[논문] 한국소성가공학회지(2004), 제 13 권 제 6 호
Transactions of Materials Processing **Vol. 13, No. 6, (2004)**

판재 성형품의 탄성회복예측 정밀도 향상을 위한 실험 및 해석

이영선* · 김민철* · 권용남* · 이정환*

(2004년 5월 13일 접수)

Experimental and FE Analysis to Improve the Accuracy of Springback Prediction on Sheet Metal Forming

Y. S. Lee, M. C. Kim, Y. N. Kwon and J. H. Lee

Abstract

Springback comes from the release of external loads after forming. The control of phenomenon is especially important in the sheet metal forming since there are no other practical methods available to correct the dimensional inaccuracy from springback. Therefore the accurate prediction before the die machining has been a long goal in the field of sheet metal forming. The aim of the present study is to enhance the prediction capability of finite element (FE) analysis for the springback phenomenon. For this purpose FE analysis for V-bending has been carried out with the commercial programs, LS-DYNA. The FE analysis results have been validated through the comparison of experimental. The experimental results measured directly by the strain gauge have given the confidence to FEA.

Key Words : V-Bending, Plastic Strain, Elastic Strain, Springback, Residual Stress

1. 서 론

판재 성형 공정에서의 굽힘 작업은 판재 성형 시 가장 많이 쓰이는 공정 중의 하나로 간단한 형상에서 복잡한 형상에 이르기까지 자동차의 차체, 선박의 선체, 비행기 기체에 이르는 다양한 제품들이 생산되고 있다. 판재 성형에서의 굽힘 작업은 가장 단순한 공정이지만 치수 정밀도 제어는 단순하지 않은 특징을 갖고 있다. 이는 판재의 굽힘성형 후 탄성복원 현상에 의해 발생되며, 굽힘 공정에서의 응력 분포 해석을 통한 기술적 정량화가 요구되어지고 성형 공정에서의 조절이 강조되고 있다. 더욱이 고강성과 경량화 등의 새로운 소재의 개발로 인하여 탄성회복 제어를 위한 기술이 더욱 절실히 요구되고 있고 탄성회복을 정밀하게 예측하고자 하는 많은 연구가 진행 되고 있다.[1~12] 디프 드로잉 공정 시 발생되는 탄성회복에 대한 탄소성 유한요소해석[1,2]과 판재 성형 해석 시 바우싱거 효과를 고려한 유한요소 해석[3,4]과 동일한 물성을 가진 재료 및 변형거동[5,6]에 대한 연구가 진행되었다. 유한요소해석 기술에 대한 연구는 성형 해석 시에 외연적 방법을 사용한 후 탄성회복은 내연적 방법을 이용하는 연계법들이 실제품 해석을 위해 적용되었으며[7,8], 해석시간의 증가 없이 탄성회복의 정밀도를 증가시키고자 하는 노력이 이루어져 왔다.[5,9] 본 연구에서는 V-굽힘 모델을 이용한 실험과 유한요소해석 결과를 상호 보완하여 탄성회복량에 대한 예측정밀도를 향상시키고자 하였다. 굽힘 가공 시 발생하는 탄성회복량에 가장 지배적인 영향을 주는 굽힘 응력과

* 한국기계연구원 재료공정연구부

잔류응력을 스트레인 게이지를 이용하여 실시간으로 직접 측정함으로써 응력의 변화를 해석결과와 직접 비교하였다. 실험과 해석에 대한 신뢰도를 높이기 위해 3 가지 종류의 소재를 사용하여 검증을 반복함으로써, 유한요소해석을 이용하여 실제 형상 제품에 대한 해석 및 탄성 회복량 제어에 활용하고자 하였다.

2. 소재의 기계적 특성 분석

2.1 인장시험

본 연구에 사용된 소재는 총 3 종류로서 물성에 따른 탄성회복의 영향을 분석하기 위해 두께 0.8mm 의 철계 소재(SPCC), Al 합금(Al1050), Mg 합금(AZ31)을 사용하였고, 판재에 존재하는 이방성 효과에 따라 압연 방향으로부터 0°, 45° 그리고 90° 방향의 ASTM E8M Subsize 인장시편을 이용하여 인장실험을 수행하였고, 인장시험곡선을 Swift 식을 사용하여 Curve Fitting 한 결과를 이용하여 가공경화지수(n), 가공경화상수(K) 그리고 변형률(ε_0)의 값을 각각의 소재에 대한 결과를 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Properties of sheets measured by tensile test

	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	K	ε_0	n
SPCC	168	292	533	0.00001	0.227
Al1050	136	131	314	0.00003	0.170
AZ31	211	280	582	0.00005	0.250

2.2 탄성계수 측정

탄성계수는 초음파를 이용한 측정 방법을 이용하였다.(ASTE-E-1875)

$$\nu = \frac{1-2(v_T/v_L)^2}{2-2(v_T/v_L)^2}, E = v_L^2\rho\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2)$$

이 방법은 Phase Adjustment 법을 이용하여 게이트가 설정된 두 에코사이의 위상을 주파수 변화에 따라 측정하여 펄스의 진행시간을 계산한다. 측정된 펄스의 진행시간은 음속계산에 사용되어 v_T, v_L 를 측정하여 위의 (1), (2)식을 이용하여 포아송비(Poisson' s ratio,ν), 탄성계수(Young' s modulus,E)를 구하였다. 초음파를 이용한 측정 결과 압연 방향(0^0)이 가장 큰 값을 나타내었으며, 압연 방향에 직각 방향(90^0)이 가장 작은 값을 나타내었다. 해석에 사용한 탄성계수 값은 각 방향에 따른 값들의 평균값으로 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 Mechanical properties measured by ultrasonic testing

	Young's Modulus (GPa)	Poission' Ratio
SPCC	210	0.30
Al1050	69	0.33
AZ31	45	0.35

3. V-굽힘을 이용한 실험

3.1 탄성회복량 실험

V-굽힘에서의 탄성 회복량 실험과 탄성 변형률의 측정을 위해 자체 제작된 V-굽힘 금형의 개략도를 Fig.1 에 나타내었다.

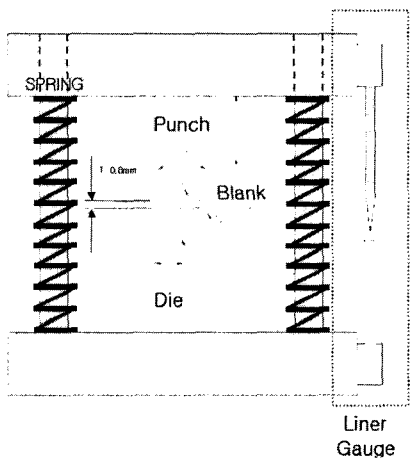


Fig. 1 Schematic diagram of the die set

실험에서 소재-펀치, 소재-다이와의 마찰의 영향을 줄이기 위해 금형 표면을 정밀 사상 가공하였다. 그리고 펀치의 제어 정밀도를 높이기 위하여 Linear Gauge(정밀도:0.1 ㎛)를 이용하여 펀치의 이동량을 제어하였다. 탄성 회복량의 측정을 위하여 소재를 다이에 접촉 시키고, 펀치를 다이에 접촉

시킨 후 이 때의 위치를 초기지점으로 정하고, 펀치의 이동 거리는 소재가 90° 만큼 성형이 되도록 17.1mm 만큼 이동시켰다. 펀치의 가압 속도는 측정 정밀도를 높이기 위해 2mm/min 의 저속을 이용하여 성형하고 성형 후 에는 탄성 회복의 영향을 피하기 위하여 빠른 속도로 후퇴시켰다. 성형된 판재의 탄성 회복량은 CMM(3 차원 측정기)을 이용하여 0.1mm 간격으로 측정하였다.

3.2 탄성 변형률과 응력의 실시간 측정

실시간으로 변형률을 직접 측정하기 위하여 대변형 스트레인 게이지를 판재(가로 100mm, 세로 100mm) 중앙에 부착시키고, 가공물과 금형 사이에서 게이지의 변형을 방지하기위해 간섭 부위는 금형을 수정하였다.(Fig.2)

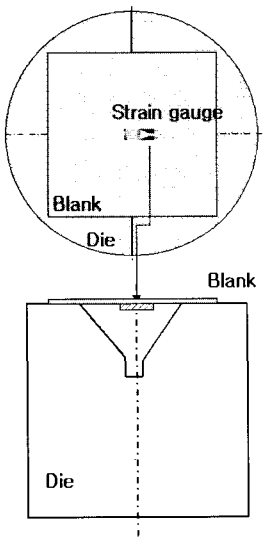


Fig. 2 Schematic diagram of strain gauge attached for a real-time strain measured

Table 3 에 실험에 사용된 대변형용 스트레인 게이지의 규격을 나타내었다. 변형률 측정을 위한 실험조건은 탄성회복량 측정 시와 동일하게 하고 DAS(Data Acquisition System)로 실시간 측정하였다.

Table 3 Type of strain gauge

Gauge type	YFLA-2
Gauge length	2mm
Gauge factor	2.10 ± 2%
Gauge residence	120 ± 0.3 Ω

4. 유한요소해석

4.1 해석인자의 영향 검토

먼저 탄성회복량의 정확한 예측을 위하여 해석의 정밀도에 영향을 미치는 변수들을 분석하고 적정 조건을 선정하기 위하여 요소크기, 요소종류, 두께방향 적분점의 개수를 변수로 선택하여 각각의 변수에 따른 다양한 조건의 해석을 수행하고 이를 검토하여 최적의 해석인자를 선택하였다. 최적 해석을 위한 조건으로 요소는 감차 적분을 사용하고, 4 절점 쉘요소(S4R), 요소크기는 2 mm 로 R_P(펀치반경)의 1/3 이 되는 값을 사용하였다. 또한 두께에 대한 적분점의 개수는 5 개를 사용하였다.

4.2 LS-DYNA 를 이용한 유한요소 해석

해석에 사용된 FE-Solver 로는 LS-DYNA-960 이며, Hill 의 항복 조건식을 이용하여 유한 요소 해석을 수행하였다. 모델링은 I-DEAS, 전처리는 Hyper Mesh 를 이용하여 유한 요소를 생성하고, 후처리는 Hyper View 를 이용하였다.

해석 시간의 단축과 효율성 증대를 위하여 성형공정 해석은 외연적 방법을, 스프링백 공정 해석은 내연적 방법을 이용하였다. Fig.3 은 Hyper-View 로 나타낸 V-굽힘의 해석용 모델을 나타내고 있다. 총 해석시간은 약 40 분이 소요되었다.

Fig. 4(a)는 성형공정에서의 X-Plane 에 의한 응력분포를 나타내었다. Fig. 4(b)은 성형공정 후 스프링백 해석을 통한 X-Plane 에서의 응력 분포를 나타내고 있다. 성형 시 최대 발생 응력은 약 300MPa 로 나타났었고, 스프링백 공정 이후의 응력 분포는 약 75MPa 로 나타났다. 또한 X-Plane 에 최대 변형률은 0.00631 로 나타났으며, 스프링백 이후의 변형률은 0.06162 로 나타났다. 이 때의 변형률의 차이는 0.00155 이었다.

5. 탄성회복량의 실험과 해석값 비교 분석

Fig.5 는 SPCC, A11050, AZ31 의 압연 방향의 소재에 대한 탄성회복량의 해석 결과와 실험 결과를 비교한 그래프로서, 탄성회복량은 AZ31 의 경우 18°, A11050 의 경우 6° SPCC 의 경우 0.8° 로 관찰되었다. 또한 스프링백 해석과 실험의 오차는 SPCC 소재의 경우 0.01° 도의 오차가 발생하였고,

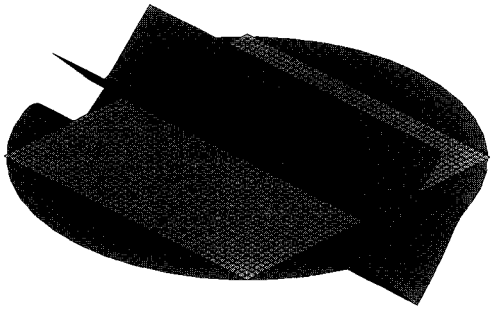
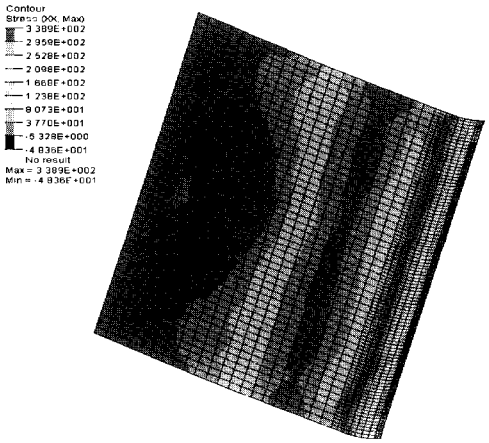
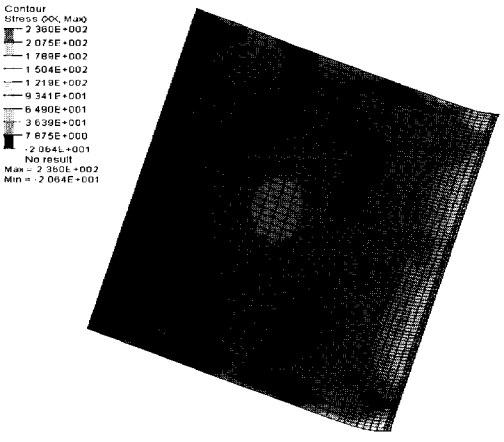


Fig. 3 FE-model for v-bending analysis



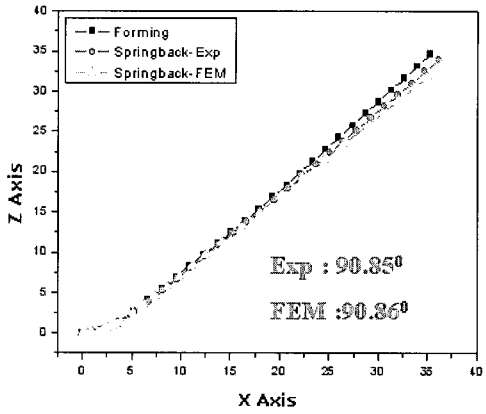
a) forming process



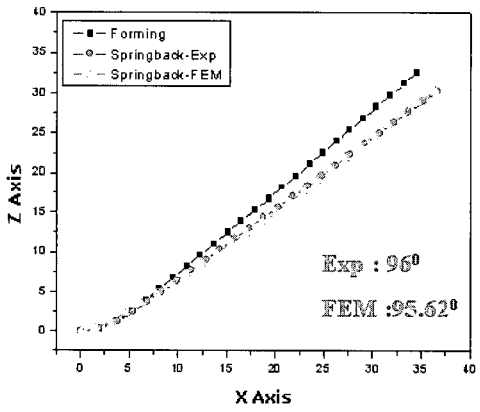
b) after springback

Fig. 4 Distribution of von-Mises stress value for v-die bending simulation(SPCC)

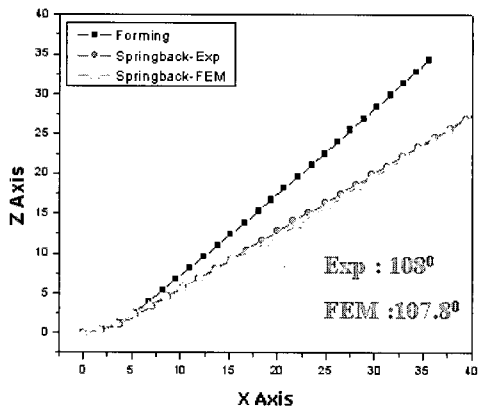
Al 합금의 경우 0.36° 그리고 Mg 합금은 0.2° 도의 차이를 보였다.



(a) SPCC

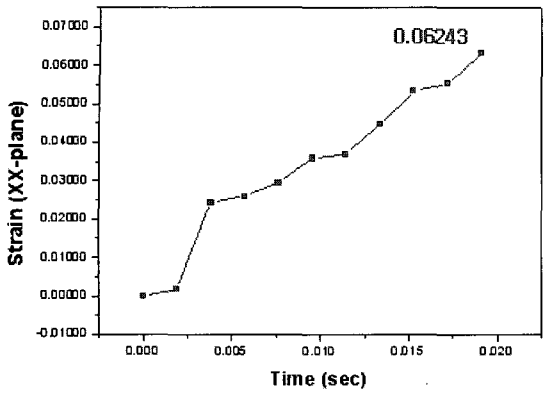


(b) Al 1050

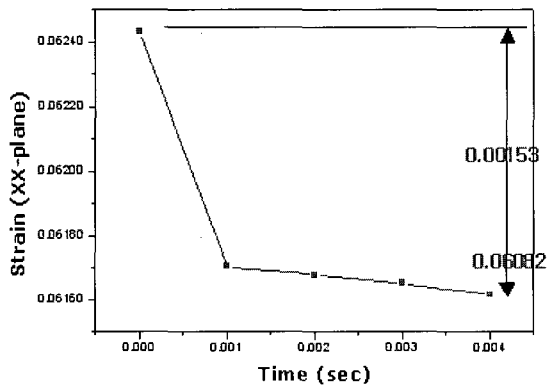


(c) AZ-31

Fig. 5 Springback for various materials experimenal and analysis results

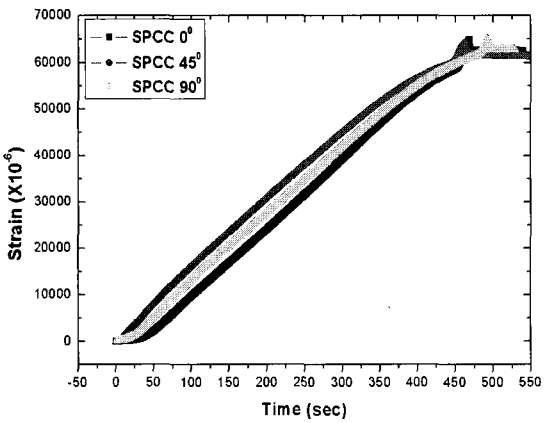


(a) On forming

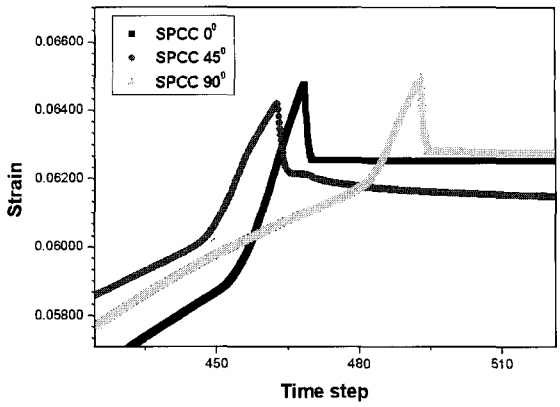


(b) After-springback

Fig. 6 Total strain estimated by FE-analysis



(a) Real-time stain measurement of experiment



(b) Magnified view of real-time stain measurement

Fig. 7 Variation of measured strain according to time

Fig.6는 SPCC압연방향 소재에 대하여 유한요소법을 이용한 성형해석과 스프링백 해석에서 변형률의 결과를 나타내었다. Fig.6(a)는 성형 해석 시 X-plane에 대하여 변형률이 0.06243으로 나타났고, Fig.6(b)는 스프링백 해석 시에 나타나는 변형률을 나타내고 있다. 이때 감소되는 변형률 값은 탄성 변형률로 0.00153로 나타났고, 소성변형률은 0.06082로 나타났다.

Fig.7 에서는 성형 실험 시 스트레인 게이지를 통해 측정한 변형률의 변화를 나타내고 있다. 실시간 변형률 측정에서 SPCC 소재에 대하여 각 방향별로 측정하였는데 압연 방향에 대하여 전 변형률은 0.06272, 소성 변형률은 0.06116 로 탄성 변형률은 0.00155 로 나타났다. 그리고 소재의 압연방향에 따라 미소한 변형률 차이가 발생하였고, 압연 방향에 90^0 방향이 가장 큰 차이를 나타내었는데, 이는 탄성계수의 차이로 판단된다.

SPCC 소재의 압연 방향에 대하여 실험과 유한요소해석을 비교한 결과 변형률의 오차가 Δ 0.0003 만큼 발생하였다. Table 4 에 변형률의 차이를 나타내었다.

Table 4 Comparison of strain between experimental and FE analysis

	Total Strain	Plastic Strain	Elastic Strain
Experiment	0.06272	0.06116	0.00155
LS-DYNA	0.06243	0.06082	0.00153
Difference	0.00029	0.00034	0.00002

Fig.8 에서는 응력과 변형률에 대한 측정 결과의 재검증을 위해 SPCC-0^0 소재에 대하여 4 단계의 가압과 제하를 반복하면서 변형률의 변화를 측정하였다. 인장 곡선상에서 비교한 결과는 Fig.9 와 같다.

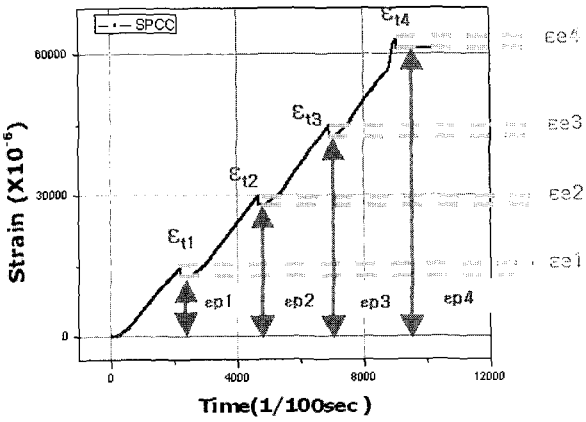


Fig.8 Elastic and total strain changes measured by repeated loading and unloading test

먼저 전 변형률(ε_{total}) 은 탄성변형률(ε_e)과 소성변형률(ε_p)의 합으로 나타내어지는데, Fig.8 에서의 4 단계에서의 가압 전 변형률과 제하 탄성 변형률의 단계에서 얻어지는 차이를 이용하여 탄성 변형률과 소성변형률의 합으로 나타내었다. SPCC 소재의 인장 곡선상에서 탄성변형률을 계산하면 Fig.9 와 같다. 전 변형률의 값을 입력하였다, 인장곡선에서는 4 단계의 변형률 값을 이용하고, 이 값들에서 탄성계수의 기울기로 오프셋(offset) 시켰을 때 탄성 변형률 값과 소성변형률 값을 구할 수 있었다. 다음 Table 5, 6 에는 스트레인 게이지에서 측정된 탄성변형률과 소성변형률의 값을 전변형률을 기준으로 인장곡선에서 계산한 값을 비교하였다.

Table 5, 6의 결과로 소성변형률의 값의 경우 인장실험과 실시간 변형률 측정에서 잘 일치함을 볼 수 있었다. 탄성 변형률의 경우는 전변형률이 증가될수록 보다 동일해짐을 알 수 있었으며, Table7에서의 응력에 대한 실험과 해석의 차이는 해석은 두께 방향의 중립면, 실험은 소재의 표면에서 측정되었기 때문에 나타나는 차이로 판단된다.

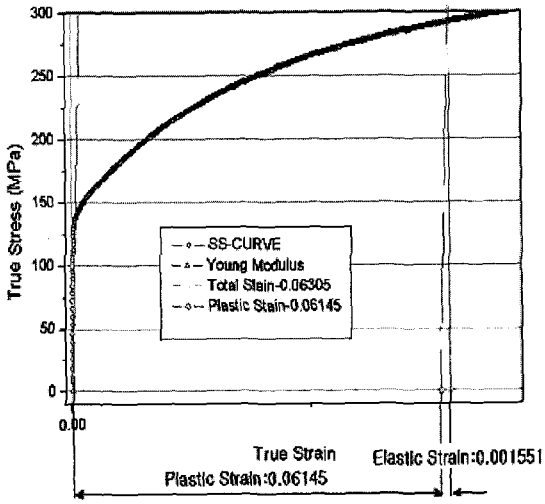


Fig. 9 Elastic and plastic strain calculated stress-strain curve

Table 5 Comparison of measured plastic strain

Plastic Strain	ε_{p1}	ε_{p2}	ε_{p3}	ε_{p4}
Offset Value from Tensile Curve	0.01338	0.02871	0.04503	0.06198
Measured Value by Strain Gauge	0.01307	0.0279	0.04258	0.06116

Table 6 Comparison of measured elastic strain

Elastic Strain	ε_{e1}	ε_{e2}	ε_{e3}	ε_{e4}
Offset Value from Tensile curve	0.0009	0.001	0.0013	0.0011
Measured Value by Strain gauge	0.0018	0.002	0.0018	0.0015

Table 7 Comparison of stress changes between measur-ed stress and calculated stress

	Experiment	FEM (LS-DYNA)
As forming	292 MPa	300 MPa
After springback	0 MPa	75 MPa

6. 결 론

일반적인 박판성형공정에서의 정확한 예측을 위해 성형 공정 해석 시에는 외연적 방법을, 탄성회복 공정에 대해서는 내연적 방법을 사용하고 있는 현재의 유한요소해석 기법에 대한 신뢰도를 입증, 향상시키기 위해 V 굽힘 모델을 이용하여 실험과 해석을 수행하였다. 먼저 유한요소해석을 위하여 소재 특성에 대한 영향을 분석하기 위해 물성치가 상이한 3 가지 소재(SPCC, Al1050, AZ31)에 대해서 상호 비교,분석하였다. 그리고 이를 이용한 FEM 해석과 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 실험값과 해석값의 차이는 각도 기준으로는 Al 합금(Al1050)의 경우 0.36°, Mg 합금(AZ31)의 경우가 최대 0.2°, 철계 소재(SPCC)의 경우는 0.01° 의 차이를 나타내고 있어, 역시 탄성회복이 큰 소재의 경우가 해석으로 그 값을 정밀하게 예측하기가 더욱 어려움을 보여주고 있다.

(2) 탄성회복에 대한 해석과 실험값의 차이 발생에 대한 원인을 분석하고자 판재 소재에 스트레인 게이지를 부착하여 변형률의 변화를 직접 측정한 결과, 탄성 변형율로 0.2×10^{-4} 만큼의 차이를 나타내고 있었다. 결국, 해석 관점에서 가장 큰 차이를 야기시킬 수 있는 것 가운데 하나인 잔류응력의 차이(실험과 해석)는 유한요소해석에서는 75MPa, 실시간 변형률 측정에서는 0(zero)로 나타남을 알 수 있었다.

따라서 잔류응력과 탄성회복률의 정밀한 예측을 위해서는 실제 현장에서 발생 되고 있는 복잡하고 다양한 판재 성형 공정을 고려한 해석 모델의 연구가 필요할 것으로 판단되며, 향후 이에 대한 연구가 계속 진행 되어져야 한다.

참 고 문 헌

(1) 김영은, 김종호 정완진, 2001, " 글래드 강 판재의 축대칭 디프 드로잉의 탄소성 유한요소해석" 한국소성가공학회지, 제 10 권, 제 5 호.

(2) 서의권, 심현보, 1996, "정사각형 컵 Deep drawing 의 탄소성 해석" 한국소성가공학회지, 제 5 권, 제 1 호.

(3) B.K. Chun, H.Y. Kim, J.T.Jinn, J.K.Lee, 2002, "Modeling the Bauschinger effect for sheet metals, part Ⅰ, Ⅱ : theory " Int. J.Plasicty 18, pp.571~616.

(4) Jenn-Terng Gau, Gary L. Kinzel, 2001, "A new model for springback prediction in which the Bauschinger effect is considered" Int.J. of Mech Sci 43, pp. 1813~1832.

(5) K.P. Li, W.P. Carden, R.H. Wagoner, 2002, "Simulation of springback" Int. J.. Mech. .Sci 44, pp. 103~122.

(6) R.M. Cleveland, A.K. Ghosh, 2002, "Inelastic effects on springback in metals" Int. J.of Plasticty 18, pp. 769~785.

(7) Narkeeran Narasimhan, Michael Lovell, 1999, "Predicting springback in sheet metal forming : an explicit to implicit sequential solution procedure" FINITE elements in Analysis and design 33, pp. 29~42.

(8) 이두환, 윤치상, 신철수, 조원석, 구본영, 금영탁, 2000, "수직벽을 가진 자동차 부품 성형공정의 스프링백 유한 요소해석" 한국소성가공학회지(2000) 제 9 권, 제 6 호.

(9) 박종세, 김승호, 허 훈, 2002, "박판 성형공정에서의 등가경계조건 계산을 위한 드로우 비드 성형의 탄소성 유한 요소 해석-Part Ⅱ : 프론트 도어 판넬 성형공정에의 적용" 한국소성가공학회지, 제 11 권, 제 6 호.

(10) 박종세, 김승호, 허 훈, 2002, "박판 성형공정에서의 등가경계조건 계산을 위한 드로우 비드 성형의 탄소성 유한 요소 해석-Part Ⅰ : 등가경계조건 계산" 한국소성가공학회지, 제 11 권, 제 6 호.

(11) 양재봉, 전병희, 오수익, 2000, "반응 표면분석법을 이용한 알 루미늄 판재성형 공정의 스프링백 저감에 관한 연구" 한국소성가공학회지, 제 9 권, 제 5 호.

(12) Xuechun Li, Yuying Yang, Yongzhi Wang, Jun Bao and Shunping Li, 2002, "Effect of the material-hardening mode on the springback simulation accuracy of V-bending. J. of Materials Processing Tech 123 pp. 209~211.