

장벽 방전형 공기 펌프의 이온풍 발생에 미치는 방전전극 형상의 영향

논문

58-5-19

Effect of Discharge Electrode Shape of a Barrier Discharge Type Gas Pump on Ionic Wind Generation

황 덕 현* · 문 재 덕†

(Deok-hyun Hwang · Jae-Duk Moon)

Abstract - Existing cooling technologies no longer provide adequate heat dissipation due to excessive heat generation caused by the growing component density on electronic devices. An ionic gas pump can be used for the thermal management of micro-electronic devices, since the size of pump can be reduced to a micrometer scale. In addition, the gas pump allows for gas flow control and generation without moving parts. This ideal property of gas pump gives rise to a variety of applications. However, all these applications require maximizing the wind velocity of gas pump. In this study a barrier discharge type gas pump, with a needle-shaped corona electrode instead of a plate-shaped corona electrode, has been investigated by focusing on the corona electrode shape on the wind velocity and wind generation yield. As a result, the enhanced wind velocity and wind generation yield of 1.76 and 3.37 times were obtained with the needle-shaped corona electrode as compared with the plate-shaped corona electrode of the proposed barrier discharge type gas pump.

Key Words : Ionic Gas Pump, Barrier Discharge, Needle-Shaped, Plate-Shaped, Ionic Wind, Ionic Wind Generation Yield

1. 서 론

최근 전자 통신제품은 고집적기술의 발달로 말미암아 초소형화 및 고밀도화 되어 이들 소자들의 발열밀도는 매우 증가되고 있다[1, 2]. 따라서 이들 고집적 소자들의 효과적인 냉각기술은 매우 필요하나, 기존의 전기 송풍기 등의 냉각방식은 냉각 효율이 매우 낮고[3, 4] 기계적 회전부분 때문에 수명이 짧으며, 특히 초소형화에 결정적 한계가 있다[2].

최근 코로나 방전중에 발생하는 이온의 이동을 전자소자들의 냉각에 적용하는 연구가 국내외에서 수행되고 있다[5, 6]. 즉, 금속의 방전침전극 대신에 수침을 방전침전극으로 적용하거나[7], 평판형 연면 방전전극에 제3전극을 추가하는 등을 적용한 효과적인 이온풍 발생장치에 대한 연구 결과가 발표되고 있으나[4], 침 또는 수침을 방전전극으로 적용하는 경우 코로나 방전과 이온풍속 발생 특성은 좋으나 방전침전극의 수명이 짧고[7], 상대적으로 높은 전압을 인가시킬 수 없어서 고속 및 대량의 풍속을 얻을 수 없는 것으로 보고되고 있다[2, 5, 6]. 한편 장벽방전은 방전전극이 평판형이기 때문에 반도체 실리콘 웨이퍼 상에 집적이 가능하여 초소형화의 장점을 가지고 있다[2]. 그러나 평판형 장벽방전은 방전이 장벽

측면의 전상에서 발생 진전[4, 9, 10]하므로 이온풍의 동력점이 분명하지 못하여 충분한 이온풍속을 얻지는 못하는 문제점이 있다[5-10]. 즉, 기존의 장벽방전에는 평판형 코로나 방전전극이 주로 사용되고 있으나, 방전이 평판전극의 연면을 따라 발생(analogue coronas)하기 때문에 이온원의 구동점이 있는 불연속적 방전(discrete coronas)에 비해 이온풍의 발생에 효율적이지 못 할 것으로 사료된다.

본 연구는, 고집적 전자소자 방열용 송풍장치로서의 장벽방전형 이온풍 발생장치 개발 기초연구로서, 통상의 연면을 따라 연속방전(analogue surface coronas)을 발생시키는 평판상(plate-shaped) 방전전극 대신에 불연속적 방전(discrete surface coronas)을 연면에 발생시키는 침판상(needle-shaped plate) 방전전극을 제안하고, 이 침판상 전극의 방전침 수의 변화가 이온풍속과 풍속발생 이득에 미치는 영향을 실험적으로 검토하고, 통상의 판상형 방전전극과 그 특성을 비교한 연구 결과보고이다.

2. 실험 장치 및 방법

그림 1은 장벽방전형 공기 펌프(barrier discharge type gas pump)의 개략도를 나타낸 것으로, 작은 풍동(wind tunnel, 크기 $5 \times 20 \times 30$ [cm³])안에 공기 펌프와, 교류 고전압 전원, 방전 전류 및 고전압 측정부, 그리고, 풍속 측정장치로 구성하였다. 공기 펌프는 방전전극(그림 2 참조)과 유도전극(stainless plate, 길이 3 [cm], 폭 0.5 [cm], 두께 0.08 [mm])을 절연평판(ceramic plate, 폭 50 [mm], 길이 70 [mm], 두께 0.7 [mm])의 상측과 하측에 각각 밀착하여

* 정 회 원 : 경북대 대학원 전자전기컴퓨터학부 박사과정

† 교신저자, 펠로우회원 : 경북대 전자전기컴퓨터학부 교수 · 공박

E-mail : jdmoon@knu.ac.kr

접수일자 : 2009년 2월 12일

최종완료 : 2009년 4월 6일

부착하였다. 그리고 풍속계는 방전전극으로부터 3.5 [cm] 뒤쪽에 설치하였다.

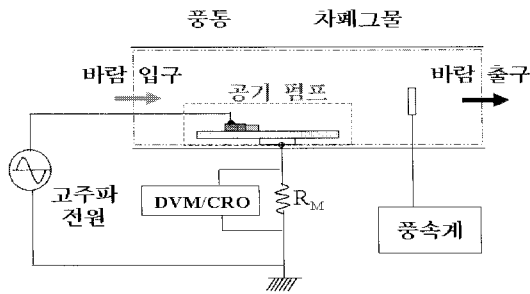


그림 1 실험장치 개략도

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

전원은 고주파 교류 고전압($f=0.1\sim 2.0$ [kHz], $0\sim 25$ [kV])을 사용하였고, 방전전류와 전압은 전압계(DVM, Fluke, 179), 고전압 분압기(HP, high-volt probe, 1,000:1, Tektronix, P6015A), 그리고, 측정저항(R_M)을 사용하여 측정하였다. 본 실험에서는 전류는 평균전류를, 전압은 최대값(peak voltage)으로 나타내었고, 이온풍속은 전자 풍속계(anemometer, Climomaster 6511)를 사용하여 측정하였으며, 모든 실험값은 5번 측정한 평균값으로 나타내었다. 실험은 모두 온도습도가 제어(23 ± 3 [°C], 30 ± 5 %RH)되는 챔버(acrylic, $30\times 30\times 50$ [cm³])속에서 수행되었다.

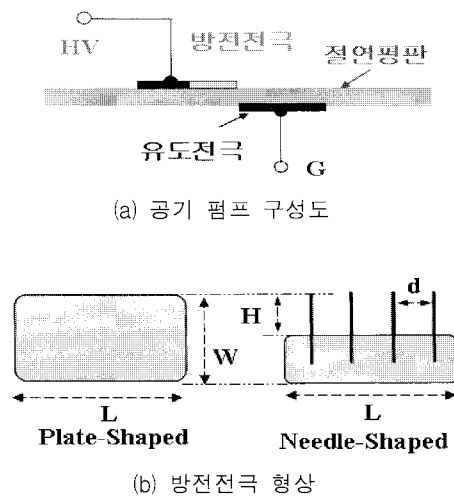


그림 2 장벽방전형 공기 펌프 전극 구성도와 방전전극 형상
Fig. 2 Closeup configuration of ionic gas pump and corona electrode shapes

그림 2는 장벽방전형 공기 펌프의 방전전극 형상을 나타낸 것으로, 방전전극은 평판상과 침판상의 2종류를 제안하여 실험하였다. 여기서 평판상 방전전극은 통상의 평판(plate-shaped, stainless plate, $W=1.5$ [cm], $L=3$ [cm], 0.08 [mm] thick)을 사용하였고, 침판상 방전전극은 평판(stainless plate, $W=1.0$ [cm], $L=3$ [cm], 0.08 [mm] thick)의 상측에 침(stainless needle, 길이 1.5 [cm], 직경 0.75 [mm], 곡률반경 0.08 [mm])을 부착한 침판상(needle-

shaped stainless plate, $W=1.5$ [cm] $L=3$ [cm], $H=5.0$ [mm], 0.08 [mm] thick)으로 실험하였다. 침판상의 방전침의 수(N_C)는 2~6개로 하였고, 침과 침 사이의 간격(d)은 $d=W/N_C$ 로 하였고, 그리고 방전전극 우측 단면을 유도전극 좌측 단면 수직 하에 설치하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 3은 평판상 공기 펌프에서 고주파 전원의 주파수(f)를 변화시켰을 때의 전류-전압 특성을 나타낸 것이다. 그림 3에서 방전전류(I_C)는 방전개시전압(V_C)에서 흐르기 시작하여 서서히 증가하는 전형적인 장벽방전특성을 보여준다. I_C 는 f 의 변화에 영향을 크게 받으며, I_C 는 f 가 클수록 증가하다가 그림 4에서 보여 주듯이 $f=1.2$ [kHz]에서 최대 방전전류가 흐름을 보여 주었다. 이와 같이 I_C 가 주파수 변화에 크게 의존하는 것은 교류 고주파 전원의 주파수에 따라 정 및 부극성 장벽방전에 따른 정 및 부 이온이 절연체판상과 방전전극간을 주파수 변화에 따라 왕복하여 이동할 때, 하전된 공기 이온의 전극간의 이동 속도와 시간과 전원 주파수 주기가 방전 모드(mode)와 방전전류에 영향을 미치기 때문인 것으로 사료된다 [11,12].

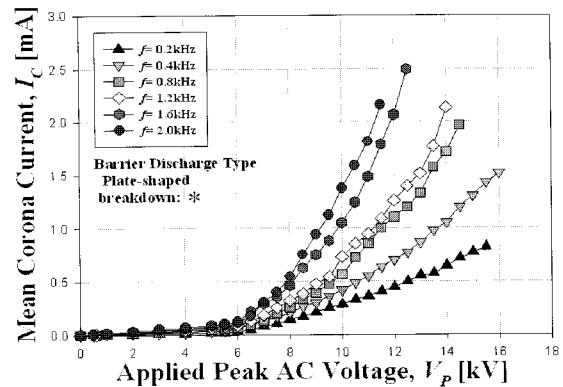
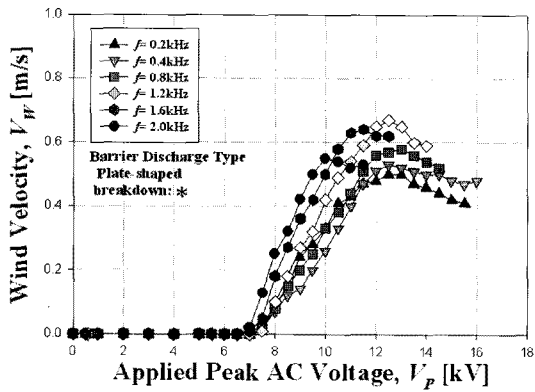


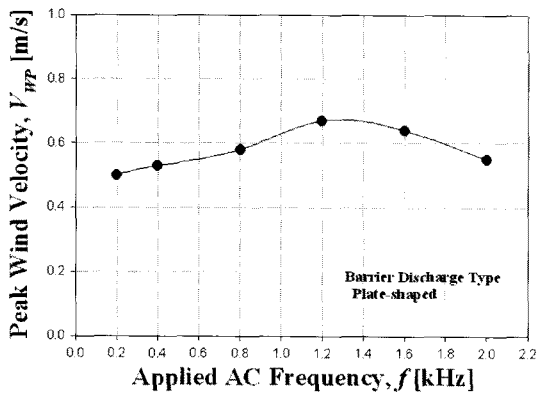
그림 3 인가 주파수변화에 따른 평판상 공기 펌프의 전류-전압 특성

Fig. 3 I-V characteristics of plate-shaped corona electrode for different applied AC frequency

그림 4는 평판상 공기 펌프의 전원 주파수(f)를 변화시켰을 때의 이온풍속(V_W)-인가전압(V_p) 특성과, 전원 주파수에 따른 최대풍속 특성을 나타낸 것이다. 이온풍속은 V_C 에서 발생하여 인가전압이 높아질수록 서서히 증가하여 최대 점에 이르고 다시 감소됨을 보여준다. 이는 이온풍속이 전기 글로우(pre-glow) 방전에서 발생하여 방전의 진전(glow → streamer corona)에 따라 증가하다가 이상 글로우(abnormal glow) 직전에서 최대 이온풍속 값을 가지고, 이상 글로우 이상에서는 이온풍속이 감소하게 되는 것을 보여준다. 이온풍속은 f 의 변화에 따라서도 큰 변화를 보여주며, $f=1.2$ [kHz] 때 최대 풍속을 가짐을 보여준다. 따라서 이후 실험은 교류 전원 주파수를 $f=1.2$ [kHz]로 고정하여 실험하였다.



(a) VW-VP-f characteristics



(b) peak VW-f characteristic

그림 4 인가 교류전압과 주파수 변화에 따른 평판상 공기 펌프의 이온풍속 특성.

Fig. 4 Ionic wind velocity characteristics of plate-shaped corona electrode for different applied AC voltage and frequency.

장벽방전에 의한 이온풍 발생기구는 다음과 같이 설명할 수 있다. 방전전극의 우측 선단에서 방전이 발생하게 되면, 방전전극 우측 선단 부근에는 공기가 이온화되어 플라즈마 영역이 형성되고, 이 플라즈마 영역중의 이온들은 전계에 따라 매 정 및 부의 반주기마다 절연판 하측에 설치된 유도전극을 향하여 정 및 부 이온들이 이동(migration)해 가게 되는 전형적인 장벽방전(barrier discharge) 특성을 보여 주게 된다. 이때 이동 이온들이 공기입자들과 충돌하게 되어 방전전극에서 유도전극 쪽으로 공기의 이동, 즉, 이온풍이 발생하게 된다[13]. 이온풍속은 이동 이온수(N_I)와 이온의 이동속도($v = \tau \lambda \approx q \tau E_A / 2m = q \tau V_A / 2mD$)에 의해 주로 결정하게 된다. 여기서 v , τ , λ , q , E_A , m , V_A , D 는 각각 이온의 이동속도, 충돌 주파수, 자유행정, 전하량, 전계, 질량, 인가전압, 그리고, 전극간격이다. 여기서 상온의 공기(주로 O_2 , N_2)중에서는 공기압력과 입자질량과 전하량이 동일하다고 보면, 이온의 이동속도(v)는 개략적으로는 E_A 가 클수록, 즉, V_A 가 높고 D 가 작을수록 높기 때문에 높은 풍속을 얻을 수 있는 것을 보여주나, 실용용상 V_A 의 증가에는 한계(예, 최대 25 [kV]이

하)가 있고 또 D 의 축소(예, sub-mm 이상)에도 한계가 있게 된다.

한편 방전전극의 형상이 평판상인 경우, 방전은 방전전극 우측 선단에 연면상으로 연속발생(analogue coronas)하게 되고, 많은 이온들이 전계방향의 동일 방향으로 이동하게 되어 이들 상호간에 척력과 충돌 때문에 효과적으로 수평으로 이동하지 못 하게 된다. 본 연구에서 그림 2(b)와 같이, 방전전극 우측 선단에 침전극을 부설하여 방전이 침상으로 발생(discrete coronas)하게 되어, 총 이온수와 방전전류는 줄일 뿐만 아니라, 이온풍의 이동시에 상호 척력과 충돌에 의한 장애도 없는 매우 효과적으로 이온풍이 발생될 것으로 판단하고 이하 이를 실험적으로 검토하였다.

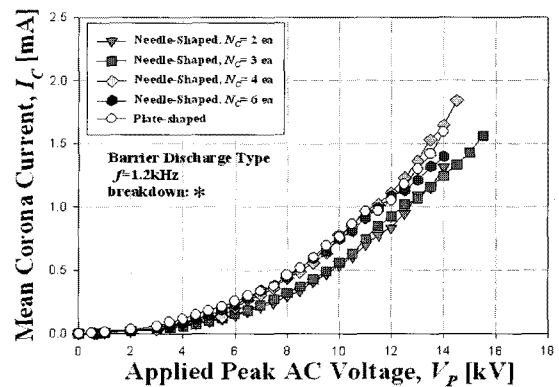


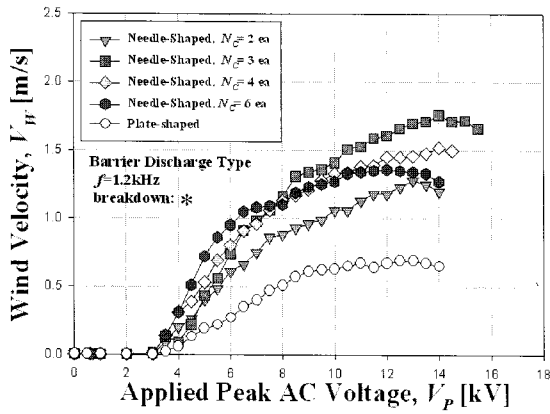
그림 5 침판상 방전전극 침수에 따른 이온풍속-전압 특성 Fig. 5 I-V characteristics for different corona needle number

그림 5는 침판상 방전전극의 침수(N_C) 변화에 따른 코로나 전류-전압(I_C-V_P) 특성을 나타낸 것이다. 그림 3에서와 같이 방전전류(I_C)는 방전개시전압(V_C)에서 흐르기 시작하여 서서히 증가하는 전형적인 장벽방전특성을 보여주나, I_C 는 N_C 의 변화에 영향을 크게 받으며, N_C 가 클수록 증가하다가, 그림 4에서 보여 주듯이, $f=1.2$ [kHz]에서 최대 I_C 가 흐름을 보여 주었다. 이와 같이 I_C 가 주파수 변화에 크게 의존하는 것은 비교적 짧은 전극간격 중에서 교류 고주파 전원의 교번 주파수에 따라 정 및 부극성 장벽방전에 따른 정 및 부 이온이 방전전극 단면과 절연판상을 교번 주파수에 따라 이동할 때, 이동 이온의 속도와 전원 교번 주파수 주기 간에 방전 전류의 최대값이 나타남을 보여주나, 구체적인 이유는 앞으로 연구 대상인 것으로 사료된다.

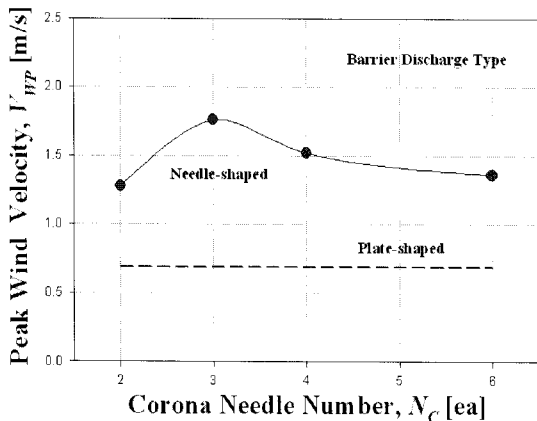
그림 6은 본 장벽방전형 이온풍 발생장치에서 N_C 를 변화시켰을 때의 이온풍속-인가전압 특성과 최대풍속 특성을 나타낸 것이다. 이온풍속은 V_C 에서 발생하기 시작하여 인가전압이 높아질수록 서서히 증가하다가 V_B 에서 종료됨을 보여준다. 또한 이온풍속은 N_C 의 변화에 따라 큰 영향을 받는 것을 보여준다. 특히 이온풍속은 그림 6(a)에서와 같이 N_C 의 변화에 따라 큰 영향을 받는 것과 그림 6(b)에서와 같이 적정 조건에서 최대값을 가짐을 보여준다. 이는 전술했듯이, 방전전극 우측 선상에 침전극을 부설함으로 이온풍의 이동시에 상호 충돌에 의한 방해

최소화하며 매우 효과적으로 이온풍이 발생될 수 있게 됨을 보여준다.

방전전극의 형상 변화에 따른 이온풍 발생특성 비교는 이온풍 발생이득(ion wind generation yield, Y)을 도입하여 비교함으로써 그 차이를 용이하게 확인할 수 있다. 이때 이온풍 발생 이득은 이온풍속(V_W)을 입력 코로나 전력(P_C)으로 나눔으로써 나타내는 값으로 정의한다[14].



(a) 이온풍속-방전침수 특성



(b) 피크 이온풍속-방전침수 특성

그림 6 방전전극의 침전극수 변화에 따른 이온풍속-전압 특성
Fig. 6 Wind velocity characteristics as a function of applied AC voltage for various corona needle number.

그림 7은 본 장벽방전형 이온풍 발생장치 입력전력(P_C) 변화에 따른 이온풍 발생이득(Y_W) 특성을 나타낸 것이다. 그림 7에서 Y_W 는 P_C 의 변화에 따라 큰 영향을 받으며, Y_W 는 P_C 가 증가할수록 급격히 감소함을 보여준다. 이는 방전개시 전압부근의 초기방전(glow)일 때가 방전이 크게 진전된 절연과피 직전의 방전(abnormal glow)일 때에 비해 매우 효율적으로 이온풍을 발생시킴을 보여준다. 한편 기존의 판상 방전전극에 의해 발생하는 선상 코로나 방전보다는 침판상 방전이 이온풍 발생과 발생 이득에 크게 증가시킴도 보여준다.

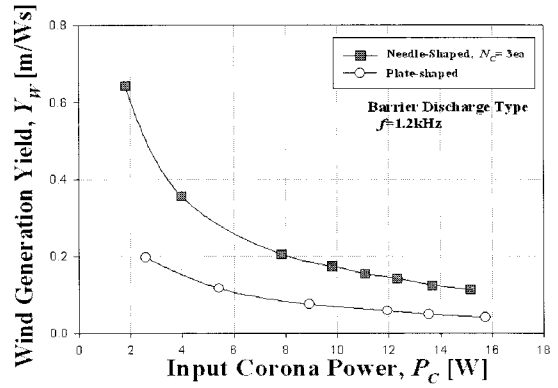


그림 7 방전전극의 이온풍 발생효율-코로나전력 특성

Fig. 7 Wind generation yield corona electrode as a function of input corona power

표 1 침판상 및 평판상 방전극의 이온풍 발생효율 비교표
Table 1 Specific data comparison for needle-shaped and plate-shaped corona electrodes

V_{PK} [kV]	V_M [kV]	I_{MP} [mA]	I_{MN} [mA]	P_{MP} [W]	P_{MN} [W]	V_{WP} [m/s]	V_{WN} [m/s]	V_{WP}/V_{WN} [-]	Y_{WP} [m/Ws]	Y_{WN} [m/Ws]	Y_{WP}/Y_{WN} [-]
8.0	5.66	0.46	0.32	2.60	1.81	0.51	1.16	2.27	0.196	0.641	3.27
10.0	7.07	0.76	0.56	5.37	3.96	0.63	1.41	2.24	0.117	0.356	3.04
12.0	8.49	1.05	0.92	8.91	7.81	0.67	1.61	2.40	0.075	0.206	2.75
13.0	9.19	1.30	1.06	11.95	9.74	0.69	1.70	2.46	0.058	0.175	3.02
14.0	9.90	1.59	1.24	15.74	12.28	0.65	1.76	2.71	0.041	0.143	3.49
15.0	10.61	-	1.43	-	15.17	-	1.72	-	-	0.114	-

(표 1에서 첨자 PK, M, N, P, W 는 각각 peak, root-mean-square, needle, plate, wind를 의미한다.)

표 1은 본 장벽방전형 이온풍 발생치의 각 특성을 상호 비교한 것이다. 표 1에서 보듯이, 판상 방전전극에 비해 침판상 방전전극이 동일인가 전압에서 더 작은 방전전류로 더 큰 이온풍 풍속을 발생시킴으로 더 높은 이온풍속 발생 이득을 나타냄을 보여준다. 즉, 통상의 판상의 방전전극을 침판상의 방전전극으로 형상을 변형함으로써, 동일 인가전압(예, $V_{PK}=14$ [kV])에서 방전전력(P_M)은 0.78배로 감소시키고, 이온풍속(V_W)은 2.71배로 증가시키며, 따라서 이온풍속 발생 이득(Y_W)은 3.49배로 매우 크게 증가하게 되는 것을 보여준다. 또한 통상의 판상의 방전전극을 침판상의 방전전극으로 형상을 변형함으로써, 최대풍속은 0.69 [m/s]에서 1.76 [m/s]로 2.55 배 증가하였고, 이온풍속 발생 이득은 0.196 [m/Ws]에서 0.641 [m/Ws]로 3.27 배 증가함을 보여주었다.

이상의 결과는 기존의 판상 방전전극을 침판상 방전전극으로 형상을 변형하여 방전이 평판전극 선단에서 선상으로 발생시키는 것 보다는 여러 개의 침선단에 집중적이고 강하게 발생시키는 것이 이온풍 발생과 발생 효율향상에 매우 효과적임을 보여주는 결과이다.

4. 결론

본 연구는 전자소자 방열용 송풍장치의 한 방편으로서 장벽방전형 이온풍 발생장치 개발을 위한 기초 연구를 수행하고, 장벽방전장치의 기존의 평판전극을 침전극화 함으로써

발생 이온풍속과 이득의 향상 가능성을 실험적으로 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

이온풍속은 방전전극의 형상에 매우 큰 영향을 받으며, 침전극 수에는 적정 값이 있음을 보여 주었다. 즉 기존의 평판상 방전전극을 침판상 방전전극화함으로써, 최대풍속은 0.69 [m/s]에서 1.76 [m/s]로 2.55 배 증가하였고, 이온풍속 발생 이득은 0.196 [m/Ws]에서 0.641 [m/Ws]로 3.27 배로 증가함을 보여주었다.

이상의 결과로부터 장벽방전형 이온풍 발생장치의 기존의 평판상 방전전극 대신에 침판상 방전전극을 적용함으로써 매우 효과적인 이온풍 송풍장치로서 유효하게 사용될 수도 있음을 보여 주었다.

참 고 문 헌

[1] 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.

[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 International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 1-4, 2003.

[3] F. Pollak, "New Micro-architecture Challenges in the Coming Generation of CMOS Process Technologies", Micro 32, 1999.

[4] 정재승, 문재덕, "연면 방전형 이온풍 발생장치의 고효율 풍속발생", 전기학회 논문지, 9호, 57권, pp. 1594-1598. 2008.

[5] 정재승, 문재덕, "수침대 그물전극형 방전장치의 이온풍 발생특성", 전기학회 논문지. (2009년 4월호에 게재 예정)

[6] R. Mestiri, R. Hadaji, S.B. Nasrallah, "The electrical discharge as a source of a mechanical energy", Desalination, 220, pp. 468-475, 2008.

[7] M. Rickard, D. Dunn-Rankin, F. Weinberg, F. Carleton, "Maximizing ion-driven gas flows", Journal of Electrostatics, vol. 64, pp. 368-376, 2006.

[8] 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.

[9] G. Tuochard, "Plasma actuators for aeronautics applications - State of art review", International Journal of Plasma Environmental Science and Technology, vol. 2, no. 1, pp. 1-25, 2007.

[10] E. Moreau, G. Touchard, "Enhancing the mechanical efficiency of electric wind in corona discharge", Journal of Electrostatics, vol. 66, pp. 39-44, 2008.

[11] Harry J. White, Industrial Electrostatic Precipitation, Addison-Wesley Pub Co. pp. 97-100, 1963.

[12] Martin A. Uman, The Lightning Discharge, Dover Pub., Inc., 2001 pp. 154-160.

[13] M. Robinson, "Movement of air in the electric wind of the corona discharge", AIEE Transactions, vol. 80, pp. 143-150, 1961.

[14] J. Moon, J. Jung, S. Gum, "The Effect of a Strip-type Third Electrode of a Wire-Plate Type Nonthermal Plasma Reactor on Corona Discharge and Ozone Generation Characteristics", International Journal of Plasma Environmental Science and Technology, vol. 2, no. 1, pp. 26-33, 2008.

저 자 소 개



황 덕 현 (黃 德 賢)

1978년 6월 30일생. 2002년 금오공대 제어계측과 졸업. 2007년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공석). 현재 경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학부 박사과정.
Tel : 053-940-8601
Fax : 053-950-5508
E-mail: besthdh@hanmail.net



문 재 덕 (文 在 德)

1946년 7월 25일생. 1970년 경북대학교 사범대학 과학교육과(물리전공) 졸업(이학사). 1975년 동 대학원 전자공학과 졸업(공석). 1982년 日本東京大學 대학원 전기공학 전문과정 졸업(공박). 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수.
Tel : 053-950-5601
Fax : 053-950-5508
E-mail : jdmoon@knu.ac.kr