

Water Droplet Ejection Characteristics of a Wet Porous Point-Plate Airgap

정재승* · 이우석** · 문재덕†
(Jae-Seung Jung · Woo-Seok Lee · and Jae-Duk Moon)

Abstract - Water droplet ejection characteristics of a point-to-plate airgap, with a wet porous point as a corona electrode, has been investigated. And the water droplet traces, charge, mass and number were measured experimentally. More particles are observed with wet porous point than metal point because the corona-discharging wet porous point can eject a number of water droplets. The water droplets ejected from the positive-corona-discharging wet porous point showed very fine traces as compared with those from the negative-corona-discharging wet porous point. Moreover, the water droplets ejected from the AC-corona-discharging wet porous point showed granular-like larger traces. It was shown that the weak corona discharge can eject smaller water droplets with larger ratio of mass-to-charge than the intense corona discharge.

Key Words : Wet porous point, Point-to-plate airgap, Water droplet ejection, Water droplet trace, Charge-to-mass ratio.

1. 서론

반도체 집적회로의 전자소자의 발열밀도는 이미 태양표면 정도에 이르고 있어[1], 기존의 전기 송풍기로서는 이들 전자소자들의 효과적인 냉각은 매우 불충분한 실정이다[2]. 코로나 방전의 전기유체역학적(electrohydrodynamic, EHD) 특성을 이용한 기체 펌프(gas pump)는 풍속의 발생과 제어가 용이하고, 기계적 회전부분이 없어 마찰에 의한 마모와 소음이 없는 장점을 가지고 있어서[3-5], 최근 이 특성을 전자소자 냉각기구로 이용하고자 하는 연구가 많이 수행되고 있다[6-8].

현재 연구되고 있는 EHD 펌프는 주로 침-평판 또는 선-원통 전극구조를 가지나[3-6], 아직 실제 적용하기에는 풍속이 충분하지 못한 문제점이 있다[3,6]. 한편, 침-평판 전극구조의 침전극 대신에 다공성(多孔性)의 수침(水針)을 적용한 연구가 수행된 바 있고, 수침을 적용한 경우가 금속침의 경우보다 이온풍속이 증가하고, 이온풍발생효율도 개선됨을 확인할 수 있었으나[9,10], 그 증가 및 개선의 원인에 대한 연구는 아직 수행된 바 없었으므로, 수침을 적용한 경우의 이온풍 발생기구에 대한 기본적 원인 규명에 대한 연구는 보고되지 않았다.

본 연구는 공기중 다공성 수침-평판 전극구조의 다공성의

수침을 적용한 공기 펌프[9,10]의 풍속향상의 원인 검토를 위한 기초 연구로서, 수침상의 직류(정 및 부)와 교류 코로나 방전으로부터의 전기유체역학적 수적발생특성, 수적의 흔적과 입경분포, 수적의 전하량과 비전하량(charge-to-mass ratio) 특성을 실험적으로 조사하였으며, 그 결과를 동일규격의 금속 침전극 특성과 비교하여, 다공성의 수침을 적용한 공기 펌프[9,10]의 풍속향상의 요인과 가능성을 실험적으로 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

그림 1은 실험장치의 개략도로서, 다공성 수침과 금속평판 전극으로 구성된 방전장치, 고전압 전원, 금속평판 전극 상에 설치된 절연체 집시 및 절연지, 전압 및 전류 측정장치, 그리고 실험 챔버로 구성되어 있다.

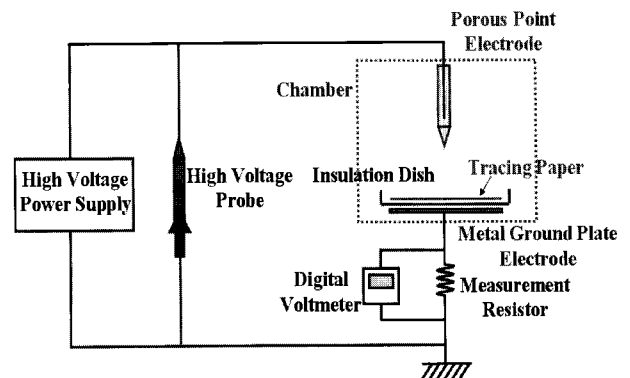


그림 1 실험장치 개략도.

Fig. 1 Schematics of experimental set-up.

* 정 회 원 : 경북대 대학원 전자전기컴퓨터학부 박사과정

** 정 회 원 : 부산정보대학, 전기자동차과, 부교수 · 공박

† 교신저자, 펠로우회원 : 경북대 전자전기컴퓨터학부 교수 · 공박

E-mail : jdmoon@knu.ac.kr

접수일자 : 2009년 7월 20일

최종완료 : 2009년 8월 26일

방전장치는 실험 챔버(acrylic chamber, 길이 25 cm, 내경 12 cm, 두께 1 cm)속에 수침-평판 전극이 수직상으로 설치되어 있어서, 상부의 코로나 방전 수침에서 발생된 수적들은 정전력(및 중력)에 의해 하부의 평판 전극으로 이동하게 되고, 결국 하부의 평판전극 상에 설치된 절연체 접시(polyethylene, 지름 60 mm, 두께 0.3 mm)상에 놓여진 절연지(tracing paper, 지름 60 mm, 두께 0.08 mm)상에 정전 부착하게 되고, 수적의 흔적(trace)도 절연지상에서 관측되게 하였다.

인가된 전압과 전류는 디지털 전압계(Fluke 75), 고전압 프로브(1,000:1, Tektronix, P6015A), 측정저항 ($R=1.0\text{ k}\Omega$)을 이용하여 측정하였다. 챔버내의 입자경은 입자 측정장치(HHPC-6, ARTI)로 측정하였으며, 절연접시상에 정전 포집된 수적의 전하량(Q)은 오실로스코프 (Tektronix, TDS 3034B) 화면상에 나타난 면적($S = \int idt = \int vdt/R_I = Q_I$, $Q = Q_I =$ 오실로스코프상의 유도전하, $R_I = 1.0\text{ M}\Omega =$ 오실로스코프 입력저항)으로부터 산출하였다. 또 정전 포집된 수적의 질량(M)은 수적 포집전후의 절연체 접시의 질량차를 정밀 전자저울(AB204, METTLER TOLEDO)로 측정 산출하였다.

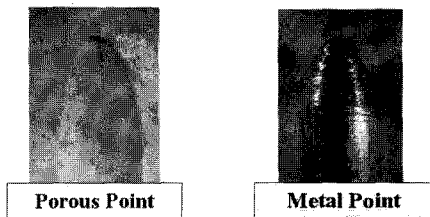
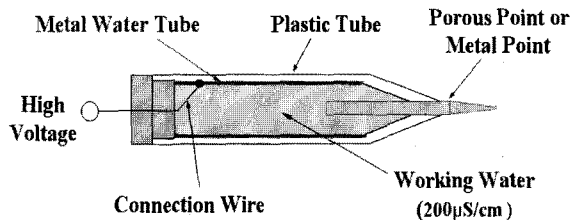


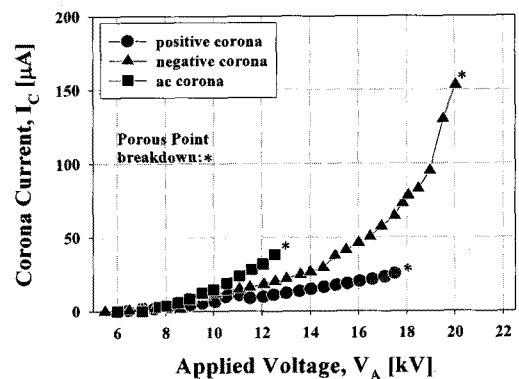
그림 2 방전전극 개략도와 수침 및 금속침의 확대사진.

Fig. 2 Schematics of discharge electrode and close-up configuration of porous point and metal.

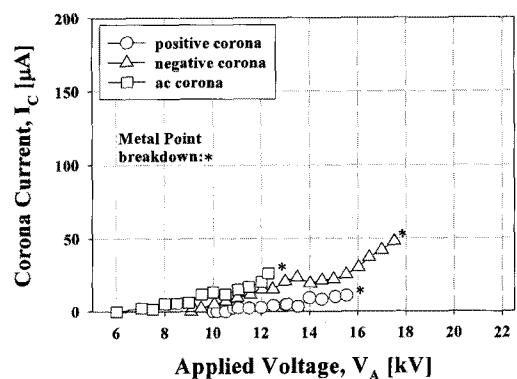
그림 2는 본 실험에 사용된 방전전극의 개략도와 수침과 금속침의 사진이다. 방전전극은 다공성 수침, 전압연결단자, 금속튜브 등으로 구성되어 있다. 다공성 침으로는 수성 펜촉(teflon, 곡률반경 0.37 mm, 지름 2.0 mm, 길이 20 mm, 기공성 35 %)이 사용되었다. 수침의 방전 및 입자 발생특성은 동일 규격의 금속침의 경우와 상호 비교하였다. 수침에 주입된 액체는 KCl 수용액(전도율: $200\text{ }\mu\text{S/cm}$)이 사용되었다. 다공성 수침을 수용액 저장 금속관(stainless steel, 두께 0.4 mm, 길이 113 mm, 외경 6.4 mm) 선단에 삽입되었으며, 고전압은 이 금속관과 수용액을 통하여 수침에 인가되게 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 3은 수침과 금속침의 전류-전압 특성을 나타낸 것이다. 수침과 금속침의 경우 모두 코로나 전류는 코로나 개시 전압에서부터 서서히 증가하여 절연파괴에 이르는 전형적인 침-평판형 전극구조의 방전특성을 나타내었다. 다공성 수침의 경우, 절연파괴 전압이 정 및 부극성, 교류 코로나에서 각각 17.5, 20.1, 12.7 kV로 금속침의 경우인 15.5, 17.5, 12.3 kV로 보다 높게 나타났다. 또 다공성 수침의 최대 코로나 전류도 정 및 부극성, 교류 코로나에서 각각 25.4, 153.0, 38.6 μA 로 금속침의 10.7, 48.0, 26.1 μA 보다 크게 증가하였다. 이는 다공성 수침을 이용할 경우, 동일한 전극간격에서 보다 큰 전압과 전류를 얻을 수 있으며, 더 효과적인 코로나 방전 및 수적의 발생 특성을 얻을 수 있어서, 금속침 전극에 비해 더 효과적인 것으로 이온풍을 발생시킬 수 있음을 보여준다.



(a) 다공성 수침



(a) 금속침

그림 3 수침과 금속침의 직류 및 교류 전압-전류 특성.

Fig. 3 I-V characteristics of porous point and metal point for DC and AC applied voltages.

그림 4는 적색 잉크(red ink)를 첨가한 수용액을 사용한 방전 수침으로부터 절연지(tracing paper)상에서 정전 포집된 수적 흔적을 인가전압(방전)의 극성과 크기에 따라서 나타낸 것이다. 그림 4에서 보듯이 정극성 코로나의 경우에는 매우 미세한 수적들이 방출되나, 부극성 코로나의 경우에는

상대적으로 큰 수적이 방출된다. 이는 정극성 코로나의 경우 주로 작은 전자들이 수침 표면의 수막과 충돌하며, 부극성 코로나의 경우는 상대적으로 큰 공기 분자 이온들이 수막에 충돌하기 때문에 상대적으로 큰 수적이 방출되는 것으로 사료된다.

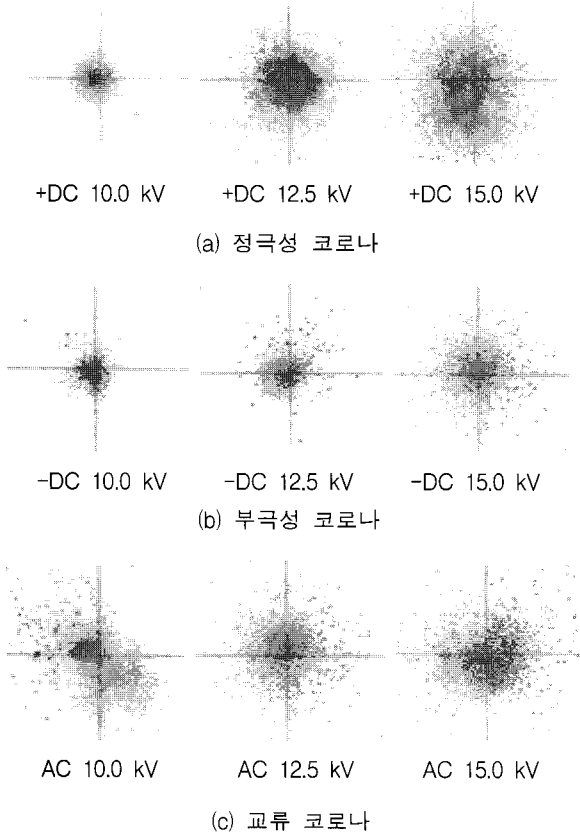


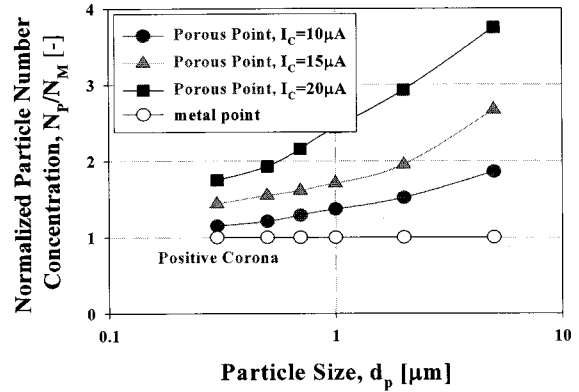
그림 4 코로나 방전 수침에서 방출되는 수적의 형상.
Fig. 4 Red-ink traces printed collected on the tracing paper for DC and AC corona discharges.

코로나 방전되고 있는 수침 선단부근에는 플라즈마 영역이 형성되고[15], 이때 플라즈마 영역에서 생성된 수침과 역극성 이온들은 수침과의 정전 인력($F=qE$)에 의해 정전에너지($W_E=Fx$, x :이온의 이동거리)를 갖게 되고, 이는 수침에 충돌하는 이온들의 충돌에너지($W_K=m_i v_i^2/2$, v_i :이온의 속도, m_i :이온의 질량)로 작용하게 된다. 결국 이들 역극성 이온들은 수침 선단을 덮고 있는 수막과 충돌하여 수적을 방출하게 된다.

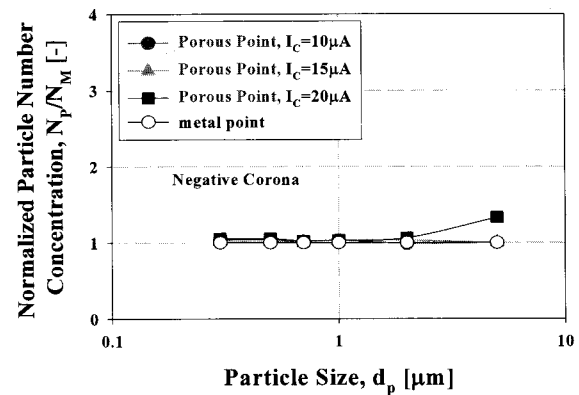
한편, 코로나 방전 수침 침단부근의 플라즈마 영역의 이온들 중 수침과 동일 극성을 가진 이온들은 수침과의 정전 척력($F=qE$)에 의해 정전에너지($W=Fx$, x :이온 이동 거리)를 가지고 금속판 전극으로 이동하게 되고, 공기중의 공기입자와 충돌하여 이온풍을 발생시키게 된다[4-6].

그림 4에서는 코로나 방전의 플라즈마영역에서 발생한 이온에 의한 수침 표면의 수막에 대한 충돌작용에 의해 수적의 발생 기구를 설명하였지만, 수적을 발생시킬 수 있는 전기 유체역학적인 작용력(EHD력)으로는 전계경사력(gradient

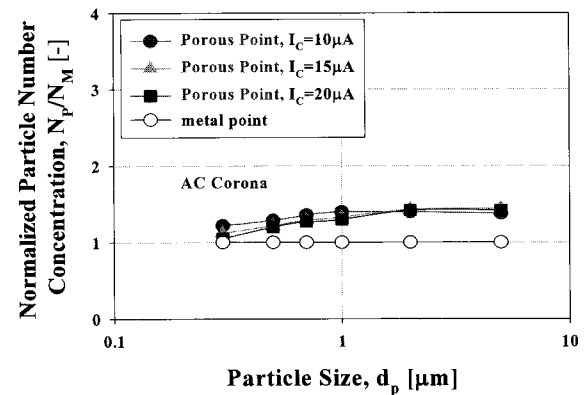
force)[11-14], 전기영동 및 유전영동력(electrophoresis-and-dielectrophoresis)[15], 침전단의 방전 열(discharge heat), 코로나 전류에 의한 열(Joule heat), 열영동력(thermophoresis)[16] 등이 부분적 또는 합력하여 작용할 것으로 사료되나, 구체적으로 연구 보고된 바는 아직 없다[9].



(a) 정극성 코로나



(b) 부극성 코로나

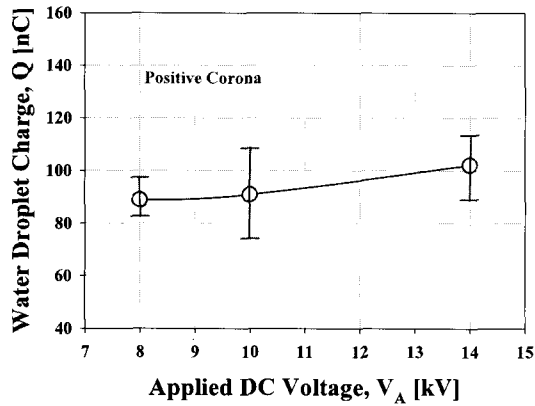


(c) 교류 코로나

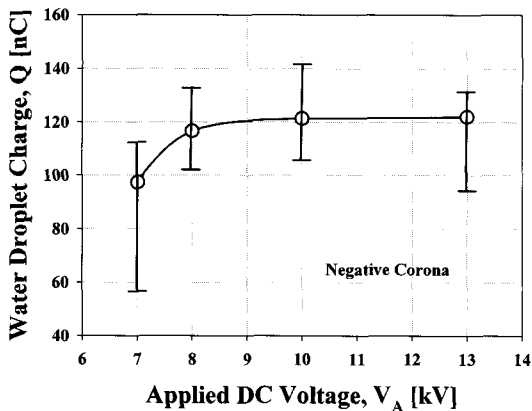
그림 5 방전 수침과 금속침에서 발생하는 입자수과 입경 비교 특성.

Fig. 5 Particle number and size distribution comparison between porous point and metal point electrode for DC and AC corona discharges.

그림 5는 실험 챔버내의 코로나 방전 수침과 금속침으로부터 측정된 입자수 특성을 상대적으로 나타낸 것이다. 금속침의 경우의 측정된 입자들은 주로 공기중에서 하전된 미진(微塵)들이지만, 수침을 이용한 경우에는 이들뿐만 아니라 수침에서 방출된 다수의 수적들이 함께 측정된 것이라고 생각된다. 그러므로 방전 전류가 동일한 경우, 금속침보다 수침이 더 많은 수의 입자를 발생하며, 방전 전류가 커질수록 입자수의 차이는 더 크게 나타나며, 특히 정극성 코로나 방전에서 현저하게 나타났다. 일례로, 수침의 방전 전류가 20 μ A인 경우, 입경이 5 μ m인 입자수(주로 수적들)는 금속침의 동일 입경의 입자수(주로 하전된 공기중의 미세 먼지)경우보다 3.75배로 큼을 보여준다. 이는 이온풍 발생에 다공성 수침이 더욱 효과적일 수 있을 것임을 보여준다[9].



(a) 정극성 코로나

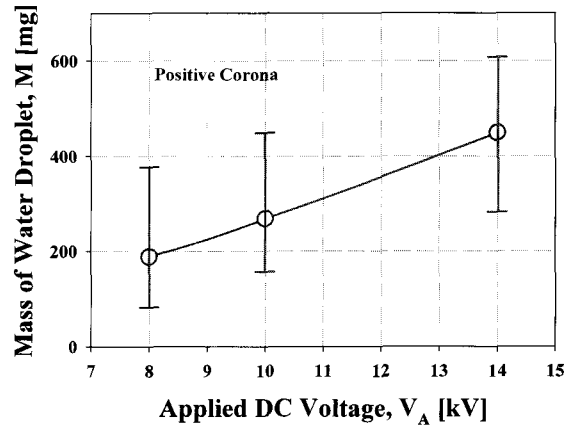


(b) 부극성 코로나

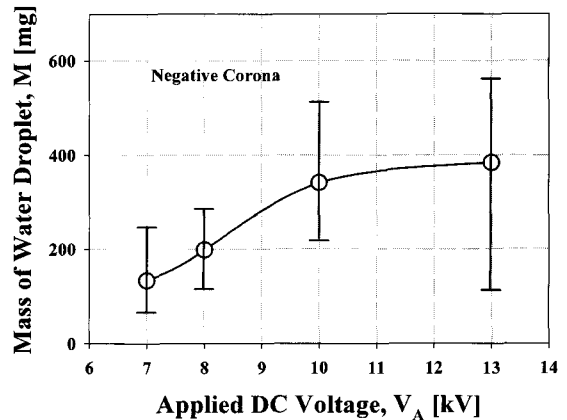
그림 6 방전 수침에서 방출되는 수적의 전하량 특성.
Fig. 6 Charge of water droplet ejected from the porous point for DC and AC corona discharges.

그림 6과 7은 코로나 방전중인 다공성 수침에서 방출된 수적의 전하량과 질량을 나타낸 것이다. 코로나 전류와 수적의 질량은 인가전압의 증가에 따라 증가하나, 수적의 전하량은 인가되는 전압의 증가에 비하여 상대적으로 적었다. 이는 그림 4에서 나타난 것처럼 인가전압의 증가에 따라 입경이 큰 수적의 다수 발생하고 이들이 절연지상에 정전 포집되며, 큰 수적 질량을 나타내게 된다. 한편 미세한 크기를

가진 수적들은, 수적 질량이 적지만 상대적으로 큰 표면적과 큰 전하량을 갖기 때문에, 평판전극에 도달하기 전에 증발(蒸發)되거나 또는 실험 챔버 표면에 정전 부착되어, 결국 평판전극에까지 도달하지 못하기 때문인 것으로 사료된다.



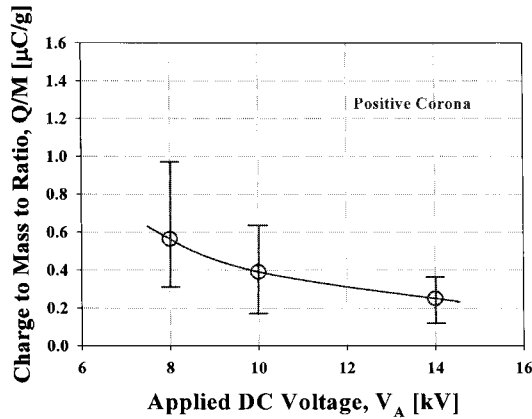
(a) 정극성 코로나



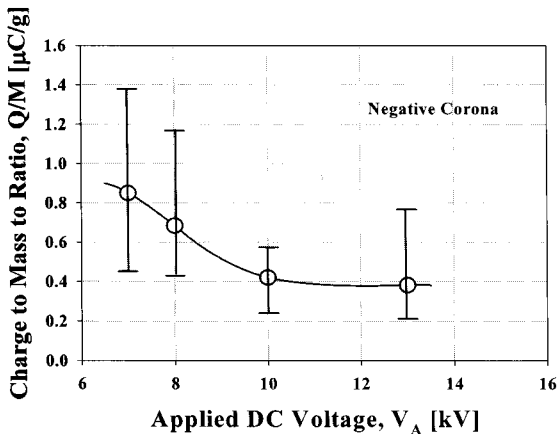
(b) 부극성 코로나

그림 7 방전 수침에서 방출되는 수적의 질량 특성.
Fig. 7 Mass of water droplet ejected from the porous point for DC and AC corona discharges.

그림 8은 코로나 방전 다공성 수침에서 방출되는 수적의 비전하량(charge-to-mass ratio, Q/M)을 나타낸 것이다. 그림 6과 7에서 나타난 것처럼 인가전압이 증가할수록 수침에서 방출되는 수적의 수는 증가하지만, 크기가 작은 수적의 소실(미세 수적의 증발 및 정전부착)된 양(또는 수)이 증가하므로, 평판전극상의 절연지상에서 도달되는 상대적으로 큰 입경의 수적의 전하량은 질량의 증가량에 비하여 작게 된다. 즉 코로나 방전 수침에서 방출된 수적의 전하량(Q)은 수적의 표면적(반경의 제곱, a^2)에 비례하여 증가하지만 수적의 질량(M)은 체적(반경의 세제곱, a^3)에 비례하여 증가하기 때문에, 결과적으로 인가전압이 증가할수록 다공성 수침에서 방출된 전체 수적의 양(또는 수)은 증가하지만, 비전하량(Q/M)은 감소하게 되는 것으로 사료된다.



(a) 정극성 코로나



(b) 부극성 코로나

그림 8 방전 수침에서 방출되는 수적의 비전하량 특성.
 Fig. 8 Charge-to-mass ratio of water droplet ejected from the porous point for DC and AC corona discharges.

4. 결 론

본 연구에서는 수침의 직류와 교류 코로나 방전으로부터의 전기유체역학적 수적발생특성, 수적의 흔적과 입경분포, 수적의 전하량과 비전하량을 실험적으로 조사한 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

수침에서 방출된 수적의 흔적의 크기는 코로나 방전의 극성과 인가전압의 크기에 따라 차이가 있었다. 즉 정극성 코로나의 경우가 부극성 코로나의 경우보다 미세한 수적 흔적을 나타내었으며, 교류 코로나의 경우에는 정 및 부극성 방전시의 입자발생 특성을 모두 나타내었다.

다공성 수침에서는 많은 수적을 발생시켰으며, 수침상의 방전전류가 증가할수록 발생하는 입자의 수도 더욱 증가하였다. 방출 수적수(또는 질량)와 전하량은 인가전압의 증가에 따라 증가하였지만, 수적의 비전하량(Q/M)은 인가전압의 증가에 따라 증가되지 않았다.

이상의 실험 결과는 제한한 다공성 수침에서 방출되는 많은 수적 입자수는 결국 이온풍속을 크게 증가시키는 중요한 요인으로 작용할 수 있음을 실험적으로 보여준다.

감사의 글

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2008-313-D00396)이며, 재단에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] G. D. Harvel, B. Komeili, C. Y. Ching, J.-S. Chang, "Electrohydrodynamically Enhanced Capillary Evaporator," IEEE Trans on DEI, Vol. 16, pp. 456-462, 2009.
- [2] F. Yang, N. E. Jewell-Larsen, D. L. Brown, K. Pendergrass, D. A. Parker, I.A. Krichtafovitch, A.V. Mamishev, "Corona driven air propulsion for cooling of electronics," XIIIth Int'l Symposium on High Voltage Engineering, pp. 1-4, 2003.
- [3] M. Rickard, D. Dunn-Rankin, F. Weinberg, F. Carleton, "Maximizing ion-driven gas flows," Journal of Electrostatics, Vol. 64, pp. 368-376, 2006.
- [4] R. Mestiri, R. Hadaji, S. B. Nasrallah, "The electrical discharge as a source of a mechanical energy," Desalination, Vol. 220, pp. 468-475, 2008.
- [5] L. Zhao, K. Adamiak, "EHD flow in air produced by electric corona discharge in pin-plate configuration," Journal of Electrostatics, Vol. 63, pp.337-350, 2005.
- [6] E. Moreau, G. Touchard, "Enhancing the mechanical efficiency of electric wind in corona discharge," Journal of Electrostatics, Vol. 66, pp. 39-44, 2008.
- [7] E. Moreau, L. Leger, G. Touchard, "Effect of DC surface-corona on a flat plate boundary layer for air flow velocity up to 25m/s," Journal of Electrostatics, Vol. 64, pp. 215-225, 2006.
- [8] J.-D. Moon, D.-h. Hwang, and S.-T. Geum, "An EHD Gas Pump utilizing a Ring/Needle Electrode," IEEE Trans on DEI. Vol. 16, pp. 352-358, 2009.
- [9] J.-D. Moon, J.-S. Jung, J.-G. Kim and S.-T. Geum, "An EHD Gas Pump Utilizing a Porous Point Electrode," IEEE Trans on DEI, Vol. 16, pp. 622-628, 2009.
- [10] 정재승, 문재덕, "수침대 그물전극형 방전장치의 이온풍 발생특성", 전기학회 논문지, 4호, 58권, pp. 783-787, 2009.
- [11] B. Komeili, J.-S. Chang, G. D. Harvel, C. Y. Ching, "Electrohydrodynamically Enhanced Capillary Evaporator," International Symposium on New Plasma and Electrical Discharge Applications and on Dielectric Materials, pp. 111-116, 2007.
- [12] A. Castellanos, Ed., Electrohydrodynamics, International centre for mechanical sciences courses and lectures - No.380, Springer Wein, New York, 1998.

- [13] J.-D. Moon, D.-H. Lee, T.-G. Kang, K.-S. Yon, "A capacitive type of electrostatics spraying nozzle," Journal of Electrostatics, Vol. 57, pp. 363-379, 2003.
- [14] J.-P. Borra, P. Ehouarn, D. Boulaud, "Electrohydrodynamic atomization of water stabilized by glow discharge - operating range and droplet properties," Journal of Aerosol Science, Vol. 35, pp. 1313-1332, 2004.
- [15] J.-S. Chang, A. J. Kelly, and J. M. Crowley, Ed., Handbook of Electrostatic Processes, Marcel Decker, Inc., 1995.
- [16] J. K. Walsh, A. W. Weimer, C. M. Hrenya, "Thermophoretic deposition of aerosol particles in laminar tube flow with mixed convection," Journal of Aerosol Science, Vol. 37, pp. 715-734, 2007.

저 자 소 개



정재승 (鄭在勝)

1978년 4월 14일생. 2004년 경북대학교 공대 전자전기공학부 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학과 박사과정.

Tel : 053-940-8601, Fax : 053-950-5508

E-mail address : bucstual@empal.com



이우석 (李禹錫)

1968년 12월 12일생. 1994년 경북대학교 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 부산정보대학 전기자동화과 부교수.

Tel : 051-330-7240, Fax : 051-330-7263

E-mail address : wslee@bit.ac.kr



문재덕 (文在德)

1946년 7월 25일생. 1970년 경북대학교 사범대학 과학교육과(물리전공) 졸업(이학사). 1975년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학). 1982년 日本 東京大學 대학원 전기공학전문과정 졸업(공학). 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수.

Tel : 053-950-5601, Fax : 053-950-5508

E-mail address : jdmoon@knu.ac.kr