

## 계장화 압입시험 및 유한요소해석을 이용한 아연도금강판의 기계적 물성 추정<sup>§</sup>

진지원\* · 곽성종\* · 김태성\*\* · 노기한\*\*\* · 강기원†

\* 군산대학교 기계자동차공학부, \*\* LS Cable, \*\*\*한국자동차부품연구원

### Determination of Mechanical Properties of Galvanized Steel Sheets Using Instrumented Indentation Technique and Finite Element Analysis

Ji-Won Jin\*, Sung-Jong Kwak\*, Tae-Seong Kim\*\*, Ki-Han Noh\*\*\* and Ki-Weon Kang†

\* School of Mechanical Engineering, College of Engineering, Kunsan Nat'l Univ.

\*\* Production Engineering Center, CAE Technology Group, LS Cable Ltd.

\*\*\* Body & Chassis System Research Center, Intelligent Vehicle Technology R&D Division, KATECH.

(Received December 21, 2011; Revised February 28, 2012; Accepted March 5, 2012)

**Key Words** : Indentation(압입), Galvanized Steel Sheet(아연도금강판), Strain-Hardening Exponent(변형률경화지수), Finite Element Analysis(유한요소해석)

**초록**: 본 논문의 목적은 계장화 압입시험과 유한요소해석을 이용하여 아연도금강판의 기계적 물성을 추정하는 것이다. 먼저 인장시험을 통하여 유한요소해석에 요구되는 두께에 따른 아연도금강판의 기계적 물성을 획득하였으며, 이를 이용하여 유한요소해석을 수행하여 특정지점에서의 소성 응력 및 변형률을 획득하였다. 이러한 유한요소해석의 유효성은 계장화 압입시험의 하중-변위선도와 비교를 통하여 검토하였다. 유한요소해석을 통하여 구한 진응력-진변형률 곡선을 인장시험 결과와 비교하여 이의 정확성을 검증하였으며 또한 이를 바탕으로 대표 응력 및 변형률 산출지점을 재평가하였다.

**Abstract**: This paper deals with the determination of mechanical properties of various galvanized steel sheets that are used for fabricating automobile bodies; the instrumented indentation technique and finite element analysis were used for the determination. First, tensile tests were conducted to obtain the true stress-true strain curves of galvanized steel sheets with various thicknesses. Load-deformation curves were then obtained by using the instrumented indentation testing machine, and they were compared with load-deformation curves obtained by finite element analysis. Further, true stress-true strain curves were obtained at the optimal observation point by finite element analysis.

### 1. 서 론

재료의 기계적 물성(mechanical properties)을 측정하기 위해서는 대상 재료로부터 인장시험편을 채취하고 이에 대한 인장시험을 수행하여 항복강도(yield strength), 인장강도(tensile strength), 변형률경화지수(strain hardening exponent) 등을 측정하는 것이 일반적인 방법이다<sup>(1)</sup>. 그러나 대상 재료의 특성상 시험편의 채취가 곤란하거나 또는 국부 물성이

급격하게 변화하는 경우 이러한 방법의 적용은 곤란한 경우가 다수 존재한다.<sup>(1)</sup> 이러한 한계를 극복하고자 도입되고 있는 기계적 물성 측정 방법중에 계장화 압입시험법(instrumented indentation test)이 있다. 계장화 압입시험법은 선단이 뾰족한 형태를 지닌 압입자(indenter)를 이용하여 가한 하중에 대한 소재의 반응을 변위로 표현하여 역학적 상태를 해석하는 기법으로서 이는 시험편 형상에 제약이 없고 비파괴적이며 실험 절차가 매우 간단하다.<sup>(2)</sup> 그러나 압입 특성이 상당히 민감하며, 이를 정량화하기가 용이치 않으므로 유한요소해석에 기반을 둔 연구가 다수 수행되어 왔다.<sup>(3-5)</sup> Knapp 등<sup>(3)</sup>은 유한요소해석과 압입시험의 하중-변위 곡선(load-displacement curve)의 일치를 위하여 기계적

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011.

11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, kwkang68@kunsan.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

물성을 변화시키는 반복적 유한요소해석에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 이러한 시행착오법 기반 기법은 해석 및 분석에 상당한 시간이 소요되어 실질적인 적용은 곤란하다. 이의 해결을 위하여 Taljat 등<sup>(4)</sup>은 구형 압입시험에 대한 새로운 대표 변형률 선정 방안을 제시하였다. 그들은 유한요소해석을 바탕으로 압입하부의 응력 및 변형률장을 분석하였고, 이로부터 기존 압입 물성 예측 지점의 한계를 고찰하였다. Lee 등은<sup>(5)</sup> 이를 바탕으로 마찰계수 등의 압입변수에 둔감하고 물성 평가에 적절한 대표 변형률 산출 지점을 새롭게 선정하고 이 지점에서 얻은 응력-변형률과 하중-변위 관계를 연관시킨 압입수식을 제시하였다. 그러나 이러한 연구는 인장시험을 통하여 얻어진 기계적 물성과의 직접적인 비교는 수행하지 않았다.

본 논문의 목적은 계장화 압입시험과 유한요소해석을 통해 다양한 두께의 아연도금강판(galvanized steel sheet)의 기계적 물성(mechanical properties)을 추정하는 것이다. 먼저 인장시험을 통하여 유한요소해석에 요구되는 기계적 물성치를 획득하였다. 또한 이를 이용하여 압입 상황에 대한 유한요소해석을 수행하여 특정 관측지점에서의 소성 응력 및 변형률을 획득하였다. 또한 계장화 압입시험을 통하여 구한 하중-변위 선도와 유한요소해석 결과를 비교하여 이의 유효성을 검토하였다. 유한요소해석을 통하여 구한 진응력-진변형률(true stress-true strain) 곡선을 인장시험 결과와 비교하여 이의 정확성을 검증하였다. 또한 이를 바탕으로 대표 응력 및 변형률 최적 산출 지점을 재평가하였다.

## 2. 실험 및 해석방법

### 2.1 재료 및 시험편

본 논문의 재료는 POSCO 제 아연도금강판(galvanized steel sheet)으로서 1.3mm(MA01), 1.4mm(MA02), 1.5mm(MA03) 및 2.1mm(MA04)의 두께를 갖는다. 도금의 두께는  $8.4\mu\text{m}$ ~ $11.2\mu\text{m}$  이며, 도금방법은 냉간압연 및 소둔처리한 재료에 전기화학적으로 표면에 아연도금을 처리한 것이다. Table 1은 이의 화학성분을 나타낸 것이다. 아연도금강판의 기계적 특성을 얻기 위한 인장시험은 KS B 0801<sup>(6)</sup> 규격을 참조하여 설계된 Fig. 1 과 같은 인장시험편에 대하여 수행하였다. 또한 시험편의 수량은 각 두께 별 7 개씩 준비하였다. 계장화 압입시험의 시험편은 30mmx30mm 로 하였으며 시험편의 수량은 각 7 개씩 준비하였다.

Table 1 Chemical composition (wt%)

C	Mn	Si	S	P
3.5~3.8	0.2~0.6	2.3~2.8	$\leq 0.001$	$\leq 0.05$

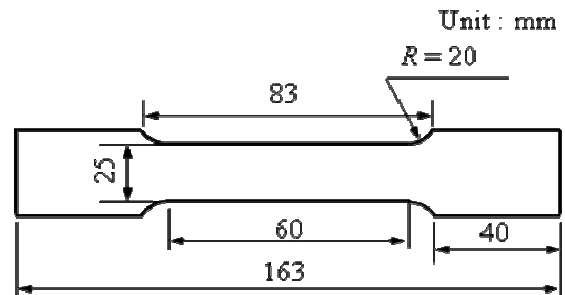


Fig. 1 Tensile specimen



Fig. 2 Instrumented indenter

### 2.2 인장시험 및 계장화 압입시험 방법

인장시험은 Instron 사의 5581 모델을 이용하였으며 실온의 대기조건하에서 2mm/min 의 크로스헤드 속도로 수행하였다. 이 때 변형률은 50mm의 표점 거리(gauge length)를 갖는 변위 계측기(extensometer)를 사용하여 측정하였다.

계장화 압입시험은 대경테크의 DKTT-3000 모델(Fig. 2)을 사용하였으며 압입자는 지름 1mm의 텅스텐 카바이트(WC) 구형압입자(spherical indenter)를 사용하였다. 계장화 압입시험은 변위 제어하에서 1mm/min의 압입속도로 수행하였으며 압입깊이와 데이터 획득 샘플링 속도는 각각 0.06mm와 100Hz이다.

### 2.3 해석방법

하중과 형상이 모두 축대칭임을 고려하여 4점 축대칭요소를 가진 상용 코드인 ABAQUS<sup>(7)</sup>의 CAX4 요소를 사용하였다. 압입하부 표면 및 압입

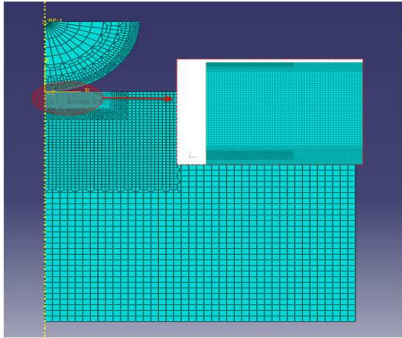


Fig. 3 Mesh for FE analysis

하부의 관측지점 영역에 압입자 직경의 0.0625% 크기의 요소를 배치하였다.<sup>(5)</sup> Fig. 3은 위의 조건을 통해 모델링한 형상이다. 해석에 사용되는 물성치는 두께 별 7 회의 인장시험을 통해 구한 탄성계수, 강도계수(strength coefficient)와 변형률경화지수의 평균을 계산하여 사용하였다. 압입자(indenter)는 구모양인 형상을 사용하였으며, 직경은 1mm, 탄성계수와 푸아송비는 각각 537GPa 및 0.24로 설정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 정적 인장 및 계장화 압입시험

아연도금강판에 대한 기계적 물성 획득을 위하여 서로 다른 두께를 갖는 MA01 ~ MA04에 대한 7 회의 인장시험을 실시하였다. Table 2는 이의 결과를 정리한 것이며 Fig. 4는 이를 통하여 구한 MA01 및 MA03의 진응력-진변형률 곡선을 나타낸 것이다. 또한 아연도금강판의 기계적 물성 정의를 위해서는 진응력과 진변형률에 대한 관계식이 요구된다. 본 연구에서는 이를 위하여 식 (1)의 관계식을 사용하였으며 Table 3은 이의 변형률경화지수(strain hardening coefficient)  $n$  과 강도계수  $K$ (strength coefficient)를 정리한 것이다.

$$\sigma = K(\epsilon_r)^n \quad (1)$$

여기서  $\sigma$  및  $\epsilon_r$ 는 각각 응력 및 총변형률이다. Fig. 4 및 Table 3에서 알 수 있듯이 네 종류의 시험편 모두 전형적인 탄소성 재료의 특성을 보이고 있으며, 또한 진응력-진변형률 곡선 및 이에 따른 변형률경화지수 및 강도계수 모두 상당히 작은 데이터 편차를 가짐을 알 수 있다.

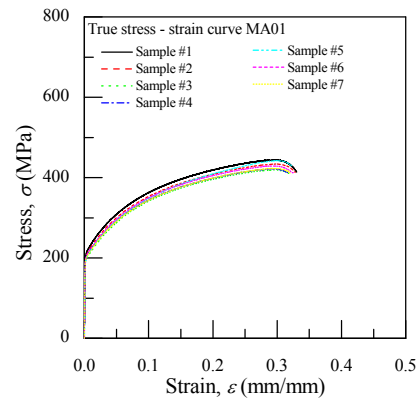
Fig. 5는 계장화 압입시험을 통하여 압입하중-변위선도 중에서 대표적인 MA01의 선도를 나타

Table 2 Mechanical properties

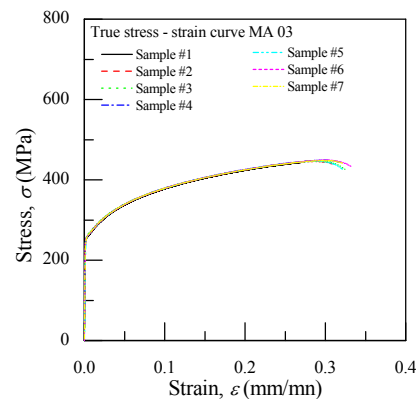
$n$	$E$ (GPa)	$\sigma_{ys}$ (MPa)	$\epsilon_r$ (%)
MA01	190.1	203.1	42.6
MA02	195.2	332.2	27.5
MA03	216.95	256.73	45.4
MA04	179.7	211.8	43.6

Table 3 Coefficients for true stress-true strain

$n$	$K$ (MPa)	$n$	$K$ (MPa)
MA01		MA02	
0.193	562.16	0.204	1014.90
0.202	531.43	0.202	997.92
0.204	542.62	0.199	1001.70
0.200	544.80	0.203	998.48
0.217	576.77	0.203	999.48
0.205	560.20	0.204	996.54
0.204	548.74	0.200	1008.50
MA03		MA04	
0.151	537.76	0.179	534.37
0.149	537.10	0.176	529.20
0.147	535.70	0.177	531.70
0.149	539.30	0.177	529.30
0.149	538.70	0.177	528.90
0.149	539.40	0.179	530.30
0.147	536.70	0.176	528.10



(a) MA01



(b) MA03

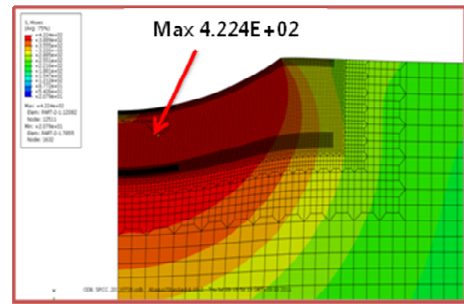
Fig. 4 True stress – strain curves by tensile test

타낸 것이다. 여기서 도금의 두께는 8.4 $\mu$ m~11.2 $\mu$ m 이므로 0.06mm의 압입깊이를 갖는 압입시험에

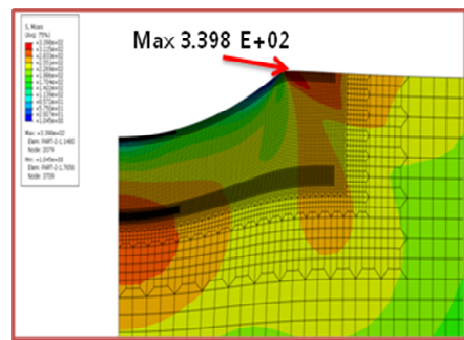
대한 영향은 작을 것으로 판단된다. 그림에서 볼 수 있듯이 제하(unloading)시의 하중-변위 곡선의 기울기는 서로 매우 유사한 값을 가지나 부하 (loading) 초기의 기울기 및 최대하중은 상당한 편차를 나타내고 있으며 이러한 경향은 시험편 두께에 관계없이 나타나고 있다. 이는 압입시험편 표면에 대한 별도의 처리를 하지 않은 관계로 표면 조도 등의 영향에 기인한다고 판단된다.

3.2 압입해석 결과

압입조건에 대한 유한요소해석은 증분소성이론<sup>(8)</sup>을 바탕으로 Table 2 및 3의 데이터를 이용하여 수행하였으며 Fig. 6은 해석을 통하여 구한 응력 분포의 대표적인 경우(MA01)를 나타낸 것이다. 부하시의 변형거동 및 응력분포를 나타낸 Fig. 6(a)를 관찰해보면 압흔 주위를 따라 pile-up이 발생하며, 압입중심 하부에는 해당 재료의 항복강도보다 매우 큰 소성등가응력이 넓게 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 6(b)는 제하후 재료의 변형형상과 등가응력 분포를 보여준다. 특히 하중시에는 압입하부에 최대응력이 발생하고 제하시에는

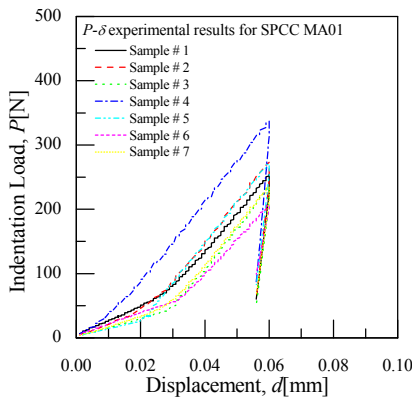


(a) Loading



(b) Unloading

Fig. 6 Stress distribution for MA01



(a) MA01

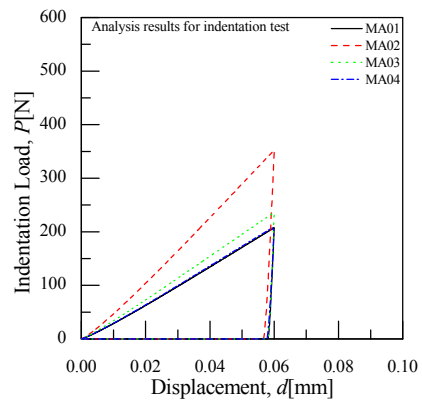
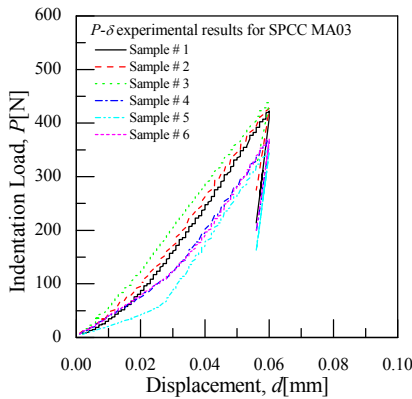


Fig. 7 P - δ curve by FEA



(a) MA03

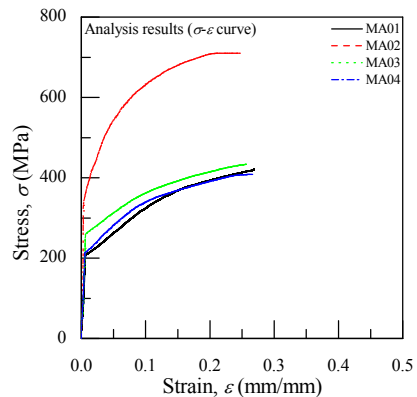
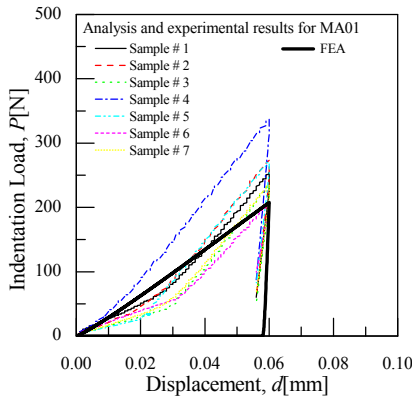
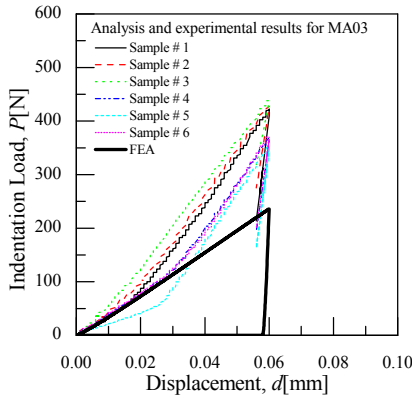


Fig. 8 σ - ε curve by FEA

Fig. 5 Load - Displacement curves by indentation test



(a) MA01

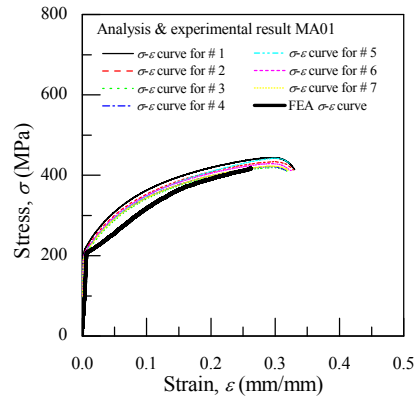


(b) MA03

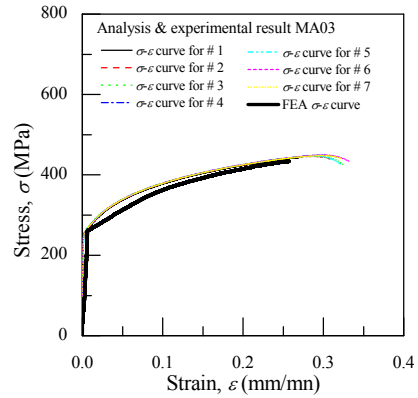
Fig. 9 Load – Displacement

pile-up 지점에서 최대응력이 발생하는 것을 알 수 있으며 이러한 경향은 Lee 등<sup>(8)</sup>의 결과와 비교했을 때 변형과 응력 분포 특성이 유사함을 알 수 있다.

이러한 해석 결과를 바탕으로 압입하중-변위 선도와 Lee 등<sup>(5,8)</sup>이 압입조건하의 응력-변형률 특성을 가장 잘 표현한다고 보고한 바 있는 특정 관측 지점 즉, 압입자 중심에서 하부 방향으로 압입자 직경의 10%( $l/D=0.1$ ) 및 반경방향으로 압입자 직경의 20%( $r/D=0.2$ ) 지점에서의 응력-변형률 선도를 구하였다. 먼저 압입하중-변위선도의 해석결과를 나타낸 Fig. 7 을 살펴보면 MA02 가 가장 큰 기울기 및 최대하중을 보임에 반하여 MA01, MA03 및 MA04 는 상당히 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 대상 재료의 변형률경화지수 및 강도계수를 나타낸 Table 3 에서 알 수 있듯이 MA02 의 경우, 변형률경화지수가 가장 낮고 강도계수가 가장 높은 값을 가지므로 상대적으로 높은 기울기 및 최대하중을 나타낸다고 판단된다. 또한 MA01, MA03 및 MA04 의 경우, 유사한 변형률경화지수 및 강도계수를 가지므로 이들의 압입하중-변위 곡선 역시 유사한 결과가 도출되었다고 판단된다. 이러한 경



(a) MA01



(b) MA03

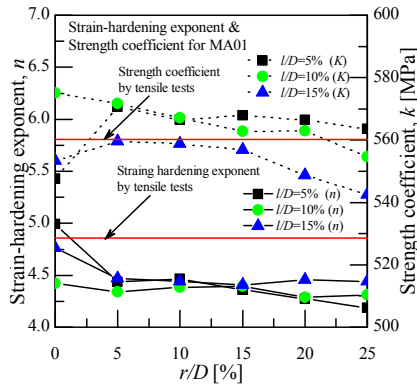
Fig. 10 True stress–strain curve by FEA and tensile test

향은 특정 관측지점에서 추출한 응력-변형률 선도인 Fig. 8 에서도 관찰되고 있다.

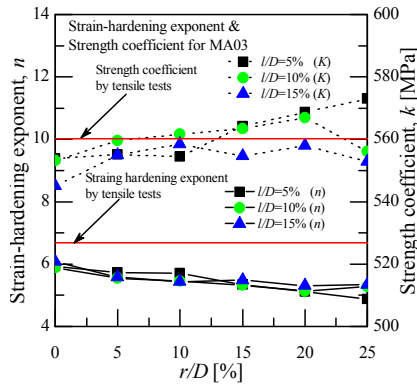
한편 이러한 FE 해석 결과의 정확성 평가를 위하여 FE 해석 및 압입시험을 통하여 구한 압입하중-변위 선도를 Fig. 9 에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 MA01 의 경우, 해석 결과는 7 회의 실험 결과의 중앙에 위치한다. 이와 반면에 MA03 의 해석 결과는 실험 결과에 비해 상당히 낮게 평가 되었다. 그러나 이미 언급하였듯이 시험편 표면에 대한 미처리 및 두께 자체의 불균질성이 존재할 수 있으므로 이러한 결과로부터 해석의 타당성을 부정하기는 곤란하다고 판단된다. 이에 대한 보다 명확한 평가를 위하여 Lee 등<sup>(5,8)</sup>이 제안한 관측지점에서의 진응력-진변형률 선도(Fig. 8)을 인장시험을 통하여 구한 진응력-진변형률 선도인 Fig. 3 과 비교하였다. Fig. 10 은 이의 대표적인 결과로서 해석 결과는 실험 결과와 상당히 유사하며 이로부터 본 연구의 해석은 타당하다고 판단된다.

### 3.3 관측지점에 따른 응력-변형률 선도의 변화

3.2 절에서도 언급하였듯이 Fig. 10 을 살펴보면



(a) MA01

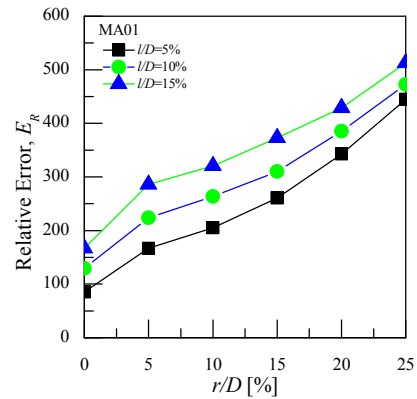


(b) MA03

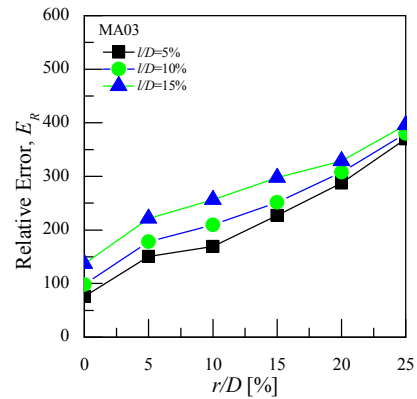
Fig. 11 Comparison of Strain-hardening exponent & strength coefficient

진응력-진변형률 선도도에 대한 해석 및 실험결과 상당히 유사하지만 해석 결과가 실험 결과에 비하여 일정부분 과소평가되고 있는 경향 역시 존재하며 이러한 경향은 두께에 관계없이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이의 원인으로서는 마찰계수를 0.1로 고정한 본 연구의 해석 조건에 따른 관측지점의 적절성 여부 및 이를 포함한 영역의 요소 조밀성 등에 기인한다고 판단된다.

이의 확인을 위하여, 마찰계수를 0.1로 고정한 상태에서 관측지점을 포함한 영역의 요소 조밀성을 증가시키고 이에 따라 다양한 관측지점에서의 응력-변형률 선도를 구하였다. 요소의 조밀성의 경우, 압입자 직경의 0.0625% 크기의 요소를 갖는 조밀 영역을 기존 관측지점을 중심으로 압입자 직경 대비 압입상하부 5%와 반경방향 25%까지 그 크기를 증가시켰다. 또한 다양한 관측지점에서의 응력-변형률 선도의 비교를 위하여, 압입 하부방향으로 압입자 직경 대비( $l/D$ ) 5%, 10%, 15% 및 반경방향( $r/D$ )으로 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% 지점에 총 18 개소의 관측지점을 새로이 선정된 후 이곳에서의 응력-변형률 선도를 구한 후 이를 인장



(a) MA01



(b) MA03

Fig. 12 Relative error between stress-strain curves by FEA and tensile tests

시험결과와 비교하였다.

Fig. 11은 상기의 절차를 통하여 구한 응력-변형률 선도의 변형률경화지수와 강도계수를 구하고 이를 압입 하부방향 및 반경방향 관측지점에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 수평의 실선은 인장시험을 통해 구한 변형률경화지수와 강도계수의 평균을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 MA01의 강도계수와 인장시험을 비교해보면 기존의 관측지점이 아닌  $l/D=15\%$ ,  $r/D=5\%$  지점에서 가장 유사한 결과가 나타나며, 변형률경화지수는  $l/D=10\%$ ,  $r/D=0\%$  지점이 제일 근사한 값을 나타내고 있다. 또한 MA03의 강도계수는  $l/D=10\%$ ,  $r/D=5\%$  지점이 제일 근사한 값을 나타내며, 변형률경화지수는  $l/D=15\%$ ,  $r/D=0\%$  지점에서 가장 유사하였다. 이러한 결과에서 알 수 있듯이 아연도금강판에 대한 본 연구의 해석결과는 마찰계수의 영향을 고려하지 않은 상태의 최적관측지점으로 기준에 보고된 관측지점( $l/D=10\%$ ,  $r/D=20\%$ )<sup>(8)</sup>이 아닌 다른 관측지점에서 실험결과와 가장 유사한 결과가 도출됨을 알 수 있었다. 그러나 이러한 관측지점은 변형률경화지수 및 강도계수의 경우 서로

상이함이 관찰되었는데, 이를 사용할 경우 변형률 경화지수 및 강도계수의 관측지점이 상이하다는 문제점이 발생한다.

이러한 문제점을 해결하고 FE 해석 및 실험결과와의 상대 오차를 정량화하기 위하여 다음의 식 (2)와 같은 상대 오차(relative error)  $E_R$  를 정의하였다. 상대오차는 인장실험 및 FE 해석을 통하여 구한 응력-변형률 선도에서 동일 변형률에 해당하는 응력의 차이의 절대값 합을 의미한다.

$$E_R = \sum_{i=1}^m |\sigma_{\text{exp},i} - \sigma_{\text{ana},i}| \quad (2)$$

여기서  $\sigma_{\text{exp}}$  및  $\sigma_{\text{ana}}$  는 각각 인장실험 및 FE 해석을 통하여 구한 응력을 나타낸다. 또한  $m$  은 응력의 차이를 구하기 위한 기준 변형률 값의 수량을 의미하며 20 개의 변형률 값을 사용하였다.

Fig. 12 는 이러한 절차를 통하여 구한 상대오차를 압입자 직경대비 압입 하부 방향 별로, 압입자 직경 대비 반경방향 관측지점에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 동일 변형률에서 구한 인장실험 및 FE 해석을 통한 응력의 상대 오차는 압입자 직경 대비 압입하부 5% 및 반경방향 0%지점에서 최소가 됨을 알 수 있다. 또한 이러한 경향은 아연도금강판의 두께와 관계없이 유지됨을 확인할 수 있다. 따라서 압입자와 아연도금강판사이의 마찰계수를 0.1 로 고정한 상태의 압입 상황에 대한 FE 해석을 통하여 아연도금강판의 기계적 물성을 획득하기 위해서는 기존 보고와는 상이하게 압입자 직경 대비 압입하부 5% 및 반경방향 0% 지점에서 응력 및 변형률을 획득하는 것이 보다 바람직하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 다양한 두께를 갖는 아연도금강판 대한 정적 인장시험, 계장화 압입시험 및 이를

이용한 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 통하여 특정 관측지점에서의 진응력-진변형률 선도를 구하였으며 이를 정적 인장시험결과와 비교함으로써 유한요소해석의 정확성을 확인하였다. 또한 마찰계수를 0.1 로 고정한 해석 조건하에서 아연도금강판의 기계적 물성치를 획득하기 위한 최적의 관측지점을 제안하였다.

#### 참고문헌

- (1) Goo, B.C., Lee, D.H., Kwon D.I. and Choi, Y., 2004, "Evaluation of Mechanical Properties of Welded Joints by an Instrumented Indentation Test and Fatigue Life Evaluation," *J. Kor. Soc. Rail. Eng.*, Vol. 7, No. 2, pp. 142~148
- (2) Kim, Y. C., Kim, H. K, Kim, H.K and Kwon D.K 2010, "Determining Mechanical Properties for Safety Assessment of Industrial Structures using Instrumented Indentation Tests" *KSME. Conference. Spring.*, pp.155~156
- (3) Knapp, J.A., Follstaedt, D. M., Myers, J.c., Friedmann, and Ager III, J. W., 1998, "Finite Element Modeling of Nano-indentation for Evaluating Mechanical Properties of MEMS Materials" *Surface and Coatings Technology* 103-104, pp. 268~275
- (4) Taljat, B., Zacharia, T. and Kosel F., 1998, "New Analytical Procedure to Determine Stress-strain Curve from Spherical Indentation Data," *Int. J. Solids Struct.*, Vol.35 No. 33, pp. 4411~4426
- (5) Lee, H. and Lee, J.H., 2008, "Evaluation of Material Characteristics by Micro/Nano Indentation Test," *J. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, No. 10, pp. 805~816.
- (6) KS B 0801, 2007, "Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials," *Korean Standard*
- (7) ABAQUS Version 6.10, Dassault Systems Simulia, Inc.,
- (8) Lee, J.H., 2006, "A Numerical Approach and Experimental Verification of the Indentation Techniques for Material Property and Residual Stress Evaluation" *Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Sogang University.*