

전기수력학적 힘이 분무특성에 미치는 영향

Effects of the Electrohydrodynamic Forces on Characteristics of Spray

이종호*, 권순도*, 김상현**, 문수연***, 이충원***
 J. H. Lee*, S. D. Kwon*, S. H. Kim**, S. Y. Moon***, C. W. Lee***

Abstract

The distributions of the SMD and behavior of 2% $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ spray discharged from a fan-spray twin fluid type nozzle are measured and observed. The spray characteristics, according to the variation in the applied voltages, are demonstrated using the PMAS (Particle Motion Analysis System) and the CCD camera, respectively. The preliminary experiments are executed to select an optimum condition for solidifying a galvanized coating layer in the uncharged condition before carrying out the main experiments. The liquid and air pressure of 0.07 kg/cm^2 and 0.15 kg/cm^2 can be considered the optimum conditions to use in the main experiment. As the applied voltage increases, the frequent range of relatively large droplets diminishes. Thus, the distributions of drop diameter in the charged spray are more uniform than these in the uncharged condition. This is explained by recognizing that repulsive forces among droplets with the charges of the same sign cause them to be uniform.

주요기술용어 : SMD (Sauter Mean Diameter), Galvanized Coating Layer (아연도금판), Electrohydrodynamic Force (전기수력학적힘)

1. 서론

현재 많은 산업적 응용 분야에서 나노미터 크기의 액적을 생성하거나 박막의 코팅 등에 대한 수요가 증가하고 있다. 액체를 미립화하는 기술은 기존에는 공기의 압력을 이용하는 분무방식이 주로 사용되었으나, 노즐 출구에서의 표면장력에 의해 실제적으로 얻을 수 있는 액적의 크기는 제한되어져 왔다. 따라서 최근에는 전기수

력학적 힘을 이용한 정전분무방식에 대한 관심이 집중되고 있다. 이러한 전기적 힘을 이용한 미립화는 페인팅, 농약 살포, 냉각 시스템, 오일 필터, 내연 기관, 잉크젯프린터 등의 많은 분야에서 적용된다⁽¹⁻³⁾.

환경오염과 인류 건강의 위협, 생산비용의 증가 등에 대한 관심이 증대되고 있는 현실에서 전기적 힘을 이용한 분무방법은 이러한 욕구를 효과적으로 충족시킬 수 있다.⁽⁴⁾

전기수력학적 힘을 이용한 분무시 액체의 표면에 전하 입자들을 대전시키면 이에 의해 액체 내부 압력이 상승되는데, 이때 이 전기적 압력은 표면장력과 평형을 이루게 되고, 이러한 상태를

* 경북대학교 기계공학부

** POSCO, 포항제철기술연구소

*** 정희원, 경북대학교 기계공학부

레이리 한계(Rayleigh limit)라고 한다.

만일 대전에 의한 액체 내부 압력이 표면장력보다 커지게 되면 액체는 액적으로 분열하여 미립화가 진행된다. 그리고 전기수력학적 분무는 액적 생성 후에도 각각의 액적이 동일 극성의 전하를 띠게 되므로 액적간의 합착을 방지할 수 있고, 2차적으로 전기장을 가해줄 경우 액적의 경로까지도 제어가 가능하다⁽⁵⁾.

김 등⁽⁶⁾ 은 도금 강판의 용고 방법으로 전기수력학적 힘을 이용한 분무에 대해 제시하였다. 또한 전기장이 미세한 액적들이 강판에 부착하도록 하고 강판의 가까운 곳에서의 액적들의 궤적을 변화시키는 사실에 대해 논하였다.

본 연구에서는 선형 분무 형태의 2유체 노즐을 이용하여 아연도금 강판의 제작 공정 중 냉각시스템에 사용되는 노즐의 최적의 분사조건을 찾아내고, 그 조건에서 액체의 분무시 대전입자의 실제 거동을 파악하기 위해 grounded object 부근에서 입경 분포와 분무형태, 속도분포를 관찰함으로써 전기수력학적 힘이 분무특성에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 그림이다.

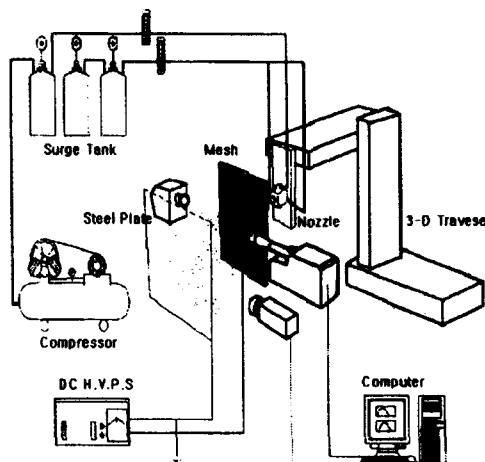
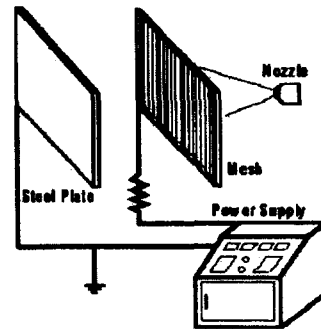


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

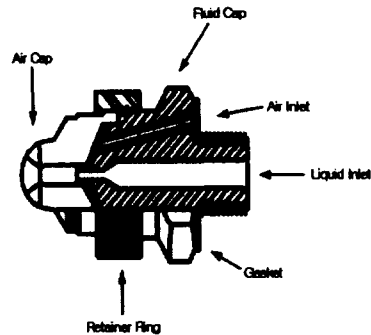
실험장치는 크게 유체공급부, 노즐부, 측정부의 세 부분으로 구분할 수 있다.

유체공급부는 질소가스를 이용하여 작동유체인 2% $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 수용액을 가압하였고, 원하는 압력의 공기를 얻기 위해 공기 압축기를 사용하였다. 작동유체의 유량조절은 압력조절계 및 유량계를 사용함으로써 제어하였다.

노즐부는 Fig. 2에서 나타내었듯이 노즐, 강판, 메시(mesh) 그리고 최대 DC 50kV까지 공급할 수 있는 전원공급장치로 구성된다.



(a) Charging Facilities



(b) A Fan-spray Twin Fluid Type Nozzle

Fig. 2 A Schematic Diagram of the Injection System with the Charging Facilities

0.2mm의 텅스텐 와이어로 5mm간격으로 제작된 mesh는 전체유량에 걸쳐 균일한 전기장을 만들기 위해서 노즐로부터 200mm 떨어진 곳으로 코노드(coronode)로서 설치하였다(Fig. 2(a)).

강판은 노즐로부터 450mm 떨어진 위치에 설치하였다. 그리고 고전압을 가할 경우 생길지도 모르는 스파크에 의한 위험을 줄이기 위해 고압을 가하는 mesh와 파워 서플라이 사이에 20MΩ의 저항을 설치하여 순간적인 방전에 의한 전원공급장치의 손상을 방지하였다. 노즐로부터 분사된 유체는 mesh를 통하여 동일 극성으로 대전되고, 아연도금강판으로 된 grounded object로 향하게 된다. Fig. 2(b)는 선형 분무 타입의 이 유체 노즐의 상세도이다.

Fig. 3은 PMAS(Particle Motion Analysis System)를 이용한 평균입경 측정방법의 개략도를 나타낸 것이다. 입자 분포도 분석에 의한 분무 해석은 아주 작은 크기의 입자에서부터 큰 입자의 크기를 화상으로 저장한 뒤 입자 분포도 분석 소프트웨어로서 실제 크기를 분석한다. 이 중 방전에 의한 극초단파의 광원에 의하여 노즐과 같은 분사기에서 분사되거나 미립화된 입자에 대한 화상이 고해상도 디지털 카메라의 촬영면에 맺히면 그 상을 정지 화상으로 잡는다.

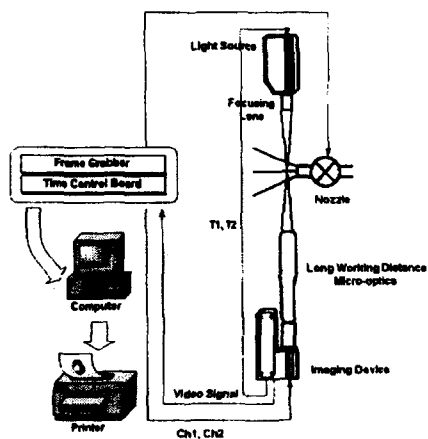


Fig. 3 Schematic Diagram of SMD Measurement by PMAS System

그리고 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 이용하여 노즐로부터 mesh까지의 거리의 변화에 따른 입자의 평균속도를 측정하였다. Fig. 4는 구형의 입자에 의한 산란광을 이용하여 입자의 속도와 크기를 측정할 수 있는

PDPA를 이용한 평균속도 측정방법에 대한 개략도이다. 그리고 CCD Camera를 이용해 전체 분무거동을 관찰했다.

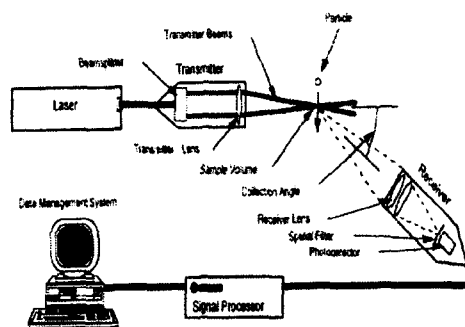
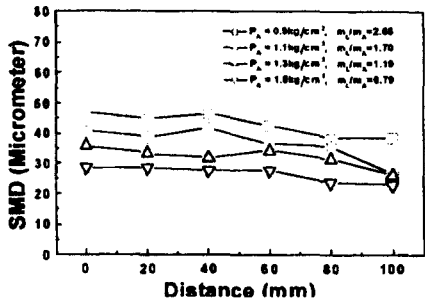


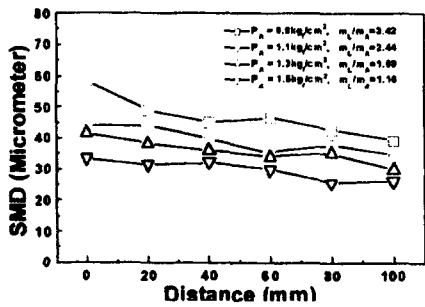
Fig. 4 Schematic Diagram of Mean Velocity Measurement by PDPA System

3. 결과 및 고찰

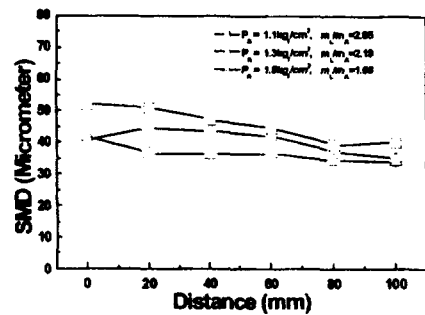
본 실험에서는 먼저 아연도금강판의 냉각을 위한 최적의 분사조건을 찾기 위해 전기장이 형성되지 않은 상태에서의 노즐의 분무 특성을 살펴보았다. 예비 실험은 액체와 공기의 분사압을 각각 0.7 kg/cm²에서부터 1.5 kg/cm²까지 0.02 kg/cm² 간격으로 증가시키면서 수행하였다. 평균입경 분포 및 유량 분포는 노즐 팁에서 100mm 떨어진 지점에서 측정을 하였고, 특히 평균입경 분포는 노즐팁을 중심으로 분무폭 방향으로 20mm 간격으로 측정을 하였다. 액체의 분사압이 공기의 분사압보다 높은 경우에 있어서는 도금 강판의 용고에 있어 적합하지 않는 큰 입자들이 분무의 중심에 분포하기 때문에 SMD의 분포를 측정하지 않았다. Fig. 5는 액체와 공기의 분사압을 변화시켜가면서 전체 분무군에 대해 노즐 팁에서 100mm 떨어진 지점에서 20mm 간격으로 SMD를 측정한 결과를 나타낸다. 전체 분사조건 범위에서 SMD는 분무군의 가운데 부분에서 값이 약간 크게 나타나고, 분무군 외각으로 갈수록 그 값이 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 액체의 분사압이 공기의 분사압보다 작을수록 SMD 값이 작게 나타났고,



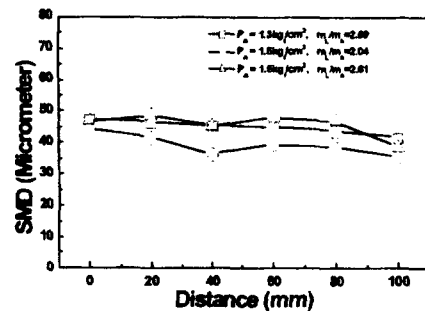
(a) $P_{L, Inj} = 0.7 \text{ kg/cm}^2$



(b) $P_{L, Inj} = 0.9 \text{ kg/cm}^2$



(c) $P_{L, Inj} = 1.1 \text{ kg/cm}^2$



(d) $P_{L, Inj} = 1.3, 1.5 \text{ kg/cm}^2$

Fig. 5 SMD Distributions of Droplets for Distance

분무폭 방향으로의 SMD 분포가 균일하게 나타났다. 분사되는 유체의 공급유량은 전기장을 형성하지 않은 상태에서의 노즐의 분무 특성 실험을 통해 액체의 분사압은 0.7 kg/cm^2 , 공기의 분사압은 1.5 kg/cm^2 에서 SMD가 가장 작고, 분무폭 방향으로의 SMD 분포가 균일하게 나타났다. 따라서, 전기장을 형성하였을 경우엔 분사압 조건을 액체의 분사압은 0.7 kg/cm^2 , 공기의 분사압은 1.5 kg/cm^2 으로 유지하여 실험을 진행하였다.

Fig. 6은 전압을 변화시키면서 측정된 분무폭 방향의 SMD 값을 나타낸 것이다. 측정위치는 전기장이 SMD에 미치는 영향을 파악하기 위해 전기장이 형성되는 mesh와 ground object사이인 노즐팁에서 400mm 떨어진 지점을 측정위치로 설정하였고, 역시 노즐팁을 중심으로 20mm 간격으로 SMD 값을 측정하였다. 전압을 증가시키며 따라 분무폭 전반에 걸쳐 SMD가 감소함을 볼 수 있다. 그리고 전압을 가하기 전에는 노즐 팁에서 분무폭 방향으로 갈수록 SMD가 작아지는 경향을 나타내지만, 전압을 증가시킬수록 분무폭 방향으로의 SMD 분포가 균일해짐을 알 수가 있다.

Fig. 7과 8은 Fig. 6에 나타난 SMD 결과를 바탕으로 부하전압 0 kV, 20 kV, 40 kV 일 때의 수밀도 분포와 부피의 비율 각각 나타낸 그래프이다.

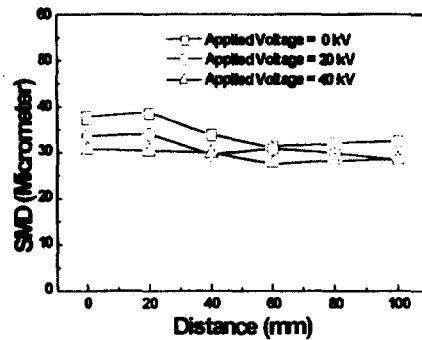
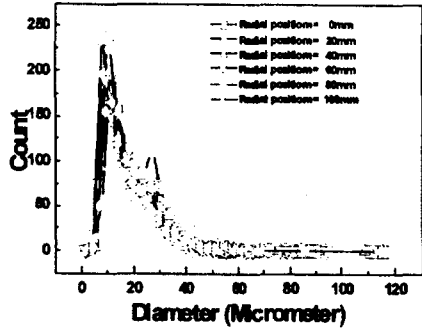
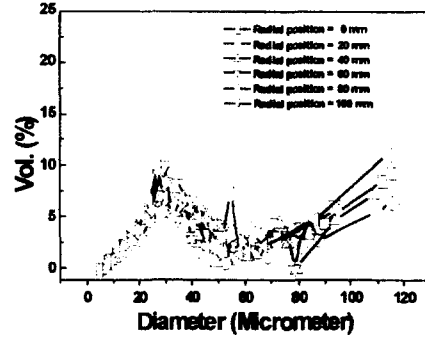


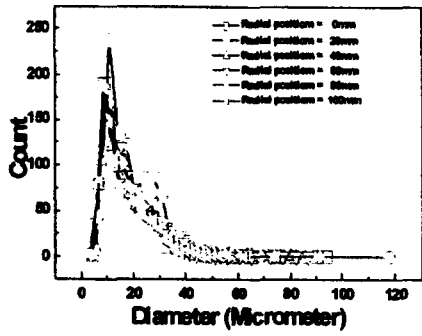
Fig. 6 SMD Distributions of Droplets for Variation of applied Voltages ($P_{L, Inj} = 0.7 \text{ kg/cm}^2$, $P_{A, Inj} = 1.5 \text{ kg/cm}^2$)



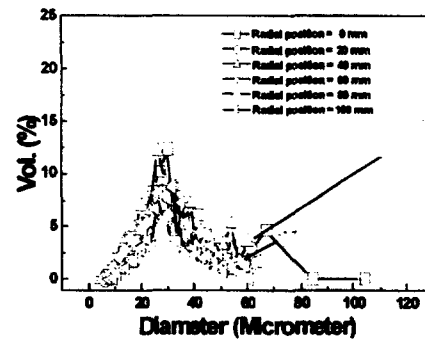
(a) V = 0kV



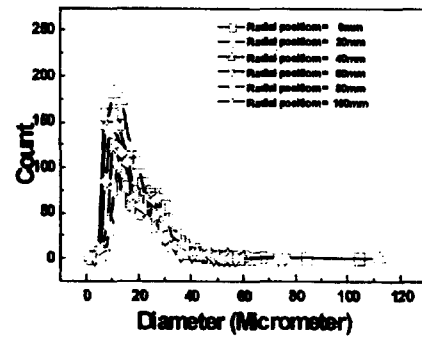
(a) V = 0kV



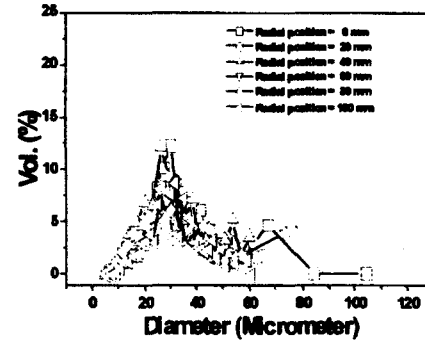
(b) V = 20kV



(b) V = 20kV



(c) V = 40kV



(c) V = 40kV

Fig. 7 Number Density of Droplets for Distances
 ($P_{L, Inj} = 0.7 \text{ kg/cm}^2$, $P_{A, Inj} = 1.5 \text{ kg/cm}^2$)

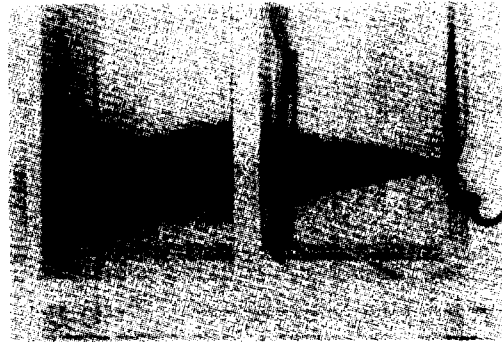
Fig. 8 Volume Fraction of Droplets for Distances
 ($P_{L, Inj} = 0.7 \text{ kg/cm}^2$, $P_{A, Inj} = 1.5 \text{ kg/cm}^2$)

Fig. 7에서 전압을 증가시키기에 따라 액적의 빈도수가 나타나는 경향은 유사하게 나타나지만, 전압을 증가시키기에 따라 x축상의 최외각 부분의 큰 입경을 가지는 액적의 빈도가 감소하고 있음을 볼 수 있다. 하지만, 전압을 가하지 않았을 경우에는 최대 직경의 값이 $110\mu\text{m}$ 부근까지 그 값이 빈번하게 나타나 전압을 증가시키기에 따라 20 kV일 때는 $95\mu\text{m}$, 40 kV일 때는 $70\mu\text{m}$ 로 그 값이 감소함을 그래프에서 볼 수 있다.

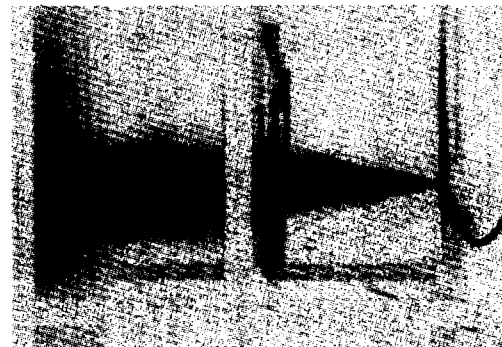
Fig. 8에서 전압이 증가함에 따라 상대적으로 큰 액적들이 감소하여 이들이 전체에서 차지하는 비율이 감소함을 볼 수 있다. 전압의 증가에 따라 SMD가 감소하고 분무폭 방향으로의 SMD 분포가 균일해지는 것은 전기적인 힘에 의해 큰 액적이 전기장에서 재분열하였기 때문이라고 볼 수 있다.

Fig. 9는 전기적인 힘이 액적의 공간분포에 미치는 영향을 알아보기 위해 전압을 0, 20, 40 kV로 변화시켰을 때, 레이저 sheet beam과 디지털 캠코더를 이용하여 측면에서 촬영한 분무사진이다. 수직 방향의 분무도달 거리는 전압이 증가하여도 거의 변하지 않음을 볼 수 있다. 하지만, 전기장이 형성되어져 있는 mesh와 ground object사이의 영역에서 진하게 나타난 분무 주류의 영역이 전압의 증가에 따라 감소함을 볼 수 있다. 이는 전압이 증가함에 따라 전체 분무군내의 액적들이 동일 극성을 가짐으로 해서 액적끼리 서로 미는 힘이 강해져 분무 전반에 걸쳐 액적이 균일하게 분포했기 때문이다.

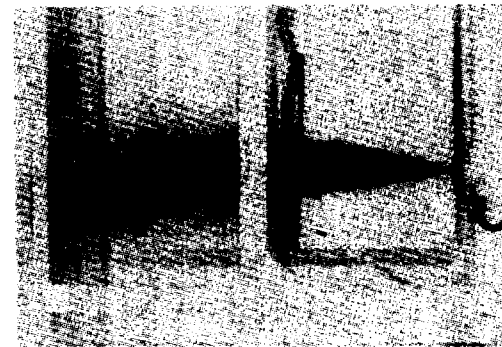
Fig. 10은 분무폭 방향을 따라서 20mm간격으로 측정된 각각의 축방향(분무방향) 속도들에 대해 평균한 값을 노즐에서 mesh까지의 거리에 대해 인가된 전압별로 나타낸 것이다. 인가된 전압의 증가에 따라 분무방향의 입자 평균 속도가 작아지는 것을 볼 수 있다. 인가된 전압의 증가에 따라 큰 액적들이 가지고 있던 운동량들이 전기적인 힘에 의해서 재분열하여 운동량이 감소하기 때문이다. 또한 본 실험의 조건내에서는 입자들의 평균 속도는 노즐로부터 mesh까지의 거리에 따라 큰 영향이 없음을 나타낸다.



(a) V = 0 kV



(b) 20 kV



(c) 40 kV

Fig. 9 Photographs of Spray in Increasing Applied Voltage
($P_{L, \text{inj}} = 0.7 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $P_{A, \text{inj}} = 1.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$)

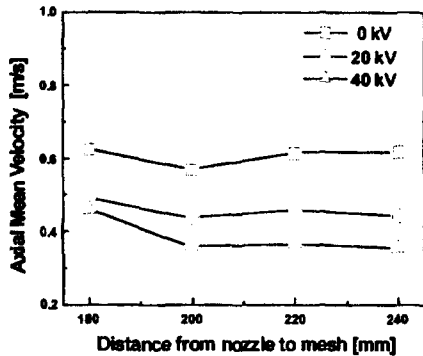


Fig. 10 Axial Mean Velocity of Droplets with distance from nozzle to mesh at $V = 0, 20$ and 40 kV

4. 결론

본 연구에서는 선형 분무 형태의 이류체 노즐을 사용하여 아연도금강판의 제강 공정 중 냉각 시스템에서 사용되는 노즐의 최적의 분사 조건을 찾기 위한 실험과 이 조건에서 전기적인 힘이 분무 특성에 미치는 영향을 관찰하기 위한 실험으로 나누어 실험을 수행하였다.

먼저 전기장을 형성하지 않은 상태에서, 노즐의 분무 특성을 조사하기 위해 분무형태, 분무각, SMD 분포 등을 관찰함으로써 최적의 분사 조건을 파악하였다. 그리고 위의 실험을 바탕으로 얻은 최적의 분사 조건에 대해 부하전압을 DC 0 ~ 40 kV의 범위에서 전압을 변화시켜 가면서 전기장이 형성되는 지점에서의 SMD값과 분무 형상, 속도분포를 살펴본 결과, 다음과 같은 결론을 낼 수 있었다.

(1) 액체와 공기의 분사압 조건 범위에서 액체의 분사압이 0.7 kg/cm^2 , 공기의 분사압이 1.5 kg/cm^2 일 때 SMD 값이 가장 작게 나타났고, 분무폭 방향으로의 SMD 분포가 가장 균일하게 나타났다.

(2) 전압을 증가시키에 따라 상대적으로 큰 액적의 빈도수가 감소하기 때문에 전기장내의 각 지

점에서의 SMD는 작아지고, 공간상의 입경분포는 전기장을 형성하기 전보다 더 균일해졌다.

(3) 전압이 증가함에 따라 동일 극성을 띤 입자들끼리의 서로 미는 힘으로 인해 전기장내의 액적의 밀도분포는 더욱 균일해진다.

(4) 전압이 증가함에 따라 입자들의 재분열로 인해 운동량이 감소하여 입자의 평균 속도가 감소하고 본 실험의 조건하에서는 mesh와 ground object로 사용된 아연도금강판과의 거리에 따라 입자의 평균속도는 큰 영향이 없다.

후 기

이 논문은 POSCO의 연구비에 의하여 수행된 결과이며 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. A. G. Bailey, "Electrostatic Spraying of Liquids", Research Studies Press Ltd., 1988.
2. D. Michelson, "Electrostatic Atomization", IOP Publishing Ltd., 1990.
3. A. G. Bailey, "The Theory and Practice of Electrostatic Spraying", Atomization and Spray Technology, 2, pp.95-134, 1986.
4. W. Balachandran and P. Mario, "Electrohydrodynamic Atomisation : Question And Challenges", 4th Annual conference on Ilass-Asia, pp. 183-198, 1999.
5. 김 병찬, 이 상용, "전기수력학적 힘을 이용한 단분산 액적 생성에 대한 검토", 한국액체미립화학회 학술강연회 논문집, pp. 11-18, 1999.
6. 김 상현, 김 형민, 정 원철, 정 원섭, "용융도금강판의 제조 공정에 있어서 2-유체 분사액적의 운동에 미치는 정전대전력의 영향", 한국액체미립화학회지, Vol.5, No.3, pp. 45-54, 2000.
7. J. M. Grace and P. F. Dunn, "Droplet Motion in an Electrohydrodynamic Fine

- Spray", ICLASS, , pp. 1002-1009, 1994.
8. M.M.Elkotb, H.El-Ghazaly, H. El-Salmawy and H. Abdel-Hameed, "Prediction of the Effect of electrostatic Charging on Spray Characteristics", Proceedings of ICLASS, pp. 633-640, 1997.
 9. K. Asano, Y. Miyatake, K. Yatsuzuka and Y. Higashiyama, "The Effects of Particle Velocity on Electrostatic Particle Sorting", Journal of Electrostatics, pp. 17-24, 1997.
 10. S. E. Law, "Embedded-Electrode Electrostatic-Induction Spray-Charging Nozzle : Theoretical and Engineering Design", Trans. ASAE 21, pp. 1096-1104, 1978.
 11. S. E. Law and M. D. Lane, "Electrostatic Deposition of Pesticide Sprays onto Ionizing Targets : Charge and Mass -Transfer Analysis", IEEE Trans. Ind. APPL. 1A-18, pp. 673-679, 1982.
 12. J. C. Palumbo and W.E. Coates, "Air-Assisted Electrostatic Application of Pyrethroid and Endosulfan Mixtures for Sweetpotato Whitefly (Homoptera : Aleyrodidae) Control and Spray Deposition in Cauliflower", Horticultural Entomology, pp. 970-980, 1996.
 13. L. Reyderman and S. Stavchansky, "Electrostatic Spraying and its Use in Drug Delivery - Cholesterol Microspheres", International Journal of Pharmaceutics, pp. 75-85, 1995.
 14. S. E. Law, "Handbook of Electrostatic Processes", Marcel Dekker, pp 414, 1995.