

비열 방전 플라즈마에 의한 실내 공기 청정기술 연구

(Study on the Indoor Air Purification Technology by Using Nonthermal Plasma)

정재승* · 이현경 · 김진규**

(Jae-Seung Jung · Heon-Gyeong Lee · Jin-Gyu Kim)

Abstract

For the purpose of indoor air purification, air conditioner or purifier is generally used, but the long operating time induced the contamination by cumulation of bacteria in the air filter. The ozone sterilization method can be one of the effective sterilization method for this case. Ozone has not leave a secondary residual contaminants, as well as a strong sterilization power. In this study, nonthermal plasma technology is investigated as an ozone generator for the air filter sterilization. Additionally, nonthermal plasma technology is possible to obtain the generation of negative ions and electrostatic force by simply adjusting the applied voltage.

Key Words : Corona Discharge, Nonthermal Plasma, Ozone

1. 서 론

현대인들은 일상생활의 대부분을 실내에 채류하기 때문에 실내공기 오염 및 정화에 많은 관심을 가지고 있다. 실내공기 오염의 발생 요인은 곰팡이, 부유분진, 석면, 각종 미생물 등과 같은 내부 발생 오염 요인과 미세먼지, 황사 등과 같이 외부 유입 오염 요인으로 분류할 수 있으며[1-2], 이들에 의한 실내 오염 문제를 해결하기 위해 방법으로 가장 일반적인 것이 공기청

정기이다. 공기청정기에 사용되는 정화용 필터의 경우 주로 정전필터를 이용하는 것이 보편적이지만, 장기간 사용 시 필터와 공기통로 내부에는 습기, 이물질의 축적 등에 의해 각종 세균이 증식할 가능성이 높아지고 이로 인해 오염된 공기가 공기청정기의 외부로 방출되어 실내공기를 재 오염시키게 된다. 그리고 필터가 장시간 외부에 노출됨에 따라 필터에 하전된 정전하의 감소와 필터 섬유의 뭉침 현상 등에 의한 필터 표면적 감소에 의해 필터가 가지는 정화효과 또한 감소하게 되므로[3] 공기청정기의 성능을 유지하기 위해서는 필터의 주기적인 교환이 필요하다.

실내 공기 정화용 필터의 세균 살균방법으로는 조사법(UV법), 가스법, 전기 방전법 등이 있다. 이 중 전기 방전법은 전기 방전에 의한 비열 방전 플라즈마로 발생하는 오존(O₃)과 활성종을 이용한 살균법으로[4-5], 특히 오존의 강한 산화작용을 이용한 것이다. 비열 방

* Main author : Korea Electrical Engineering & Science Research Institute, Senior Researcher, Ph D.
** Corresponding author : Dept. of Electrical Engineering, Kyungpook National University, Professor
Tel : 053-950-7226, Fax : 053-950-6600
E-mail : kjg@knu.ac.kr
Received : 2015. 10. 2.
Accepted : 2015. 12. 19.

전 플라즈마에 의해 발생된 오존은 강한 산화능력과 더불어 단시간 내에 산소로 환원되기 때문에 잔류 오염 물질을 발생시키지 않는다는 장점이 있어[6], 대기 오염 물질의 제거, 수질 정화, 살균, 탈취 등 산업전반에 걸쳐 다방면으로 응용되고 있다. 오존 살균의 경우, 일반적으로 많이 알려져 있는 대장균, 고초균, 포도상구균 등과 같은 세균들을 살균하기 위해서 1~2ppm 정도로 약 90초 정도의 살균시간이 소요된다. 또한 이러한 강한 살균력은 인체에도 지대한 영향을 끼칠 수 있으므로 적절한 살균력을 갖도록 효과적인 오존발생과 더불어 살균 후 잔여 오존 제거(생활환경 기준치, 0.1ppm/8h) 기술에 대한 연구가 필요하다[7].

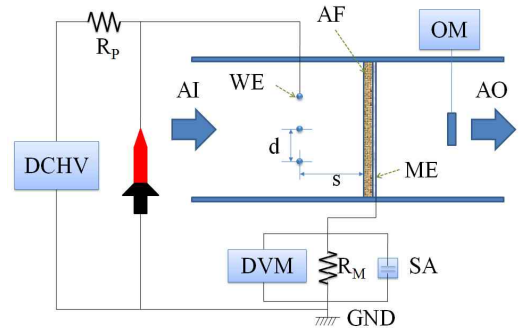
지금까지 연구된 오존발생장치에는 유전체 장벽방전, 전위방전, 펄스 코로나 방전, 표면방전, 무성방전, 글로우 방전 등이 있으며, 이 중 코로나 방전방식이 가장 단순한 구조를 가지면서 강한 불평등전계를 형성하여 오존을 효율적으로 발생시킬 수 있는 방법으로 알려져 있다[8-10]. 본 연구는 불평등전계에 의한 코로나 방전이 가능한 선대 그물형 전극구조를 적용한 실내 공기 정화용 필터 살균용 오존 발생장치에서의 전기적 특성 및 오존발생 특성에 대한 연구이다.

2. 실험장치 및 방법

그림 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도로서, 직육면체 아크릴 챔버(단면적 : $470 \times 250 \text{mm}^2$) 내부에 코로나 전극인 선전극과 그물형인 유도전극으로 구성된 오존발생장치를 설치하였다. 선전극은 직경 0.2mm, 길이 230mm인 스테인리스강(stainless steel 402) 재질로 제작되었으며, 유도전극은 스테인리스강 재질의 그물전극($230 \times 205 \text{mm}^2$)이다. 공기 정화용 필터(현대자동차용 실내필터, $230 \times 205 \text{mm}^2$, 두께 2mm)는 선전극과 그물전극 사이에 삽입되었다. 그 외에 직류고전압 전원장치(Spellman, SL600), 오존 모니터(In USA, IN-2000), 고전압 프로브와 디지털멀티미터(DVM, Yokogawa, 73401), 측정저항, 보호저항 등이 사용되었다.

선전극들은 동일한 간격(d)으로 배치되었고 그물전극과의 간격(s)은 20.0mm으로 고정하였으며, 선전극

수(N)와 인가전압(V_A)에 따른 방전 전류(I_C), 오존 발생량을 측정하였다. 원활한 코로나 방전의 발생을 위한 조건, $d \gg s$ 가 성립할 수 있도록 N의 최대값을 7개로 제한하였다[10]. 선전극에 인가되는 V_A 와 I_C 는 DVM, 고전압 프로브, 측정저항(1.00k Ω)을 사용하여 측정하였다. 오존측정은 접지 전극으로부터 280mm 후방에서 오존을 샘플링하여 오존 발생장치 내부에서 발생하는 평균 오존을 측정하였다. 실험은 외부와 차단된 온도 24.5 $^\circ\text{C}$, 습도 45%인 실험챔버 내에서 수행되었다.



(a) Schematic of the experimental set-up



(front side) (rear side)
(b) Photograph of the experimental set-up

| | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| DCHV : DC high voltage supply | R_p : Protection resistor |
| AI : Air inlet | WE : Wire type electrode |
| DVM : Digital multimeter | AF : Air filter |
| R_m : Measurement resistor | ME : Mesh type electrode |
| SA : Surge arrester | OM : Ozone monitor |
| AO : Air outlet | |

Fig. 1. Experimental set-up

3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 N에 따른 V_A - I_C 특성곡선을 나타낸다.

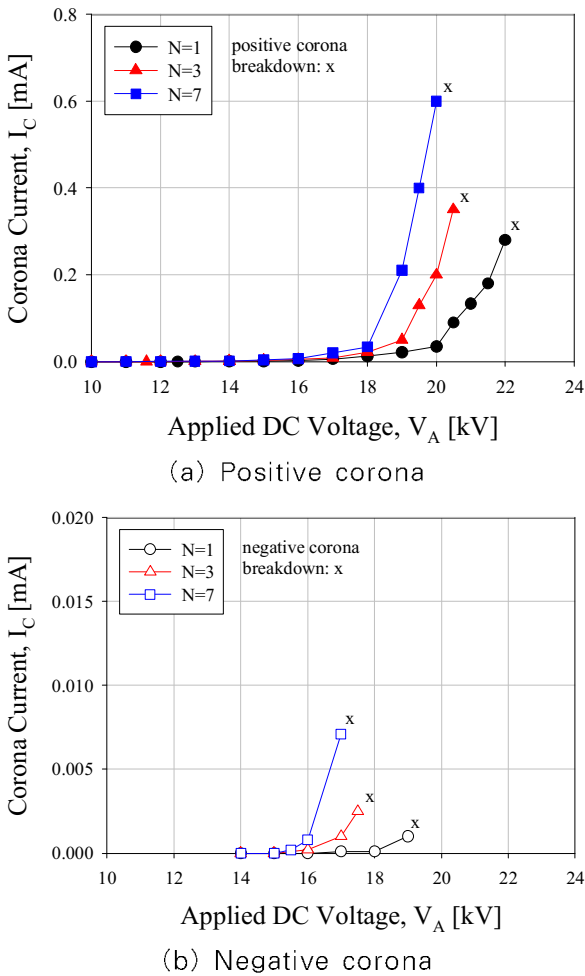


Fig. 2. I-V characteristics for the number of the corona electrodes

선전극에 직류 고전압을 인가하면 코로나 방전개시전압(V_C) 이후에 방전 전류가 급격히 증가하다가 절연 파괴전압(V_B) 이상의 전압이 인가되면 절연파괴로 이행되는 전형적인 코로나 방전 특성을 보인다. 동일한 V_A 에서는 N 이 증가함에 따라 I_c 가 증가하지만, 그림 2에서 나타난 것처럼 정극성 코로나 방전에 비하여 부극성 코로나 방전의 경우는 $1/80 \sim 1/300$ 정도로 I_c 가 매우 작게 나타난다.

방전간격과 선전극 간격의 비, $2s/d < 0.75$ 이므로 V_C 에 대한 s 의 영향은 무시할 수 있게 되며, V_C 는 다음 식 (1)처럼 d 에 의해 결정된다[11].

$$V_C = r_0 E_C \ln \frac{d}{r} \quad (1)$$

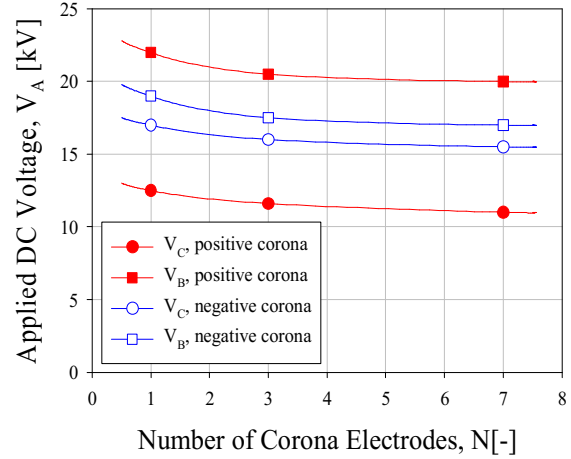


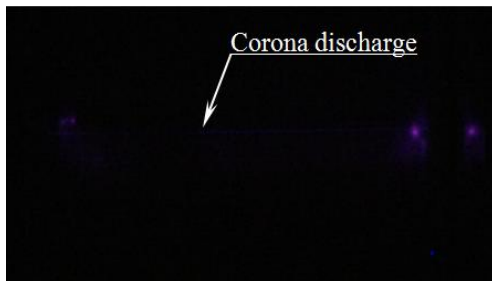
Fig. 3. Breakdown characteristics of the reactor

본 실험에서 d 가 일정하므로 V_C 는 N 의 변화에 무관하게 일정한 값을 가져야 하지만, 실험결과, 그림 3에서 나타난 것처럼 N 이 1에서 7로 증가하였을 때, V_C 는 1.5kV, 절연파괴전압, V_B 는 2kV 감소하였다. 이는 V_C , V_B 가 전계의 불균형 정도 뿐만 아니라 방전 공간 및 방전 전극 간에 삽입된 필터에서의 전하 축적에 의한 전계 왜곡과 이에 의한 필터상의 표면 방전에 의해서도 영향을 받기 때문으로 사료된다.

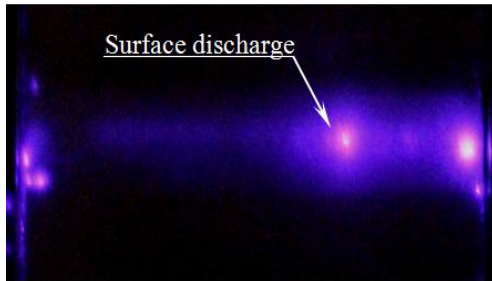
그림 4은 본 실험에서 나타난 방전현상의 사진이다. 정극성 코로나 방전의 경우 $V_A=18kV$ 일 때, 그림 6 (a) 처럼 불평등 전계에 의한 코로나 방전이 선전극 인근에서 발생한다. 이후 V_A 가 점차적으로 상승하여 코로나 방전에 의해 발생한 이온들이 필터 상에 충분히 축적된 후부터는 필터의 기공을 통해 축적된 이온들이 유도전극으로 이동하여 표면방전이 발생됨을 그림 4 (b)와 (c)에서 확인할 수 있다. 이로 인하여 코로나 전극에서 뿐만 아니라 필터 상의 표면 방전에 의해서도 오존이 발생하게 되므로 오존 발생 효율이 증가한다 [12-13].

그림 5는 N 에 따른 O_3-V_A 특성곡선을 나타낸다. 부극성 코로나 방전의 경우, 그림 2 (b)와 그림 3에서 나타난 것처럼 코로나 개시 후 절연파괴로 이행되는 구

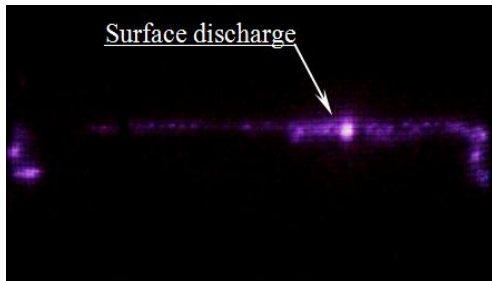
간이 작고, 오존 발생에 필요한 코로나 방전이 충분히 활성화되지 않으므로 오존이 측정되지 않는다. 따라서 정극성 코로나 방전 시에만 오존이 측정된다. O_3 - V_A 특성곡선은 그림 2 (a)의 V_A - I_C 특성곡선과 유사하며, 코로나 방전이 시작된 후 V_A 가 19kV 이상 증가한 후부터 발생하기 시작하고, 최대 오존 발생량은 절연과피 직전에서 나타난다. 동일한 V_A 에서의 오존 발생량은 N 이 증가할수록 증가하며, 이는 오존 발생 영역인 코로나 방전 영역의 증가에 의한 것이다. 본 실험 조건에서 얻을 수 있는 최대 오존 발생량은 $N=7$ 일 때 18ppm 정도이다.



(a) corona electrode (front side, $V_A=18kV$)



(b) surface discharge (front side, $V_A=20kV$)



(c) surface discharge (rear side, $V_A=20kV$)

Fig. 4. Photographs of electric discharge of reactor

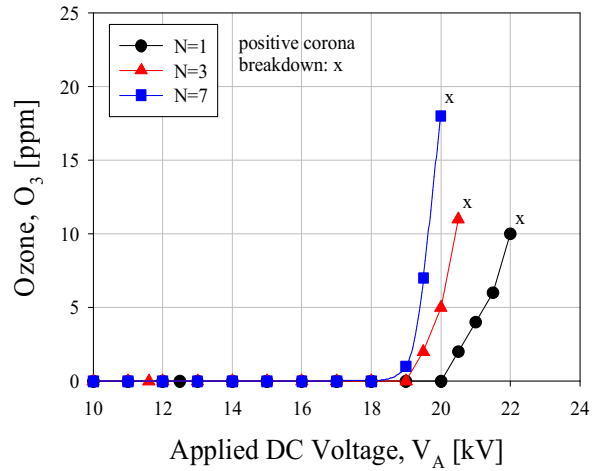


Fig. 5. O_3 - V characteristics for the number of the corona electrodes

오존 발생 시 전력 효율(η)은 식 (2)로 계산되며, N 에 따른 η 의 차이를 그림 6에 나타내었다.

$$\eta = \frac{O_3}{P} = \frac{O_3}{V_A I_C} \quad (2)$$

그림 6에 나타난 것처럼 오존 발생량이 증가할수록 η 의 증가폭이 완만해지며 포화되는 특성을 나타낸다.

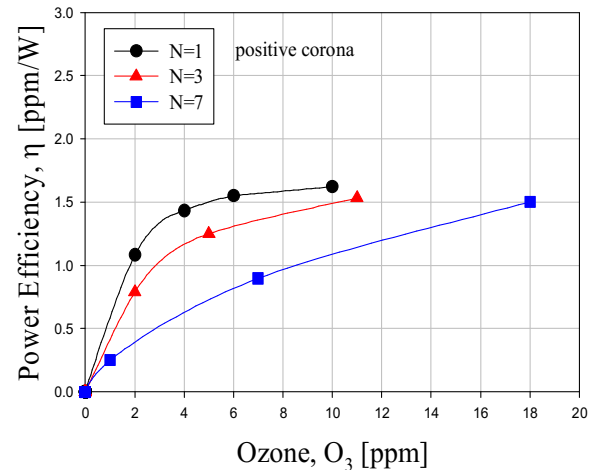


Fig. 6. Power efficiency of O_3 generation

N 의 증가에 따라 오존 발생량이 증가하는 비율에 비해 방전 전류의 증가량이 더 크게 나타나므로 η 는 N 이 증가할수록 감소하는 특성을 보인다. 따라서 동

일한 전력에서는 N이 작을수록 오존 발생량이 더 크게 나타나게 된다. 이는 N의 증가에 의해 오존 발생영역인 코로나 방전 영역이 증가하므로 최대 오존 발생량은 증가하게 되지만 선전극간의 전계 간섭과 실험 챔버 내 방전공간의 한계에 의해 각 선전극당 오존발생량이 감소하기 때문으로 사료된다.

Table 1. Electric characteristics of the reactor

| 선전극수 (-) | 전압 (kV) | 전류 (μA) | 전력 (W) | 오존 (ppm) | 효율 (ppm/W) |
|----------|---------|---------|--------|----------|------------|
| N=1 | 21.0 | 0.133 | 2.793 | 4 | 1.432 |
| | 22.0 | 0.280 | 6.160 | 10 | 1.623 |
| N=3 | 19.5 | 0.130 | 2.54 | 2 | 0.790 |
| | 20.5 | 0.350 | 7.180 | 11 | 1.530 |
| N=7 | 19.0 | 0.210 | 3.990 | 1 | 0.251 |
| | 20.0 | 0.600 | 12.000 | 18 | 1.500 |

표 1은 실험에 사용된 방전장치의 전기적 특성, 오존 발생량, 전력대비 오존 발생 효율을 나타낸다. 최대 오존 발생량은 N=7인 경우가 N=1, 3인 경우보다 1.8, 1.6배 더 많지만, η는 1.5~1.6 정도로 큰 차이를 보이지 않는다. 필터 살균에 필요한 오존 농도는 약 2ppm 정도의 낮은 농도이므로, N=1인 경우 전력효율 면에서는 보다 적합하다. 그러나 필터에 발생하는 표면방전을 살균에 이용하기 위해서는 표면방전을 넓게 일으킬 수 있도록 N이 커야 할 필요가 있다.

Table 2. Characteristics of negative ion generation

| 코로나 극성 | 전압 (kV) | 전류 (μA) | 이온 (-) | |
|---------|---------|---------|--------|-----|
| 정극성 코로나 | 16 | 16.2 | +ion | 0 |
| | | | -ion | 265 |
| 부극성 코로나 | -16 | -9.3 | +ion | 0 |
| | | | -ion | 232 |

표 2는 코로나 방전에 의한 이온 발생량을 나타낸 것이다. 상기한 것처럼 부극성 코로나 방전의 경우, N과 무관하게 V_C=-16kV에서 코로나 전류가 측정되기 시작하여, -17~-19kV에서 방전 전극간에 아크가 발

생된다. 따라서 방전 전극간의 코로나 방전구간이 짧고 지속적인 이행이 되지 않아 발생된 오존은 측정되지 않았다. 그러므로 부극성 코로나 방전의 경우 오존에 의한 필터 살균은 불가능하지만 오존이 발생하지 않는 16kV 이하의 저전압 영역에서는 정극성 코로나 방전과 더불어 음이온이 측정되며, 그 발생량은 표 2에 나타난 것처럼 정극성 코로나에서 265, 부극성 코로나에서는 232개 정도로 측정되었다.

4. 결 론

본 연구는 실내 공기 청정기술에 필요한 공기 정화용 필터에 대한 연구로써 단순한 비대칭 구조의 비열 방전 플라즈마 장치를 필터에 적용하여 실험적으로 연구하였으며 그 결과는 다음과 같다.

실험에 사용된 비열 방전 플라즈마 장치의 전기적 특성과 오존발생 특성에 대한 실험 결과, 코로나 방전에 의한 필터상의 전하의 축적과 방전에 의해 보다 효율적이 오존의 발생이 가능함을 확인하였다. 최대 오존 발생량은 N=7인 경우가 N=1, 3인 경우보다 1.8, 1.6배 더 많지만, η는 1.5~1.6 정도로 큰 차이를 보이지 않는다. 필터 살균에 필요한 오존 농도는 약 2ppm 정도이므로, N이 적어도 충분한 발생이 가능하지만 필터에 발생하는 표면방전을 살균에 이용하기 위해서는 N이 큰 것이 더 효율적일 수 있을 것으로 사료된다. 또한 오존이 발생하지 않는 낮은 방전전압 영역에서는 음이온을 발생시킬 수 있으며, 필터에 정전력을 부여할 수 있으므로 필터의 미세입자 포집 능력의 저하를 방지할 수 있을 것으로 사료된다.

향후 연구에서는 공기 정화용 필터의 장시간 사용에 따른 오존, 음이온, 정전력 강화 및 검증에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

References

- [1] J. J. Yee, "Indoor Air Pollution and Ventilation System", Air-Conditioning and Refrigeration 24, 1, pp. 1-13, 1995.
- [2] S. G. Hong, Y. T. Jeong, G. H. Cheon, S. Y. Baek, "Isolation and Identification of Bacteria from Air Conditioners and its Hygiene", The Korean Journal of

Microbiology 39, 4, pp. 283-287, 2003.

[3] J. H. Ji, S. H. Kang, J. Hwang, G. N. Bae, "Effect of Particle Loading on the Collection Performance of an Electret Cabin Air Filter for Submicron Particles", Transactions of the KSME B, 26, 8, pp. 1102-1114, 2002.

[4] S. G. Hwang, H. K. Choi, Y. J. Song, C. G. Yoon, J. E. Lee, H. Y. Shin, "A study on the Lighting Fixture with Sterilization Feature about Airborne Bacteria", Proceedings of KIEE Autumn Annual Conference 2010, pp. 19-21, 2010.

[5] N. Mastanaiah, P. Banerjee, J. A. Johnson, S. Roy, "Examining the Role of Ozone in Surface Plasma Sterilization Using Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma", Plasma Processes and Polymers, 10, 12, pp. 1120-1133, 2013.

[6] S. Pekarek, "Ozone production of hollow-needle-to-mesh negative corona discharge enhanced by dielectric tube on the needle electrode", Plasma Sources Science and Technology. 23, 6, 062001, 2014.

[7] W. J. Kowalski, W. P. Bahnfleth, T. S. Whittam, "Bactericidal Effects of High Airborne Ozone Concentrations on Escherichia coli and Staphylococcus aureu", Ozone Science & Engineering, 20, pp. 205-221, 1998.

[8] K. Teranishi¹, N. Shimomura¹, S. Suzuki, H. Itoh, "Development of dielectric barrier discharge-type ozone generator constructed with piezoelectric transformers: effect of dielectric electrode materials on ozone generation", Plasma Sources Science and Technology, 18, 4, 045011, 2009.

[9] Z. Buntat, I. R. Smith, N. A. M. Razali, "Ozone Generation by Pulsed Streamer Discharge in Air", Applied Physics Research, 1, 2, pp. 1-10, 2009.

[10] Z. Buntat, I. R. Smith, N. A. M. Razali, "Ozone generation using atmospheric pressure glow discharge in air", Journal of Physics D: Applied Physics, 42, 23, 235202, 2009.

[11] A. D. Moore, Editor, Electrostatics and Its Applications, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., USA, pp. 188-198, 1973.

[12] J. S. Jung, J. D. Moon, "Corona discharge and ozone generation characteristics of a wire-plate discharge system with a glass-fiber layer", Journal of electrostatics, 66, 5-6, pp. 335-341, 2008.

[13] J. S. Jung, J. D. Moon, "Effective Ozone Generation with a Wire-Wire-Type Nonthermal Plasma Reactor With a Slit Barrier", IEEE-IA, 44, 5, pp.1391-1396, 2008.

◆ 저자소개 ◆



정재승 (鄭在勝)

1978년 4월 14일생. 2004년 경북대학교 공대 전자전기공학부 졸업. 2007년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 경북대학교 대학원 전자전기 컴퓨터학부 졸업(박사). 2015년~현재 기초전력연구원 선임연구원.



이헌경 (李憲京)

1990년 2월 11일생. 2015년 2월 경북대학교 전기공학과 졸업. 2015년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



김진규 (金振圭)

1967년 2월 24일생. 1990년 경일대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1994년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년 경북대학교 전자전기공학부 BK21조교수. 2001~2008년 상주대학교 전자전기공학부 부교수. 2008~2012년 경북대학교 산업전자전기공학부 부교수. 2012년~현재 경북대학교 IT대학 전기공학과 교수. 현재 본 학회 대구·경북지회 재무이사 및 본 학회 평의원.