

An Maximization of Ionic Wind Utilizing a Cylindrical Corona Electrode

정재승* · 문재덕†
(Jae-Seung Jung · Jae-Duk Moon)

Abstract - A corona discharge system with needle point or wire type corona electrode has been well used as an ionic wind blower. The corona discharge system with a needle point electrode produces ions at lower applied voltage effectively. However, the corona discharge on the needle point electrode transits to the arc discharge at lower voltage, and it is hard to obtain the elevated electric field in the discharge airgap for enhancing the ion migration velocity due to the weak Coulomb force. A cylindrical corona electrode with sharp round tip is reported as one of effective corona electrode, because of its higher breakdown voltage than that of the needle electrode. A basic study, for the effectiveness of cylindrical electrode shape on the ionic wind generation, has been investigated to obtain an maximum wind velocity, which however is the final goal for the real field application of this kind ionic wind blower. In this paper, a parametric study for maximizing the ionic wind velocity utilizing the cylindrical corona electrode and a maximum ion wind velocity of 4.1 m/s were obtained, which is about 1.8 times higher than that of 2.3m/s obtained with the needle corona electrode from the velocity profile.

Key Words : Corona discharge, Ionic wind velocity, Cylindrical and needle corona electrode, Velocity profile

1. 서론

코로나 방전에 의한 이온풍 발생장치는, 기존의 전기 송풍장치(electric fan)에 비하여 풍속의 발생과 제어가 용이하고, 기계적인 가동부분이 없으므로 마모와 소음이 발생하지 않으며, 그 구조가 매우 단순하고, 초소형화도 용이하기 때문에, 연구자들의 큰 관심을 갖게 해왔다[1-5].

코로나 방전에 의한 이온풍 발생장치는, 코로나 전극 부근에서 발생한 이온들이 코로나 전극에서 유도전극 방향으로 이동할 때, 이들 이온들이 방전공간내의 중성 공기분자와 충돌함으로써 공기분자들도 이온과 동일한 방향으로 이동하게 하는 장치이다[1-2]. 따라서 최대의 이온풍속을 얻기 위해서는, 방전전극의 선단에 많은 이온들을 유효하게 생성 시키고, 또 방전전극과 유도전극간에 높은 전계를 형성하게 하여 이온들이 큰 정전력을 갖게 해야 한다[4]. 현재 이온풍 발생장치로 주로 이용되고 있는 침대 그물형(또는 침대 링형) 전극구조[4-6]에서는 침 방전을 이용하기 때문에 코로나 방전의 발생은 용이하나, 침전극의 절연과피전압이 낮기 때문에, 방전공간내에 높은 전계를 얻을 수가 없다. 왜냐하면, 인가전압의 상승은 침전극의 코로나 방전을 낮은 전압에서 아크방전으로 전이시키게 되어, 방전공간내에 높은 전압이

인가될 수 없게 되고, 결국 높은 전계를 얻을 수 없기 때문이다. 따라서 이러한 침전극을 코로나 전극으로 이용하는 방전전극구조에서는 높은 이온풍속은 원리적으로 얻을 수 없게 된다[4-6].

지금까지의 이온풍 발생장치 연구의 가장 중요 목표는 최대의 이온풍속을 얻는 것이었다[1-2, 5-7]. 따라서 종래의 이온풍 발생장치 중 가장 높은 이온풍속을 얻을 수 있는 전극구조는 침대 그물형 전극구조이다[8-9]. 이 경우의 침형 코로나 전극 대신에 선단이 원형인 관형을 코로나 방전전극으로 적용함으로써, 방전 개시전압과 절연과피전압은 크게 증가시키고, 선단의 모서리를 매우 날카롭게 하여 코로나 방전은 용이하게 발생시킬 수 있을 것으로 사료되어, 이의 유효성에 대한 기초 원리를 보고한바 있다[8-9]. 따라서 금속 관형 방전 전극과 유도전극을 구조와 관의 직경과 유도전극의 면적 비 등을 파라미터 연구를 통해 최적화한다면 매우 높은 이온풍속을 얻을 수 있을 것이고, 이는 이온풍 연구의 작은 업적[1-2, 5-7]이 될 수 있을 것이라고 사료된다.

본 연구에서는, 종래의 침형 전극 대신에 선단이 원형인 관을 코로나 방전전극으로 적용하여 매우 높은 이온풍속을 얻기 위한 파라미터 연구, 즉, 관형 전극의 형상(내경과 선단), 관형 방전전극과 유도전극의 직경의 비, 코로나 방전의 극성이 이온 발생과 효율에 미치는 영향과, 이온풍속장치의 풍속분포 특성 검토를 위한 풍속 프로파일(profile) 측정 등을 실험적으로 연구 검토하여 금속관을 코로나 방전전극 적용했을 때의 최대 이온풍속을 얻고자 하였으며, 그 결과들을 기존의 침형 전극의 특성과 비교 분석하였다.

* 정 회 원 : 경북대 대학원 전자전기컴퓨터학부 박사과정

† 교신저자, 정회원 : 경북대 전자전기컴퓨터학부 교수 · 공학

E-mail : jdmoon@knu.ac.kr

접수일자 : 2010년 9월 7일

최종완료 : 2010년 11월 29일

2. 실험 장치 및 방법

그림 1은 이온풍 발생장치의 실험 개략도로서, 관형 전극과 그물형 유도(접지)전극으로 구성되어 있다. 관형 전극(stainless cylinder)은 선단의 곡률반경(0.05 mm)로 가공하였고, 내경(d)은 5종류로 하였고, 유도전극(mesh disc, stainless cylinder)의 직경(D)은 25.0 mm로 고정이다. 통상의 방전장치에서는 방전전극의 직경, 방전 간격, 그리고 대향 유도전극 면적의 비(ratio)가 방전에 크게 영향을 미치는 중요 변수가 된다[10]. 따라서 본 연구에서는 두 전극간의 거리(s)는 15.0 mm로 고정하고, 방전전극의 내경과 유도전극의 직경의 비(d/D)를 실험변수로 하였고, 이를 표 1에 나타내었다.

전원으로는 직류 고전압(0~40 kV, 20mA)을 사용하였으며, 인가전압 및 방전전류는 고전압 분압기(HP, 1,000:1, Tektronix, P6015A)와 전압계(DVM, Fluke, 79) 그리고 저항(RM)으로 각각 측정하였다. 이온풍속은 열선식 풍속계(Testo 425)로 유도전극 후방 10 mm 지점에서 상하 2 mm 간격으로 풍속분포(wind velocity profile)를 측정하고, 이를 평균하여 이온풍속으로 구하였다. 이온풍 발생장치는 풍통(acrylic wind tunnel, 직경 25 mm, 길이 50 cm) 내부에 설치하였고, 모든 실험은 온습도가 제어(air, 23±3 °C, 30±3 %RH)된 실험장치 내에서 수행되었다.

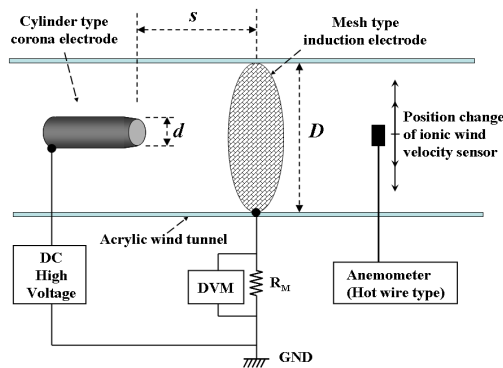


그림 1 이온풍 실험장치 개략도

Fig. 1 Schematic diagram of ionic wind generation system

표 1 관형 전극의 관 내경 및 유도전극 직경과의 비

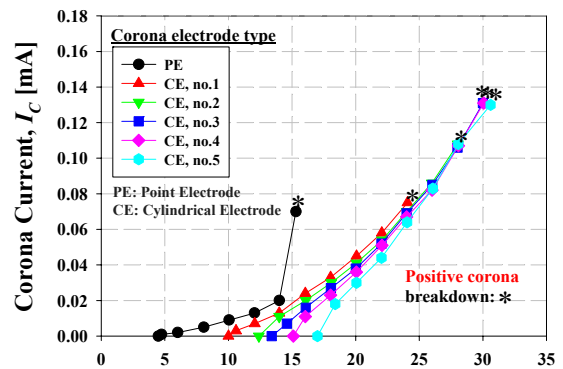
Table 1 Cylinder inner diameter and diameter ratio of d/D

type of cylinder electrode	no. 1	no.2	no.3	no.4	no.5
cylinder inner diameter, d [mm]	1.73	2.06	3.13	4.41	6.19
ratio of d/D ($D=25.00$ mm)	0.069	0.082	0.125	0.176	0.248

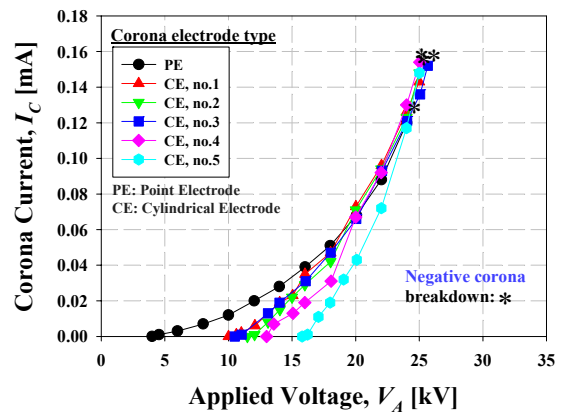
3. 실험 결과 및 고찰

그림 2는 관형 및 침형 전극의 정 및 부 극성 코로나 방전의 전류-전압 특성을 나타낸 것이다. 관형이나 침형의 코로나 전극 및 정 및 부 극성의 경우 모두, 코로나 개시전압에서 코로나 전류가 흐르기 시작하여 인가전압의 증가에 따

라 증가하다가 절연과괴전압에 이르는 전형적인 방전 특성을 보여준다. 이때 침형 전극의 경우, 가장 낮은 전압에서 코로나 방전이 시작되고, 또 가장 낮은 전압에서 절연과괴전압에 이름을 보여준다. 이는 낮은 전압에서 방전이 시작되기 때문에 하전장치로서는 유효하나, 하전된 이온들의 이동을 위한 전계가 낮기 때문에 높은 이온풍 발생에는 미약하다[1-2]. 한편, 관형 전극의 경우, 비교적 높은 전압에서 코로나 방전이 시작되고, 또 매우 높은 전압에서 절연과괴전압에 이름을 보여준다. 또한 관형 전극의 직경이 커질수록 코로나 개시전압과 절연과괴전압이 크게 증가하는 것을 보여준다. 이는 높은 전압에서 방전이 시작되기 때문에 하전장치로서는 불리하나, 하전된 이온들의 이동을 위한 전계가 매우 높기 때문에 높은 이온풍 발생에는 아주 효과적일 것을 보여준다[8-9].



(a) 정극성 방전



(b) 부극성 방전

그림 2 이온풍 장치의 전압-전류 특성

Fig. 2 I-V characteristics of ionic wind generation system

그림 3은 관형 및 침형 전극의 정극성 코로나 방전 특성을 관형 전극의 내경(d)과 유도전극의 직경(D)의 비(d/D)와 코로나 개시전압(V_C)과 절연과괴 전압(V_B)을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 3에서 보이듯이, 관형의 V_C 와 V_B 는 침형의 것에 비해 (d/D)가 낮을 때는 각각 2.2~2.6 배와 1.6~1.8 배 정도로 크나, 높은 d/D 에서는 2.8~3.8 배 및 1.9~2.0 배의 매우 높은 값을 보여준다. 이는 전술했듯이, 침형에 비해 관형

이 경우 방전간격 중에서 2 배로 높은 전계를 얻을 수 있으므로, 그림 3은 관형 방전전극을 이온풍 장치에 적용함으로써 매우 높은 이온풍속을 얻을 수 있는 가능성을 보여주는 결과이다.

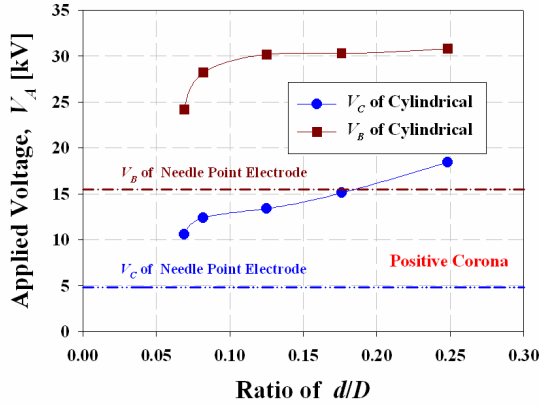
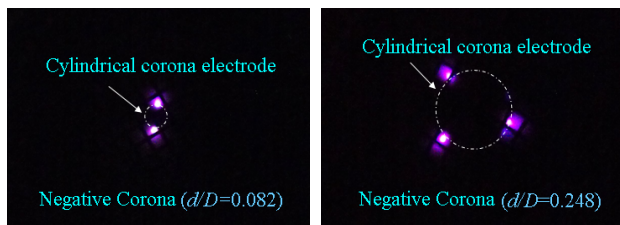


그림 3 관형 전극의 d/D 변화에 따른 코로나 개시전압 및 절연파괴전압

Fig. 3 Corona onset voltage and breakdown voltage of cylindrical electrode



(a) 정극성 방전의 경우 (d/D=0.082 및 d/D=0.248)



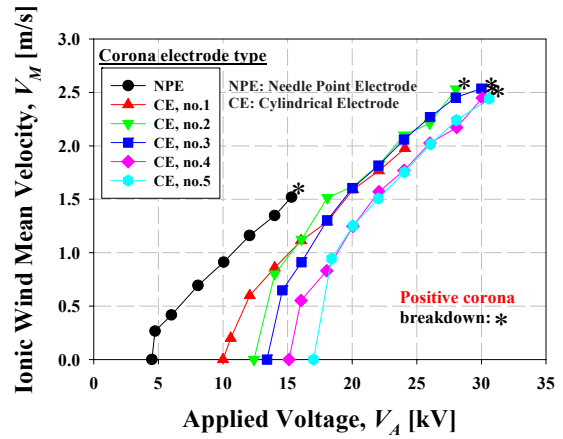
(b) 부극성 방전의 경우 (d/D=0.082 및 d/D=0.248)

그림 4 d/D변화에 따른 관형 방전전극 선단의 코로나 방전 사진

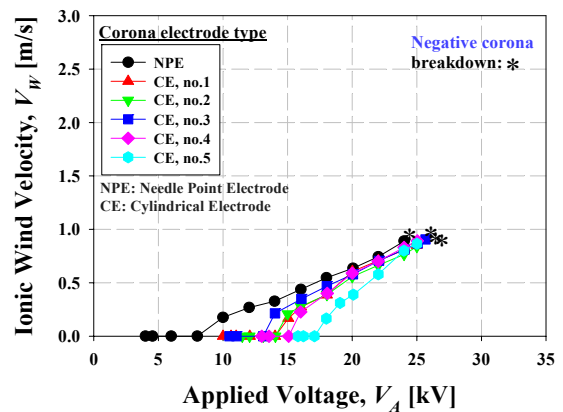
Fig. 4 Photos of corona discharge on tip of cylindrical corona electrode at different d/D

이와 같이 정 및 부극성간의 큰 방전특성 차이를 보여주는 것은 소과정 코로나 방전 특성의 차이에서 기인하는 것으로 사료된다. 그림 4는 d/D에서의 값이 작을 경우 (d/D=0.082)와 매우 큰 경우(d/D=0.248)의 정 및 부 극성 방전 모양을 나타낸 이다. 정극성 방전의 경우는 방전특성상 방전전극 표면에서 좌우로 잘 전이(propagation)되어 방전전극 표면전체에서 방전이 발생되지만, 부극성 방전의 경우에는 방전특성상 방전전극의 표면상으로 잘 전이되지 못하고 점상(spot)으로 방전이 발생되어 방전전극 표면의 국지

적 방전을 발생시키게 된다[11-12]. 이와 같은 정 및 부 극성간의 방전 발생 모양의 차이는 결국 그림 2와 3과 같은 정 및 부 극성간의 방전특성간의 차이가 나게 되는 원인이 되며, 이는 결국 이온풍의 발생에도 크게 영향을 미쳐서, 부극성보다 정극성의 방전이 이온풍 발생에 더욱 효과적인 것으로 사료된다.



(a) 정극성 방전



(b) 부극성 방전

그림 5 관형 및 침형 이온풍 장치의 이온풍속-인가전압 특성
Fig. 5 Ionic wind velocity-voltage characteristics of ionic wind generation system with cylindrical and needle corona electrode

그림 5는 관형 및 침형 방전전극의 정 및 부 극성 이온풍속-인가전압 특성을 나타낸 것이다. 관형 전극을 적용하였을 경우, 침형 전극의 경우보다 정 및 부 극성 모두 매우 높은 전압과 전류를 얻을 수 있으므로 매우 높은 이온풍속을 얻을 수 있음을 보여준다. 즉 정극성 코로나의 경우, 침형 전극의 경우 최대전압 15.5 kV에서 최대 이온풍속 1.5 m/s를 얻을 수 있었으나, 관형 방전전극의 경우는 d/D에 따라 최대전압이 24~30 kV로 침형 전극보다 1.5~2.0 배정도 크기 때문에, 최대 이온풍속도 2.0~2.5 m/s로, 침형에 비해 1.3~1.7 배의 높은 값을 보여준다. 그러나 부극성 코로나 방전의 경우에는 관형과 침형 방전전극이 비슷한 결과를 보여주어, 관형 방전전극이 장점이 없음을 보여주었다

이와 같이 관형이 침형 방전전극보다 높은 이온풍속을 얻을 수 있는 이유는 다음과 같다. 즉 인가전압의 n 배의 증가는 전극간의 전계가 n 배 증가하는 경우, 정전 에너지 ($W_E=q_iEs$, 여기서, q_i 는 이온의 전하량, E 는 전계, s 는 이온의 이동거리이다)가 모두 이온들의 운동에너지($W_K=m_i v_i^2/2$, 여기서, m_i 는 이온의 질량, v_i 는 이온의 이동속도)로 변환된다[7, 8]고 보면 $W_E=W_K$ 이므로, 이온들의 운동에너지(W_K)도 n 배가 되며, 따라서 이온의 이동속도는 \sqrt{n} 배로 증가할 수 있다. 또한 인가전압의 증가에 따른 코로나 전류의 증가는 이온 량의 증가로 이어지기 때문에, 이온풍속이 더욱 증가할 수 있게 된다.

그림 6은 관형 전극의 내경과 유도전극의 직경의 비 (d/D)의 변화에 따른 최대 이온풍속 특성을 인가전압 극성별로 나타낸 것이다. 정극성 코로나의 경우, d/D 의 증가는 이온 풍속의 증가로 나타나는데, 본 실험의 경우는 주어진 $D(D=25\text{ mm})$ 에서 d (표 1 참조)만 가변시킨 것으로, d 만의 증가는 바로 방전 공간내의 전압(즉, 전계)의 증가를 의미하게 된다. 실제 $d/D=0.069$ 인 경우와 $d/D=0.125$ 인 경우를 비교하여 보면, 인가전압은 1.25 배, 코로나 전류는 1.75 배 증가하여, 상기 관계식($W_E=q_iEs=W_K=m_i v_i^2/2$)에 의하면 이온 풍속은 2.19 배 증가하여야 한다. 그러나 실험결과에서의 이온풍속의 증가량은 1.28 배 정도이다. 이는 관형 방전전극과 유도전극간이 심한 불평등전계이고, 방전전류의 증가에 의한 이온 량의 증가가 그대로 이온풍속에 1차 비례하여 증가시키지 않기 때문이며, 또한 전계 증가에 의한 이온의 운동에너지 증가가 공기 입자의 충돌 에너지는 증가시키지만 이온 풍속을 1차적으로 증가시키지 않기 때문에 이온풍속의 2.19 배의 증가로는 이어지지 않은 것으로 사료된다.

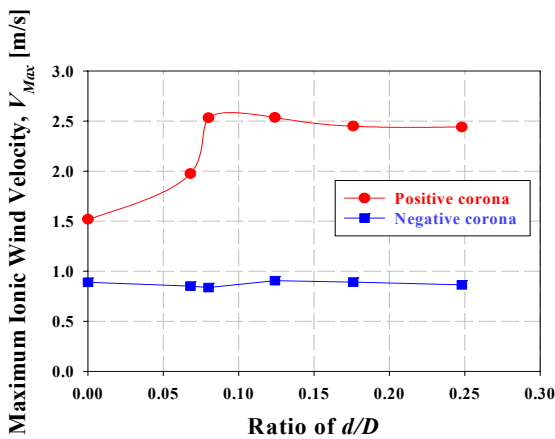
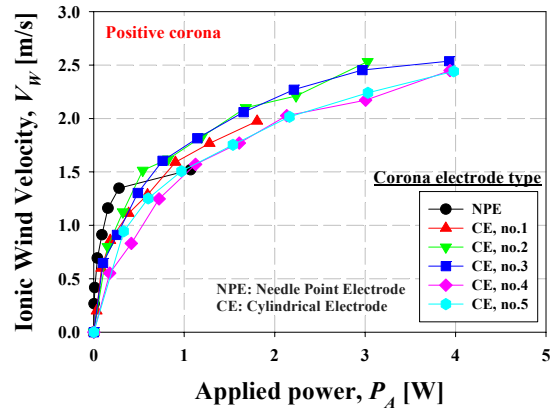


그림 6 관형 전극의 d/D 와 인가전압의 극성 변화에 따른 최대 이온풍속 특성

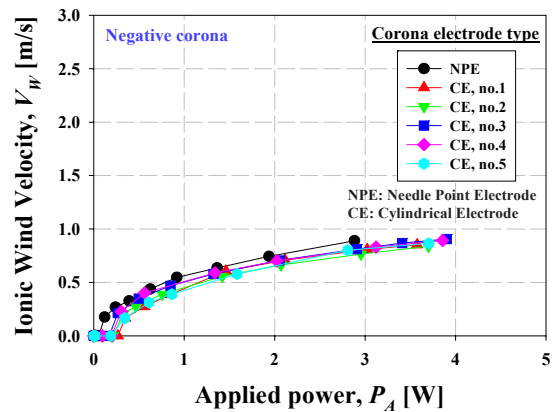
Fig. 6 Maximum ionic wind velocity as a function of diameter ratio of d/D and polarity of applied voltage

그림 7은 관형 및 침형 방전전극의 정 및 부 극성 이온풍속-코로나 전력 특성을 나타낸 것이다. 여기서 코로나 전력 (P_A)은 $P_A=I_C V_A$ 에서 얻었으며, 여기서 I_C , V_A 는 각각 코로나 전류, 인가전압이다. 그림 7에서, 인가전력의 증가는 이온 풍속의 증가를 가져오며, 정극성의 경우 전력의 증가에 따라 매우 높은 이온풍속을 얻을 수 있음을 보여준다. 한편 이온

풍속이 낮은 경우(1.4 m/s 이하)의 풍속 발생에는 낮은 전압에서 방전이 발생하는 침형 전극을 적용하는 것이 유효하나, 실제 응용을 위해서는 전력효율보다는 이온풍속의 극대화 필요하므로[1-2, 7], 높은 이온풍속(1.5 m/s 이상)을 얻기 위해서는 관형 전극을 적용하는 경우가 더욱 유효한 것으로 사료된다.



(a) 정극성 방전



(b) 부극성 방전

그림 7 이온풍 장치의 인가전력-이온풍속 특성

Fig. 7 Ionic wind velocity as a function of input corona power of ionic wind generation system

그림 8은 관형 및 침형 방전전극의 이온풍 발생장치가 설치된 풍통의 중심에서 상하 및 좌우의 방사상 거리 변화에 따른 정극성 이온풍속의 분포를 d/D 를 변수로 하여 측정된 것이다. 침형 전극을 적용하였을 경우의 이온풍속의 발생분포 형태는 'V'자 형태를 가지나, 관형 전극을 적용하였을 경우의 이온풍속의 발생분포 형태는 'W'자 형태를 가지며, 이는 침대 링형 방전전극 구조의 이온풍 발생장치에서 얻어지는 이온풍의 발생분포[7]와 유사한 형태를 가지는 것으로 나타났다. 그림 8에서 보듯이, 침형 전극의 이온풍속 분포(그림 8(a))는 작은 'V'자 형태를 보여주나, 관형 전극의 이온풍속의 분포(그림 8(c))는 매우 큰 'W'자 형태를 가짐을 보여준다.

그림 8에서 최대 이온풍속은 관전극선단의 연장선상에서 나타나게 되며, 이 지점에서의 이온풍속은 d/D 가 0.082인

경우, 최대 4.1 m/s를 보여주었으며, 이는 침전극의 연장선 상에서 나타나는 최대 이온풍속인 2.3 m/s에 비하여 약 1.8 배로 높게 나타났으며, 다른 연구자들의 높은 이온풍속 결과(즉, 최고풍속 3.2 m/s[2], 1.4 m/s[4], 최고풍속 4.5 m/s[6], 2 m/s[7] 그리고, 1.2 m/s[8])와 비교해도 높음이 확인되어, 관형 코로나 방전전극이 실적용상 매우 유효 및 유용함을 보여주었다.

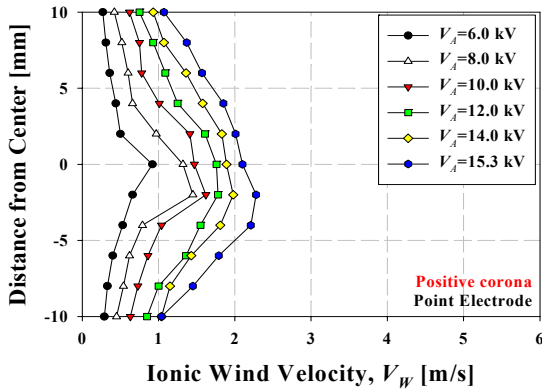
3. 결 론

본 연구에서는, 침형 전극 대신에 관형 전극을 코로나 방전전극으로 적용함으로써 높은 이온풍속을 얻기 위한 파라미터 연구를 수행한 결과와 이를 침전극의 결과를 비교 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

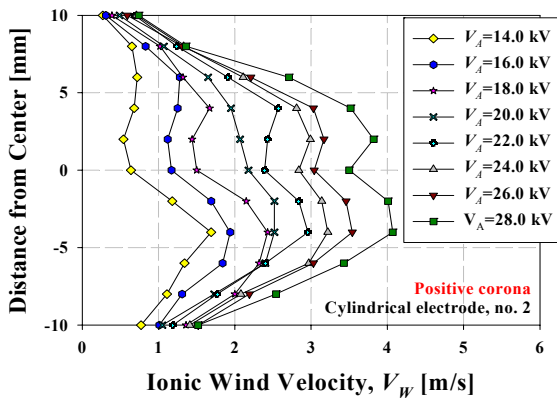
침형 전극은 코로나 개시전압과 절연과피전압이 매우 낮기 때문에 하전장치로서는 유효하나, 이온풍 발생장치로서는 미흡하였다. 한편, 관형 전극은 코로나 개시전압과 절연과피전압이 매우 높기 때문에 하전장치로서는 불리하나, 하전된 이온들의 이동을 위한 전계가 매우 높기 때문에 높은 이온풍 발생장치로서는 아주 효과적임을 보여주었다. 즉, 정극성 코로나 방전 특성을 관형 전극의 내경(d)과 유도전극의 직경(D)의 비(d/D)와 코로나 개시전압(V_C)과 절연과피 전압(V_B)을 비교하여 나타내면, 관형의 V_C 와 V_B 는 침형의 것에 비해 d/D 가 작을 때는 각각 2.2~2.6 배와 1.6~1.8 배정도, 큰 d/D 에서는 2.8~3.8 배 및 1.9~2.0 배의 매우 높은 값을 보여주었다.

정극성 코로나의 경우, 침형 전극의 경우는 최대전압(15.5 kV)에서 최대 이온풍속(1.5 m/s)을 얻었으나, 관형 전극의 경우는 d/D 에 따라 최대전압(24~30 kV)은 침형 전극보다 1.5~2.0 배정도로 높고, 최대 이온풍속(2.0~2.5 m/s)도 침형에 비해 1.3~1.7 배의 높은 값을 얻을 수 있었다.

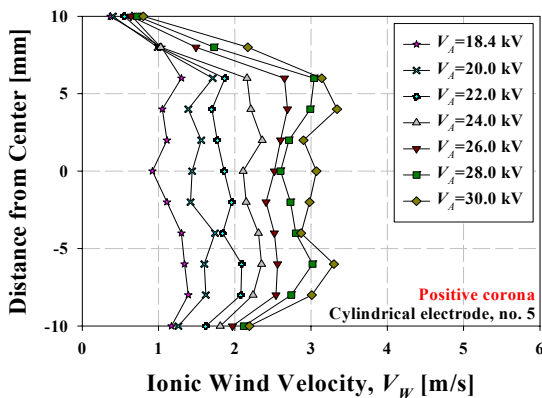
침형 전극의 이온풍속의 발생분포 형태는 'V'자 형태를 가지나, 관형 전극은 'W'자 형태로 더 넓고 크며 또한 균일한 이온풍속을 가짐이 확인되었다. 최대 이온풍속은 관형 전극선단의 연장선상에서 나타나며, 이 지점에서의 이온풍속은 d/D 가 0.082인 경우 최대 4.1 m/s로 침전극의 최대 이온풍속인 2.3 m/s에 비하여 약 1.8 배로 매우 높게 나타났으며, 다른 연구자들의 이온풍속 결과와 비교해도 높은 값임이 확인되었다.



(a) 침형 코로나 전극



(b) 관형 코로나 전극 ($d/D=0.082$)



(c) 관형 코로나 전극 ($d/D=0.248$)

그림 8 코로나 전극의 종류와 인가전압 변화에 따른 이온풍속의 분포특성

Fig. 8 Ionic wind velocity profile for different corona electrode and applied voltages

참 고 문 헌

- [1] A. Rashkovan, E. Sher, and H. Kalman, "Experimental optimization of an electric blower by corona wind", Applied Thermal Engineering, Vol. 22, No. 14, pp. 1587-1599, 2002.
- [2] M. Rickard, D. Dunn-Rankin, F. Weinberg, and F. Carleton. "Maximizing ion-driven gas flows", Journal of Electrostatics, Vol. 64, No. 6, 368-376, 2006.
- [3] H. Tsubone, J. Ueno, B. Komeili, S. Minami, G.D Harvel, K. Urashima, C.Y. Ching, and J.S Chang, "Flow characteristics of dc wire- non-parallel plate electrohydrodynamic gas pump", Journal of Electrostatics, Vol. 66, No. 1-2, pp. 115-121, 2008.
- [4] R. Mestiri, R. Hadaji, and S.B. Nasrallah, "The electrical discharge as a source of a mechanical energy", Desalination, Vol. 220, No. 1-3, pp. 468-475, 2008.

- [5] E. Moreau and G. Touchard, "Enhancing the mechanical efficiency of electric wind in corona discharge", Journal of Electrostatics, Vol. 66, No. 1-2, pp. 39-44, 2008.
- [6] J.-D. Moon, D.-h. Hwang, and S.-T. Geum, "An EHD Gas Pump Utilizing a Ring/Needle Electrode," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, No. 2, pp. 352-358, 2009.
- [7] M Rickard, D. Dunn-Rankin, F. Weinberg, and F. Carleton, "Characterization of ionic wind velocity," Journal of Electrostatics, Vol. 63, No. 6-10, pp. 711-716, 2005.
- [8] 정재승, 문재덕, "금속관형 코로나 방전극을 적용한 효과적인 이온풍 발생," 전기학회논문지, 6호, 59권, pp. 599-603, 2010.
- [9] 정재승, 김진규, 이우석, 문재덕, "금속관대 그물형 방전 전극간의 이온풍 특성 기초연구," 2010년도 대한전기학회 하계학술대회(2010.7.14-16), DHP001.
- [10] Harry J. White, Electrical Precipitation, Addison-Wesley Publishing Co. Inc. USA, 1963, pp. 97-99.
- [11] 田春生, 放電・高電壓工學, 서울:동명사, 1980, pp. 94-99.
- [12] S. Masuda and J.-D. Moon, "Electrostatic Precipitation of Carbon Soot from Diesel Engine Exhaust," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 19, No. 6, pp. 1104-1111, 1983.

저 자 소 개



정재승 (鄭在勝)

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

Tel : 053-940-8601

Fax : 053-950-5508

E-mail : bucstual@empal.com



문재덕 (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 전기공학전문과정 졸업(공박). 현재 경북대학교 IT대학 전기공학과 교수.

Tel : 053-950-5601

Fax : 053-950-5508

E-mail : jdmoon@knu.ac.kr