

# 합금화 용융아연 도금강판의 가공시 손상모델을 이용한 도금층 파우더링에 관한 유한요소 해석

김동욱<sup>1</sup>·김성일<sup>2</sup>·장윤찬<sup>3</sup>·이영석<sup>#</sup>

## Finite Element Analysis of Powdering of Hot-dip Galvanized Steel using Damage Model

D. W. Kim, S. I. Kim, Y. C. Jang, Y. Lee

### Abstract

Coating of Hot-dip galvanized steel consists of various Fe-Zn intermetallic compounds. Since the coating is hard and there for is very brittle, the surface of steel sheet is easy to be ruptured during second manufacturing processing. This is called as powdering. In addition, forming equipment might be polluted with debris by powdering. Therefore, various research have been carried out to prohibit powdering for improving the quality of GA steel. This paper carried out finite element analysis combined with damage model which simulate the failure of local layer of hot-dip galvanized steel surface during v-bending test. Since the mechanical property of intermetallic compound was unknown exactly, we used the properties calculated from measurements. The specimen was divided into substrate, coating layer and interface layer. Local failure at coating layer or interface layer was simulated when elemental strain reached a prescribed strain.

**Key Words:** Hot-Dip Galvanized Steel, Powdering, V-bending Test, Finite Element Analysis, Damage Model

### 1. 서론

용융아연도금강판은 냉연강판에 용융아연을 도금하여 냉연강판이 가지고 있지 않는 내식성을 확보한 강판으로 내식성은 우수하나 도금층이 순수아연으로 되어 있어 도장성이나 가공성 측면에서 단점을 갖고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 순수한 아연으로 구성된 도금층을 재가열하여 바탕강판의 철(Fe)을 도금층중에 확산시켜 철과 아연의 금속간 화합물로 만든 강판을 합금화 용융아연도금강판이라고 한다.

그러나 도금층이 철과 아연의 금속간 화합물로 이루어져 단단하면서 매우 쉽게 깨어진다. 금속간 화합물은 조성비에 따라 크게  $\Gamma$ ,  $\delta$ ,  $\zeta$  상(Phase)등으로 구분하는데 제품의 2 차 가공

시 도금층이 분말형태로 떨어지게 된다. 이를 파우더링(Powdering)이라 칭하며 떨어져 나간 분말은 제품에 달라붙어 불량품을 발생시키고 설비장치를 오염시키게 된다. 따라서 이러한 파우더링 발생 거동을 억제시키기 위한 많은 연구들이 수행되었다. 주로 금속간 화합물의 각 상(phase)의 관계를 기초로 파우더링이 조사되었다[1~3]. 합금상의 구성비에 따라서 도금층은 큰 영향을 받게 되어 적절한 합금상을 형성시켜주어 파우더링을 억제할 수 있기 때문이다. 하지만 여러가지 합금상으로 이루어진 미세한 도금층의 기계적인 물성치는 각 합금상의 벌크(Bulk)한 재료로 보고된 물성치와는 다르고 따라서 도금층의 합금상에 대한 기계적인 물성치는 정확하게 알려진 바가 없다[4].

1. 중앙대학교 대학원

2. 포스코 기술연구소 자동차소재연구그룹

3. 중앙대학교 대학원

# 교신저자: 중앙대학교 기계공학부, E-mail:

ysi@cau.ac.kr

이 논문에서는 브이-휨 시험 방식을 통해서 합금화 용융아연도금 강판의 가공시 도금층의 국부변형 특성에 관한 파우더링을 상용유한요소 프로그램인 아바쿠스(Abaqus)를 이용해서 모사하였다. 신뢰성 있는 모사를 위해서 모재의 인장 실험, 나노압입(nano indentation) 실험, 계면 접합력 실험을 토대로 한 기계적인 물성치 측정값 및 계산값을 유한요소해석에 적용하였다. 그리고 요소 제거 기법 (Element removing method)과 손상 모델 (Damage model)을 결합하여 변형 중 발생하는 국부적인 파단을 모사하였다.

제시된 모델의 파우더링 모사 결과의 적절성을 판단하기 위해서 실험결과와 비교하고, 파단 변형률에 따른 도금층 및 경계층과 모재의 거동에 대한 비교 및 도금층 및 경계층의 인장과 압축지역에 대한 결과를 비교 분석하였다.

## 2. 실험 (Experiment)

### 2.1 시편

실험에 사용된 시편은 상업적으로 이용되는 인장강도 340MPa 급 소부경화형(Bake hardening) 합금화 용융아연 도금강판을 사용했다. 도금강판의 모재(Substrate) 및 도금층(Coating layer)의 치수는 표 1 에서 보여준다.

Table 1 Dimensions of specimen

	Length(mm)	Thickness(mm)	Width(mm)
Substrate	100	0.686	40
Coating Layer	100	0.014	40

### 2.2 인장실험

모재의 응력-변형률 선도를 통해서 기계적인 물성치를 측정하기 위해서 인장시험기(ZWICK)를 이용하여 단축 인장 실험을 수행하였다. 인장시험편의 표점거리(Gauge length)는 50mm, 폭 25mm 로 압연방향의 수직방향으로 10m/min 의 속도로 인장하였다. 도금층은 작은 변형률에도 쉽게 깨지기 쉽고 전체 시편에 비해 차지하는 비율이 대단히 적으므로 모재의 응력-변형률 선도에는 영향을 미치지 못한다.

### 2.3 나노압입 (Nano indentation) 실험

시편의 도금층 항복강도를 계산하기 위해서 모

재와 도금층의 나노압입 실험을 수행하였다. 시편의 단면 10 개의 지역으로부터 경도값을 측정하고 이 값을 평균한 경도값을 이용하여 도금층의 항복강도를 계산하였다.

### 2.4 계면 접합력 실험

모재와 도금층의 경계면에서 전단 파단강도를 측정하기 위해서 두 시편을 접착제로 접합하여 전단실험을 수행하였다[6]. 그림 1 에서 보는 바와 같이 접착부위는 길이 12.5mm, 두께 0.2mm, 폭 12.5mm 이고 속도는 50mm/min 으로 잡아 당겼다. 접착제와 도금층이 같이 떨어져 나옴으로써 경계면에서의 최대 박리 강도를 측정하였다. 접착제의 강도가 경계면에 미치는 영향은 무시했다. 변위-인장력 관계가 그림 2 에서 보여진다.

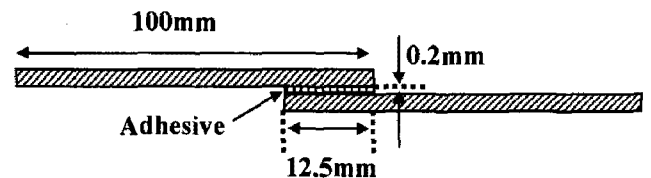


Fig. 1 Schematic specimen configuration for shear test

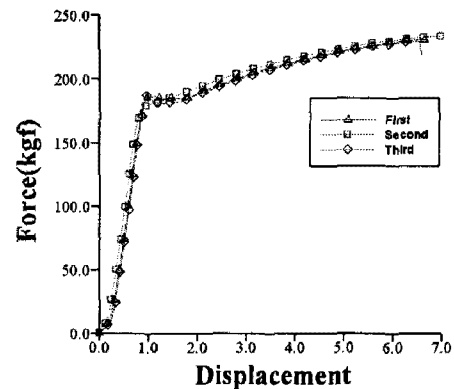


Fig. 2 Displacement-tensile force relation

### 2.5 브이-휨 시험 (V-bending test)

자동차 강판의 국부적인 도금층 파우더링을 측정하는 시험 방식인 브이-휨 시험을 채택하였다. 펀치(Punch)의 휨 각도는 90°, 휨 반경은 R=1mm, 다이(Die)의 휨 각도는 90°, 펀치 속도는 10mm/s 로 실험을 수행하였다. 펀치가 시편을 누른 후 시편의 중앙부위를 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope : SEM)을 이용하여 시편의 최종 변형시

도금층 단면의 파우더링 특성을 조사하였다.

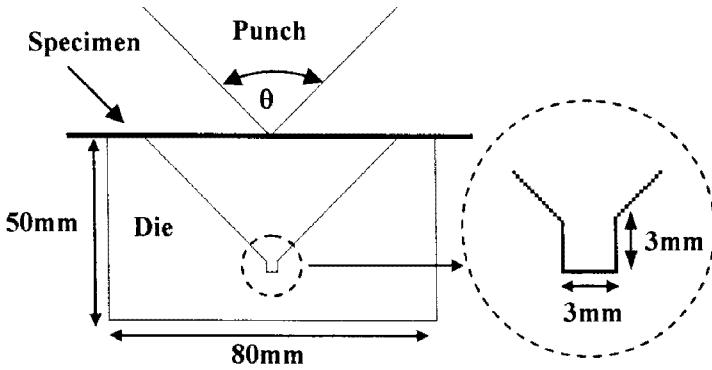


Fig. 3 Schematic of V\_bending test

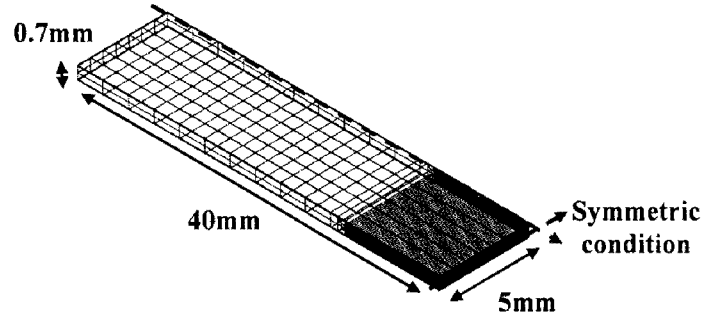


Fig. 4(a) Mesh configuration of specimen

### 3. 유한 요소 해석(FEA)

#### 3.1 모델링에 이용된 가정들

도금층의 파우더링을 모사하기 위해서 상용 유한요소 프로그램인 아바쿠스(Abaqus Ver.6.6-1)를 이용하여 브이-휨 시험을 모델링하였다. 다음은 모델링에 이용된 가정들이다.

1. 펀치(Punch)와 다이(Die)는 강체
2. 시편의 물성치는 등방성(Isotropic)
3. 시편 전체는 균질(Homogeneous)
4. 펀치 및 다이와 시편 사이의 마찰계수는 일정 (0.2)[7].

#### 3.2 시편의 유한요소 형상

시편이 대칭이기 때문에 대칭조건을 적용하여 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 시편의 1/4 만 모델링하였다. 펀치가 누름에 따라서 파우더링이 발생하는 시편부분은 요소의 크기를 조밀하게 하였고 나머지 변형이 심하게 일어나지 않는 부분은 요소의 크기를 크게 만들었다(그림 4(b)참조). 총 소요된 요소의 개수는 5558 개, 요소타입은 3차원 8절점 저감적분요소인 C3D8R 을 적용하였다. 시편은 모재와 도금층, 모재와 도금층 사이의 경계면을 하나의 층(layer)으로 하여 총 3개의 영역으로 나누어 모델링하였다. 그림 4(c)에서는 시편의 각 층에 대한 형상 및 치수를 보여준다.



Fig. 4(b) Transition mesh of specimen

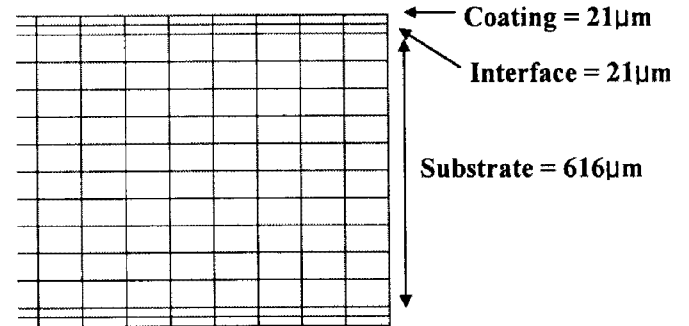


Fig. 4(c) Specimen dimensions using modeling

해석을 위해서 실험에 이용된 실제 시편 크기의 일부분만을 모델링하였다. 또한 실제 도금층의 두께는 7 $\mu$ m 정도되지만 해석을 위해서 21 $\mu$ m 로 좀 더 큰 치수를 적용하였다. 실제 실험에 사용된 시편의 크기로 모델링을 하지 않은 이유는 실제 시편의 크기로 모델링하고 코팅층과 경계층의 치수를 적용하게 되면 감당하기 힘든 요소 수와 해석시간을 요구하기 때문이다. 따라서 파우더링에 관한 거동을 보기위한 적절한 요소의 크기로 시편을 모델링하였다[7].

### 3.3 손상 모델 (Damage model)

코팅층 및 경계층의 균열 및 파단 현상을 모사하기 위해서 아바쿠스(Abaqus)에서 제공하는 손상 모델을 이용한 요소제거 기법을 이용했다. 손상을 받는 요소들은(여기서는 시편) 해석이 진행됨에 따라 인장강도를 넘어서는 요소들이 생기게 된다. 이후 요소는 네킹(Necking)현상이 발생하고 강성이 점차 저하되면서 0(zero)에 이르게 되는데 이때 요소의 응력(Stress) 또한 0(zero)이 된다. 응력이 0인 요소는 파단된 요소로 이 요소가 제거되는 기법이다. 이는 제거된 요소를 통해 코팅층 및 경계층에서의 국부적인 파우더링을 모사하는데 있어서 반드시 필요한 기법이다.

## 4. 실험 결과

### 4.1 모재의 기계적인 물성치 측정값

그림 5에서는 단축 인장 실험으로 측정된 모재의 응력-변형률 선도를 나타낸다. 이를 통해서 탄성계수, 항복강도 및 인장강도뿐만 아니라 파단강도와 그에 따른 각각의 변형률을 측정함으로써 모재의 기계적인 물성치를 얻을 수 있다.

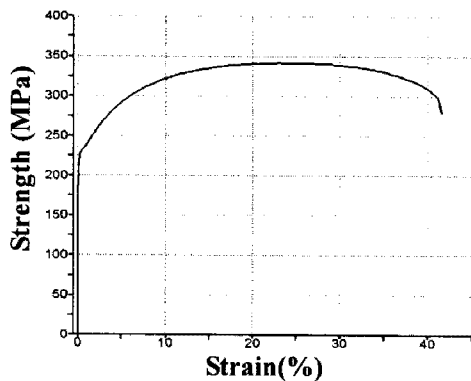


Fig. 5 Substrate stress-strain curve for tensile test

### 4.2 도금층의 기계적인 물성치 추정값

도금층을 이루는 다양한 미세 금속간 화합물들의 기계적인 물성치를 측정하는 것은 불가능하다. 따라서 인장실험으로 얻은 모재의 항복강도와 나노압입 실험으로 얻은 모재와 도금층의 경도값의 비(Ratio)를 이용하였다. 도금층 전체의 항복강도는 약 390MPa로 계산되었다. 그림 6(a), (b)는 각각 도금층과 모재의 나노압입 실험결과를 나타내며 표 2에서는 측정된 실험결과와 정량적인 수치를 보여준다.

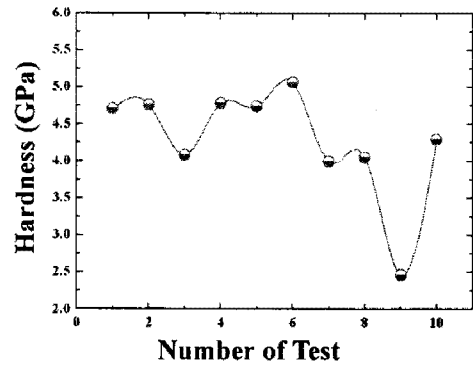


Fig. 6(a) Coating layer hardness of nano indentation test

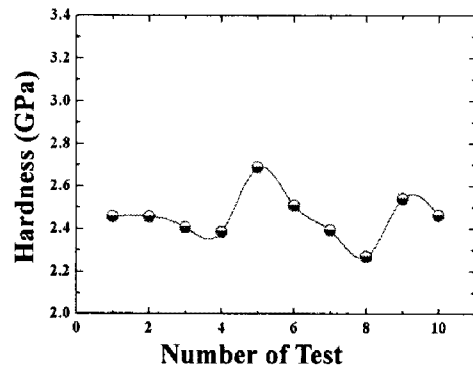


Fig. 6(b) Substrate hardness of nano indentation test

Table 2 Measured hardness of specimen

	Coating Layer (GPa)	Substrate (GPa)
1	4.7	2.45
2	4.75	2.45
3	4.0	2.4
4	4.75	2.4
5	4.7	2.7
6	5.2	2.5
7	4.0	2.4
8	4.0	2.25
9	2.5	2.55
10	4.3	2.48
Aver.	4.29	2.46

4.3 경계면에서의 기계적인 물성치 측정값  
총 3 번의 계면 접합력 실험을 하여 아래 표 3에서와 같이 각각의 최대 박리 강도를 산출하였고 이를 평균한 값을 수식 (1)을 이용하여 경계면에서의 기계적인 물성치를 계산하였다. 수식 (1)은 단축 인장 파단강도  $\sigma_y$ 와 전단 응력  $k$ 와의 관계를 나타낸다.

**Table 3 Maximum exfoliation strength of interface**

	The number of time			Average
	1	2	3	
Maximum exfoliation Strength (MPa)	180.5	182.7	182.6	182.0

$$\sigma_y = \sqrt{3}k \quad (1)$$

실험을 통해서 얻은 시편의 기계적인 물성치 측정값 및 계산값을 표 4에서 정리하였다.

**Table 4 Mechanical property of specimen**

	Substrate	Coating Layer	Interface
Young's modulus (GPa)	210	.	.
Yield stress (MPa)	223	390	.
Tensile stress (MPa)	341	.	315.3
Failure stress (MPa)	280	.	.
Failure strain	0.41	.	.

4.4 변형된 시편의 최종단면

브이-웍 시험 후 최종 변형된 시편의 도금층 단면을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다.

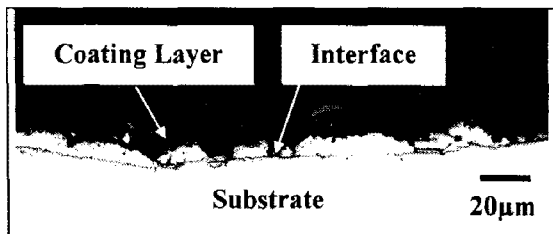


Fig. 7(a) Compression area

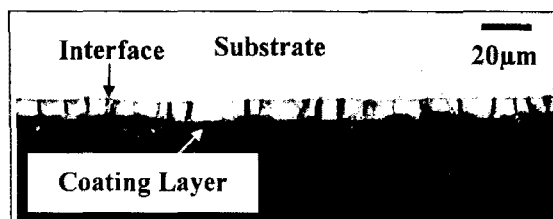


Fig. 7(b) Tension area

그림 7(a), (b)의 단면 사진들은 각각 편치 힘 반경 R=1mm 일 때 시편의 압축면과 인장면을 나타낸다.

단면사진을 통해서 브이-웍 시험에 따른 도금층 파우더링 거동이 시편의 압축면과 인장면에서 차이가 있음을 알 수 있다. 압축면에서는 도금층 파우더링이 경계면에 대해서 비스듬히 발생하는 반면 인장면에서는 주로 경계면과 수직하게 균열이 생기는 것을 확인할 수 있다[8].

5. 유한 요소 해석 결과

5.1 해석에 적용된 기계적인 물성치

실험으로 얻은 시편의 기계적인 물성치 측정값 및 계산값을 해석에 적용하였고 실험으로 측정하지 못하는 기계적인 물성치들은 간접적으로 계산한 값을 부여하였다. 경계층의 탄성계수는 모재와 가장 인접해 있으므로 200GPa로 모재와 비슷하게 적용하였고 코팅층의 탄성계수 140GPa은 논문을 참고하였다[4~5]. 모재의 항복강도에 비해 인장강도가 약 1.5 배 정도되므로 코팅층 및 경계층의 인장강도 역시 모재와 같은 비율이 되도록 적용하였다. 그리고 도금층 및 경계층에 대한 파단 변형률을 3 가지 경우(Case1, Case2, Case3)로 나누어 해석 결과를 비교하였다. 유한요소 해석에 적용된 기계적인 물성치는 표 5와 같다.

**Table 5 Mechanical property used of specimen for FEA**

	Substrate	Coating Layer	Interface
Young's modulus (GPa)	210	140	200
Yield stress (MPa)	223	390	210
Tensile stress (MPa)	341	585	315.3
Failure stress (MPa)	280	.	.
Failure strain	0.41	Case1	0.34
		Case2	0.32
		Case3	0.30
			0.33
			0.31
			0.29

표 5를 이용하여 적용한 응력-변형률 선도는 그림 8(a), (b), (c)에서 보여진다.

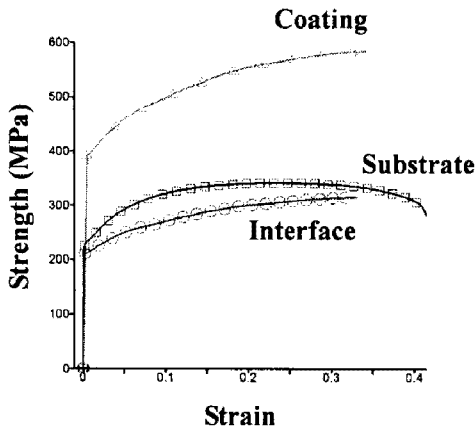


Fig. 8(a) Stress-strain curve of case1

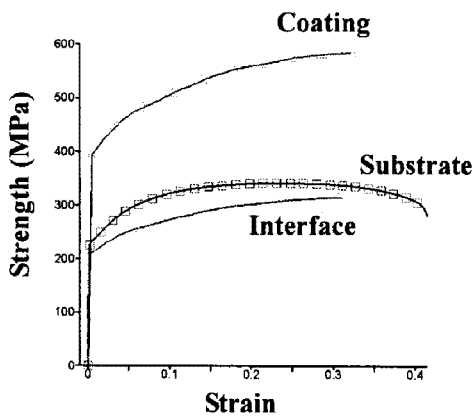


Fig. 8(b) Stress-strain curve of case2

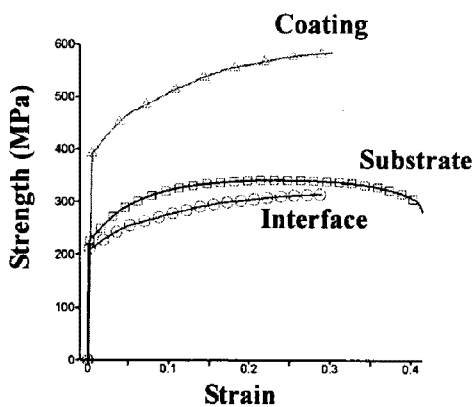
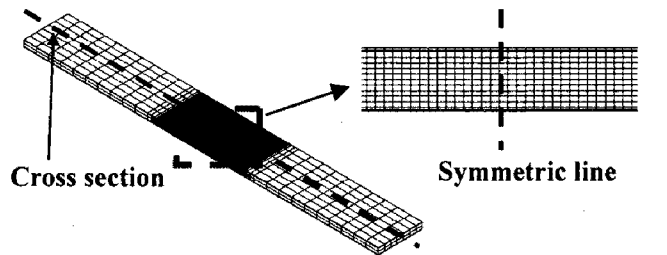


Fig. 8(c) Stress-strain curve of case3

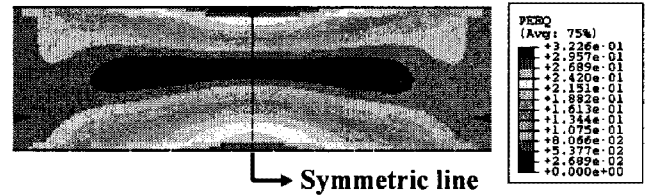
## 5.2 파단 변형률에 따른 해석 결과 비교

그림 9에서는 브이-웍 시험이 완료된 시편의 중앙부분에서의 가운데 단면을 보여준다. 변형 전 형상에서 시편이 최종 변형 됐을 때 단면에서의 등가 소성 변형률의 분포를 나타내었다. 경우

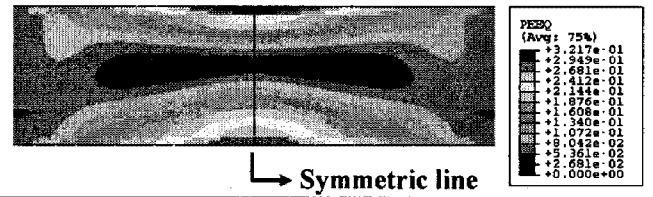
1(Case1)에서 경우 3 (Case3)으로 갈수록, 즉 코팅층 및 경계층의 파단 변형률이 작아질수록 코팅층 및 경계층의 소성 변형 지역이 확대(붉은색 분포 지역)되는 반면 모재의 소성 변형이 발생하는 지역은 축소되는 것을 확인할 수 있다(파란색 분포 지역). 이는 편치가 누름에 따라 코팅층 및 경계층에서의 파단 변형률이 작은 경우로 갈수록 요소 제거가 빨리 진행되어 주위 요소가 받는 변형률이 적어지기 때문이다.



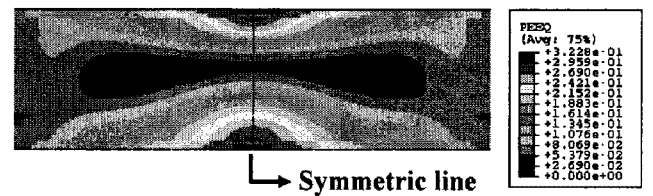
(a) Undeformed shape of specimen



(b) Case1



(c) Case2



(d) Case3

Fig. 9 Equivalent plastic strain contour

해석이 진행됨에 따라서 시편의 위쪽은 압축을 받고 그 반대쪽은 인장을 받게 된다. 그림 10에서는 1번 방향 (X 축 방향)으로의 소성 변형률에 따른 최종 변형된 시편의 형상을 보여준다. 경우 1(Case1)에서는 도금층의 파우더링을 관찰할 수 없지만 경우 2(Case2)에서 경우 3(Case3)으로 갈수록, 다시 말해서 파단 변형률이 작아질수록 도금

층의 파우더링이 많이 일어난 것을 확인할 수 있다.

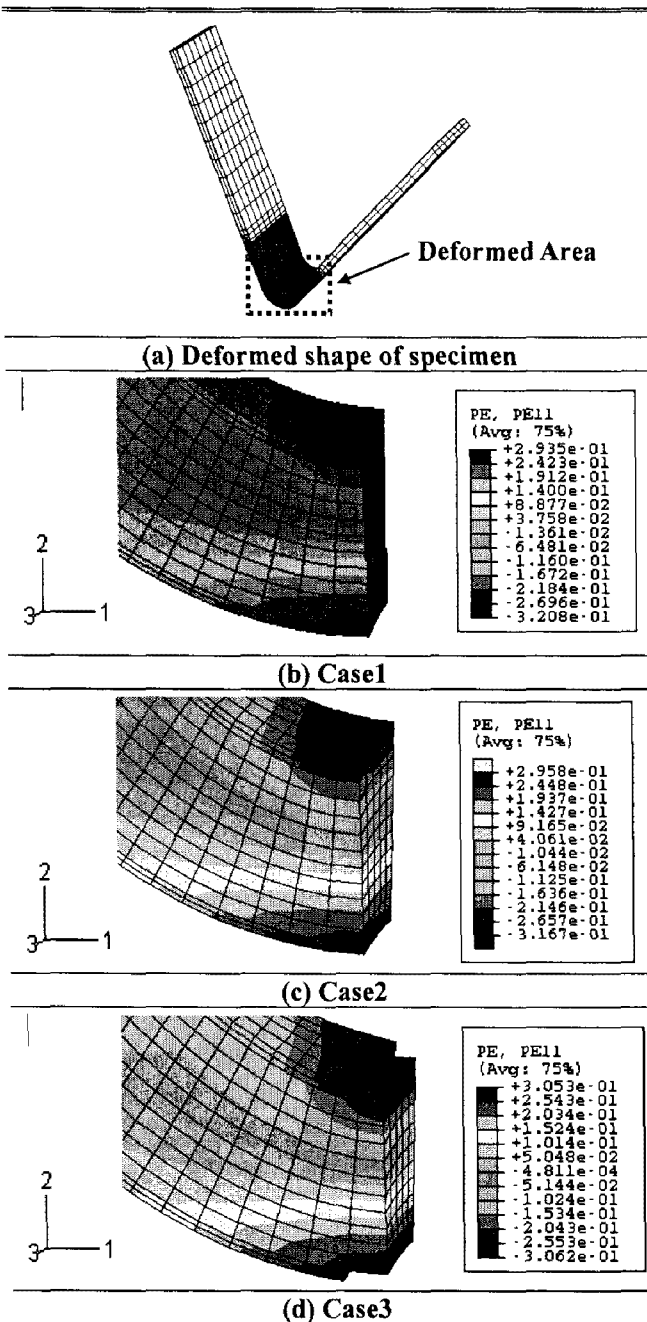


Fig. 10 plastic strain contour of deformed specimen

파란색 분포지역은 압축변형을 받는 지역을 나타내며 붉은색 분포지역은 인장변형을 받는 지역을 나타낸다. 펀치가 누름에 따라서 코팅층 및 경계층은 압축을 받는 시편의 위쪽에서 먼저 파단이 일어나고 인장을 받는 시편의 아래쪽에서는 더 늦게 파단이 일어나는 것이 확인되었다[8]. 이는 그림 10의 모든 경우(Case1 ~ Case3)에서 확

인할 수 있듯이 압축변형을 받는 지역의 소성 변형률이 인장변형을 받는 지역보다 크기 때문이다.

따라서 파우더링을 억제시키는 가장 좋은 방법은 해석 결과에서도 보여주듯이 도금층의 연신율을 높이는 것으로 이는 파우더링을 제어하는 가장 큰 요인임을 확인하였다.

### 5.3 모델의 한계

그림 7(a), (b)의 도금층 단면 사진에서 보는 바와 같이 인장과 압축변형을 받는 지역의 실제 시편의 도금층은 중간중간 균열 및 파단이 일어난 것을 확인할 수 있다. 하지만 제시된 연속체 모델에서는 인장과 압축 변형률이 가장 큰 지역의 국부적인 파우더링만을 모사할 수 있었다. 인장 및 압축 지역 전체에 관한 실제적인 해석을 위해서는 불균질(Inhomogeneous)한 손상모델에 관한 연구가 진행되어야 할 것이다. 또한 유한요소 해석을 통해서 실험으로 얻을 수 없는 기계적인 물성치를 역으로 추정하는데 있어서 더욱 정확한 결과를 얻기 위해서는 도금층 및 경계층의 인장 강도에 따라서 도금층 파우더링에 미치는 영향을 고려한 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 6. 결론

(1) 브이-웍 시험을 통한 도금층 파우더링을 모사하기 위해서 아바쿠스(Abaqus)에서 제공하는 연속체구조물에서의 손상모델을 이용하였다. 실험을 통해 얻은 측정값 및 계산값을 해석에 적용하여 결과의 신뢰성을 높이고자 하였다.

(2) 코팅층 및 경계층의 파단 변형률이 각각 0.34, 0.33 이상일 경우에는 파우더링이 발생하지 않았다. 즉 도금층의 연신율은 파우더링을 억제하는 가장 큰 요인중 하나이다.

(3) 파단 변형률에 따른 모재와 도금층의 거동을 확인할 수 있었다. 파단 변형률이 클수록 도금층 및 경계층의 소성변형 지역은 감소하지만 모재의 소성변형 지역은 증가한다. 반대로 파단 변형률이 작을수록 도금층 및 경계층의 소성변형 지역은 증가하고 모재의 소성변형 지역은 감소한다.

(4) 시편의 인장 및 압축면에서의 도금층의 거동을 유한요소 해석을 통해서 확인할 수 있었다. 도금층은 인장변형보다 압축변형에서 파우더링이 쉽게 일어난다는 사실을 확인할 수 있었다. 이는

압축변형을 받는 지역에서의 소성 변형률이 인장 변형을 받는 지역보다 크기 때문이다.

(5) 제시된 연속체모델에서는 인장과 압축이 가장 큰 지역에서의 파우더링만을 확인할 수 있었다. 보다 실제적인 해석을 위해서는 불균질한 손상 모델에 관한 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 2 단계 두뇌 한국 사업의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] L.G. Garza, C.J. Van Tyne, 2007, Friction and formability of galvanized interstitial free sheet steel, *Journal of Materials Processing Technol.*, Vol. 187~188, pp. 164~168.
- [2] Kyung-Keun Lee, In-Hwan Lee, Cheul-Ro Lee, Haeng-Keun Ahn, 2007, In-situ observation in a scanning electron microscope on the exfoliation behavior of galvanized Zn-Fe coating layers, *Surface & Coatings Technol.*, Vol. 201, pp. 6261~6266.
- [3] Moon-Hi HONG, 2005, Correlation between the Microstructure of Galvanized Coatings and the Defoliation during Press Forming, *ISIJ Inter.*, Vol. 40, pp. 896~902.
- [4] G. Reumont, J.B. Vogt, A. Iost, J. Foct, 2001, The effects of on an Fe-Zn intermetallic-containing coating on the stress corrosion cracking behavior of a hot-dip galvanized steel, *Surface & Coatings Technol.*, Vol. 139, pp. 265~271.
- [5] S. OCHIAI, S. IWAMOTO, T. TOMIDA, T. NAKAMURA, H. OKUDA, M. TANAKA and M.HOJO, 2005, Multiple-Cracking Phenomenon of the Galvanized Coating Layer on steels under Thermal and Tensile Stresses, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 36, pp.1807~1816.
- [6] Chun Xu, Z.Q. Lin, S.H. Li, W.G. Zhang, 2007, Research on Shear strength of galvanized coatings, *Materials & Design*, Vol. 28, pp. 1668~1671.
- [7] B. Hauw, L. Dubar, J. Oudin, 1999, Improvement of stamping computations by means of the identification of the bulk behavior of coatings: application to galvanized sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 94, pp. 23~29.
- [8] Yoshinari NUNOMURA and Takayuki TAKASUGI, 2003, Plastic Deformation and Fracture Behavior of Galvanized Coating, *ISIJ International*, Vol. 43, pp. 454~460.