

정전 대전된 액적에 의한 용융 아연 도금층의 응고 방법

김상헌*, 김형민**, 정원철*, 정원섭***

* 포항제철 기술연구소, 광양압연연구그룹

** 경기대학교, 기계공학과

*** 부산대학교, 재료공학부

Solidification of Hot-Dip Galvanized Layer by Electrostatically Charged Aerosol Particles

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

* POSCO Research Laboratories, Kwangyang-Shi, 544-090, Korea

** Kyunggi University, Department of Mechanic, Suwon-Shi, 442-760, Korea

*** Pusan University, Division of Materials Science and Engineering, Pusan, 609-735, Korea

Abstract

A novel electrostatic spraying method to solidify molten zinc coating layer was studied by SEM and measurement of sample's temperature. The sprayed droplets also served as nucleation sites in the solidification reaction of molten zinc but might leave the pitting mark by impinging on its surface especially at high spray pressure. Our experimental results showed that electric field could change the sprayed particle trajectories and assist the fine droplets to attach on the surface. Thus, by reducing the spray pressure and by applying the electric voltage higher than -20 KV to charge the droplets electrostatically, we could produce the spangle free galvanized coating layer without pitting.

1. 서 론

용융아연도금강판에서 스팅글(spangle)이란 아연 특유의 결정립을 지칭하는 것으로 그 크기에 따라 레규러 재 및 제로 혹은 미니 스팅글재로 구분되어 생산된다. 양자를 구분하는 기준은 없지만 통상적으로 전자는 10 mm 이상인 경우를, 후자는 1

mm 이하인 경우를 말한다. 제로 스팅글재는 표면이 평탄하여 도장용 소재로 많이 사용된다¹⁾. 결정립의 크기를 감소시키는 방법으로는 Pb 혹은 Sb가 없는 도금욕을 사용하여 수지상정의 성장 속도를 느리게 하는 방법(Pb-less법)²⁾과 핵생성을 촉진시키기 위하여 인산염 수용액³⁾ 혹은 아연 분말을 분사하는 방법⁴⁾ 등이 있다. 용액 분사방법에서

는 통상적으로 용액을 기체에 의해 미립화하여 분무하는 2-유체 노즐을 사용하며, 최적의 품질을 얻기 위해 분사압, 분사각도, 분사 거리등을 조절하지만 분사노즐의 특성상 액적의 균일 분사 및 부착에 한계가 있다.

미립자 혹은 액적의 정전대전 부착 기술은 정전기를 띤 입자와 어스(earth)된 물체 사이에 작용하는 전기적 인력을 이용하는 것으로 전기집진, 분체 도장 분야 및 강판제조 공정에 있어서는 방청유를 도포하는 도유공정(oiler)에 이용되고 있다⁵⁾. 용융도금의 결정립 크기 제어를 위한 수용액 분사 방법에 정전대전 기술을 이용하고자 하는 연구는 수행되지 않았고, 기존에 적용되어 온 분야와는 달리 피부착 물체인 강판과 분위기와의 온도 차이가 400 °C 정도로 크고, 또한 수용액 액적의 유전율이 오일, 도료 및 분진과 차이가 있다. 그러나 인가 전압의 크기, 대전전극의 형상에 의해 액적의 부착효율 및 균일성 조절이 가능한 것⁶⁾을 고려하면 정전대전 기술은 새로운 결정립 제어 방법으로 고려할 충분한 가치가 있다고 생각된다.

이러한 이유로 본 연구는 기존의 2-유체 분사노즐의 적용상의 문제점을 파악하고 2-유체 분사노즐로 부터 분사된 액적을 정전대전시킬 때 부착이 촉진되는 효과를 전자 현미경을 이용한 강판 표면의 액적 부착 흔적 관찰과 강판의 냉각곡선 측정을 통하여 조사하였다.

2. 실험방법

상업적으로 생산된 두께 0.8 mm의 용융도금 강판을 가로 10 cm, 세로 20 cm로 절단하여 도금에 사용하였으며 실험에 사용한 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 온도가 460 °C인 용융 아연 포트에 시편을 30초간 침적하여 강판에 부착되어 있던 기존의 도금층을 완전히 재용해시킨 후에 새로운 용융 아연이 강판에 부착된 상태로 꺼낸 후, 중량비로 2% 인산암모늄 수용액을 시편 표면에 분사하여

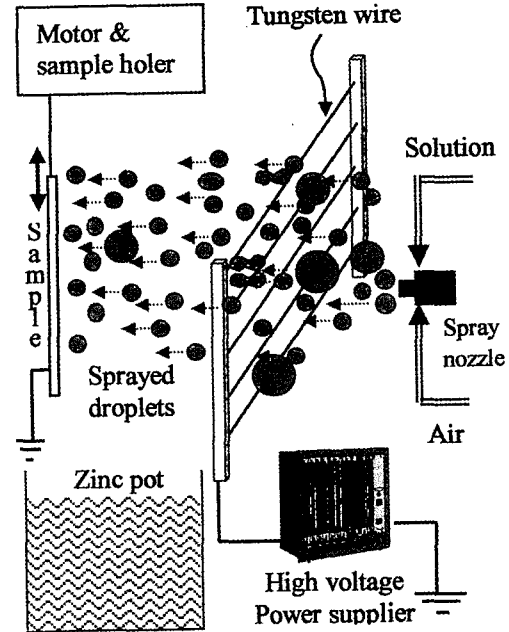


Fig. 1. Drawing of an apparatus for galvanizing and spraying test.

도금층을 용고시켰다⁷⁾. 도금 욕의 성분은 안티몬(Sb)이 0.07%, 알루미늄(Al)이 0.17%이고 나머지는 아연(Zn)인 조성을 갖고 있었다. 실험에 사용한 분사 장치는 Spray System 사(미국)의 AutoJet®용액 분사 시스템(노즐 번호: 13A)을 사용하였고, 강판의 한쪽 면에만 분사하였다. 이때 분사조건은 표 1과 같다. 조건 "A"는 본 실험의 기본 조건으로 분사된 액적을 정전대전시키는 실험을 할 때는 이 조건으로 고정하였다. 조건 "B"는 "A" 보다 노즐이 강판에 근접된 조건에서 고압으로 분사한 조건으로서 기존 분사조건에 문제점을 파악하는데 이용하였다.

Table 1. Spray test conditions.

	Pressure (kg/cm ²)		Spray angle (degree)	Spray Distance (cm)
	liquid	Air		
A	0.8	1.2	30	40
B	2	3	90	12

분사된 액적은 다음과 같은 방법으로 정전대전 시켰다. 노즐 출구와 시편과의 거리는 40 cm로 하였으며, 노즐의 분사 각도는 강판을 향해 약 30° 정도 아래로 경사지게 하였다. 대전전극은 노즐 출구로부터 10 cm 떨어진 위치에 강판과 마주 보게 설치하였다. 대전전극은 폭이 15 cm, 길이가 25 cm, 두께가 2 cm인 문틀 모양의 프레임에 직경이 0.25 mm 인 텅스텐 와이어를 3 mm 간격으로 수직으로 다수 설치하였고, 노즐로부터 분사된 액적이 대전전극의 텅스텐 망을 통과한 후에 강판에 부착되도록 하였다. 이때 고전압 발생기의 전압을 조정하여 대전전극에 인가되는 전압을 조정하였다. 본 실험에서 대전전극에 인가된 전기 극성은 (-)였으며, 이때 (+)극성은 어스된 강판과 그라운드를 통해 연결되어 있다.

강판의 온도는 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 강판에 직경이 1 mm인 작은 구멍을 드릴로 뚫고, 열전대를 시편 뒤로부터 이 구멍을 통해 앞으로 0.5 mm 정도 나오게 삽입한 후에 구부러 강판에 전기 스팟 용접하고, 그 상태로 도금하면서 연속적으로 강판 온도를 측정하였다. 도금된 시편은 전자현미경으로 액적 부착상태를 조사하였다

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 도금욕에서 시편을 꺼낸 후 자연 냉각시킬 때 시간에 따른 강판의 온도변화를 측정된 것이다. 강판은 419 °C 까지 일정한 속도로 냉각된 후 일정한 온도가 유지되고 응고가 완료되면 다시 온도가 감소하였다. 이 일정 온도 구간은 응고잠열의 발생에 기인한 것이므로 Sb를 0.07 % 첨가할 때 2~4 °C 정도의 도금층 과냉이 발생하며, 응고는 419 °C에서 415 °C의 강판 온도 범위에서 일어나는 것을 알 수 있다.

용액을 분사할 때의 강판 온도와 도금층 외관과의 상관성을 조사하기 위하여 강판온도가 아연의 응고온도인 419 °C 보다 높은 경우와 낮은 경우에

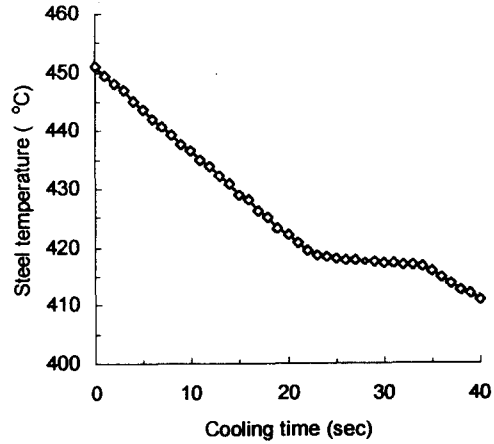


Fig. 2. Cooling curve of a galvanized steel sheet under natural cooling condition.

대하여 스팅글 크기를 조사하였다 (Table 2). 가능한 한 액적을 강판에 많이 부착시키기 위하여 표 1의 "B" 조건으로 용액을 분사하였는데 이는 용액 압과 공기압이 각각 2 kg/cm², 3 kg/cm²으로 고압이고, 노즐과 강판과의 거리도 12 cm로 가까운 조건이다. 강판온도가 421 °C 일때 분사를 시작하여 418 °C에서 분사를 종료한 경우 도금 결정립의 크기가 1 mm 이하였다. 분사종료시의 강판온도 418 °C는 Fig. 1로부터 응고가 완전히 끝나지 않은 상태임을 알 수 있고, 육안 관찰에서도 분사가 종료되었을 때 도금층 표면은 반응용 상태였다. 도금층 표층부가 완전 응고될 때는 용액이 분사되지 않았음에도 불구하고 결정립의 크기가 감소되는 것은 주목할만 하다. 418 °C에서 분사를 시작하였을 때는 결정립의 크기가 10 mm 이상인 레귤러 스팅글재가 형성되었다. 이때 분사가 끝났을

Table 2. Spray test conditions.

Steel Temperature (°C)		Grain size
Start	Finish	
422	418	< 1mm (Zero spangle)
418	416	10~15mm (Regular spangle)

때는 시편 온도가 416 °C였고 도금층은 완전히 응고되어 있었다. 이상으로 부터 용액 분사를 시작할 때의 강판 온도가 결정립의 크기와 밀접한 관계가 있고, 따라서 응고가 시작할 때의 분사조건이 매우 중요하다고 사료된다.

용융도금에서 수용액 분사의 목적은 강판 냉각과 인위적인 응고 핵 부여이다. 전자는 액적 중의 수분 증발과 인산암모늄이 열에 의해 HPO_4 (Metaphosphoric acid) 혹은 P_2O_5 (Phosphorous pentoxide)로 분해될 때 얻어지는 흡열 효과에 의하며⁸⁾, 후자는 표면에 잔존한 인산 화합물에 의한다. 일반적으로 응고조직의 크기는 핵생성 속도와 성장 속도에 의해 결정되며, Sb가 첨가된 도금층에서는 수지상정이 빠르게 성장하기 때문에 응고 초기에 스팅글의 골격이 형성되는 것을 고려하면¹²⁾ 결정립의 크기는 응고 초기의 응고 핵의 밀도(=단위 면적 당 응고핵의 갯수)와 직접 관련이 있고 제로 스팅글재를 얻기 위해서는 응고 핵의 밀도가 높아야 한다. Table 2의 결과가 액적이 강판에 많이 부착될 수 있는 분사 조건에서 얻어진 것을 고려하면 421 °C에서는 액적이 응고핵으로 작용하였지만 418 °C에서는 응고핵으로 작용하지 못한 것을 의미한다. 이러한 현상에 대한 원인은 다음과 같다고 추정된다.

도금층의 두께는 10~25 μm 로 얇고, 용융 아연의 열 전도도는 57.7 J/(m·s·K)로 크기 때문에¹³⁾ 강제 냉각시 도금층 표면과 강판/도금층 계면 사이의 온도 차이는 1 °C 이하로 거의 동일하다¹¹⁾. 따라서 용액 분사를 시작하였을 때의 도금층과 강판과의 계면온도는 도금층 표면온도와 거의 동일하였을 것으로 추정된다. 아연의 평형응고온도가 419.6 °C이며, 도금층/강판 계면이 응고 핵이 생성되기가 가장 용이한 장소인 것을 고려할때⁹⁾ 강판 온도 418 °C에서는 용액 분사전에 이미 응고핵이 도금층과 강판 계면에 형성되었을 가능성이 높다. 용액 분사에 의한 냉각효과는 도금층 표면과 계면에서 거의 동일하므로 용액 분사에 의해 이미 생

성되어 있던 응고핵의 성장이 촉진될 수 있다. 또한 조대한 결정립이 생성된 것으로부터 응고 핵의 밀도는 높지 않았을 것으로 추정되지만, 이에 대해서는 더욱 연구가 필요하다. 반면에 421 °C에서 용액을 분사하였을 경우에는 계면에서 응고 핵이 형성되기 전에 표면에 부착된 액적이 응고 핵으로 작용하였고, 이때 부착된 액적의 밀도가 높아 수지 상정의 성장이 극히 제한된 범위(약 1mm 이하) 밖에 일어나지 못하였으므로 스팅글의 형태를 나타내지 못한 것으로 사료된다.

이상을 고려하면 Sb 첨가욕에서 결정립의 크기를 작게 하기 위해서는 응고핵의 밀도를 증가시키는 것이 필요하다. 강판과의 계면은 도금층 표면에 대해 핵생성 장소로 상호 경쟁관계에 있으며 강판과의 계면에서의 핵 생성을 인위적으로 조작하는 것이 현실적으로 불가능하므로 도금층 표면에 액적을 가능한 한 균일하고 많이 부착시켜 응고 핵의 밀도를 높여야 한다. 또한 계면에 응고핵이 생성되어 있으면 액적에 의한 핵생성 효과 보다는 냉각효과에 의해 응고 핵의 성장이 일어나서 결정립의 크기가 증가하므로, 강판온도가 아연의 평형 응고온도인 419 °C 이상 즉 도금층이 완전히 용융상태일 때 용액을 분사하여야 한다.

Fig. 3은 시편의 온도가 421 °C일 때 조건 "B"로 수용액을 분사하여 응고시킨 도금층의 표면을

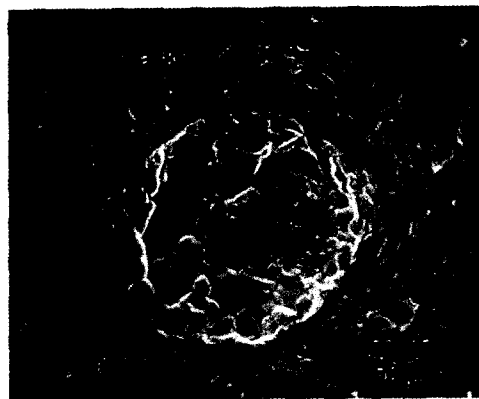


Fig. 3. Galvanized coating layer solidified by high pressurized aerosol particles.

관찰한 사진이다. 사진에서 작은 검은색의 원형 반점은 도금층에 부착된 액적의 흔적을 나타낸다. 수용액 액적의 핵 생성 효과에 의해 응고조직은 크기가 30~100 μm 로 매우 미세하였다. 사진의 중앙부에 있는 큰 분화구 모양의 파임은 도금층이 용융 상태일 때 큰 액적이 충돌하여 발생된 파임 흔적(피팅마크)으로써, 이는 평형 응고 온도에서의 용융아연의 점도가 3.85 mNsm^{-2} 로 낮아¹³⁾ 외부 충격에 의해 쉽게 변형되기 때문으로 사료된다. 이것을 방지하기 위해서는 액적의 충돌압을 낮춤과 동시에 액적을 미립화시켜 액적의 운동량을 감소시켜야 한다. 그러나 2-유체 분사노즐의 특성상 미립화를 위해서는 공기압을 증가시켜야 하는 점을 고려하면 양자를 모두 만족시키는 것은 곤란하다.

Fig. 4는 저압인 조건 "A" 하에서 대전전극에 인가되는 전압을 변화시킬 때 도금층의 표면에 부착된 액적의 모습을 전자현미경으로 관찰한 것으로, 용액 분사 시작시의 강판 온도는 421°C 이었다. 사진에서 검은 반점은 부착된 액적을 나타내며 모든 경우에서 피팅 마크는 관찰되지 않았다. 시편이 없는 상태에서 용액을 분사할 때 분사 도달 거리는 100 cm 이상이었고, 시편과 노즐과의 거리가 40 cm인 것을 고려하면 용액이 분사되는

공간 내에 시편이 위치해 있었음에도 불구하고 정전대전시키지 않았을 때는 직경이 20 μm 이상의 큰 액적만이 표면에 부착되었고, 또한 액적의 부착효율도 매우 낮았다. 정전대전 전압이 증가할수록 액적의 부착 밀도가 증가하며 특히 작은 액적의 부착이 많아지는 것으로 부터, 정전대전에 의해 액적의 부착이 촉진되는 것을 알수가 있다. -40 kV의 고전압을 인가하였을 때의 결정립 크기는 1 μm 이하 였고, 정전대전 시키지 않을 때는 레귤러 스팅글 재가 제조되었다.

Fig. 5는 Fig. 4의 (a) 및 (d) 시편의 온도 변화를 측정한 것이다. 대전전극에 -40 kV의 전압을 인가하였을 경우 강판이 더욱 빨리 냉각되어 응고시간이 단축됨을 알 수가 있으며, 이는 강판에 부착된 액적의 양이 증가한데 기인한 것으로 사료된다.

이상과 같이 Fig. 4와 Fig. 5의 결과에서 시편이 용액 분사 범위 내에 있었음에도 불구하고 고전압을 인가하지 않았을 경우에 액적의 부착효율이 낮은 것은 강판 표면 부근에 부착을 방해하는 저항력이 존재하는 것을 의미한다. 또한 작은 액적들은 부착되지 못하고 큰 액적들만 주로 부착되는 현상으로 부터 이 저항력을 극복하기 위해서는 강판을 향한 액적의 운동량은 일정 크기 이상이어야 함을 알 수가 있다. 이 저항력은 분사된 유체가

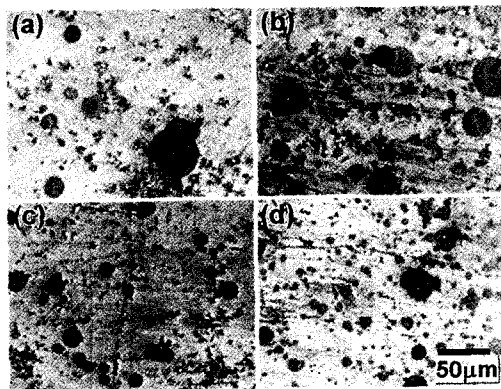


Fig. 4. SEM images of droplets on galvanized coating layer, (a) 0kV, (b) -10kV, (c) -20kV, (d) -40kV.

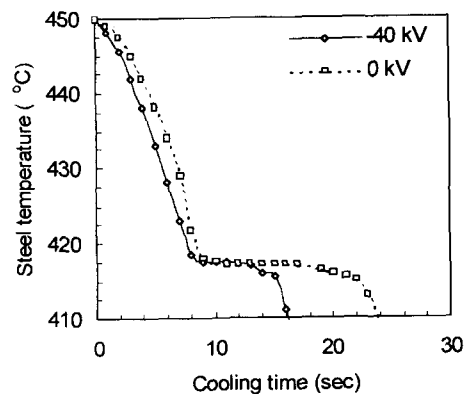


Fig. 5. Cooling curves of sample at low spray pressures.

시편에 충돌할 때 중심부와 엣지부에서의 압력차이에 의해 발생하는 와류와 강판 표면부근에 형성되어 있는 상승기류의 영향이 복합된 것으로 생각할 수 있다. 후자는 용융도금 공정의 특성에서 비롯된 것으로 뜨거운 강판에 의해 강판 표면 부근의 공기가 더워져서 발생하는 대류 현상에 기인한다. 용액의 분사압이 낮아질수록 폭방향 와류 영향은 감소되고, 상승기류의 영향은 증가될 것을 예상할 수 있다.

이러한 상승기류에 의한 영향을 확인하기 위하여 Fig. 6에서 450, 460, 470, 480, 490 °C의 온도를 갖는 강판에 용액을 분사할 때 냉각속도를 측정하였다. 이때 -40 kV의 고전압을 인가한 경우와 인가하지 않은 경우로 나누어 실험하므로써 정전대전력의 효과도 함께 조사하였다. 470 °C까지는 고전압 인가 여부에 관계없이 강판 온도가 높을수록 냉각속도가 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 강판의 온도가 증가할수록 주위 환경과의 온도 차이가 커져서 강판으로부터 외부로 방출되는 열량이 증가되는 당연한 결과이다. 이때 냉각속도는 정전대전시켰을 때가 1 °C/sec 빨랐고 이는 정전대전에 의해 액적의 부착량이 증가하여 액적에 포함된 수분의 증발 및 인산염의 분해시 흡열반응에 의해 냉각효과가 증가하였기 때문으로 사료된다. 그러나 고전압 인가시 강판 온도가 470 °C 이

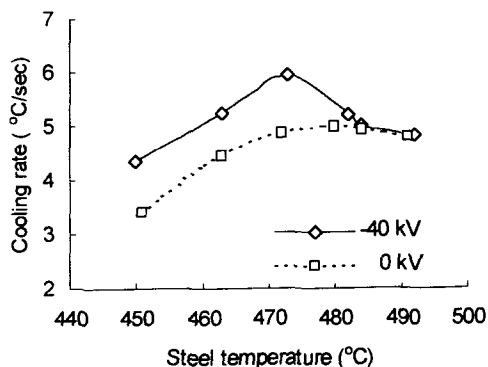


Fig. 6. Effects of steel temperature just before spraying on cooling rate.

상인 조건에서는 온도에 따라 오히려 냉각속도가 감소하여 490 °C에서는 고전압을 인가시키지 않았을 때와 거의 동일한 냉각속도를 나타내었다. 이것은 부착된 액적의 양이 강판 온도가 증가함에 따라 감소하여, 490 °C의 강판에서는 거의 정전대전력의 효과가 없어졌음을 의미한다. 강판의 온도가 증가할수록 강판 표면에 형성되는 상승기류가 세어지는 것을 고려하면, 490 °C가 되면 저항력의 세기가 -40 kV 고전압 인가시 액적이 갖는 강판과의 정전기적 인력 보다 커지게 되어 고전압 인가 효과가 나타나지 못하는 것으로 추정된다. 이상의 결과로부터 용융도금공정에서는 공정상의 특성에 기인하여 기존의 분체도장 혹은 방청유를 도포하는 오일러 공정에서 보다 액적과 강판과의 정전기적 인력은 더 커야 함을 알 수가 있다.

정전대전에 의해 액적이 강판에 부착되려는 힘은 액적이 갖게 되는 전하량 및 전기장의 세기에 의해 결정되며, 액적이 갖는 최대 전하량의 크기는 액적의 유전율, 액적의 크기와 전기장의 세기에 의해서만 결정된다¹⁴⁾. 기존에 정전대전 기술이 적용되어 온 분체 도장 혹은 방청유 도포의 경우와 본 연구를 비교하면 수용액의 유전율은 이들보다 훨씬 크므로 수용액 액적은 동일한 전계에서 더 큰 전하량을 갖을 것으로 사료되어 액적과 강판과의 정전대전 인력도 더욱 클 것이 예상된다. 그러나 용융 도금 공정에서는 앞서 언급하였듯이 저항력이 존재하여 기존의 정전기 이용 분야보다 더 큰 정전기 인력이 필요할 것으로 추정된다. 주어진 도금 조건에서 이를 얻기 위한 최소 인가 전압을 결정하기 위해서는 전압에 따른 정전기력의 변화에 대한 검토가 필요하다. 그러나 이를 정량적으로 검토하는 것은 매우 어려우므로 Fig. 7의 실험과 같이 wrap around 현상¹⁶⁾을 관찰하는 등의 간접적인 측정 방법이 많이 사용된다.

Fig. 7은 온도가 421 °C인 강판 전면에 용액을 분사할 때 시편 뒷면을 전자현미경으로 관찰한 결과로서 사진 중앙은 시편의 edge로부터 2.5 mm 떨

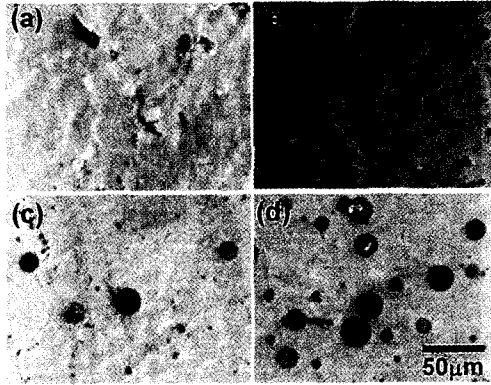


Fig. 7. SEM images of drops on the back side of samples, (a) 0KV, (b) -10KV, (c) -20KV, (d) -40KV.

어진 위치이다. -10 kV 이하의 전압에서는 거의 부착된 액적이 관찰되지 않았으나, -20 kV 이상에서는 전압에 따라 부착된 액적의 양이 증가함을 알 수가 있다. 강판 전면을 향해 분사된 액적이 시편의 뒷면에 부착되는 것은 순수하게 정전기적 인력에 의한 것이다. 즉, 강판에 부착되지 못하고 비산되었던 액적이 강판과 대전전극사이에 형성된 전기장에 의해 다시 강판쪽으로 이끌리게 되는 wrap around 현상에 기인한다¹⁶⁾. 이 결과로부터 용융 도금공정에서 정전 대전기술을 적용하는 데는 -20 kV 이상의 고전압이 필요하다고 사료된다.

이상의 결과로부터 정전대전된 액적을 이용하여 용융아연도금층을 응고시키는 방법에 대하여 고찰하면 다음과 같다.

통상적으로 외부로부터 응고 site가 부여되지 않는 경우의 응고반응은 강판과 도금층 계면에서 시작되고, 강판의 열이 외부로 방출됨에 따라 도금층 표면을 향해 응고가 진행된다. 따라서 강판 온도가 419 °C 이하 즉, 응고가 시작된 이후에 용액을 분사하면 이미 생성된 응고 핵의 성장만을 촉진시키기 쉬우며, 이러한 현상은 수지상정의 성장속도가 빠른 도금층일수록 뚜렷해 질 것으로 생각된다. 따라서 이를 방지하기 위해서는 강판의 온도가 아연의 평형 응고온도인 419 °C 이상일 때

용액을 분사해야 하며, 이때 피팅 마크를 방지하기 위해서는 분사압을 낮추어 액적들의 운동량을 감소시켜야 한다. 또한 결정립의 크기는 응고 직전에 강판에 부착된 액적의 부착밀도와 직접 관련이 있으므로 작은 크기의 액적들을 강판 표면에 부착시키는 것이 유리하다. 이러한 조건들은 기존의 2-유체 분사노즐을 이용하여 노즐과 강판과의 거리를 멀게 한 상태에서 가능한 한 저압으로 분사하고, 이때 고전압을 인가하여 액적들을 정전대전시켜서 강판과 액적 사이에 정전기적 인력에 의해 강판에 부착시키면 피팅 마크 발생없이 제로스판글 용융아연도금강판의 제조가 가능하다.

4. 결 론

1) 용융 아연 도금의 결정립 크기 제어 방법들 중의 하나인 수용액 분사방법에 있어서 도금층 표면에 부착된 액적이 응고 핵으로 작용하기 위해서는 용액 분사시 강판의 온도는 아연의 평형 응고 온도인 419 °C 이상이어야 하지만 이때 액적의 충돌에 의해 도금층 표면에 파임 흠의 발생하는 문제점이 있다.

2) 분사된 수용액에 고전압을 인가하면 대전된 액적과 강판사이에 정전기적 인력이 작용하여 부착 효율이 향상되는 현상이 관찰되었으며, 특히 작은 크기의 액적에서 뚜렷한 효과가 나타났다. 이 현상을 이용하면 액적에 의한 파임 흠이 나타나지 않는 압력까지 분사압력을 낮추는 것이 가능하여 미려한 외관을 갖는 제로스판글재의 제조가 가능하였다.

3) 용융도금의 응고에 정전 대전기술을 적용하는데 있어서 가열된 강판 표면에 존재하는 대류현상이 액적의 부착을 방해하지만 인가 전압에 따라 정전대전 효과는 향상되어 - 20 kV 이상의 인가전압에서는 이를 충분히 극복할 수 있음을 wrap around 현상 관찰로부터 알수 있었다.

참 고 문 헌

1. Ram S. Patil, Gary W. Henger and Raymond J. Glatthorn, SAE Technical Paper, No 840211, '84
2. 中森俊夫, 涉谷郭義, CAMP-ISIJ, 1 (1088), 1625
3. 橋本孝夫, 石原晴彦, CAMP-ISIJ, 3 (1990) 1575
4. M. Hoetzle, Iron and Steel Engineer, 31 (1985), 31
5. A.D. Moore : Electrostatics and its applications, John Wiley & Sons, Inc., New York, (1973), 250
6. Souheng Wu, Polym. -Plast. Technol. Eng., 7 (1976), 119
7. F.A. Fasoyinu : Doctoral thesis, The University of British Columbia, Vancouver, (1989), 59
8. E.V. Margulis : Zh. Neorg. Khim., 14, 1969, pp. 2950
9. I. Cameron and G.J. Harvey, Proceedings 8th Inter. Hot Dip Galvanizing Conf. London, 1967", edited by Zinc Development Association, London (1967), p86
10. Yong-Wu Kim and Ram S. Patil, Proceedings 1th Inter. Conf. On Zinc Coated Steel Sheet, edited by Zinc Development Association, London, (1985), D/1
11. J. Strutzenberger and J. Faderl, Metall. And Mat. Trans. A, 29 (1998), 631
12. F.A. Fasoyinu : Doctoral thesis, The University of British Columbia, Vancouver, (1989), 179
13. Smithells Colin James : Smithells metals reference book, 6th ed., Butterworth & Co. Ltd., 1983, p14-8
14. M.M. Pauthenier and M. Moreau-Hanot, J. Phys. Radium, 3, 590 (1932)
15. J.F. Hughes : Electrostatic powder coating, Research Studies Press Ltd., England, (1984), 19