

나노인덴테이션 시험과 유한요소해석을 이용한 합금화 온도별 GA 강판의 코팅층 체적 거동 결정

전성진¹ · 이정민¹ · 김병민[#]

Determination of Mechanical Properties for Coating Layer of Galvannealed Sheet Steel using Nano-indentation and FEM

S. J. Jeon, J. M. Lee, B. M. Kim

Abstract

In the modern days, a galvannealed 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 properties of GA, the several tests such as nanoindentation and FE-analysis were executed. For this goal use is made of the method of neural networks. 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.

Key Words : Nanoindentation(나노인덴테이션), Coated Layer(코팅층), Mechanical Properties(기계적 물성치), Frictional Characteristics(마찰특성), Galvannealed Sheet Steel(용융아연도금강판)

1. 서론

최근 들어 자동차 차체의 수명연장을 위한 대책으로 종래의 냉연강판을 대신하여 고내식성의 아연도금강판의 사용이 증가되고 있다. 이러한 아연도금강판은 스탬핑 공정중에 발생하는 코팅층 손상(박리:Powdering)에 따른 성형성 저하와 코팅층 탈락에 의한 강판의 내식성 저하 등과 같은 새로운 문제점들을 야기시키고 있다. 일반적으로 도금강판에서 스탬핑 성형가능 여부는 코팅층의 마찰과 윤활특성이 결정적인 영향을 미치며 이것은 코팅층의 야금학적 특성과 밀접한 관련이 있다고 보고되고 있다[1].

그러므로 제품의 고정밀 및 고품질화를 실현하기 위해서는 코팅층에 대한 기계적 특성을 명확히 규명하는 것이 반드시 필요하다. 따라서 본 연구는 합금화 용융아연도금강판(Galvannealed Sheet Steel, GA)의 코팅층 기계적 특성을 평가하기 위해 수행되었다. 기계적 특성은 코팅층의 항복강도(Yield Stress)로 정의되며 이것은 나노 인덴테이션 시험과 유한요소해석 및 신경망 이론을 통해 획득되었다. Fig. 1 은 GA 강판의 생산공정과 코팅층의 합금화 과정(Fe10%-Zn)을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 합금화 온도(Fig. 1 Heating Furnace)에 따라 총 4 가지 (465℃, 505℃, 515℃, 540℃ 이후: 465, 505, 515, 540)의 GA 강판을 채택하였다.

1. 부산대학교 정밀기계공학과
교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과
E-mail : bmkim@pusan.ac.kr

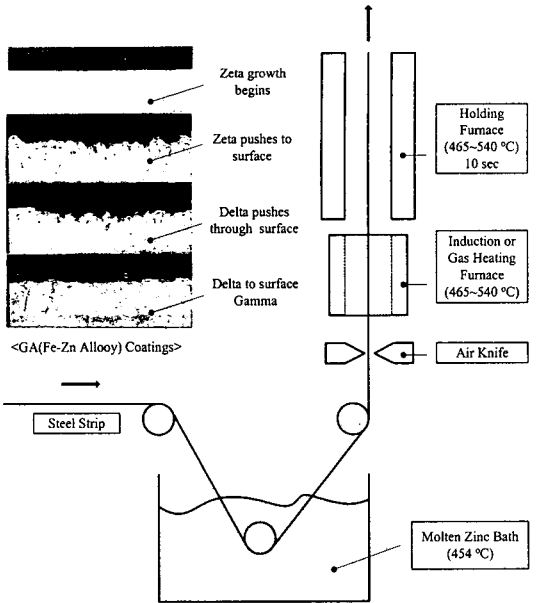


Fig. 1 The stages of alloying between the steel strip and the molten zinc coating to produce “galvannealed sheet steel”

2. 코팅층의 기계적 특성 결정방법

Fig. 2 는 코팅층 기계적 특성을 결정하기 위해 본 연구에서 사용된 해석 과정을 나타낸 것이다. 먼저 나노 인덴테이션 시험을 통해 코팅층의 하중-변위 곡선을 도출한 후 유한요소해석을 위한 코팅층의 기초 물성치(탄성계수, 항복강도(나노 경도의 1/3))를 획득한다.

유한요소 해석은 코팅층의 항복강도 변화에 따른 하중-변위 곡선을 도출하고 각각의 곡선에 대한 로딩-언로딩 곡선의 함수식을 결정한다.

결정된 함수식 들은 실험을 통해 얻어진 하중-변위 곡선의 함수식과 비교되어 실험에서의 로딩-언로딩 곡선의 함수식과 일치하는 항복강도를 결정한다.

이러한 과정은 신경망 이론을 이용하여 수행되며 해석을 통해 얻어진 함수식들은 모두 신경망 이론의 초기 입력 데이터로써 사용된다.[2]

최종적으로 결정된 코팅층의 항복강도는 다시 해석을 통해 실험결과와 비교된다. 최종적으로 해석을 통해 코팅층의 하중-변위 곡선이 도출된다. 본 연구에서는 합금화 온도별 GA 강판의 항복강도를 결정하는데 까지 수행되었다.

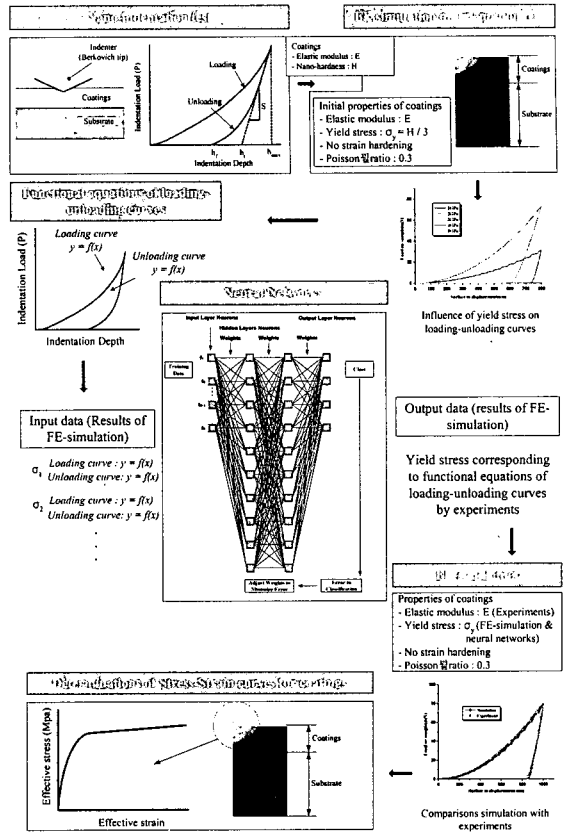


Fig. 2 Procedures for determination of mechanical properties for coatings

3. GA 강판 코팅층의 항복강도 결정

3.1 나노 인덴테이션 시험

합금화 온도별 GA 강판 코팅층의 기계적 특성은 나노 인덴테이션 시험을 통해 결정되었다. 시험에 사용된 시편은 10mm × 10mm 로 절단하여 준비하였으며, 증류수를 이용하여 초음파 세척해서 사용하였다.

나노 인덴테이션 시험은 미세 압입자(Berkovich Tip)를 코팅층 표면을 압입하고 그때 얻어지는 하중-변위(Loading-Unloading)곡선을 이용하여 수행된다. 탄성계수는 하중-변위 곡선에서 언로딩(Unloading)곡선의 초기 기울기로 정의된다. 합금화 온도별 코팅층의 평균두께는 6000 ~ 7000nm 이므로 탄성계수는 모재(Steel Strip)의 영향을 받지 않는 적정 압입 깊이에서 여러 번 실험을 수행하여 얻은 결과의 평균값을 선택하였다. 코팅층의 탄성계수와 경도는 식(1)과 (2)로부터 계산된다.

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu_s^2}{E_s} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad (1)$$

$$H = \frac{P}{A} \quad (2)$$

여기서 E_r 은 환산탄성계수, E_i 는 압입자의 탄성계수, ν_s 와 ν_i 는 각각 시편과 팁의 프와송비 (Poisson's ratio)이며 A 는 접촉투영면적을 나타낸다[3].

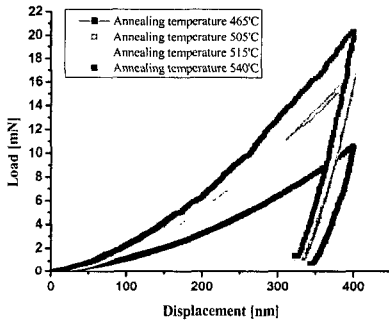


Fig. 3 Plots of load versus displacement for coatings of galvanized sheet steel at 400nm

Table 1 Experimental results of nanoindentation

Specimens		Depth	Hardness	Elastic modulus
Coated layer	465 °C	400nm	2.61GPa	126.4GPa
	505 °C		4.45GPa	138.1GPa
	515 °C		5.05GPa	147.2GPa
	540 °C		5.40GPa	150.5GPa

Fig. 3 은 합금화 온도별 GA 코팅층에 대해 압입 깊이 400nm 에서 실험한 하중-변위 곡선이고 실험 결과는 Table 1 에 나타내었다.

나노 인덴테이션 시험 결과 합금화 온도가 증가할수록 압입 하중은 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 합금화 온도가 증가할수록 코팅층 내 아연과 철의 확산이 증가하여 상대적으로 경도가 높은 Γ (Fe_3Zn_{10})와 δ ($FeZn_{10}$)상이 많이 형성되었기 때문이다. 반면에 465 의 경우, 합금화 정도가 낮은 ζ ($FeZn_{13}$)상이 많아 압입 하중은 낮게 나타난다.

3.2 코팅층 항복강도의 영향

본 절에서는 온도별 코팅층의 항복강도를 결정하기 위하여 나노 인덴테이션 시험의 유한요소해석을 수행하였다.

Table 2 Mechanical properties of coatings

Coatings	465	505	515	540
Initial yield stress (GPa)	0.87	1.48	1.68	1.8
No strain hardening				
Poisson' ratio : 0.3				
Steel Strip : $\sigma = 57.690(0.00318 + \epsilon)^{0.181}$				

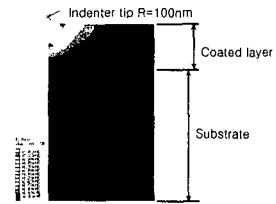


Fig. 4 2D finite element modeling of nanoindentation

Table 3 Conditions of FE-simulation

Specimens	Yield Stress (GPa)			
	465	0.5	0.7	0.9
505	1.0	1.2	1.4	1.6
515	1.2	1.4	1.6	1.8
540	1.4	1.6	1.8	2.0

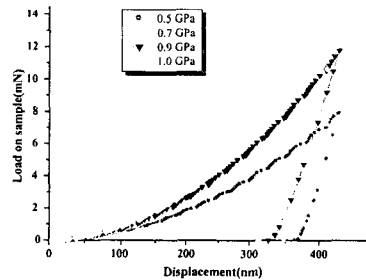


Fig. 5 Plots of load versus displacement for 465

코팅층의 정확한 물성치를 얻기 위해 Table 3 과 같이 합금화 온도별 코팅층에 따라 항복강도를 변화시켜 유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 5 는 Table 3 의 465 에 대한 해석 결과로써 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 코팅층 항복강도가 높을수록 최대하중은 높게 나타났다.

각각의 코팅층 물성치와 해석모델은 Table 2 와 Fig. 4 에 나타내었다. 해석은 ABAQUS 6.4 를 이용하였다[4].

3.3 신경망 이론의 적용

Table 4 의 함수식은 실험을 통해 얻어진 곡선 (Fig. 3)으로 이 함수식과 일치하는 항복강도 값을 도출한다. 항복강도 도출은 신경망(Neural networks) 이론을 이용하였으며 Table 3 의 해석 결과에서 얻어진 하중-변위 곡선의 함수식들은 신경망 학습을 위한 기초 데이터로써 사용된다.

Table 4 Functional equations of Fig. 3

Coatings		Functional equations
465	Loading	$Y = 5e^{-5}x^2 + 0.0063x - 0.1319$
	Unloading	$Y = 0.0019x^2 - 1.3596x + 242.73$
505	Loading	$Y = 6e^{-5}x^2 + 0.0162x - 0.078$
	Unloading	$Y = 0.002x^2 - 1.2545x + 201.53$
515	Loading	$Y = 8e^{-5}x^2 + 0.0099x - 0.1575$
	Unloading	$Y = 0.0014x^2 - 0.8514x + 128.93$
540	Loading	$Y = 9e^{-9}x^2 + 0.0145x - 0.0648$
	Unloading	$Y = 0.0016x^2 - 0.9228x + 136.16$

Table 5 Functional equations of Fig. 3

Coatings	465	505	515	540
Yield Stress (GPa)	0.85	1.47	1.63	1.75

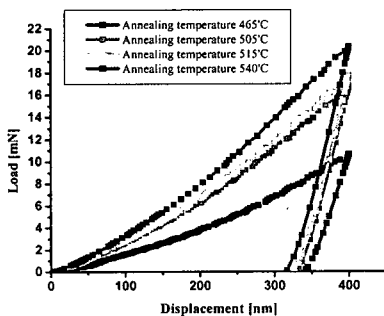


Fig. 6 Loading curves using nanoindentation FEM

Table 5 에 신경망 이론을 통해 얻어진 코팅층의 최종 항복강도 값을 나타내었다. 이러한 항복강도를 이용하여 최종적으로 나노 인덴테이션 시험의 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 6 에 합금화

온도별 하중-변위 곡선을 나타내었다. 결과는 Fig. 3 의 실험결과에 거의 일치하였다.

4. 결론

본 연구에서는 나노 인덴테이션 시험을 통해 합금화 온도별 GA 강판 코팅층의 기계적 물성치를 측정하고 항복강도 변화에 따른 유한요소 해석을 수행하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 합금화 온도가 높을수록 코팅층의 탄성계수 및 항복강도가 높게 나타났으며 항복강도의 변화에 따른 압입 하중의 크기를 비교해 본 결과, 항복강도가 클수록 압입 하중과 탄성변형량이 크게 나타났으며 신경망을 이용하여 박막에 대한 항복강도를 결정했다.

(2) GA 강판 코팅층은 합금화에 의해 매우 높은 취성을 갖고 있으므로 실제 가공경화 곡선이 거의 0 에 가까울 것으로 판단되며 해석 결과 정확한 탄성계수와 항복강도를 적용할 경우, 실제 실험과 유사한 하중-변위 곡선을 얻을 수 있다.

후기

본 연구는 학술진흥재단에서 지원하는 선도연구자 지원사업 연구과제인 “Nanoindentation 시험과 유한요소 모델링을 이용한 코팅층의 체적거동결정 및 표면처리강판 성형해석에의 적용”의 지원에 의하여 수행되었습니다.(KRF-2003-041-D00057)

참고 문헌

- [1] Yoshida, K., 1987, 프레스성형 난이 Hand Book, Chap. 5
- [2] D. C. Ko, D. H. Kim, B. M. Kim, 1991 “Application of artificial neural network and Taguchi method to perform design in metal forming considering workability”, International Journal of Machine Tools & Manufacturing, Vol.39, pp771-785.
- [3] 한준희, 이광렬, 김광석, 이상윤, 2001, “나노 인덴테이션 시험의 원리 및 응용”, 한국정밀학회지, Vol.19, No.3, pp19~26.
- [4] A. K. Bhattachary and W. D. Nix, 1988, “Analysis of Elastic and Plastic Deformation associated with Indentation testing of thin Films on Substrates” Int. J. Solids Structures, 24(12), 1287-1298.