

이온풍을 이용한 유기용매의 건조 효율 향상에 관한 실험적 연구

이재원* · 손동기* · 고한서†

Experimental study on enhancement of drying efficiency of organic solvent using ionic wind

Jae Won Lee*, Dong Kee Sohn* and Han Seo Ko†

Abstract ‘Ionic wind’ is phenomenon induced by corona discharge which occurs when large electric potential is applied to electrodes with high curvature. The ionic wind has advantage that it could generate forced convective flow without any external energy like separate pump. In this study, ‘pin-mesh’ arrangement is utilized for experiments. First, optimization of configuration is conducted with local momentum of ionic wind behind the mesh. Empirical equation for prediction about velocity profile was derived using the measured results. Secondly, the enhancement of mass transfer rate of acetone with ionic wind was analyzed. Also, the drying efficiency using a fan which has same flow rate was compared with ionic wind for identification of additional chemical reaction. At last, the drying process of organic solvent was visualized with image processing. As a result, it was shown that the use of ionic wind could dry organic matter four times faster than the natural condition.

Key Words : Ionic wind(이온풍), Corona discharge(코로나 방전), Image processing(영상 처리), Drying efficiency(건조 효율)

기호설명

v 이온풍의 속도 [m/s]	m^* 무차원 용매 질량
r 방사상의 거리 [m]	η_E 전기적 효율
p 실험 상수 [m ²]	V 인가 전압 [kV]
D 메쉬 구멍의 직경 [m]	I 인가 전류 [mA]
m_0 초기 용매 질량 [kg]	P_c 소모 전력 [W]
	P_h 유체 동력 [W]
	t 시간 [s]

† School of Mechanical Engineering,
Sungkyunkwan University
E-mail: hanseoko@skku.edu

* School of Mechanical Engineering,
Sungkyunkwan University

1. 서론

코로나 방전(Corona discharge)이란 두 전극에 높은 전압 차이가 형성 되었을 때, 큰 곡률을 가지는

방전 전극(Emitter electrode)에서 전기장이 발생하게 되어 인가 전압에 의한 국부 절연 파괴 현상으로 인해 이탈된 자유 전자(Free electron)가 발생하는 현상을 의미한다^{1, 2}. 코로나 방전으로 인한 자유전자의 이탈은 대기 중의 플라즈마(Plasma)를 매우 효율적으로 발생시킬 수 있다^{3, 4}.

대기 중에서 플라즈마를 발생시킬 때 이온과 라디칼(Radical), 화학적 부산물(Byproduct) 등이 생성된다⁵. 또한, 생성된 이온이 극 사이에 형성된 전기장에 의해 가속되고 전기적 중성 분자들과의 충돌로 이온풍이 발생한다. 코로나 방전이 진행되는 동안 이온풍은 지속적으로 발생하며, 인가 전압의 상승에 따라 특정 전압까지 이온풍의 운동량은 증가한다. 이온풍은 전극에서 공기를 이루는 기체 분자가 전자 이탈과 충돌로 인해 이온화된 분자들을 이동시켜 대류현상을 일으키기 때문에 별도의 펌프를 필요로 하지 않는다는 장점을 가진다⁶.

방전 전극과 대전극(Counter electrode)의 형태에 따라 핀-메쉬, 핀-평판, 와이어-링, 와이어-평판 등 다양한 방식이 있으며⁷⁻¹⁴, 위와 같은 형태에 따라 발생하는 전기장의 형태가 달라져 이온풍의 유동 특성도 달라진다.

이온풍에 의한 강제 대류 현상은 매우 다양한 분야에서 각광받고 응용되고 있는 기술이다¹⁵⁻¹⁸. 규모 면에서 제한적인 시스템 내부에 유동장을 형성하여 열전달 효율을 향상시킬 수 있으며^{13, 19, 20} 공간 내에 형성된 높은 밀도의 전기장으로 인해 발생한 화학적 부산물들에 의해 오염 물질 제거에 응용될 수도 있다²¹.

본 연구에서는 핀-메쉬 형태에서 발생할 수 있는 효율적인 전극 구성에 대한 최적화 연구가 진행되었다. 또한, 동일한 유량을 발생 시키는 팬(Fan)과의 비교를 통해 이온풍의 화학 작용에 대한 실험적 검증은 진행하였다.

마지막으로 일정 표면에 도포된 유기용매에 대한 이온풍의 건조 효율을 측정하는 실험을 진행하였다. 지금까지 이온풍을 활용한 유기 물질의 건조 효율성에 대한 연구는 많이 진행되었지만^{22, 23}, 매우 제한된 방법들로 효율성을 확인해왔다. 이번 연구에서는 실시간으로 변화하는 반사광을 촬영한 후 MATLAB 코딩을 이용한 영상 처리(Image processing) 과정에 의해 시간에 따른 건조 효율성을 확인하였다.

2. 실험 구성

2.1 유속 측정 실험

Fig. 1은 핀-메쉬 전극 형태에서 발생하는 전기장의 영향에 의해 나타나는 시스템 내부의 유동장의 특성을 확인하기 위한 실험 도식이다.

목업으로 제작한 구조물의 윗부분에 방전 전극으로 사용될 핀 전극을 고정시키고 아랫부분에 대전극으로 사용될 메쉬 전극을 고정시켰다. 방전 시 발생하는 유속의 측정을 위해 유량 측정계(TSI-9060A)를 사용하였다. L은 유속 측정이 수행된 위치와 메쉬 전극 사이의 거리를 의미하며, 유속 측정에 대한 모든 실험에서 고정되었다. 또한, 방사상으로의 유속 분포를 확인하고 이를 통해 유체 동력의 정량적 분석을 위해 횡 방향으로 17개 위치에서 0.0015m간격으로 측정을 시도하였다. 전압은 방전 전극의 끝단에서 플라즈마가 발생하기 시작하는 6kV에서부터 아크 방전(Arc discharge)이 발생하게 되는 10kV까지 1kV간격으로 조절하였다. 이를 위한DC 고전압 장치로는CONVERTECH사의 SHV600R-50kV-12mA-P를 사용하였다.

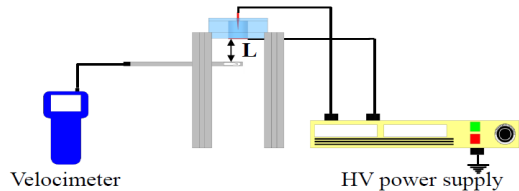


Fig. 1. Experimental setup for measurements of velocity of ionic wind

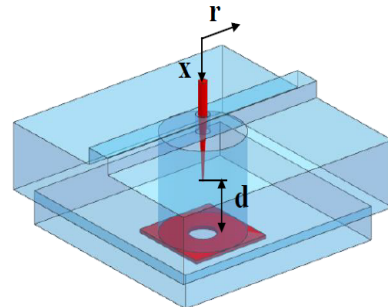


Fig. 2. Schematic of mockup with located electrodes

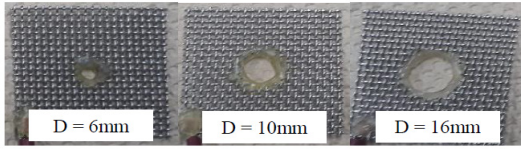


Fig. 3. Mesh electrodes with various hole diameters

Fig. 2는 전극이 위치한 부분을 확대한 그림이다. 여기서 전극은 붉은색으로 표시되었다. 방전 전극인 핀은 방전 시 표면에 발생할 수 있는 부식 현상을 최소화하기 위해 텅스텐(Tungsten)으로 제작되었었다. 메쉬 전극의 크기는 약 $0.03 \times 0.03 \text{m}^2$ 이고 STS304로 제작 하였으며, 적절한 방전 현상을 위해 전극 사이의 거리는 0.015m 로 고정하였다.

Fig. 3은 실험에서 사용된 메쉬 전극들의 사진이다. 지금까지의 연구들에서 메쉬 형태의 전극을 대 전극으로 활용한 연구들은 많이 진행되었다^{24, 25}. 하지만, 메쉬 전극은 전기장에 의한 이온풍의 운동량을 방해하는 역할을 할 수 있다. 즉, 메쉬 전극 자체가 다공성 매질(Porous media)의 역할을 하게 되어 압력 손실을 야기할 수 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 메쉬 전극의 가운데 부분에 압력 손실을 줄여줄 구멍(Hole)을 제작 하였으며, 메쉬의 절단 부분에서 발생할 수 있는 아크 방전을 방지하기 위해 구멍 주변에 절연 코팅을 하였다.

2.2 증발 효율 측정 실험

코로나 방전에 의해 발생하는 플라즈마는 주변 공기 분자들로부터 여러 종류의 화학종을 발생시킨다. 이 때, 발생한 화학종은 공기 중의 휘발성 유기 화합물(Volatile organic compounds, VOCs)과의 충돌 및 전기적 작용을 통해 인체에 무해한 이산화탄소 및 수증기로 분해 시키는 역할을 하게 된다. 이러한 분해 현상은 유기 용매의 표면에서 나타나는 농도 구배를 증가시켜 증발 현상이 더 활발히 일어날 수 있도록 한다²⁶⁻³¹. 증발 현상이 활발하게 일어남에 따라 용매의 표면에 있는 분자들은 주변 공기 중으로 확산되며, 이로 인해 용매의 질량은 시간에 따라 감소하게 된다.

방전 시 플라즈마가 공기 중에 발생시킨 이온에 의한 휘발성 유기화합물인 아세톤의 분해 효과를

전자 저울을 이용한 질량 변화를 통해 확인하였다. 이를 위해 최적화된 전극 구성과 동일한 유량을 발생시키는 팬을 이용한 실험을 진행했다. 이때, 팬과의 비교를 통해 소모 전력당 감소하는 아세톤의 질량을 시간에 따라 측정하였다. 아세톤이 용기에 담겼을 때 공기와 접촉하는 부분의 직경은 각 $0.04, 0.05, 0.06 \text{m}$ 로 다양한 면적에 대해 실험을 수행 하였으며, 동일한 40ml 의 부피를 가지는 아세톤의 표면은 메쉬 전극으로부터 약 0.09m 정도 떨어진 곳에 위치시켰다.

2.3 건조 효율 측정 실험

2.3.1 실험 방법

시간에 따른 건조 현상을 확인하기 위해 유기 용매가 도포된 로드 부분을 증발 효율에 대한 실험과 같이 메쉬 전극으로부터 0.09m 의 간격을 유지할 수 있도록 위치시켰으며, 전극 사이의 거리는 유속 측정 실험과 동일하게 유지하였다.

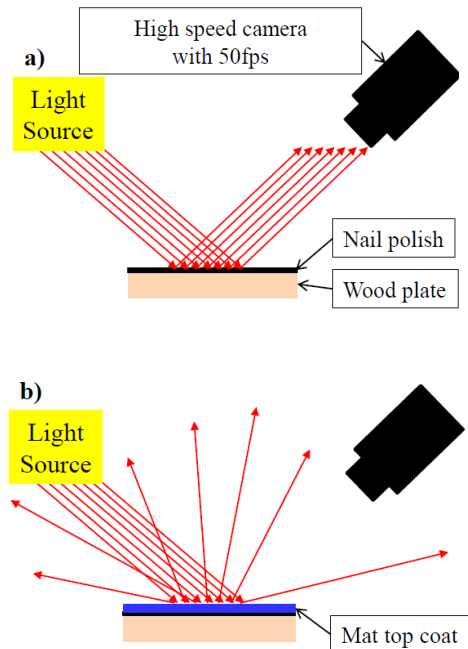


Fig. 4. Measurement method for reduction of intensity by time; a) Before use of MTC and b) After use of MTC

Fig. 4는 건조 효율 측정을 위한 실험을 설명하는 그림이다. 건조 효율 측정을 위한 유기 용매로는 매니큐어(Nail polish) 약품을 활용하였다. 하지만, 매니큐어 같은 유기 용매의 경우 건조가 완료되는 동안 빛을 정반사 시키는 것을 알 수 있었다. 이러한 문제점 때문에, 건조가 진행되는 동안 난반사를 발생 시키는 유기 용매인 Mat Top Coat(MTC)를 매니큐어 약품 위에 한번 더 도포하였다. 이를 통해 시간에 따라 용매의 건조가 진행되는 과정에서 반사광이 감소하는 것을 실시간으로 확인할 수 있었다.

2.3.2 영상 처리

건조 효율에 대한 실시간 측정을 위해 MATLAB 코드를 통한 영상 처리 방식을 활용하였다. 이에 대한 영상 처리 과정은 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 5. a)와 같이 실험이 진행되는 동안 촬영된 회색조(Gray scale) 이미지들을 시간 순으로 나열하였다. Fig. 5. b)에서는 도포된 부분에서 나타나는 반사광의 변화를 명확하게 나타내기 위해 특정 임계치

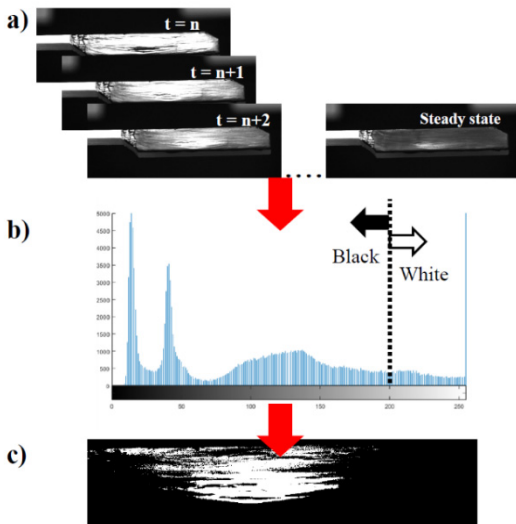


Fig. 5. Procedure of image processing for drying efficiency; a) Photographed images during experiment, b) Histogram analysis for binarization and c) Counting pixels in binarized images

(Threshold level)를 설정함으로써 흑색, 백색으로 변환시켜 주는 이진화(Binarization) 작업을 하였다. Fig. 5. c)와 같이 이진화된 이미지의 백색을 나타내는 부분의 픽셀 개수를 시간 별로 계산하였으며, 이를 통해 시간에 따른 건조 과정을 수치화 할 수 있었다.

3. 결과 및 토의

3.1 유속 측정

실험을 통해 메쉬 전극을 통과한 이온풍의 유속 분포를 확인할 수 있었으며, 이와 동시에 가우스 곡선(Gaussian curve)을 나타내는 방정식의 형식을 차용하여 유속 분포에 대한 실험적 모델을 얻을 수 있었다. 실험적 모델은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(r) = v_{\max} \exp(-r^2/p) \quad (1)$$

위 식에서 v_{\max} 는 중앙 부분에서 발생하는 이온풍의 최고 속도를 의미하며 r , p 는 각각 방사상의 거리와 실험 상수로서 직접적인 실험을 통해 얻을 수 있는 상수값을 의미 한다.

Fig. 6은 구멍의 직경이 10mm일 때 6kV에서 10kV까지 전압을 높이며 유속을 측정한 그래프이다. Fig. 6을 통해 확인할 수 있듯이, 가우스 곡선을 활용한 실험식과 메쉬 전극에서 발생하는 이온풍의 유속 분포가 매우 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 이때 구멍 직경이 10mm일 때 p 값은 0.1로 일정했으며, 최대 유속은 전압의 크기에 비례하여 2.3m/s ~ 4m/s 정도로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 일정한 전압에서 메쉬의 구멍 직경(D)을 다르게 하였을 때 발생하는 유속 분포에 대한 실험값과 실험적 모델을 비교한 그림이다. 위 그림에서 확인할 수 있듯, 구멍의 크기가 6mm인 경우에는 중앙에서 매우 낮은 유속을 나타낼 뿐 아니라 메쉬의 주변 부분에서도 다른 case들과 비교하였을 때 상대적으로 높은 유속이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 때문에, 실험 모델과 주변부의 실

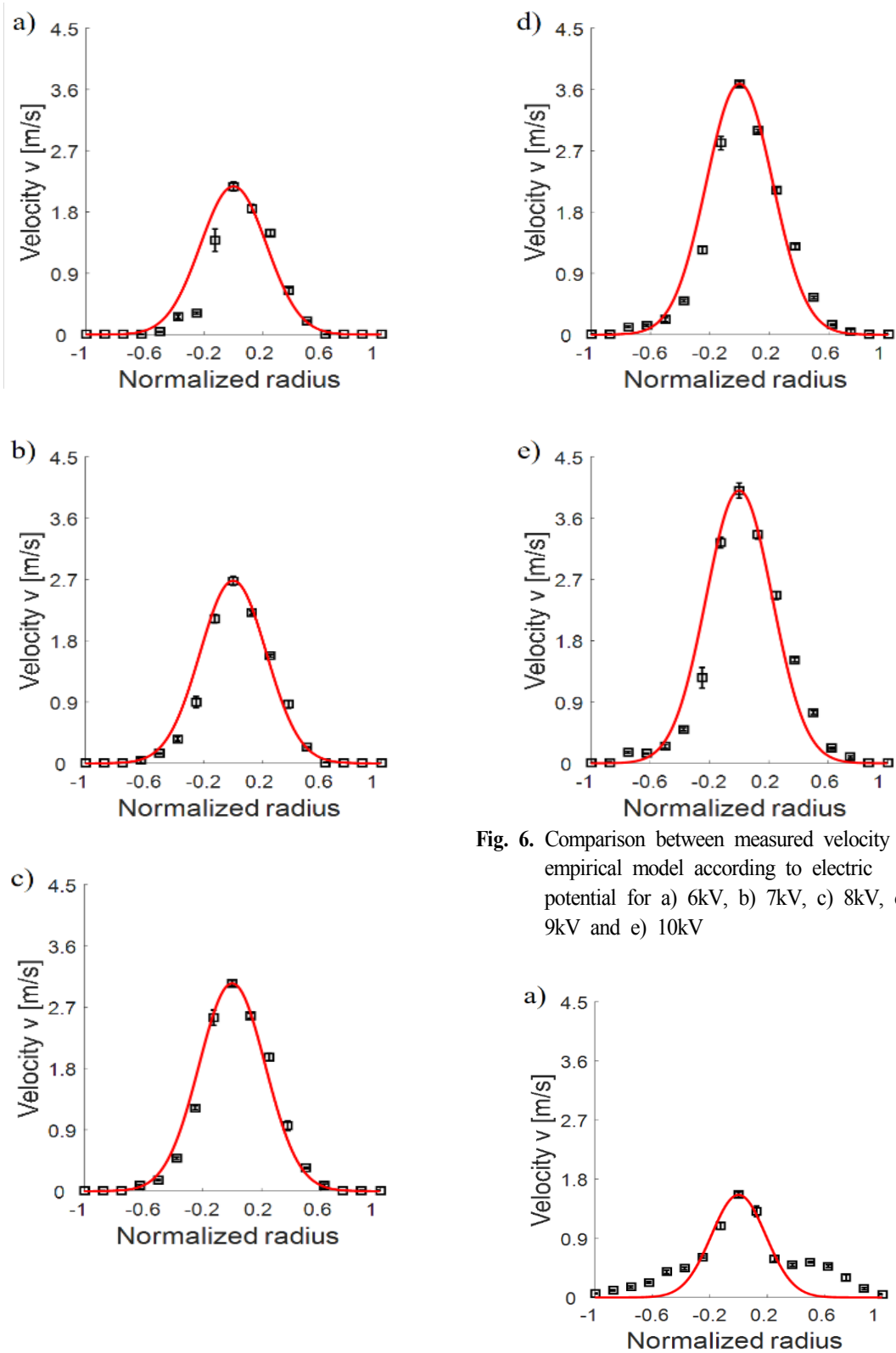


Fig. 6. Comparison between measured velocity and empirical model according to electric potential for a) 6kV, b) 7kV, c) 8kV, d) 9kV and e) 10kV

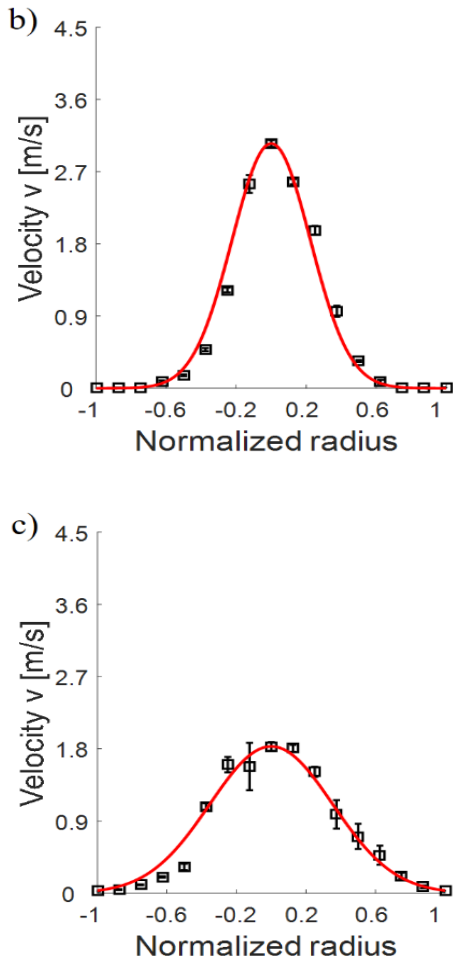


Fig. 7. Comparison between measured velocity and empirical model according to hole diameter for a) 6mm, b) 10mm and c) 16mm

힘값 사이의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 16mm의 경우에는 압력 손실을 유발하는 메쉬의 영역이 줄었음에도 불구하고 구멍의 직경이 10mm인 경우보다 더 낮은 유속을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

이러한 현상은 Fig. 8을 통해 설명할 수 있다. Fig. 8. a)는 구멍의 직경이 6mm일 때 발생하는 전기장과 메쉬 전극 아랫부분에서 토출되는 이온풍의 속도 크기를 도식화한 그림이다. 홀의 직경이 상대적으로 작을 경우 방전 전극에서 생성된 전기장은 방전 전극과 대전극 사이를 통과하며 형성되기도 하지만(검은 선) 구멍을 통과하여 형성되

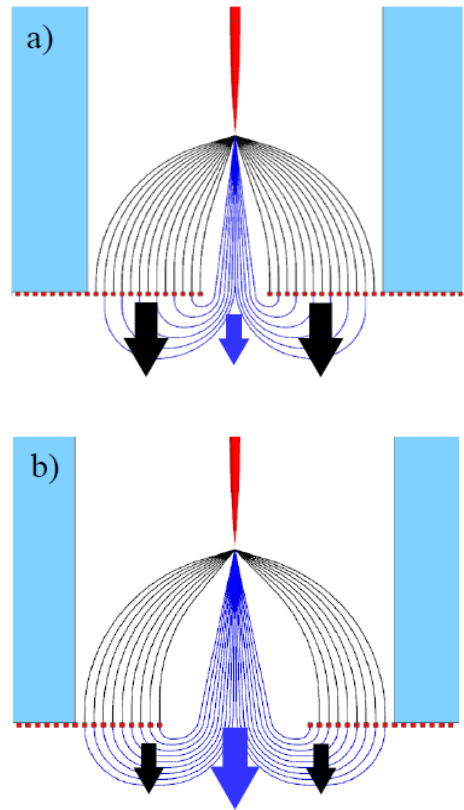


Fig. 8. Schematic of electric field and magnitude of velocity of ionic wind for a) D = 6mm and b) D = 16mm

는 전기장도 발생하게 된다(파란 선). 구멍의 주변부에서는 검은 선으로 인해 발생하는 이온풍의 운동량과 파란 선으로 인해 발생하는 이온풍의 운동량 사이의 상쇄에 의해 유속의 크기가 결정된다. 이와 같은 현상이 발생하게 될 때 6mm의 경우 검은 선의 밀도가 더 높게 나타나기 때문에 주변부에서 상대적으로 높은 유속이 발생하게 된다. 반대로 Fig. 8. b)와 같이 16mm의 경우에는 구멍 주변부에서 유속은 거의 나타나지 않지만, 구멍을 통과하여 발생하는 전기장의 밀도가 10mm의 경우보다 상대적으로 낮다. 이 때문에 최고 속도는 10mm의 경우에 가장 크게 나타나고 이를 통해 구멍의 직경에 대한 최적 설계를 시도할 수 있었으며, 실제 발생한 최고 유속과 실험 상수 p값에 대해 Table 1과 같이 확인할 수 있었다.

Table 1. Maximum velocity of ionic wind and empirical constant for various hole diameters of mesh

	6mm	10mm	16mm
v_{max}	1.62 m/s	3.05 m/s	1.92 m/s
p	0.0714	0.1	0.25

3.2 효율 측정

3.2.1 화학 작용 실험

Fig. 9는 시간에 따라 이온풍을 작동시켰을 경우와 작동시키지 않았을 경우에 발생하는 아세톤의 질량 감소율을 나타내는 그래프이다. 무차원화된 질량의 변화는 식 (2)를 통해 계산할 수 있다.

$$m^* = [m_0 - m(t)]/m_0 \quad (2)$$

위 식에서 $m(t)$ 는 시간에 따라 측정된 질량을 의미하며, 초기 질량인 m_0 는 31 ~ 31.5g으로 측정되었다. 접촉 면적이 넓으면 넓을수록 화학종을 전달시켜 주는 이온풍에 의한 영향을 받는 아세톤의 면적이 넓어진다. 이 때문에 짧은 시간에도 증발 현상이 더 활발하게 발생한다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 서로 다른 접촉 면적을 가지는 경우에 대해 이온풍과 팬의 전기적 효율에 대한 그래프이다. 전기적 효율성(η_E)은 전력 소모량(P_e)과 유체 동력(P_h)에 대한 인수로 표현할 수 있으며 이는 식 (3) ~ 식 (5)를 통해 계산할 수 있다.

$$P_e = VI \quad (3)$$

$$P_h = \frac{1}{2} \rho \int_0^\pi \int_0^R v^3(r) |r| dr d\theta \quad (4)$$

$$\eta_E = P_h / P_e \quad (5)$$

그래프를 통해 확인할 수 있듯이, 접촉 면적이 넓어질수록 증발 효율이 상승하는 것을 두가지 경우에서 모두 확인할 수 있다. 하지만, 동일한 유량을 토출함에도 불구하고 전기적 효율성은 이온풍을 사용하였을 경우가 약 5배 이상 높은 것을 확인

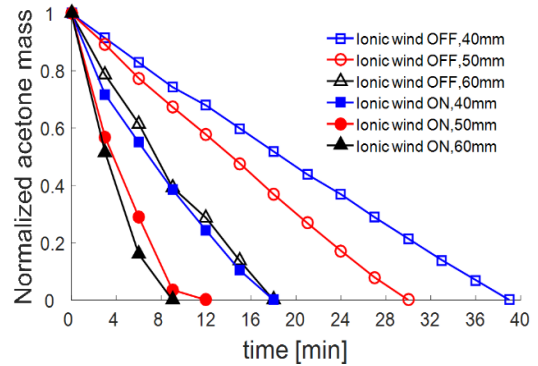


Fig. 9. Reduction of acetone mass by time with and without ionic wind for various contact diameters

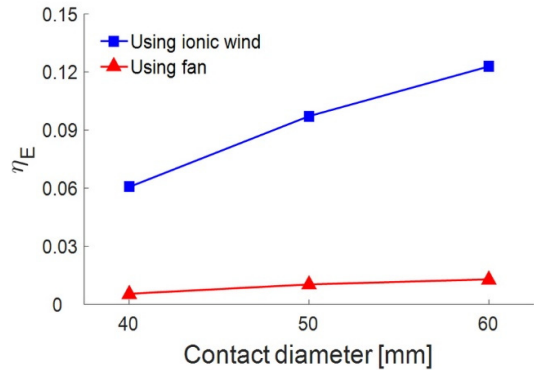


Fig. 10. Electric efficiency for different contact area with ionic wind and fan

할 수 있다. 이를 통해 이온풍을 활용하였을 때 화학적 반응에 의한 효율 증진이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

3.2.2 건조 효율 실험

건조 효율을 확인하는데 있어 도포된 약품의 표면 부분에서 반사되는 반사광의 변화량을 정량화하는 것을 목표로 실험을 수행하였다. 이에 대한 결과는 Fig. 11을 통해 확인할 수 있다.

용매가 도포된 표면에 이온풍을 충돌시켰을 때 발생하는 건조 효율은 이온풍을 활용하지 않았을 경우보다 더 높은 것을 확인할 수 있었다. 앞서 아세톤을 사용하여 수행한 실험의 결과를 통해, 매니큐어 약품이 도포된 표면에서 또한 강제 대류 현

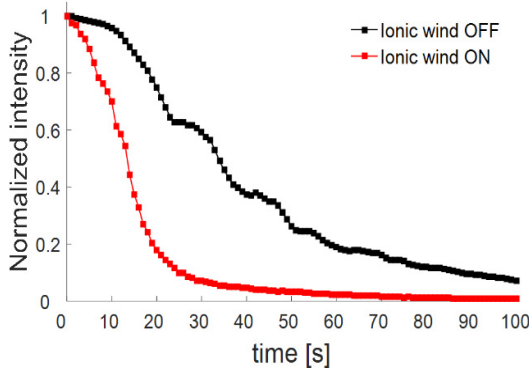


Fig. 11. Reduction of normalized reflected intensity according to time with and without ionic wind

상에 의한 기체의 충돌뿐 아니라 플라즈마에 의해 발생한 화학종들과의 반응에 의해 건조 효율이 더 향상된 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 코로나 방전에 의해 발생하는 이온풍을 활용하여 최적 설계 및 건조 효율 향상을 확인할 수 있었다. 실험을 수행함에 있어서 ‘핀-메쉬’ 전극 배치를 활용하였으며, 메쉬 전극에 구멍을 가공하여 방전 시 발생할 수 있는 압력 손실을 최소화하였다. 또한, 가공된 구멍의 직경에 대해 최적화를 진행하였으며 결과적으로 직경이 10mm 일 때 소모 전력 당 가장 큰 유량을 나타낸다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 측정을 통해 국소적인 위치에 대한 유속을 구할 수 있었으며, 이를 기반으로 가우스 곡선을 차용한 실험식을 세우고 실험을 통해 유속 분포를 비교, 분석할 수 있었다.

최적화된 결과를 바탕으로 이온풍의 물질 전달 향상에 대한 실험을 진행하였다. 물질 전달 현상의 연구에 있어 아세톤을 활용한 질량 감소율을 측정하는 방법을 사용하였다. 이를 통해 접촉 면적이 넓어질수록 증발량이 증가한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 동일한 유량을 발생시키는 팬과의 비교를 통해 방전 전극에서의 플라즈마 형성에 의한 화학 작용 효과를 입증할 수 있었다.

마지막으로 매니큐어에 사용되는 유기 용매를

활용한 건조 실험을 수행하였다. 이를 분석하는데 있어서 영상 처리 과정을 활용하였으며, 이를 통해 건조율이 90%에 달하기까지 자연 조건의 경우 88s, 이온풍에 의한 대류 조건의 경우 약 25s정도 걸리는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 중견 연구자 과제의 지원으로 수행되었습니다.
(NRF-2019R1A2C2003176)

REFERENCES

- 1) Fridman, A. Chirokov, A. and Gutsol, A., 2005, "Non-Thermal Atmospheric Pressure Discharges," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 38, pp.1~24.
- 2) Robinson, M., 1961, "A History of the Electric Wind," *Am. J. Phys.*, Vol. 28, pp.366~371.
- 3) Johnson, M. J. and Go, D. B., 2017, "Recent Advances in Electrohydrodynamic Pumps," *Plasma Sources. Sci. T.* Vol. 26, pp.1~27.
- 4) Zhao, L. and Adamiak, K., 2016, "EHD Flow Produced by Electric Corona Discharge in Gases from Fundamental Studies to Applications : a Review," *Particul. Sci. Technol.* Vol. 34, pp.63~71.
- 5) Muller, S. and Zahn, R. -J., 2007, "Air-Pollution Control by Non-Thermal Plasma," *Contrib. Plasma. Phys.* Vol. 47, pp.520~529.
- 6) Moreau, E., 2007, "Airflow Control by Non-Thermal Plasma Actuators," *J. Phys. D: Appl. Phys.* Vol. 40, pp.605~636.
- 7) Chun, Y. N., 2006, "Numerical Modeling of Wire Electrohydrodynamic flow in a Wire-Plate ESP," *Environ. Eng. Res.* Vol.11, pp.164~171.
- 8) Johnson, M. J., Tirumala, R. and Go, D. B., 2015, "Analysis of Geometric Scaling of Miniature, Multi-Electrode Assisted Corona Discharges for Ionic Wind Generation," *J. Electrostat.* Vol. 74, pp.8~14.

- 9) Li, L., Lee, S. J., Kim, W. and Kim, D., 2015, "An Empirical Model for Ionic Wind Generation by a Needle-to-Cylinder DC Corona Discharge," *J. Electrostat.* Vol. 73, pp.125~130.
- 10) Meng, X., Zhang, H. and Zhu, J., 2008, "A General Empirical Formula of Current-Voltage Characteristics for Point-to-Plane Geometry Corona Discharges," *J. Phys. D: Appl. Phys.* Vol. 41, pp.1~10.
- 11) Moon, J. D., Hwang, D. H. and Geum, S. T., 2009, "An EHD Gas Pump Utilizing a Ring-Needle Electrode," *IEEE. T. Dielect. El. In.* Vol. 16(2), pp.352~358.
- 12) Shaughnessy, E. J. and Solomon, G. S., 2007, "Electrohydrodynamic Pressure of the Point-toPlane Corona Discharge," *Aerosol. Sci. Tech.* Vol. 14, pp.193~200.
- 13) Tsui, Y. Y., Huang, Y. X., Lan, C. C. and Wang, C. C., 2017, "A Study of Heat Transfer Enhancement via Corona Discharge by Using a Plate Corona Electrode," *J. Electrostat.* Vol. 87, pp.1~10.
- 14) Zhang, Y., Liu, L. L., Chen, Y. and Ouyang, J., 2015, "Characteristics of Ionic Wind in Needle to Ring Corona Discharge," *J. Electrostat.* Vol. 74, pp.15~20.
- 15) Artana, G., D'Adamo, J., Leger, L., Moreau, E. and Touchard, G. G., 2002, "Flow Control with Electrohydrodynamic Actuators," *AIAA. J.* Vol. 40, pp. 1773~1779.
- 16) Leger, L., Moreau, E. and Touchard, G. G., 2002, "Effect of a DC Corona Electrical Discharge on the Airflow along a Flat Plate," *IEEE. T. Ind. Appl.* Vol. 38, pp.1478~1485.
- 17) Liang, W. J. and Lin, T. H., 1994, "The Characteristics of Ionic Wind and Its Effect on Electrostatic Precipitators," *Aerosol. Sci. Tech.* Vol. 20, pp.330~344.
- 18) Yamamoto, T. and Velkoff, H. R., 1981, "Electrohydrodynamics on an Electrostatic Precipitator," *J. Fluid. Mech.* Vol. 108, pp.1~18.
- 19) Kim, B., Lee, S., Lee, Y. S. and Kang, K. H., 2012, "Ion Wind Generation and the Application to cooling," *J. Electrostat.* Vol. 70, pp.438~444.
- 20) Wang, T. H., Peng, M., Wang, X. D. and Yan, W. M., 2017, "Investigation of Heat Transfer Enhancement by Electrohydrodynamics in a Double-Wall-Heated Channel," *Int. J. Heat. Mass. Tran.* Vol. 113, pp.373~383.
- 21) Scholtz, V., Pazlarova, J., Souskova, H., Khun, J. and Julak, J., 2015, "Nonthermal plasma-A tool for decontamination and disinfection," *Biotechnol Adv* Vol. 33, pp.1108~1119.
- 22) Lai, F. C. and Lai, K. -W., 2002, "EHD-Enhanced Drying With Wire Electrode," *Dry. Technol.* Vol. 20, pp.1393~1405.
- 23) Wonly, A., 1992, "Intensification of the Evaporation Process by Electric Field," *Chem. Eng. Sci.* Vol. 47, pp.551~554.
- 24) Moreau, E. and Touchard, G. G., 2008, "Enhancing the Mechanical Efficiency of Electric Wind in Corona Discharges," *J. Electrostat.* Vol. 66, pp.39~44.
- 25) Yamada, K., 2004, "An Empirical Formula for Negative Corona Discharge Current in Point-Grid Electrode Geometry," *J. appl. phys.* Vol. 96, pp.2472~2475.
- 26) Chang, J. S., 2001, "Recent Development of Plasma Pollution Control Technology : a Critical Review," *Sci. Technol. Adv. Mat.* Vol. 2, pp.571~576.
- 27) Chang, J. S., 2003, "Next Generation Integrated Electrostatic Gas Cleaning Systems," *J. Electrostat.* Vol. 57, pp.273~291.
- 28) McAdams, R., 2001, "Prospects for Non-Thermal Atmospheric Plasmas for Pollution Abatement," *J. Phys. D: Appl. Phys.* Vol. 34, pp.2810~2821.
- 29) Mizuno, A., 2007, "Industrial Application of Atmospheric Non-Thermal Plasma in Environmental Remediation," *Plasma Phys. Control. Fusion.* Vol. 49, pp.A1~A15.

- 30) Shiavon, M., Torretta, V., Casazza, A. and Ragazzi, M., 2017, "Non-Thermal Plasma as an Innovative Option for the Abatement of Volatile Organic Compounds : a Review," Water. Air. Soil. Poll. Vol.), pp.228~388.
- 31) Tham, K. W., 2016, "Indoor Air Quality and Its Effects on Humans - A Review of Challenges and Developments in the last 30 Years," Energ. Buildings. Vol. 130, pp.637~650.