

## 금형변형을 고려한 성형 CAE에서의 스프링백 예측정확도 향상

박정수<sup>1,2</sup> · 최현준<sup>3</sup> · 김세호<sup>#</sup>

### Improvement in Prediction Accuracy of Springback for Stamping CAE considering Tool Deformation

J. S. Park, H. J. Choi, S. H. Kim

(Received July 17, 2014 / Revised August 26, 2014 / Accepted August 27, 2014)

#### Abstract

An analysis procedure is proposed to improve the prediction accuracy of springback as well as to evaluate the structural stability of the tooling used for fabricating a side sill part from UHSS. The analysis couples the stamping analysis and the subsequent analysis of the tool structural. The deformation and stress results for the tool structure are obtained from the proposed analysis procedure. The results show that the amount of deformation and stresses are so high that the tool structure must be reinforced and the tooling design must consider structural stability. Springback is predicted with CAE in order to compare the prediction accuracy between the given tool geometry and the geometry from the structural analysis. The simulation results with the deformed tool can predict the experimental springback tendency accurately.

**Key Words** : Prediction Accuracy, Springback, Tool Deformation, UHSS(Ultra High Strength Steel)

#### 1. 서론

최근 자동차 업계에서는 차량 경량화에 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있다. 차량부품에 고강도강을 적용할 경우 경량화에 의하여 연비를 증가시키고 충돌안전성을 향상시킬 수 있는 장점이 있어 차량 부품용 소재가 저강도 일반강에서 고강도강으로 전환되고 있는 추세이다. 그러나, 일반강 성형 시 발생하지 않았던 금형수명 감소, 금형 손상, 구조 불안정, 성형성 열화, 스프링백 과다 등의 문제들이 발생하고 있다. 고강도화되고 있는 소재에 반하여 금형의 구조 및 소재가 일반강을 성형하던 기존방식과 동일하게 설계 및 선정되는 것이 불량률의 가장 큰 원인이다. 소재의 인장강도 증가에 따라 블랭크와 금형 사이의 접촉력

이 증가하게 되며, 금형의 과도한 변형에 의해 금형형상 변화가 발생하고 있다. 금형의 변형은 성형중 간극(clearance)을 변화시켜 형합불량을 야기하고 의도된 형상의 성형이 어렵게 되며, 과도한 스프링백 발생의 원인이 된다. 따라서, 형합불량을 제거하고 원하는 형상의 제품을 얻기 위해서는 고강도강 소재에 적합한 금형 구조가 요구된다. 금형의 구조해석을 통한 변형 최적화 또는 스프링백 예측 정밀도 향상에 관련된 연구가 일반강을 대상으로 진행된 사례가 있다[1,2]. 본 논문에서는 초고강도강을 적용한 차량 사이드 시일(side sill) 부품용 금형구조의 구조강도 평가를 위하여 성형해석과 금형구조해석 연계 방안을 제안하였다. 제안된 기법을 이용하여 금형의 구조평가를 수행하였으며, 스프링백 해석의 예측 정확도를 평가하였다.

1. 대구대학교 대학원 기계공학과

2. 한국생산기술연구원 성형기술연구그룹

3. ㈜화신 기술연구소

# Corresponding Author : School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu University, E-mail: mvksh@daegu.ac.kr

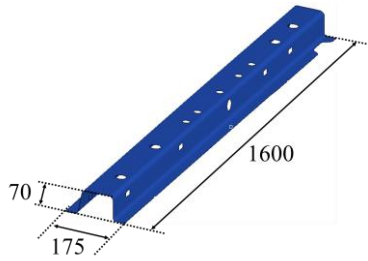
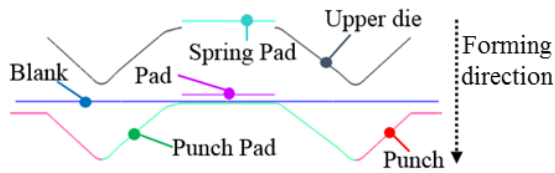
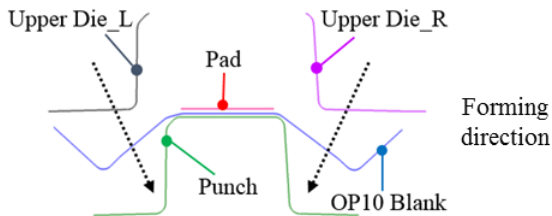


Fig. 1 Shape and dimension of the side sill (unit : mm)



(a) OP10



(b) OP20

Fig. 2 Schematic forming process of the side sill

## 2. 성형공정 해석

### 2.1 성형시험

본 논문의 대상 제품은 Fig. 1에 도시한 사이드 시일이다. 성형에 사용된 소재는 인장강도 1.2GPa급 강판인 SGAF1180Y 이고, 두께는 1.2mm이다. 대상 부품은 4 단계의 프레스 성형공정에 의해 제작된다. 제 1 공정(OP10)과 제 2 공정(OP20)은 폼(form) 공정에 의하여 성형된다. Fig. 2에 제 1 공정과 제 2 공정의 성형과정의 개략도를 도시하였다. 제품 고정을 위한 패딩은 가스 스프링을 활용하였다. 제 3 공정과 제 4 공정은 단순한 트림(trim)과 피어싱(piercing) 공정이다. 앞서 설명한 성형공정을 통해 제작된 각 공정별 제품을 Fig. 3에 도시하였다. 성형이 완료된 제품은 Fig. 4와 같이 광학식 3 차원 스캐너를 통하여 형상을 추출하고 스프링백 양을 정량적으로 측정하였다.

### 2.2 성형 CAE 조건

금형구조해석에 필요한 접촉력을 도출하기 위하여 성형공정해석을 수행하였다. 금형구조해석을 수행하



(a) OP10



(b) OP20



(c) OP30



(d) OP40

Fig. 3 Shape of the formed side sill after each forming stage



Fig. 4 Measurement of the three-dimensional shape of the side sill with an optical scanner

기 위한 목적으로 많은 변형이 발생하는 제 1 공정을 대상으로 하였다. 성형공정해석에 필요한 금형과 블랭크의 유한요소모델을 Fig. 5에 도시하였다. 금형과 블랭크는 쉘(shell)요소로 모델링하고, 각각 강체와 탄소성 변형체로 가정하였다. 금형은 곡률부를 7.5° 간격으로 분할하였다. 초기 블랭크 요소 크기를 15mm로 분할하였으며, 형상 및 스프링백의 정밀한 모사를 위하여 최대 4회의 적응형 요소분할(adaptive mesh refinement)을 실시하였다. 해석을 위하여 상용 유한요소 프로그램인 PAM-STAMP 2G V2012[3]를 이용하였다.

성형해석에 사용한 소재의 기계적 물성값을 Table 1에 정리하였다. 재료의 항복함수는 평면이방성을 고려한 Hill의 1948 모델[4]을 사용하였다. 금형과 블랭크간의 무윤활 조건으로 가정하여 쿨롱 마찰계수는 0.12로 설정하고 상형의 하강속도 2 m/s를 부과하여 해석을 수행하였다.

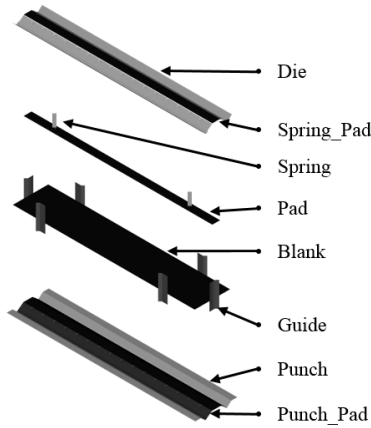


Fig. 5 Finite element model of the tools and the blank used for the stamping analysis of the side sill

Table 1 Mechanical properties of the blank sheet

YS (MPa)	742	K (MPa) <sup>*</sup>	1488.9
UTS (MPa)	1279.16	n <sup>*</sup>	0.0437
R <sub>0</sub> /R <sub>45</sub> /R <sub>90</sub>	0.61/1.00/0.83	ε <sub>0</sub> <sup>*</sup>	0.000919

$$\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon}^n)$$

### 3. 금형구조해석

#### 3.1 금형구조해석 과정

본 절에서는 성형공정해석과 금형구조해석을 연계할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 금형구조해석은 성형해석 중에 얻은 접촉력을 3차원 금형모델에 하중 경계조건으로 적용하는 방식을 이용하여 상하형의 해석을 개별적으로 수행하였다. Fig. 6에 제안된 금형구조해석의 과정을 도시하였다. 2차원 금형도를 이용하여 3차원 금형구조를 모델링한다. 성형해석 후 금형면에 발생된 접촉력을 도출하여 금형구조해석에서 하중조건으로 사용할 수 있도록 데이터의 형태를 변환한다. 변환된 접촉력을 3차원 요소 모델의 표면에 사상하고 경계조건을 부과하여 금형구조해석을 진행한 뒤 결과에서 추출한 응력과 변형량을 이용하여 금형구조의 안전성을 평가하게 된다. 해석은 상용 유한요소 프로그램인 Optistruct V12[5]를 이용하여 진행하였다.

#### 3.2 금형구조 모델링

제품을 성형하기 위한 제1차 공정용 금형의 구조 중 상형은 주물(casting)부, 인서트(insert)부, 가스 스프링으로 이루어져 프레스의 슬라이드에 체결된다.

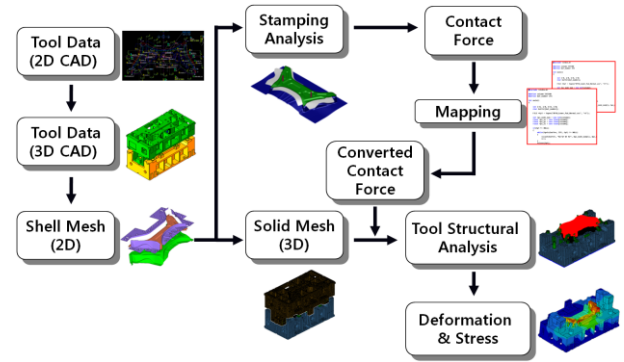


Fig. 6 Flow-chart for the finite element analysis of tool structure

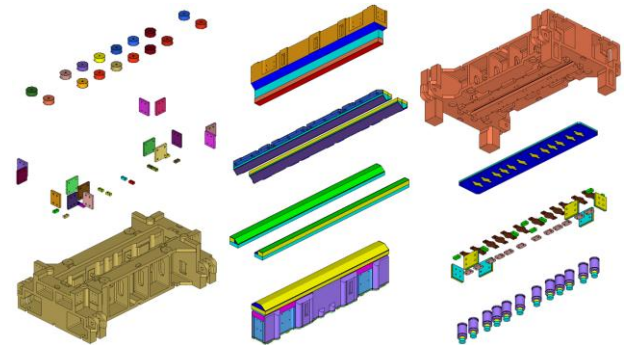


Fig. 7 Three-dimensional model of stamping tools for the OP10 stage

Table 2 Information of finite elements used in the structural analysis of the press tool

Element type	Upper die		Lower die	
	Hexa8 <sup>*</sup>	Tetra4 <sup>*</sup>	Hexa8	Tetra4
Number of elements	106×10 <sup>4</sup>	961×10 <sup>4</sup>	113×10 <sup>4</sup>	777×10 <sup>4</sup>

<sup>\*</sup> Hexa8 : 8-node hexahedral element

<sup>\*</sup> Hexa4 : 4-node tetrahedral element

하형은 주물부와 인서트부로 구성되며 프레스의 볼스터에 부착된다. 금형도와 성형해석에 사용한 금형 마스터면을 바탕으로 인서트부와 주물부를 Fig. 7에 도시한 바와 같이 3차원 모델링하였다. 인서트부는 성형해석에 사용된 쉘요소를 이용하여 8절점 선형 육면체 요소와 4절점 선형 사면체 요소로 모델링하였고, 주물부는 4절점 사면체 연속체 요소로 모델링하였다. 금형이 장착되는 상형의 슬라이드와 하형의 볼스터는 주물부와 같은 방식을 이용하여 모델링하였다. 모델링에 사용된 유한요소의 정보를 Table 2에 요약하였다.

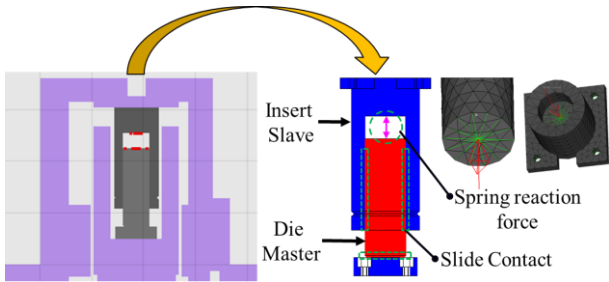


Fig. 8 Boundary condition for considering the padding force and sliding contact of the gas spring



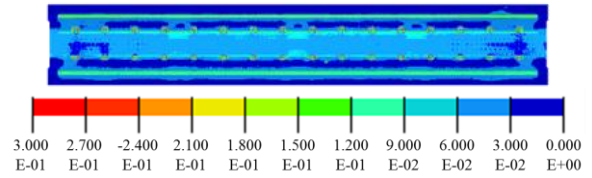
Fig. 9 Boundary conditions for the bolting region and slide contact condition

### 3.3 경계조건

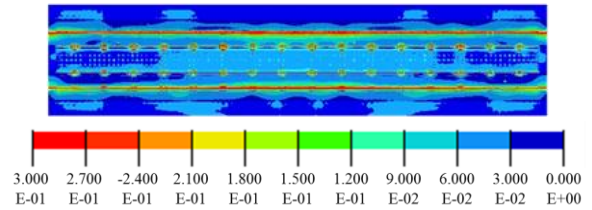
금형구조해석을 통하여 정확한 금형변형 정보를 얻으려면 금형의 경계조건을 정확히 반영해야 한다. 스프링 반력은 Fig. 8에 도시한 바와 같이 실린더 내측에 부과하였고, 접촉면에 접촉(slide contact) 조건을 부과하여 가스 스프링의 운동이 가능하도록 하였다. 금형구조 중 볼트 결합 부위는 Fig. 9에 도시한 바와 같이 강체 바(bar) 요소로 결합하였으며, 주물부와 인서트부 접촉면, 주물부와 볼스터 접촉면, 인서트 분할면에 접촉조건을 부과하였다. 성형해석 결과로부터 얻은 접촉력을 금형표면에 사상하여 하중 경계조건을 부과하였다. 프레스 상형의 슬라이드와 하형의 볼스터의 외측면을 구성하는 전체 절점의 자유도를 구속하였다.

### 3.4 금형구조해석 결과

이상의 조건으로 금형구조해석을 수행하였으며, 인서트부에서의 von-Mises 응력, 폭방향과 높이방향 변형량을 분석하였다. Fig. 10에 상형과 하형의 인서트부 응력분포를 도시하였다. 일부 작은 곡률반경 부분의 요소 품질 문제로 과도한 응력이 발생하였지만,

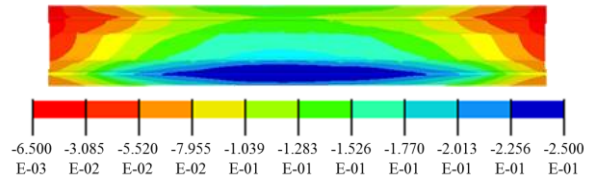


(a) upper tool

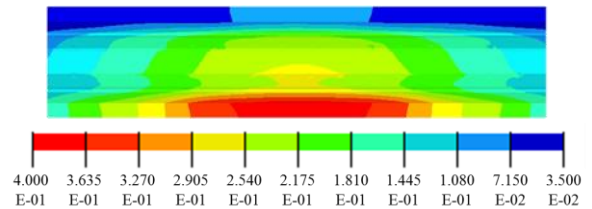


(b) lower tool

Fig.10 Distribution of the von-Mises stress in the insert part (unit : MPa)

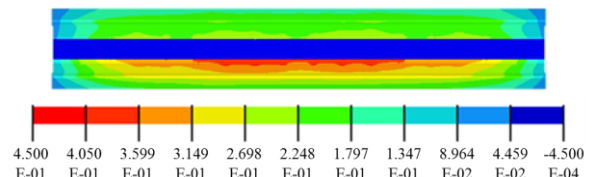


(a) upper tool

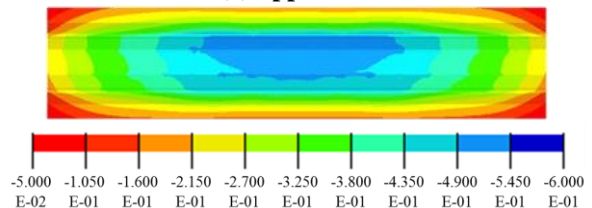


(b) lower tool

Fig.11 Distribution of the displacement along the width direction in the insert part (unit : mm)



(a) upper tool



(b) lower tool

Fig.12 Distribution of the displacement along the height direction in the insert part (unit : mm)

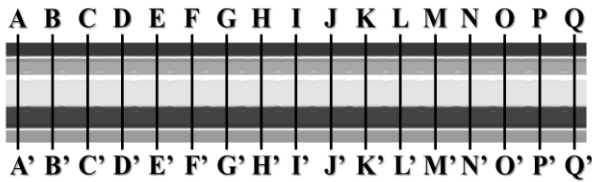


Fig.13 Measuring sections of the blank for springback

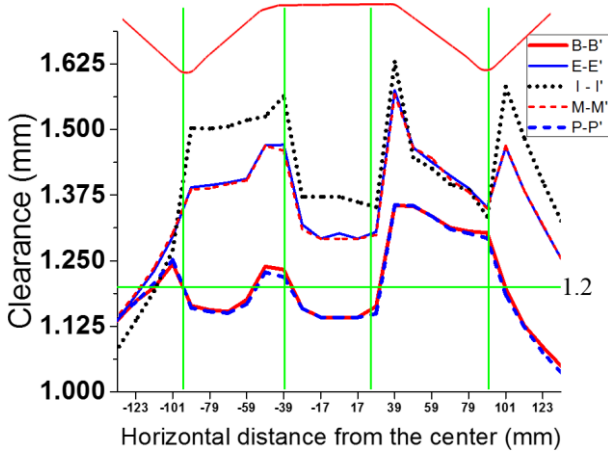


Fig.14 Clearance change between the upper and lower tools from the structural analysis of the tools

전체적인 응력의 분포는 항복강도를 넘지 않는 것을 확인할 수 있었다.

인서트부의 폭방향 변형량을 Fig. 11 에 도시하였으며, 상형과 하형의 폭방향 최대 변형량은 각각 0.28mm 와 0.38mm 로 나타났다. 이는 성형중 블랭크의 반력에 의하여 금형이 변형하고 있음을 의미하며, 이에 따라 상하형의 간극이 변화하여 스프링백에 큰 영향을 줄 수 있는 가능성이 있음을 의미한다. 인서트부의 높이방향 변형량을 Fig. 12 에 도시하였으며, 상형과 하형의 최대 변형량은 각각 0.44 mm 와 0.56mm 로 폭방향과 유사하게 매우 크게 나타났다. 결론적으로 초기 금형형상이 아닌 변형이 고려된 금형형상으로 성형해석 후 스프링백 해석을 수행하는 것이 스프링백 예측의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

이상의 해석에서 얻은 금형변형 결과를 이용하여 상하형의 형합을 실시하고 Fig. 13에서 도시한 단면에서 상하형간의 간극을 측정된 결과를 Fig. 14에 도시하였다. 최종 하사점에서 상하형의 최대 간극은 초기 간극 1.2mm 보다 35% 증가한 1.63mm이 측정되었다. 즉, 블랭크가 금형에 가한 반력에 의하여

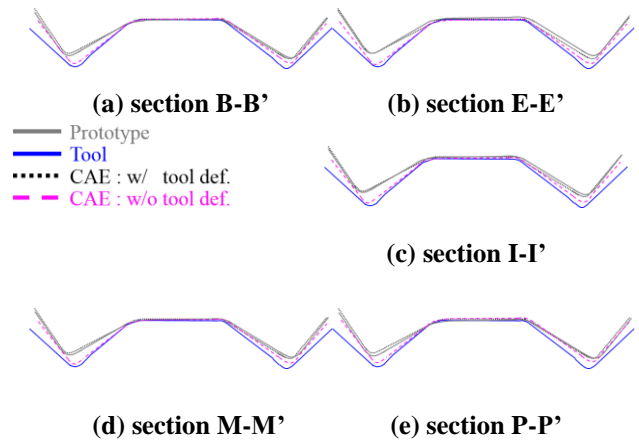


Fig.15 Measurement regions for the surface roughness of the die

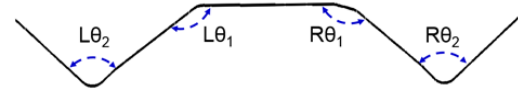


Fig.16 Measuring method of springback modes in the side sill

간극이 증가하여 성형중 형합불량의 가능성이 매우 높음을 의미하며, 이는 접촉력 전달률이 낮아져 스프링백이 커진다는 것을 예측할 수 있는 근거가 된다.

#### 4. 금형변형을 고려한 스프링백 예측

##### 4.1 스프링백 해석 개요

금형구조해석에서 얻은 금형면의 변형형상을 성형공정해석에 고려하고 스프링백 예측 정확도를 분석하였다. 폼 성형공법의 특성상 블랭크 및 금형변형은 하사점 직전에서 발생되므로, 변형이 고려되지 않은 초기 금형형상을 이용하여 성형해석을 수행하다가 변형이 급격히 증가되는 시점인 최종 하사점 2mm 전에 변형된 금형형상으로 교체하여 성형해석을 수행하였다.

##### 4.2 스프링백 예측 결과분석

초기 금형형상과 변형된 금형형상을 이용한 스프링백 해석으로 얻은 성형 형상과 시험결과의 오차를 Fig. 15에 비교하였다. 강제로 가정한 금형형상을 이용한 경우 스프링백 예측 정확도가 현저하게 저하되나, 금형변형을 고려한 경우 시험과의 오차가 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 또한, 금형변형을

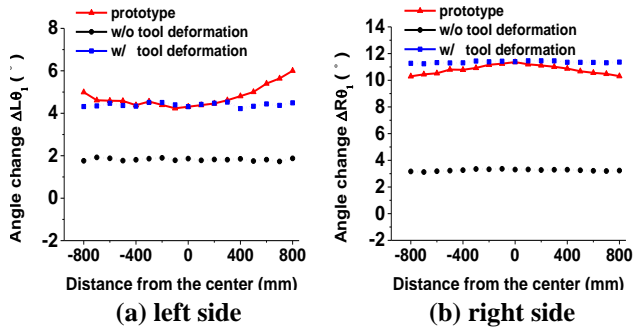


Fig.17 Comparison of the springback amount at the punch shoulder

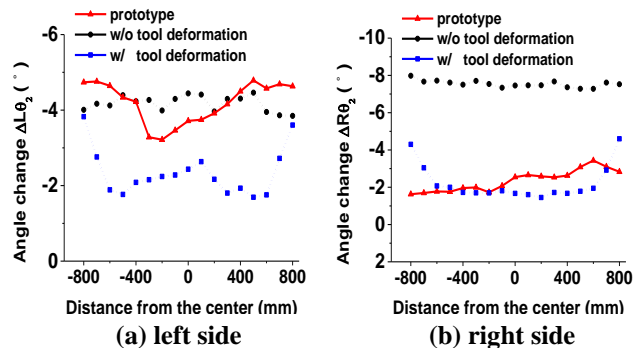


Fig.18 Comparison of the springback amount at the flange

고려한 결과 금형구조해석 결과에서 예측한 바와 같이 스프링백 양이 증가하는 것으로 나타났다.

편치 어깨부와 플랜지부의 스프링백 양을 비교하기 위하여 Fig. 16에 도시한 바와 같이 단면에서의 스프링백을 정량화하였다. Fig. 17에 도시한 바와 같이 금형변형을 고려하지 않은 경우 편치 좌측과 우측 어깨부 탄성회복각의 예측오차가 각각 3°와 8° 정도였던 것에 비하여 금형변형을 고려한 경우 1° 미만으로 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 기존방법의 스프링백 해석의 예측 정확도 저하의 주요 원인이 과도한 반력에 의한 금형의 변형이라는 것을 의미한다. Fig. 18에 도시한 플랜지부 스프링백은 우측의 경우 예측정확도가 크게 개선되었음을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 고강도강을 적용한 차량 부품인 사이드 시일 부품의 금형구조 평가를 위하여 성형

해석과 금형구조해석을 연계하는 방안을 제안하였고, 해석을 통해 얻은 변형된 금형형상을 이용하여 스프링백 해석의 예측 정확도 향상을 검증하였다. 본 논문에서 수행한 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 제안된 방법을 사용한 금형구조해석 결과 금형 인서트 부의 폭방향과 높이방향 최대 변형량이 각각 0.38mm 와 0.56mm 로 나타나 무시할 수 없는 수준이었다. 금형 형합상태에서는 간극이 최대 35% 증가하여 금형의 변형을 무시할 경우 성형해석 시 스프링백을 과소평가하게 될 것으로 예상되었다.

(2) 금형의 변형을 고려한 스프링백 해석을 수행한 결과 스프링백의 예측값이 기존 해석방법보다 크게 나왔으며, 스프링백의 예측 정확도를 크게 향상시켰다. 따라서, 초고강도강의 성형해석을 양산 공정에 활용하기 위해서는 금형변형의 고려가 필수적으로 요구되는 것을 확인할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2011 학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의한 논문임.

## REFERENCES

- [1] M. J. Song, Y. T. Keum, 2006, Forming Analysis of Automotive Fender Panel considering Die Deformation, Trans. Mater. Process., Vol. 15, No. 5, pp. 387~394.
- [2] A. Nilsson, F. Birath, 2007, Proc. NUMIFORM2007, (editor: J. Cesar and A. Santos), American Institute of Physics, Melville, New York, USA, pp. 449~454.
- [3] ESI Group, PAM-STAMP™, User's Manual, 2010.
- [4] R. Hill, 1948, A theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals, Proc. R. Soc. London, Ser. A, Vol. 193, No. 1033, pp. 281~297.
- [5] Altair Engineering, Hyperworks Optistruct Design Optimization, User's Guide Version 12.0, 2010.
- [6] H. J. Choi, 2012, Structural Analysis and Design Optimization of Press Tools for an Automotive Part with High-Strength Steel, M. S. Thesis, Graduate School, Daegu University, Gyeongbuk, Korea.