

표면처리강판 코팅층의 기계적 특성결정에 관한 연구

고영호*(부산대 대학원 정밀기계공학과), 이정민(부산대 대학원 정밀기계공학과),
김병민(부산대 기계공학부)

Determination of the mechanical properties of coated layer in the sheet metal

Y. H. Ko(Pre. Mech. Eng., PNU), J. M. Lee(Pre. Mech. Eng., PNU),
B. M. Kim(Mech. Eng. Dept, PNU)

ABSTRACT

In recent years, various forms of indentation testing have been increasingly used to determine the material properties of specimens. This technique, particularly the nano-indentation method, has been extended to the testing of coating systems in order to calculate the individual properties of the thin coatings and the substrates. However, the interpretation of the test data to achieve this is complex and continues to be a widely studied subject. Based on the finite element method of coated surfaces indented by a Berkovich diamond tip, this paper describes methods for combining FEM and experimental indentation testing to determine coating modulus and hardness independent of substrate effects. Using this proposed methodology, testing and FEM to measure coefficients of friction of sheet steel for outer panel were studied.

Key Words : Nanoindentation (압입 실험), Coated layer (코팅층), Finite element (유한요소법), Berkovich diamond tip (베르코비치 압자), Mechanical properties (기계적 물성치), Frictional characteristics (마찰특성),

1. 서론

최근 들어 자동차 차체의 수명연장을 위한 대책으로 종래의 냉연강판을 대신하여 아연도금 강판으로 대표되는 고 내식성 표면처리강판의 사용증가에 따라 스텝핑 공정중에 도금층의 손상에 의한 박리 및 탈락된 도금피막에 의한 외판 표면의 흠 발생 등에 의하여 내식성 및 표면품질 측면에서 새로운 문제점들이 야기되고 있다. 스텝핑 안정 성형가능 여부에 결정적 역할을 하는 도금층의 마찰과 윤활특성은 도금층의 야금학적 특성과 밀접한 관련이 있다고 보고되고 있다. 그러나 야금학적 특성이 일반적으로 강판의 마찰특성과 관련이 있다고 알려지고 있는 표면 경도와 같은 코팅층 특성에 대한 연구는 행해지지 않고 있다.

표면처리강판과 같은 일종의 이종재료 코팅층에 대한 기계적 특성을 결정하기 위한 실험 방법들 중에서 나노인덴테이션 실험은 인장 실험과 같은 여러

가지 전통적인 방법들과 비교해서 많은 장점들을 가지고 있다. 특히, 표면처리강판 코팅층에 대한 연구에서 이러한 방법은 얇은 코팅층과 모재 각각의 특성을 결정하는데 아주 유용하다. 나노인덴테이션에서 코팅층 경도는 압입공정 동안에 잔류 압입 형상을 측정함으로써 얻어지고, 탄성계수는 일반적으로 하중-변위 곡선에서 계산되어진다. 시편의 탄성계수를 계산하기 위해서, 하중-변위 곡선의 언로딩(Unloading) 부분에 대한 해석이 아주 일반적이는데, 이것은 언로딩 곡선의 최대 하중 부분이 단순한 형상을 지닌 인덴터에 대해서 선형적이고 탄성인 구간으로 가정되기 때문이다. 하지만 언로딩 동안에 실험한 소재의 탄성회복량이 크게 나타날 경우에, 이것은 큰 강성을 지닌 하드코팅(Hard coating)에 적용되고 언로딩 곡선이 해석 모델과 잘 일치하지 않는다. 따라서, 탄성회복부분에서 비선형적인 거동과 균열 발생은 계산과정에 있어서의 보간을 필요로 한다.

본 연구는 베르코비치 다이아몬드 압자를 이용해 표면처리강판 코팅층에 대하여 압입 실험을 하고,

이를 유한요소 해석결과와 비교하여 코팅층의 물성치를 결정하였다. 그리고 시편에 대한 평판 마찰 실험을 수행하여 코팅층을 적용한 마찰 해석결과와 비교하였다.

2. 나노인덴테이션 실험 및 압입공정 해석

2.1 나노인덴테이션 실험

표면처리강판 코팅층에 대한 기계적 물성치 실험은 베르코비치 팁을 부착한 Nanoindenter® XP(MTS)를 이용하여 수행하였다. 시편은 나노 압입실험을 위하여 10mm × 10mm로 절단하여 준비하였으며, 증류수를 이용하여 초음파 세척하여 사용하였다.

이 실험에서 사용된 연속강성측정법(Continuous stiffness measurement)은 기본적인 압입깊이 제어과정에 비교적 높은 진동수의 진동을 가하여 연속적인 탄성계수 즉, 하중제거곡선의 초기 기울기 값을 얻는다. 이 데이터를 Oliver & Pharr가 제안한 식에 대입함으로써 압입 깊이에 따른 경도(Hardness)와 탄성계수(Young's modulus)의 변화를 얻게 되는데, 이 값들은 모재의 영향을 받지 않도록 반복 실험을 수행하여 얻은 적정 압입 깊이에서 여러 번 실험을 수행하여 얻은 결과의 평균값을 선택하였다. 시편의 탄성계수와 경도는 보정상수를 사용하여 식(1)과 식(2)로 계산하였다. 여기서 E_r 은 환산탄성계수, E_s 는 압자의 탄성계수, ν_s 와 ν_i 는 각각 시편과 압자의 프와송비(Poisson's ratio)이며 A는 접촉투영면적을 나타낸다. Table.1은 인덴테이션 실험조건을 나타내었다.

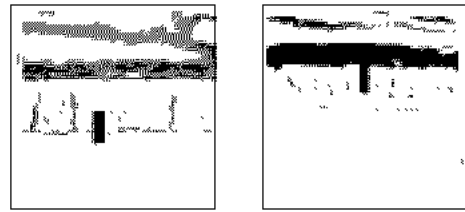
$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \quad (1)$$

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

Table.1 Conditions for nanoindentation test

Conditions	Value
Surface approach sensitivity	30%
Surface approach velocity	10mm/s
Allowable drift rate	0.05
Poisson's ratio of specimen	0.3
Harplify	21%, 33%
Temperature	23.5°C ~ 24.5°C
Tip	Berkovich diamond

Fig.1에서 볼 수 있듯이 표면처리강판 코팅층의 두께는 8~9μm이며, 소재 특성상 표면이 균일하지 못하고 균열과 기공이 존재할 수 있으므로 코팅층 두께의 10~12%정도로 반복 압입 실험을 수행하였다.



(a) Electrolytic galvanized (b) Galvanized

Fig.1 Scanning electron micrograph of each specimens

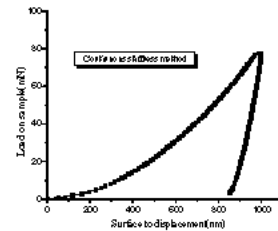


Fig. 2(a) Plots of load versus displacement for film of electrolytic galvanized at 1000nm

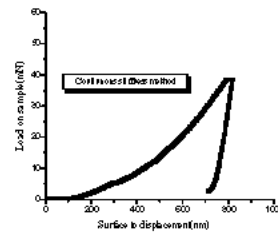


Fig. 2(b) Plots of load versus displacement for film of galvanized at 200nm

Fig.2(a)는 전기도금강판 코팅층에 대해 1000nm 압입 실험한 결과이며 최대 압입 하중이 77.6mN이다. Fig.2(b)는 용융도금강판 코팅층에 대해 800nm 압입 실험한 하중-변위 곡선이고 실험 결과는 Table.2에 나타내었다.

Table.2 Experimental results of nanoindentation test

	Indenter depth	Modulus	Hardness
Electrolytic galvanized	1000nm	130GPa	4.23GPa
Galvanized	800nm	110GPa	2.01GPa

2.2 압입 공정 해석

본 연구에서는 나노인덴테이션 실험에서 도출한 하중-변위 곡선과 유한요소해석 결과를 일치시켜 코팅층 기계적 물성치를 결정하는 기초연구의 일환으로 FEM 패키지인 ABAQUS 6.3을 이용하였다. 2차원 나노인덴테이션 공정에서 실제 Berkovich diamond 압자의 팁 라운드(Tip round)가 40nm이상이고 반복

된 실험으로 인한 마모를 고려하여 100nm로 하였으며 면각은 Fig.3과 같이 Nano-indenter XP(MTS) 메뉴얼의 치수정보를 참고하여 모델링하였다. 해석은 로딩과 언로딩 단계로 나누었으며 ABAQUS/Explicit를 이용하였다.



Fig.3 Schematic of indenters



Fig.4 2D finite element modeling of nanoindentation

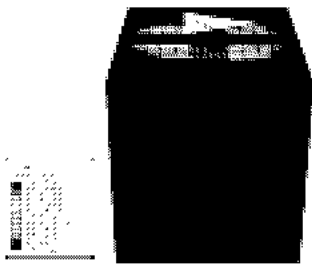


Fig.5 3D finite element modeling of nanoindentation

Fig.4는 2차원 압입 공정 해석 모델로써 소재부분의 메쉬는 축대칭 요소(CAX4R element type) 7200개로 구성하였으며 메쉬크기는 대칭축에 가까워질수록 작아진다. Fig.5는 3차원 압입 공정 해석 모델이며 법은 600여개의 강체요소(R3D4 element type)로 구성하였고 소재는 45000여개의 8노드 축소 적분요소(C3D8R element type)로 구성하였다. 해석은 2차원 모델로 실험에서 도출한 하중-변위 곡선과 해석 결과를 일치시키고 이를 3차원 모델에 적용하여 압흔을 예측하였다.

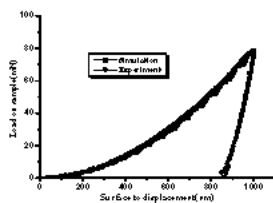


Fig.6 Comparison of curves between experimental and simulated for electrolytic galvanized

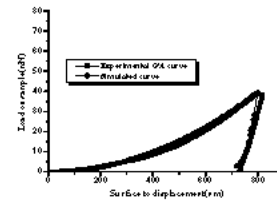


Fig.7 Comparison of curves between experimental and simulated for galvanized

압입 공정에 대한 해석에서 전기도금강판은 항복강도를 1.96GPa, 용융도금강판은 13.2GPa로 각각 결정하였으며 이를 적용하였을 경우 Fig.6과 Fig.7에서 보는 바와 같이 7%이내의 오차범위에서 실험결과와 해석 결과가 일치하였다.

3. 마찰 실험 및 해석

3.1 마찰 실험

본 실험은 나노인덴테이션 실험에서 결정한 코팅층 물성치를 적용하여 표면처리강판 마찰특성을 파악하기 위하여 실시하였다. 금형은 열처리후 Cr도금한 SKD11을 사용하였으며 표면조도는 $0.3 \pm 0.05 \mu\text{m}$ 로 조절하였다. 실험은 무윤활 상태에서 14kgf/cm^2 의 가압력으로 수행되었다. 마찰계수는 (3)식과 같은 콜롱 마찰식을 이용하여 구했으며 Fig.8에 실험 계략도를 나타내었다.

$$\mu = \frac{F}{2N} \quad (3)$$

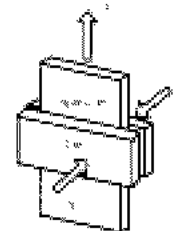
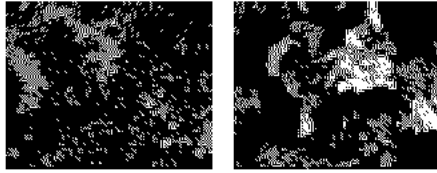


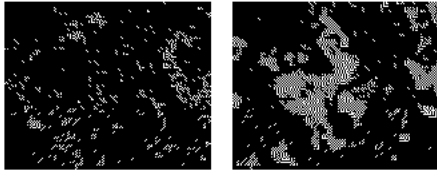
Fig.8 Schematic Drawing of Friction Test

60mm의 인출거리에서 전기도금강판과 용융도금강판은 각각 60.1kgf, 52.9kgf의 하중이 요구되었다. 이는 표면코팅층 특성과 형상의 영향이 큰 것으로 판단된다. Fig.9는 마찰시편의 실험전후의 표면상태를 나타낸 것이다. 전기도금강판은 실험 전 조도가 1.34 μm 였으나 실험 후 1.19 μm 로 감소하였으며 Fig.10에 나타낸 용융도금강판은 0.79 μm 에서 0.59 μm 로 감소하였다.



(a) Before friction test (b) After friction test

Fig.9 The optical micrographs image for electrolytic galvanized (×500)



(a) Before friction test (b) After friction test

Fig.10 The optical micrographs image for galvanized (×500)

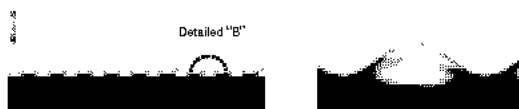
3.2 압입 공정 해석

평판 마찰 실험에 대한 해석은 ABAQUS 6.4를 이용하였으며 메쉬는 CPS4R로 모재는 15449개이고 코팅층은 67159개로 구성되었다. 금형과 코팅층 사이의 마찰계수는 실험에서 (3)식을 적용하여 계산하였으며 전기도금강판은 0.153, 용융도금강판 0.139를 해석에 적용하였다. 인출거리는 실험과 동일하게 60mm로 하였고 조도 측정 결과에 따라 코팅층의 표면조도(Average roughness)와 산과 골의 밀도를 다르게 적용하였다.



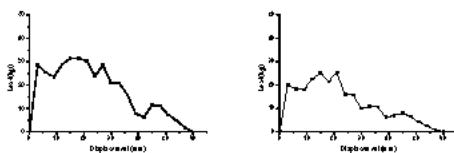
(a) Distribution of Von-Mises stress (b) detailed "A"

Fig.11 The simulation result of electrolytic galvanized



(a) Distribution of Von-Mises stress (b) detailed "A"

Fig.12 The simulation result of galvanized



(a) Electrolytic galvanized (b) Galvanized

Fig.13 The results of simulation for friction test

Fig.13은 유한요소해석결과 인출력을 나타낸 것

으로 실험결과와 유사하게 전기도금강판이 용융도금강판보다 많은 인출력을 요구하였다. 하지만 요구되는 인출력의 정량적인 비교에서는 코팅층의 형상과 모재와의 접촉 조건등으로 인하여 다소 차이가 발생하였으며 이에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

4. 결론

본 연구에서는 나노인덴테이션과 유한요소해석을 이용하여 표면처리강판 코팅층의 물성치를 결정하고, 이를 평판 마찰 실험 및 해석에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 표면처리강판과 같은 일종의 이종재료 코팅층에 대한 압입 실험에서 코팅층 두께의 12%미만에 해당하는 깊이로 압입 실험하여 신뢰성 있는 결과 도출이 가능하다.

(2) 나노인덴테이션과 유한요소 해석에서의 로딩-언로딩>Loading-Unloading)곡선을 비교함으로써 코팅층의 기계적 물성치를 결정할 수 있으며, 압입 형상도 예측할 수 있었다.

(3) 마찰 실험과 유한요소 해석 결과를 비교함으로써 코팅층의 기계적 특성을 검증하고자 하였다.

후기

본 연구는 한국산업기술재단(KOTEF)에서 지원하는 지역혁신 인력양성사업 연구과제인 “고기능, 고정도 판재성형 및 금형설계 기술개발 인력양성”(과제번호 : TS-32)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Anthony C. Fischer-Cripps, "Nanoindentation"
2. J.B.Pethica, R.Hutchings and W.C.Oliver, " Hardness measurement at penetration depths as small as 20nm." Philos. Mag. A, 48(4), 593-606, 1983
3. M.F.Doerner and W.D.Nix, "A method for interpreting the data from Depth-sensing Indentation." J.Mater.Res.,1,pp601-609,1986
4. Hahn,J.H., Lee,K.R. ,Kim,K.S. Lee,S.Y., "Principal and applications of nanoindentation test," J.of Kor. Soc. Prec. Eng., Vol.19, No.3, pp.19-26,2002
5. L. Gan, B. Ben-Nissan, "The effects of mechanical properties of thin films on nano-indentation data: Finite element analysis," Computational Materials Science 8,273-281. 1997
6. 김동환, 김병민, "Non-Vinyl Pre-coated Metal 재의 성형성에 관한 연구" 한국정밀공학회지, 제18권, 제4호, pp. 121-128, 2001.