

코로나 방전을 이용한 이온풍의 특성분석 및 열전달 향상

이 재 일, 황 유 진*, 주 호 영*, 안 영 철**, 신 희 수***, 이 재 근****

부산대학교 미세기계전자시스템 협동과정, *부산대학교 기계공학과 대학원,

부산대학교 기계기술연구소, *부산대학교 기계공학과

Characteristic of the Ion Wind Using Corona Discharge and Enhancement of Heat Transfer

Jae-Il Lee, Yu-Jin Hwang*, Ho-Young Joo*,
Young-Chull Ahn**, Hee-Soo Shin***, Jae-Keun Lee****

Interdisciplinary Program in Micro Electro Mechanical Systems, Pusan National Univ., Busan 609-705, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Pusan National Univ., Busan 609-735, Korea*

***Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National Univ., Busan 609-735, Korea*

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

(Received June 24, 2005; revision received September 9, 2005)

ABSTRACT: An experimental study is conducted to investigate the characteristics of the ion wind generated by the electric field between a needle electrode and the parallel plate electrodes. The ion wind enhances heat and mass transfer between the surface and the surrounding gas. Moreover such enhancement makes no noise or vibration. This study is conducted to develop the electronic cooling device. The measured gas velocities and heat transfer coefficients are proportional to the applied voltage. The heat transfer coefficient can be increased as compared with a natural convection. The maximum enhancement of heat transfer obtained in this system is 47% for 3 W in heat transfer rate.

Key words: Corona discharge(코로나 방전), Ion wind(이온풍), Corona wind(코로나풍), Heat transfer(열전달)

기 호 설 명

D : 전극간 거리 [mm]
 d : 수력학적 직경 [m]
 E : 전기장 [N/C]
 f_e : 단위체적당 작용하는 힘 [N/m^3]
 h : 열전달계수 [W/m^2K]
 k : 열전도도 [$W/m \cdot K$]

Nu : Nusselt 수
 q'' : 열유속 [W/m^2]
 Q : 전하량 [C/m^3]
 Q_h : 열전달량 [W]
 Re : Reynolds 수
 T_s : 히터표면온도 [$^{\circ}C$]
 T_{∞} : 주위공기온도 [$^{\circ}C$]
 u : 점성률 [$kg/m \cdot s$]
 v : 유속 [m/s]
 W : 이온풍 출구의 폭 [mm]

† Corresponding author

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

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

그리스 문자

- ϵ : 유전율 [C/Vm]
- ρ : 밀도 [kg/m³]
- θ : 접지극 경사각 [°]

1. 서 론

이온풍(Ion Wind)은 Hauksbee가 1791년에 최초로 대전된 튜브에서 약한 바람이 생성되는 것을 발견한 이후로 Newton, Faraday뿐만 아니라 많은 과학자들의 흥미 있는 학문의 대상이 되고 있다. 그중에서 Chattock⁽¹⁾은 최초로 이온풍의 현상을 정량적으로 분석하였으며, 이어 Robinson⁽²⁾에 의해 역학적으로 규명되었다. 특히 Robinson은 이온풍의 속도가 전류의 함수로 표현된다는 것과, 공기 중에서 코로나 방전시 공급되는 전기 에너지의 1~2%만이 기체입자의 운동에너지로 변환된다는 것도 증명하였다. 그후로 Owsenek 등에 의해 이온풍이 열전달을 촉진시킨다는 연구결과가 발표되었다.⁽³⁻⁵⁾

또한, 이온풍은 다른 기계적인 운동 없이 유체 유동을 생성하므로 Micro Pump나 Micro Compressor 등 기계적인 구동부를 제거해야 하는 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 분야나 기타 유체유동 분야에 적용이 가능하다.

이온풍은 코로나 방전(Corona Discharge)시 발생하는 양, 음이온들과 기체분자들 사이의 마찰로 인해 발생하므로 주위의 환경에 의해 많은 영향을 받는다. 특히, 방전극과 접지전극과의 거리, 방전극의 종류, 접지극의 배치가 전류 및 이온풍의 유속에 직접적인 영향을 미치므로 이온풍 발생에 주요한 변수가 된다.

따라서 본 연구에서는 코로나 방전에 의한 이온풍의 특성과 열전달 특성을 분석하기 위해 침전극과 평행판 접지극으로 구성된 실험장치를 이용하여 전극간 거리, 접지극 경사각, 이온풍 출구 폭의 변화에 따른 이온풍의 전류와 유속 특성을 분석하여 열전달 향상에 응용하였다.

2. 이론적 배경

방전극과 접지극 사이에 강한 전기장이 형성되면 방전극 근처의 기체에 글로우 방전(Glow Dis-

charge)이 일어나는데, 이를 대기압에서 흔히 코로나라고 한다. 어떤 조건 하에서 코로나는 방전극과 접지극 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.⁽⁶⁾

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

위 식에서 우변 첫째항은 쿨롱힘(Coulomb Force)으로 전기장 내에서 순수전하에 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 침전극인 방전극에 고전압이 인가되면 침전극 근처에는 전기장세기가 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 공기분자들이 마찰에 의해

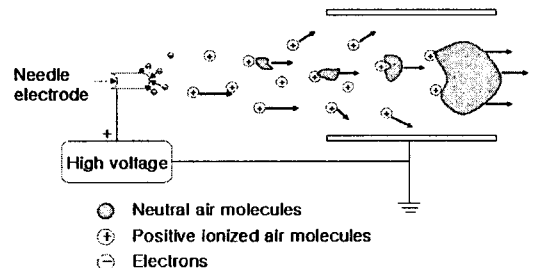


Fig. 1 Generation mechanism of DC ion wind by corona discharge.

서 유동을 일으키며, 이때 발생하는 바람을 이온풍이라 부른다.

코로나 방전에 의해 발생한 이온들은 접지극을 지나면서 사라지지만, 이온과의 마찰에 의해 이동하는 공기분자는 관성력에 의해 계속 이동하며 유동을 일으킨다. 따라서, 이온풍은 이온의 양이 많고, 전기이동률이 클수록 유속이 빠르며, 침전극 끝의 곡률반경이 작을수록 이온풍의 유량이 많아짐을 유추할 수 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 이온풍 실험장치

Fig. 2는 제작된 이온풍 실험장치를 나타내었다. 본 연구에 사용된 이온풍 발생장치는 노즐형상이며, 방전극은 직경 0.8mm, 길이 45mm, 곡률반경 25 μ m의 스테인리스강 재질의 침을 사용하였고, 접지극은 아크릴을 가공한 후 알루미늄 필름을 부착하여 접지시켰으며, 방전극과 접지극을 정렬하기 위해 3축 스테이지에 장착하였다. 전압측정을 위해 고전압 공급장치에 저항프루브(1k Ω)와 멀티미터를 이용하여 회로를 구성하였으며, 코로나 방전시 방전극(침전극)과 접지극 사이에서 발생하는 미세전류를 측정하기 위하여 부하저항(1k Ω)과 그 양단에 멀티미터를 연결하였다. 이온풍의 유속측정은 열선유속계(TSI, 8386)를 이용

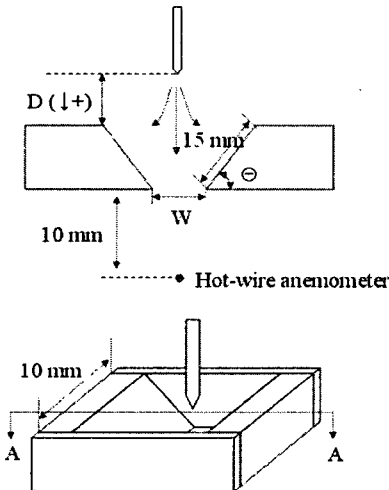


Fig. 2 Schematic diagram of the ion wind generator.

하였으며, 이온풍 출구의 중앙으로부터 10mm 간격을 두고 측정하였다. 실내온도와 상대습도는 항온항습챔버(H&C System) 내에서 20 $^{\circ}$ C, 40%로 조절하였으며, 실내는 외부와 차단하여 외풍의 영향을 받지 않는 조건에서 실험을 수행하였다.

3.2 열전달 실험장치

Fig. 3은 히터의 개략도와 열전달 실험장치를 나타내었다. 열전달 실험장치는 크게 히터와 이온풍 발생장치로 구성되어 있다. 히터는 테프론 패키지 내부에 열을 발생시키기 위한 니크롬선을 삽입한 후, 단열재를 이용하여 열방출 부분을 제외하고 단열하였으며, 히터 표면온도를 측정하기 위해 구리블럭 내부에 열전대를 삽입하였다. 히터의 위치는 이온풍 출구의 중앙부분으로부터 10mm 떨어진 지점에서 히터의 중앙부분과 정렬하였다.

3.3 실험방법 및 내용

본 실험은 공기의 주유동이 없는 경우, 구조변수에 따른 전압과 전류, 공기의 유속과의 관계를 알아보기 위하여 전극간 거리 D 를 2mm, 0mm, 2mm, 접지극의 경사각 θ 를 45 $^{\circ}$, 50 $^{\circ}$, 55 $^{\circ}$, 60 $^{\circ}$, 65 $^{\circ}$, 70 $^{\circ}$, 이온풍 출구의 폭 W 를 2mm, 4mm, 6mm, 8mm, 10mm인 경우에 각각의 전압, 전류, 유속을 측정하였다. 전압은 디지털 멀티미터(TMI, M92A)를 이용하여 측정했으며, 전류는 Spark-Breakdown으로부터 계측장치를 보호하기 위해 부하저항(1k Ω)을 통해서 전압을 측정하여 전류를 계산하였으며, 유속은 2번씩 측정한 값을

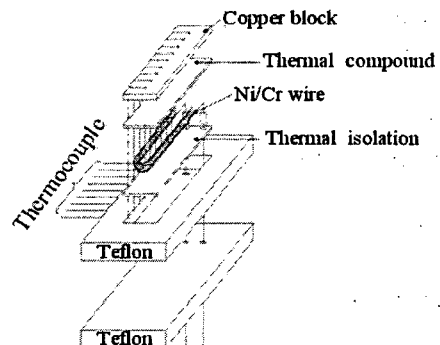


Fig. 3 Schematic diagram of the heater.

산술 평균하여 나타내었다. 히터의 표면온도와 주 위온도는 열전대를 통해 데이터수집기(AGILENT, 34970A)를 이용하여 측정하였으며, 온도는 안정된 상태(Steady state)의 값을 기록해야 되는데, 5분간 0.1°C 내외로만 변동이 있을 경우 안정된 상태로 보았다. 히터에 인가된 열량은 3 W, 6 W, 9 W이며, 각각의 열량에 대해 자연대류 및 강제 대류 열전달계수를 구하였다.

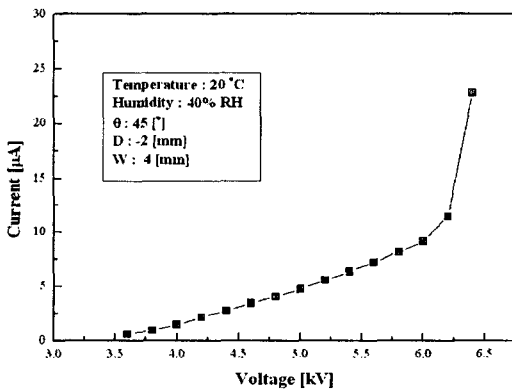
4. 실험결과 및 고찰

4.1 이온풍 실험결과

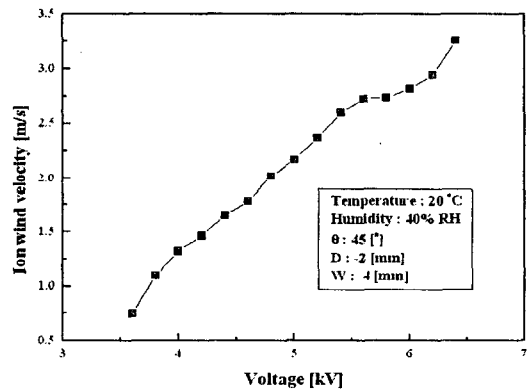
Fig. 4는 본 연구에 사용된 이온풍 발생장치를

이용하여 온도 20°C, 상대습도 40%에서 접지극 경사각 45°, 전극간격 -2 mm, 이온풍 출구폭 4 mm의 조건에서 코로나 방전에 대한 전압과 전류의 관계 및 전압과 유속의 관계를 나타내었다. 방전극에 인가하는 전압이 증가하면, 코로나 개시전압까지는 전류와 유속 모두 관찰되지 않지만, 코로나 개시전압 이상이 되면 방전극 근처에서 이온화에 의해 발생된 이온이 접지극으로 이동하는 코로나 전류와 이온풍이 발생하기 시작한다. 본 실험에서 코로나 개시전압은 3.6 kV이며, 그림에서 보듯이 Spark-Breakdown은 6.4 kV에서 발생했다.

Fig. 5는 접지극 경사각을 각각 45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°로 변화시켰을 때 전극간 거리에 따

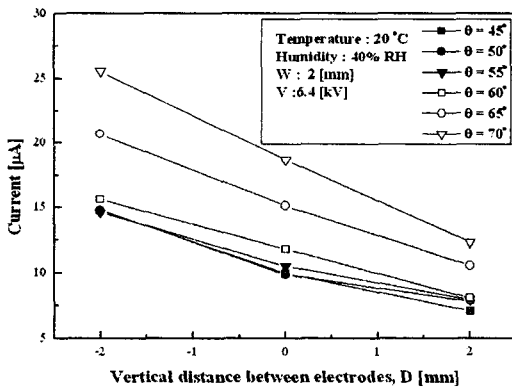


(a) Voltage vs. current

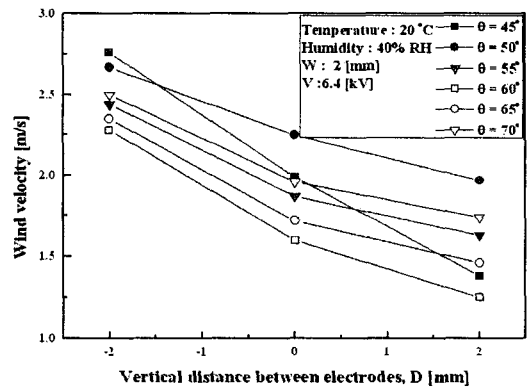


(b) Voltage vs. velocity

Fig. 4 Characteristics of corona voltage-current and voltage-velocity.

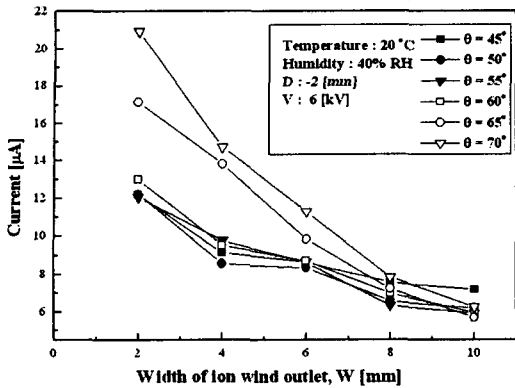


(a) Vertical distance between electrode vs. current

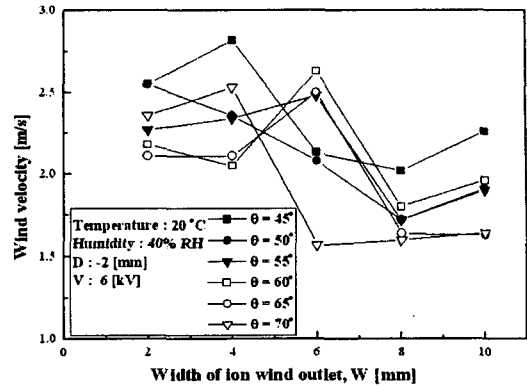


(b) Vertical distance between electrodes vs. velocity

Fig. 5 Current and wind velocity as a function of the vertical distance between electrodes at various angle of the ground electrode.



(a) Width of ion wind outlet vs. current



(b) Width of ion wind outlet vs. velocity

Fig. 6 Current and wind velocity as a function of the width of the ion wind outlet at various angle of the ground electrode.

른 코로나 전압-전류관계 및 전압-유속관계를 보여주고 있다. 인가된 고전압은 각 변수실험에서 코로나 개시전압과 Spark-Breakdown 전압 사이에서 변수간의 비교가 가능한 최대 전압을 선택하였으며, 6.4 kV를 비교전압으로 선택하였다. 각각의 경사각에 대해서 전극간격이 작아질수록, 경사각이 증가할수록 전류가 높게 나타났다. 이것은 방전극이 접지극에 가까이 갈수록 전기장 강도가 높아져서 전극 사이에 흐르는 미세한 전류가 크게 증가하기 때문이다. 측정된 전류와 유속의 최대값은 전극간격이 -2 mm일 때 70°에서 전류가 25.6 μA , 45°에서 유속이 2.76 m/s를 나타내었다. Fig. 6은 전극간격을 -2 mm로 고정한 상태에서 접지극의 경사각을 각각 45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°로 변화시켰을 때 이온풍 출구폭의 변화에 따른 전류와 유속의 관계를 나타내었으며 비교전압은 6 kV를 인가하였다. 측정된 최대 전류는 이온풍 출구폭이 2 mm이고 접지극 경사각이 70°일 때 21 μA 로 최대값을 가졌고, 최대 유속은 이온풍 출구폭이 4 mm이고, 접지극 경사각이 45°일 때 2.82 m/s로 최대값을 나타내었다. 이온풍이 최대가 되는 경사각은 이온풍 출구를 통해 나가는 유동의 손실이 최소가 될 때 얻어질 수 있다. 45°의 접지극 경사각의 결과와 비교해서 70°는 높은 전기적 에너지 입력을 가지지만, 이온풍의 일부만 출구를 통해 유동으로 변환된다. 이것은 이온풍의 방향과 반대방향으로 유동이 발생하기 때문이다.

따라서 본 연구에서 이온풍이 최대가 되는 최

적의 조건은 접지극 경사각 45°, 전극간 거리 -2 mm, 이온풍 출구폭 4 mm이다.

4.2 열전달 실험결과

열전달계수는 열유속(Heat flux), 히터 표면온도, 주위온도를 사용하여 계산되어질 수 있으며, 다음과 같이 표현된다.

$$h = \frac{q''}{(T_s - T_\infty)} \quad (2)$$

여기서, q'' 는 열유속, T_s 는 히터 표면온도, 그리고 T_∞ 는 주위온도이다. Reynolds 수와 Nusselt 수의 계산은 다음과 같다.

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (3)$$

$$\text{Nu} = \frac{h d}{k} \quad (4)$$

Fig. 7은 접지극 경사각 45°, 전극간 거리 -2 mm, 이온풍 출구폭 4 mm인 이온풍 발생장치의 조건에서 열량을 각각 3 W, 6 W, 9 W를 인가하였을 때 자연대류와 강제대류에 대해서 전압과 이온풍 유속에 따른 대류 열전달계수를 나타내었다. 자연대류일 때 열전달계수는 일정하고, 이온풍이 인가되면 대류 열전달계수는 증가하게 된다. 열량 Q 가 증가하게 되면 자연대류와 강제대

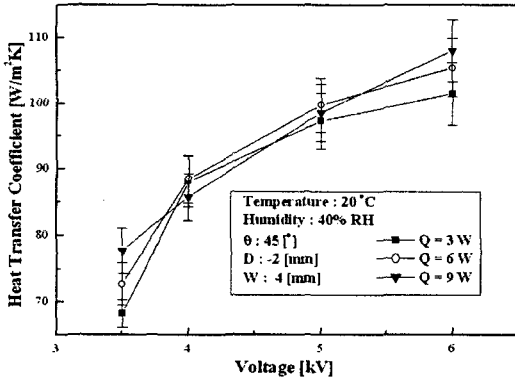


Fig. 7 Heat transfer coefficient as voltage at various heat transfer rate.

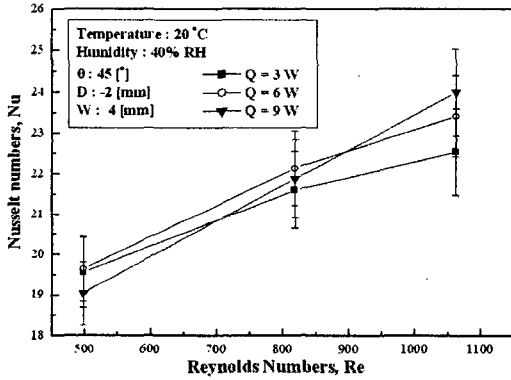


Fig. 8 Reynolds number vs. Nusselt number.

류에서 열전달계수가 증가하는데, 이것은 열량이 증가할수록 히터 주위온도가 증가하여 공기의 열전도도가 증가하게 되므로, 상대적으로 열전달계수가 높게 나타났다. 각각의 열량에 따른 최대 열전달계수는 3 W일 때 $101 \text{ W/m}^2\text{K}$, 6 W일 때 $105 \text{ W/m}^2\text{K}$, 9 W일 때 $108 \text{ W/m}^2\text{K}$ 가 나타났다. Fig. 8은 Reynolds 수에 따른 Nusselt 수를 나타내었다. Reynolds 수에 따른 Nusselt 수는 이온풍이 발생하면 이로 인해 Reynolds 수와 열전달계수가 증가하여 결국 Nusselt 수가 증가함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 코로나 방전에 의한 이온풍 특성과 열전달 특성을 분석하기 위하여, 침전극과 평행판 접지극으로 구성된 실험장치에서 코로나 방전시 인가전압에 따른 방전전류, 그리고 이온

풍 유속의 변화를 분석하여 열전달에 응용하였으며, 주요 연구결과는 다음과 같다.

(1) 인가전압이 코로나 영역 내에서 증가함에 따라 이온풍도 증가하였으며, 전극간격을 가까이할수록 전기장 강도의 증가로 이온풍이 증가하였다.

(2) 접지극의 경사각이 커질수록 방전전류는 높게 나타나고, 경사각이 작아질수록 이온풍 유속은 높아졌다. 본 연구에서 이온풍 장치의 최대유속을 위한 조건은 접지극 경사각이 45°, 전극간거리 -2 mm, 이온풍 출구폭 4 mm일 때 이온풍이 2.82 m/s로 나타났다.

(3) 6 kV의 고전압이 인가될 때, 대류 열전달계수는 열량이 각각 3 W일 때 47%, 6 W일 때 44%, 9 W일 때 39%가 향상되었다.

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. Owsenk, 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. 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.
6. 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.