

용융도금강판의 제조 공정에 있어서 2-유체 분사 액적의 운동에 미치는 정전대전력의 영향

Effects of Electrostatic Force on Movement of Sprayed Aerosol Particles in Continuous Galvanizing Process.

김상현*, 김형민**, 정원철*, 정원섭***

S. H. Kim, H. M. Kim, H. C. Chung, W. S. Chung

ABSTRACT

A novel electrostatic spraying method for solidifying a galvanized coating layer was studied. Our experimental results and computer simulations showed that electric field could assist the fine droplets to attach on the steel surface and change the sprayed droplets trajectory especially in the space near the steel surface. It was necessary to apply the electric voltage higher than - 20 kV to obtain the enough electrostatic attraction force between droplets and the steel sheet.

주요기술용어: Galvanizing (아연도금강판), Electrostatic (정전기), Solution Spraying Method(수용액 분사법), Spangle(스판글)

1. 서 론

용융 아연 도금강판은 용융 상태의 아연욕에 강판을 침적시켜 아연을 균일하게 부착시킨 후에 응고시키는 과정을 거쳐 제조된다⁽¹⁾. 응고 단계는 도금층 품질이 거의 결정되는 중요한 단계이고, 이 반응을 조절하기 위한 몇 가지 응고 방법이 개발되어 있다⁽²⁾. 그 중 2-유체 분사노즐에 의해 수용액을 강판

표면에 분사하는 방법이 가장 간편하여 널리 이용되고 있으며, 이때 수용액 및 공기의 분사 압력은 1~4 kg/cm² 정도이다. 분사에 의해 도금층 표면에 부착된 수용액 액적은 증발에 의한 강판 냉각 작용과 표면에 잔존하게 되는 화학물질에 의한 응고해 작용을 하여 도금층 결정립 크기를 감소시킨다.

최근 용융 아연 도금강판이 자동차 및 가

* 포항제철 기술연구소
** 경기대학교 전자기계공학부
*** 부산대학교 재료공학부

전제품의 외부 판넬 등 고급 용도로 많이 사용되게 됨에 따라 가능한 한 균일한 도금 조직과 미려한 표면 외관이 요구되고 있어⁽³⁾ 수용액 분사 기술의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 상업 생산 공장에서의 작업 경험에 의하면 이상적인 액적 크기는 10 μm 이하로 알려져 있으며, 이를 만족시키기 위하여 노즐 및 분사 조건을 조절하고 있지만 50~100 μm 이상인 큰 액적도 불가피하게 분사되고 있다.

용융 도금공정에서 액적의 운동에 영향을 주는 유체의 흐름은 다음과 같다. 용액 분사 시 강판 중심부를 향한 유체 압력이 예지 부보다 높게 되어 강판 폭 방향으로 유체가 흐르게 된다. 또한 강판의 온도는 유체 보다 약 400 $^{\circ}\text{C}$ 정도 높기 때문에 강판 표면 근처에서 대류 현상이 발생한다. 작은 액적은 큰 액적 보다 이러한 유체의 흐름에 더 큰 영향을 받게 되어 강판에 부착되지 못하고 비산될 확률이 더 높으며, 실제로 작은 액적 보다는 큰 액적이 주로 강판에 부착되는 현상이 관찰된다.

작은 액적의 부착을 촉진시키기 위해서 분사 압력을 높일 경우 큰 액적이 도금층 표면에 충돌하여 파임 흔적이 나타날 수 있으며, 심할 경우에는 직경이 1mm 정도가 되어 강판 외관이 심하게 손상되는 경우도 발생한다. 이러한 파임 흔적을 방지하기 위해서는 분사 압을 낮추어야 하지만 이 경우 액적의 부착 효율이 저하되어 도금 결정립의 크기가 불균

일하게 되는 문제점이 야기된다.

이러한 현상은 가압식 분사 노즐을 이용한 방법에서는 불가피한 것으로서 분사 조건의 조절만으로는 해결하기가 쉽지 않다.

일반적으로 액적 혹은 입자가 고전압의 전기장을 통과하면 정전대전되어 접지된 물체와 전기적 인력이 작용하여 그 물체에 부착하게 되며⁽⁴⁾, 이를 전기집진, 분체 도장 및 방청유 도포 공정에 이용하고 있다.

정전대전 부착 기술을 수용액 분사 공정에 적용하면 정전기력의 도움으로 낮은 분사 압력에서도 액적이 강판에 부착될 수 있어 기존 기술의 문제점이 해결될 가능성이 높다. 특히 인가 전압의 높이 및 코로노드 (coronode)의 형상을 조정하면 입자의 부착 효율 및 균일성을 향상시키는 것이 가능해지므로 정전 대전 기술은 용융 도금 공정의 새로운 용액 분사 기술로서 충분히 고려할 가치가 있지만 현재까지 이에 대한 연구는 수행된 바가 없다.

용융 도금의 수용액 분사 공정은 기존 정전 대전 이용 분야와 유체의 흐름 및 액적의 유전율에 차이가 있다. 따라서 본 연구에서는 도금 실험에 의해 제조한 시편의 표면을 전자 현미경으로 관찰함으로써 액적의 부착 형태를 관찰하였고, 분사된 액적의 운동 궤적이 정전 대전에 의해 변화되는 모습을 수치해석함으로써 정전 대전에 의한 액적 부착 효율 향상 효과를 조사하였다.

2. 실험 방법 및 수치해석 방법

2.1 실험 장치 및 실험 방법

Fig.1은 도금실험에 이용한 실험장치의 개략도이다. 두께가 0.8 mm이고, 가로와 세로가 각각 0.1 m, 0.2 m인 시편을 온도가 460 °C 인 용융아연 포트(pot)에 30초 간 침적후 꺼내어 도금층이 응고되기 전에 중량비로 2 % 인산염 수용액을 분사하여 도금층을 응고시켰다. 온도 측정결과 용액 분사시 강판온도는 421 °C로 도금층은 완전히 용융된 상태였다.

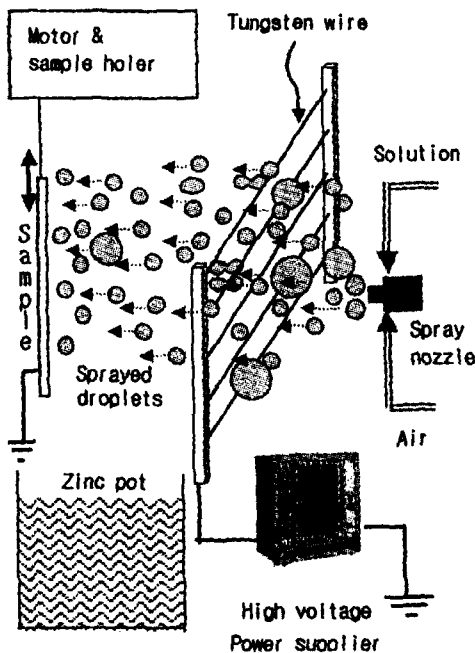


Fig.1. Drawing of an apparatus for galvanizing and spraying test

실험에 사용한 분사 장치는 Spray System 사(미국)의 AutoJet® 에 2-유체 분사노즐(셋업 No. 13 A)을 부착하여 사용하였고, 이때 분사조건은 파임 흔적이 발생하지 않는조건

으로 고정하였는데 공기압 및 용액압은 각각 1.2 kg/cm², 0.8 kg/cm²이었다. 이는 통상적으로 행하여지는 분사 압력보다 낮은 압력이다. 노즐은 강판을 향해 30 ° 아래로 향하여 분사되게 하였으며, 노즐 출구와 시편과의 거리는 0.4 m로 일반적인 경우보다 0.2 m 정도 멀리하였다.

그림에서 텅스텐 선은 코로노드(coronode)로서 정전 대전장치에 의해서 일정 전압이 부가되는 대전 전극이다. 노즐로부터 분사된 액적이 코로노드를 통과하면서 정전 대전된 후에 강판에 부착되도록 하기 위하여 노즐과 강판사이에 강판과 마주보게 설치하였으며, 노즐 출구로부터의 거리는 10 cm 였다. 코로노드는 폭이 0.15 m, 길이가 0.25 m, 두께가 0.02 mm인 문틀 모양의 틀에 직경이 0.25 mm의 텅스텐 와이어를 3 mm 간격으로 평행하게 다수 설치된 형태를 갖고 있었다. 실험이 끝난 시편은 전자현미경으로 액적 부착상태를 조사하였다.

2.2 수치해석 방법

2.2.1 유동장의 기본 방정식

유동과 전기장 내에서 액적의 운동을 수치해석하기 위해서는 먼저 노즐에 의해 분사되는 유체에 의한 유동장을 해석해야 한다. 유동장의 해석^{(5),(6)}을 위한 기본 방정식인 질량과 운동량 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} (v_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) \quad (2)$$

본 연구에서 유동장은 난류유동으로 가정하였으며 위 식(2)에서의 v_{eff} 는 동점성 계수(ν)와 난류점성계수(ν_t)를 포함한 변수이다. 난류점성계수의 계산은 난류운동에너지(κ)와 난류에너지소산율(ϵ) 방정식으로 부터 그 변수의 값이 결정되며 그 식들은 다음과 같다.

$$u_i \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i}) + p - \epsilon \quad (3)$$

$$u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}) + C_1 \frac{\epsilon}{K} p - C_2 \frac{\epsilon^2}{K} \quad (4)$$

여기서 p 는 난류 응력과 평균속도 변화의 비율에 의한 항으로 난류 운동에너지의 생성항이라 하며 수학적으로는 다음과 같이 표현된다.

$$p = \nu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

그리고 위식 (3) 과 (4)에서 C_1 , C_2 , σ_κ , σ_ϵ 는 각각 1.44, 0.09, 1.0 및 1.3으로 하였는데, Launder⁽⁷⁾와 Rodi⁽⁸⁾에 의해서 결정된 값이다.

2.2.2 전기장의 기본 방정식

전기장에 의한 전압 분포는 다음의 라플라스 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (e \frac{\partial \phi}{\partial x_i}) = 0 \quad (6)$$

여기서 ϕ 그리고 e 는 각각 전압과 물질의 유전율을 나타낸다. 식 (6)으로부터 전장의 세기(E_i)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_i = -\frac{\partial \phi}{\partial x_i} \quad (7)$$

2.2.3 액적의 라그랑지안 운동 방정식

여러 가지 힘의 작용에 의한 액적의 궤적과 위치 등에 대한 예측은 힘의 평형식^{(9),(10)}을 해석함으로써 가능하며, 액적에 작용하는 힘의 차는 액적의 운동량의 변화 비로서 나타낼 수 있다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$m_p \frac{\partial V_{pi}}{\partial x_i} = F_{di} + F_{ci} + F_{pi} \quad (8)$$

여기서 m_p 는 액적의 질량, V_{pi} 는 액적의 속도 그리고 F_{ci} , F_{di} , F_{pi} 는 액적에 작용하는 쿨롱력, 점성력, 분극력 이다. 이러한 힘들은 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$F_{di} = \frac{\pi d_p \rho C_d}{8 C_c} (u_i - V_{pi}) |u_i - V_{pi}| \quad (9)$$

$$F_{ci} = Q_p E_i \quad (10)$$

$$F_{pi} = \frac{\pi \epsilon_0 d_p^3}{4} (\frac{e_p - 1}{e_p - 2}) \frac{\partial}{\partial x_i} (E_j E_j) \quad (11)$$

여기서 C_d 는 Crawford의 실험에 의해서 결정된 항력계수이며 Reynold 수에 따라 다르다.

$$C_d = \frac{24}{Re}, \quad Re < 1 \quad (12-1)$$

$$C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \quad 1 < Re < 1000 \quad (12-2)$$

$$C_d = 0.44, \quad 1000 < Re < 10^5 \quad (12-3)$$

$$C_d = 0.1, \quad 10^5 < Re \quad (12-4)$$

C_c 는 Cunningham 보정 계수이며, 다음의 식에 의해서 그 값이 결정된다.

$$C_c = 1 + Kn \left[A + Qe^{-\frac{b}{Kn}} \right] \quad (13)$$

여기서 Kn 은 Knudsen수로서 기체의 평균자유행로 λ 와 액적 지름 d_p 의 비($= \frac{2\lambda}{d_p}$)로 표현

된다. 위 식의 A , Q , b 는 실험적인 상수로서 Jennings⁽¹¹⁾에 의해서 실험적으로 구해진 수를 적용하였다. 그 값은 $A=1.252$, $Q=0.3992$ 그리고 $b=1.1$ 이다.

2.2.4 수치해석 방법

앞 절의 식 (1) ~ (5)는 계산영역 내부의 유동을 해석하기 위한 보존 방정식으로 본 연구에서는 유한요소법⁽¹²⁾을 기반으로 제작된 FIDAP 상용 프로그램을 사용하였다. 그 외의 전기장의 전압분포와 액적의 운동방정식은 유한요소법과 Runge-Kutta 방법이나 Gear 방법에 비하여 수렴성이 좋고 빠른 Bader와 Deufilhard에 의해서 개발된 준 암시적 보외법(Semi-Implicit Extrapolation Method)을 이용하였다^{(13), (14)}.

본 연구에서 사용된 경계 조건을 상부에서 투시한 노즐과 시편의 그림(Fig.2)으로 설명하면 다음과 같다

이 계산영역의 크기는 실제 도금 실험에서 사용한 크기를 기준으로 벽경계 (wall boundary)를 $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 으로 하였으며 시편 중심을 기준으로 폭 방향인 x축 방향으로

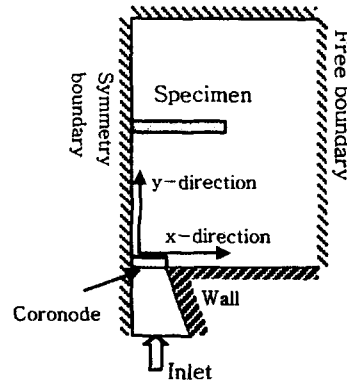


Fig.2. Applied boundary conditions and calculation domain

대칭을 이루고 있으므로 계산은 $0.3 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 에 대해서만 하였다. 그림에서 시편은 접지되어 있다고 가정하였다. 전압 분포 계산을 위한 그 외의 경계조건은 Neumann 조건⁽¹⁵⁾을 이용하였다.

분사 노즐의 형태는 다음과 같다고 가정하였다. 실제 분사 실험에서 유체는 미세한 노즐 구멍으로부터 부채꼴 모양으로 퍼지면서 진행하므로 유체가 코로노드 망을 통과할 때의 분사폭은 0.1 m 정도였다. 수치해석의 목적이 정전 대전의 효과를 가시화하는데 있으므로 노즐을 코로노드와 매우 근접되어 위치한 slit 형태로 가정하였으며, 이때 노즐 출구의 폭은 도금 실험시 코로노드에서의 분사폭인 0.1 m 로 하였다. 즉, 노즐로부터 코로노드까지의 유체의 유동 형태를 Convergent 관으로 유입된 기체가 출구에서 분출되는 형태로 단순화시켰다.

실제 분사 실험시 노즐 출구에서 분사된 기체의 속도는 약 1 m/s 정도였으므로 수치해

석에 있어서도 노즐 출구에서의 기체의 속도를 1 m/s로 하였다. Reynold 수를 계산한 결과 그 값은 4,000 이상이므로 기체의 유동을 난류로 취급하여 Cd의 값을 0.44 (식 12-3)으로 하였다.

유동과 전기장의 형성 상태가 상이하므로 각각 다른 형상의 격자를 이용하여 계산하였다. 유동에서는 유동장의 변화가 심한 노즐의 근접부와 시편 주위에 격자를 집중시켰으며, 전기장의 계산에서는 액적의 예상 경로가 될 수 있는 부분과 코로노드와 시편 사이의 공간에 격자를 세분화하였다. 전기장을 해석할 경우에는 노즐 영역은 제외시켰다.

액적의 운동 궤적은 Lagrangian 운동방정식인 식(8)로부터 계산할 수 있다. 준 암시적 보외법을 적용하기 위하여 이 식을 다음의 두 미분방정식으로 변환하였다.

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = V_{pi} \quad (14)$$

$$\frac{dV_{pi}}{dt} = \frac{1}{m_p} (F_{di} + F_{ci} + F_{pi}) \quad (15)$$

위의 식에서 x_{pi} 는 액적의 위치를 나타내는 벡터이며 아래 첨자는 각각의 성분을 나타낸다.

계산시 온도차에 의한 부력을 배제한 2차원 비압축성 난류 유동으로 가정하였고 유동장과 전기장의 해석은 유한요소법을 이용하였다.

분사초기에 액적의 운동은 주로 기체의 흐름에 의해 결정되므로 노즐 출구에서 분사된 액적의 초기 속도는 분사되는 기체의 속도와

같다고 가정하여 1 m/s로 하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 용액 분사시 코로노드에 인가된 전압을 변화시켜 응고시킨 도금층의 표면을 관찰한 것이다. 사진에서 원형의 검은 반점은 강판에 부착되어 증발한 액적의 흔적을 나타낸다. 액적을 정전대전시키지 않았을 때는 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 면적에 액적이 6개 관찰되었고, 그 크기도 $20\text{-}50 \mu\text{m}$ 로 정도로 컸다. 시편이 무수히 많은 액적이 분사되는 공간 내에 위치하고 있었던 것을 고려하면 액적은 거의 부착되지 않았다고 말할 수 있다. 이는 본실험에서는 파입 흔적을 방지하기 위하여 분사압을 가능한 한 낮게 유지하였기 때문에 액적의 운동이 주로 유동에 의해 영향을 받게 되어 강판에 부착되지 못하고 대부분 비산되어 버렸기 때문이다. 정전대전 전압이 증가할수록 액적의 밀도가 증가하여

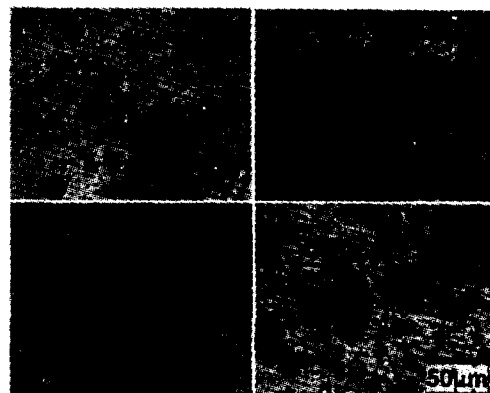


Fig.3. SEM images of droplets on galvanized coating layer, (a) 0 kV, (b) -10 kV, (c) -20 kV, (d) -40 kV

-40 kV에서는 매우 작은 액적이 표면에 많이 부착되었다. 유동에 의해 민감하게 영향을 받는 작은 액적의 부착효율이 대전 전압의 증가에 따라 향상되는 것으로 부터 수용액 분사 방법에서도 정전기 인력의 세기와 대전 전압의 높이는 밀접한 관계가 있음을 알수가 있다.

정전대전시키지 않았을 때는 도금층은 크기가 5-20 μm 인 조대한 결정립으로 구성되어 있었던 반면에 -40 kV의 고전압을 인가하면 결정립 크기가 1 μm 이하로 감소하였고 또한 조직도 균일해지는 것으로부터 정전대전에 의해 제품의 품질이 크게 향상됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 액적의 크기가 125 μm 및 200 μm 일 때 시편에 부착될 수 있는 분사 초기 위치를 계산한 것이다. 액적의 직경이 125 μm 인 경우 그 임계 분사 위치 즉 시편 부착될 수 있는 액적의 초기 위치는 노즐의 중심으로부터 0.028 m이며, 액적의 직경이 200 μm 인 경우의 임계 분사 위치는 0.038 m이었다. 이 결과는 시편의 영향에 의해 노즐로부터 분출된 기체가 시편 부근에서 폭 방향으로 흐름이 확산되었기 때문으로 분사 초기에 유체의 가장자리에 위치한 액적은 비산되어 버리며, 액적의 크기가 감소할수록 이 현상은 더욱 심해짐을 뜻한다. 계산영역 내에서의 초기 분사 폭이 0.05 m이므로 액적의 크기가 125 μm 일 때는 액적의 강판 부착효율이 최대 55 % 밖에 되지 않으며, 200 μm 일 때는

75%로 증가될 것을 예상할 수 있다. 물론 액적의 크기와 부착효율 사이의 관계는 노즐의 특성과 액적의 분사 속도에 따라 차이가 있지만 그 경향은 동일할 것이 예상된다.

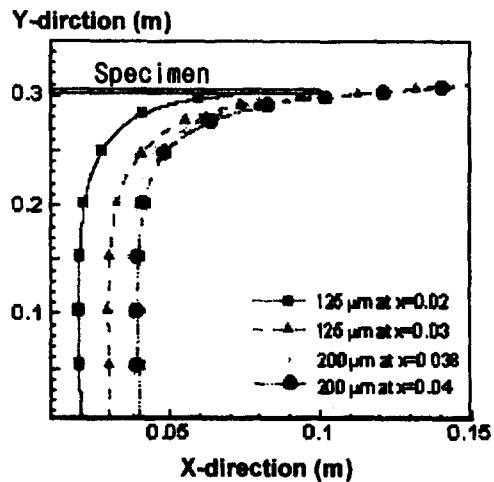


Fig.4. Particles trajectories in fluid field only due to the variation of the particle size and starting position

Fig. 5는 -40 kV로 대전할 경우에 크기가 10 μm 및 50 μm 인 액적의 운동궤적의 변화를 나타낸 것이다. x=0.03 m의 위치는 유동장만 존재할 경우 125 μm 의 큰 액적도 비산되는 조건이었지만(Fig. 4) 본 결과로부터 전기장의 효과에 의해 10 μm 의 작은 액적도 비산되지 않고 강판에 부착되는 것으로 나타났다. 또한 분사 초기에는 크기에 관계없이 운동궤적이 동일하지만 액적이 시편에 근접될수록 굴절되는 각도의 차이가 발생하였다. 굴절각은 노즐 중심부 보다 에지부에서 더 컸다. 이는 분출된 액적은 분사초기 즉 액적이 시편과 멀리 떨어져 있을 때는 유체의 유선을 따라 운동을 하게 되지만 시편에

근접될수록 폭 방향으로의 흐름이 강해지기 때문에 가장자리에 위치한 액적일수록 또한 작은 액적일수록 더 큰 영향을 받는 것을 의미한다.

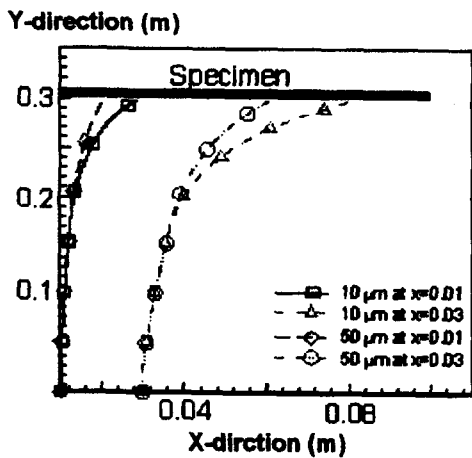


Fig. 5. Particles trajectories started at $x = 0.01$ and $x = 0.03$ in electric and fluid flow field with the variation of the particle's diameter

Fig. 6은 -40 kV로 대전시 직경이 $10 \mu\text{m}$ 인 액적의 분사 초기 위치에 따른 운동 궤적의 변화를 나타낸 것이다. 최외각에 존재하는 액적들 경우는 유선을 따라 운동하여 시편의 에지부를 벗어난 후에 전기장의 영향을 받아 다시 시편 쪽으로 운동 방향이 변하게 되어 시편에 부착되는 것으로 나타났다. 이와 같이 정전대전에 의해 시편 뒷면에 입자가 부착되는 현상을 wrap around effect⁽¹⁶⁾라 한다. 따라서 Fig. 6에서는 모든 액적이 강판에 부착되게 되어 부착효율은 100%가 되는 것으로 나타났다.

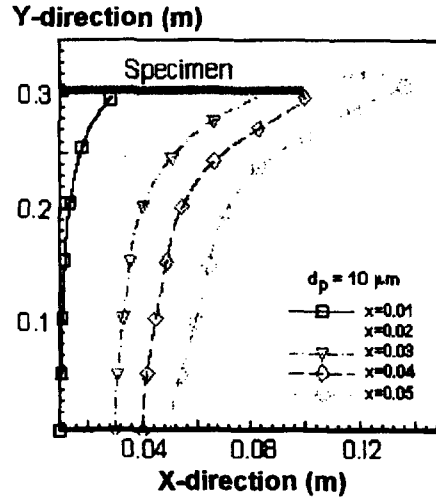


Fig. 6. Particle trajectories in fluid flow and electric field due to the variation of the starting position ($d_p=10\mu\text{m}$)

Fig. 7은 $x=0.03 \text{ m}$ 의 위치에서 분사된 직경이 $10 \mu\text{m}$ 크기의 액적의 경우 전압을 0 kV에서 -40 kV까지 변화시킬때 그 운동궤적을 나타낸 것이다. 전압의 크기가 증가할수록 폭 방향의 굴절각이 작아졌으며, wrap around 현상이 -20 kV 에서 나타나는 것으로 해석되었다. -20 kV 이하의 전압에서는 분사 액적은 유체흐름에 의한 점성력이 지배적으로 작용하여 시편에 부착되지 못하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 실제 실험을 통하여 wrap around 효과가 나타나는 전압을 조사하기 위하여 시편 뒷면을 전자현미경으로 관찰한 결과이다. 사진 중앙은 시편의 에지로 부터 2.5 mm 떨어진 위치이다. -10 kV 이하의 전압에서는 거의 부착된 액적이 관찰되지 않았으나, -20 kV 이상에서는 전압에 따라 부착된 액적의 양이

증가함을 알 수가 있다. 따라서 -20 kV이상의 전압에서 wrap around 현상이 나타나는 것을 알 수가 있으며, 이로 부터 액적과 강판과의 정전기적 인력이 유동에 의한 비산력보다 크기 위해서는 -20 kV이상의 대전전압이 필요함을 알 수가 있다.

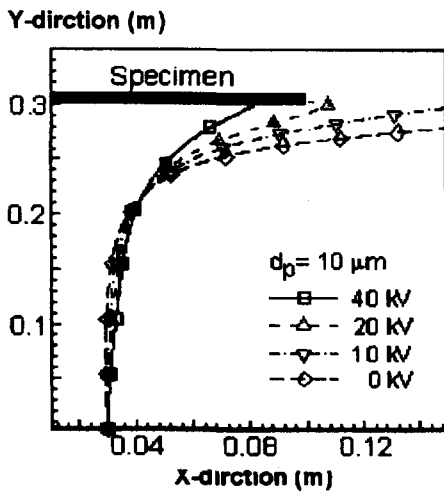


Fig.7. Particle trajectories started at $x=0.03$ in electric and fluid flow field due to the variations of the charged electric potential

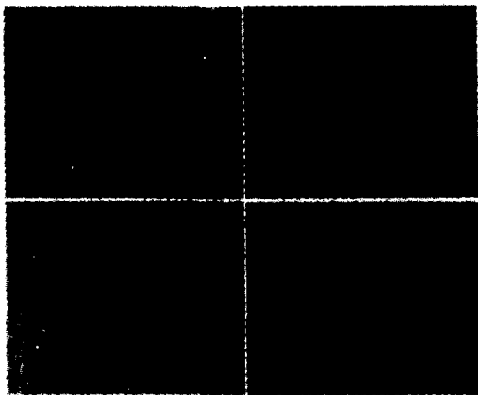


Fig.8. SEM images of droplets one the back side of samples (a) 0 kV, (b) -10 kV, (c) -20 kV, (d) -40 kV

4. 결 론

용융 아연도금층의 응고에 이용되는 수용액 분사방법에 있어서 분사된 액적을 정전대전시킬 때의 효과를 도금 실험과 수치 해석을 통하여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수용액 분사 방법에서도 정전기 인력의 세기와 대전전압의 높이는 밀접한 관계가 있어 정전 대전 전압이 증가됨에 따라 액적의 부착이 촉진된다.
2. -20 kV 이상의 전압에서는 강판과 액적과의 정전기적 인력의 작용 효과에 의해 기체의 유동에 의한 영향을 극복할 수 있음을 실험 및 수치 해석을 통하여 확인할 수 있었으며, 이로 부터 적절한 대전 전압은 -20 kV 이상으로 사료된다.
3. 액적을 정전시킬 경우 수용액 분사압력을 파임 흔적이 발생하지 않는 압력까지 낮출 수 있고 또한 작은 액적의 부착이 촉진되므로, 수용액 액적의 정전대전 방법은 균일한 조직을 갖는 미려한 도금강판 제조를 위한 새로운 도금층 응고방법으로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

1. Porter, Frank C., Zinc handbook, Marcel Dekker, Inc., 1991, pp.253-268
2. M.Chida, Y.Komiya and T. Matsuo, "Automation of a minimum spangle atomized spray system", GALVATECH '95,

- CONFERENCE PROCEEDINGS, pp.27-32
3. H.F. Graff, T.R. Roberts and D.H.Orts,
"Ultrasmooth: A Two-Side Hot-Dip Galvanized
Steel for Exposed Automotive Applications",
SAE Technical paper Series No.810140
 4. Southeng Wu, "Electrostatic Charging and
Deposition of Powder Coatings", Polym.Plasti.
Technol.Eng., Vol 7, 1976, pp.119-220, 1976
 5. 김형민, 김은필 "직교류에서 난류제트로 유입되
는 유량에 관한 고찰", 대한기계학회논문집 B권
Vol. 23, 1999, 342 - 351
 6. White, F.M. "Viscous Fluid Flow", 2nd Edition,
Mcgraw-Hill Inc. 1991
 - 7.Launder B.E. and Spalding D.B., "The
numerical computation of turburlent flow",
Vol.3, 1974, pp.209~289
 8. Rodi W. and S.K. Srivatsa, "A Locally Elliptic
Calculation Procedure for three dimensional
flow and its application to a jet in a cross flow",
Computer Methods in Applied Mechanics and
Engineering, Vol 23, 1980, pp.67~83
 9. 안강호, "정전 섬유필터 주위의 입자포집 및 거
동에 관한 수치해석적 연구", 대한기계학회논문
집 B권, Vol 21, 1997, pp.1509 - 1517, 1997
 10. Parker C. Reist, "Aerosol Science and
Technology", McGraw-Hill International
Editions, 1993
 11. Jennings, S. G., Journal of Aerosol Sci., Vol.
14, 1988
 12. Reddy, J.N. "An Introduction to the Finite
Element Method", 2nd Edition, McGraw-Hill Inc.
1993
 13. Fletcher, C.A.J. "Computational Techniques
for Fluid Dynamics", Springer-Verlag, 1990
 14. Suhas, V. "Numerical Heat Transfer and Fluid
Flow", Hemisphere Publishing Coord. 1980
 15. Abbott, M.B., and Basco, D.R.,
"Computational Fluid Dynamics", Longman
Scientific & Technical, 1989
 16. J.F. Hughes: Electrostaic powder coating,
Research Studies Press Ltd., Eng., 1984, pp.19