

論文99-36T-9-11

## 세라믹 방전판의 코로나 방전 특성

(Corona discharge characteristics of ceramic discharge plate)

崔圭南 \*

(Kyoo-Nam Choi)

### 요 약

오존발생기에 사용되는 세라믹 방전판 상하면에 패턴된 전극간에 일어나는 연면 코로나 방전의 주파수 특성에 대하여 측정하였다. 암류방전 경우와 연면코로나 방전 경우의 주파수 특성에 대하여 비교하였다. 효율적인 오존발생에 필요한 코로나방전을 위해서는 공진주파수로 스위칭 시키는것 보다는 공진주파수의 수분의 1로 스위칭 시킨후 공진을 이용하여 스위칭과형을 체배 시키는것이 방전판에서의 전계의 분포를 불균일하게 하는데 효율적인 것을 알 수 있었다. 공진주파수의 1/5의 주파수로 스위칭시킬때 오존발생효율은 28mg/W인 것으로 측정되었다.

### Abstract

The frequency characteristics of surface corona discharge from the electrodes on the ceramic substrate ozonator were investigated. The frequency characteristics of dark current were compared with that of corona discharge. Switching frequency which was the fraction of resonant frequency was found to be effective for corona discharge. This is regarded to distort the electric field distribution on the discharge plate which is essential for corona discharge. The measurement showed the efficiency of 28mg/W ozone generation when the switching frequency was 1/5 of the resonant frequency.

### I. 서 론

소용량 오존발생기로부터 발생하는 오존은 공기중의 악취제거와 음료수의 살균에 많이 사용되며 이러한 소용량 오존발생은 세라믹(Ceramic)판이나 유리와 같은 유전체의 양면에 박막증착후 도금하는 방법이나 후막 인쇄법을 이용하여 전극을 형성한 후 여기에 고전압을 인가하여 연면코로나방전을 시키는 방법이 사용된다. 이러한 연면코로나방전을 위하여 필요한 전압은 유전체의 재질과 두께에 따라 다르지만 일반적으로 일만볼트 이상의 고전압이 필요하게 된다. 이러한 교류 고전

압을 발생시키기 위하여 종래에는 고압변압기<sup>[1]</sup> 사용되어 왔으나 2차측 권선의 절연을 유지하기 위하여는 부피가 크고 무거워 소형기기내에 내장하여 상용화하기가 어려웠다. 또한 구동주파수가 고압트랜스의 1차측 권선에 인가되는 주파수와 같으므로 제약요인이 되었다. 이러한 구동주파수를 높여서 방전효율을 높이는 방법으로 상용 교류전원을 정류하여 직류로 변환시킨 후 SCR<sup>[2]</sup>을 높은 주파수로 단속시키는 주파수변환기를 거친후 고압트랜스의 1차측 권선에 인가하는 방법이 사용되었다. 그러나 SCR을 이용한 구동회로는 상대적으로 복잡해지는 단점이 있고 고압발생을 위해서는 높은 권선비의 변압기가 필요하였다. 고압트랜스의 권선비를 줄이기 위하여 스위칭 인버터가 구동하는 고압트랜스의 일차측 권선과 직렬로 인덕터 및 콘덴서를 연결<sup>[3]</sup>하여 직렬공진을 유도하거나 고압트랜스의 2차측 권선에 병렬로 콘덴서를 연결<sup>[4]</sup>하여 병렬공진을 유도하는 방법

\* 正會員, 仁川專門大學 工學部 通信科  
(Dept. of Communication Engineering, Junior College of Incheon)  
接受日字:1999年8月24日, 수정완료일:1999年9月13日

이 사용되었다. 그러나 이러한 방법에서는 직렬 또는 병렬로 연결된 인덕터 및 콘덴서가 전력을 소모하여 변환효율이 낮은 단점이 있었다.

한편, 안정된 연면코로나 방전을 지속적으로 발생시키기 위하여는 방전전류를 안정적으로 일정하게 유지시켜 주는 것이 필요하다. 종래에는 방전전류가 설정된 값을 초과하면 스위칭 인버터의 발진이 중단되고 방전전류가 감소되면 다시 발진이 계속되는 단속제어 방법<sup>[4]</sup>이 사용되었다. 그러나 이러한 방법은 평균적으로는 적정 방전전류로 보이지만 순간적으로는 과방전 전류가 흐르므로 연면코로나방전을 발생시키는 방전판의 수명을 단축시킬 수 있었다. 또한 스위칭 인버터<sup>[5-7]</sup>와 직류전원 사이의 저항값을 제어하여 적정 방전전류를 유지하는 방법<sup>[8]</sup>이 사용되었다. 그러나 이러한 방법은 전원장치의 공급전압과 출력전압 사이에 직류전압 조정에 필요한 전압차 이상의 차이가 있어야 하므로 전압제어회로에서 필연적으로 과도한 열을 발생시키는 단점이 있고 넓은 범위에 걸쳐서 방전전류를 제어하기 위해서는 넓은 범위에 걸쳐서 직류전압을 조정하는 것이 필요하나 내압이 40볼트 정도인 Bipolar Transistor를 사용한 일반적인 정전압회로로는 구현이 어려우며 따라서 회로가 복잡해지는 단점이 있었다.

결국, 종래 기술에 의한 오존발생기용 전원장치는 변환효율이 낮으며 따라서 고압트랜스의 권선비를 획기적으로 낮추기 어려운 문제점이 있고 방전전류를 정밀하게 조정하며 안정적으로 유지시키기가 어려운 문제점이 있었다. 본 논문에서는 상기와 같은 문제점들을 해결하기 위하여 세라믹 방전판 자체의 용량과 고압트랜스의 2차측 권선 자체의 인덕턴스간의 직렬공진을 이용하여 세라믹 방전판 위에서 방전시킬 때 방전특성을 주파수 제어의 측면에서 측정하였다.

본 논문의 구성은 2장에서는 연면코로나 방전에 대하여 논하고 3장에서는 실험장치 및 실험방법에 대하여 논하였고 4장에서는 실험결과 및 고찰, 마지막으로 5장에서 결론으로 끝맺었다.

## II. 연면코로나 방전

오존발생에 관계되는 코로나방전은 전극사이에 전계가 강한 극부만이 절연파괴되어 발광하는 방전을 말하며, 세부적으로는 glow 코로나방전, 부라쉬코로나방전,

스트리이마코로나방전으로 나뉘어진다. 전극에 전압을 인가하여 그 값을 점점 올려갔을 때 아크방전이 일어나기전에 코로나가 발생하는 조건으로서는 첫째 전계의 분포가 심하게 불균일하여야 하며, 둘째 코로나의 발생에 의하여 최대전위경도의 값이 감소하여야 한다. 첫째 조건은 극부적인 전리현상이 생기기 위하여 필요한 조건이며 두번째 조건은 코로나가 안정되게 존재하기 위하여 필요한 조건이다. 코로나 방전특성을 해석하기 위해서는 비저속방전에 속하는 초기단계인 암류 특성과 코로나방전의 특성에 대하여 해석할 필요가 있다.

세라믹 방전판과 같이 고체유전체의 표면에 접하고 있는 공기는 공기만이 단독으로 전극사이에 있는 경우에 비하여 낮은 전위경도에서 방전이 일어나게 된다. 평행판 전극 간격을  $d[cm]$ , 판상고체유전체의 두께를  $t[cm]$ , 비유전율을  $\epsilon_r$ 이라고 하면 공기부분이 받는 전기적 스트레스  $X_a$ 와 고체유전체가 받는 전기적 스트레스  $X_r$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X_r &= \frac{V}{(d-t)\epsilon_r + t} [KV/cm] \\ X_a &= \frac{\epsilon_r V}{(d-t)\epsilon_r + t} [KV/cm] \end{aligned} \quad (1)$$

이 식에서  $X_a$ 와  $X_r$ 를 비교하여 보면 고체유전체의 비유전율은  $\epsilon_r > 1$ 이므로  $X_a > X_r$ 이며, 일반적으로 고체유전체의 절연내력이 공기의 절연내력보다 크므로 공기부분의 절연이 먼저 파괴되어 코로나방전이 발생되게 된다. 그림 1(a)와 같은 전극구조에서 일어나는 연면코로나 방전은 수직방향으로만 방전이 일어난다고 할 때는 그림 1(b)와 같은 구조로 생각할 수 있다. 여기서 공기의 최대간극  $d-t$ 는 방전불꽃의 길이와 같게 되며 방전불꽃의 넓이가 얼마나 진행되는가는 전극간에 인가되는 전압치와 전압파형에 비례하게 된다.

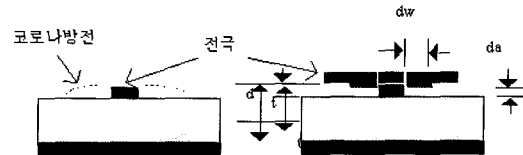


그림 1. (a) 대향전극 구조, (b) 등가 세라믹방전판 구조

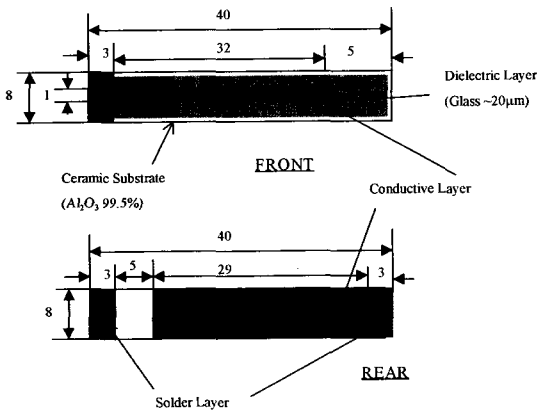
Fig. 1. (a) Electrode structure, (b) Equivalent ceramic discharge plate structure.

III. 실험장치 및 실험방법

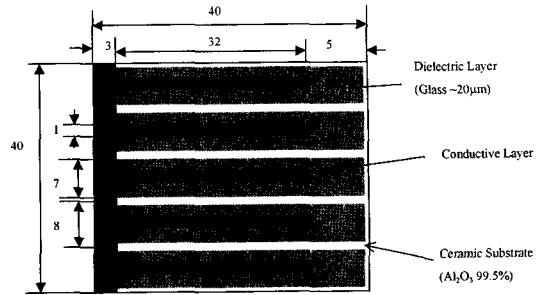
시료 1과 2에 사용된 방전판은 표 1과 같은 사양의 세라믹(Ceramic)판 위에 RuO<sub>2</sub> 방전전극을 후막인쇄법을 이용하여 50 $\mu$ m 두께로 인쇄후 850 $^{\circ}$ C에서 9분간 소성하고 납땜용 터미널로 Ag/Pd(15%) powder를 인쇄후 150 $^{\circ}$ C에서 10분간 건조한 후 850 $^{\circ}$ C에서 9분간 소성하여 형성하였다. 방전시 표면전극의 소모를 줄이기 위하여 Glass Paste 를 20 $\mu$ m 두께로 Terpineol을 용매로 사용하여 인쇄후 580 $^{\circ}$ C로 60분간 소성하였다. 시료 3에 사용된 방전판은 표 1과 같은 사양의 세라믹(Ceramic) 판 위에 Ag/Pd(15%) 방전전극을 후막인쇄법을 이용하여 20 $\mu$ m 두께로 인쇄후 150 $^{\circ}$ C에서 10분간 건조한 후 850 $^{\circ}$ C에서 9분간 소성하였다. 그림 2에 각 방전판의 외부규격을 나타내었다. 실험은 연면코로나방전 발생을 위하여 세라믹 방전판에 고압 펄스전압을 변화시키고 또한 주파수를 변화시키면서 인가하는 방법을 사용하였다.

표 1. 방전판의 재질  
Table 1. Material characteristics of discharge plate.

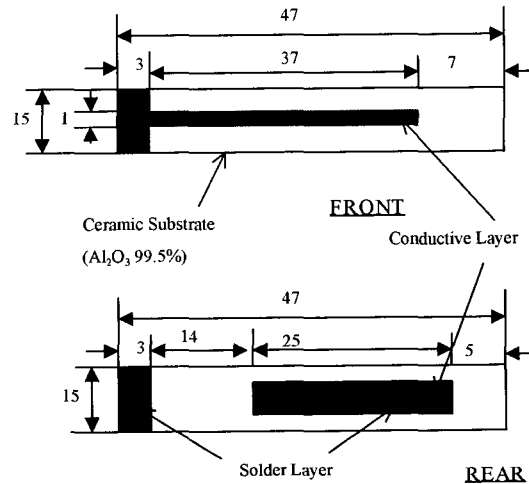
구 분	시료1, 2	시료 3
방전판 기관재료	Alumina 99.5%	Alumina 99.5%
Volume Resistivity	1014 ohm-cm	1014 ohm-cm
Dielectric Strength	7.9 kV/mm	7.9 kV/mm
상대유전계수	9.8	9.8
유전체 두께	1 mm	0.8 mm



a) 시료 1



b) 시료 2



c) 시료 3

그림 2. 방전판의 외부규격  
Fig. 2. Dimensions of discharge plates

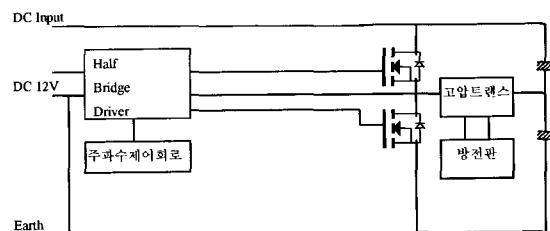


그림 3. 고압발생용 인버터 블록도  
Fig. 3. Block diagram of high voltage inverter

방전에 필요한 교류 고전압을 발생시키기 위하여, 상용교류전압을 Triac을 이용한 가변전압장치를 통한 후 정류하여 가변직류전압을 공급하고 그림 3과 같이 MOSFET 전력용 스위칭소자를 이용한 Half Bridge 인버터회로를 사용하여 고주파로 순차적으로 단속시켜 고압변압기의 1차측 권선에 인가하였다. 이때 인버터의 스위칭 주파수는 임의로 조절할 수 있게 하였다.

측정방법은 고압변압기의 2차측 권선의 인덕턴스와 연면코로나 방전용 방전판의 전극간 용량으로 결정되는 공진주파수의 분수배에 해당하는 주파수를 스위칭 주파수로 하여 변화시키면서 공진점을 찾았다. 가지 코로나방전에 의한 공진주파수 변화가 주파수특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 비자속방전인 암류방전시의 주파수특성과 비교하였다.

IV. 실험결과 및 고찰

스위칭 주파수를 변화시키면서 방전전류의 변화를 측정하여 방전특성을 살펴보았다. 시료1의 측정결과는 그림 4와 같다. 그림에서 코로나 방전이 시작되기 전인 암류방전의 경우에는 인가된 스위칭주파수에 따라 공진특성을 나타내며 스위칭주파수가 증가할수록 공진점에서의 평균 방전전류가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 고압변압기의 2차측 권선의 인덕턴스와 연면코로나 방전용 방전판의 전극간 용량과 배선분포용량의 합으로 결정되는 공진주파수인 약 180kHz에 근접할수록 커짐을 알 수 있다.

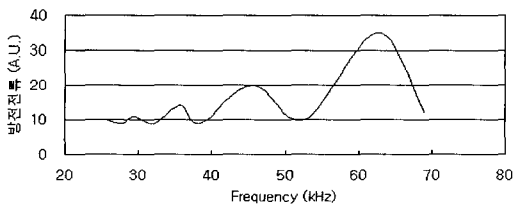


그림 4. 시료1의 발진주파수와 암류방전전류와의 관계  
Fig. 4. Relationship between switching frequency and dark current of sample 1.

그러나 시료 1에서 부라쉬코로나 방전이 시작되면 그림 5에 보이는것과 같이 주파수특성이 암류방전의 경우와 비교하여 왜곡되는 것을 알 수 있다. 이는 코로나방전의 정도에 따라 변화되므로 코로나방전이 그림 6과 같이 추가로 용량을 형성하여 공진특성을 변화시키

는 것으로 해석될 수 있다. 그림 6에서  $C_0$ 는 방전판 자체의 정전용량이고  $R_0$ 는 유전체의 도전율이다. 코로나방전이 진전되면 방전범위에 따라서 추가로 전극의 좌측으로는 불꽃저항  $R_{1n}$ 과 불꽃으로 인한 추가정전용량  $C_{1n}$ 이 불꽃의 범위에 걸쳐서 무한히 잘게 나뉘어져 분포되어 있고 전극의 우측으로도 같이 분포되어 있는 것으로 해석될 수 있다.

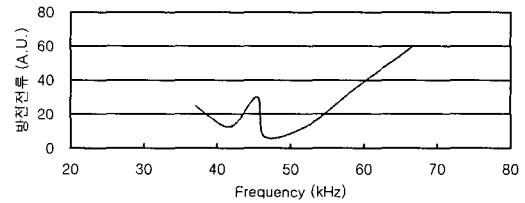


그림 5. 시료1의 발진주파수와 부라쉬코로나 방전전류와의 관계  
Fig. 5. Relationship between switching frequency and brush corona current of sample 1.

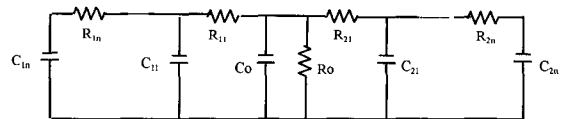


그림 6. 방전판의 코로나방전시 등가회로  
Fig. 6. Equivalent circuit of discharge plate with corona discharge.

공진특성이 고압변압기의 2차권선의 인덕턴스와 방전판의 용량에 관계되는지를 확인하기 위하여 전극면적이 시료 1보다 5배 넓은 시료 2에 대한 발진주파수와 암류방전전류와의 관계를 그림 7과 같이 측정하였다. 시료 2의 계산상 공진주파수는 시료 1의 공진주파수의  $1/\sqrt{5}$ 에 해당하므로 이는 180kHz의 44.7%인 약 80kHz에 해당된다. 그림 7에서 공진주파수에 근접할수록 방전전류가 증가되며 1/2 고조파에서 2번째 첨두치가 나타나는 것으로도 확인될 수 있다.

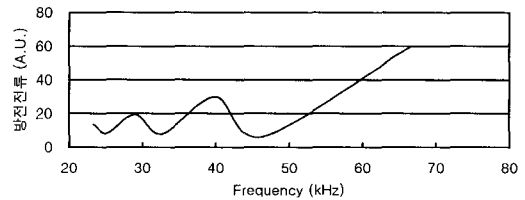


그림 7. 시료 2의 발진주파수와 암류방전전류와의 관계  
Fig. 7. Relationship between switching frequency and dark current of sample 2.

시료 3은 시료 1보다 약 4% 방전판의 정전용량이 많으나 보호절연막이 없으므로 보다 낮은 구동전압에서 그림 8과 같이 glow 코로나를 발생시킬 수가 있었다. Glow 코로나의 경우에는 부라쉬 코로나의 경우보다는 방전의 정도가 약하므로 주파수특성을 덜 왜곡시키는 것을 알 수 있다.

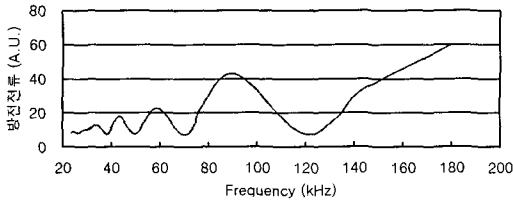
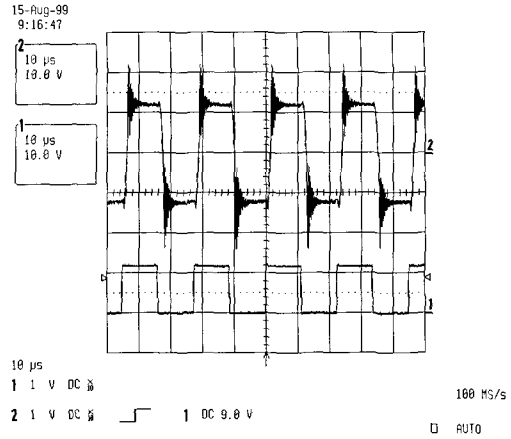


그림 8. 시료 3의 발진주파수와 코로나 방전전류와의 관계

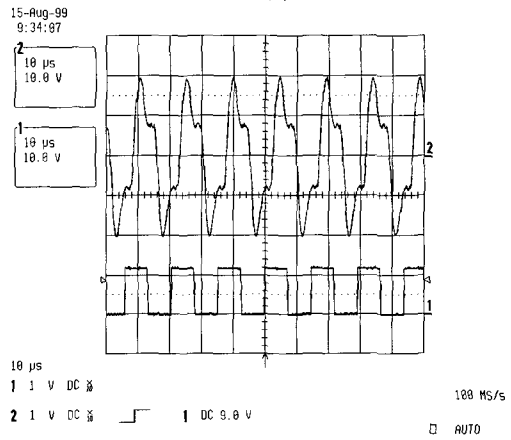
Fig. 8. Relationship between switching frequency and corona discharge current of sample 3.

발진주파수가 공진주파수의 분수배일 때 방전판에 인가되는 전압파형을 측정하여 보았다. 코로나방전을 수반하지 않는 단순한 LC 수동소자를 사용한 공진회로에서는 고전적인 회로이론에서와 같이 비공진시에는 그림 9(a)와 같이 단순한 발진파형을 나타내고 공진시에는 그림 9(b)와 같이 정현파에 가까운 파형을 나타낸다. 그림에서 상단파형은 고압변압기로부터의 출력전압 파형을 하단은 스위칭파형을 각각 나타낸다. 그러나 코로나방전을 수반하는 공진회로에서는 그림 10(a)에서와 같이 발진주파수가 공진주파수의 1/4일 때는 발진주파수보다 4배 많은 발진파형이 방전판에 인가되고 그림 10(b)에서와 같이 발진주파수가 공진주파수의 1/2일 때는 발진주파수보다 2배 많은 발진파형이 방전판에 인가 되는 것을 알 수 있다. 그러나 발진주파수가 공진주파수에 정합되지 않을 때는 그림 10(c)와 같이 발진주파수의 배수만큼 주파수가 확연하게 구분되지 않는 것을 알 수 있다. 측정을 통하여 효율적인 코로나방전을 위해서는 공진을 이용하여 발진파형을 체배시키는 것이 효율적인 것을 알 수 있었다. 또한 발진파형이 고조파를 많이 함유할수록 코로나방전 개시전압이 낮아지는 것을 알 수 있었다. 이는 발진주파수를 높여 방전전류를 증가시키는 것만이 코로나방전에 유리한 조건은 아닌 것임을 의미한다. 즉 효율적인 코로나방전에 가장 유리한 조건은, 전체의 분포가 심하게 불균일하도록, 공진주파수의 수분의 1에 해당되는 구형파 전압을 인가하여 체배 공진을 유도함으로써, 고조파가 많이 함유된

공진 파형이 방전판에 가해지도록 하는 것임을 알 수 있다. 발진주파수를 필요이상으로 공진주파수에 근접시



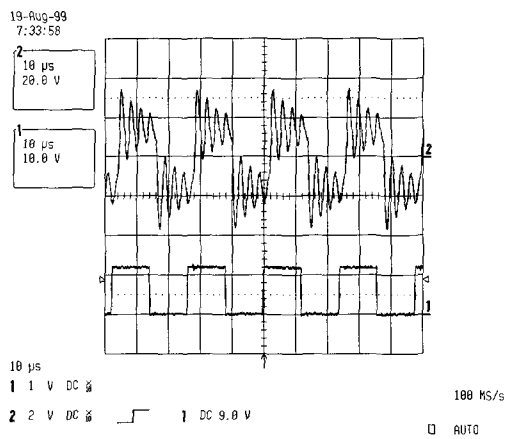
(a)



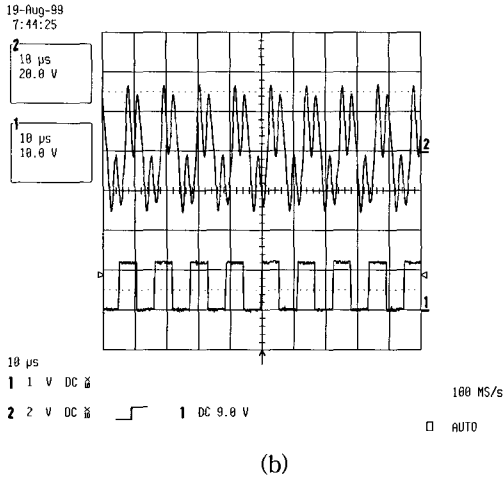
(b)

그림 9. 단순한 LC 공진회로에서의 콘덴서에서의 전압파형

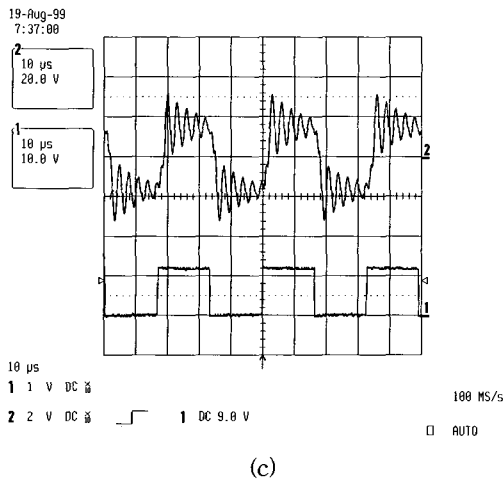
Fig. 9. Waveform across capacitor in the simple LC resonant circuit.



(a)



(b)



(c)

그림 10. 시료 3 방전판에 인가되는 전압파형  
Fig. 10. Voltage waveform applied to sample 3 discharge plate.

키면 방전전류는 증가되지만 효율적으로 코로나방전에 모두 이용되는 것이 아니므로 오존발생효율은 오히려 저하하게 된다. 시료 1을 사용하여 오존발생량측정기로 오존발생효율을 측정시 공진주파수의 1/5의 주파수로 발진시킬때 3.6W의 전력이 공급되면 100mg의 오존이 발생되어 오존발생효율은 28mg/W인 것으로 측정되었다.

V. 결론

공진용 수동소자인 인덕터와 콘덴서를 회로에 추가하지 않고 세라믹 유전체위에 후막인쇄된 전극의 정전용량과 고압트랜스 2차측권선의 인덕턴스를 이용하여 공진을 일으켜 스위칭주파수의 변화에 따른 코로나방

전의 주파수특성을 조사하였다. 효율적인 오존발생에 필요한 코로나방전을 위해서는 공진주파수로 스위칭시키는 것보다는, 공진주파수의 수분의 1로 스위칭시킨 후 공진을 이용하여 스위칭파형을 체배시키는 것이 방전판에서의 전계의 분포를 불균일하게 하는데 효율적인 것을 알 수 있었다. 또한 발진파형이 고조파를 많이 함유할수록 코로나방전 개시전압이 낮아지는 것을 알 수 있었다. 스위칭주파수를 필요 이상으로 공진주파수에 근접시키면 방전전류는 급격히 증가되지만 방전판에 인가되는 구동전압파형에서 고조파 성분이 줄어들어 전계분포의 불균일이 감소하게 되므로 방전전류가 효율적으로 코로나방전에 모두 이용되지 않아서 오존발생효율은 오히려 저하하게 되는 것으로 나타났다. 시료1을 사용하여 오존발생량측정기로 오존발생효율을 측정시 공진주파수의 1/5의 주파수로 발진시킬때 3.6W의 전력이 공급되면 100mg의 오존이 발생되어 오존발생효율은 28mg/W인 것으로 측정되었다.

참고 문헌

- [1] Maurice Adaatto and Christian Coste, "Power supply for ozone generator," US Patent 4587591, May. 6, 1986.
- [2] Frank E. Lowther, "Solid state frequency converter for corona generator," US Patent 3784838, Jan. 8, 1974.
- [3] Anh N. Huynh, "Power supply for an ozone generator with a bridge inverter," US Patent 5285372, Feb. 8, 1994.
- [4] William Racca and Edward F. Racca, "Resonant power supply circuit for ozone generators," US Patent 5474750, Dec. 12, 1995.
- [5] D. Grant et al, "Technique for pulse elimination in pulsewidth-modulation inverter with no waveform discontinuity," IEEE Proc., Vol. 129, Pt. B, No. 4, Jul. 1982.
- [6] Schwarz et al, "A 95 percent efficient 1KW DC converter with an internal frequency of 50 KHz," IEEE Trans. on Ind. Electron. & Control Instrumentation, vol.IECI-25, No.4, pp.326-333, Nov. 1978.

- [7] S. Magai, A. Chibani, M. Nakooka, and H. Ogiwara, "A new phase-shifting PWM regulated-mode resonant inverter using static induction power devices for inductionheating-and-melting applications," EPE'89 3rd European Conference on Power Electronics and Applications, vol.1, dated Oct.9 through 12, 1989, pp.347-352.
- [8] Anh N. Huynh, "Ozonator power supply employing a current source inverter," US Patent 4682266, Jul. 21, 1987.

---

 저자 소개
 

---



崔圭南(正會員)

1953년 8월 2일생. 1976년 2월 서울대학교 졸업(공학사). 1989년 12월 Texas A&M Univ. 졸업(공학석사). 1992년 8월 Texas A&M Univ. 졸업(공학박사). 1992년~1994년 LG전자기술원 연구실장.

1994년 현재 인천전문대학 부교수.

주관심분야는 평판디스플레이 및 박막반도체임