

합금화 용융아연도금강판에서 어닐링 온도가 도금층 기계적 특성 및 마찰계수에 미치는 영향

전성진¹, 이정민¹, 김동환², 김동진³, 강연식³, 김병민[#]

The influence of annealing temperature on mechanical properties and friction coefficient of coating layer in galvanized sheet steel

J. S. Jeon, J. M. Lee, D. J. Kim, Y. S. Kang, B. M. Kim

Abstract

In the modern days, a galvanized sheet steel (GA) instead of a cold rolled steel sheet has been widely used as an alternative to extend the life of automotive body. Accordingly, the mechanical properties of GA for automobiles were taken into account and studied by comparing with the temperature variation on annealing in this study. To clarify the effect of surface features in the mechanical and frictional properties of GA, the several tests such as nanoindentation, vickers hardness and nano scratch test were executed. The developed neural networks apply also to obtain reliable mechanical properties of the thin films. Load-displacement curve was computed by the analysis procedure and compared with experimental results. The frictional characteristics of coating layers in GA were verified though nano scratch test in this study. The friction coefficient of coating layers on the surface was obtained from the nano scratch. The variation of friction coefficient versus velocity and pressure was taken into consideration in this paper.

Key Words : Nanoindentation(나노인덴테이션), Coated Layer(도금층), Mechanical Properties(기계적 특성), Frictional Characteristics(마찰특성), Galvanized Sheet Steel(용융아연도금강판)

1. 서론

최근 들어 자동차 차체의 수명연장을 위한 대책으로 종래의 냉연강판을 대신하여 고내식성의 용융아연도금강판의 사용이 증가되고 있다. 그러나 용융아연도금강판은 스템핑 공정 중 모재 변형(인장, 압축, 굽힘)에 의한 파우더링(Powdering)와 같은 성형 불량에 나타난다. 대부분 이러한 불량은 다이와 소재 사이의 마찰 및 윤활 특성을 변화시켜 성형성 저하와 도금층 탈락에 의한 강

판의 내식성 저하 등과 같은 새로운 문제점들을 야기한다. 그러므로 제품의 고정밀 및 고품질화를 실현하기 위해서는 도금층에 대한 기계적 특성 및 마찰특성을 명확히 규명하는 하는 것이 반드시 필요하다. 자동차 외판으로 많이 사용되고 있는 Zn-Fe 계 합금 도금강판은 냉연강판과 비교하여 도금공정 특성상 도금공정에서 코일의 길이방향 쪽 방향으로 도금량 및 합금성분 함량의 편차에 의해 표면품질이 불균일 해지기 쉬운 특징이 있다. 또한 프레스 성형가능 여부에 결정적인 역

1. 부산대학교 정밀기계공학과
2. 진주국제대학교 자동차공학과
3. POSCO자동차강재가공연구센터
교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과, bmkim@pusan.ac.kr

할을 하는 도금층의 마찰과 윤활특성은 도금층의 야금학적 특성(도금종류, 도금층 두께, 합금성분 함량)과 밀접한 관련이 있다고 보고 되고 있다[1].

본 연구에서는 표면처리강판 중 현재 일본 및 국내의 자동차 강판에 널리 적용되고 있는 용융 아연도금강판(이하 GA 강판)에 대해 합금화 온도 별 도금층의 기계적 및 마찰특성을 평가한다. 합금화 온도별 GA 강판의 기계적 특성은 도금층의 경도(Hardness)로 정의되며 이것은 나노 인덴테이션 시험을 통해 획득하였다. 또한 합금화 온도별 표면 미세 도금층에 대한 마찰특성을 평가하기 위해 나노 스크래치 시험(Nano Scratch)을 수행하였다.[2] 이는 일반적인 편마찰시험 혹은 거시적인 마찰시험으로는 표면처리강판의 도금층 고유의 마찰특성을 알 수 없기 때문이다

2. GA 강판의 제조 과정

GA 강판은 용융아연도금층을 응고 직전 고온에서 재가열하여 얻은 회백색의 Fe-Zn 합금층을 형성시키며 연속 생산라인에서 대략 수 μm 의 두께로 코팅된다.

GA 강판의 생산과정과 도금층의 합금화 과정(Fe10%-Zn)을 가진다.[2] 도금욕조에서 빠져 나온 도금강판은 Holding Furnace에서 어닐링 작업이 이루어진다. 여기서는 합금화 온도에 따라 모두 4가지(465°C, 505°C, 515°C, 540°C)의 GA 강판을 채택되었으며 그 합금층은 Fig. 1과 같다. GA 강판은 순수 Zn 도금강판 보다 우수한 스탬핑 성형성

(Stamping Formability), 용접 용접성(Weldability), 내식성(Good Corrosion Resistance)을 갖는다. 이렇게 도금된 GA 강판은 자동차 차체, 부품 등의 제조를 위한 성형 공정에 이용된다.

그러나 GA 강판은 여러 가지 판재 성형공정에 이용되고 있으나, 대변형 영역에서 얇은 도금층의 기계적 특성 및 마찰거동을 명확히 규명하지 못하여 판재의 성형성 평가에 있어 여러 가지 문제를 야기하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 도금층의 마찰특성 파악에 관한 연구들이 선행되어 왔다.[3, 4]

3. 나노 인덴테이션 시험

나노 인덴테이션 시험에는 MTS사의 Nanoindentation® XP가 사용되었고 팁은 탄성계수가 크고 마찰계수와 접촉면적이 작은 베르코비치 팁(Berkovich Tip)을 사용하였다. 시험에는 연속강성측정법(Continuous Stiffness Method)이 사용함으로써 압입깊이에 따른 Loading-Unloading 곡선, 경도 및 탄성계수의 변화를 측정할 수 있다.

나노 인덴테이션 시험을 위하여 시편은 합금화 온도에 따라 1000nm x 1000nm로 절단 후 초음파 세척을 하였다. 일반적으로 나노 인덴테이션 시험에서 모재의 영향을 받지 않는 도금층의 적정 압입깊이는 도금층 두께의 10%인 것으로 알려져 있다.[5] 그러나 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 소재 특성상 표면이 균일하지 못하고 도금층 내 균열 및 기공이 존재할 수 있으므로 도금층 두께의

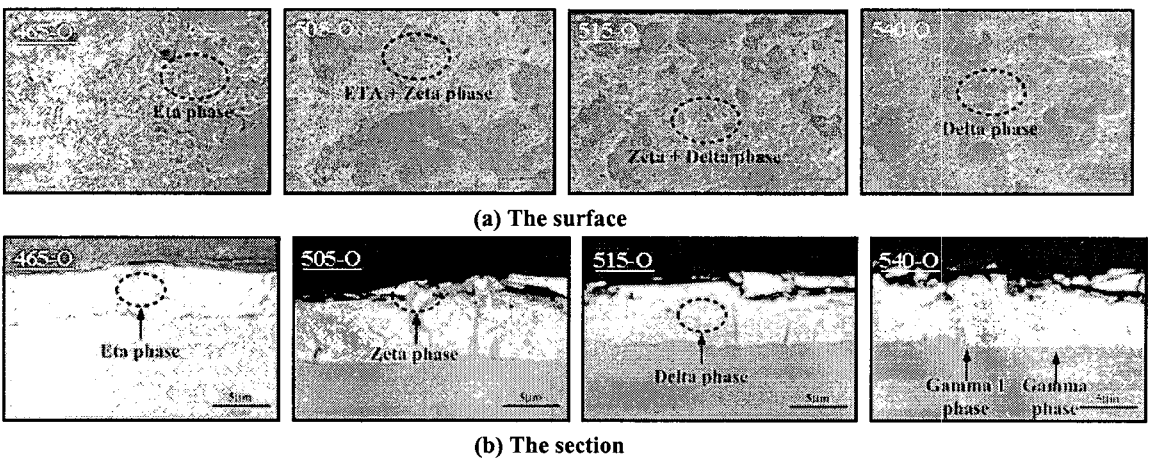


Fig. 1 Scanning electron micrograph of coating layer on annealed temperature of GA

약 6.7%(400nm)의 압입깊이로 10 회 이상 반복 시험하였다. 시험은 도금층뿐만 아니라 도금층을 제외한 모재에 대해서도 수행되었다. Table 1 에 일반적인 시험조건을 제시하였다.

나노 인덴테이션 시험 결과 합금화 온도별 GA 강판 도금층의 정확한 경도와 탄성계수를 얻기 위해 가장 중요한 것은 모재 및 도금층 표면 형상의 영향을 받지 않는 도금층의 적정 압입깊이를 결정하는 것이다.[6, 7] 이에 나노 인덴테이션 시험 결과 변위에 대한 하중곡선의 로딩(Loading) 곡선에서 변곡점이 생기지 않는 도금층 전체 두께의 6.7%에 해당하는 400nm로 압입하였다.

Table 2 에는 나노 인덴테이션 시험결과를 나타내었다. 시험결과 Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 의 그래프를 도출하였다. Fig. 2 는 400nm 로 시험한 결과로 나타난 하중-변위 곡선이다. 합금화 온도가 높은 GA 강판일수록 도금층의 경도가 증가하기 때문에 최대하중이 높게 나타남을 알 수 있었고, 압입깊이가 400nm 일 때 최대하중 21.4mN 이 나타났다. 탄성회복 후 잔류압입깊이는 330nm 로 탄성회복량은 약 70nm 이다. Fig. 3 과 Fig. 4 는 압입깊이에 대한 도금층에 대한 탄성계수와 경도를 나타낸 것이다. 측정 결과에서 초기에는 압입 크기 효과(Indentation Size Effect)와 표면거칠기 효과 등으로 인해 곡선의 급격한 변화를 관찰할 수 있었다. 따라서 100nm 이후의 탄성계수 및 경도 분포 평균값을 도금층의 기계적 물성치로 결정하였다.

Table 1 Conditions for nanoindentation test

Conditions	Value
Surface Approach Sensitivity	30%
Surface Approach Velocity	10nm/sec
Poisson's Ratio of Specimen	0.3
Humidity	31% ~ 41%
Room Temperature	23.5°C ~ 24.5°C
Tip	Berkovich Diamond

Table 2 Experimental results of nano indentation

Annealed Temperatures	Indentation depth	Modulus	Hardness	Maximum load
465°C	400nm	107.3GPa	2.168GPa	21.5mN
505°C		157.4GPa	3.287GPa	18.2mN
515°C		170.3GPa	3.455GPa	16.5mN
540°C		180.3GPa	5.269GPa	10.3mN

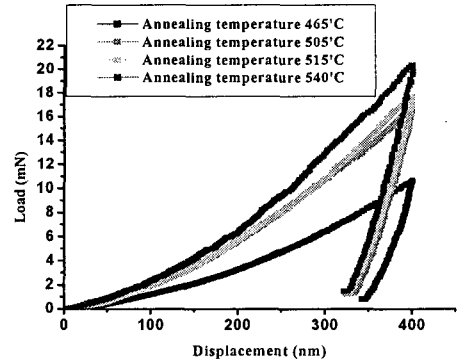


Fig. 2 Plots of load versus displacement for film of galvannealed sheet steel at 400nm

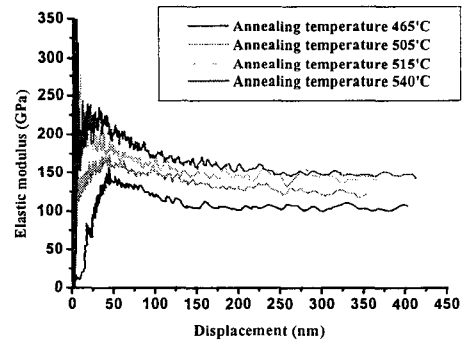


Fig. 3 Plots of elastic modulus versus displacement for film of galvannealed sheet steel at 400nm

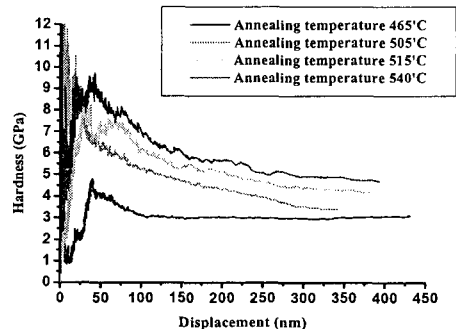


Fig. 4 Plots of hardness versus displacement for film of galvannealed sheet steel at 400nm

4. 나노 스크래치 시험

Fig. 5 는 나노 스크래치 시험의 개략도 및 시험 조건을 나타낸 것이다. 시험 조건은 스크래치 속도가 10nm/sec 일 때 나노 스크래치 하중을 20, 40, 50mN 으로 변화시켜 합금화 온도별 GA 강판의 표면 미세 도금층을 500 μ m 로 스크래치 하였다. 또한 하중이 20mN 일 때 속도를 5, 10, 15, 20nm/sec 로 변화시켜 수행하였다.

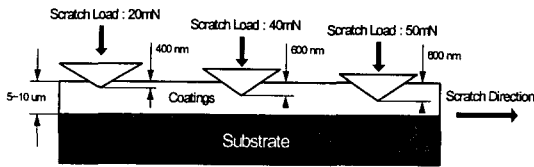


Fig. 5 Conditions of nano-scratch test

Table 3 Conditions for nano scratch test

Conditions	Value
Surface Approach Sensitivity	30%
Surface Approach Velocity	10nm/sec
Allowable Drift Rate	0.15
Humidity	30~35%
Temperature	23.5°C
Scratch Distance	500 μ m

Fig. 6 은 일정한 스크래치 속도(10nm/sec)에서 스크래치 하중의 변화에 따른 합금화 온도별 GA의 마찰계수 변화를 나타낸 것이다. 시험 결과 GA 강판의 합금화 온도가 증가하고 스크래치 하중이 증가할수록 마찰계수는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 도금층 표면에 작용하는 스크래치 하중이 작을수록 합금화 온도에 따라 마찰계수의 변화가 크게 나타나고 스크래치 하중이 클 때 합금화 온도별 마찰계수의 차이가 작게 나타남을 확인할 수 있었다. 이것은 GA 강판 도금층의 특성상 합금화 온도가 증가할수록 표면 미세 도금층의 경도가 증가하기 때문에 마찰계수가 감소하는 것으로 사려된다.

Fig. 7 은 일정한 스크래치 하중(20mN)일 때 스크래치 속도의 변화에 따른 합금화 온도별 GA 강판의 마찰계수 변화를 나타낸 것이다.

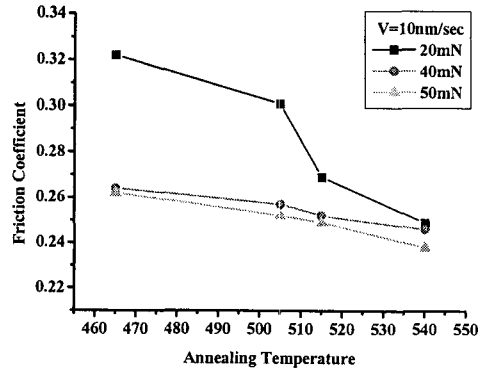


Fig. 6 Friction coefficient in nano-scratch test according to scratch loads

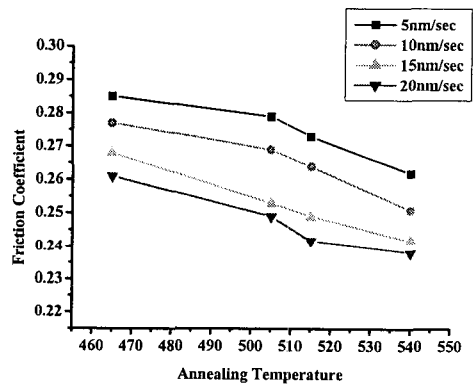


Fig. 7 Friction coefficient in nano-scratch test according to scratch velocities

시험 결과 GA 강판의 합금화 온도가 증가하고 스크래치 속도가 증가할수록 표면 미세 도금층의 마찰계수는 감소하는 것으로 나타났다.[8] 일반적으로 GA 강판의 경우, 합금화 온도가 증가하면 도금층 내 Zn 과 Fe 의 확산이 증가하여 ζ 상이 감소하고 Γ , Γ_1 과 δ 상이 증가한다. 이는 도금층의 경도를 전체적으로 상승시키는 역할을 한다. 따라서 GA 합금화 온도의 증가에 따른 도금층 경도 상승에 의해 마찰계수는 감소하였다.

7. 결론

본 연구에서는 GA 강판의 합금화 온도별 도금층에 대한 SEM 촬영을 통해 표면 미세 도금상을

참 고 문 헌

분석하였다. 또한 나노 인덴테이션과 비커스 경도 시험기를 통한 도금층의 기계적 특성과 나노 스크래치를 통한 표면 미세 도금층의 마찰특성을 분석하였다. 이때 시험 조건의 변화에 따른 영향을 고찰하였으며 이 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 나노 인덴테이션 시험에서 GA 강판의 합금화 온도별 표면 미세 도금층에 대한 400nm 압입 시 최대 하중은 21.4mN 이었으며 합금화 온도가 증가할수록 최대하중이 증가하였다.

(2) 비커스 경도 시험에서 압입 하중이 작을수록 GA 강판의 합금화 온도가 증가할수록 비커스 경도가 증가하였다.

(3) 나노 스크래치 시험에서 일정한 스크래치 속도(10mn/sec)에 대한 압입 하중(20, 40, 50mN)의 변화 시 압입하중이 작을수록 표면 미세 도금층에 대한 마찰계수는 작게 나타났으며 GA 강판의 합금화 온도가 증가할수록 마찰계수가 작게 나타났다.

(4) 나노 스크래치 시험에서 일정한 압입 하중(20mN)에 대한 스크래치 속도(5, 10, 15, 20nm/sec)의 변화 시 스크래치 속도가 빠를수록 표면 미세 도금층에 대한 마찰계수는 작게 나타났다.

후 기

본 연구는 2005 년도 POSCO 사외위탁 연구과제의 지원에 의하여 연구되었습니다.

- [1] Meuleman, D. J., Denner, S. G. And Cheng, F. L., "The effect of zinc coating on the formability of automotive sheet steels", SAE paper, No. 840370, 1984.
- [2] A. R. Marder, "The metallurgy of zinc-coating steel", Progress in Materials Science 45, 191-271, 2000.
- [3] Tlustý, J., Smith, S. and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 517-521, 1990.
- [4] Anthony C. Fischer-Cripps, "Nanoindentation", Springer-Verlag, pp. 20-29, 2001.
- [5] W. C. Oliver, G. M. Pharr, "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments", J. Master. Res., Vol. 7, No. 6, pp. 1564-1583. 1992.
- [6] Lu C. J., Bogy D. B., "The effect of tip radius on nano-indentation hardness test", Int. J. OF Solids structures, Vol. 32, No. 12, pp. 1759-1770, 1995.
- [7] Bhattacharya A. K., Nix W. D., "Analysis of elastic and plastic deformation associated with Indentation testing of thin Films on Substrates," Int. J. of Solids Structures, Vol. 24, No. 12, pp. 1287-1298, 1988.
- [8] X. Li, B. Bhushan, A review of nanoindentation continuous stiffness measurement technique and its applications, Materials characterization, 48, 11-36, 2002.