

박판의 온간 2차원 드로오 벤딩에서의 스프링백

이상무* · 장성호* · 최이천** · 허영무*** · 서대교****

Springback for the Warm 2D Draw-bending of Steel Sheets

S. M. Lee, S. H. Chang, Y. C. Choi, Y. M. Heo, and D. G. Seo

Abstract

The purpose of this study is to investigate the characteristics of springback for various process conditions of the 2D draw-bending operation. The process variables are the forming temperature, the geometry of tools such as punch profile radius(R_p) and die profile radius(R_d). Especially, in order to control the springback, the use of the warm forming method is applied. For the warm draw-bending, five steps of temperature ranges, from room temperature to 200°C, were adopted. And two kinds of steel sheets, namely SCP1 and TRIP(transformation-induced plasticity), the newly developed high strength steel, were adopted. As a result, the springback was affected by the elevated temperature and the geometry of tools in two kinds of steel sheets.

Key Words : Springback, Transformation-Induced Plasticity(TRIP), Warm Forming, 2D Draw-Bending

1. 서론

박판 성형에서 스프링백(springback)은 재료가 금형에 의하여 강제 변형이 일어난 후 금형에서 추출되면서 구속이 사라지게 되어 새로운 정적 평형 상태를 만족하기 위하여 추가적인 변형이 일어나는 현상이다. 이러한 스프링백의 양은 성형품의 기하학적인 형상과 재질, 그리고 성형 방법에 따라 변화한다. 경우에 따라서는 과도한 스프링백이 제품의 공차를 만족시키지 못하는 결과를 야기할 수 있으며 산업현장에서는 이를 해결하기 위하여 금형을 제작함에 있어서 수많은 부가적인 수정 공정을

거치거나 숙련자의 경험에 의지하는 경향이 두드러진다.

스프링백에 따른 문제점을 해결하기 위한 연구가 오랫동안 수행되어져 왔다. 특히, 최근 금형 제작에 앞서 수치적인 방법으로 스프링백 해석을 수행하여 문제점을 발견함으로써 효율적인 금형 설계가 가능해지고 있다. 수치해석 방법으로 유한 요소법(FEM)이 많이 적용되고 있다. 또, FEM을 이용한 여러 신기술을 이용하여 스프링백 양을 좀더 근사적으로 예측하기 위한 연구가 활발히 진행되어지고 있다.⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾

실제 박판 성형에 있어서 스프링백 양의 예측에 관한 연구뿐만 아니라 영향을 주는 인자들을 분석하여 그 스

* 성균관대학교 기계공학부 대학원

** 기아자동차 (주)

*** 한국 생산 기술 연구원

**** 성균관대학교 기계공학부, 책임저자

프링백을 감소시키는 공정에 관한 연구가 절실히 요구되어 진다.

또한, 최근 환경 문제로 인한 차량 경량화 추세와 자동차 충돌 안전성 규제강화로 인해 차체는 경량화하면서 충돌안전성을 향상시킬 수 있는 소재 개발이 시급하게 되었다. 이러한 이유로 고강도이며 동급 고장력 강판에 비해 고가공성을 가지고 우수한 충격흡수성을 지닌 고장력 강판인 가공유기변태(이하 TRIP)강판이 개발되었다.⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾ 그러나, TRIP강의 재질적 특성상 높은 스프링백 양이 발생함으로 인하여 실제 적용에 제한되고 있다.

TRIP강의 스프링백을 저감시키고, 또한 산업이 점차 첨단화되어 감에 따라 제품의 고정밀화가 요구되어지므로 이에 부응하기 위하여 본 연구에서는 온도차를 이용한 온간 성형법을 적용하여 박판 성형에 있어서 스프링백에 의한 문제점의 해결 방안을 제안하고자 한다. 온간 성형법이란 국부 가열 기술을 이용하여 원하는 부분에 요구되어지는 성형성과 강도를 얻을 수 있는 가공법이다.⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾ 일반적으로 재료는 온도가 상승함에 따라 인장강도와 항복강도가 감소하고 연성이 증가한다. 따라서 성형성이 증가하게 되고 탄성복원도 감소하리라는 예측을 할 수 있다.

본 연구에서는 형상에 의한 구속이 없어 높은 탄성 복원율을 유발하는 2차원 드로오 벤딩으로 기존의 자동차용 냉연강판(SCP1)과 신소재인 TRIP강판을 사용하여 온간 성형법을 적용하고 실험을 통해 그 효율성을 평가하고, 상용 FEM code인 PAM-STAMP를 사용하여 그 결과를 비교, 고찰하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용한 2차원 드로오 벤딩 실험 장치는 NUMISHEET '93에서 벤치마크 문제를 기반으로 하여 플랜지 부의 가열을 위하여 블랭크 홀더를 다이와 같은 폭과 길이를 가지도록 수정하였다. 펀치와 다이의 형상 반경의 변화를 주기 위해 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 반경별 인서트를 별도로 제작, 삽입하였으며 펀치 형상 반경(Rp)은 3 mm에서 15 mm까지 5단계로 변화시켰고, 다이 어깨 반경(Rd)은 5 mm, 10 mm와 15 mm로 3단계로 하였다. 펀치와 다이 사이의 간격(c)를 변화시킬 수 있도록 지지대와 다이의 사이에 레일을 설치하였다. 또한 온간 성형을 위하여 다이와 블랭크 홀더에는 각각 2개의 500 W급의 가열 파이프를 삽입하고 PID 제어 방식의 온도조절기를 통하여 온도를 조절할 수 있도록 하

였으며, 펀치는 내부로 냉각수가 순환할 수 있도록 제작되었으며 냉각기를 사용하여 10 °C로 유지하였다. 그리고, 한 금형은 열처리 후 크롬 도금을 하였으며 다른 금형은 열처리만 하여 두 종류로 제작하였으며 사용된 소재는 SKD11이다.

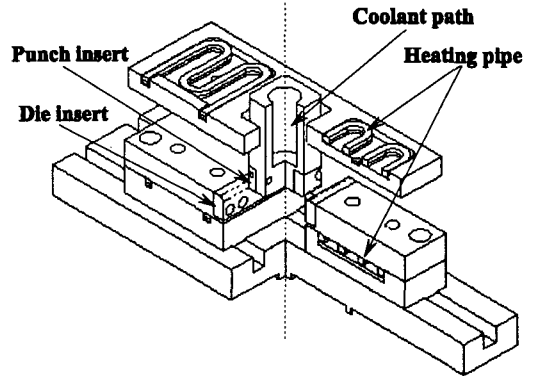


Fig. 1 Experimental apparatus for warm 2D draw-bending

Table 1 Conditions for the warm 2D draw-bending

Material	t (mm)	c (mm)	Rp (mm)	Rd (mm)	Temp. (°C)	B.H.F. (kgf)
SCP1	0.8	1.2	3	5	RT	250
			6	10	50	
			9	15	100	
TRIP	1.0	1.5	12	15	150	500
			15		200	

2.2 실험 방법

실험에 사용한 재료는 SCP1과 TRIP강으로 각각 두께가 0.8 mm와 1.0 mm이며 시편을 긴 쪽을 압연 방향과 일치하게 하여 300 mm×30 mm로 제작하였으며, 펀치와 다이 사이의 간격은 시편 두께의 1.5배로 하였다. 그리고 성형 깊이는 70 mm, 펀치 속도는 5 mm/sec이다. 실험의 세부적인 조건들을 Table 1에서 보여주고 있다.

먼저 상온에서 금형 형상에 따른 스프링백의 영향을 알아보기 위하여 크롬 코팅 금형을 이용하여 다이의 어깨 반경을 5 mm로 고정하고 펀치의 형상 반경을 3 mm에서부터 15 mm까지 3 mm 간격으로 변화시켜가면서 실험을 수행하였다. 다음으로 펀치의 형상 반경을 6 mm 고정시키고 다이의 어깨반경을 5 mm, 10 mm, 15 mm로 변화시켰다. 이때 홀딩력(B.H.F.:blank holding force)을 250 kgf로 가하였다.

다음으로 온간 성형으로 인한 스프링백 특성을 알아보기 위하여 펀치의 형상 반경은 6 mm로, 다이의 형상 반경은 5 mm로 하였다. 펀치의 온도는 10 °C로 고정, 냉각하고 다이와 블랭크 홀더는 상온(30 °C)에서 200 °C까지 5단계로 가열하였다. 홀딩력은 크롬 코팅 금형의 경우 250 kgf로 무코팅 금형은 500 kgf로 가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 형상에 따른 스프링백 특성

SCPI과 TRIP강의 스프링백 이후의 형상을 비교한 Fig. 2에서와 것과 같이 스프링백 이전 형상에 비해 TRIP강이 훨씬 많은 변형이 일어남을 알 수 있다. Fig. 3, Fig. 4에서는 상온에서 펀치 형상 반경에 따른 스프링백 후의 형상을 나타내고 있다. SCPI의 경우에는 반경 변화에 따른 스프링백 후의 형상변화가 미비했으나, TRIP강의 경우에는 펀치 형상 반경의 커질수록 스프링백 후의 변형이 적은 양이지만 조금씩 증가함을 확인할 수 있었다.

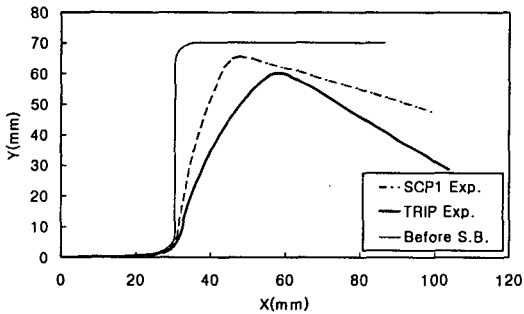


Fig. 2 Comparison of the deformed shapes after springback between SCPI and TRIP

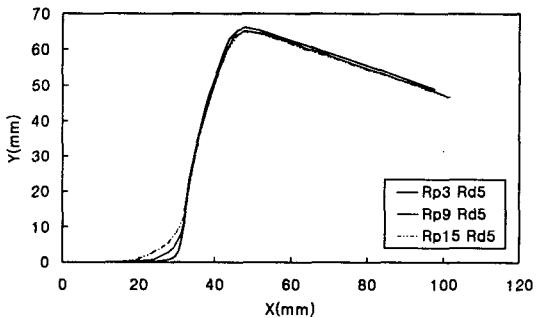


Fig. 3 The deformed shapes after springback of SCPI for various punch profile radii

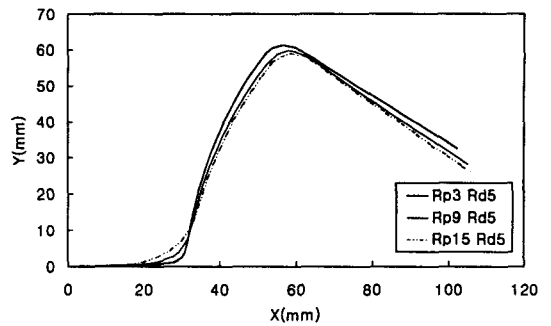


Fig. 4 The deformed shapes after springback of TRIP for various punch profile radii

그러나 Fig. 5, Fig. 6에서 보는 바와 같이, 펀치 형상 반경의 변화보다 다이 어긋 반경을 변화시키는 경우 스프링백에 의한 옆벽부의 휨과 플렌지 부의 형상이 더 확연하게 차이를 나타내고 있다. 또한, 그 형상 변화의 차는 TRIP강이 SCPI보다 훨씬 크게 나타났다.

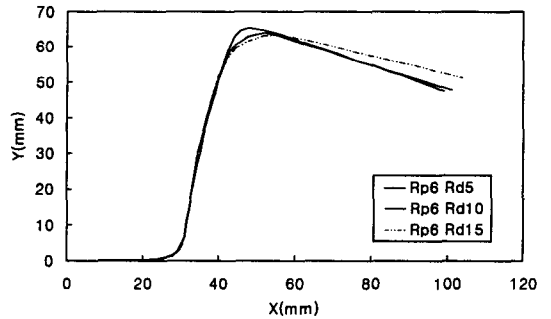


Fig. 5 The deformed shapes after springback of SCPI for various die profile radii

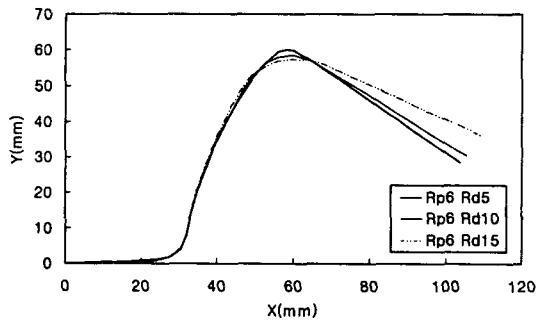


Fig. 6 The deformed shapes after springback of TRIP for various die profile radii

3.2 온간 성형에서의 스프링백 특성

무코팅 금형에서 시편의 소재별 온도에 따른 스프링백 후의 형상 변화를 Fig. 7, Fig. 8에 보여주고 있다.

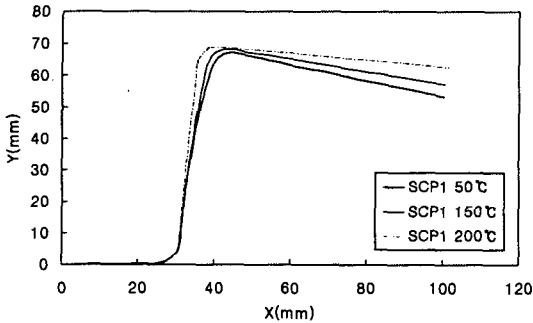


Fig. 7 The deformed shapes after springback of SCP1 for various temperature (no coated die, B.H.F.=500 kgf)

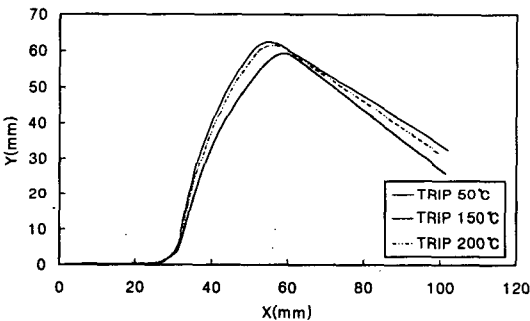


Fig. 8 The deformed shapes after springback of TRIP for various temperature (no coated die, B.H.F.=500 kgf)

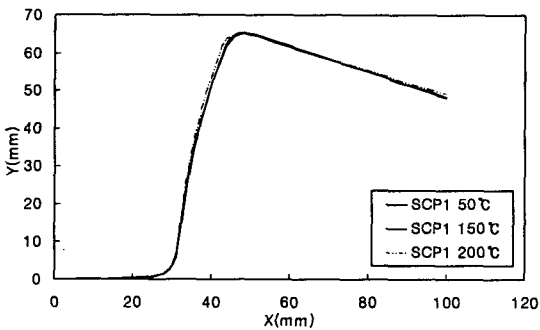


Fig. 9 The deformed shapes after springback of SCP1 for various temperature (Cr coated die, B.H.F.=250 kgf)

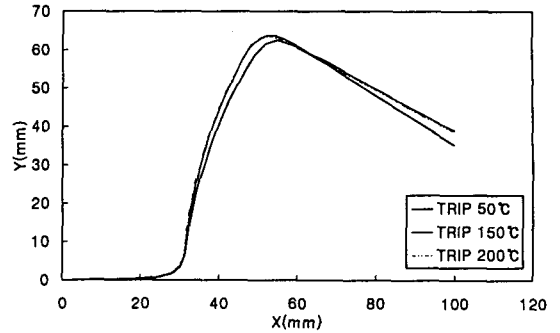


Fig. 10 The deformed shapes after springback of TRIP for various temperature (Cr coated die, B.H.F.=250 kgf)

Fig. 7에서와 같이, SCP1의 경우에는 스프링백 이후의 형상은 적용 온도가 증가함에 따라 스프링백 전의 형상에 가까워지고 있으며, 이는 스프링백이 감소함을 의미한다. 결국 200 °C까지 스프링백은 감소하였다. 반면, TRIP강의 경우를 나타내는 Fig. 8에서는 150 °C까지 스프링백이 감소하다가 200 °C에서 다시 증가하는 경향을 볼 수 있다.

크롬 코팅 금형에서는 Fig. 9와 Fig. 10에서와 같이, 무코팅 금형에서의 실험과 달리 스프링백 감소량은 극히 적었으나 그 감소 경향은 유사하였다. 이는 온도에 의한 영향이 성형 조건, 즉 홀딩력과 마찰 조건에 따라 커지거나 적어질 수 있음을 의미한다.

4. 해석

스프링백을 예측하기 위하여 본 연구에서는 상용 FEM code인 PAM-STAMP를 이용하였다. 해석 모델과 조건들은 상온의 크롬 코팅 금형에서의 펀치 형상 반경 6 mm, 다이 형상 반경 5 mm일 경우를 대상으로 하였으며 해석 시간의 단축과 대칭을 고려하여 1/4 모델링을 하였다. 해석에 사용된 성형조건은 기존 연구 등에서 제시한 실험을 통하여 얻은 값을 사용하였다.⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹¹⁾ Table 2에 해석에 사용된 기본적인 물성을 나타내었다. 또한 이외에도 스프링백의 예측에 영향을 미치는 인자들에 대하여 보다 정확한 예측을 위하여 기존 연구 결과를 바탕으로 Table 3에 나타낸 바와 같은 값을 사용하였다.

Table 2 Material properties for the FEM analysis for the 2D draw-bending
(Y.S., P.C., T.S. unit : kgf/mm^2)

Material	Y.S.	T.S.	P.C.	S.H.E.	Friction factor
SCP1	16.2	29.89	58.032	0.249	0.256
TRIP	44.35	63.82	113.09	0.228	

Table 3 Numerical parameters of the springback analysis

Blank element size (mm)	1
Number of corner element	20
Punch velocity (m/sec)	5
Penalty parameter	0.01
Number of integration point	7

앞서 제시한 조건들을 바탕으로 해석한 결과를 실험 결과와 함께 Fig. 11에 제시하였다. SCP1과 TRIP의 두 재료에 대해서 비교해 볼 때 상당한 차이를 보이고 있다. 특히 펀치 형상 부의 각과 옆벽부의 휨을 과소평가하는 경향을 보이고 있다.

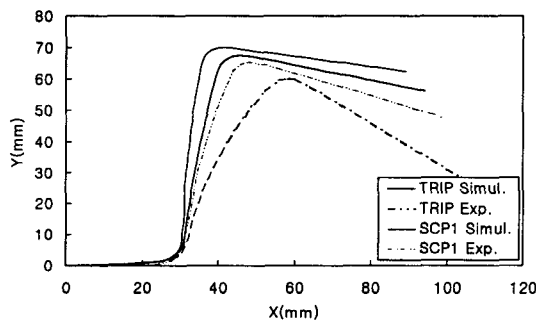


Fig. 11 Comparison of the deformed shapes after springback between experiment and simulation

5. 결론

SCP1과 TRIP의 두 재료에 대해서 금형의 형상에 따른 스프링백 특성을 파악하고 스프링백을 감소시키기 위하여 온간 성형법을 적용하여 스프링백에 의한 시편의 형상을 측정, 비교해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 펀치의 형상 반경을 5단계로 변화시켜 실험한 결과 SCP1의 경우에는 변화가 없었으나 TRIP의 경우에는 반경이 증가함에 따라 스프링백 이후의 변형도 약간 증가하였다. 또한, 다이의 어깨 반경을 변화시킴에 따라 SCP1과 TRIP에서 스프링백 이후의 형상 변화하였으며 펀치 형상 반경에서 보다 더 많은 변화가 발생하였다. 따라서 드로오 벤딩 문제에서 펀치보다 다이 형상 반경이 스프링백 문제에서 더욱 민감하다고 볼 수 있다.

(2) TRIP강의 경우가 SCP1보다 형상에 따른 스프링백의 변화가 심하므로 형상에 의한 제약이 크다고 할 수 있다.

(3) 2차원 드로오 벤딩에 온간 성형법을 적용하여 무코팅과 크롬 코팅의 두 종류의 금형으로 실험한 결과 SCP1과 TRIP 모두 온도가 상승함에 따라 스프링백이 감소하였으며 무코팅 금형에서 더욱 스프링백이 감소하는 경향을 나타내었다.

(4) 온간 성형법에 의한 스프링백 감소 효과는 동일한 조건에서 SCP1에 비해 TRIP에서 더 크게 나타났으며 이로써 TRIP을 성형함에 있어서 스프링백에 대한 대책으로써 온간 성형법의 효율성을 확인하였다.

(5) 온간 성형을 통한 스프링백 감소를 위하여 SCP1은 200 °C에서 TRIP의 경우에는 150 °C에서 성형하는 것이 적절하다고 판단된다.

(6) 스프링백을 예측하기 위한 연구로 PAM-STAMP를 이용한 FEM 해석을 시도하였으나 스프링백 이후의 변형, 특히 펀치 형상 반경 부의 각도와 옆벽부의 휨을 전반적으로 과소평가하는 경향을 나타내었다. 따라서 추후 이를 해결하기 위한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 성균관대학교 성균학술연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Y. Hayashi and M. Takagi, 1984, "Control of Side Wall Curl in Draw-Bending of High Strength Steel Sheets", *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 735~740
- (2) F. Pourboghraat, E. Chu, 1995, "Prediction of spring-back and side-wall curl in 2-D draw bending", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 50, pp. 361~374

- (3) M. J. Finn, P. C. Galbraith, L. Wu, J. O. Hallquist, L. Lum, T. -L. Lin, 1995, "Use of a coupled explicit-implicit solver for calculating spring-back in automotive body panels", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 50, pp. 395~409
- (4) S. W. Lee, D. Y. Yang, 1998, "An assessment of numerical parameters influencing springback in explicit finite element analysis of sheet metal forming process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80~81, pp. 60~67
- (5) D. W. Park, J. J. Kang, J. P. Hong, S. I. Oh, 1999, "Springback Simulation by Combination Method of Explicit and Implicit FEM", *Proceedings of the 4th International Conference and Workshop on Numerical*, pp. 35~40
- (6) T. Ohwue, H. Takechi, 1987, "Temperature Dependence of Tensile Properties Drawability of Steel Sheets in Warm Working Condition", *Journal of the JSTP*, Vol. 28, No. 314, pp. 225~231
- (7) 송광현, 이재동, 이정우, 서대교, 1999, "금형의 온도와 처리 상태에 따른 판재의 마찰특성", *한국소성가공학회지*, 제8권, 제3호, pp. 245~251
- (8) J. D. Lee, Y. M. Heo, S. H. Chang, Y. C. Choi, H. Y. Kim, D. G. Seo, 2001, "A Study on the Warm Deep Drawability of Sheets in Cr-Coated Die", *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 7, pp. 839~846
- (9) H. Shunji, T. Manabu, 1993, "Effect of Deformation-Induced Transformation on Deep Drawability", *Journal of the JSTP*, Vol. 35, No. 404, pp. 1109~1114
- (10) Y. Sakuma, 1995, "Next-Generation High-Strength sheet steel Utilizing TRIP effect", *Nippon Steel Technical Report*, No. 64, pp. 20-24
- (11) 공경환, 최치수, 최이천, 서대교, 2000, "가공유기변태 강판의 온간 디프드로잉 성형특성", *한국소성가공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 162~167