

## 고강도 용융아연 도금강판의 파우더링 특성에 미치는 실리콘 및 합금화 열처리의 영향

이호중, 오용택, 김종상\*

순천대학교 공과대학 재료금속공학과  
\*포항제철 기술연구소

## Effect of Silicon in Steels and Galvannealing Heat Cycles on Powdering Behavior of High Strength Galvannealed Steels

H. J. Lee, Y. T. O and J. S. Kim

Dept. of Materials Science and Metallurgical Eng., Suncheon National University  
\*Technical Research Labs., POSCO

### Abstract

Hot-dip galvanized sheet (GA) with high strength of 45kg/mm<sup>2</sup> in tensile strength, has developed for automotive applications. However, for a successful application, the powdering behaviour of GA must be minimized. The powdering of galvanized coatings was reduced as the silicon content in the steel increased. Rapid heating and rapid cooling rate during the galvannealing process improved the powdering resistance due to the suppression of not only the  $\zeta$  phase, but also the  $\Gamma_1$  phase. An analysis of the Fe-Zn alloy phases and its relation to the powdering behaviour are discussed with SEM micrographs.

### 1. 서 론

지구온난화와 환경문제가 대두되면서 자동차의 연비 향상을 위한 노력이 한층 더 박차를 가하고 있다. 특히 1992년에 발효된 CAFE(Corporative Average Economy)법안, 신 대기 정화법, 기후협약 등은 보다 높은 연비의 자동차 개발을 요구하고 있다. 자동차 경량화 대책의 하나로서 강판의 고강도화에 의한 자동차의 무게감소가 효과적이기

때문에 자동차 차체용 고강도 용융아연 도금강판의 수요가 증가하고 있다. 최근 국제연·아연협회(ILZRO)에서 조사한 결과에 의하면<sup>1)</sup> 향후 2005년까지 약 11~15%의 자동차 경량화가 예상되며, 그 중 고장력강을 사용함에 따른 약 1/3정도의 무게감소가 기대되고 있다. 특히 자동차 차체의 경량화와 방청성 측면에서 심가공성 고장력 강판을 모재로 하는 합금화 용융아연 도금강판(Galvannealed steels : GA)의 개발이 진행되고 있다.

GA강판은 전기아연 도금강판에 비해 값싼 가격에 두꺼운 도금층이 가능한 특징을 갖고 있다. 그러나 자동차용 GA강판은 패널 제작시 높은 압축응력을 받는 조건에서 가공을 받을 때 도금층이 분말형태로 탈락되는 파우더링(Powdering)이 가장 큰 문제점으로 나타났다. 따라서 GA강판의 내 파우더링성(Powdering resistance) 향상을 위해서는 도금층 중의 가장 취약한 합금상인  $\Gamma_1$ 상의 두께를 최대한 작게 하는 것이 필요하다. 반면 도금층이 전단응력에 의해 비늘형태로 탈락되는 플래킹(Flaking)은 도금층 중의  $\zeta$ 상이 두꺼울수록 열화되므로, 프레스 가공측면에서  $\zeta$  및  $\Gamma_1$ 상은 가능한 얇게하고 가공성이 양호한  $\delta$ 상을 극대화시키는 것이 매우 중요하다.

GA도금층의 파우더링성에 영향을 미치는 인자로서는 강성분<sup>2-3)</sup>, 합금화 열처리조건<sup>4)</sup> 및 도금속 성분<sup>5)</sup> 등이 있다. 특히 인장강도 35kg/mm<sup>2</sup>급 이상의 고강도 GA재는 기계적 성질을 확보하기 위해 첨가되는 Ti, Nb, P, Si등의 강성분 때문에 불균일 합금화반응이 발생한다<sup>6)</sup>. 따라서 연속소둔후 용융도금 및 합금화처리가 연속적으로 이루어지는 CGL(Continuous galvanizing line)의 경우 합금화 처리조건이 제한되는 제조상의 어려움이 있다. 특히 Si는 강의 연성을 크게 감소시키지 않고 강도를 크게 향상시키는 효과가 있어, Si함유강은 고강도 구조용강 및 자동차용 가공용, 고장력강의 용융아연 도금소재로 사용이 유망하다. 최근 Si가 0.25%함유된 인장강도 45kg/mm<sup>2</sup>급 심가공용 고강도 GA강판은 자동차의 보강재(Reinforcement)로 개발되었으나, 강에 0.2%이상의 Si첨가는 도금전 소둔 열처리 중에 Si의 표면농화가 발생하여 도금 밀착성을 크게 열화시키는 문제점이 나타났다. 최근 Si함유강의 도금밀착성을 개선하기 위한 연구는 많이 수행되어 왔으나<sup>7-9)</sup>, Si함유강의 파우더링 특성에 대한 연구는 미흡한 상태에 있다. 또한 Si함유강의 합금화 열처리 과정에서 가열속도, 냉각속도 및 합금화 온도에 따른 파우더링 특성에

대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 Si이 일부 함유된 45kg/mm<sup>2</sup>급의 고강도강을 개발하기 위해 Si함량에 따른 기계적 성질과 합금화 열처리시 강성분 및 합금화변수에 따른 도금층의 파우더링성을 평가하였으며, 각각의 합금상 두께를 주사전자 현미경(SEM))으로 관찰하여 상관성을 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 시편준비

합금화 용융도금 및 소둔 열처리시험에 사용된 시편은 진공유도로에서 용해하고 35mm로 연삭한 후, 실험용 압연기에서 균질화를 위한 재가열후 열간압연을 행하여 3.2mm두께의 열연 판을 얻었다. 1200℃에서 1시간 재가열처리한 후 마무리압연은 Ar<sub>3</sub>온도인 890℃이상으로 하였으며, 열간압연이 끝난 소재는 620℃에서 1시간 유지후 로냉하여 권취조건을 재현하였다. 열간압연된 시편은 염산으로 산세하여 표면의 산화스케일을 제거한 다음 냉간압연하여 0.8mm두께의 냉연판을 제조하였다. 강의 Si 함량과 합금화 처리조건에 따른 합금화 특성을 관찰하기 위하여 침입형 원소가 없는 극저interstitial-free (IF) 재를 기저(base)로 하고, 0.01%Si, 0.10%Si 및 0.25%Si를 각각 첨가하여 제조하였으며, 강의 화학성분은 Table 1에 나타내었다.

### 2.2. 연속소둔 열처리실험

강의 Si함량에 따른 연속소둔 열처리실험은 적외선 반사가열식 분위기로 (Image Gold Furnace,

Table 1. Chemical composition of cold rolled steels(wt %)

Specimen	C	Si	Mn	P	Ti	Nb
A1	0.004	0.01	1.04	0.10	0.045	0.010
A2	0.004	0.10	1.03	0.10	0.046	0.010
A3	0.004	0.25	1.05	0.10	0.047	-

ULVAC, model CCT-Y8)에서 질소분위기 하에서 행하였다. 연속소둔 열처리에는 CGL 연속소둔 cycle을 감안하여 소둔시간은 64초로 하고, 소둔온도를 740~820°C로 변화시켰다. 이때 예열대에서의 승온속도는 15°C/s, 예열대에서 가열대까지의 승온속도는 1.2°C/s, 도금후 냉각속도는 20°C/s로 180°C까지 냉각한 후 공냉처리하였다.

### 2. 3. 용융도금 및 합금화 열처리실험

상기 소재를 100mm×200mm의 크기로 절단하여 전처리로 아세톤과 에틸알코올로 강표면을 탈지하여 표면청정을 하였다. 연속소둔 열처리후 용융도금 및 합금화 열처리에는 일본 Rhesca사에서 제작된 수직형 용융도금 simulator에서 연속적으로 실시하였으며 이때 도금조건은 Table 2와 같다. 합금화처리 변수로서 Fig. 1에 개략적으로 나타낸 바와 같이 합금화 처리온도를 480~560°C로 변화시켰으며 합금화 처리시간은 15초로 고정하였다. 또한 합금화처리시 가열속도는 10~60°C/s로, 합금화처리후 냉각속도는 10~50°C/s로 변화시켰다.

### 2. 4. 합금층 특성평가

GA도금층의 파우더링 평가는 일반적으로 행해지고 있는 60° 굽힘시험후 비닐테이프를 부착하여 도금층이 떨어지는 정도를 5단계로 상대 평가하였다. 파우더링등급 1은 도금층이 전혀 탈락되지 않은 것을 말하며, 2등급까지를 양호한 수준으로 판정하고

Table 2. Variables of hot-dip galvanizing experiments

환원성 분위기	15%H <sub>2</sub> -85%N <sub>2</sub>
소둔조건	800°C×64s
도금욕 온도	460°C
도금욕 침적시간	3s
도금부착량	60g/m <sup>2</sup>
도금욕 조성	Al : 0.135%, Fe : 0.03%, Pb : 0.007%

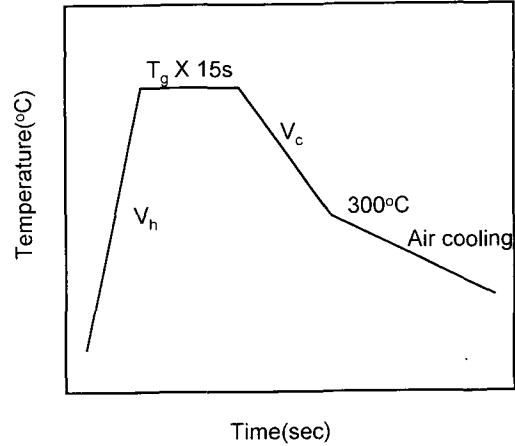


Fig. 1. Heat cycle pattern for galvannealing heat-treatment

있다. 또한 박판성형 시험기를 사용하여 컵성형시험(Cupping test)을 실시하고 무게감량을 측정하여 정량적으로 파우더링량을 측정하였다.

강종과 합금화 열처리조건에 따른 도금 시편의 표면 및 단면조직을 SEM으로 관찰하였다. 도금층내의 Fe-Zn 합금상인  $\zeta$ ,  $\delta_1$  및  $\Gamma_1$ 상의 두께는 도금층을 에칭한 후 SEM으로 측정하였다. 또한 합금층내의 Fe함량은 염산과 물을 1:3으로 혼합한 후 부식억제제로 hexamine을 1~2 방울 첨가한 용액으로 합금층을 용해하여 ICP로 분석하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3. 1. 기계적 성질에 미치는 Si의 영향

Table 1의 강종을 대상으로 소둔온도를 740~820°C, 소둔시간을 64초로 하여 연속소둔후 인장강도를 측정된 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 소둔온도가 증가함에 따라 인장강도는 감소하였으며, 소둔온도가 740~760°C일 때 목표재질인 인장강도 45kg/mm<sup>2</sup> 이상을 얻었으며, 연신율도 31~35%를 나타내었다. 특히 Si가 0.1%인 A2강종의 경우 Si가 0.25%인 강종 A3와 유사한 기계적 성질을

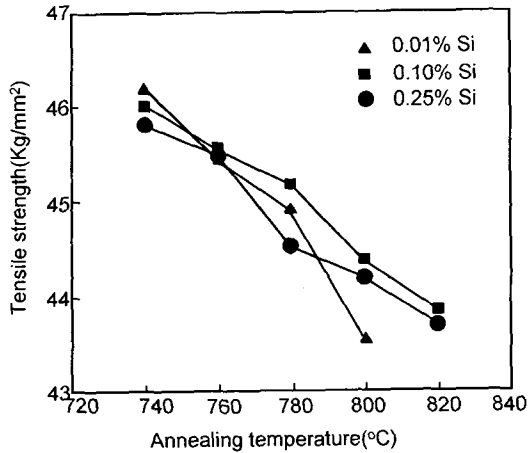


Fig. 2. Effect of Si content in steel on tensile strength as a function of annealing temperature

나타내었다. Si가 0.01%인 A1강종의 경우, Nb를 복합첨가(0.01%) 하고 기타 성분은 기존 강종과 동일하게 한 결과, 연신율은 다소 떨어지나 목표 재질을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 Si에 의한 강도효과가 이론 식보다는 낮게 나타나며, Nb 탄화물에 의한 석출경화에 의해 강도가 일부 상승하였기 때문으로 추정된다. 따라서 Si가 0.25%인 기존 강종(A3)을 대체하기 위해서 합금화 처리성 및 용접성 등의 문제를 초래하는 Si함량을 0.01%로 낮추는 것이 가능하였다.

Fig. 3은 Si농도가 0.01%, 0.1%, 0.25%인 강종에 대해 760°C에서 소둔처리한 현미경 미세조직을 나타낸 것이다. Si농도에 따른 강종별 미세조직의 뚜렷한 차이는 나타나지 않았으며, 소둔온도가 증가함에 따라 결정립이 약간 조대해지는 경향을 나타내었다. 따라서 재질목표 인장강도인 45kg/mm<sup>2</sup>를 초과하고 연신율이 31%이상인 강을 제조하기 위해서는 소둔온도를 740~760°C로 하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 열연판에서 탄화물을 미리 석출시켜 재결정온도를 낮추는 것이 효과적으로 나타났다.

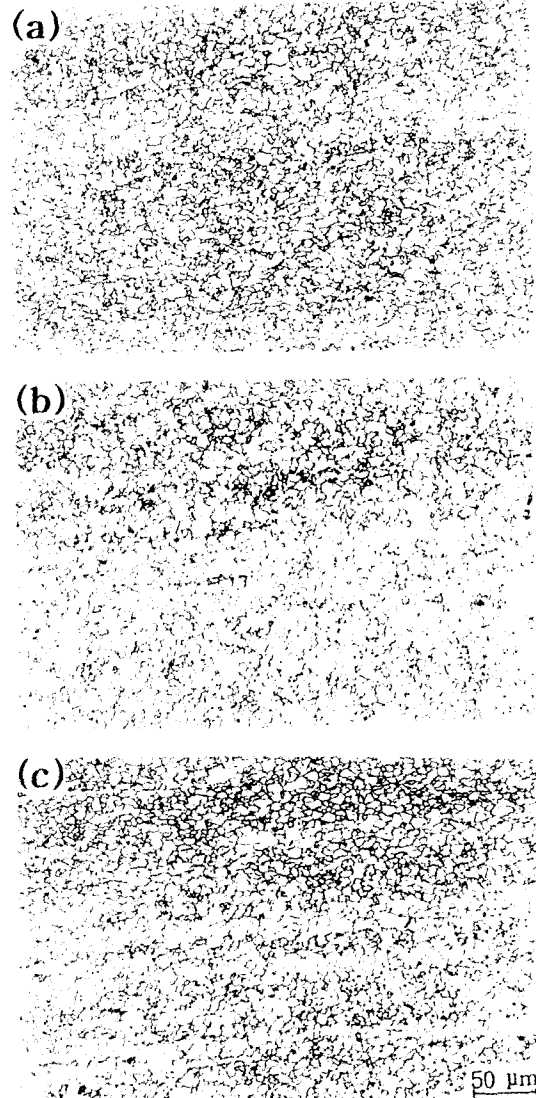


Fig. 3. Microstructure after annealing treatment at 760°C for 64 seconds  
(a) 0.01%Si, (b) 0.10%Si, (c) 0.25%Si

### 3. 2. 합금화특성에 미치는 Si의 영향

강성분과 합금화 속도는 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다. Fig. 4는 Si함량이 상이한 3개 강종에 대해 합금화온도에 따른 도금층내 Fe함량을 나타내었다. Si농도가 증가함에 따라 도금층내 Fe함량이 감소하는 것으로 보아 합금화 반응이 지연됨

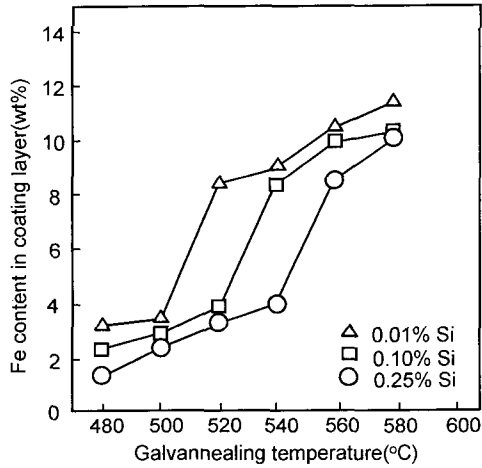


Fig. 4. Effect of Si content on Fe content in coating layers as a function of galvannealing temperature

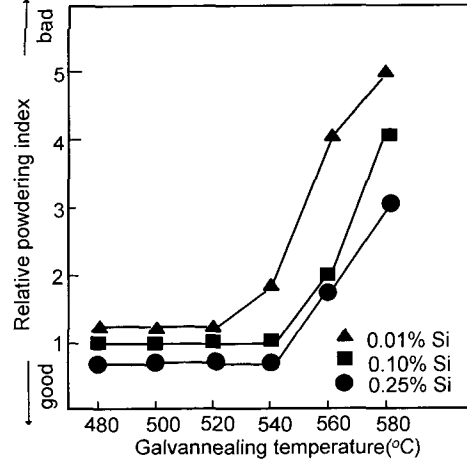


Fig. 5. Effect of Si content on relative powdering index as a function of galvannealing temperature

을 뚜렷이 알 수 있다. 일반적으로 도금층내의 Fe 함량이 증가할수록 파우더링이 증가한다고 알려져 있다. 또한 내파우더링성 및 내플래킹성이 우수한 합금층내 Fe함량은 8~10%일 때 양호하며, 11%이상이면 도금부착량과 관계없이 파우더링성이 열화된다. 따라서 적정 합금화온도는 0.01%Si강의 경우 520~540°C, 0.1%Si강은 540~560°C, 0.25%Si강의 경우 560~580°C로 나타났다. 이 결과로부터 강의 Si함량이 0.1%증가함에 따라 합금화 완료온도는 약 20°C 정도 상승하는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 합금화온도에 따른 파우더링성을 상대평가한 결과를 나타내었다. Si함량이 증가할수록 동일한 합금화 온도에서의 파우더링은 감소되는 것으로 나타났다. 이는 동일한 합금화 온도에서는 Si함량이 증가할수록 합금화반응이 지연되어 파우더링이 감소한 것으로 볼 수 있다. 반면 합금화온도 580°C에서는 도금층내 Fe함량이 거의 비슷함에도 불구하고 0.25%Si재가 내파우더링성이 우수한 것으로 나타났다. 또한 합금화온도의 증가는 Fe-Zn반응을 가속화시켜 파우더링이 증가하였다. 520°C이하의 저온에서는 파우더링성에

큰 영향을 미치지 않으나, 고온(560°C)에서는 그 영향이 커지고 합금화시간이 증가할수록 도금부착성이 열화되었다. 우수한 성형성(formability)을 얻기 위한 합금화온도와 합금화시간의 범위를 조사한 결과, 합금화온도가 높을수록 양호한 내파우더링성을 얻는데 필요한 합금화시간의 범위가 감소하였다.

Fig. 6~Fig. 7은 Si함량이 각각 0.01%, 0.1% 및 0.25%인 고장력강에 대해 520°C에서 합금화 처리하였을 때 도금층표면 및 단면조직을 관찰한 것이다. 0.01%Si강의 경우 520°C에서 15초간 열처리시 표면까지 완전히 합금화가 되어 있고 주로  $\delta_1$ 상 및  $\zeta$ 상으로 구성되어 있는 반면, 동일한 합금화 온도에서 0.1%, 0.25%Si강의 표면층은 완전한 합금화가 되지 않았으며 도금층내부에  $\zeta_1$ 상 결정이 성장하고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 0.01%Si 첨가강의 단면조직(Fig. 7(a))을 보면 대부분  $\delta_1$ 상이고 소지철계면에 얇게  $\Gamma_1$ 상이 형성되어 있음을 볼 수 있다. 반면 0.1%Si 첨가강의 경우 초기 불균일한 합금층 조직인 outburst조직이 형성되어 있으나, 0.25%Si 첨가강은 outburst조직 및  $\Gamma_1$ 상이 나타나지 않았다. 일반적으로 파우더링은 가장

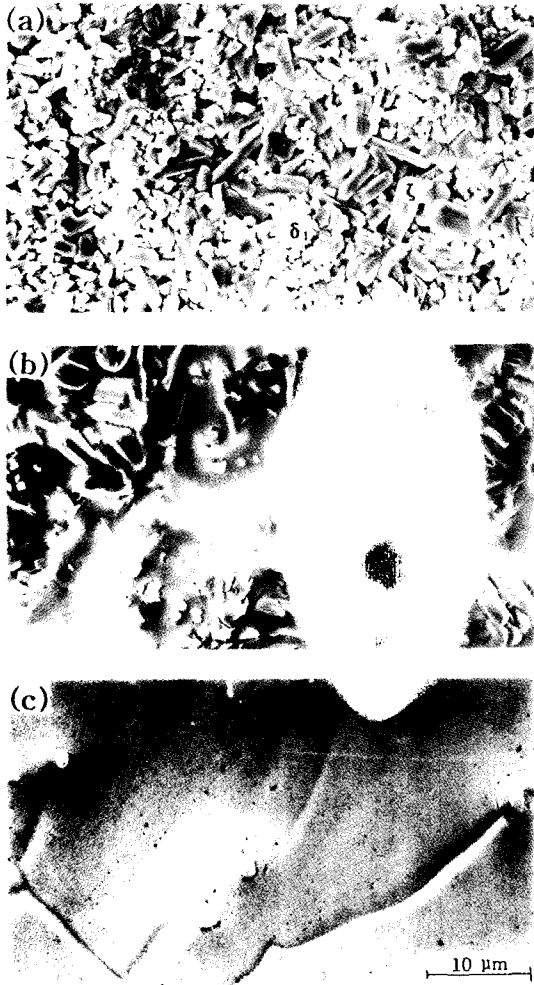


Fig. 6. Surface appearances after galvannealing at 520°C for 15 seconds  
(a) 0.01%Si, (b) 0.10%Si, (c) 0.25%Si

높은 취약한 상인  $\Gamma_1$ 상의 두께를 최소화시킬 때 가장 효과적으로 감소시킬 수 있으므로, 대략 0.5  $\mu\text{m}$ 이하로 관리하여야 한다. 따라서 강의 Si함량이 증가할수록 불균일 합금화 반응뿐 아니라  $\Gamma_1$ 상의 형성을 억제하여 파우더링성이 개선되는 것으로 추정된다. 이는 불연속 도금공정 (Batch galvanizing)에서 Si가 도금욕 중에서 용출시 Sandelin 효과<sup>10)</sup>에 의해  $\zeta$ 상의 과도한 성장을 촉진하는 것과 같은 상이한 결과이다.

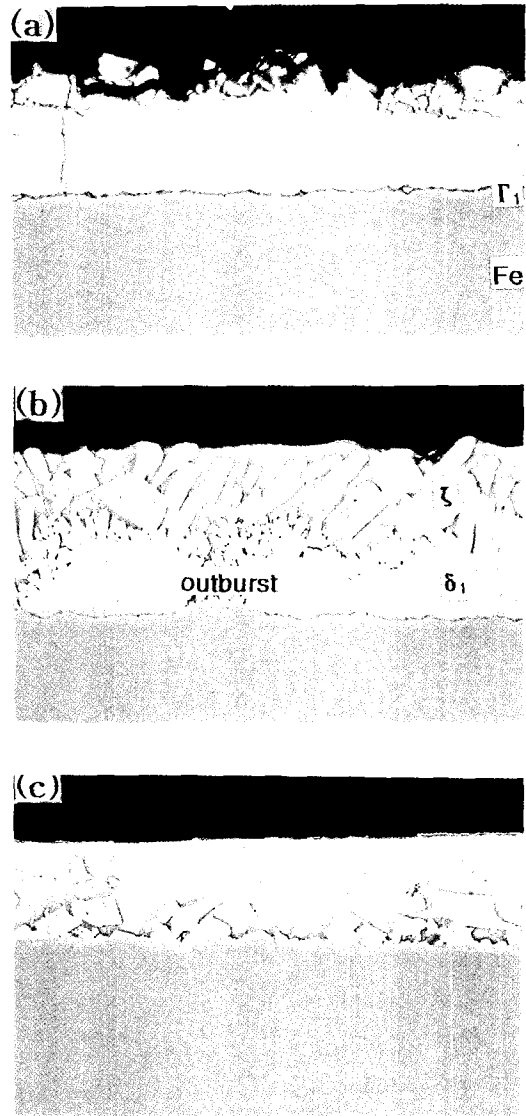


Fig. 7. Cross sections after galvannealing at 520°C for 15 seconds  
(a) 0.01%Si, (b) 0.10%Si, (c) 0.25%Si

0.01%Si강의 경우 (Fig. 8(a)) 합금화처리 하지 않은 용융아연 도금층과 소지철의 계면을 뚫은 염산으로 용해후 SEM으로 관찰한 결과 모두 주상정의  $\zeta$ 상으로 나타났다. 반면 0.25%Si첨가강의 경우 (Fig. 8(b)) 소수의 주상정  $\zeta$ 상과 치밀한 Al rich 중간상으로 XRD 분석결과  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ 층으로 나타났

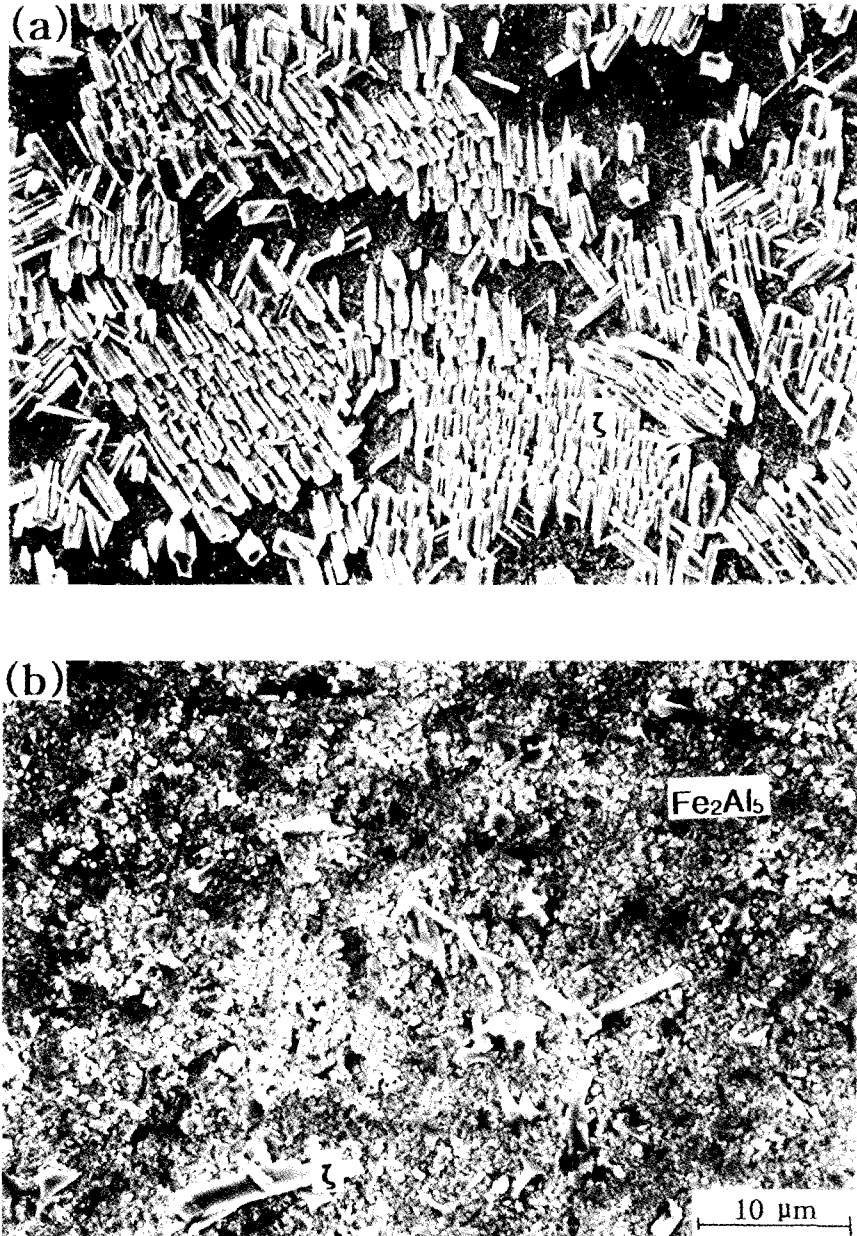


Fig. 8. Scanning electron micrographs of the interfacial layer after removing the pure Zn layer

다.  $Fe_2Al_5$ 층은 용융도금 욕에 침적시 초기에 형성되며 Fe-Zn 확산반응을 억제하는 확산억제층(inhibition layer)으로 알려져 있으며 도금욕 내의 Al농도가 높을수록 두껍게 형성된다.  $Fe_2Al_5$ 층은

Zn이  $Fe_2Al_5$ 층을 통과하여 소지철의 결정립계를 따라 Fe와 반응할 때 outburst조직이 생성되어 파괴된다. 따라서 0.25%Si첨가강의 경우 치밀한 granular 형태의  $Fe_2Al_5$ 층이 도금층/소지철 계면

에 형성되어 Fe-Zn 합금화반응을 억제하는 반면, 0.01%Si강의 경우 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>층이 파괴되어 Fe-Zn 중간화합물인 주상정의 ζ상이 형성되어 합금화반응이 증가한 것으로 추정된다.

또한 Si첨가 강에서는 CGL 소둔 열처리시에 Si를 주체로 하는 산화물이 강판표면에 형성된다. Fig. 9는 각각 0.25%Si강의 미소둔 냉연판 대비 800°C에서 60s 소둔 열처리한 강판을 사용하여 FT-IR 표면분석한 결과를 나타내었다. 0.25%Si강 표면에 비정질 SiO<sub>2</sub> 및 MnSiO<sub>3</sub>의 흡수 peak가 관찰되었다. 일반적으로 Si는 연속소둔 공정 중에 강판표면으로 확산되어 모재보다 10~100배 정도 높게 된다. 이와 같이 강표면에 농화된 Si는 로내 분위기중의 극미량의 수분 또는 불순물과 반응하여 SiO<sub>2</sub> 산화피막을 형성하여 용융아연과의 젖음성(wettability) 및 합금화 반응성을 크게 저하시킨다. 그러나 본 시험강종의 경우 Mn과 일부 SiO<sub>2</sub>가 결합하여 MnSiO<sub>3</sub>가 형성되어 도금성이 비교적 양호하게 나타났다. 한편 일부 Si는 강판표면의 페라이트 입계상에 편석하기 때문에 도금욕에 침적시 입계부에서의 초기 outburst반응을 억제하고, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> 확산장벽층을 두껍게 형성시켜 합금화반응을 지연시키는 것으로 추정된다.

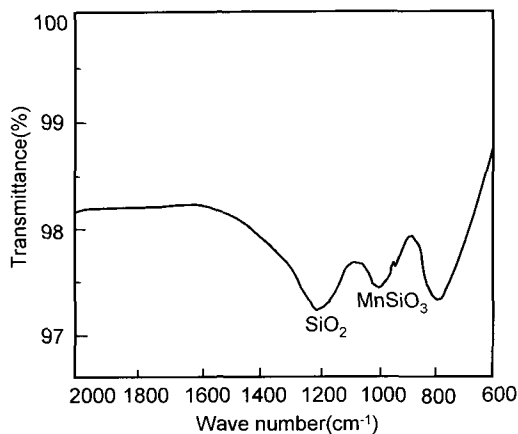


Fig. 9. FT-IR reflection spectra of oxide film formed on the surface of 0.25%Si-1.1%Mn added steel after annealing treatment

### 3. 2. 합금화변수의 영향

GA강판을 자동차용 강판으로 사용하기 위해서는 도금층내 Fe함량을 8~11%, 프레스 가공측면에서 ζ상이 거의 없고 Γ<sub>1</sub>상은 0.5μm이하로 가능한 얇게 만드는 것이 내파우더링성 개선 측면에서 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 Si함량이 0.01%인 A1강종을 대상으로 합금상들의 성장거동에 영향을 미치는 인자 중에서 합금화 열처리시 가열속도, 냉각속도 및 합금화온도의 영향에 대해 조사하였다.

합금화 열처리시 가열속도에 따른 ζ상 및 Γ<sub>1</sub>상의 두께를 Fig. 10에 나타내었다. ζ상 및 Γ<sub>1</sub>상의 두께는 가열속도를 증가시킬수록 감소하였다. 이는 합금화 열처리시 가열속도를 증가시키면 저온부에서 급속히 성장하는 ζ상을 억제하고 δ<sub>1</sub>상의 형성을 촉진하기 때문으로 추정된다. 따라서 이 결과는 합금화 열처리시 저온구간을 통과시 급속가열의 필요함을 보여주고 있다.

Fig. 11은 520°C에서 20초간 합금화 열처리후 300°C까지 냉각할 때 냉각속도에 따른 파우더링량을 측정된 결과이다. 냉각속도가 빠를수록 과도한 합금화가 억제되어 파우더링이 감소됨을 알 수 있다. 합금화반응은 도금층 표면이 아연의 응고온도

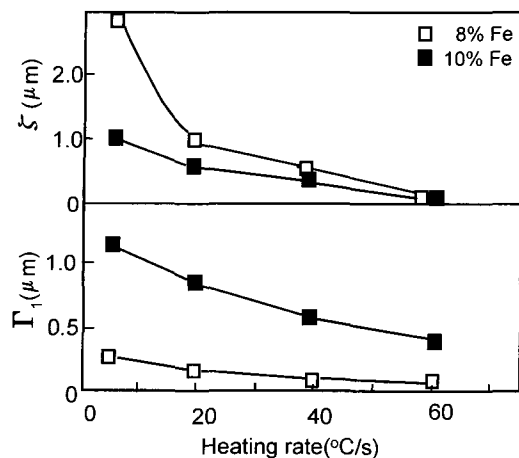


Fig. 10. Effect of heating rate on growth of ζ and Γ<sub>1</sub> phases



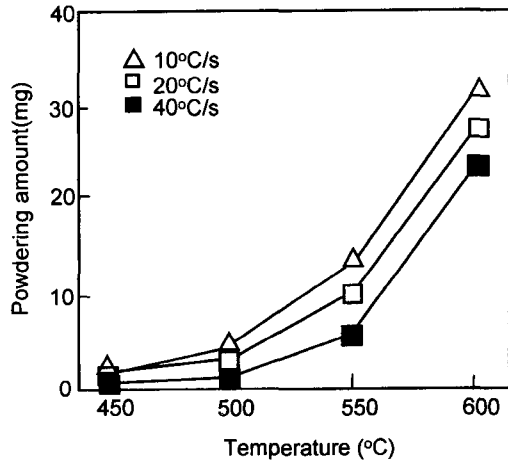


Fig. 11. Effect of cooling rate on powdering amount

인 419°C까지 냉각되는 중에도 일어나며, 이 보다 더 낮은 온도에서도 일어난다. 따라서 냉각속도가 느릴수록 합금화가 많이 되어 연성을 열화시킨다. 또한 냉각 중에 더 높은 합금화온도에서 안정하지 못한 상들이 형성될 수 있다. 일반적인 용융도금 공정에서 가스냉각에 의한 냉각속도는 평균적으로 20°C/s 이나, 향후 급속냉각시 (40°C/s) 과합금화 방지에 따른 파우더링성 개선 및 상부롤(Top roll)에서의 아연부착을 크게 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 12는 60g/m<sup>2</sup>의 도금부착량을 갖는 A1강의 합금화 열처리에 따른 합금상의 변화양상을 XRD로 분석한 결과를 나타내었다. Fe-Zn계 상태도에 따르면 δ상의 포정반응은 520°C 전후에서 있으므로, 그 이상의 온도에서는 ζ상이 열역학적으로 불안정하다. 저온(450°C)에서는 ζ상의 회절강도가 초기에 우선적으로 증가하나, 불균일 합금화반응인 outburst반응의 결과로 δ상이 급격히 증가한다. 따라서 합금화반응은 주로 δ상의 증가에 기인한 것이다. 또한 450°C에서 도금층내 평균 Fe함량이 12%전후에서 공존하는 ζ상이, 500°C에서는 상당히 억제되고, 550°C에서는 소멸됨을 볼 수 있다. 즉 합금화온도가 낮은 경우 합금화과정 초기

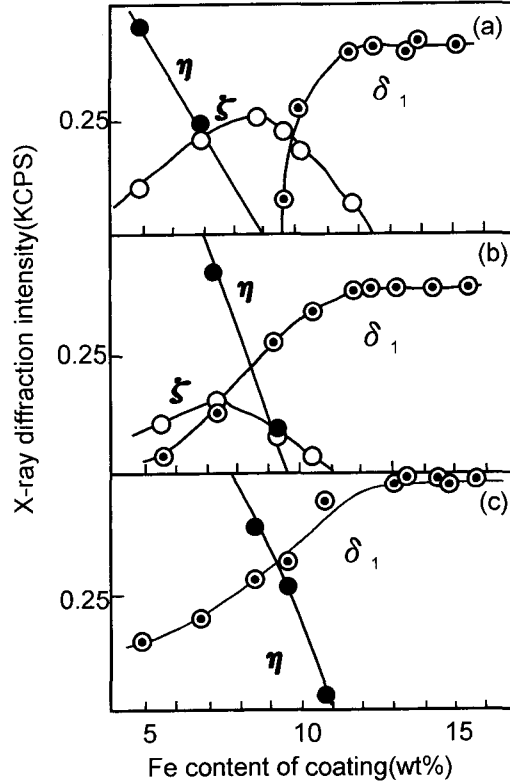


Fig. 12. Transition of alloy phase in galvanized layers  
(a) 450°C, (b) 500°C, (c) 550°C

에 Fe함량이 낮은 ζ상이 형성되지만, 합금화온도가 높은 경우에는 초기부터 Fe함량이 높은 δ상이 성장하고 ζ상은 억제된다. 이 결과는 합금화온도의 하한선(η상 소멸점)이 있으며, 도금층중의 Fe함량이 합금화온도에 따라 변화되는 것을 의미한다. 실제로 합금화온도의 하한선은 합금화온도가 상승함에 따라 Fe함량이 높은 방향으로 이동하는 경향이 관찰되었다.

Fig. 13은 도금층내 Fe함량이 각각 8%, 10%일 때, ζ상 및 Γ<sub>1</sub>상의 두께에 미치는 합금화온도의 영향을 나타낸 것으로 Γ<sub>1</sub>상의 두께는 530°C일 때 0.5/μm이하로 낮게 나타났다. Γ<sub>1</sub>상의 성장은 도금층내 Fe함량이 10%이상일 때 급격히 증가한다. 또한 ζ상은 저온일수록 두께가 증가하며 530°C이

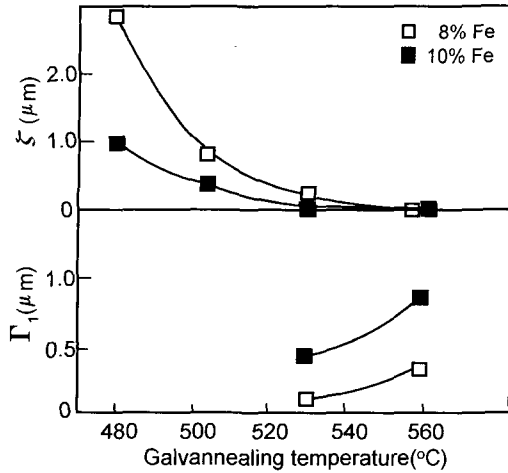


Fig. 13. Effect of galvannealing temperature on growth of  $\zeta$  and  $\Gamma_1$  phases

상에서는 형성되지 않았다. 따라서 A1강의 경우 합금상조직 측면에서 적정 합금화온도는 530°C 근방으로 나타났다. 그러나 이러한 적정 합금화온도는 강종, 도금부착량 및 처리시간 등에 따라 변화될 수 있다.

일반적으로  $\zeta$ 상으로 이루어진 도금층은 파우더링은 적으나, 프레스 성형시 도금층이 비늘조각 형태로 탈락하는 플래킹이 심하게 나타났다. 실제로 도금층의 미끄러짐 변형시험(draw bead test)을 한 결과  $\zeta$ 상이 많아질수록 다이에 접촉하기 때문에 마찰력이 커지고, 플래킹이 심하게 발생하였으며 이는  $\zeta$ 상의 낮은 정도에 기인한 것으로 추정된다.

#### 4. 결 론

고강도 합금화 용융아연 도금강판의 파우더링 거동에 미치는 강성분 및 합금화변수의 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 강의 Si함량이 증가할 수록 합금화반응이 지연되고 파우더링이 감소하였다.
- 2) 강중 Si이 0.1%증가함에 따라 합금화 완료

온도는 약 20°C 정도 상승하는 것으로 나타났다.

3) Si는 합금화 초기의  $\text{Fe}_2\text{Al}_6$  확산장벽층을 증가시켜 합금화반응을 지연시키고,  $\Gamma_1$ 상의 형성을 억제하여 내파우더링성을 향상시키는 것으로 추정된다.

4) 0.01%Si-0.10%P가 함유된 45kg/mm<sup>2</sup>급 고강도 GA강판의 적정 합금화처리 조건은 급속가열하여 530°C에서 15초 유지후 급속냉각할 때,  $\zeta$ 상 및  $\Gamma_1$ 상의 성장을 최소화시켜 파우더링이 개선되는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 순천대학교 자동차부품 및 소재연구 개발센터의 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. F.E. Goodwin : Fifth Inter. Conf. on Zinc Coated Steel Sheet. ECGA, Birmingham, (1997) 1
2. M. Guttman : Mat. Sci. Forum, 155 (1994) 527
3. M. Urai : CAMP-ISIJ, 4 (1991) 1635
4. J. Inagaki, M. Sakurai and T. Watanabe : ISIJ International, 35 (1995) 1388
5. M. Urai : CAMP-ISIJ, 1 (1988) 651
6. M. Sakurai et al. : CAMP-ISIJ, 9 (1996) 513
7. A. Komatsu : CAMP-ISIJ, 8 (1995) 1550
8. T. Ooi : CAMP-ISIJ, 7 (1994) 1513
9. M. Isobe : CAMP-ISIJ, 8 (1995) 649
10. R.W. Sandelin : Wire and Wire Prods., 16 (1941) 28