

# 판재 성형품의 탄성회복예측 정밀도 향상을 위한 모델 연구

김민철\* · 이영선\* · 권용남\* · 이정환\*

## A study of model to improve the accuracy of Springback prediction on sheet metal forming

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

### Abstract

Springback comes from the release of residual stress 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 predication 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, Resident Stress, LS-DYNA

### 1. 서론

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 작업이지만 치수 정밀도는 많이 낮다. 이는 판재 성형 시 스프링백 현상에 의해 발생되었으며, 굽힘공정에서의 굽힘 역학을 통한 기술적 정량화가 요구되어지고 있다. 더욱이 고강도의 신소재의 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 대해 공정[1,2]과 바우싱거 효과[3,4]와 같은 물성 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] 따라서 본 연구에서는 탄성회복의 정확한 FEM 해석을 위해 가장 큰 영향을 주는 인자들을 찾고 이를 이용하여 성형 해석 시는 외연적 방법을 사용하고, 탄성회복 해석 시는 내연적 방법을 사용 있는 기존의 유한요소 해석을 위해 가장 큰 영향을 주는 인자들을 찾고 이를 이용하여 성형해석 시는 외연적 방법을 사용하고, 탄성회복 해석 시는 내연적 방법을

\* 한국기계연구원 소성응용그룹

사용하고 있는 기존의 유한요소해석 방법에 대한 신뢰성을 입증하고 성형 시와 탄성회복 후의 응력 변화를 실험을 통해 직접 측정 함으로서 향후 실 제품의 탄성 회복량 제어를 위해 유한요소해석을 적극적으로 이용할 바탕을 마련하고자 하였다.

## 2. 소재의 기계적 특성 분석

본 연구에 사용된 소재는 총 3 종류로서 물성에 따른 탄성회복의 영향을 분석하기 위해 철계 (SPCC), Al 합금(AI1050), Mg 합금(AZ31)을 사용하였고, 판재에 존재하는 이방성 효과에 따라 압연 방향으로부터  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  그리고  $90^{\circ}$  방향의 ASTM E8M Subsize 인장시편을 이용하여 인장실험을 수행하였고, 인장실험에서의 결과를 이용하여 가공경화지수, 가공경화상수 그리고 변형률의 값을 각각의 소재에 대하여 정리하였으며, 압연 방향의 값을 Table 1에 나타내었다.

**Table 1 Properties of sheets measured by tensile test**

	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)	K	$\epsilon_0$	n
SPCC	168	292	26	533	0.00001	0.227
AI1050	136	131	2.5	314	0.00003	0.170
AZ31	211	280	22	582	0.00005	0.250

탄성계수는 초음파를 이용하여 방향별( $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ )에 따라 시편을 측정된 결과에서 압연 방향이 가장 높게 나왔으며, 압연 방향에 직각 방향이 가장 작은 값을 나타내었고 평균값은 Table 2와 같다.

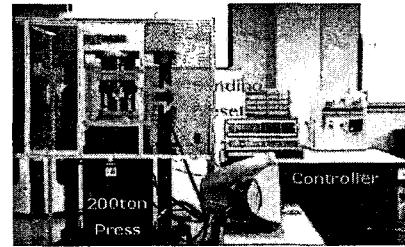
**Table 2 Mechanical properties measured by ultrasonic testing**

	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
SPCC	210	0.3
AI1050	69	0.33
AZ31	45	0.35

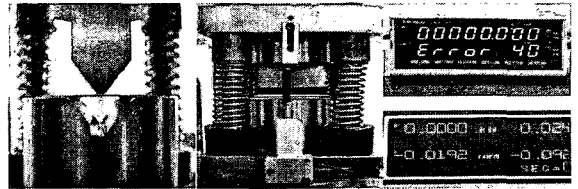
## 3. V-굽힘을 이용한 실험

### 3.1 V-굽힘을 이용한 탄성회복량 실험

V-굽힘에서의 탄성 회복량과 탄성 변형률의 측정을 위해 자체 제작된 V-die 금형과 실험에 사용한 CNC 200 톤 유압프레스를 Fig.1(a)에 나타내고 있다. 실험에서 마찰의 영향을 줄이기 위해 금형 표면을 정밀 사상 가공하였다. V 굽힘의 Stroke를 기준으로 성형량을 설정했으며, 제어 정밀도를 높이기 위하여 Liner Gauge(정밀도 :  $0.1 \mu\text{m}$ )를 이용 하였다. Fig.1(c)에 나타내었다.



(a)



(b) (c) (d)

(a) Press for V-bending process

(b), (c), (d) : Die and dieset for V-bending process

Fig. 1 V-bending test equipment

먼저, 탄성 회복량의 측정을 위하여 펀치와 판재의 접촉된 위치를 초기지점으로 정하고, 하부 다이까지의 거리, 17.1mm 만큼 이동시켰다. 성형 속도는 측정 정밀도를 높이기 위해 2mm/min의 저속을 이용하였다. 공정순서는 Fig.2와 같다.



Fig. 2 V-bending process

### 3.2 탄성 회복량 측정

탄성회복 된 소재의 탄성 회복량을 측정하기 위하여 Fig.3 과 같이 CCM(3 차원측정기)를 이용

하였고, 프루브의 직경은 2mm 로 시험편을 0.1mm 간격으로 측정하였다.

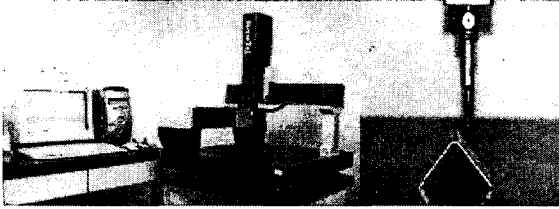


Fig. 3 Measurement of dimension by CCMM

### 3.3 탄성 변형률의 실시간 측정

대변형 스트레인 게이지를 이용하여 실시간으로 변형률을 직접 측정하기 위하여 판재에 대변형 스트레인 게이지를 부착시켰으며, 가공물과 금형 사이에서 게이지의 변형을 방지하기 위해 간섭 부위는 금형을 수정하였다(Fig.3). Table 3 에 실험에 사용된 대변형용 스트레인 게이지의 규격을 나타내었다.

Table 3 Type of strain gauge

GAUGE TYPE	YFLA-2
GAUGE LENGTH	2mm
GAUGE FACTOR	2.10 ± 2%
GAUGE RESISTANCE	120 ± 0.3 Ω

탄성 변형률의 측정을 위하여 탄성회복량 측정 시와 동일하게 하고 DAS(Data Acquisition System)으로 실시간 측정하였다. Fig.4 에 DAS 장비들을 나타내었다.



Fig. 4 DAS and strain gauge attached for a real-time strain measured

## 4. 유한요소해석

### 4.1 해석인자의 영향 검토

스프링백 해석의 정밀도에 영향을 미치는 변수들을 분석하고 적정 조건을 선정하기 위하여 요소크기, 요소종류, 두께방향 적분점의 개수를 변수로 선택하여 각각의 변수별로 다양한 해석을 수행하고 그를 검토하여 최적의 해석인자를 선택하였다. 이 단계를 거쳐 선택된 요소는 감차 적분을 사용한 4 절점요소(S4R)로 요소크기는 2 mm 로  $R_p$ (편치반경)의 1/3 이 되는 값을 사용하였다. 또한 두께에 대한 적분점의 개수는 5 개를 사용하였다.

### 4.2 LS-DYNA 를 이용한 유한요소 해석

LS-DYNA 를 이용한 유한요소해석을 위해 모델링은 I-DEAS, 전처리는 Hyper Mesh 를 이용하여 유한 요소를 생성하였으며, 후처리는 Hyper View 를 이용하였다.

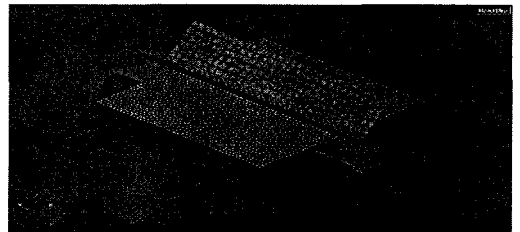
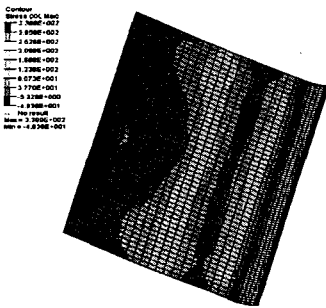


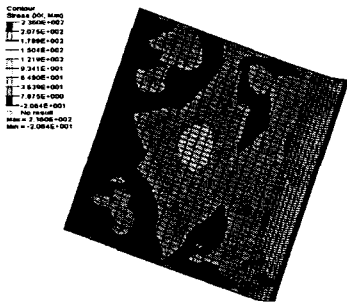
Fig. 5 Element geometry for the V-bending. Shell elements have been used for the present LS-DYNA.

해석 시간의 단축과 효율성을 위해 성형공정에서는 외연적 방법을 스프링백 공정에서는 내연적 방법을 이용하였다. Fig.5 는 Hyper-View 로 나타낸 V-굽힘의 해석용 모델을 나타내고 있다. 총 해석시간은 약 40 분이 소요되었다.

Fig. 6(a) 는 성형공정에서의 XX-Plane 에 의한 응력분포를 나타내었다. 그리고 X-Plane 에 대하여 성형 시 최대 발생 응력은 337MPa 이었고, 스프링백 공정 이후(Fig. 6(b))의 잔류 응력량은 약 74MPa 이었다. 또한 성형 시 X-Plane 에 최대 변형률은 0.0063155 이었고 스프링백 이후의 변형률은 0.0061619 이었다. 이때의 탄성 변형률은 0.001551 로 나타났다.



(a) sheet forming process



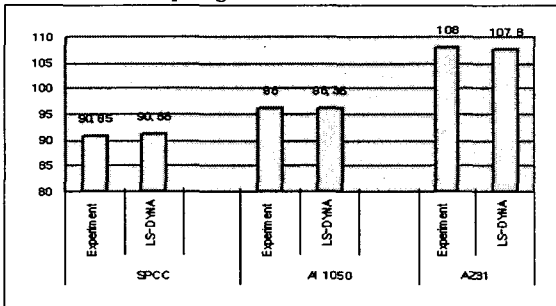
(b) after springback

Fig. 6 Distribution of von-Mises stress value for V-die bending simulation

### 5. 결과

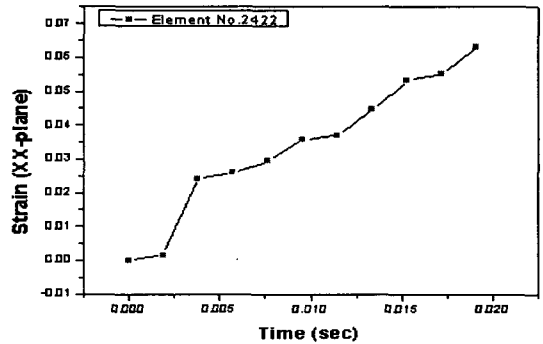
본 연구에서는 철계 소재와 경량 합금 소재들의 정확한 스프링백 예측을 목표로 수행된 V-굽힘실험 해석을 수행하였다. Table 4에 SPCC, AI 합금, Mg 합금의 압연 방향에 대한 탄성회복량 결과를 나타내었다.

Table 4 Springback of various materials

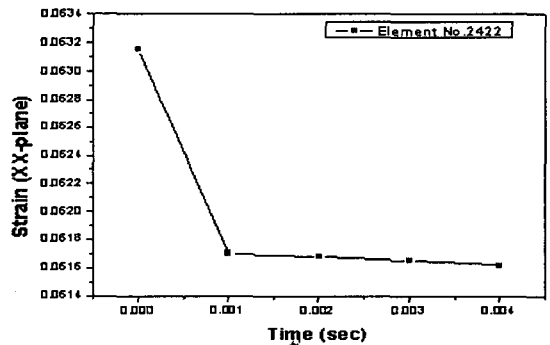


스프링백 현상이 가장 많이 나타나는 재료는 Mg 합금이었고, 다음은 AI 합금 그리고 철계합금으로 나타났다. 따라서 스프링백의 영향에는 탄성계수의 영향이 지배적임을 알 수 있었다. 또한 해석과 실험의 오차는 SPCC 소재의 경우 0.01°도의 오차가 발생하였고, AI 합금의 경우 0.36° 그리고 Mg 합금은 0.2°도의 차이를 보였다.

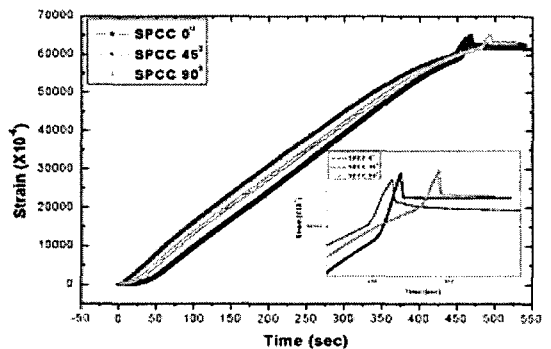
Fig 6은 FEM 과 실험의 탄성변형률을 비교하였다.



(a) in sheet forming process total strain through LS-DYNA



(b) after-springback total strain through LS-DYNA



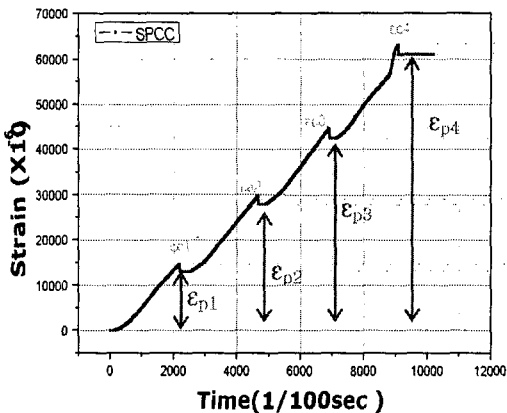
(C) real-time strain measurement of experiment  
Fig. 7 Compared of total strain

Fig. 7(a)는 성형 해석 시 X-plane 에 대하여 전변형률이 0.00624323 으로 나타났고, Fig. 7(b)는 스프링백 해석 시에 나타나는 변형률을 나타내고 있다. 이때 감소되는 변형률 값은 탄성 변형률로 0.00153 으로 나타났고 소성변형률은 0.0060821 로 나타났다. Fig. 7(c)에서의 실시간 스트레인 실험에서는 각 방향별로 측정하였는데 압연 방향에 대하여 전 변형률은 0.06272, 소성 변형률은 0.061169 로 탄성 변형률은 0.001551 로 나타났다. 그리고 소재의 압연 방향에 따라 미소한 변형률 차이가 발생함을 보여 주고 있고, 압연 방향에 90° 방향이 가장 많은 스트레인의 발생량을 보이고 있다. 압연 방향에 대하여 실험과 FEM 해석의 탄성 변형률의 오차가 0.000021 만큼 발생하였다. 그리고, 탄성 변형률의 차이를 Table 5에 나타내었다.

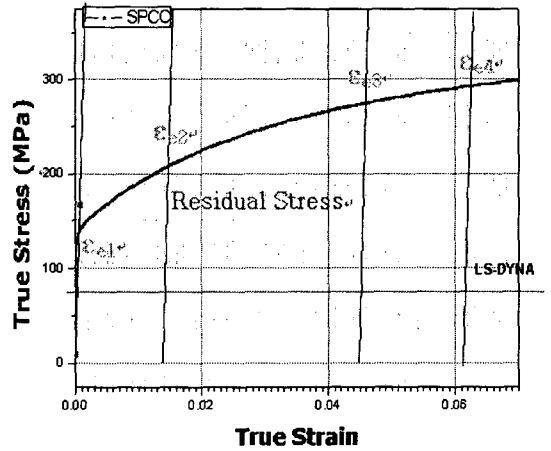
**Table 5 Total strain by analysis method and experiment**

	Total Strain	Plastic Strain	Elastic Strain
Experiment	0.06272	0.061169	0.001551
LS-DYNA	0.0624323	0.0608213	0.00153
Difference.	0.0002877	0.0003477	0.000021

응력과 변형률에 대한 측정 결과의 재검증을 위해 Fig.8 과 같이 SPCC 소재에 대하여 검증 실험을 하였다. 소재에 스트레인 게이지를 부착시켜 놓고 4 단계의 가압과 제하를 통하여 소성변형률과 탄성 변형률을 측정하였다.



**Fig. 8 Strain change curve by the stepped loading-unloading experiment**



**Fig. 9 SPCC of true stress -true strain curve**

그리고 전 변형률( $\epsilon_{total}$ )은 탄성변형률( $\epsilon_e$ )과 소성변형률( $\epsilon_p$ )의 합으로 나타내어지는데, 각각의 단계에서의 변형률을 전변형률로 보고 SPCC 소재의 인장 곡선(Fig. 9)에 각 단계에 따른 변형률의 값을 대입시키고 탄성계수의 기울기로 오프셋(offset) 시켰을 때 탄성 변형률값과 소성변형률 값을 비교하고 이를 Table 6, 7에 나타내었다.

**Table 6 Comparison of measured plastic strain**

Plastic Strain	$\epsilon_{p1}$	$\epsilon_{p2}$	$\epsilon_{p3}$	$\epsilon_{p4}$
Offset Value from Tensile curve	0.013382	0.028715	0.045032	0.061980
Measured Value by Strain gauge	0.013077	0.0279	0.042586	0.061169

**Table 7 Comparison of measured elastic strain**

Elastic Strain	$\epsilon_{e1}$	$\epsilon_{e2}$	$\epsilon_{e3}$	$\epsilon_{e4}$
Offset Value from Tensile curve	0.000855	0.000998	0.001300	0.001136
Measured Value by Strain gauge	0.001873	0.002036	0.001812	0.001551

## 6. 결 론

성형 공정 해석시에는 외연적 방법을, 탄성회복 공정에 대해서는 내연적 방법을 사용하고 있는 현재의 유한요소해석 기법에 대한 신뢰도를 입증, 향상시키기 위해 V 굽힘 모델을 이용하여 실험과 해석을 수행하였으며, 소재 특성에 대한 영향을 분석하기 위해 물성치가 상이한 3 가지 소재 (SPCC, A11050, AZ31)에 대해서 상호 비교, 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 실험값과 해석값의 차이는 각도 기준으로는 Al 합금(A11050)의 경우  $0.36^\circ$ , Mg 합금(AZ31)의 경우가 최대  $0.2^\circ$ , 철계 소재(SPCC)의 경우는  $0.01^\circ$  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 스트레인게이지를 부착하여 변형률의 변화를 직접 측정한 결과, 탄성 변형률로  $0.2 \times 10^{-4}$  만큼의 차이를 나타내고 있었다. 결국, 해석 관점에서 가장 큰 차이를 야기시킬 수 있는 것 가운데 하나인 잔류응력의 차이(실험과 해석)는 미소함을 알 수 있었다.

그러므로, 보다 정밀한 예측을 위해서는 해석 모델을 보다 현실적으로 고려할 수 있도록 하는 방안 모색이 필요할 것으로 판단되며 이에 대한 연구를 계속 수행할 예정이다

## 후 기

본 과제는 기본연구사업과제, 21C 프론티어 사업인 “차세대 소재 성형 기술 개발” 과제의 연구 결과로서 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 정완진 외, 2001, “글래드 강판재의 축대칭 디프 드로잉의 탄소성 유한요소해석” 한국소성학회지(2001) 제 10 권, 제 5 호, pp411-417
- (2) 심현보 외, 1996, “정사각형 컵 Deep drawing 의 탄소성 해석” 한국소성학회지(1996) 제 5 권, 제 1 호, pp8-17
- (3) J.K.Lee, 2002, “Modeling the Bauschinger effect for sheet metals, part I, II : theory ” Int. J.Plasticity 18, pp571-616
- (4) Gary L. Kinzel, 2001, “A new model for springback prediction in which the Bauschinger effect is considered” Int.J. of Mech Sci 43, pp1813-1832
- (5) R.H. Wagoner, 2002, “Simulation of springback” Int. J. Mech. Sci 44, pp.103-122
- (6) A.K. Ghosh, 2002, “Inelastic effects on springback in metals” Int. J.of Plasticity 18, pp769-785
- (7) Michael Lovell, 1999, “Predicting springback in sheet metal forming : an explicit to implicit sequential solution procedure” FINITE elements in Analysis and design 33, pp29-42
- (8) 금영탁 외, 2000, “수직벽을 가진 자동차 부품 성형공정의 스프링백 유한 요소해석” 한국소성학회지(2000) 제 9 권, 제 6 호, pp574-581
- (9) 허훈 외, 2002, “박판 성형공정에서의 등가경계 조건 계산을 위한 드로우 비드 성형의 탄소성 유한 요소 해석-Part II : 프론트 도어 판넬 성형공정에의 적용” 한국소성학회지(2002) 제 11 권, 제 6 호, pp513-518
- (10) 양동열 외, 2003, “하이브리드 박막/첼 방법을 이용한 박판성형공정의 스프링 백 해석”, 한국소성공학학회지 제 12 권, 제 1 호, pp49-59
- (11) 오수익 외, 2000, “반응 표면분석법을 이용한 알 루미늄 판재성형 공정의 스프링백 저감에 관한 연구” 한국소성학회지(2000) 제 9 권, 제 5 호, pp526-532
- (12) Xuechun 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