<학술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.3.283 ISSN 1226-4873

초고강도 소재가 적용된 U 형 채널 제품의 다단공정변수에 따른 스프링백 영향

서창희* · 정윤철* · 임용희** · 윤효윤** · 이경훈*** · 김영석****†
* 대구기계부품연구원, ** 신화, *** (주)솔루션랩, **** 경북대학교

The Effects of Process Parameters of Multi-Stage Forming on Springback for a U-Channel made of Ultra-High-Strength Steel

Chang Hee Suh*, Yun-Chul Jung*, Yong Hee Lim**, Hyo Yun Yun**, Kyunghoon Lee*** and Young Suk Kim****†
* Daegu Mechatronics & Materials Institute, ** Shinhwa,
*** Solution Lab, **** School of Mechanical Engineering, Kyungpook Natl. Univ.

(Received August 30, 2011; Revised January 5, 2012; Accepted January 5, 2012)

Key Words : Ultra High Strength Steel(초고강도강), Springback(스프링백), U Channel(U 형 채널), Multi-Stage Forming(다단 성형), Finite Element Analysis(유한요소해석)

초록: 자동차 부품의 경량화를 위해서 초고강도강의 사용이 확대됨에 따라 판재성형 공정에서 초고강도 강판의 스프링백 제어의 중요성이 점차로 확대되고 있다. 본 연구에서는 초고강도 소재를 사용한 U 형 채널 부품의 성형을 위해서 사용되는 다단공정에서 공정 변수들이 스프링백에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 해석을 위해서는 유한요소법이 사용되었으며, 주요 공정 변수는 공정수, 금형 각도, 금형 반경, 펀치성형방향이다. 단공정에 비해서 다단공정이 스프링백을 아주 효과적으로 제어할 수 있었으며, 금형 반경과 펀치성형방향의 각도가 작을수록 스프링백 제어에 효과적이었다. 그러나 금형 각도의 영향은 크지 않았다.

Abstract: Ultra-high-strength steels (UHSSs) are widely used for lightweight automobile parts, and the control of springback is very important in sheet-metal forming. The object of this study is to verify the effects of multi-stage forming process parameters for U-channel-type automobile parts made of UHSS. Finite element analysis is carried out to predict the formability and springback. The main parameters considered for the multi-stage forming process are the die angle, die radius, and punch-forming direction. It is shown that multi-stage forming is very effective for reducing springback, and that a small punch-forming angle and die radius reduce springback, whereas the die angle does not have a large effect.

1. 서 론

최근 자동차의 연비 향상 및 경량화 기술에 대한 중요성이 확대되고 있다. 자동차의 경량화를 달성하기 위해 알루미늄과 같은 비철계 경량 소재의 적용을 확대하려는 노력과 초고강도강과 같은 철계 소재의 적용을 확대하려는 노력이 동시에 추진되고 있다. 비철계 소재는 고가이면서 철계 소재에 비해서 강도가 낮아 충분한 강성 확보를 위해서는 제품을 두껍게 제조하여야 하기 때문에 제품의 가격이 상승하는 문제점이 있다. 반면에 초고강도 강판은 소재비가 저렴하며 얇은 두께로 원하는 강성을 유지할 수 있기 때문에 자동차 부품에의 적용이 빠르게 증가하고 있다.[1~3]

초고강도 강판을 적용하게 되면 탄성영역의 확대로 인해서 스프링백이 증가하기 때문에 치수의 불균일이 발생하여 조립성을 저해하게 된다.[4] 현재까지 초고강도 강판에 대한 연구는 V 나 U 형상의 제품을 대상으로 많은 연구들이 수행되었다. 스프링백에 영향을 미치는 주요 인자들은 금형 및 펀치 반경, 굽힘 각도, 재료의 항복 및 탄성계수,

† Corresponding Author, caekim@knu.ac.kr
ⓒ 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

두께 등이며, 이들 인자들이 복합적으로 작용하여 스프링백에 영향을 미치게 된다.[5~11] 하지만, 지금까지의 연구들은 대부분 단공정(single-stage forming)을 적용하여 공정변수에 따른 스프링백의 영향을 검토한 연구들이 대부분 이었다. 또한, 실제 초고강도 강판이 적용된 자동차 부품을 대상으로 한 스프링백에 대한 연구도 수행되고 있으나, 대부분이 외연적 해석프로그램(explicit code)을 사용하기 때문에 응력의 정확한 예측이 어려워 스프링백의 정밀한 예측에는 한계가 있다.[3]

따라서, 본 연구에서는 정확한 응력의 예측을 위해서 내연적 해석프로그램(implicit code)을 사용하였으며, 초고강도 강판을 성형하기 위해 사용되고 있는 다단공정(multi-stage forming)의 공정변수들이 스프링백에 미치는 영향을 정량적으로 연구하였다. 또한 성형 후 표면의 응력을 분석하여 성형응력으로 스프링백의 양을 예측할 수 있는 기법에 대하여 고찰하였다.

2. 성형해석 조건

2.1 재료 특성

본 연구에 사용된 초고강도 강판은 두께가 1.2 mm 인 SGAFC1180 이다. 소재의 유동응력을 평가하기 위해 KS B 0801 13 호에 따라 압연방향으로부터 채취한 인장시험편을 제작한 다음, Instron 5569 를 사용하여 KS B 0802 규격에 따라 변위제어 방식으로 인장시험을 수행하였다. 변형율의 정밀한 측정을 위해서 표점거리가 50 mm 인 연신율계를 사용하였다. 인장시험 결과를 Table 1 에 나타내었다. 성형해석은 실험에서 얻어진 유동응력을 사용하였으며, 영율은 210 GPa, 푸아송비는 0.3 을 사용하였다.

2.2 성형 공정 및 해석 모델

본 연구의 대상인 승용차용 사이드실의 형상을 Fig. 1 에 나타내었다. 제품의 전체에 걸쳐 단면 형상의 변화가 거의 없기 때문에 제품의 중앙부 단면을 기준으로 금형을 설계 하였다. 성형공법은 폼 타입(form type)으로 설계하였으며, 성형과 스프링백 제어의 자유도를 높이기 위해서 1 공정 폼과 2 공정 폼으로 성형공정을 나누어 구성하였다. 이때 2 공정 폼 금형은 제품의 형상과 동일하게 설계하였다. 폼 타입 공법은 초고강도강판과 같이 연성이 크지 않은 소재에 대해서 주로 굽힘 모드로 3 차원적인 형상을 성형하는 프레스 공법이다.

Fig. 2(a)와 (c)에 1 공정과 2 공정의 금형과 블랭크(blank)의 유한요소모델을 나타내었다. 1 공정 및 2 공정에서 상형은 모두 패드(pad)와 펀치(punch)로 구성하였으며, 하형은 다이(die)만으로 구성하였다. 성형 공정은 1 공정 및 2 공정 모두 패드로 블랭크를 잡아주고 펀치를 사용하여 성형이 되도록 하였다. 각 공정별로 성형이 완료된 후 상하형 금형을 제거하여 블랭크의 스프링백 해석을 수행하였다. 1 공정의 다이각도(die angle)에 따른 스프링백 특성을 확인하기 위해서 Fig. 2(b)와 같이 다이각도를 30°, 45°, 60°로 변화시켜 해석을 수행하였다. 펀치의 성형방향에 따른 영향을 검토하기 위해서 펀치의 성형방향을 45°~90°로 변경하였다. 성형해석은 내연적 범용 유한요소 프로그램인 MARC 2008 을 사용하였으며, 제품의 길이방향 변형율이 크지 않을 것으로 예상되어 평면변형조건으로 가정하였다. 블랭크에 사용된 요소의 크기는 0.2 mm 이고, 사용된 총 요소수는 7,680 개이며, 쿨롱마찰계수는 0.1 이다.

U 형 채널 부품에서 스프링백 거동을 특징짓는 변수들을 Fig. 3 에 나타내었다. 다이반경 부분의 스프링백량을 α, 측면벽(side wall)의 컬링(curling)량을 β로 나타내었다. 또한, 스프링백량의 예측을 위한 표면응력은 다이 반경부가 끝나는 부분에서 4 mm 떨어진 부분을 기준(0 mm)으로 하여 분석하였다.

블랭크의 중립면을 기준으로 하였을 때 표면에서 가장 큰 응력이 발생되기 때문에 윗면(upper

Table 1 The results of tensile test

Flow curve	$\sigma=1580\varepsilon^{0.085}$
Yield strength	888 MPa
Tensile strength	1,241 MPa
Elongation	11 %

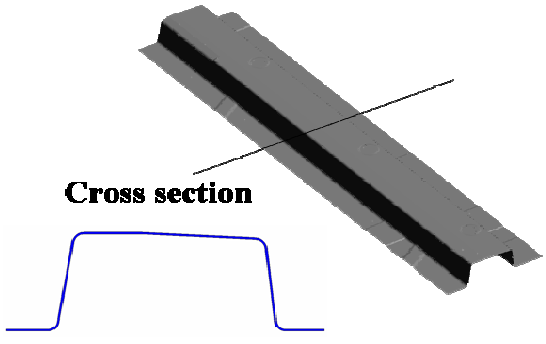
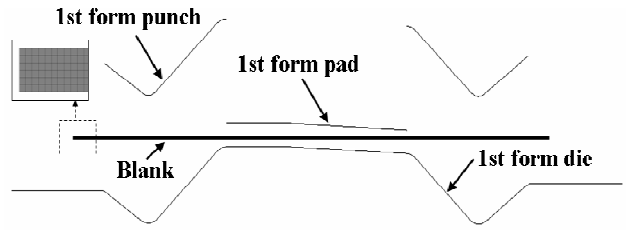


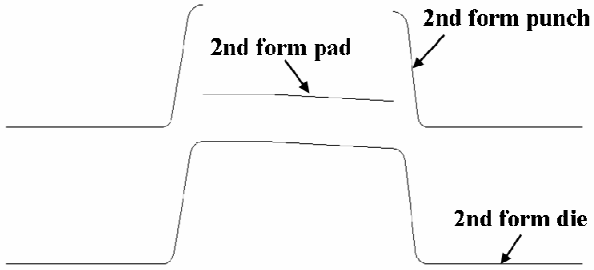
Fig. 1 Geometry of side sill for automobile and its cross section in the central region

surface)과 아랫면(lower surface)의 응력을 주로 검토하였으며, 응력은 표면에서 발생되는 최대 주응력을 사용하였다. 이때 + 는 인장응력을 나타내며, - 는 압축응력을 나타낸다.



(a) 1st forming

(b) Die angle of 1st form die



(c) 2nd forming

Fig. 2 Finite element models for forming simulation used in the present analysis

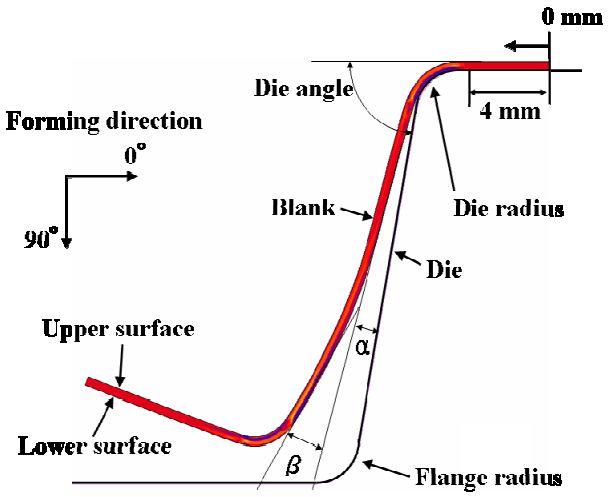


Fig. 3 Parameters for the springback and curl

3. 결과 및 고찰

3.1 공정변수에 따른 스프링백의 영향

3.1.1 단공정(single-stage forming)

2 공정 금형(제품 형상)을 사용하여 다이반경(die radius)과 펀치성형방향(punch forming direction)에 따른 스프링백의 영향을 검토한 결과를 Fig. 4 와 Fig. 5 에 나타내었다. 펀치성형방향을 90°로 고정했을 경우 다이반경이 작을수록 α 는 작아졌다. 그러나, β 는 거의 변화가 없었으며, 15°로 큰 값을 나타내었다. 다이반경이 작을수록 α 가 감소하여 전체적인 스프링백 양이 감소하게 된다. 이와 반대로 다이반경을 6 mm 로 고정한 경우에는 펀치성형방향의 각도를 줄일수록 β 는 급격히 감소하였으나, α 는 거의 변화하지 않았다. 즉, 펀치성형방향의 각도를 줄이는 것은 컬링량을 줄이는 주요한 요소이다. 결과적으로 전체적인 스프링백 양을 줄이기 위해서는 다이반경을 줄이면서 펀치성형방향의 각도를 줄이는 방안을 선택하면 스프링백 발생을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

3.1.2 다단공정(multi-stage forming)

공정을 2 공정으로 나누어 1 공정 성형해석 완료 후 2 공정 성형해석을 연계해서 수행하였다. 1 공정 다이각도를 30°, 45°, 60°의 3 가지 경우로 모델링하였으며, 2 공정은 제품 형상의 금형을 사용하였다. 이때 펀치성형방향과 다이반경은 각각 90°, 6 mm 로 하였다. 1 공정과 2 공정 성형 후 스프링백 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 다단공정을 사용했을 경우는 전반적으로 단공정을 적용했을 경우보다 스프링백 양이 작게 나타났다. α 는 다단공정 적용시 다이 각도와 관계없이 모두 4°로 낮은 값을 나타내었다. 이는 단공정 적용시보다 작은 스프링백 양으로 다단공정이 α 를 줄이기 위한 효과적인 방법임을 알 수 있다. β 도 단공정에 비해서 다단공정 적용시 작게 나타났다. 또한 다이각도가 작아질수록 적은 값을 나타내었다.

다단공정은 단공정에 비해서 스프링백량을 줄이면서 변수에 따른 변화량도 크지 않기 때문에 안정적으로 스프링백을 제어 할 수 있을 것으로 생각된다.

3.2 표면응력을 사용한 스프링백 분석

Fig. 7 에 단공정 성형후 블랭크의 응력분포를 나타내었다. 다이반경 영역의 굽힘부 윗면에서는

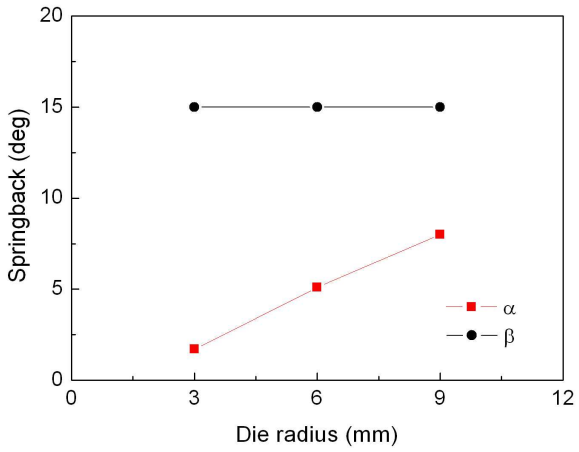


Fig. 4 The effect of die radius on the springback after single-stage forming when the punch forming direction is 90°

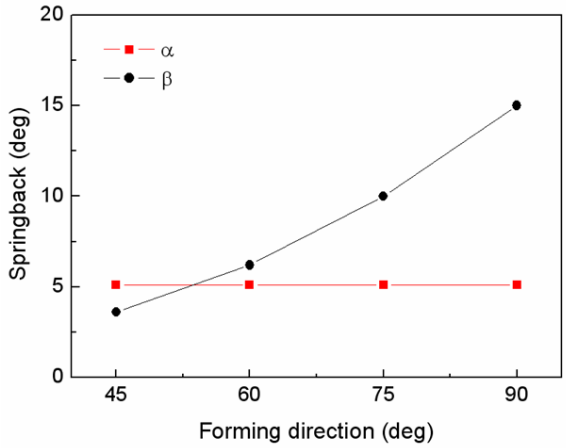


Fig. 5 The effect of punch forming direction on the springback after single stage forming when the die radius is 6 mm

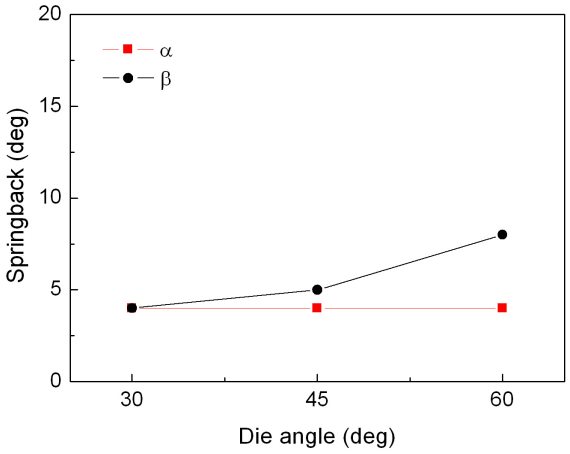


Fig. 6 The effect of die angle on the springback after multi-stage forming when the die radius and punch forming direction are 6 mm and 90°

인장응력이 아랫면에서는 압축응력이 발생하고 있으며, 굽힘부 아래의 인근 영역에서 역굽힘(reverse bend)으로 인해서 윗면에는 압축응력이 발생하고 아랫면에는 인장응력이 발생하고 있음을 확인하였다. 그러나 측면벽 영역의 윗면과 아랫면에서는 각각 인장응력과 압축응력이 발생하고 있었으며, 역굽힘 현상은 발생하지 않았다.

Fig. 8 에 2 공정 금형을 사용하여 단공정으로 성형했을 경우 표면의 최대 주응력 분포를 나타내었다. 잘 알려진 바와 같이 윗면과 아랫면에서 블랭크의 중립면을 기준으로 거의 대칭적인 응력분포를 나타내고 있기 때문에 윗면의 응력만을 분석하였다. 다이반경부분에서 인장응력이 발생한 이후에 인근에서 압축응력이 발생하였다. 이는 초기에 변형이 반경부에 집중되고 이후에 인접부에서 역굽힘 현상이 발생하였기 때문이다. 역굽힘은 대부분의 굽힘 성형시 발생하며 이러한 역굽힘의 양을 제어하면 스프링백의 제어가 가능할 것으로 기대된다. 측면벽 영역(25~60 mm)에서는 큰 인장응력만이 작용하기 때문에 단공정에서 과도한 컬링이 발생하였을 것으로 판단된다. 마지막으로 플랜지부와 인접한 굽힘부에서는 압축응력과 인접한 부위에서는 인장응력이 작용하고 있어 스프링백에 영향을 끼친 것으로 판단된다.

Fig. 9 에 다단공정으로 성형했을 경우 표면응력을 나타내었다. 단공정과는 다르게 다이반경 부분에서 응력이 낮아졌다가 다시 높아지는 경향을 나타내었다. 즉, 단공정에 비해서 발생되는 인장응력의 총 양이 작아졌으며, 역굽힘에 의한 압축은 큰 변화가 없었다. 따라서 인장에 의한 스프링백 발생이 줄어들게 된다. 이는 금형을 제거하는 스프링백 해석에서 α 량이 다단공정에서 줄어드는 경향을 잘 설명해 준다. 즉, 굽힘 성형시 굽힘과 주위의 역굽힘을 잘 조절하여 응력의 발생량을 유사하게 만들어 주면 스프링백을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 다단공정은 이러한 응력의 균형을 통해서 스프링백을 줄일 수 있는 효과적인 방법임을 확인하였다. 발생되는 응력의 총량을 비교한 결과 단공정에서는 성형 후 다이반경부에서 발생되는 인장응력의 총합은 75,451 MPa 이며, 인근의 역굽힘에 의한 압축응력의 총합은 25,288 MPa 이다. 즉, 인장응력의 총합대 압축응력의 총합은 75% : 25%의 비율로 나타나고 있다. 따라서 인장응력에 의한 스프링백 발생이 예상되며, 단공정에서는 α 가 5.1°이다. 다단공정에서는 다이반경부에서 발생하는 응력 총합의 비율은 67% : 33%로 단

공정에 비해서 인장응력의 총합비율이 감소하였다. 따라서, 다단공정에서도 인장응력에 의한 스프링백이 예상되며, 얻어진 α 는 4°이다. 단공정에서는 인장응력의 총합이 압축에 비해서 3 배 높았으며, 다단공정에서는 2 배 정도 높게 나타났다. 결론적으로 단공정에 비해서 다단공정시 인장응력의 총합이 압축에 비해서 2 에서 3 배로 증가하는 경우 α 값이 4°에서 5.1°로 증가하였다. 그러나 응력의 총합비와 스프링백과는 1 : 1 의 관계를 가지지는 않는 것으로 판단된다. 이는 굽힘부와 역굽힘부의 응력이 스프링백에 동일한 영향을 주는 것은 아님을 의미한다. 응력의 분포와 총합이 스프링백에 미치는 영향에 대한 보다 심도있는 연구는 향후에 수행될 예정이다.

측면벽 영역에서도 단공정에서 발생하는 과도한 인장응력이 다단공정에서는 상당히 낮아졌다. 따라서 단공정에서 많이 발생하는 컬링의 양이 급격히 감소하였다. 또한 측면부에서는 역굽힘의 발생은 없었다.

3.3 시제품 제작 및 스프링백 측정

해석의 유효성을 검증하기 위해서 시제품을 제작하였으며, Fig. 10 에 다단공정을 사용하여 제작된 시제품의 형상을 나타내었다. 그리고 Fig. 11 에 다단공정으로 성형했을 경우 해석결과와 실험에서 얻어진 제품의 치수를 측정한 결과를 비교하여 나타내었다. 해석과 실험의 다단공정에서는 1 공정의 다이각도를 45°로 하였으며, 다이반경은 6mm 를 사용하였다. 그리고 펀치의 성형방향은 90°로 하였다.

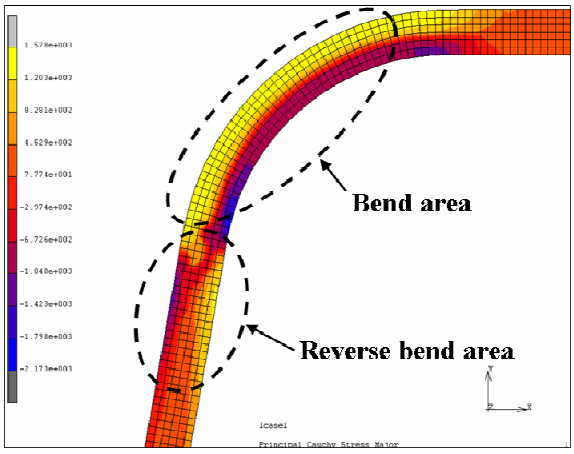


Fig. 7 Distribution of major principal stress around die radius after single-stage forming when the die radius and punch forming direction are 6mm and 90°

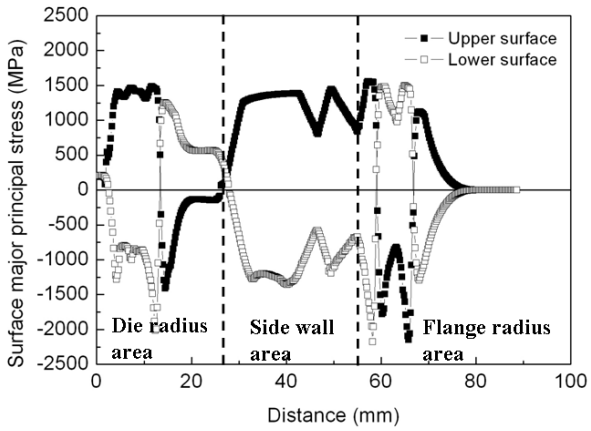


Fig. 8 Surface stress distribution at upper surface of blank after single-stage forming when the die radius and punch forming direction are 6 mm and 90°

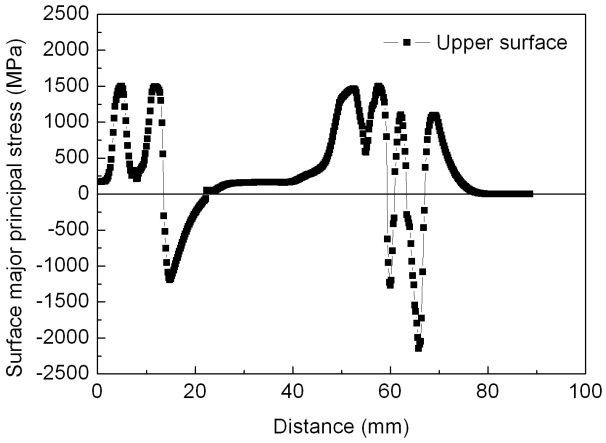
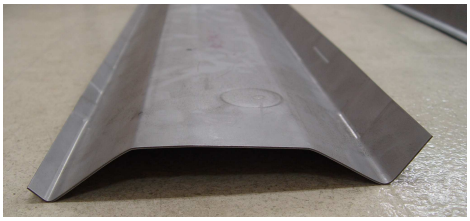
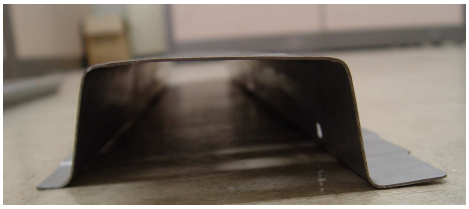


Fig. 9 Surface stress distribution at upper surface of blank after multi-stage forming (1st form die angle = 45°, 1st and 2nd form die radius = 6mm, 1st and 2nd punch forming direction = 90°)



(a) 1st forming



(b) 2nd forming

Fig. 10 Prototyping of side sill using multi-stage forming

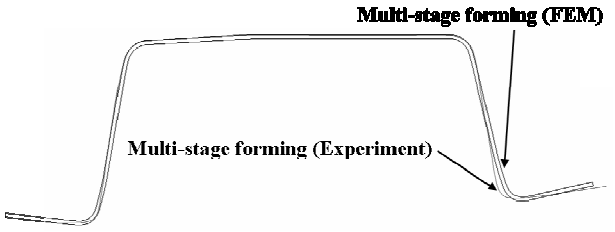


Fig. 11 Measured cross section geometries in the central region of prototypes

다단공정에서 제작된 시제품의 치수측정결과와 해석에서 얻어진 스프링백 해석 결과는 거의 일치하였다. 실험과 해석에서의 스프링백량이 거의 유사하였으며, 컬링도 발생하지 않았다. 즉, 다단공정이 컬링을 제어할 수 있는 효과적인 방법임을 확인하였다. 오른쪽 플랜지 부분에서는 해석과 실험의 미세한 차이가 발생하였지만 이는 금형가공과 시제품 제작시 발생한 것으로 생각되며 전체적으로 해석과 실험결과가 잘 일치하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 초고강도 강판을 성형하기 위해 사용되고 있는 다단공정의 공정변수들이 스프링백에 미치는 영향을 정량적으로 연구하였다. 그리고 성형 후 표면의 응력을 분석하여 스프링백 양을 예측할 수 있는 기법에 대해 연구하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) 다이반경이 작아 질수록 다이반경부의 스프링백 발생이 현저히 감소하였으며, 펀치성형방향의 각도를 줄일수록 컬링의 발생이 크게 감소하였다.

(2) 다단공정은 단공정에 비해서 효과적으로 컬링의 발생을 방지할 수 있었으며, 1 공정의 다이 각도가 작을수록 컬링의 감소에 효과적인 것으로 나타났다.

(3) 스프링백은 성형 후 발생되는 응력에 지배를 받으며, 성형 후 표면 응력의 분석을 통해서 스프링백 발생의 정량화가 가능할 것으로 판단된다.

(4) 굽힘부 인근에서 역굽힘이 발생하게 되면 스프링백의 발생을 완화시키며, 굽힘부 응력과 역굽힘부의 응력의 총합비율에 따라서 스프링백량이 영향을 받음을 확인하였다.

(5) 다단공정에서 스프링백 해석결과는 실험결과는 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 중소기업기술혁신개발사업의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Cha, C. H., Lee, S. K., Ko, D. C. and Kim, B. M., 2009, “A Study on the Forming of Automotive Front Side Member Part with Ultra High Strength Steel of DP980,” *Trans. Mater. Process*., Vol. 18. No. 1, pp. 39~44.

(2) Park, I. C., Kim, Y. J., Lee, J. M. and Park, Y. C., 2006, “Optimization of Design Planning by Using the Spring Back Simulation of Auto Panels,” *Trans. Mater. Process*., Vol. 15. No. 2, pp. 164~171.

(3) Suh, C. H., Shin, H. D., Jung, Y-C., Park, C. D., Lim, Y. H. and Kim, Y. S., 2009, “A Study on the Forming Process of Stair Type Side Sill for Automobile Using DP780,” *Trans. Mater. Process*., Vol. 18. No. 8, pp. 601~606.

(4) Asgari, S. A., Pereire, M., Rolfe, B. F., Dingle, M. and Hodgson, P. D., 2008, “Statistical Analysis of Finite Element Modeling in Sheet Metal Forming and Springback Analysis,” *J. Mater. Process. Technol*., Vol. 203, pp. 129~136.

(5) Chen, P. and Koc, M., 2007, “Simulation of Springback Variation in Forming of Advanced High Strength Steels,” *J. Mater. Process. Technol*., Vol. 190, pp. 189~198.

(6) Banu, M., Takamura, M., Hama, T., Naidim, O., Teodosiu, C. and Makinouch, A., 2006, “Simulation of Springback and Wrinkling in Stamping of a Dual Phase Steel Rail-Shaped Part,” *J. Mater. Process. Technol*., Vol. 173, pp. 178~184.

(7) Kim, Y. H., Kim, T. W., Lee, Y. S. and Lee, J. H., 2004, “A Study on the Springback of High Strength TRIP Steel,” *Trans. Mater. Process*, Vol. 13, No. 5. pp. 409~414.

(8) Yang, D. Y., Lee, S. W., Yoon, J. W. and Yoo, D. J., 1999, “Springback Analysis in Sheet Metal Stamping Processes and Industrial Applications,” *Trans. Mater. Process*., Vol. 8, No. 1, pp. 22~28.

(9) Chae, M. S., Lim, Y. H., Suh, Y. S., Park, C. D. and Kim, Y. S., 2008, “A New Manufacturing Process for the Ring Plate of Automotive Fuel Tank,” *Trans. Mater. Process*, Vol. 17, No. 5, pp. 350~355.

(10) An, J. H., Ko, D. C., Lee, C. J. and Kim, B. M., 2008, “Springback Compensation of Sheet Metal Bending Process Based on DOE & ANN,” *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 32, No. 11, pp.990~996.

(11) Kwak, E. J., Lee, K., Suh, C. H. and Lim, Y. H., “Quantitative Analysis of Elastic Recovery Behavior After Bending of Ultra High Strength Steel Sheet:Spring-Back or Spring-Go,” *Trans. Mater. Process*, Vol. 20, No. 6, pp. 456~460.