

자동차용 합금화 용융아연도금강판의 도금층 미소물성 및 파괴 거동

박춘달*, 고대철**, 김병민#

Microproperties and Fracture Behavior of Galvannealed Coating Layer of Automobiles

Chun Dal Park*, Dae Cheol Ko** and Byung Min Kim#

ABSTRACT

Fractures of galvannealed coating layer during actual press forming in automotive applications were observed by scanning electron microscopy in order to understand fracture mechanism. Fracture behaviors of galvannealed coating layer in extra deep drawing quality steels and high strength steels have been studied by performing the tests describing the representative plastic deformation in sheet metal forming such as uni-axial tensile test, compression test, bi-axial test and plane strain test. Growth and direction of cracks were deeply related to the plastic deformation modes and history. The material properties of galvannealed coating layer were investigated by nano-indentation test equipped with Berkovich diamond indenter for the specimens. Hardness and elastic modulus of the coating layer were higher than bared steels and that was the reason for crack of coating layer. Flat friction test and drawbead friction test were performed to observe the effect of the surface morphology on the frictional characteristics. The micro-plasto hydrodynamic lubrication were appeared and played an important role in reducing the coefficient of friction.

Key Words : Galvannealed coating layer(용융아연도금층), Fracture behavior(파괴거동), Plastic deformation(소성변형), Nano-indentation test(나노인덴테이션실험), Flat friction test(평면마찰실험), Drawbead friction test(드로우비드마찰실험), Micro-plasto hydrodynamic lubrication(미소소성유체윤활)

1. 서론

합금화 용융아연도금강판은 우수한 내식성, 도장성 및 용접성을 가지고 있기 때문에 자동차 차체를 비롯한 많은 분야에서 널리 사용되고 있다.¹ 아연도금피막은 피막 자체가 용해되어 지철인 원소

재를 보호하는데, 합금화 처리에 의해 한층 더 내식성이 향상되기 때문에 합금화 용융아연도금강판이 현재 많이 사용되고 있다. 도금층은 여러가지 Zn-Fe 금속간 화합물상으로 구성되어 있는데, 그 구성상으로는 원소재의 계면부터 Γ (Fe_3Zn_{10} -bcc), Γ_1 (Fe_5Zn_{21} -fcc), δ_1 ($FeZn_7$ -hexagonal), ζ ($FeZn_{13}$ -

접수일: 2006년 7월 24일; 게재승인일: 2007년 1월 2일

* 부산대학교 정밀기계공학과

** 부산대학교 동남권부품소재산학협력혁신연구소

교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과

E-mail bmkim@pusan.ac.kr Tel (051) 510-3074

monoclinic), η (Zn)상 등으로 구성되어 있다. 이러한 금속간 화합물은 원소재에 비해 변형능이 떨어지기 때문에 프레스 성형 등의 가혹한 변형 조건에 있어서는 원소재의 변형에 따라가지 못해 도금층이 파괴되고, 분상의 박리인 파우더링과 편상의 박리인 플레이킹 현상을 야기시킨다. 박리된 도금층은 프레스 금형에 축적되어 성형품의 표면품질을 저하시키기 때문에 빈번한 금형 세척 등 여러 가지 프레스 작업성의 저하를 초래한다. 그리고 도금층의 존재는 판재 성형과정에서 마찰 거동에 영향을 미쳐, 무도금 강판과의 성형성 차이를 야기시킨다. 따라서 합금화 용융아연도금강판에 있어서의 도금층 파괴 거동과 마찰에의 영향을 파악하여 프레스 성형시의 거동을 자세히 이해하는 것이 요구된다.

합금화 용융아연도금강판의 도금층 가공성은 도금층 구조에 크게 의존한다고 알려져 있다. Urai² 등은 도금층 구조에 미치는 합금화 조건에 대해 조사하였는데, 표면층에 ζ 상이 존재하는 경우, ζ 상의 연질성에 의해 내파우더링성이 향상된다고 보고하였다. Nunomura³ 등은 3 점굽힘 시험을 통하여 인장 응력과 압축 응력을 받은 합금화 용융아연도금강판의 도금층 파괴와 변형을 관찰하였는데, 응력의 작용 방향에 따라 도금층의 파괴 양상이 달라진다고 보고하였다.

합금화 용융아연도금강판의 도금층 마찰 특성은 프레스 성형성에 큰 영향을 미친다. Kim⁴ 등은 여러 가지 도금강판에 대해 표면 특성과 마찰 특성을 분석하였는데, 표면층 금속간 화합물의 물성과 표면조도가 마찰계수에 영향을 미친다고 보고하였다. Hira⁵ 등은 접촉 압력과 인발 속도를 변경하면서 여러가지 도금강판의 마찰계수를 평가하였다. 부드러운 소재 표면이 마찰을 받을 경우, 미소소성 정수압 윤활 현상이 발생하여 소재 표면에 포집되어 있던 윤활유가 소재와 금형 사이로 유입되게 되어 마찰계수가 저하된다고 하였다. Nakamura⁶ 등은 전기아연도금강판과 용융아연도금강판에 대해 평마찰 실험과 드로우비드 마찰 실험을 실시하였다. 그들은 도금강판의 드로우비드 마찰 실험에서는 도금층의 변형이 박리 등의 현상을 일으킴으로써 마찰특성에 영향을 미침을 확인하였다.

도금강판의 표면을 구성하는 금속간 화합물층인 도금층은 도금층의 파괴 및 마찰계수 등과 밀접한 관계가 있다. Ahn⁷ 등은 인덴테이션 기술을 이용하여

여 재료의 기계적 물성치를 평가하는 방법을 연구하였으며, 특히 베르코비치(Berkovich)팁 등의 나노인덴테이션 장비를 이용하여 증착 표면 처리층이나 코팅층의 재료 물성치 평가법을 제안하였다.

본 논문에서는 합금화 용융아연도금강판에 있어 소성변형모드 및 마찰에 따른 도금층 파괴 거동을 관찰하고, 나노인덴테이션 기술을 이용하여 도금층의 특성을 평가하였다.

2. 변형 모드에 따른 도금층 파괴 거동

프레스 성형후의 도금층 파괴 형태를 관찰하기 위해 프론트 펜더(Front fender)와 프론트 사이드 바디(Front side body) 파트를 대상으로 성형 후 표면 및 단면 SEM(Scanning Electron Microscopy) 관찰을 실시하였다. 사용된 소재는 프론트 펜더의 경우 고성형성 딥드로우용 합금화 용융아연도금강판인 SGACUD 이고, 리어 사이드 바디는 고장력 합금화 용융아연도금강판인 SGARC440 이며, 자세한 소재 특성에 대해서는 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Material properties of specimens

Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	Coating Wt. (g/m ²)
SGACUD	161.3	296.6	46	60
SGARC	343.3	461	31	60

2.1 프론트 펜더의 도금층 파괴 형태

프론트 펜더는 자동차의 전반부 스타일을 결정하는 대표적인 프레스 성형 부품이다. 도금층 파괴에 미치는 변형모드의 영향을 관찰하기 위해 드로우 변형과 스트레치 변형이 주로 발생하는 영역 1 과 평면 변형이 주로 발생하는 영역 2 를 Fig. 1 과 같이 선정하였다. 그리고 각 영역은 드로우비드 통과 여부, 다이측 성형 여부 및 펀치측 성형 여부 등 성형 이력에 따른 도금층 파괴 형태를 관찰하기 위해 다섯 군데를 선정하여 조사하였다. 영역 1 과 2 의 각 관찰 위치에 대해 3 차원 레이저 용접기를 사용하여 시편을 제작하였고, 표면과 단면에 대해 SEM 관찰을 하였으며, 그 결과를 Fig. 2 에 나타내었다. 표면 SEM 결과로부터, ㉔번 위치의 도금층 파괴가 가장 심하고 ㉑번 위치로 갈수록 작고 많은 수의 도금층 파괴가 일어난다.

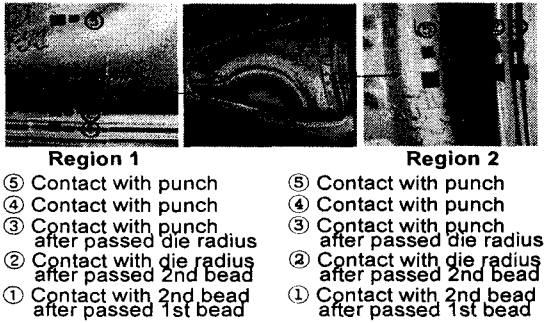
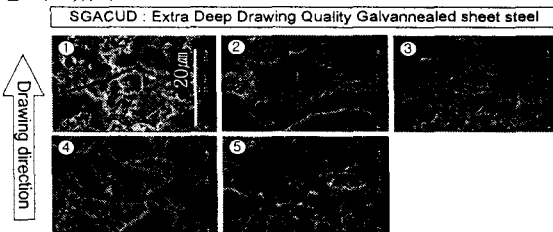
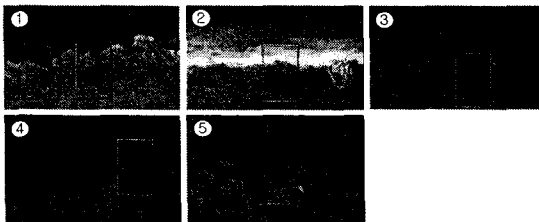


Fig. 1 Observed resins and forming state of fender

드로우비드 등의 변형을 받은 후, 다이 등에 의해 추가적인 변형을 받을 경우에는 도금층의 파괴가 현저하게 발생하는데 이는, 변형이력이 도금층의 파괴에 영향을 줄 수 있다. 또 주로 드로우 변형모드인 ①~③위치에서의 도금층 파괴 방향은 소재 유입 방향, 즉 인장 응력이 작용하는 방향과 수직하게 발생하고, 스트레치 변형모드인 ⑤ 위치에서는 도금층이 사방으로 불규칙하게 파괴됨을 볼 수 있는데, 이로부터 도금층의 파괴 방향은 변형모드 즉, 응력의 작용 방향과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 단면 SEM 에서는 도금층에 수직한 균열이 모든 위치에서 발생하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) SEM images of surfaces for region 1



(b) SEM images of sections for region 1

Fig. 2 Cracks of the coating layer observed by the SEM for front fender

2.2 프론트 사이드 바디 파트의 도금층 파괴 형태

프론트 사이드 바디는 엔진 등 자동차의 전방 무개를 지탱하고 충돌 등으로부터 승객을 보호하기 위해 주로 고장력강판으로 제조된다. 프론트 펜더와 동일한 방법으로 프레스 성형후의 도금층 파괴 거동을 관찰하였다. 사용한 소재의 물성치는 Table 1 에 나타내었다. Fig. 3 은 도금층 파괴 영역과 성형 상태를 나타내고 있다.

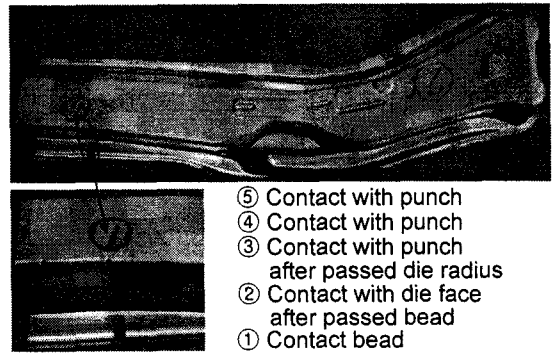
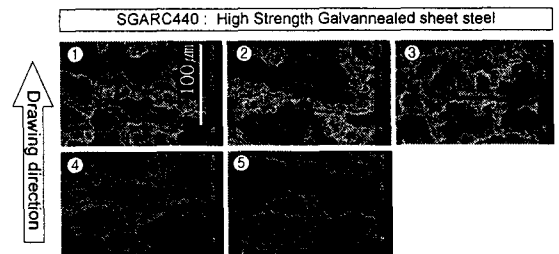
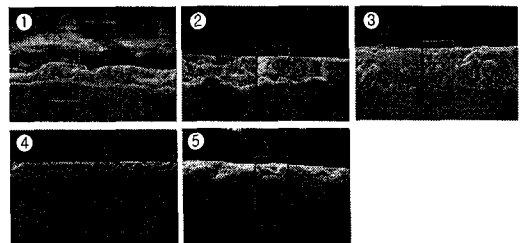


Fig. 3 Observed resin and forming state of front side body



(a) SEM images of surfaces



(b) SEM images of sections

Fig. 4 Cracks of the coating layer observed by the SEM for front side body

프론트 펜더와 동일한 방법으로 다섯 군대를 선정하여, 평면과 단면의 도금층 파괴 형태를 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 도금층 파괴는 다이 반경에서 변형을 받은 후 편치에 의해 계속적인 변형을 받고 있는 ③번 위치에서 가장 크게 발생하고 있으며, 도금층 파괴 방향은 모든 위치에서 동일하게 유입방향에 수직하게 발생하고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 관찰 위치의 변형모드는 대부분 평면 변형모드에 해당하고, 이 모드에서는 드로우모드와 거의 비슷하게 응력의 작용방향과 수직한 도금 파괴가 발생한다. 단면 SEM 이미지에서는 도금층 파괴를 잘 관찰할 수 없지만 프론트 펜더에 비해 가공 표면이 매우 평활화 되어 있음을 알 수 있다. 이는 고장력강관을 성형할 경우에는 높은 성형압력이 작용하기 때문에 도금층이 과도하게 함몰되어 평활화 되기 때문이라고 판단된다. Fig. 5는 프론트 펜더와 프론트 사이드 바디의 관찰 위치에 있어서의 도금층 균열 사이즈와 개수를 나타내었는데, 위에서 설명한 바와 같이 도금층 균열 사이즈와 크기는 변형모드와 이력에 영향을 받음을 알 수 있다.

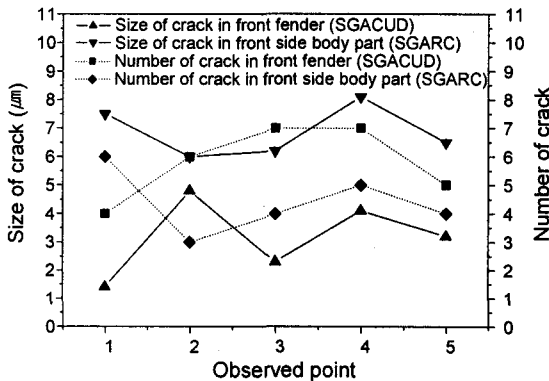


Fig. 5 Size and number of cracks in observed points for front fender and front side body

2.3 변형모드에 따른 도금층 파괴 거동의 고찰

두 종류의 양산용 프레스 부품에 대한 관찰로부터, 도금층의 파괴는 변형모드, 즉 응력이 작용하는 방향 및 변형 이력과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 본 논문에서는 프레스 성형시 발생하는 대표적인 변형모드인 단축인장 변형모드, 압축 변형모드, 이축인장 변형모드 및 평면 변형모드에 대

한 도금층 파괴거동을 고찰하기 위해 각각 단축인장시험, V-벤딩실험, 등장출실험 및 평면변형 (PSST)실험을 실시하고, 평면과 단면에 대해 SEM 관찰을 하였다. 사용한 시편은 프론트 펜더 성형에 사용된 SGACUD와 프론트 사이드 바디 성형에 사용된 SGARC440이다. 먼저 단축인장 실험에 있어서는 변형률의 영향을 고찰하기 위해 Fig. 6과 같이 변형률을 증가시키면서 실험하였다. 실험 후 시편을 절단하여 평면과 단면에 대해 SEM 촬영을 실시하였고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

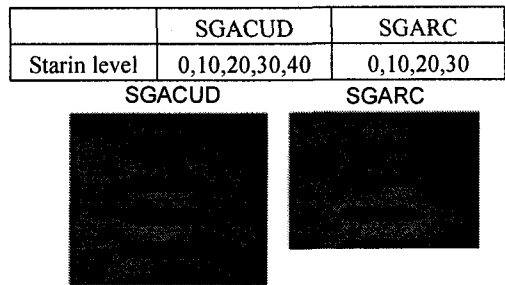


Fig. 6 Strain levels and specimens of the uni-axial tensile test

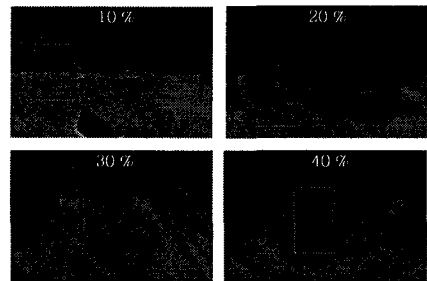
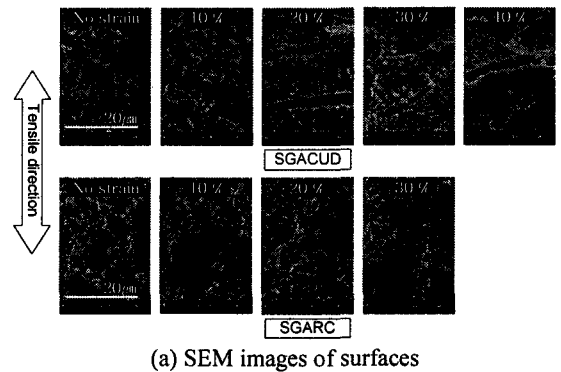


Fig. 7 Crack of coating for uni-axial tensile specimen

Fig. 7 (a)의 평면 SEM 결과로부터 단축인장 변형 모드에서는 도금층의 파괴가 인장응력의 작용방향과 수직하게 발생함을 알 수 있는데, 이는 인장응력이 도금층에 직접적으로 작용하기 때문으로 판단된다. 변형률이 증가할수록 도금층의 파괴가 증가한다. Fig. 7 (b)의 단면 SEM 결과에서는 도금층의 파괴가 원소재 방향으로 수직하게 발생함을 알 수 있다.

압축 변형모드에서의 도금층 파괴 거동을 관찰하기 위해 V-벤딩 실험을 실시하였다. 굽힘반경이 R=3, 5, 8mm 급형을 사용하여 SGACUD와 SGARC 440 을 성형후, 평면과 단면에 대해 각각 SEM 촬영을 실시하고 결과를 관찰하였다. Fig. 8 과 Fig. 9 에 실험시편과 SEM 촬영 결과를 각각 나타내었다.

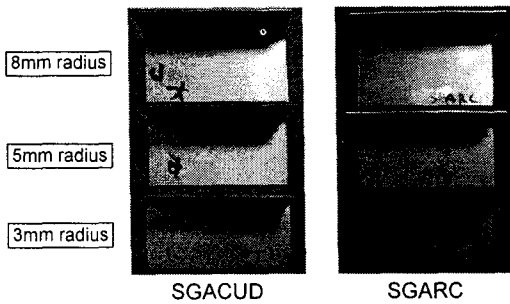
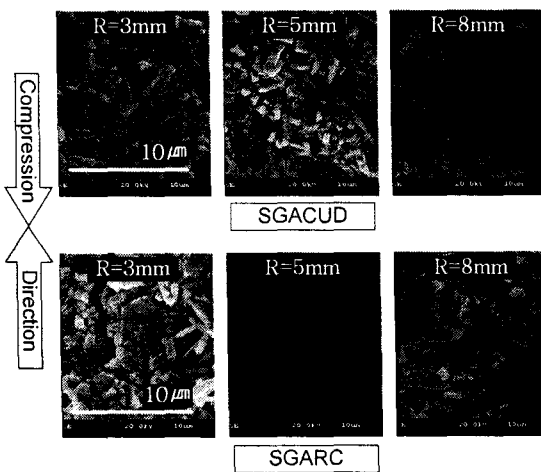
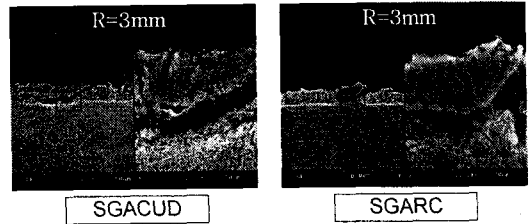


Fig. 8 Specimens of V-bending tests for compressive deformation mode



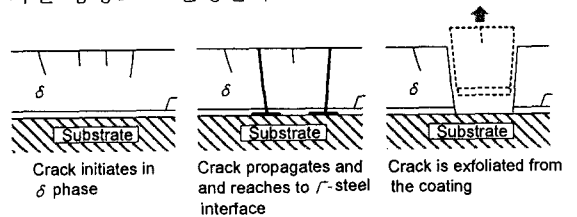
(a) SEM images of surfaces



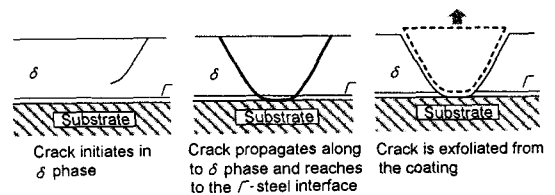
(b) SEM images of section

Fig. 9 Crack of coating for compressive deformation mode

Fig. 9 (a)의 평면 SEM 결과로부터 압축 변형 모드에서는 도금층의 파괴가 압축응력의 작용방향과 동일한 방향으로 발생함을 알 수 있는데, 이는 압축응력에 의해 발생하는 인장응력은 압축응력의 작용방향과 수직한 방향으로 작용하게 되므로 도금층의 파괴가 압축응력이 작용하는 방향과 동일한 방향으로 발생한다고 판단된다. 굽힘반경이 작은 R=3mm 에 있어서는 도금층 파괴가 크고 명백하게 나타나고 있으나 굽힘반경이 커질수록 도금층의 파괴는 줄어들음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 9 (b)의 단면 SEM 결과에서는 도금층의 파괴가 쉘기형으로서, 원소재 방향에서 어느 정도 기울기를 가진 방향으로 발생한다.



(a) Crack propagation and exfoliation of uni-axial tensile deformation mode

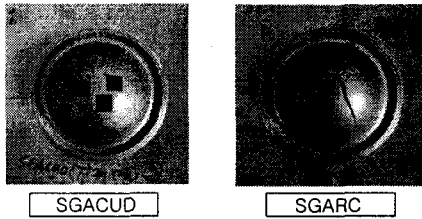


(b) Crack propagation and exfoliation of compressive deformation mode

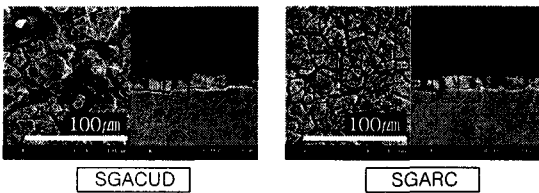
Fig. 10 Comparison of crack propagation and exfoliation between uni-axial mode and compressive mode

인장응력이 작용하는 경우와 압축응력이 작용하는 경우에 있어, 단면에서의 도금층 파괴 현상을 Fig. 10 에 비교하였다.³ 인장응력의 경우에는 δ_1 상에서 파괴가 시작되어 원소재 방향과 수직하게 전파되고, 최종적으로 박리된다. 그러나 압축응력에 대해서는 δ_1 상에서 시작한 도금층 파괴가 원소재 방향과 임의의 각도를 가지고 전파되어 Γ 상에 도달되고 최종적으로 쇄기모양의 박리가 발생된다.

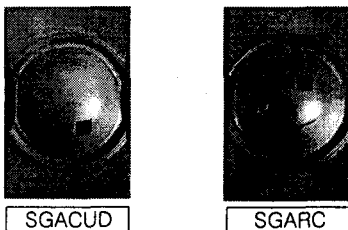
스트레치 변형모드와 평면 변형모드에서의 도금층 파괴 거동을 관찰하기 위해 금형과 시편간의 마찰을 최소화한 돔장출실험과 평면변형 장출실험(PSST)을 각각 실시하였으며 그 결과를 Fig. 11 과 Fig. 12 에 각각 나타내었다.



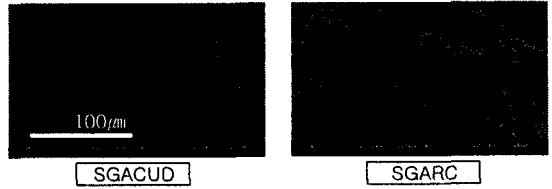
(a) Specimens of dome stretch test for biaxial deformation mode



(b) SEM images of surfaces and sections
Fig. 11 Crack of coating for stretch deformation mode



(a) Specimens of PSST test for plane strain deformation mode



(b) SEM images of surfaces
Fig. 12 Crack of coating for plane strain deformation mode

Fig. 11 에서 알 수 있듯이 장출 변형모드에서는 양방향으로 인장응력을 받기 때문에 도금층이 사방으로 잘게 부서지는 것을 알 수 있다. 평면 변형모드에서는 단축인장 변형모드와 유사한 파괴 거동을 관찰할 수 있다.

3. 도금층 파괴와 마찰특성 평가

마찰특성은 프레스 성형성에 영향을 미치는 중요한 인자중 하나이다. 합금화 용융아연도금강판의 도금층과 마찰특성의 관계를 관찰하기 위해 편면 마찰실험을 실시하였다.

3.1 편면 마찰실험

마찰에 따른 도금층의 거동을 관찰하기 위해 Fig. 13 과 같이 편면 마찰실험을 실시하였다. 시편은 변형모드 실험에서와 동일한 소재를 사용하여 실험하였는데, 도금처리를 하지 않은, 동일 종류의 비도금강판과의 비교를 위해 SPCUD (SGACUD 동일종류 비도금강판)와 SPRC(SGARC 동일종류 비도금강판)에 대해서도 실험을 실시하고, 그 결과를 도금강판과 비교하였다.

수직압력(F_N)에 따른 마찰계수와 도금층의 특성을 평가하기 위해 수직압력을 증가시키면서 실험을 실시하였다.

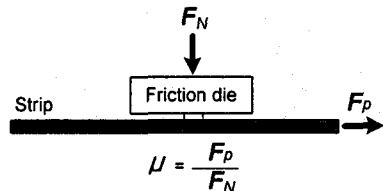
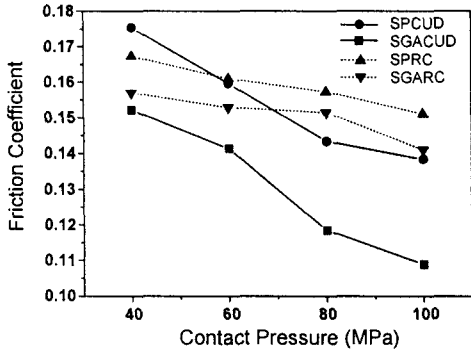


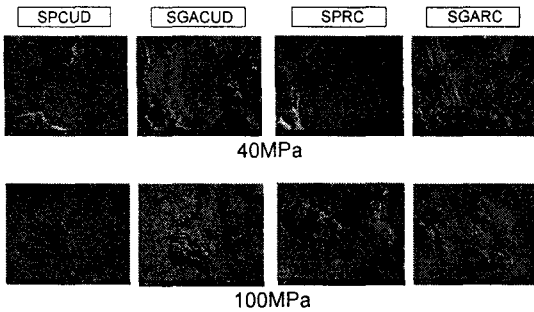
Fig. 13 Schematic of one side flat friction test

3.2 실험결과 및 고찰

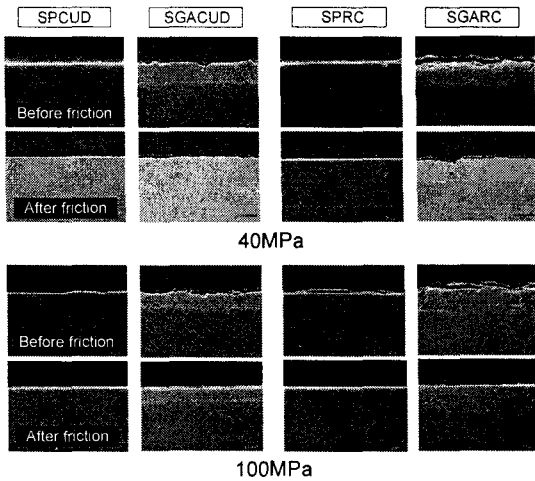
먼저, 접촉압력의 변화에 따른 마찰계수와 단면 및 표면 SEM 결과를 Fig. 14 에 나타내었다.



(a) Coefficient of friction for various contact pressures



(b) SEM images of surfaces for various contact pressures



(c) SEM images of sections for various contact pressures

Fig. 14 Coefficient of friction and SEM image for various contact pressures

Fig. 14 로부터 딥드로우강판과 고장력강판 모두 도금강판의 마찰계수가 비도금강판 보다 낮으며, 접촉압력이 증가할수록 마찰계수는 저하함을 알 수 있다. 표면과 단면 SEM 결과로부터 접촉하중이 증가하면 표면의 요철이 평활화 되면서 요철 사이에 존재하던 윤활유가 금형과 소재 사이로 침투하여 윤활성을 좋게 하고, 요철내에서의 윤활유의 정수압이 증가하여 마찰저항을 줄이는 미소소성정수압윤활(micro-plasto hydrodynamic lubrication)의 발생에 의해 마찰계수가 저하된다고 판단된다. 이러한 현상은 비도금강판 보다 도금강판에서 더욱 강하게 나타나기 때문에 도금강판의 마찰계수가 더 작으며 접촉하중이 증가할수록 그 차이는 커지는 것을 딥드로우강판의 결과로부터 확인할 수 있다.

4. 나노인덴테이션을 이용한 도금층의 미소-물성치 평가

4.1 나노인덴테이션

경도시험법은 소재의 기계적 물성을 평가하는 방법 중에서 간편, 용이성으로 인해 가장 널리 사용되는 역학시험법 중의 하나이다. 특히, 모재 위에 증착시킨 박막이나 코팅층의 물성 평가는 모재의 물성을 완전히 배제하면서 측정되어야 하기 때문에 수 μ m 두께의 박막이나 코팅층의 경도시험을 위해서는 나노인덴테이션 기법을 이용한다. 나노인덴테이션 실험에 의해 얻어지는 기계적 물성치는, 압입하중에 따른 압입깊이 곡선으로부터 소재가 가진 탄성계수, 미소경도 및 최대하중 등이다.

본 연구에서는 합금화 용융아연도금강판의 도금층과 비도금강판의 특성을 비교, 평가함으로써 도금층 파괴의 원인을 파악하고자 나노인덴테이션 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 나노인덴테이션 장비(Fig. 15)는 베르코비치(Berkovich) 다이아몬드 팁을 장착한 Nano-indentation XP(MTS) 장비이다.



Fig. 15 Main device and controller of Nano-indentation XP(MTS)

실험조건은 Table 2 에 요약하였다.

Table 2 Conditions of nano-indentation test

Surface approach sensitivity	30 %
Surface approach velocity	10 nm/sec
Allowable drift rate	0.15
Poisson's ratio of specimen	0.3
Humidity	30~32 %
Temperature	23~24 °C
Indentation depth	1000 nm

4.2 미소-물성치 측정 결과 및 고찰

나노인덴테이션 실험을 통해 얻은 네 종류의 강판의 압입깊이-하중 그래프를 Fig. 16 에 나타내었으며, 각 재료 물성치를 Table 3 에 정리하였다.

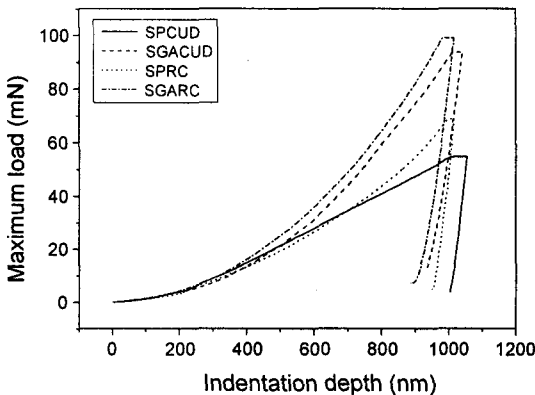


Fig. 16 Indentation depth versus load curve for specimens

Table 3 Micro-material properties of specimens measured by nano-indentation test

Classification		Hardness (GPa)	Elastic Modulus (GPa)	Maximum Load (mN)
GA	SGACUD	4.11	229.3	95.5
	SGARC	4.40	254.4	99.1
CR	SPCUD	2.237	195.7	54.5
	SPRC	2.925	204.9	67.5

Table 3 으로부터 도금강판이 비도금강판 보다 표면 경도가 높고 탄성계수도 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 물성 차이는 도금강판에 있어 도금층과 기저소재의 차이로 간주할 수 있다. 따라서, 도금

층은 기저소재에 비해 높은 경도와 탄성계수 등에 의해 상대적으로 취성이 강하고 변형능이 작아서 프레스 성형 등에서 기저소재의 변형에 따라가지 못하고 파괴된다고 생각된다.

압입하중과 깊이로부터 경도 및 탄성계수를 계산하기 위해 다음의 수식을 사용하였다. 즉, 미소경도는

$$H = \frac{P}{A} \quad (1)$$

여기서, A 는 접촉면적을 나타내며, P 는 압입하중으로서 다음과 같다.

$$P = \frac{4E_r a^3}{3R} \quad (2)$$

여기서, 탄성계수 E_r 은

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_f^2)}{E_f}$$

이다.

5. 결론

합금화 용융아연도금강판의 도금층은 여러가지 금속간 화합물로 구성되어 있으며, 도금층의 파괴는 성형 시 나타나는 변형 모드와 밀접한 관계가 있었다. 마찰 시 도금층은 함몰되면서 미소소성정수압윤활 상태가 발생하여 마찰이 저하되었다. 그리고 도금층과 비도금강판 표면의 미소-물성치 비교 결과, 도금층의 경도와 탄성계수가 비도금강판의 표면보다 높았으며, 그 결과로 성형 시 도금층이 모재의 변형에 적응하지 못하고 파괴되었다.

본 연구를 통하여 도금층이 파괴되는 원인을 파악할 수 있었으며, 부분적으로 마찰계수를 저하시키는 요인으로 작용하여 마찰이 심하게 발생하는 드로우 성형에서, 성형성을 향상시킴을 알 수 있었다. 그러나, 파우더링과 플레이킹 등의 형태로 파괴된 도금층이, 금형 내부에 잔존하여 제품의 표면에 스크래치를 발생키는데, 이에 대한 연구가 계속적으로 요구된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Marder, A. R., "The Metallurgy of Zinc-coated Steel," Progress in Materials Science, Vol. 45, pp. 191~271, 2000.
2. Urai, M., Iwaya, J., Iwai, M. and Arimura, M., "Effects of Press-forming Conditions and Coating Structure on Flaking Phenomenon in Galvannealed Steel Sheet," Kobe Technical Report, Vol. 17, No.2, pp.29~32, 1997.
3. Nunomura, Y. and Takasugi, T., "Plastic Deformation and Fracture Behavior of Galvannealed Coating," ISIJ International, Vol.43, No.3, pp.454~460, 2003.
4. Kim, Y. S., Nam, J. B. and Choi, W. J., "A Study of Frictional Characteristics of Galvanized Sheet Steels for Automobiles," Journal of the KSME, Vol. 14, No. 6, pp. 1474~1486, 1996.
5. Hira, T., Yarita, I., Yasuda, A. and Abe, H. "Frictional Behavior of Coated Steels in Sheet Forming," Journal of the JSTP, Vol. 34, No. 393, pp. 1141~1146, 1993.
6. Nakamura, S., Yoshida, A., Nishimoto, A. and Ono, T., "Study on Method of Evaluation for Frictional Characteristics in Coated Steel Sheets," IDDRG Working Group Meeting, 1990.
7. Ahn, J. H., "Analysis and Development of Continuous Indentation Techniques for Evaluating Standard Tensile Flow Properties of Micromaterials," Thesis of Seoul National University, 2001.