

1.2GPa급 초고강도강판의 공정조건에 따른 스프링백 특성에 관한 유한요소해석 연구

장현민¹ · 최계광[†]

공주대학교 금형공학과^{1,†}

A Study on the Finite Element Analysis of springback characteristics according to stamping process conditions of UHSS with UTS of 1.2GPa

Hyun-Min Jang¹ · Kye-Kwang Choi[†]

Department of Mold & Die Engineering, kongju National University^{1,†}

(Received June 07, 2018 / Revised July 24, 2018 / Accepted August 01, 2018)

Abstract: The biggest topics in the automobile industry are light weightening and fuel efficiency improvement. There's a lot of research going on. It is focused on light weight materials. Light weight material is seen as the best way to reduce fuel consumption and to solve the problem of environmental pollution and resource depletion. For the light weight materials, new materials such as aluminum, magnesium, and carbon-hardening materials can be found. Research on the joining techniques of dual materials, improvement of material properties by improving the method of manufacture of existing materials, and studies on ultra-high strength steel sheets are expected to take up the most weight in lightweight materials. As the strength of the ultra-high strength steel sheets increases during forming, it is difficult to obtain dimensional precision due to the increase in elastic restoring force compared to mild or high strength steel sheets. Spring back is known to be affected by a number of factors due to poor plastic molding, and can be divided into the effects of the material spraying and the process. The study on the plastic variables were studied as plastic factors that can be controlled by a part company. Tensile testing of ultra-high strength materials was conducted to derive properties for plastic analysis and to analyze spring back with two factors controlling the height of the bead and blank holding force by adding tensile force and controlling the flow rate.

Key Words: Cold-stamping, Finite element analysis, Spring back, Ultra high strength steel

1. 서 론

세계 자동차 시장은 강화된 온실가스 및 유해물질 배출규제를 만족하기 위해 차체 경량화를 통해 대응하고 있다. 차체경량화의 방법으로는 설계최적화, 경량화 소재 적용, 부품 일체화 등이 있다. 경량화 소재에는 탄소강화섬유(CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics), 알루미늄(aluminium) 등을 적용하고 있지만 소재간 접합의 어려움과 고가의 소재 비로 인해 업계에서 어려움을 겪고 있다. 따라서 당

분간은 기존 철강소재의 물성치 향상에 따른 초고강도 강판에 관한 연구가 소재 경량화에서 가장 많은 비중을 차지 할 것으로 보여 진다. 초고강도강(Ultra High Strength Steel)의 경우 기존의 공정라인을 사용할 수 있고 종래의 소재와 동등한 가격대를 형성하고 있어 자동차 산업에 많이 적용하고 있다.

초고강도강판 적용으로 인한 문제점은 높은 항복강도와 인장강도로 인해 종래의 강판에 비해 성형급형에 가하는 반력이 증가하여 급형 내구수명에 영향을 미친다. 또한, 종래의 철강 소재에 비해 탄성 복원량이 증가함에 따라 스프링백(springback)이 과대하게 발생하여 치수 정밀도를 얻기 어려운 문제가 발생한다¹⁾. 스프링백은 판재 프레스성형에서

1. 공주대학교 금형공학과
[†] 교신저자: 공주대학교 금형공학과
E-mail: ckkwang@kongju.ac.kr

나타나는 대표적인 성형 불량으로 제품의 형상, 공정조건, 마찰(friction) 등 여러 인자들에 영향을 받으며 이를 분석하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

초고강도강을 적용하여 판재 성형 시 해석을 통한 스프링백 예측이 어렵고 이는 금형의 변형문제, 소재 산포, 형합 불량 등이 영향을 미친다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 성형과정 중 금형변형에 대해 정량적으로 분석한 연구가 진행되었으며²⁾, 성형해석 프로그램과 연동된 금형보정 프로그램을 적용하여 실제 금형과 비교한 연구가 있다³⁾. 서술한 요인 외에도 기본 프레스 기본성형 공정에서 공정조건에 따라 스프링백 경향의 변화를 연구도 필요하다.

본 논문에서는 인장강도 1.2GPa급 초고강도강의 물성시험을 실시하고 성형해석 프로그램을 이용하여, 모자형 시험편에 대해 프레스 공정조건 및 비드형상을 변수로 성형공정해석을 실시하여 스프링백 양을 정량적으로 분석하였다.

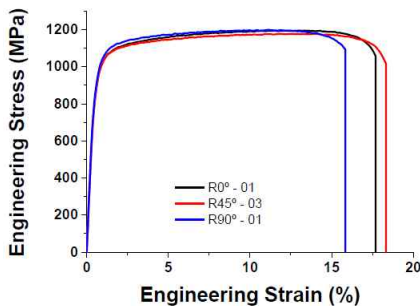
2. 기계적 시험⁴⁾

2.1. 인장 시험

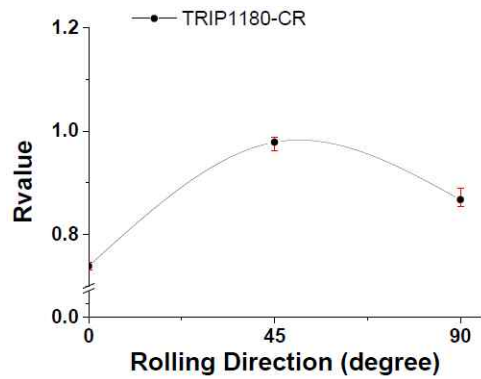
본 논문에서는 두께 1.4mm의 인장강도 1.2GPa급의 초고강도강의 성형해석용 물성을 얻기 위해 인장시험을 실시하였다. 인장시험은 MTS 만능시험기를 이용하여 압연방향(rolling-direction)에 따라 0°, 45°, 90°에 대해 각각 실시하였다. 시험 결과를 바탕으로 이방성계수(Rankford value)와 식 (1)과 같이 swift equation으로 fitting하여 성형해석공정에 적용하였다. 항복함수는 Hill의 1948 평면이방성 모델을 사용하였다⁵⁾.

인장 시험과 이방성계수 시험의 결과는 Fig. 1과 Table 1에 도시하였다.

$$\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \epsilon^p)^n \quad (1)$$



(a) S-S curve of each rolling directions



(b) R-value of each rolling directions

Fig. 1 Result of tensile tests

Table 1 Swift coefficient and R-value by tensile tests

Swift coeff.		R-value	
K (GPa)	1.7	R0	0.738
ϵ_0	0.003	R45	0.978
n	0.09	R90	0.867

2.2. 인장 압축 시험

인장 시험과 더불어 스프링백의 예측 정확도를 향상시키기 위한 목적으로 인장-압축 거동을 적용하기 위해 이동경화(kinematic hardening) 이론 중 하나인 Yoshida-Uemori 모델을 적용하였다⁶⁾.

시험결과는 Fig. 2와 Table 2에 도시하였다.

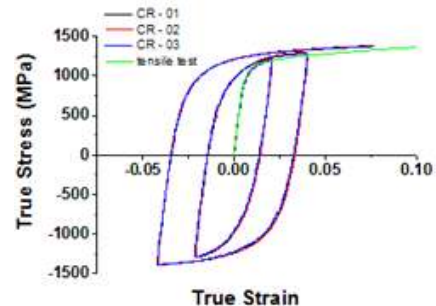


Fig. 2 Result of tensile-compression tests

Table 2 Material parameters for Y-U model

X11	0	X22	0	X12	0
Xsat	0.470	Bsat	0.115	Rsatx	0.100
Cx1	420	Cx2	180	EpRef	0.005
Hnih	0.2	Rnih0	0.002	AM	20
Xi	140	Younga	178		

2.3. FLD(Forming Limits Diagram)

1.2GPa급 초고강도강의 스프링백 경향을 연구하기 위해서는 성형공정 중에 파단(fracture)이 발생하지 않아야 한다. 성형성을 정확히 판단하기 위해 한계 돔 높이시험(LDH : Limits Dome Height)을 실시하여 성형한계도(FLD : Forming Limits Diagram)를 도출하였다. 시험결과는 Fig. 3에 도시하였다.

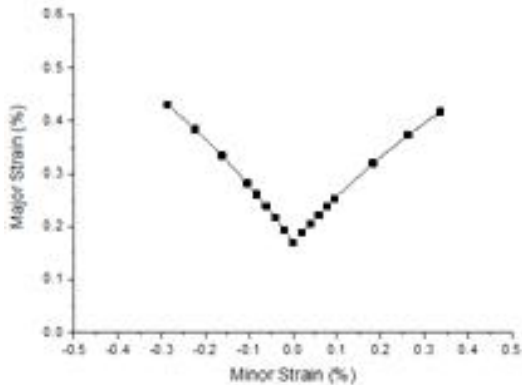


Fig. 3 Result of Limits Dome Height

3. 성형공정해석

3.1. 성형해석 조건

기계적 시험을 통하여 도출한 1.2GPa급 초고강도강의 기계적 물성을 적용하여 성형공정 유한요소해석을 진행하였다. 성공공정 해석에 사용된 소프트웨어는 PAM-STAMP 2G 2017을 이용하였다⁷⁾.

성형공정해석은 모자형 시험편을 드로잉(drawing)성형 하였으며 금형(stamping die)은 상형(die), 하형(punch), 홀더(blank holder)로 구성된다.

금형과 소재(blank) 형상은 Fig. 4 에 도시하였다. 소재는 변형체로 가정하여 BLT(Belytschko-Lin-Tsay) 쉘요소⁸⁾를 사용하여 모델링 하였고, 소재의 초기 요소 크기는 16mm, 성형 중 최소 크기를 1mm 되도록 설정하였다. 요소의 두께방향 적분점의 갯수는 5개로 설정하였으며 해석시간 단축을 위해 질량증가법(mass scaling)을 사용하였다.

성형공정은 소재 안착부터 스프링백 발생까지 모두 확인하기 위해 자중치중(gravity), 상형과 홀더 단힘(holding), 드로잉 성형(stamping), 스프링백으로 총 4단계로 설정하여 해석을 수행하였다.

변수조건으로 비드(bead) 반경(R : radius)과 블랭크 홀딩력(BHF : Blank Holding Force)을 선정하였

다. 각 변수들의 조합에서 파단이 발생하지 않는 조건을 도출하여 비드 반경은 3, 5, 7mm로 설정하였고 비드 높이는 3mm로 일정하게 설정하였다. 블랭크 홀딩력은 100, 150, 200kN으로 설정하였다.

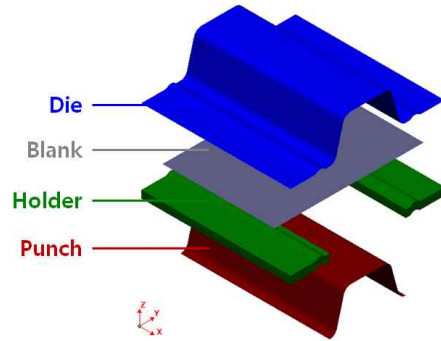


Fig. 4 Finite element model of the tools and the blank used for the stamping analysis of the target part

3.2. 성형해석 결과

성형해석을 실시하여 모자형 시험편의 성형성을 평가하였다. 스프링백을 평가하기 위해서는 성형 완료 후에 파단이 발생하지 않아야 신뢰성 있는 분석이 가능하기 때문에 파단이 발생하지 않는 범위를 설정하였다.

변수조건에서 가장 가혹한 조건인 비드 반경 3mm, 블랭크 홀딩력 200kN 일 때 성형성에 결함이 없다면 다른 조건에서 또한 결함이 없으므로 가혹조건에서 시험 성형을 실시하고 범위를 도출하였다.

성형성은 두께변화율(thinning)과 성형한계도를 기준으로 평가하였으며 하사점에서의 해석결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 도시하였다.

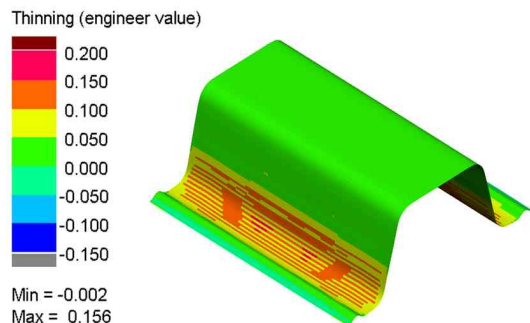


Fig. 5 Distribution of the thickness reduction ratio (BHF = 200kN, Radius of bead = 3mm)

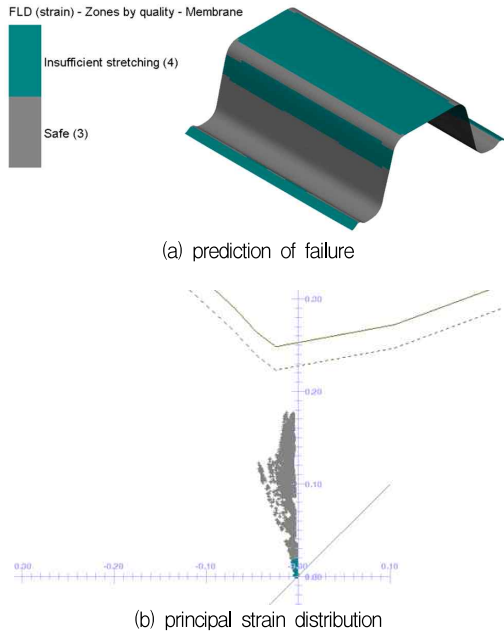


Fig. 6 Principal strain distribution on the forming limits diagram (BHF = 200kN, Radius of bead = 3mm)

가혹 조건에서의 파단이나 다른 성형 결함은 발생하지 않음을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 하지만 블랭크 홀딩력 100kN과 150kN에서는 상형 다이와 블랭크 홀더의 열림 현상(opening)이 발생하였다.

열림 현상은 비드 반경 3mm, 블랭크 홀딩력 100kN일 때 최대 0.546mm로 확인하였다. 홀더 열림 현상은 비드 반경이 커질수록, 블랭크 홀딩력이 높을수록 값이 작아짐을 확인하였다.

홀더 열림 현상은 초고강도강을 냉간 성형 시 블랭크 홀딩력이 부족하거나 비드 형상처럼 국부적인 변형이 심화될 때 소재 반력에 의해 발생하는데 해석결과와 같이 국부변형이 심한 비드 반경3mm에서 열림 현상이 심화되었고, 블랭크 홀딩력이 약할수록 심화됨을 확인하였다.

홀더의 열림이 발생하면 소재를 잡아 유입량을 제어하는 블랭크 홀더의 역할을 제대로 수행하지 못하여 주름(wrinkle)이 발생할 수 있다.

본 연구에서는 스프링백의 영향을 분석이 주목적이므로 블랭크 홀더 열림 현상은 스프링백의 영향을 잘 표현할 것이라 판단하여 변수조건을 변경하지 않았다. 블랭크 홀더 열림 현상의 정량적인 수치는 Table 3에 도시하였다.

Table 3 Opening distance of between die and blank holder

Opening amount (mm)		BHF (kN)		
		100	150	200
Bead R (mm)	3	0.546	0.143	0
	5	0.341	0.129	0
	7	0.232	0.112	0

3.3. 스프링백 예측

성형해석과 더불어 스프링백 해석을 실시하였으며 스프링백 양(spring back amount)을 정량적으로 나타내었다. 스프링백의 측정은 Fig. 7과 같이 금형과 스프링백이 발생한 판넬의 각도로 측정하였으며 각도의 기준은 다이 반경(dir R) 끝단이다.

비드 반경과 블랭크 홀딩력에 따라 스프링백 변화량을 비교하였으며 스프링백 해석의 결과를 정리하여 Table 4에 도시하였다.

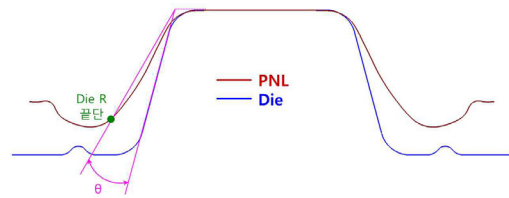


Fig. 7 Measuring method of springback amount

Table 4 Spring back amount by spring back analysis

Springback amount (degree)		BHF (kN)		
		100	150	200
Bead R (mm)	3	20.92	18.81	15.77
	5	21.63	21.11	18.15
	7	21.91	21.21	20.42

스프링백 해석의 결과는 비드 반경이 증가할수록 스프링백 양이 증가하였고, 블랭크 홀딩력이 약할수록 스프링백 양이 증가하였다. 이 결과는 비드 반경과 블랭크 홀딩력의 변수가 성형과정 중에 발생하는 인장력에 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 비드 반경이 커질수록 블랭크 홀딩력에 대한 스프링백 변화폭이 감소하였으며 블랭크 홀딩력이 감소할수록 비드 반경에 대한 스프링백 변화폭이 감소하였다. 이는 두 가지 변수 모두 스프링백에 대해 영향력을 가지고 있으며 두 가지 변수에 대해 최적 조건을 도출하여 적용해야 한다.

스프링백 해석의 단면형상 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 도시하였다.

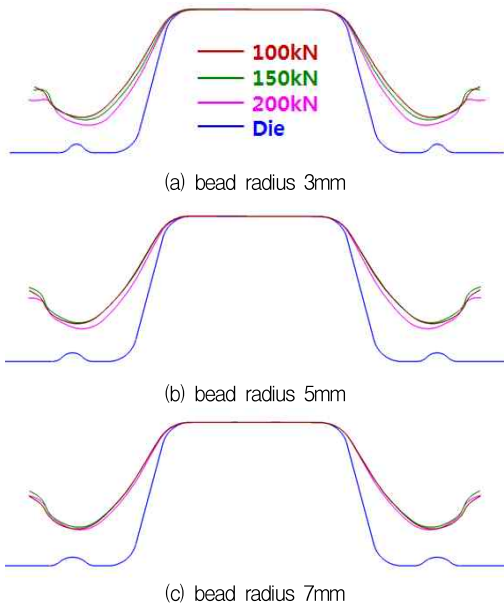


Fig. 8 Section view according to bead radius by springback analysis

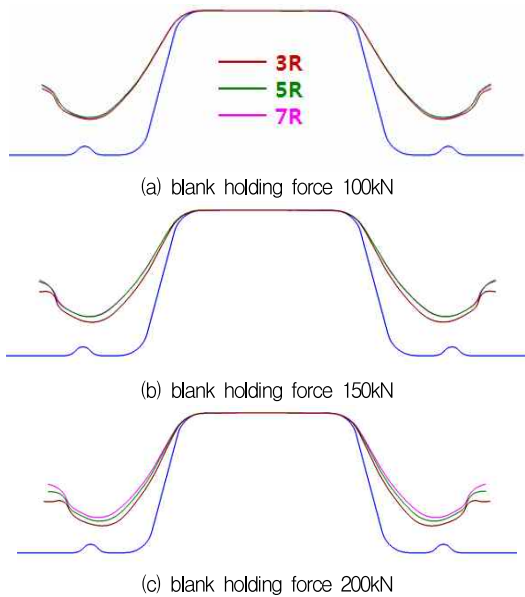


Fig. 9 Section view according to blank holding force by spring back analysis

4. 결론

본 논문에서는 인장강도 1.2GPa급의 초고강도강 소재의 프레스 냉간성형 공정 후 스프링백 특성에 대해 연구하였다. 성형공정해석을 위해 인장 시험,

인장 압축 시험, 한계돔 높이 시험을 실시하였으며 각 시험을 통해 swift coefficient, Yoshida-Uemori parameter, FLD를 도출하였다. 블랭크 홀딩력을 100kN, 150kN, 200kN으로 성형공정 변수로 선정하였으며 비드 반경 변수는 3mm, 5mm, 7mm로 선정하였다. 각 변수 조합에 대해 성형성을 검토하였으며 스프링백 해석과 연계하여 스프링백 특성에 대해 연구하였다. 해석결과를 바탕으로 스프링백 특성을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 블랭크 홀딩력이 충분하지 않으면 홀더 열림 현상이 발생하였다.
- 2) 홀더 열림 현상은 비드 반경이 작을수록, 블랭크 홀딩력이 낮을수록 심화되었다.
- 3) 비드 반경이 증가할수록 스프링백 양이 증가하였고, 블랭크 홀딩력이 약할수록 스프링백 양이 증가하였다.
- 4) 비드 반경이 커질수록 블랭크 홀딩력에 대한 스프링백 변화폭이 감소하였으며 블랭크 홀딩력이 감소할수록 비드 반경에 대한 스프링백 변화폭이 감소하였다.

위의 결과들을 토대로 볼 때, 본 논문에서 연구한 변수 조건들은 모두 스프링백에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 하나의 변수만 제어하지 않고 두 가지 변수 모두 제어하여 최적 조건을 도출한다면 산업 현장에서 스프링백 제어에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 스프링백 현상을 분석하기 위해 단순형상인 모자형 시험편에 대해 연구하여 다른 형상적 요인은 배제되었다. 형상이 복잡한 실제 부품에 적용하여 공정변수와 비드 형상변수에 대해 연구할 필요성이 있고, 나아가 다른 변수 조건을 고려하여 스프링백에 대해 정량적으로 연구할 필요가 있다.

참고문헌

- 1) AHSS Application Guidelines Version 5.0, <http://www.worldautosteel.org/projects/ahss-guidelines>
- 2) K. H. Kang, "Design Guideline with the Structural Analysis of the Press Die for Stamping an Auto-part with Ultra High Strength Steel of 1.5GPa UTS-grade", M. S. Thesis, Graduate School, Daegu University, Gyeongbuk, Korea, 2015.

- 3) J. H. Lee, S. H. Kim, “Automatic Tool Compensation for an UHSS Automotive Component Using a Compensation Module”, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 25, No. 2, pp. 109-115, 2016.
- 4) J. H. Song, J. H. Kwak, B. W. Kang, W. Noh, S. H. Kim, D. H. Park, J. H. Lee, C. Y. Jung, “Finite Element Analysis of Variable Blank Holder Force for Springback Reduction of 1.2GPa Steel Grade Auto-body Part.”, *KSMTE Spring Conf.*, Poster, 2017.
- 5) R. Hill, “A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals”, *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, Vol. 193, No. 1033, pp. 281-297, 1948.
- 6) F. Yoshida, T. Uemori, “A Model of Large-Strain Cyclic Plasticity Describing the Bauschinger Effect and Workhardening Stagnation”, *Int. J. Plast.*, Vol. 18, No. 5-6, pp. 661-686, 2002.
- 7) ESI Group, *PAM-STAMPTM, User’s Manual*, 2017.
- 8) T. Belytschko, J. I. Lin, C. Tsay, “Explicit Algorithms for the Nonlinear Dynamics of Shells”, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 42, No. 2, pp. 225-251, 1984.