

# 저면압 영역에서 합금화 온도에 따른 합금화용융아연도금 강판의 마찰특성 평가

이정민\*, 전성진\*, 김동환\*\*, 김병민#, 김동진\*\*\*, 박성호\*\*\*

## Evaluation of Frictional Characteristic of Galvannealed sheet steel with different annealing temperatures at Lower Normal Loads

Jungmin Lee\*, Seongjin Jeon\*, Donghwan Kim\*\*, Byungmin Kim#, Dongjin Kim\*\*\* and Sungho Park\*\*\*

### ABSTRACT

This paper is designed to estimate friction and powdering characteristic of coating layer on galvannealed sheet steel with different annealing temperature, which is 465, 505, 515 and 540°C. Estimations of powdering and friction were done using a 60° bending test and one side friction test, respectively. In order to obviously understand the effect of coatings on friction cross-section of coatings before and after friction test was also observed by SEM. The results show that powdering of coatings is increased with increasing of annealing temperature and that friction characteristic greatly depends on powdering which leads to increase of real contact area between tools and coatings.

**Key Words** : Galvannealed sheet steel(합금화 용융아연도금강판), Powdering(파우더링), Annealing temperature(합금화 온도), One side friction test(편면마찰시험)

### 1. 서론

아연계 도금강판의 피막 특성은 도금부착 방법과 합금조성에 따라 약간씩 다르지만 대부분 낮은 경도(Hv)와 낮은 밀착특성을 가지고 있다. 특히 일축 인장에서 인장방향으로 모재의 수% 이내의 비틀림에도 균열이 발생하고 도금 피막은 파괴된다. 이러한 도금 특성은 프레스 가공 현장에서 강판의 성형성 변화 및 악화를 야기한다. 성형성 변화의 원인은 크게 도금 부착 공정 중 발생하는 모재의

특성치 변화와 도금의 파괴 및 변형에 따른 표면 마찰특성 변화로 나눌 수 있다. 그러나 최근 도금 공정의 기술 발달로 인해 도금후 모재의 기계적 특성은 도금전과 비교하여 3% 이내로 저하하거나 아니면 거의 변하지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서 프레스 성형에서 공구와 도금층 사이의 마찰 거동이 가장 중요한 인자로 자리 잡고 있다.<sup>1-5</sup>

마찰 거동에 영향을 미치는 인자로는 표면조도, 상대속도, 접촉면압, 윤활유 등을 들 수 있다. 특히 접촉면압과 마찰계수와의 관계에서, 압력이

접수일: 2005년 10월 7일; 게재승인일: 2006년 2월 10일

\* 부산대학교 정밀기계공학화 대학원

\*\* 진주국제대학교 자동차공학과

# 교신저자: 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

E-mail [bmkim@pusan.ac.kr](mailto:bmkim@pusan.ac.kr) Tel. (051) 510-3074

\*\*\* POSCO 자동차장재연구소

증가할수록 일반적으로 마찰계수는 감소하지만, 압력이 계속해서 증가하면 도금층과 공구의 금속접촉이 증가하여 스커핑(Scarping)이 발생하는 압력 지점에서 마찰계수는 다시 급격히 증가한다. 보통 도금강판의 마찰시험은 스커핑이 발생하는 영역까지의 성형가능 면압 범위를 찾기 위해 40MPa 이상의 고압영역에서 주로 연구되어 왔다.<sup>5,7</sup> 그러나 고압 영역에서의 마찰특성은 대부분 도금층 정도에 의존하고 있어 가압초기 도금층 표면 손상이나 조도의 영향은 거의 무시하는 것으로 볼 수 있다. 이것은 스커핑 발생이 도금층의 플레이킹(Flaking)이나 골링(Galling)에 기인한다는 것을 의미한다.

따라서 본 연구는 저압영역에서 도금층의 파우더링(Powdering)이 도금과 금형사이의 마찰 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 고안되었다. 사용된 강판은 자동차의 외판에 주로 사용되는 합금화 용융아연도금강판(이후 GA 강판)으로 도금공정 중 합금화 온도영역에 따라 4 종류로 구분하였다. 각 강판에 대한 파우더링성을 평가는 60° 벤딩 시험을 통해 수행되었으며, 편면마찰시험을 이용하여 각 강판의 마찰계수를 평가하였다. 최종적으로 마찰시험 전후 도금층 단면의 SEM 관찰을 통해 마찰계수와 도금층 손상과의 관계를 규명하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시편 준비 및 도금층 특성

GA 강판은 용융아연도금강판의 단점인 용접성과 도장성을 보완하기 위해 아연도금층을 응고 직전에 460~540℃의 가열로를 통과하여 10% 이내의 철 아연(Fe-Zn) 합금층을 형성시킨 것이다. 이것은 순수아연도금강판에 비해 경도가 우수하며 이온화 현상이 적어 국부적인 표면부식에 매우 안정적이다. 아연도금의 합금화 과정을 통해 얻어지는 상들은 크게  $\zeta$  상,  $\delta$  상,  $\Gamma_1$  과  $\Gamma$  상으로 구분할 수 있으며 각 상들의 특성을 Table 1 에 정리하였다.<sup>1,8</sup>

본 연구에서는 가열로 온도를 465, 505, 515, 540℃(이후 465, 505, 515, 540)로 구분하여 총 4 종류의 강판을 생성시켰다. 가열로 통과 시간은 총 10 초로 설정하였다. Fig. 1 과 2 는 4 종류 강판의 도금층 단면 및 표면 SEM 사진과 평균 표면조도를 나타낸 것이다.

합금화 온도 465 (Fig. 1(a), 2(a))에서는 도금 두께 및 표면 전체에 걸쳐  $\eta$  상이 관찰되었다. 이것은 충분한 열처리가 이루어지지 않아 철이 아연에 고용되어 있는 상태로 합금화 불량으로 볼 수 있다. 505 (Fig. 1(b), 2(b))의 경우, 단면 내에서는 두께 1  $\mu\text{m}$ 의  $\zeta$  상이 불규칙적으로 관찰되었으며 표면은  $\zeta$  상과  $\delta$  상이 공존한 상태를 유지하였다. 515 (Fig. 1(c), 2(c))는 단면과 표면 전체에 걸쳐  $\delta$  상 고르게 분포하였으며 계면에서  $\Gamma$  상이 일부 관찰되었다. 540 (Fig. 1(d), 2(d))에서는 모재와의 계면에서 약 0.5  $\mu\text{m}$  두께의  $\Gamma_1$  과  $\Gamma$  상이 관찰되었고 표면에서는 역시  $\delta$  상이 고르게 분포되었다.

강판 제조사에서는 오직  $\delta$  상만 존재하는 GA 강판을 요구하지만 실험 결과에서 보듯이 합금화 온도가 낮을수록  $\eta$  와  $\zeta$  상이 증가하고 온도가 높을수록  $\delta$  와  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma$  상이 증가한다.<sup>1</sup>  $\zeta$  상이 증가할 경우, 도금층 연성(Ductility)은 풍부하지만 경도가 낮기 때문에 금형과 응착하여 골링이나 플레이킹이 쉽게 발생된다. 반면에 철함량이 많은  $\delta$  와  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma$  상이 증가할 경우, 도금층 경도는 상승하여 마찰 전단응력의 저항력은 증가하지만 연성이 부족하기 때문에 파우더링이 쉽게 발생한다.<sup>9, 10</sup> 따라서 GA 강판에서 도금층 손상을 최소화하기 위해서는  $\Gamma_1$  과  $\zeta$  상을 최소화하는 것이 가장 중요하다.<sup>1</sup>

도금층 두께는 평균적으로 6~7  $\mu\text{m}$  이고, 표면 조도(Ra:  $\mu\text{m}$ )는 합금화 온도가 증가함에 따라 감소하였다. 일반적으로 GA 강판에서 합금화 온도 증가는 도금층 수축량을 증가시켜 내부 크랙을 증가시킨다. 따라서 도금층 표면의 스킨 패스 면은 작아지고 표면조도는 감소하게 된다.

Table 1 Fe-Zn phase characteristics<sup>1</sup>

Phase	Formula	Crystal structure	VHN (25mg)
$\zeta$	$\text{FeZn}_{13}$	Monoclinic	208
$\delta$	$\text{FeZn}_{10}$	Hexagonal	358
$\Gamma_1$	$\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$	FCC	505
$\Gamma$	$\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$	BCC	326

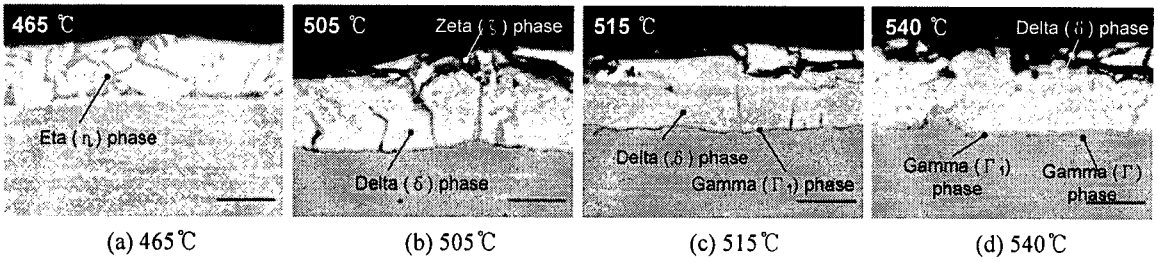


Fig. 1 SEM images of cross-sections of coatings with different annealing temperatures

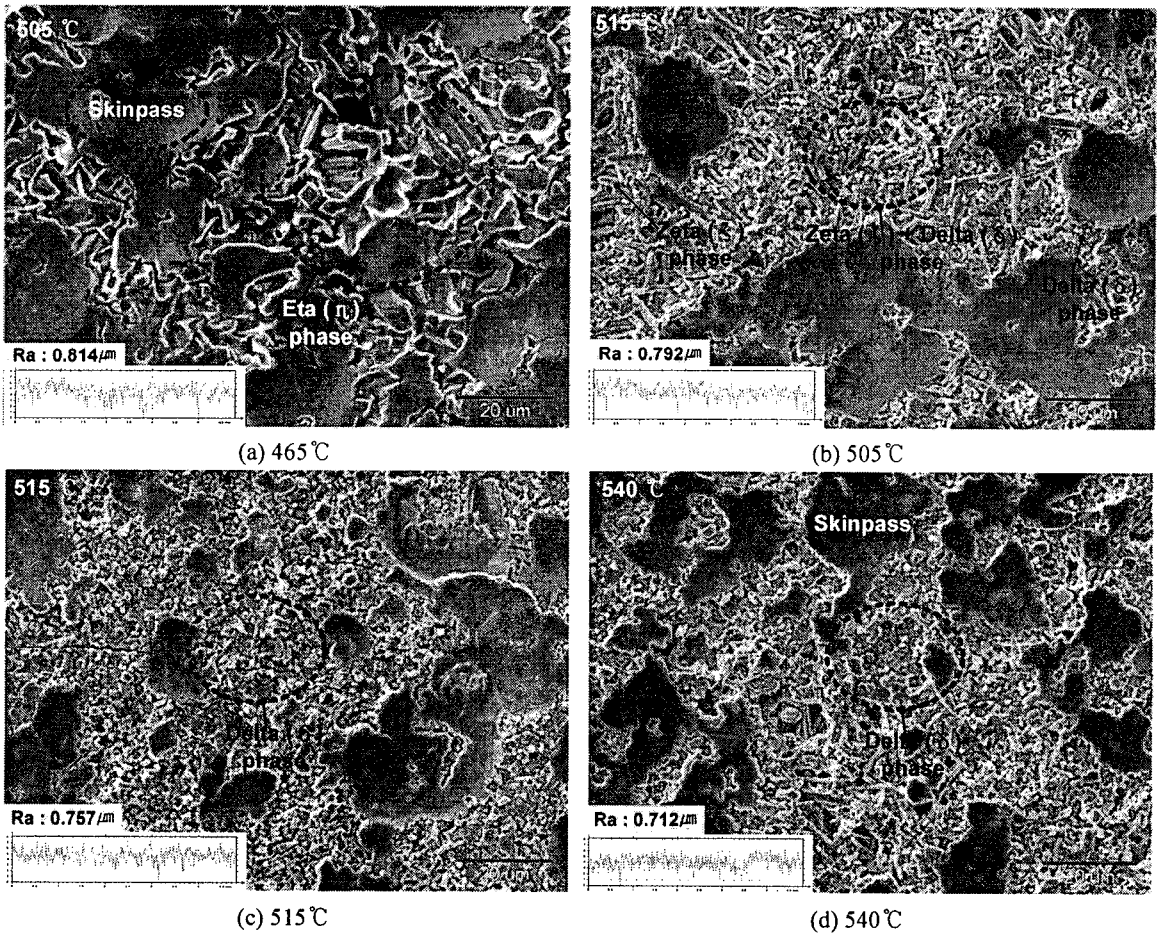


Fig. 2 SEM images of coatings surfaces with different annealing temperatures

### 2.2 60° 벤딩 시험 및 경도시험

합금화 온도에 따른 도금층의 파우더링 특성을 평가하기 위해 60° 벤딩 시험이 수행되었다.<sup>11</sup> 파우더링성은 압축성형부의 테이핑(Tapping)을 통하여 시험후에 테이프에 잔류한 도금 피막의 무게로 정의하였다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 벤딩

시험기의 개략도와 사용된 시편의 치수를 나타낸 것이다.

각 도금강판의 도금층 경도 측정은 비커스 경도시험기(Matsuzawa)를 이용하여 측정되었다. 부하하중은 50 과 25, 5gf 이면 부하시간은 10 초로 설정하였다.

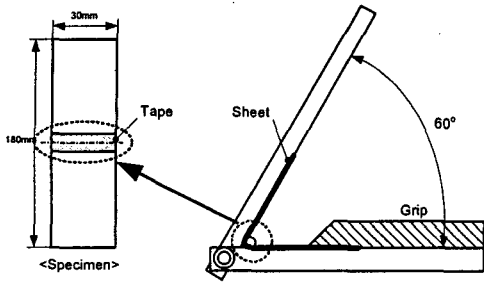


Fig. 3 Schematic drawing of 60° bending test

### 2.3 편면마찰시험

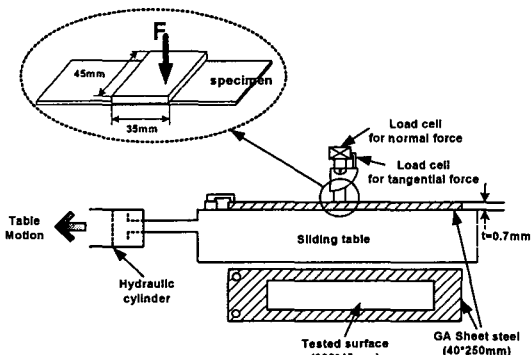


Fig. 4 Schematic drawing of one side friction tester and dimensions of tool and specimens

Fig. 4 는 본 논문에서 사용된 편면마찰시험기의 개략도와 시험편 및 금형의 치수를 나타낸 것이다. 마찰금형은 표면에 경질 크롬(CrN)코팅을 하고 평균 표면 조도(Ra)를 0.6 되도록 폴리싱하였다. 마찰시험시 평균 가압력은 2, 4MPa 두가지로 구분하였고 윤활유는 저점도의 세정유(Washing oil)와 고점도의 방청유(Rust prevent oil)를 사용하였다. 전반적인 시험조건과 윤활유 특성은 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 Conditions of one side friction test

Items	Specifications	
Tool	STD11(CrN coating)	
Drawing speed	30mm/s	
Normal pressure	2 and 4 MPa	
Lubricant	Washing oil (P-340N) 2.9cst, 40°C	Rust prevent oil (BW-90EG) 18.6cst, 40°C

## 3. 시험 결과

### 3.1 60° 벤딩 및 경도 시험 결과

Fig. 5 는 벤딩 시험결과로써 각 도금층의 파우더링량과 테이핑 시험 결과를 나타낸 것이다. 결과는 합금화 온도가 증가할수록 도금층 파우더링성은 증가하였다. 그림에서 알 수 있듯이 465 와 비교하여 540 는 상당한 량의 도금층이 테이퍼에 부착된 것을 확인할 수 있다. 도금층의 파우더링성은 일반적으로 도금층 두께와 철-아연 합금상의 분포에 크게 영향을 받는데 이것은 도금층 내 δ 와 Γ상이 증가할수록 도금층의 연성은 감소하기 때문이다.<sup>1</sup>

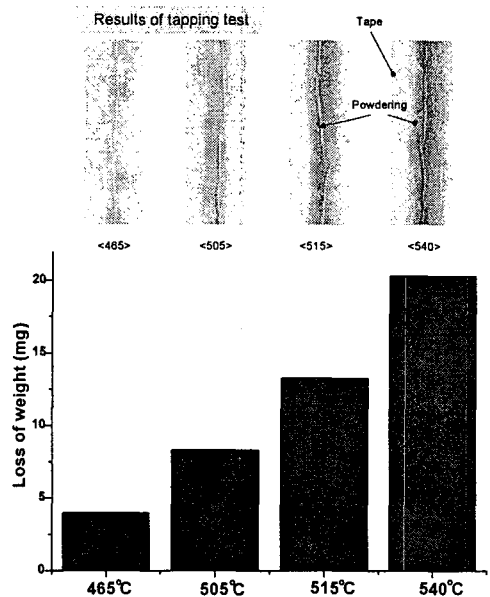


Fig. 5 Effect of annealing temperature on amount of powdering

Fig. 6 은 합금화 온도 변화에 따른 강판의 표면 경도값을 나타낸 것이다. 결과는 합금화 온도가 증가할수록 도금층 표면 경도값은 증가하였다. 부하 하중 증가에 따른 경도 값의 감소는 모재 및 도금층 깊이의 영향이 크게 작용한 것으로 판단된다. 결과적으로 도금층 경도 또한 도금층 내 합금상 분포에 크게 의존하는 것으로 나타났다.<sup>1</sup>

Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 n 상이 대부분인 465 의 경우 부하 하중에 상관없이 거의 일정한 경도

값을 가지지만  $\delta$ ,  $\Gamma$ 상과 이 존재하는 540 은 부하 하중이 감소할수록 도금층 특성이 크게 반영되기 때문에 경도값은 증가한다. 경도 차이는 540 이 465 보다 2.5 배 높은 경도값을 가지는 것으로 나타났다. 505 와 515 의 경우, 파우더링성은 515 가 높은 반면에 경도는 서로 비슷한 값을 나타내었다.

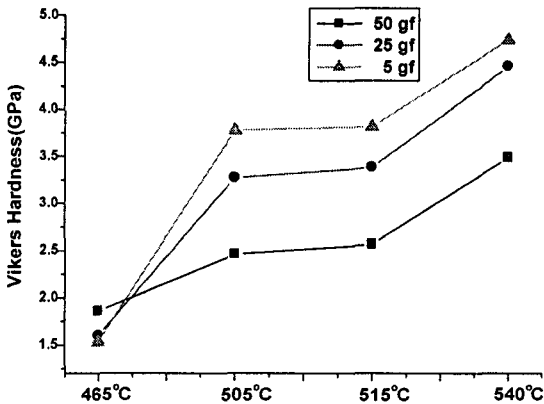


Fig. 6 Effect of annealing temperatures on hardness of coating surface

### 3.2 편면마찰시험 결과

Fig. 7 은 합금화 온도 변화에 따른 마찰계수 값을 나타낸 것이다. 방청유를 사용한 경우, 465 를 제외한 505, 515, 540 모두 비슷한 마찰계수를 나타내었다. 이에 반해 세정유를 사용한 경우에는 합금화 온도가 증가할수록 마찰계수는 증가하였다. 특히 4MPa 에서 540 의 마찰계수는 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 도금층 경도가 증가할수록 마찰계수는 감소하는 것으로 알려져 있지만 본 저압영역에서의 마찰시험결과는 정반대로 나타났다.<sup>12-16</sup>

이러한 결과는 도금층의 파우더링성에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 40MPa 이상 고압영역의 마찰시험은 가압 초기, 금형에 의해 도금층 표면형상이 대부분 평활화 되어 마찰계수가 도금층 경도에 의존하게 된다.<sup>14, 15</sup> 그러나 저압영역에서는 표면조도와 도금층의 파우더링 현상이 금형과 도금층 사이의 접촉면적에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 파우더링성이 증가할수록 마찰계수는 증가하는 것으로 예측할 수 있다. 특히 저점도의 세정유에서는 금형과 도금층이 서로 금속접촉을 하고 있기 때문에 이러한 현상이 더욱 가속화 될 것이다.

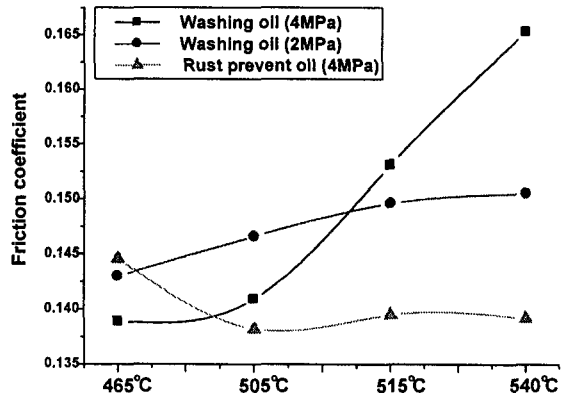


Fig. 7 Effect of normal pressure and lubricants on friction coefficient of coatings

이에 반해 고점도의 방청유에서는 공구와 도금층 사이에 경계윤활층이 형성되기 때문에 마찰계수는 대부분 도금층 경도나 윤활유 점도에 크게 의존한다. 이것은 Fig. 6 에서 505, 515, 540 의 마찰계수가 서로 유사한 값을 가지는 것에 의해 설명될 수 있다.<sup>4,5</sup>

### 4. 고찰

저압영역에서 도금층의 파우더링성과 마찰계수의 관계를 규명하기 위해서 세정유를 적용한 마찰시험 후 도금층의 단면 형상을 관찰하였다. Fig. 8 과 9 는 마찰시험후 도금층 단면의 SEM 사진과 평균 표면조도를 나타낸 것이다.

465(Fig. 8(a), 9(a))에서는 가압력에 상관없이 시험 전후 도금층의 단면형상 거의 변화하지 않았다. 이것은 낮은 가압력으로 인해 도금층 변형이 없고 또한 파우더링성이 적기 때문에 금형 이송중 전단력에 의한 실접촉 면적의 변화가 거의 없는 것으로 평가할 수 있다. 따라서 4 종류의 강판 중에서 가장 낮은 마찰계수를 나타낸다.

505 와 515(Figs. 8 and 9(b), (c))의 경우, 2MPa 에서는 마찰시험 후  $\zeta$ 상이 일부 잔존하였지만 4MPa 에서는  $\zeta$ 상과  $\delta$ 상의 탈락이 명확하게 관찰되었다. 540(Fig. 8(d), 9(d))의 경우, 2MPa 에서는 일부  $\delta$ 상의 탈락이 확인된 반면에 4MPa 에서는 도금층 표면의  $\delta$ 상이 완전히 제거되어 평활화된 연삭면

이 뚜렷이 관찰되었다. Fig. 7의 4MPa에서 540의 마찰계수 증가는 이러한 도금층 탈락에 의한 금형과 도금층의 실접촉면적을 증가로써 설명될 수 있다. 표면조도의 측정 결과에서도 465는 시험 전후 조도의 변화가 적은 반면에 540의 경우에는 약

0.1 정도의 감소되어 마찰시험후 표면이 상당부분 평활된 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 저면압 영역에서 금형과 도금층 사이의 마찰 특성은 도금층 파우더링 증가에 의한 실접촉 면적 변화에 크게 의존하는 것으로 설명할 수 있다.

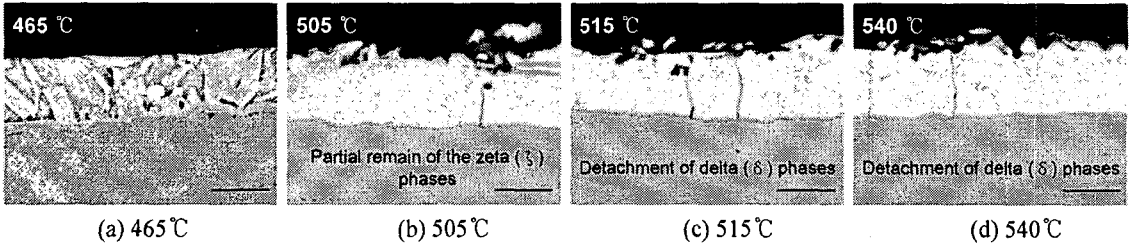


Fig. 8 SEM images of cross-sections of coatings with different annealing temperatures after friction test at 2MPa, normal pressure and washing oil

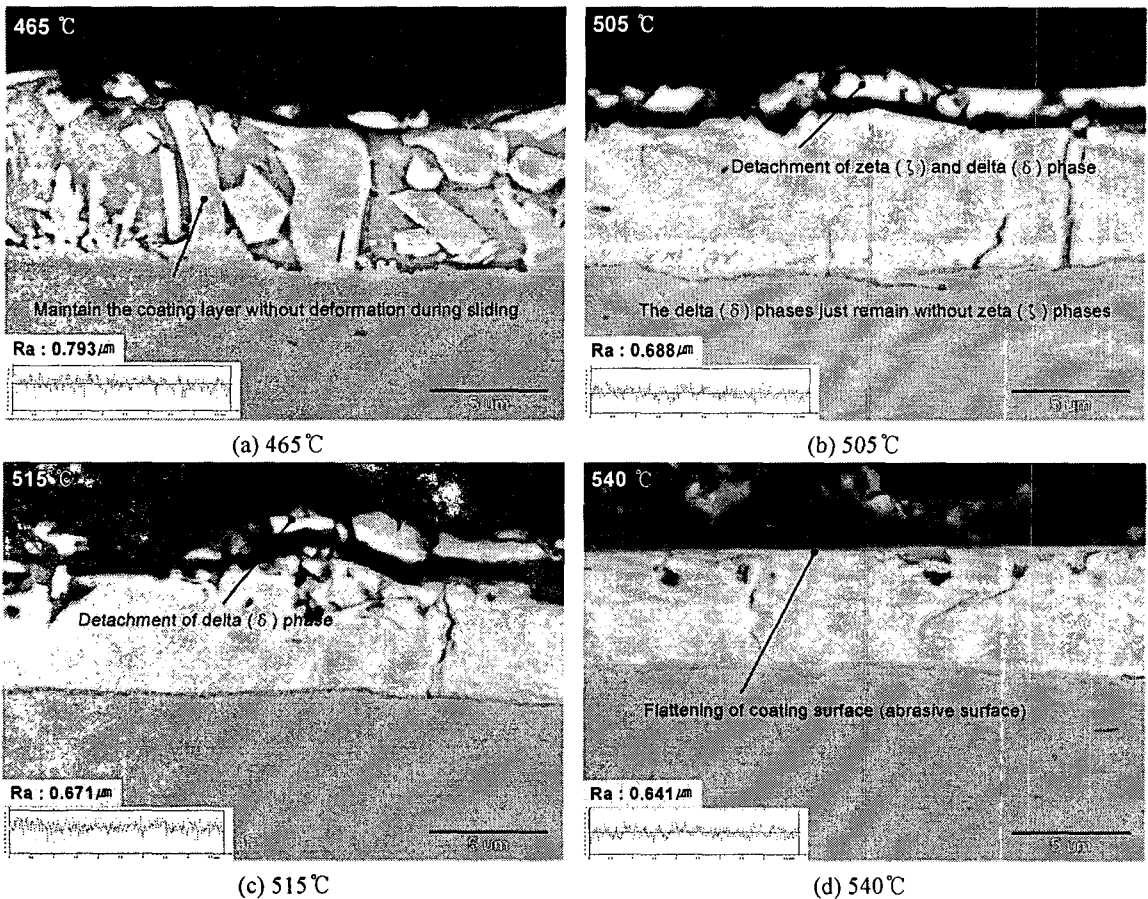


Fig. 9 SEM images of cross-sections of coatings with different annealing temperatures after friction test at 4MPa, normal pressure and washing oil

## 5. 결론

본 연구에서는 저면압영역에서 GA 강판의 합금화 온도 변화에 따른 마찰 특성을 평가하기 위해 파우더링 시험과 편면마찰시험을 수행하였다. 또한 마찰시험 전후의 도금층 관찰을 통해 도금층 특성이 마찰특성에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 합금화 용융아연도금강판에서 합금화 온도가 증가할수록 도금층 파우더링성과 도금층 경도 값은 증가한다.

(2) 저면압영역에서 세정유를 사용할 경우, 합금화 온도가 증가할수록 강판의 마찰계수는 증가한다. 이것은 파우더링 성 증가에 따른 공구와 소재간의 실접촉면적이 증가하기 때문이다. 반면에 방청유를 사용할 경우, 도금층 경도와 윤활유 점도에 의존하기 때문에 합금화 온도에 상관없이 유사한 값을 가진다.

(3) 도금강판에서 고압영역에서의 마찰 특성은 도금층 경도에 의존하는 반면에 저압영역에서는 도금층 파우더링성에 크게 의존한다.

## 참고문헌

- Marder, A. R., "The metallurgy of zinc-coated steel," *Progress in Material Science*, Vol. 45, pp. 197 - 271, 2000.
- Park, H. C., Lee, S. G., "Formability of Steel for Automotive," *Proc. of KSPE*, pp. 516-564, March 2003.
- HiRa, T., Yarita, I., Yasuda, A. and Abe, H., "Friction behavior of coated steels in sheet forming," *Journal of JSTP*, Vol. 34, No. 393, pp. 1141-1146, 1993.
- Hayashi, H., "Tribology in sheet metal forming," *Journal of JSTP*, Vol. 34, No. 393, pp. 1114-1121, 1993.
- Hayashi, H., "Behavior of coating layer in forming of galvanized steel sheet," *Journal of JSTP*, Vol. 26, No. 291, pp. 355-360, 1985.
- Urai, M., Iwaya, J., Iwai, M. And Arimura, M., "Effect of press-forming conditions and coating structure on flaking phenomenon in galvanized steel sheets," *Materials Technology for Automobiles*, Vol. 47, No. 2, pp. 29-32, 1997.
- Rangarajan, V., Jagannathan, V. and Raghavan, K. S., "Influence of strain state on powdering of galvanized sheet steel," *Proceeding of SAE*, pp. 63-70, 1996.
- Kim, S. K., Kim, M. J., Jun, E. C., "A study on the characteristics of the galvalume steel sheet," *Journal of KSPE*, Vol. 15, No. 7, pp. 77-84, 1998.
- Bordet, H., Ignat, M. and Dupeux, M., "Analysis of the mechanical response of film on substrate systems presenting rough interface," *Thin Solid Films*, 315, pp. 207-213, 1998.
- Kunde, N. D., Saran, M. J. and Michal, G. M., "Correlation of prephosphate treatment, surface friction and powdering of galvanized during forming," *Proceeding of SAE*, pp. 1-6, 1998.
- Cheng, C. and Franks, L., "Forming characteristics of galvanized coatings on IF and P-bearing steels," *GALVATECH 95 conference proceedings*, pp. 723-731, 1995.
- Azushima, A., Tsubouchi, M., Kudo, H., Furuta, N. and Minemura, K., "Experimental confirmation of micro-plasto-hydrodynamic lubrication mechanism at the interface between workpiece and forming die," *Vol. 30, No. 347*, pp. 1631-1636, 1989.
- Hertveldt, I., De Cooman, B. C., Meseure, K. and Xhoffer, C., "The shear strength of galvanized coatings on IF steels," *ISIJ international*, Vol. 39, No. 12, pp. 1280-1288, 1999.
- Dohda, K., "Friction characteristic of Zn coated sheet steels according to ironing," *Journal of JSTP*, Vol. 44, No. 504, pp. 1258-1262, 1997.
- Yarita, I., "Lubrication in cold forming," *Journal of JSTP*, Vol. 12, No. 123, pp. 313-321, 1971.
- Hong, M. H., Hwang, G. S. and Chung, J. H., "Microstructure of surface defects observed on continuous hot-dip galvanized coating steels," *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 40, No. 1, pp. 83-96, 2002.