

## 동일한 전극 표면적에서 DBD방전형 내부전극 형상에 따른 오존생성특성 연구

(Ozone Production Characteristics of the DBD Discharge the Electrode Shape at the Same Electrode surface area)

권영학\* · 박현미 · 송현직 · 박원주\*\*

(Young-Hak Kwon · Hyunmi Park · HyunGig Song · Won-Zoo Park)

### Abstract

The dielectric barrier discharge (DBD) has low efficiency due to about 70% input power is consumed as thermal energy in the discharge space. However, because of the usage of DBD ozone generator is easier than other methods. The DBD ozone generator has been widely applied for high concentration ozone generation in the industrial application. But, the low-capacity compact DBD ozone generator is not applied so far. Therefore, the DBD ozone generator is necessary to improve ozone production efficiency and reduce the capacity.

In this paper, the stainless steel pipe inner electrode was designed with hall type and screw type to improve the ozone production yield. The manufactured two inner electrodes were experimented with normal type for comparison of the discharge characteristics and the ozone generating characteristics.

As the experimental results, the discharge current effective value of designed inner electrodes with hall type and screw type are higher than the normal type, due to unequal electric field is formed at the boundary. However, the difference of designed and original electrodes is less than 0.1mA that has no effect on the discharge characteristic. On the other hand, the screw type inner electrode increased higher than original model about 7 times when the flow rate of the oxygen source gas was increased from 0.6 ℓ/min to 1.0 ℓ/min. The reason was assumed by the flow rate of the raw gas through the inner electrode was became fast that has a cooling effect. The designed hall type and screw type inner electrodes have shown good performances in ozone generation and ozone production that better than normal type in the same electrode surface area.

Key Words : Dielectric Barrier Discharge(DBD), Ozonizer, Cylindrical Inner Electrode, Effect of Temperature

\* Main author : Ph.D of Electrical Engineering at Yeungnam University

\*\* Corresponding author : Professor of Electrical Engineering at Yeungnam University

Tel : 053-810-2581, Fax : 053-810-4767

E-mail : wzpark@ynu.ac.kr

Received : 2015. 11. 27.

Accepted : 2015. 12. 18.

## 1. 서 론

오존처리분야는 산업현장 뿐만이 아니라 가정, 학교, 병원 등의 적용이 확대됨에 따라 외국에서는 오존발생기에 관한 연구개발을 활발히 하고 있다. 특히 유전체장벽방전(Dielectric Barrier Discharge, DBD)의 경우 고농도 오존생성이 가능하여 산업용으로 많이 사용되었으나 수율이 좋지 못한 단점으로 저용량 소형 오존발생기에는 적용하지 못하고 있다. 그러나 DBD오존발생기는 다른 전기분해, 광화학식 오존발생 방식 보다 안정성이 높고 제어가 편리하기 때문에 DBD오존발생기를 저용량 소형화시켜 산업에 적용시키기 위해서는 오존생성수율의 개선이 필수 조건이라 생각한다.

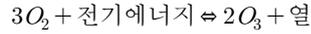
지금까지 DBD오존발생기의 오존생성수율을 높이기 위해서 원료가스의 온도와 종류, 유전체의 종류, 전원장치의 종류 등에 관한 연구가 진행되어 왔다[1-3]. 그 중 오존생성수율에 가장 큰 영향을 주는 것은 방전장치의 내부온도로서, 방전공간의 온도를 350K이하로 유지시켜주는 것이 중요한 것으로 알려져 있다[6-7].

이에 본 논문에서는 스테인레스 스틸관(STS304)을 사용하여 원형(Hall)과 나선형(Screw)으로 제작하고 기존의 내부전극과 방전특성 및 오존생성특성을 비교·실험하였다.

## 2. 이론고찰

### 2.1 오존발생 원리

오존발생방법은 DBD방전, 전기분해, 광화학식 등이 있으며, 산업 현장에서 이용되는 방식의 대부분은 DBD방전이다. 2개의 전극사이에 세라믹이나 유리와 같은 유전체(Dielectric)를 삽입한 후 교류고전압을 인가하면 전극과 유전체 간극사이에 방전이 일어난다. 이 간극 사이에 산소를 공급하면 산소가 해리되고, 해리된 산소원자(O)가 다른 산소분자(O<sub>2</sub>)와 결합하여 오존(O<sub>3</sub>)이 생성된다. 이러한 반응은 발열반응이기 때문에 오존생성수율을 충분히 높이기 위해서는 발생된 열을 효과적으로 제거하여야 한다.



### 2.2 오존발생기 구성

#### 2.2.1 방전장치

DBD오존발생기의 전기방전 공간은 기체반응에 의한 수율적인 오존발생을 위하여 대기압이상의 고압, 350K이하의 저온상태를 유지하도록 설계하여야 한다. 그러나 이론적인 오존생성수율에 비해 상용화된 오존발생기의 경우 오존생성수율이 대단히 낮은 것으로 알려져 있다. 이는 오존발생장치에서 소모되는 에너지의 약 70%가 방전장치에서 열 손실 등에 의해 대부분 소모되기 때문이다.

방전장치의 오존생성수율에 큰 영향을 주는 것은 유전체의 종류와 내부전극이다. 유전체로는 유전율이 높은 석영관 또는 세라믹을 주로 사용하며, 내부전극으로는 스테인레스 스틸(STS) 또는 동(Cu) 재질을 사용한다. 기존의 내부전극 형태에 관한 연구는 원통형 내부전극 외부에 그물망(Mesh)을 감싸는 형태와 원통형 내부전극의 외부를 나사산으로 깎은 형태가 있다[8-9].

#### 2.2.2 전원장치

오존발생기의 방전장치에 따른 인자들이 일정한 값일 경우 전력소비량이나 오존발생량에 변화를 줄 수 있는 인자는 주파수(Frequency)와 전압(Voltage)이다. 상용주파수, 중주파수, 고주파수 등 시스템에 따라 인가전압은 3~18(kV)로 달라지며 고주파수 방식일수록 오존발생농도와 에너지 수율이 높다.

#### 2.2.3 냉각장치

오존생성반응은 발열반응으로 발생된 열을 충분히 제거하면, 오존분해를 억제시키고 열로 파괴되는 유전체를 보호할 수 있어 오존생성수율이 증가된다. 오존발생장치의 냉각장치는 수랭식과 공랭식이 있으며 수랭식이 공랭식에 비하여 냉각수율이 높아 대용량 장치에서는 대부분 수랭식을 적용하고 있다.

### 2.3 오존생성수율 향상

DBD방전 오존발생기의 전극간의 거리(d)가 짧을수록 오존생성수율이 높은 것으로 알려져 있다[10]. 이는 전극간의 거리가 좁을수록 동일한 유량(Flow rate, Q)에서 원료가스의 유속이 상대적으로 빨라지므로 방전공간의 냉각이 활발히 일어나기 때문이다[11].

동일한 방전공간일 경우, Q가 감소될수록 유속이 감소되어 방전공간을 통과하는 시간이 길어지므로 오존생성능도가 증가하게 된다. 그러나 방전공간의 온도 상승으로 오존분해 반응이 증가하므로 오존생성수율이 낮아지는 결과를 가져온다. Q의 변화에 따른 산소분자의 방전공간 통과시간은 다음의 식 (1)에 의하여 구할 수 있다[12-13].

$$Q = U \cdot A, \quad T = \frac{L}{U} \quad (1)$$

Q = 유량 [m<sup>3</sup>/s], U = 유속 [m/s], T = 통과시간

A: 판의 단면적 [m<sup>2</sup>], L = 판의 길이 [m]

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

그림 1은 전극 표면적이 동일할 때 오존발생장치의 내부전극 형태에 따른 오존생성특성과 방전특성을 연구하기 위한 실험장치의 배치도이다. 그림에서 실선은 방전특성을 조사하기 위한 전원장치와 계측장치들을 연결한 회로이며, 점선은 오존생성특성을 연구하기 위한 오존가스 흐름선을 나타내고 있다. 오존발생기로부터 출력되는 방전전압, 전류 및 파형은 고전압 분압기(분압비=2000:1), Probe(10:1)으로 Digital Storage Oscilloscope로 측정하였다. 방전전력(W<sub>d</sub>)은 AC watt meter(0~240V, 0~1A, 0~160W, accuracy : ±0.5%)를 이용하여 방전시의 전력, 전원장치의 전력 손실, 선로손실 등을 포함한 전원 입력단에서 오존발생장치 전체회로에 소모되는 전력을 측정하였다.

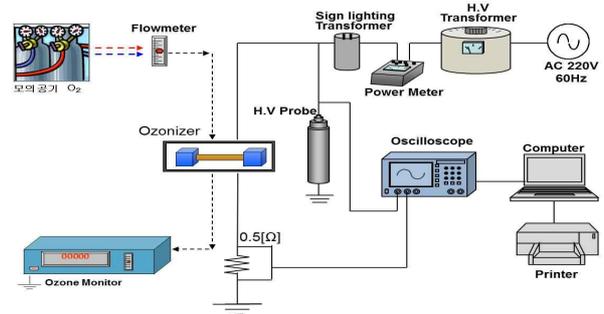


Fig. 1. The schematic diagram of experimental setup

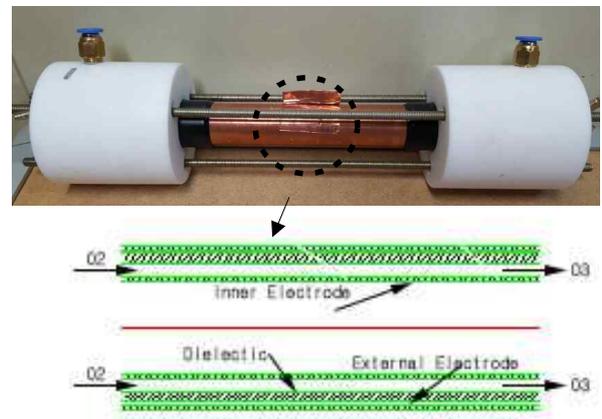


Fig. 2. DBD ozone generator photographs and schematic interior



Fig. 3. The Photographs of each inner Electrode (Normal, Hall, Screw)

그림 2와 3은 본 연구를 위해 설계 제작한 DBD오존발생기와 3가지 종류의 내부전극의 사진을 나타내었다. 스테인레스 스틸관(STS 304 Pipe)을 사용하여 Normal형, Hall형 전극 및 Screw형 전극으로 제작하였다. 이때 Hall형 전극 및 Screw형 전극은 내부전극을 통한 유체흐름을 변화시켜 원료가스가 방전공간에

체류하는 시간을 늘려 오존발생량을 늘리고 유체의 흐름으로 인한 냉각효과를 얻고자 하였다.

내부전극의 유효 면적은 7.7cm<sup>2</sup>, 유전체와 간격은 2.5mm이며 외부전극으로 동태이프(Cu, 두께 0.1mm)를 석영관에 밀착시켰다. 오존발생기의 원료가스 입·출구 크기를 각 6φ, 4φ로 다르게 설계하였다.

### 3.2 실험방법

오존발생장치의 주변온도는 항상 25°C ±2°C로 유지하였으며 산소 원료가스를 flow meter(0.6~10 l/min)를 통하여 일정한 Q로 오존발생기에 공급하였다. 또한 인가전압 및 시간에 따라 내부전극의 발열반응이 달라지므로 각 인가전압에 따라 2분 동안 오존생성농도(O<sub>3con</sub>) 및 방전전압(V<sub>d</sub>), 방전전류(I<sub>d</sub>)를 측정하고 그 평균치 및 표준편차를 계산하였다. 그리고 오존발생기내에서 발생한 오존화 가스를 매 실험마다 0.3 l/min으로 샘플링하는 자외선흡수방식의 기상용 오존모니터로 O<sub>3con</sub>를 측정 후 오존생성수율(Ozone Yield, O<sub>3Y</sub>)을 다음의 단위 환산한 식 (2)에 따라 계산하였다.

$$\frac{0.00214 \times O_{3con} \times Q \times 0.06}{V_d \cdot I_d \cdot 10^{-3}} [g/kWh] \quad (2)$$

또한 Q의 변화에 따른 O<sub>3con</sub>, O<sub>3Y</sub> 특성을 연구하기 위해 1세트 실험이 끝난 후 전압을 인가하지 않고 매 실험마다 강제 배기시킨 후 방전 공간 온도를 일정하게 유지하고 실험을 진행하였다.

### 3.3 실험결과

#### 3.3.1 방전특성

그림 4는 인가전압에 따른 내부전극별 (a) 6kV와 (b) 10kV에서의 V<sub>d</sub> 및 I<sub>d</sub> 파형을 나타낸 것이다. CH1은 전압파형, CH2는 전류파형이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 I<sub>d</sub>의 Pulse는 정부 V<sub>d</sub>의 최대치까지 형성되다가 V<sub>d</sub>가 강하하면서 유전체 표면에 축적되어 있는 전하에 순간적으로 역전계가 걸리면서 방전이 일시에

정지되는 방전휴지구간이 형성된다. 인가전압이 상승할수록 방전휴지구간이 짧아지고 전류 pulse가 상승하게 되는 전형적인 DBD방전의 특성을 나타내고 있다.

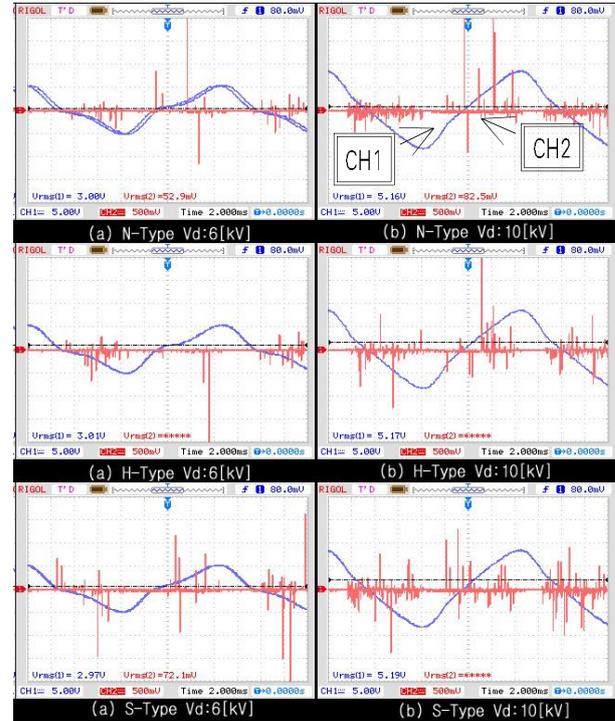


Fig. 4. Waveform of Voltage and current at each internal electrode type

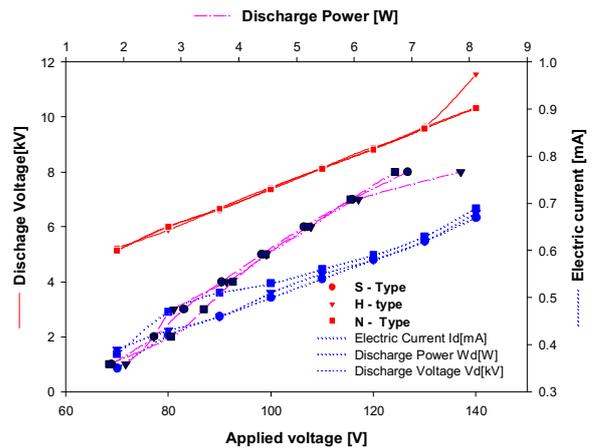


Fig. 5. Characteristics of V<sub>d</sub>, I<sub>d</sub>, W<sub>d</sub> according to Applied Voltage at each Inner electrode type

그림 5는 내부전극별 인가전압에 따른  $V_d$ ,  $I_d$ ,  $W_d$  실효값을 그래프로 나타낸 것이다.  $I_d$  실효값은 Screw형 전극>Hall형 전극> Normal형 전극 순으로 Screw형 전극이 가장 큰 값이 측정되었다. 이는 Hall형과 Screw형 주변으로 불평등 전계가 형성되기 때문이다. 그러나  $I_d$  실효값의 차이는 0.1mA 이내의 오차를 고려할 경우, 내부전극 형태별 방전특성은 큰 차이가 없다. 이는 내부전극의 표면적을 동일하게 제작하였기 때문이라 판단된다.

### 3.3.2 오존생성특성

그림 6은 Q가 (a) 0.6 l/min, (b) 1.0 l/min일 때 내부전극별  $W_d$ 에 따른 오존발생량( $O_3$  Generate,  $O_{3g}$ )과  $O_{3Y}$ 을 나타낸 그래프이다. 이때 실선은  $O_{3g}$ , 점선은  $O_{3Y}$ 이다.

$O_{3g}$ (g/h)는 오존생성농도( $g/m^3$ )에 원료가스의 Q( $m^3/h$ )를 곱한 값으로 모든 내부전극에서  $W_d$ 가 상승함에 따라  $O_{3g}$ 이 증가한다. 이는  $W_d$ 가 증가할수록 유전체에 축적된 전자가 증가하게 되므로  $O_2$ 와의 충돌확률이 증가하여 산소 활성화중에 의한 오존생성반응이 활발해지기 때문이다[14-15].

일반적으로 Q가 증가할수록 유속이 빨라지므로 방전현상으로 발생한 전자와  $O_2$ 의 충돌확률이 낮아지면서  $O_{3g}$ 가 낮아지는 특성이 있다[16]. 이는 그림 6의 두 그래프를 통해 Normal형 내부전극의 오존발생특성을 확인할 수 있다.

그러나 Hall형 내부전극과 Screw형 내부전극의 경우 Q의 증가에 따라  $O_{3g}$ 가 증가하는 특성을 나타낸다. 이는 입출구의 단면적을 달리 했기 때문에 Hall형 및 Screw형 내부전극의 경우 오존발생기 가스 출구에서 병목현상으로 인해 유체의 흐름이 달라지기 때문이다. 결국 원료가스가 방전공간을 통과하는 시간이 길어지기 때문에  $O_{3g}$ 가 증가하는 것으로 생각한다. 한편 Screw형 내부전극이 Hall형 내부전극에 비해  $O_{3g}$ 가 높게 측정되었다. 이는 Q가 증가함에 따라 내부전극 내부공간을 통한 유체의 흐름은 더욱 활발해지므로 냉각효과의 영향을 받기 때문으로 생각된다.

$O_{3Y}$ 는 Q=0.6 l/min, 3W일 경우 각 내부전극 형태에

따라 79, 280, 302g/kWh로 계산되었다. 그 결과 Screw형 내부전극이 Normal형 내부전극에 비해 약 4배 수율이 높았다. 반면 Screw형 내부전극과 Hall형 내부전극은 큰 차이가 없었다. 그러나 Q=1.0 l/min, 3W일 경우  $O_{3Y}$ 는 각 내부전극별 48, 229, 347g/kWh로 Screw형 내부전극이 Normal형 내부전극에 비해 약 7배 높았다. 또한 Screw형 내부전극은 Hall형 내부전극에 비해서도  $O_{3Y}$ 이 더 좋은 것을 확인할 수 있었다. 이는 식 (2)에서와 같이  $O_{3Y}$ 는 동일한  $W_d$ 와 Q일 경우,  $O_{3g}$ 에 따라 비례하기 때문에  $O_{3g}$ 의 증가에 따른 영향과 동일하다.

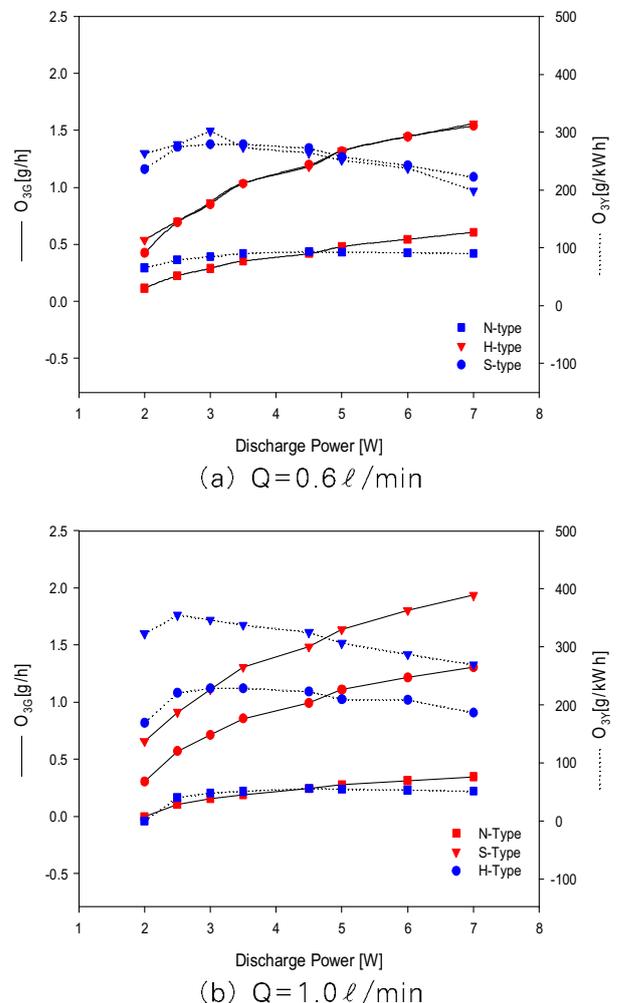


Fig. 6. The Characteristics of  $O_{3g}$  and  $O_{3Y}$  according to discharge power at each Inner electrode type

이로써 동일한 전극 표면적일 경우 Screw형 내부전극이 Normal형 내부전극과 Hall형 내부전극에 비해 가장 좋은 오존생성특성을 가진다. 이는 Screw형 내부전극이 원료가스의 흐름을 가장 활발하게 해주는 형태이기 때문이라 생각한다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는  $O_{3Y}$ 을 개선하기 위하여 DBD오존발생기의 내부전극을 Normal형, Hall형 및 Screw형으로 제작 구성하고 그 방전특성과 오존생성특성에 대해 연구하였다.

그 결과 내부전극별 방전전류 실효값은 Screw형, Hall형>Normal형 순으로 Screw형이 다른 내부전극에 비해 높았으나 오차를 고려할 경우 그 차이가 미미하여 내부전극별 방전특성은 동일하다고 할 수 있다.

오존생성특성은  $Q=0.6\ell/\text{min}$ 일 경우 Screw형 내부전극은 Normal형 내부전극에 비해  $O_{3Y}$ 가 약 4배 높고 Hall형 내부전극과는 비슷한 특성을 보인다. 반면  $Q$ 를 증가시킨  $Q=1.0\ell/\text{min}$ 일 때,  $O_{3Y}$ 는 Normal형 내부전극에 비해  $O_{3Y}$ 는 7배 증가하였고, Hall형 내부전극에 비해  $O_{3g}$  및  $O_{3Y}$ 가 약 1.5배 증가하였다.

동일한 전극 표면적일 경우 Screw형 내부전극과 Hall형 내부전극은 오존발생기 내부공간에 원료가스가 통과하는 시간을 늘려 오존생성반응이 충분히 일어나도록 유도할 수 있고, 발생하는 열도 유체의 흐름을 활발히 함으로써 냉각효과가 발생하기 때문이라 생각한다. 이상의 결과로 본 논문에서 제안한 Screw형 내부전극을 Normal형 내부전극 대신 적용한다면 오존생성수율을 최대 7배 상승시킬 수 있을 것이다.

앞으로 Screw형 내부전극과 냉각장치를 함께 적용하였을 경우 오존발생특성에 대한 실험을 추가적으로 할 예정이다. 또한 Screw형 내부전극 표면의 거칠기를 증가시키고 유체의 흐름을 막는 형태의 내부전극에 관한 실험을 추가적으로 할 예정이다.

#### References

- [1] Byung-Joon Chun, Kwang-Sik Lee, Temperature Dependence Characteristics of Double Cylindrical Type Ozonizer Combined Discharge Type Ozonizer(CDO) Vol.3-C, No.3, pp.106~112, AUG 2003, KIEE.
- [2] J AC Gentile, MJ Kushne "Microstreamer dynamics during plasma remediation of NO using atmospheric pressure dielectric barrier discharges", J. Appl. Phys, 79, 3877 1996.
- [3] Y Nakata, R Mabuchi, K Teranishi, 'Effect of small-diameter coaxial reactors on ozone production using nanosecond pulsed power' IEEE Vol20,1146 - 1152, 2013.
- [4] C. Yamabe "Ozone Generation Technologies and their Applications", IEEJ Trans. FM, vol. 126, no. 9, pp.874 - 877 2006.
- [5] I. Chalmers, L. Zanella, S. J. MacGregor and I. A. Wray "Ozone generation by pulsed corona discharge in a wire cylinder arrangement", IEEE Colloquium Digest, vol. 29, pp.1 - 4 1994.
- [6] W.J.M. Samaranayake, Y. Miyahara, T. Namihira, S. Katsuki, R. Hackam and H. Akiyama "Pulsed streamer discharge characteristics of ozone production in dry air", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 7, pp.254 - 260 2000.
- [7] N. Shimomura, H. Togo, F. Fukawa and H. Akiyama "Consideration of discharge reactor to exploit nanosecond pulsed power", IEEE 26th Int'l. Power Modulator Sympos., pp.391 - 394 2004.
- [8] V. I. Gibalov and G. J. Pietsch "On the Performance of Ozone Generators Working with Dielectric Barrier Discharges", Ozone: Sci. Eng., vol. 28, pp.119 - 124 2006.
- [9] M. X. McDonough , C. A. Campabadal , L. J. Mason , D. E. Maier , A. Denvir and C. Woloshuk "Ozone application in a modified screw conveyor to treat grain for insect pests, fungal contaminants, and mycotoxins", J. Stored Prod. Res., vol. 47, no. 3, pp.249 - 254 2011.
- [10] K. M. Crowe , D. Skonberg , A. Bushway and S. Baxter "Application of ozone sprays as a strategy to improve the microbial safety and quality of salmon fillets", Food Contr., vol. 25, no. 2, pp.464 - 468 2012.
- [11] J. H. Choi , I. Han , H. K. Baik , M. H. Lee , D.-W. Han , J.-C. Parb , I.-S. Lee , K. M. Song and Y. S. Lim "Analysis of sterilization effect by pulsed dielectric barrier discharge", J. Electrostat., vol. 64, no. 1, pp.17 - 22 2006.
- [12] K. Yanallah , F. Pontiga , A. Fernandez-Rudea and A. Castellanos "Experimental investigation and numerical modelling of positive corona discharge: Ozone generation", J. Phys. D, Appl. Phys., vol. 42, no. 6, pp.065202-1 - 065202-4 2009.
- [13] B. Dhandapani and S. T. Oyama "Gas phase ozone decomposition catalysts", Appl. Catal. B, Environ., vol. 11, no. 2, pp.129 - 166 1997.
- [14] M. Shimada, G. R. Tynan, and R. Cattolica, "Rotational and translational temperature equilibrium in an inductively coupled plasma," J. Vac. Sci. Technol. A 24(5), 2006, pp.1878-1884.

- [15] T. Matsumoto, D. Wang, T. Namihira, and H. Akiyama, "Gas temperature measurements of nano-seconds pulsed discharge based ozonizer," Proc. of 18th IEEE International Pulsed Power Conference, 2011, pp.1088-1092.
- [16] L.-S. Wei, D.-K. Yuan, Y.-F. Zhang, Z.-J. Hu and G.-P. Dong "Experimental and theoretical study of ozone generation in pulsed positive dielectric barrier discharge", Vacuum, vol. 104, pp.61 -64 2014.

◇ 저자소개 ◇



**권영학**(權泳學)

1962년 2월 13일생. 2011년 2월 숭실사이버대학교 소방방재학과 졸업. 2013년 8월 영남대학교 공학대학원 산업안전학과 졸업(석사). 2015년 영남대학교 대학원 스마트산업안전학과 박사 수료. 현재 한국농어촌공사 재직 중.



**박현미**(朴現美)

1982년 1월 6일생. 2003년 8월 경일대학교 전기공학과 졸업. 2005년 8월 영남대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 영남대학교 전기공학과 박사 수료. (주)메디스윙 대표.



**송현직**(宋炫直)

1968년 7월 30일생. 1991년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 1993년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 2006년~현재 영남이공대학 전기자동화과 부교수. 현재 한국조명·전기설비학회 대구경북지회.



**박원주**(朴元住)

1954년 3월 14일생. 1978년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 1980년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 3월 큐우슈대학 대학원 졸업(박사). 1994년~현재 영남대학교 전기공학과 교수. 현재 본 학회 부회장.