

와이어 전극과 평행판에서 발생하는 이온풍 특성 연구

안 영 철, 황 필 재, 이 제 근*

부산대학교 기계공학과 대학원, *부산대학교 기계공학과

A Study on an Ion Wind Created by a Wire Electrode and Parallel Plates Assembly

Young-Chull Ahn, Phil-Jae Hwang, Jae-Keun Lee*

Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received August 6, 2003; revision received December 8, 2003)

ABSTRACT: When a strong electric field is applied between a sharply curved electrode and a blunt surface, the corona may result in a gas movement in the electrode gap which is directed toward the blunt surface. That is called the corona wind. It enhances heat and mass transfer between the surface and the surrounding gas. Moreover such enhancement causes no noise or vibration, which can be applied in complex, isolated geometries, and allows simple control of surface temperatures. This paper examines the relationship between the corona wind and the relative humidity. The facility consists of high voltage power supply, thin tungsten wire, plate electrode, multimeter, microammeter and flow meter. Gas velocity is a linear function of voltage, relative humidity and is proportional to the square root of the current. The maximum velocities for the positive and negative corona discharge are 1.9 m/s (2.74 CMM/m), 1.5 m/s (2.15 CMM/m), respectively.

Key words: Ion wind(이온풍), Corona discharge(코로나 방전), Charging current(방전전류)

기 호 설 명

- a : Plate 가로길이 [mm]
- b : Plate 세로길이 [mm]
- D : 실험장치 높이 [mm]
- d : Wire 직경 [mm]
- E : 전기장 [N/C]
- f_e : 단위체적당 작용하는 힘 [N/m^3]
- H : 실험장치 세로길이 [mm]
- L : Wire와 Plate 사이의 거리 [mm]

- l : Wire 길이 [mm]
- Q : 전하량 [C/m^3]
- RH : 상대습도 [%]
- W : 실험장치 가로길이 [mm]

그리스 문자

- ϵ : 유전율 [C/Vm]
- ρ : 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

이온풍(Ion Wind)은 Hauksbee가 1719년에 최초로 대전된 튜브에서 약한 바람이 생성되는 것

† Corresponding author

Tel.: +82-51-510-2455; fax: +82-51-512-5236

E-mail address: jklee@pusan.ac.kr

을 발견한 이후로 Newton, Faraday뿐만 아니라 많은 과학자들의 흥미 있는 학문의 대상이 되기도 했다. 그중에서 Chattock⁽¹⁾은 최초로 이온풍의 현상을 정량적으로 분석하였으며, 이어 Robinson⁽²⁾에 의해 역학적으로 규명이 되었다. 특히 Robinson은 이온풍의 속도가 전류의 함수로 표현된다는 것과, 공기 중에서 코로나 방전시 공급되는 전기에너지의 1~2%만이 기체입자의 운동에너지로 변환된다는 것도 증명하였다. 그후로 Owsenek 등에 의해 이온풍이 열전달을 촉진시킨다는 연구 결과가 발표되었다.^(3,4)

이를 계기로 이온풍에 대한 연구가 본격적으로 시작되었으며 최근에는 특히 강한 전기장의 형성이 열전달 촉진에 미치는 영향과 코로나 방전을 이용한 높은 효율을 가진 전기집진장치(Electrostatic Precipitator) 제작에 관한 연구가 주를 이루고 있다. 그리고 이러한 연구들은 현재까지도 많이 진행되고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

이온풍은 코로나 방전(Corona Discharge)시 발생하는 이온(양, 음이온)들과 기체분자들 사이의 마찰로 인해 발생하므로 주위의 환경에 의해 많은 영향을 받는다. 특히, 습도의 경우 코로나 방전에 의한 이온 발생량에 직접적인 영향을 미치므로, 습도는 이온풍 발생에 주요한 변수가 된다.

따라서 본 연구에서는 코로나 방전에 의한 이온풍 특성을 분석하기 위한 일환으로 와이어 전극과 평판 전극으로 구성된 1단 실험장치를 이용하여 상대습도 변화에 따른 이온풍의 유속과 유량을 분석하였다.

2. 실험방법 및 실험장치

2.1 이론적 배경

방전극과 방전판 사이에 강한 전기장이 형성되면 방전극 근처의 기체에 글로우 방전(Glow Discharge)이 일어나는데, 이를 대기압에서 흔히 코로나라고 한다. 어떤 조건 하에서 코로나는 방전극과 방전판 사이에 인가된 전압의 극성(Polarity)에 상관없이 기체분자의 움직임을 유발하는데 이를 이온풍이라고 한다. 이는 인위적으로 만든 유동이 없는 경우 하전된 기체이온에 작용하는 전기력(Electric Force)에 의해 발생하며 관계식은 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$f_e = QE - \frac{1}{2} |E|^2 \nabla \epsilon + \frac{1}{2} \nabla \left(\rho \frac{d\epsilon}{d\rho} |E|^2 \right) \quad (1)$$

위 식에서 우변 첫째항은 쿨롱힘(Coulomb Force)으로 전기장 내에서 순수 전하에 작용하는 힘을 나타내며 이는 단상유동에 있어 중요한 역할을 한다. 우변 둘째항은 유체 내에서의 유전율의 구배에 의한 유체가 받는 힘을 나타내며 이상유동의 경우에 특히 중요하다. 우변 셋째항은 전기장의 불균일에 의해 유체에 작용하는 힘을 나타낸다.

Fig. 1은 이온풍 발생원리를 나타낸 것으로 방전극에 고전압이 인가되면 와이어 근처에는 전기장 세기가 상당히 증가하며 이곳을 지나가는 이온들은 높은 전기이동률(Electrical Mobility) 때문에 고속으로 가속된다. 가속된 이온들은 주위의 기체분자와 충돌하여 기체분자의 외곽전자를 방출시켜서 양이온과 자유전자로 각각 분리한다. 생성된 전자들은 같은 과정을 반복하여 코로나 방전 영역 내에 상당량의 전자와 양이온들을 생성시키는 전자사태(Electron Avalanche) 현상이 일어난다. 만약 방전극이 음이면 전자는 접지극으로, 양이온은 방전극으로 이동하고, 방전극이 양이면 반대가 된다. 이때 이온의 이동에 의하여 주위의 전기적 중성인 공기 분자들이 마찰에 의해 유동을 일으키며, 이때 발생하는 바람을 이온풍이라 부른다.

코로나 방전에 의해 발생한 이온들은 평판 전극 영역을 지나면서 평판 전극을 통해 접지극으로 사라지지만, 이온과의 마찰에 의해 이동하는 공기분자는 관성력에 의해 계속 이동을 하며 유동을 일으킨다.

따라서, 이온풍은 이온의 양이 많고, 전기이동률이 클수록 유속이 빠르며, 와이어 방전극의 길

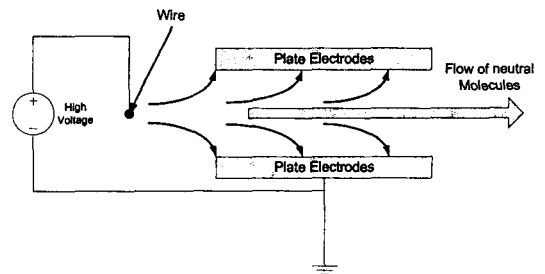


Fig. 1 Mechanism of the ion wind by corona charging.

이가 길수록 이온풍의 유량이 많아짐을 유추할 수 있다.

2.2 실험장치

Fig. 2는 본 연구에 사용된 이온풍 발생장치의 개략도로서, 실험장치는 직육면체 형상이며, 방전극은 1개의 텅스텐 와이어를 팽팽하게 고정시킨 후 고전압공급장치와 연결하였다. 방전판은 착탈이 가능한 2개의 합석판으로 제작하였으며 장치의 옆면에서 접지극과 연결하였다. 전압측정을 위해 고전압공급장치에 저항프루브(1 kΩ)와 멀티미터를 이용하여 회로를 구성하였으며, 코로나 방전시 와이어 전극과 방전판 사이에서 발생하는 미세전류를 측정하기 위하여 전류계를 방전판과 연결시켰다. Table 1에는 실험장치의 상세 사양을 나타내었다.

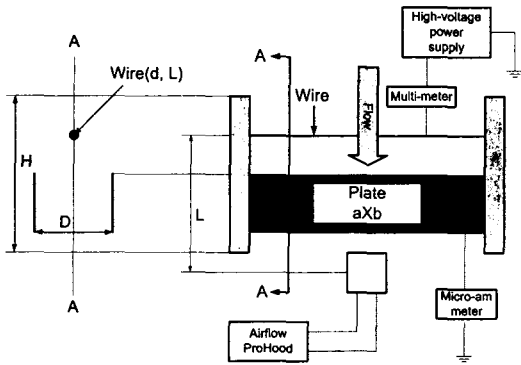


Fig. 2 A schematic layout of the experimental apparatus.

Table 1 Specifications of the test device

	Component	Specifications (mm)
Test device	Device ($W \times H \times D$)	220 × 150 × 44
	Wire (d, l)	0.1, 200
	Plate ($a \times b$)	200 × 33

Table 2 Specifications of the constant temperature and humidity chamber

	Specifications
Electric power	AC 220 V, 3 Phase, 3 W, 60 Hz
Temperature	15 ~ 45 ± 0.5 °C, 1 °C/min
Relative humidity	10 ~ 90 ± 2%

이온풍의 유속측정은 회전 날개형 유속계(Air-flow, Prohood)를 이용하였으며, 평판의 중앙 위치에서 100 mm의 간격을 두고 측정하였다. 실내 온도와 상대습도는 항온항습챔버(H&C System) 내에서 조절하였으며, 실내는 외부와 차단하여 외풍의 영향을 받지 않는 조건에서 실험을 수행하였다. Table 2에는 실험에 사용된 항온항습챔버의 사양을 나타내었다.

2.3 실험방법 및 내용

본 실험은 공기의 주유동이 없는 경우, 상대습도에 따른 전압과 전류, 공기의 유속과의 관계를 알아보기 위하여 상대습도가 30%, 50%, 70%인 경우에 각각의 전압, 전류, 유속을 측정하였다.

전압은 디지털 멀티미터(TMI, M92A)를 이용하여 측정했으며, 전류는 방전극의 단위길이에 대한 전류로 나타내었다. 유속은 좌, 중, 우측 총 3 부분에서 3번씩 측정한 값을 평균하였으며 좌, 우측에서의 유속은 장치의 가장자리에서 발생하는 벽면 경계층의 영향을 고려하여 좌, 우측 벽면에서 10 mm 이격된 거리에서 측정하였다. 그리고 모든 값은 Spark-Breakdown이 일어나기 전까지 측정하였다. 또 양코로나 방전뿐만 아니라 음코로나 방전에 대한 실험도 병행하여 수행하였다. 양코로나 방전은 전압, 전류, 유동장이 비교적 안정적이었는데 반해, 데이터들의 차이가 작아 측정하기가 쉽지 않았다. 반대로 음코로나 방전은 낮은 전압에서는 비교적 전류와 유동장이 안정적이었으나, 전압이 증가함에 따라 전류와 유동장의 요동이 심하게 나타났다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전압과 전류의 관계

Fig. 3은 20 °C 온도조건에서 상대습도에 따른 양코로나 및 음코로나에 대한 전압과 전류의 관계를 나타낸 것으로, 코로나 방전에 의한 전형적인 전압-전류관계를 나타내고 있다.

그림에서 보듯이 양코로나는 18 kV, 음코로나 방전은 14 kV에서 각각 Spark가 발생했다. 결과에서 보는 바와 같이 음코로나 방전인 경우가 양코로나 방전의 경우보다 전류값이 큼을 알 수 있다. 그 이유는 와이어 방전극에 고전압이 인가될

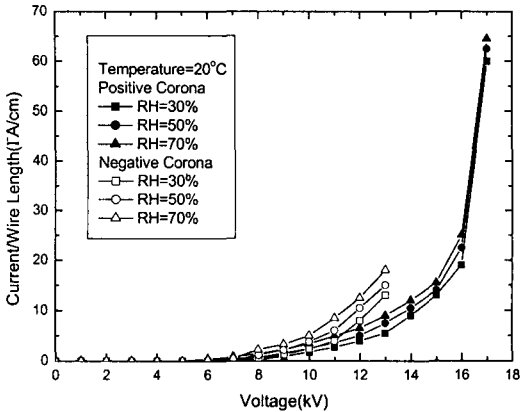


Fig. 3 Voltage-Current characteristics for both voltage polarities with various relative humidity.

때, 양코로나보다는 음코로나 방전일 경우 이온들이 더 많이 방출되기 때문이다. 전류가 이온들의 흐름임을 감안할 때 이온수가 증가할수록 전류량이 증가하기 때문이다.

3.2 전압과 유속의 관계

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 양코로나 방전과 음코로나 방전일 때의 전압과 유속과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 와이어 방전극에 인가하는 전압이 증가하면 코로나 개시전압, 즉 와이어 방전극에서 이온이 발생하여 평판 전극으로 이동하는 방전전류가 발생하기 시작하는

전압까지는 아무런 유동이 관찰되지 않지만, 그 전압 이상을 인가하면 이온풍의 유속은 인가 전압이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다.

상대습도가 증가함에 따라 이온풍의 유속은 증가하게 되는데, 이는 주위의 상대습도가 증가하면 와이어 전극에서 국부적인 수분의 응축이 발생하게 되고 이러한 응축수가 점점 역할을 하게 되어 이온의 방출이 용이하여 동일 전압에 대하여 발생하는 전류량이 증가하기 때문이다. 그러나, 이러한 상대습도별 이온풍 유속의 차이는 인가 전압이 증가할수록 그 차이가 작아짐을 알 수 있다. 이는 주어진 특정한 형상의 이온풍 발생장치에서 절연파괴가 일어나기 전까지 최대로 형성될 수 있는 이온풍에는 한계가 있음을 나타내는 실험결과이며 그 한계값에 대해 수렴하는 특성을 나타내게 된다.

상대습도 70%의 경우, 양코로나는 인가전압 6 kV, 음코로나의 경우는 인가전압 5 kV가 코로나 개시전압으로 관찰되었으며, 그 이상의 전압을 가해 주었을 때 이온풍이 발생하였다. 이와 같이 동일한 상대습도 조건에서 코로나 개시전압은 음코로나의 경우가 양코로나의 경우보다 낮은 값을 가지는데, 이는 음코로나에서 발생하는 전자가 양코로나에서 발생하는 양이온보다 전기이동률(Electrical Mobility)이 커서 보다 낮은 전압에서 방전되기 때문이다. 또한 상대습도가 낮아질수록 이러한 개시전압의 차이가 작아지는데 이는 낮은 상대습도 조건으로 인해 방전극에 형성되는 수분의 응축현상이 없어지기 때문에 습도에 따른 극

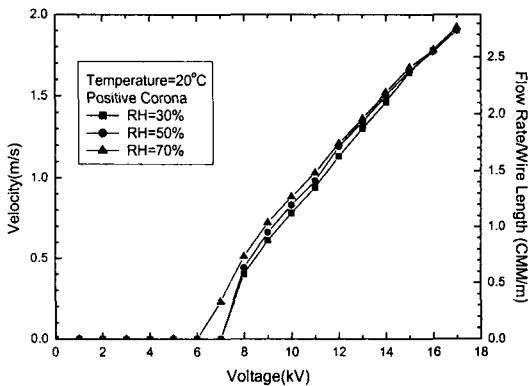


Fig. 4 Corona wind velocity as a function of the applied voltage for positive corona charging.

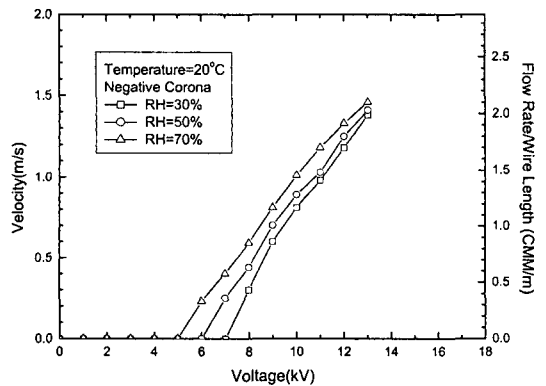


Fig. 5 Corona wind velocity as a function of the applied voltage for negative corona charging.

성 간의 이온발생 정도 차이가 작아지기 때문이다. 그리고, 주유동이 없을 때 이온들은 쿨롱힘(Coulomb Force)의 영향을 받으므로 전압이 커질수록 전기장의 세기가 커지므로 이온의 흐름이 더 많아지게 된다.

또한 동일한 인가전압에서 음코로나에 의한 이온풍의 유속이 양코로나에 의해 발생하는 이온풍의 유속보다 크다. 이는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 동일 인가전압 조건에서 음코로나에서 발생하는 이온의 양이 많으므로, 이에 따라 이온풍의 유속이 증가함을 알 수 있다.

3.3 전류와 유속의 관계

Fig. 6은 전형적인 코로나 방전에 의한 방전전류와 이온풍 유속의 관계를 나타낸 것이다. 동일한 방전전류에 대하여 양코로나에서 발생하는 이온풍이 음코로나의 이온풍보다 강한 것을 알 수 있는데, 이는 각각 발생하는 이온의 전기이동률이 다르기 때문이다. 양코로나 방전인 경우는 양이온이, 음코로나 방전인 경우는 음이온이 방전판으로 이동한다. 이때 양이온이 전자보다 약 1,840배 더 크기 때문에 양이온과 음이온의 질량차로 인해 양이온이 이동할 경우 더 많은 기체분자의 유동을 발생시키기 때문이다. 즉, 양이온과 음이온의 질량차에 의하여 전기에너지의 역학적 에너지로의 변환효율이 음코로나 방전보다는 양코로나 방전일 때 더 높다는 것을 알 수 있다.⁽⁹⁾

또한, 음코로나와 양코로나에 대하여 이온풍의 유속은 각각 1.5 m/s와 1.9 m/s에 수렴함을 알 수 있다.

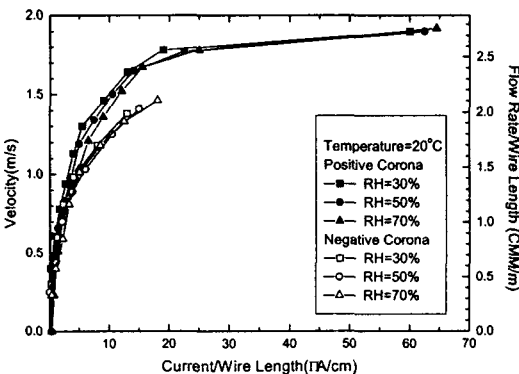


Fig. 6 Ion wind velocity as a function of the charging current.

4. 결 론

본 연구에서는 코로나 방전에 의한 이온풍 특성을 분석하기 위하여, 와이어 전극과 평판 전극으로 구성된 실험장치에서 코로나 방전시 인가전압과 방전전류, 그리고 상대습도 조건변화에 대한 이온풍 유속의 변화를 분석하였으며, 주요 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 인가전압이 증가할수록 방전전류의 증가와 전기장 강도의 증가로 이온풍이 강해지며, 동일한 방전전류에 대해 양이온과 음이온의 전기적 이동성의 차이로 인하여 양코로나에서 발생하는 이온풍이 음코로나에서 발생하는 이온풍보다 강하다.

(2) 상대습도가 증가할수록 방전극에서의 이온 발생이 증가하여 이온풍의 발생 또한 증가하게 된다.

(3) 인가전압이 코로나 영역 내에서 증가함에 따라 이온풍도 증가하여 일정한 유속에 수렴하게 되며, 음코로나와 양코로나에 대하여 각각 1.5 m/s(2.15 CMM/m), 1.9 m/s(2.74 CMM/m)의 이온풍이 발생하였다.

후 기

이 논문은 2004년 부산대학교 Post-Doc. 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Chattock, A. P., 1899, On the velocity and mass of ions in the electric wind in air, *Philosophy Magazine*, Vol. 48, p. 401.
2. Robinson, M., 1961, Movement of air in the electric wind of the corona discharge, *Trans. Am. Inst. Electr. Engng. Commun. Electron (AIEE J.)*, pp. 143-150.
3. Owsenek, B. L., Seyed-Yagoobi, J. and Page, R. H., 1995, Experimental investigation of corona wind heat transfer enhancement with a heated horizontal flat plate, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 309-315.
4. Owsenek, B. L. and Seyed-Yagoobi, J., 1997, Theoretical and experimental study of electrohydrodynamic heat transfer enhancement

- through wire-plate corona discharge, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 119, pp. 604-610.
5. Lee, J. K., Kim, S. C., Shin, J. H., Lee, J. E., Ku, J. H. and Shin, H. S., 2001, Performance evaluation of electrostatically augmented air filters coupled with a corona precharger, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 35, pp. 785-791.
 6. Yabe, A., Mori, Y. and Hijikata, K., 1978, EHD study of the corona wind between wire and plate electrodes, *AIAA Journal*, Vol. 16, pp. 340-345.
 7. Hwang, P. J., Kim, S. C. and Lee, J. K., 2002, A study on an ion wind created by a wire electrode and parallel plates assembly, *Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference*, pp. 388-393.
 8. Min, H. S., Na, B. C. and Yun, J. Y., 1998, Study on corona wind between wire and plate electrode in single phase, *Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference*, pp. 623-628.
 9. Kalman, H. and Sher, E., 2001, Enhancement of heat transfer by means of a corona wind created by a wire electrode and confined wings assembly, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, pp. 256-282.