 입력전원주파수를 매개변수로 하고 입력전원전압을 바꿔가면서 오존 농도의 변화를 측정하였다. 그림 6에서 알 수 있듯이 입력전원주파수가 클수록 오존 농도가 증가하는 경향이 있고, 입력전원 전압이 커질수록 오존 농도가 역시 증가할 것으로 생각되나 어느 한도 이상에서는 오히려 감소한다. 즉 그림 6에 약 800~900Hz사이의 주파수 영역에서부터는 증가하던 오존 농도가 감소하기 시작하는 것을 확인할 수 있었다. 그 이유는 커지는 전압 또는 주파수에 의한 오존 발생의 증가보다는 너무 높은 전압 또는 주파수에 의해 발생된 지나친 온도 상승으로 인해 방전관이 단시간 내에 뜨거워지고 이를 충분히 냉각하지 못해 생성된 오존이 재 분해되는 것으로 분석되었다. 이 모든 것은 오존 발생기의 냉각능력에 따라 다소 차가 있을 수 있다.



(유량: 60LPM, 좌상에서 좌하로, 주파수: 900, 800, 700, 600, 500Hz)

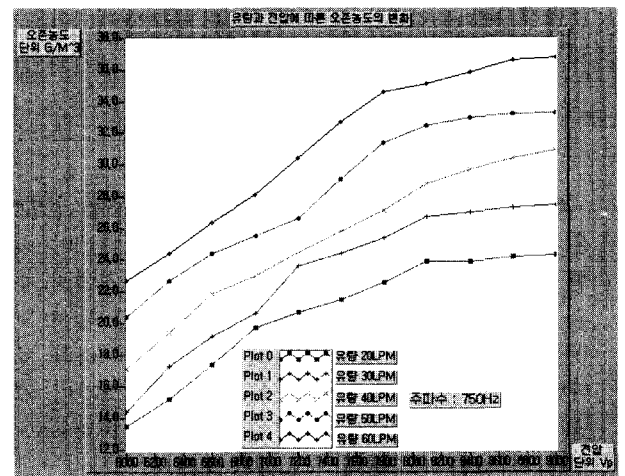
그림 6 전압과 주파수의 변화에 따른 오존농도곡선  
Fig. 6 Ozone concentration curve for varying voltage and frequency

두 번째 실험으로, 유입가스인 공기의 투입량을 매개변수로 하여 전압과 주파수를 변화시키면서 오존 농도를 측정하였다. 그림 7은 주파수와 공기유량에 따른 오존 농도의 변화를 보인 것이고, 그림 8은 전압에 따른 오존 농도 변화를 살펴본 것이다. 그림 7과 그림 8을 비교하면, 주파수와 전압이 증가하면서 오존 농도가 상승함을 알 수 있지만, 그림 7에서 주파수가 어느 이상 증가함에 따라 오히려 농도가 감소함을 알 수 있



(전압: 9000Vp, 상에서 하로, 유량: 60, 50, 40, 30, 20LPM)

그림 7 공기유량과 주파수의 변화에 따른 오존농도 곡선  
Fig. 7 Ozone concentration curve for varying air flow rate and frequency



(주파수: 750Hz, 상에서 하로, 유량: 60, 50, 40, 30, 20LPM)

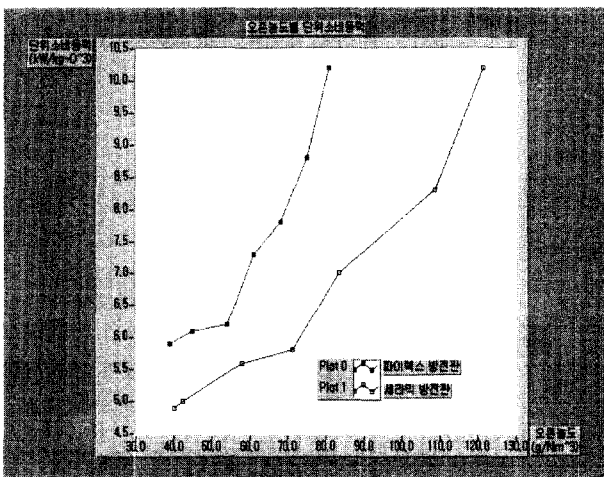
그림 8 공기유량과 전압의 변화에 따른 오존농도 곡선  
Fig. 8 Ozone concentration curve for varying air flow rate and voltage

다. 즉, 750Hz를 전후에서 이러한 현상을 관찰 할 수 있었다. 이것은 첫 번째 실험에서 알 수 있듯이 오존 발생시 방전관 내부에서 상승하는 온도의 영향으로 분석되었다. 오존 발생시 방전관의 온도는 전압보다는

주파수에 더 밀접한 관련이 있음을 관찰할 수 있었다.

세 번째 실험으로, 세라믹 방전관에 대한 오존발생을 분석하기 위해 주성분이  $Al_2O_3$  로 되어 있고 유전율이 9.6인 세라믹 ( $\phi 43 \times 1200mmL$ ) 38개를 병렬로 연결하여 방전면적이  $2.3m^2 (=0.0607m^2/개 \times 38개)$  인 방전관을 구성하고 냉각수 온도를  $23.5^\circ C$  로 유지하도록 하였다. 파이렉스관과 세라믹관에 대해 각각 나타낸 단위소비동력별 오존농도가 그림 9에 있다. 그림 9에서 알 수 있듯이 일정한 오존농도를 유지하기 위한 단위오존당 소비동력은 세라믹방전관이 훨씬 작다. 따라서, 고효율 오존발생기를 위해서는 세라믹방전관이 유리함을 알 수 있다. 파이렉스관과 세라믹관에 대해 각각 나타낸 공급산소량별 오존농도가 그림 10에 있다.

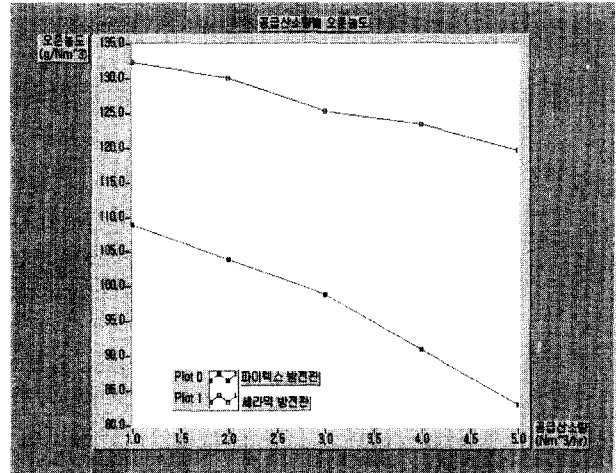
그림 10에서 알 수 있듯이 전기공급량과 공급산소량을 일정하게 하였을 때 세라믹방전관의 오존농도가 훨씬 진하다.



(상 : 파이렉스방전관, 하 : 세라믹방전관)

그림 9 오존농도 변화에 따른 단위소비동력 곡선  
Fig. 9 Unit consumption power curve for varying ozone concentration

마지막으로, 모니터링 시스템에 대해 간단한 실험을 행한다. 온도센서는  $-20^\circ C \sim 80^\circ C$  사이의 온도를  $0 \sim 1V$  또는  $0 \sim 5V$ 의 전압이나  $4 \sim 20mA$ 의 전류로 변환시키고, DaqBoard 100A를 통해 A/D 변환과정을 거치게 된다. DaqBoard 100A의 경우 최대  $100kHz$ 의 주기로 샘플링한다. 80C196 마이크로프로세서를 사용하는 전압·주파수 제어기에서 RS232C를 통해서 전압과



(상 : 세라믹방전관, 하 : 파이렉스방전관)

그림 10 공급산소량 변화에 따른 오존농도 곡선  
Fig. 10 Ozone concentration curve for varying oxygen supply



그림 11 LabView를 이용한 모니터링 시스템  
Fig. 11 Monitoring system using LabView

주파수 정보를 얻는다. 오존농도의 경우 전압과 주파수에 의한 영향이 크기 때문에 전압과 주파수의 경우에는 모니터링을 하는 것뿐만 아니라 최적의 오존발생을 위해 이 두 값을 결정하여 제어하는 것이 필요하므로 양방향 통신이 필수적이다. 그림 11은 LabVIEW를 이용하여 최종적인 모니터링 시스템의 형태를 나타낸 것이다.

## 5. 결 론

수처리에 사용되는 오존발생기는 80년대 선진국에서 쓰였고 지금 우리나라에서 많이 쓰이는 상용주파수 (50/60Hz)의 고전압 (14KV이상)을 인가하는 방식에서 이 보다 오존을 두 세배이상 발생시킬 수 있고 현재 선진국에서 많이 쓰이는 중주파수 (500Hz 이상)의 저전압 (10KV이하) 인가방식으로 바뀌고 있다. 오존방전 전압, 주파수, 오존방전관 내의 온도등이 오존발생율을 결정짓는 주요한 변수임을 확인하였다. 또한, 이들 변수들을 효과적으로 제어하기 위해 그래픽사용자 인터페이스를 갖는 모니터링 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 윈도우 98에서 C++ 과 LabView 로 프로그래밍 하였다. 향후에는, 이와 같이 구축된 실험 시스템을 이용하여 보다 효과적인 오존발생을 위한 제어기법 및 정성적인 분석이 요구된다고 생각한다.

이 논문은 1998년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 연구되었음(KRF-1998-001-E01206).

## 참 고 문 헌

[1] 이회재, 김규식, 김용철, "오존발생시스템에 관한 연구", *제어계측, 자동화, 로보틱스연구회 합동학술발표회 논문집*, pp. 136~139, 1998.

[2] 이회재, 남경태, 최경업, 김규식, 김용철, 이주봉, "인버터 오존발생기의 특성에 관한 연구", *대한전자공학회 회로 및 시스템연구회/전력전자연구회 합동학술발표회*, pp. 90~93, 1999.

[3] S. Masuda, K. Akutsu, M. Kuroda, Y. Awatsu, and Y. Shibuya, "A ceramic - based ozonizer using high - frequency discharge," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 24, pp. 223~231, Mar./Apr. 1988.

[4] Y. Nomoto, T. Ohkubo, S. Kanazawa, and T. Adachi, "Improvement of ozone yield by a silent - surface hybrid discharge ozonizer," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 31, pp. 1458~1462, Nov./Dec. 1995.

[5] 문재덕, 우정욱, "수전해 오존발생에 미치는 평판전극상의 유통개부의 효과," *전기학회논문집*, 제44권, 제 11호, pp. 1539~1544, 1995.

[6] 문재덕, 김진규, "수중 공전극에 의한 효과적인 오존발생," *전기학회논문집*, 제44권, 제 12호, pp. 1661~1667, 1995.

[7] Gary W. Johnson, "LabView graphical programming", McGraw-Hill, 1997.

## 저 자 소 개



### 김용철(金容徹)

1958년 10월 1일생. 1981년 서울공대 전자공학과 졸업. 1983년 KAIST 전기 및전자공학과 졸업(석사). 1993년 남가주대학교 졸업(박사). 1983년~1986년 금성전기연구소. 1993년~1996년 LG 이노텍연구소 전문팀장. 1996년~현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수.



### 김규식(金奎植)

1958년 8월 25일생. 1981년 서울대 전자공학과 졸업. 1983년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1990년 8월 동 대학원 제어계측공학과(박사). 1988년~1992년 대우중공업 중앙연구소 선임연구원. 1993년~현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수. 당 학회 기획위원.



### 최주엽(崔宙樺)

1961년 2월 11일생. 1983년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 Texas Univ. at Arlington(석사). 1994년 Virginia Tech (박사). 1995년 Virginia Tech (Post Doc.) 1983~88년 이화전기 기술개발부 근무, 1995~2000년 한국과학기술연구원 선임연구원. 2000년~현재 광운대학교 전기공학과 조교수. 당 학회 편집위원.