

## Electrohydrodynamic Water Droplet Ejection Characteristics from a Micro-Water-Nozzle

문 재 덕\*  
(Jae-Duk Moon)

**Abstract** - A micro-water-nozzle, as one of a cooling means of micro-electronic devices, has been proposed and investigated. The I-V characteristics of the micro-water-nozzle and effect of applied voltage on the meniscus formation and deformation and ejection processes of de-ionized water on the micro-water-nozzle tip have been investigated. The water ejection processes, such as a drop formation, a drop deformation, a dripping, a cone jet, and an atomization, were taken place on the micro-water-nozzle tip by the electrohydrodynamic forces acted by the DC and AC high voltages applied on the meniscus of the micro-water-nozzle tip. The I-V characteristics of the micro-water-nozzle-to-plate electrode system were different from that of the same metal-point electrode system, due to the meniscus formation and water droplet ejection at the nozzle tip. The positive and negative DC and AC high voltages showed the water droplets ejection, the ejection rates of 1.8, 1.5 and 1.2 g/h respectively, which, however, showed that the proposed micro-water-nozzle-to-plate electrode system could be used as one of an effective pumping means.

**Key Words** : Micro-water-nozzle, Corona discharge, Electrohydrodynamics, Droplet ejection, Droplet formation.

### 1. 서 론

최근 코로나 방전이나 정전현상이 전기유체역학적(electrohydrodynamic, EHD) 구동기구(driving mechanism) [1-2]로 적용될 수 있음이 확인되어 많은 연구가 수행되고 있다. 이는 종전의 전기기계적인 방법에 비해 유속의 발생과 제어가 용이하고, 저소음과 기계적 회전부분이 없는 등의 장점[3-4]을 가지기 때문이나, 아직은 발생 유속과 효율이 낮은 문제점이 있다[2, 4, 5].

전기유체역학적 방법을 이용한 유체의 구동에 대한 연구는 주로 전극의 형상[3]이나, 전계 경사(gradient)력[2], 방전의 형태(mode) 변화[6-8], 모세관 현상[4] 등이 이용되고 있다. EHD 구동은 외력(압력)을 사용하지 않고 EHD력만으로 유체가 분출(구동)되게 하는 것으로, 절연체 노즐[6]이나 금속노즐[7-10]도 효과적인 EHD 구동이 되지 못했다[4, 11]. 금속 노즐에 전압을 인가하는 경우, 인가전압은 금속 노즐선단에 모두 인가되어, 노즐속의 유체를 효과적으로 구동시키지 못하는 문제점이 있다. 또 절연체 노즐의 경우는 전압이 유체에만 인가되어, 미립자 발생을 위해 내경을 작게 해야 하는데, 이는 결국 최대 전류량도 감소되어 유체의 분출량도 적게 되기 때문에, 내경을 줄이는 것이 문제가 되어 왔다[7]. 이와 같은 경우, 절연체 노즐속에 금속전극을 직접 삽입함으로써 실효 내경을 확대되며 제한전류도 증가시킬 수 있는 장점[12-13]이 있으나, 노즐속에 금속전선 인입은 금속전극

(침)에 모든 전압이 인가되어 방전이 특성 되어지기 때문에, 결국 유체분출 특성과 이의 제어가 상대적으로 용이하지 못한 문제점이 있게 된다.

모세관을 유체구동 노즐(nozzle)로 이용하는 경우, 미립자 발생과 제어는 가능하나, 노즐 내경을 60 $\mu\text{m}$ 이하로 줄이면 최대 허용 전류량과 유체의 분출량도 크게 감소는 문제점이 있게 된다[7]. 한편, 노즐 직경을 증가시키면, 최대 허용 전류량과 유체의 분출량은 크게 증가시킬 수 있으나, 미립자 발생과 제어가 매우 어려운 문제점이 있게 된다. 따라서 노즐경이 60  $\mu\text{m}$ [7]보다는 크고 1,200  $\mu\text{m}$ [12-13]보다는 상대적으로 매우 작은 200  $\mu\text{m}$  정도의 노즐에 대한 코로나 방전 및 유체역학적 분사연구가 필요하나, 아직 이에 대한 방전 및 전기유체역학적 분사에 대한 연구는 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 통상의 침대 평판 구조의 방전장치로서 미세 수관 노즐대 평판 구조의 유체분출장치를 제안하고, 유체가 인입된 미세 수관 노즐의 방전특성, 유적형성과 유체분사 특성을 검토 조사하였으며, 동일 구조의 금속침대 평판간의 방전특성을 실험적으로 비교 연구 검토한 결과를 보고한다.

### 2. 실험 방법 및 장치

그림 1은 미세 수관 노즐대 평판전극 구조의 수적분사 실험장치로서, 유체역학적 수적분사용 미세 수관 노즐, 수적의 정전유도 및 집속용 평판전극, 수통, 고전압 전원, 방전 전류 및 고전압 측정장치, 그리고 방전 및 수적 촬영용 사진기로 구성되었다. 사용된 수적분사용 미세 수관 노즐은 유리 모세관(glass capillary tube, 외경 1.00 mm, 내경 192  $\mu\text{m}$ , 길이 3.5 mm)에 유체(de-ionized water,  $\rho \approx 10^6 \Omega\text{cm}$ ,  $\epsilon \approx 80$ )를

\* 펠로우회원 : 경북대 IT대학 전기공학과 교수 · 공박

E-mail : jdmoon@knu.ac.kr

접수일자 : 2010년 6월 23일

최종완료 : 2010년 8월 6일

인입한 것으로, 수통(acrylic water vessel, 외경 40 mm, 내경 30 mm, 높이 50 mm)의 하부에 설치하였고, 노즐 돌출 부분의 길이는 고정(3.5 mm) 하였다. 미세 수관 노즐의 방전특성은 미세 수관 노즐의 외경과 동일 규격의 금속 침(stainless needle, 직경이 1.00 mm, 선단 곡률반경이 0.50 mm)의 방전특성과 비교하였다. 분출되는 수적의 정전유도 및 집속용으로 평판전극(stainless disc, 외경 10 cm, 두께 0.50 mm)을 사용하였으며, 미세 수관 노즐선단과 유도(접지)평판전극과의 간격(s)은 고정(s=10 mm)하여 실험하였다. 인가전원은 직류 및 교류(가변전압 0~30 kV, 최대전류 20 mA, 교류 주파수 60 Hz)를 사용하였고, 방전전류와 전압은 전압계(DVM, Fluke, 179), 분압기(high volt probe, 1,000:1, Tektronix, P6015A), 그리고, 분류저항(film resistor, 1.00 kΩ)을 사용하여 측정하였다. 그리고 미세 수관 노즐의 방전특성, 수적 형성과정과 분사특성 그리고 침전극의 방전특성은 축적형 사진기(digital camera, Sony DSC-W1)로 촬영하였다. 미세 수관 노즐에서 수적 분사량은 실험 전후의 수통(그림 1)의 무게가 감소하는 것을 정밀 저울(electronic balance, Mettler Toledo, AB204)로 측정하여 환산하였다.

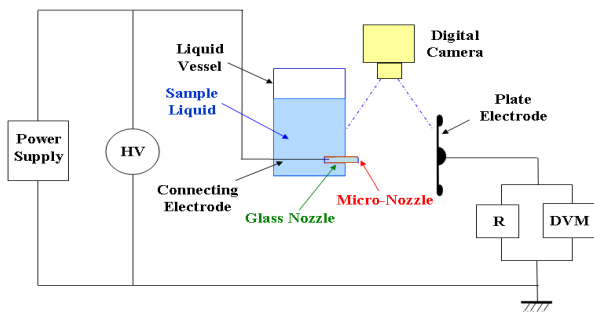


그림 1 실험 장치 개략도.  
Fig. 1 Schematic of the experimental setup.

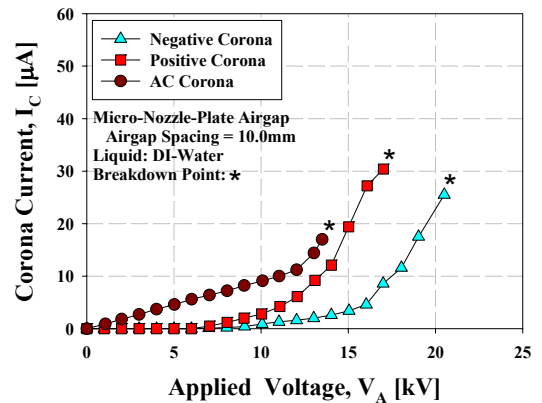
## 2. 실험 결과 및 고찰

그림 2는 미세 수관 노즐과 금속 침대 평판 전극간의 직류 및 교류전압에 대한 I-V 특성을 나타낸 것으로, 방전전류는 방전개시전압에서 흐르기 시작하여 인가전압의 증가에 따라 서서히 증가하고, 마침내 절연과괴전압으로 진전하는 전형적인 침대 평판형의 불평등 방전특성을 보여준다[5, 6]. 미세 수관 노즐의 교류 I-V 특성의 초기, 즉, Ohm성 직선 구간(0~10 kV 부근)은 침(뒷부분의 수통 포함)과 평판간의 정전용량성 전류가 있음을 보여준다.

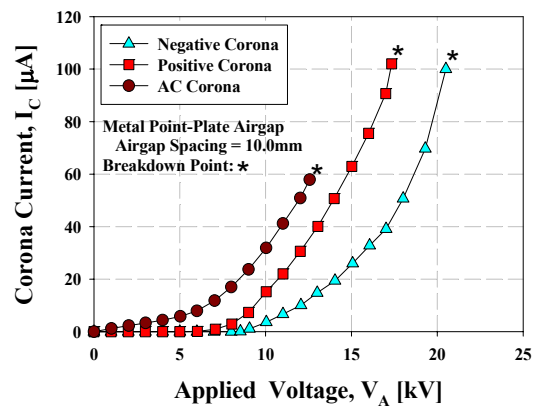
직류 코로나 개시전압의 크기는 미세 수관 노즐의 경우가 금속 침의 경우에 비해 매우 큰 값을 보여준다. 이는 미세 수관 노즐의 경우, 노즐 선단에서의 모세관 현상과 전기유체역학적(EHD) 현상에 의해 노즐 선단의 유적 형성에 의해 노즐 직경이 수관 외경( $d \approx 1.00$  mm)보다 더 커져서(그림 4(b) 참조) 결국 금속 침의 외경( $d \approx 1.00$  mm)보다 더 커졌기 때문인 것으로 사료된다.

미세 수관 노즐과 침전극의 각각의 최대 방전전류의 크기는 모두 직류 정극성 > 직류 부극성 > 교류의 순서이었다. 미세 수관 노즐의 방전전류가 금속 침전극의 것에 비해 매우 작

으며, 최대 방전전류의 크기는 미세 수관 노즐의 경우가 금속 침의 경우의 약 1/3 정도로 매우 작은 값을 보여주었다. 이는 미세 수관 노즐의 경우, 노즐 선단에서의 모세관 현상과 정전력에 의해 노즐 선단의 곡률반경이 노즐 외경 크기로 커지며(그림 4(a, b) 참조), 인가전압의 크기에 따라 변하고, 또 미세 수관 노즐속의 물(de-ionized water,  $\rho \approx 10^6 \Omega \text{ cm}$ )을 통해 전류가 흐르기 때문에 방전전류가 물 저항에 의해 제한(그림 3 참조)되기 때문인 것으로 사료된다.



(a) 미세 수관인 경우

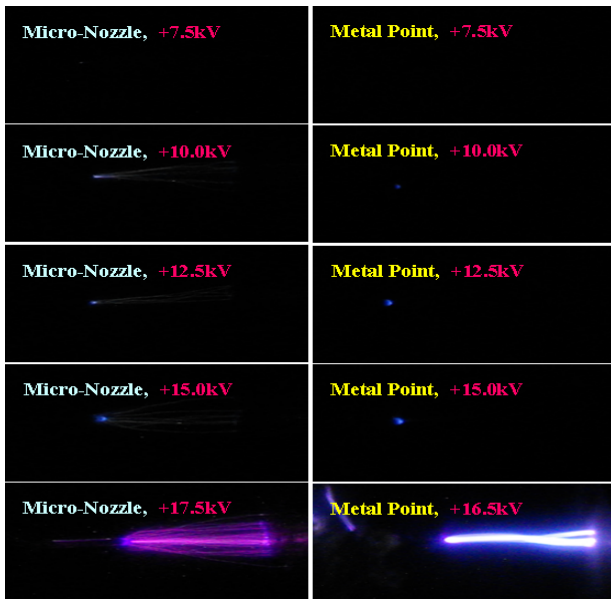


(b) 금속 침인 경우

그림 2 미세 수관과 금속 침의 직류 및 교류 I-V 특성.  
Fig. 2 I-V characteristics of micro-nozzle and metal point for DC and AC applied voltages.

그림 3은 정 및 부극성 직류와 교류 전압 인가에 따른 미세 수관 노즐선단과 금속 침선단의 방전 사진을 각각 나타낸 것이다. 금속 침선단의 직류 정 및 부극성 그리고 교류 방전 모양은 전형적인 침대 평판간의 방전 모양을 보여준다[12-13]. 미세 수관 노즐선단의 방전은 미세 수관 선단의 형상에 의해 크게 특성에 영향을 받게 되는데, 그림 4에서 보여주듯이, 선단의 형상과 수류(수적)가 분출(분사)되기 때문에 이들이 방전에 많은 영향을 줄 것으로 사료된다. 특히 직류 정극성 및 교류 인가전압이 인가된 미세 수관의 경우, 미세 수관에서 스트리머 방전(streamer corona)이 발생되어 유도(접지)전극으로 진전하는 것을 보여준다. 이는 인가전압

이 높아지면, 미세 수관 노즐의 선단의 수막에 큰 EHD력이 작용하여, 노즐선단의 수막으로부터 수류나 수적이 분출(분사)되어 방전이 상대적으로 저항이 작은(수적: $\rho \approx 10^6 \Omega\text{cm}$ , 공기: $\rho \approx 10^{16} \Omega\text{cm}$ ) 수류(수적)를 통해 진전되기 때문인 것으로 사료된다. 한편 미세 수관 노즐선단보다 금속 침선단의 방전이 더 강하게 나타나는 것은, 이는 미세 수관 노즐선단과 노즐속이 물(de-ionized water,  $\rho \approx 10^6 \Omega\text{cm}$ )로 구성되어 있고, 이들로 말미암아 방전전류가 제한되기 때문인 것으로 사료된다. 이는 그림 3에서 보여주는 것과 같이 인가전압이 증가되어 전극간이 단락(arc discharge)될 때, 미세 수관 노즐 내부가 붉은 색을 띄는 것으로 확인되어 진다.



(a) 수침과 금속 침의 직류 정극성 방전사진.



(b) 수침과 금속 침의 직류 부극성 방전사진.



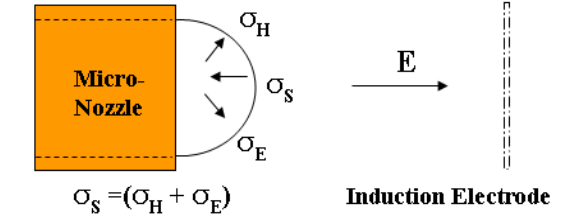
(c) 수침과 금속 침의 교류 방전사진.

그림 3 인가전압 종류와 극성에 따른 침선단의 방전사진.  
Fig. 3 Photos of discharges on nozzle tip for DC powers.

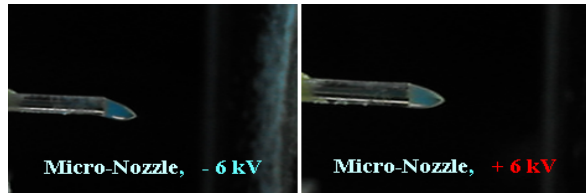
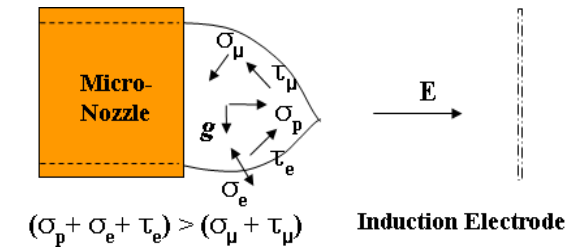
그림 4는 정 및 부극성 직류전압 인가에 따른 미세 수관 노즐선단의 수적 생성과 탈리, 수적분사 과정을 이론적 기초와 실험사진으로 나타낸 것이다. 노즐선단에 전압이 인가되지 않을 때는 미세 수관 선단의 수막은 모세관 현상에 따라 수적이 형성되지 않는다. 그러나 노즐선단에 직류전압이 인가[ $V_{DC} = \pm 3 \sim 5 \text{ kV}$ ]되면 미세 수관 노즐선단의 수막의 표면장력(surface tension,  $\sigma_s$ ), 정역학력(hydrostatic pressure,  $\sigma_H$ ), 정전압력(electrostatic pressure,  $\sigma_E$ )이 균형[6]을 이루게 되는 반원형 수적(그림 4(a), drop formation mode)이 형성되게 된다. 인가전압이 증가[ $V_{DC} = \pm 5.5 \sim 6.5 \text{ kV}$ ]하면, 노즐선단의 수분자의 분극력(electric polarization stress,  $\sigma_p$ ), 인가전계(E)에 의한 전기력(normal electric stress,  $\sigma_e$ , tangential electric stress,  $\tau_e$ ), 그리고, 유체의 점성력(normal viscosity stress,  $\sigma_v$ , tangential viscosity stress,  $\tau_v$ )이 작용하게 되나, 분극력( $\sigma_p$ )과 전기력( $\sigma_e$ ,  $\tau_e$ )이 상대적으로 더 크게 작용하여 수분자는 더욱 미세 수관 노즐의 선단으로 끌리게 되어 타원형의 수적(그림 4(b))이 형성된다[14, 15]. 이때까지는 노즐선단의 수적은 노즐 외경까지로 확대되어, 따라서 아직 코로나 방전은 일어나지 않게 된다.

인가전압이 더욱 높아지면[ $V_{DC} = \pm 7 \sim 8 \text{ kV}$ ], 수적의 접선방향의 분극력( $\sigma_p$ )과 전기력( $\sigma_e$ ,  $\tau_e$ )이 더욱 커져서 마침내는 수적은 노즐선단으로부터 수적 형태(drop)로 탈리(dripping mode)할 수 있게 된다. 이때는 노즐선단의 집중전계가 커져서 아주 약한 글로 코로나(glow corona) 방전이 노즐선단의 수적 끝에서 간헐적으로 일어난다. 즉, 노즐선단의 수적이 유도전극방향으로 형성(인장)되는 동안에는 수적선단에서 코로나 방전이 일어나며, 시간의 경과에 따라 수적으로 성장하여 노즐선단에서 탈리(dripping)되면 방전은 살아지는 과정을 반복하게 된다. 이때 탈리된 수적들은 전하( $Q = CV$ )를 가지므로 노즐대 평판간의 공간에서 운동 에너지( $W_k = mv^2/2 = QEx$ )를 갖게 되어, 접지전극을 향하여 중력(g)과 합력하여 하강곡선(그림 4(b))을 그리며 이동(migration)하게 된다. 여기서 C, V 는 각각 수적의 정전용량, 인가전압이고, m, v,  $E = V/x$  그리고 x 는 각각 수적의 질량, 이동 속도, 전계, 그리고, 수적이 이동한 거리이다. 인가전압이 더욱

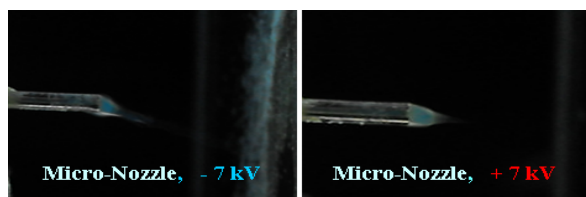
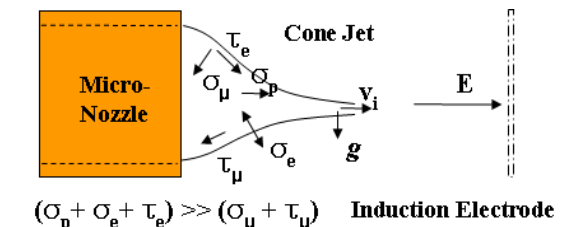
높아지면[ $V_{DC}=\pm 8\sim 8.5$  kV], 분극력과 접선방향의 전기력이 더욱 크게 작용하여 노즐선단의 수적은 더욱 크게 인장되게 되고, 노즐선단으로부터의 수적 탈리 시간간격도 점차 짧아지며, 마침내 노즐선단에서 수적 탈리모드(dripping mode)에서 수류모드(cone jet mode, 그림 4(c))[7, 8]로 진전되어, 수류는 노즐선단에서 유도전극으로 강하게 유출하고 물의 분사량도 급격히 증가하게 된다.



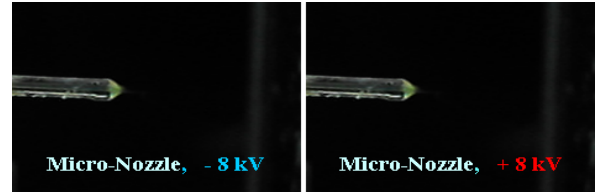
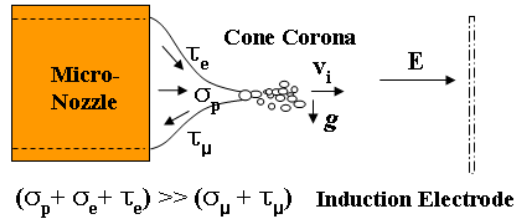
(a) Drop formation mode [ $V_{DC}=\pm 3\sim 5$  kV]



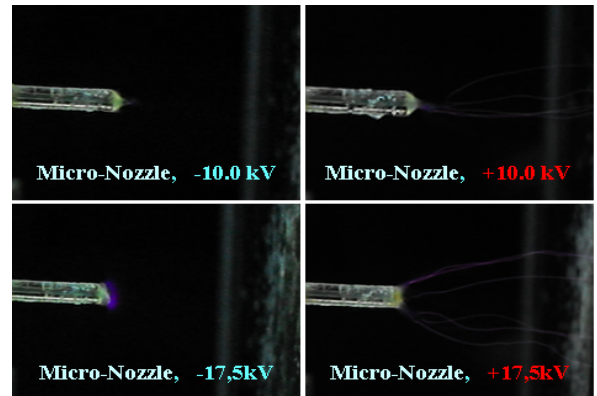
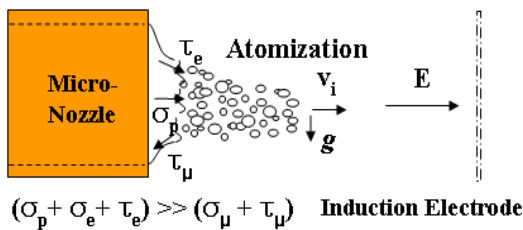
(b) Drop deformation mode [ $V_{DC}=\pm 5.5\sim 6.5$  kV]



(c) Cone jet mode [ $V_{DC}=\pm 6.5\sim 7.5$  kV]



(d) Cone Corona mode [ $V_{DC}=\pm 7.5\sim 9.5$  kV]



(e) Atomization mode [ $V_{DC}=\pm 9.5\sim 20$  kV]

그림 4 노즐 선단에서의 수적 형성과 탈리 과정.  
Fig. 4 Droplet meniscus ejection processes on nozzle tip.

인가전압이 더욱 증가[ $V_{DC}>8$  kV]하면, 수류의 직경은 차츰 작아지고, 탈리 속도는 더욱 빨라지게 된다. 인가전압이 더욱 높아지면[ $V_{DC}>9$  kV], 수류는 분산(그림 4(d), EHD droplet atomization mode [6-9])현상을 나타내게 되어 분무(droplet, mist)를 발생하게 되고, 나아가 강력한 스트리머 코로나(streamer corona, 그림 3(a), (c)) 방전을 일으키게 되며, 방전공간에는 수적과 방전이 혼합하여 강한 스트리머 방전(그림 3, 4(e))이 발생하게 되며, 인가전압의 더욱 증가에 따라 아-크 방전(그림 3)으로 전이되게 된다. 이때는 방전 전류도 크게 증가하여 미세 수관 노즐속이 Joule 열로 붉게 빛나게 됨(그림 3)을 보여준다.

본 논문에서는 192  $\mu$ m의 노즐전극 선단에서의 수적의 형성, 유도전극쪽으로의 인장(끌림), 탈리, 그리고, 수적형성 및 진전, 수류형성과 탈리, 나아가, 분사에 이르는 구체적인 형

성과정을 인가전압의 크기에 따라 기초 이론적 그리고 구체적 실험사진으로 나타냈다. 기본적으로는 노즐경이 매우 큰 침침 노즐(직경 1,200 μm)과 비슷한 과정을 나타냈으나 [7-13], 노즐 선단에 생성되는 수막 크기나 분사되는 수적의 크기는 노즐경에 비례하가 때문에, 본 실험에서 발생 분사되는 수적은 매우 작은 것으로 관찰되었다.

그러나 세밀한 이론적인 수적의 크기나 분사량 또 이들의 생성기구는 기존의 몇몇 논문에도 부분적으로는 보고되어 있으나[6-11], 전기적, 유체 역학적, 표면 물리적, 열역학적 등의 매우 복합적 현상이므로 미세 수관 노즐선단에서의 구체적(이론적) 수적 탈리(분사)나 생성기구는 아직도 충분히 해석되지 못하고 있는 실정이다[7, 16, 17].

그림 5는 직류 및 교류 방전에 의한 미세 수관노즐 선단의 수적 분사(droplet ejection) 특성을 동일 조건으로 3회 실시한 결과를 나타낸 것이다. 미세 수관 노즐에서 수적 분사량은 인가전압의 증가에 따라 증가하며, 동일 인가전압(예, 10 kV 경우)에서는 직류 정극성방전(1.8 g/h) > 직류 부극성방전(1.5 g/h) > 교류방전(1.2 g/h)의 순으로 많았고, 직류 정극성의 경우 최대 3 g/h 정도를 분사(직경 192 μm의 노즐경의 경우 약 2.65 cm/s 정도의 분출속도)로 분사되는 것을 알 수 있다.

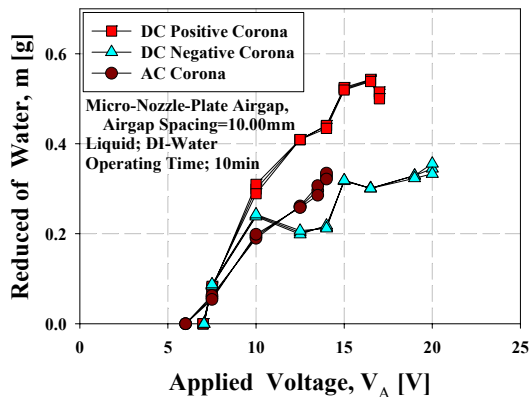


그림 5 인가전압의 종류와 극성에 따른 미세 수관 노즐의 수적 분사특성.

Fig. 5 Droplet ejection characteristics from micro-nozzle for DC and AC powers.

직류 정극성방전의 경우, 약 7 kV부근에서 분사량이 관찰되기 시작하며, 인가전압의 증가에 따라 분사량도 많아지며, 방전은 글로 코로나에서 스트리머성 코로나로 진전하며, 방전의 진행에 따라 큰 수적에서 시작하여 작은 수류 형태로 간헐적으로 방출되다가, 인가전압이 더욱 증가할수록 그 간헐적인 분사주기(시간)는 점차 짧아지고 가늘어지며, 분사량도 점차 많아진다. 그러나 인가전압이 절연과피 부근에서는 스트리머성 방전이 매우 강해지고, 물분사량은 크게 감소하는 경향을 보여주었다.

직류 부극성방전의 경우, 약 7 kV 부근(glow corona)에서 분사되기 시작하여 인가전압의 증가에 따라 분사량도 증가하다가, 10~16 kV에서는 미세 수관 노즐선단에서 수류 형태로 사방으로 흩뿌리는 형태로 분사하여 분사량은 불규칙적이고 약간 감소함을 보여주었다. 인가전압이 15 kV에서는

미세 수관 노즐 선단에서 다시 강한 코로나가 관찰되어지나 흩뿌리는 양은 직전보다 더 많이 관찰되었다. 17~19 kV에서는 노즐선단에 코로나가 강하게 발달되어 흩뿌리는 분사형태는 약해졌다. 19.5~20 kV에서는 절연과피 직전이어서 미세 수관 노즐에서 유도전극을 연결하는 정도의 강한 스트리머 방전이 순간순간 발생하는 동시에 수적도 방전함께 강하게 분사되어 분사량도 증가함을 보여주었다.

교류(AC)방전의 경우, 약 6 kV부근에서 수적이 분사되기 시작하여 인가전압의 증가에 따라 분사량도 증가하였으나, 11~14.8 kV까지 미세 수관 노즐선단에서 스트리머 형태로 간헐적으로 분사하며, 인가전압이 더욱 증가할수록 그 간헐적인 주기(시간)는 짧아져 분사량도 많아졌다. 교류 인가전압의 경우, 분사시에는 직류의 경우와는 상이하게 미세 수관 노즐선단의 수적이 상당히 떨림이 많고, 분사도 여러 방향으로 분산 분사는 경향을 보여 주었다.

한편 노즐로부터 방사되는 수적의 입경은 노즐경에 의해 크게 영향을 받으며, 노즐경이 클 경우에는 입경도 크게 되는 것으로 보고되고 있다[7, 8]. 따라서 직경이 192 μm 정도의 미세 노즐에서 방사되는 수적경은, 앞으로 연구될 과제이지만, 아주 미세한 것으로 관찰되었다.

이상의 결과는 직경이 약 200 μm의 미세 수관 노즐로부터의 EHD력 등에 의해 노즐선단의 방전 및 EHD에 의한 수적 형상과 분사, 수분자의 구동 등을 실험적으로도 확인하였으며, 인가전압의 크기와 극성을 조절로 분사 수적의 모양 그리고 분사량(유속)의 조절이 가능하여 적절한 수적 분사장치로 사용될 수 있음을 보여준다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 내경이 매우 미세한 미세 수관 노즐을 이용하여, 인가전압이 방전의 형상에 미치는 영향과, 미세 수관 노즐 선단의 수적 형성과 탈리 그리고 분사과정을 기초 이론적 및 실험적으로 검토한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

미세 수관 노즐은, 노즐전극의 선단에 방전이 생성될 때 통상의 침전극과는 상이하게 침전극선단이 EHD력에 의해 수적이 형성되어, 동일구조의 전극과는 상이한 전류-전압 특성을 나타내었다. 즉, 이온교환수가 미세관속에 인입된 경우는 금속침의 경우에 비해 직류 및 교류 전압 인가에 대한 코로나 방전 개시전압과 방전전류의 크기에 차이가 있음을 보여 주었다. 이는 고전압이 미세 수관 노즐에 인가되면, 금속 침전극과는 다르게, 미세 수관 노즐선단에서는 수적 형성과 분출되며, 이 과정은 반원형 수적, 타원형 수적, 수적 탈리, 수류분출 나아가 수적분사의 과정으로 진전되고, 마침내 분무로의 분사현상을 나타내기 때문인 것으로 사료된다.

교류와 직류 인가전압의 극성에 따라 분사특성의 차이는 크지 않았으나, 교류의 경우는 직류의 경우와는 상이하게 미세 수관 노즐 선단의 수적이 상당히 떨림이 많고 분사도 여러 방향으로 분사는 경향이 관찰되었다. 미세 수관 노즐에서 수적 분사량은 인가전압의 증가에 따라 증가하며, 동일 인가전압(예, 10 kV 경우)에서는 직류 정극성방전(1.8 g/h) > 직류 부극성방전(1.5 g/h) > 교류방전(1.2 g/h)의 순으로 많았고, 직류 정극성의 경우 최대 3 g/h 정도(192 μm 노즐경의

경우 약 2.65 cm/s 정도의 분출속도를 분사할 수 있음을 보여준다.

이상의 결과는 미세 수관 노즐로부터의 EHD력 등에 의해 노즐선단으로부터의 유체 분사를 용이하게 구동시킬 수 있음을 보여주며, 직경이 192  $\mu\text{m}$  정도의 미세 노즐의 경우에도 인가전압의 크기와 극성을 조절로 분사 수적의 모양 그리고 유량(유속)을 조절이 가능하여 수적 분사장치로 적절히 사용될 수 있음을 보여준다.

### 감사의 글

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-313-D00396)

### 참 고 문 헌

- [1] R. Mestiri, R. Hadaji, S.B. Nasrallah, "The electrical discharge as a source of a mechanical energy," *Desalination*, vol. 220, pp. 468-475, 2008.
- [2] H. Tsubone, B. Komeili, S. Minami, G.D. Harvel, K. Urashima, C.Y. Ching, J.S. Chang, "Flow characteristics of dc wire-non-parallel plate electrohydrodynamic gas pump," *Journal of Electrostatics*, vol. 66, pp. 115-121, 2008.
- [3] E. Moreau, G. Touchard, "Enhancing the mechanical efficiency of electric wind in corona discharge," *Journal of Electrostatics*, vol. 66, pp. 39-44, 2008.
- [4] 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, Aug. 2007.
- [5] J.-D. Moon, J.-S. Jung, J.-G. Kim, S.-T. Geum, "An EHD Gas Pump Utilizing a Porous Point Electrode," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, No. 3, pp. 622-628, 2009.
- [6] 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.
- [7] J.L. Li, "EHD spraying induced by the pulsed voltage superimposed to a bias voltage," *Journal of Electrostatics*, vol. 65, pp. 750-757, 2007.
- [8] 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.
- [9] A. Castellanos (ed), *Electrohydrodynamics, CISM Courses and Lectures No 380*, Springer, 1998.
- [10] A. Jaworek, A. Krupa, "Studies of the corona discharge in EHD spraying," *Journal of Electrostatics*, vol. 40 & 41, pp. 173-178, 1997.
- [11] P. Atten, J. Seyed-Yagoobi, "Electrohydrodynamically Induced Dielectric Liquid Flow Through Pure Conduction in Point/Plane Geometry," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol 10, No. 1, pp. 27-36, 2003.
- [12] 문재덕, "침심 노즐전극의 전기 유체역학적 액적 형성 과정," *전기학회논문지*, vol. 57, No. 10, pp. 1807-1811, 2008.
- [13] 정희원, 문재덕, "침심 노즐전극의 전기유체역학적 펌핑 특성," *전기학회논문지*, vol. 57, No. 10, pp. 1812-1817, 2008.
- [14] J.S. Eow, M. Ghadiri, Mortion, "Deformation and break-up of aqueous drops in oil under high electric field strengths," *Chemical Engineering and Processing*, vol. 42, pp. 259-272, 2003.
- [15] L.E. Lundgaard, G. Berg, A. Pederson, P.J. Nilson, "Eletrocoalescence of water drop pairs in oil," *Proceedings of 14th International Conference on Dielectric Liquids*, pp.215-219, July 2002.
- [16] F. Yan, B. Farouk, F. Ko, "Numerical modeling of an electrostatically driven liquid meniscus in the cone-jet mode," *Journal of Aerosol Science*, vol. 34, pp. 99-116, 2003.
- [17] 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



#### 문재덕 (文在德)

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

Tel : 053-950-5601

Fax : 053-950-5508

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