

초고강도강판 드로잉 성형에서 가변 블랭크 홀딩력에 의한 스프링백 경향

곽정환¹ · 정철영² · 김세호³ · 송정한[†]

에이치아이티오토모티브(주)¹ · 대우공업(주) 기술연구소³
대구대학교 기계공학부[†] · 한국생산기술연구원 성형기술그룹[†]

Springback tendency with the variable blank holding force in the drawing process of the UHSS

Jung-Hwan Kwak¹ · Jung-Han Song^{2†} · Chul-Young Jung² and Se-Ho Kim³

H.I.T Automotive Co. Ltd.¹ · R&D Center Dawoo Industry Co. Ltd.²

School of Mechanical Engineering, Daegu University³ · Metal Forming R&D Group, KITECH[†]

(Received October 30, 2018 / Revised November 22, 2018 / Accepted December 01, 2018)

Abstract: The production of the automotive parts with the ultra high strength steel usually involves large amount of springback as well as fracture during the cold stamping process. Variable blank holding force(VBHF) can be used as one of the effective process parameters to reduce the springback amount with achieving better condition of formability. In this paper, VBHF with respect to the punch stroke is applied to the stamping process of the front side rear lower member for reducing the springback amount. From the analyses with constant blank holding force(CBHF), 24 kinds of VBHF conditions are utilized to investigate the springback tendency. It is noted that springback can be effectively reduced when BHF is increased near the bottom dead center because VBHF provides the tensile force to the blank with an adequate level of deformation without fracture.

Key Words: Formability, Springback, UHSS(Ultra High Strength Steel), Variable Blank Holding Force(VBHF)

1. 서 론

최근 차량 경량화를 위하여 외관 및 차체부품에 고강도강의 적용이 점차 증가되고 있으며, 특히 판재의 인장강도가 1 GPa 이상인 초고강도강(UHSS)이 냉간 공정에서도 많이 사용되고 있다. 초고강도강의 냉간 성형은 점차 확대되고 있으나 낮은 성형성 및 매우 큰 스프링백의 발생에 의하여 주로 폼(form) 공법 등의 굽힘 공정이 적용되고 있으며, 드로잉(drawing) 공법의 적용은 제한적으로만 이루어지고 있다. 성형성의 문제점은 주로 제품형상의 단순화와 공정분할로 해결하고 있으나, 스프링백 발생에 의한 형상정밀도의 문제는 시행오차를 이용한 금형보정

을 통하여 해결하고 있어 금형 및 공법 개발 단계에서 비용과 시간이 많이 소요된다. 개발 기간 및 비용의 절감을 위해서는 금형 형상의 보정 이전 단계에서 스프링백의 크기를 감소시키는 노력이 필요하다.

판재 성형공정 중 파단 및 주름을 방지하는 동시에 스프링백 양을 줄이기 위한 시도로 가변 블랭크 홀딩력을 활용하는 방안이 시도되어 왔다. Lin 등¹⁾은 오일팬 제품 성형 시 블랭크 홀딩력을 제어하여 주름 및 파단 등의 불량을 동시에 해결하는 것을 보였다. Yossifon 등²⁾은 원형 컵의 성형 중 최대 하중 시점에서 블랭크 홀딩력을 감소시켜 한계 드로잉비를 높이는 연구를 진행하였다. Jeong³⁾은 단차 형상이 있는 제품의 성형 중 블랭크 홀딩력을 제어하여 소재 유입량을 조절하고 평면변형 모드에서 파단 방지 효과를 확인하였다. Choi와 Chung⁴⁾은 오일팬 형상의 제품의 성형성 향상을 위하여 해석 및 통계

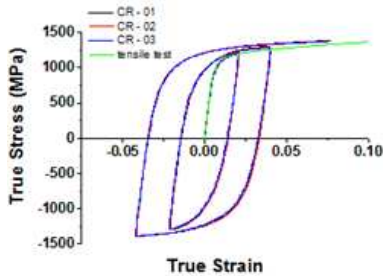
1. 에이치아이티 오토모티브(주)
† 교신저자: 한국생산기술연구원 성형기술그룹
E-mail: jhsong@kitech.re.kr

분석적 최적화 기법을 사용하여 가변 블랭크 홀딩력의 변화를 결정하였고 성형하중 등의 감소를 통하여 성형성 개선을 확인하였다.

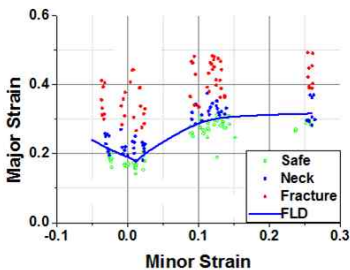
본 논문에서는 인장강도 1.2 GPa급 초고강도 강관의 드로잉 성형 시 발생하는 스프링백의 효율적인 감소를 위하여 블랭크 홀딩력을 펀치 행정에 따라 변화시켜 부과하였으며, 형상정밀도를 높이기 위한 가변 블랭크 홀딩력 크기의 변화를 결정하였다.

2. 블랭크 물성평가

본 논문에서 대상으로 적용한 초고강도 강관은 TRIP1180으로 비슷한 인장강도를 가지는 소재에 비하여 성형성 및 연신률이 높아 드로잉 공정용 소재로 개발되었다. 소재의 기계적 물성을 구하기 위하여 압연방향에 따라 0°, 45°, 90° 방향으로 시편을 가공하고 인장시험, 성형한계도 특성 평가, 인장-압축 시험을 실시하였으며, 이동경화 이론인 Yoshida-Uemori 모델⁵⁾에 적용할 수 있는 계수 및 성형한계도를 구하였다. Fig. 1에 도출된 인장-압축 곡선과 성형한계도를 도시하였으며, Table 1에 Yoshida-Uemori 모델의 계수를 도시하였다. 사용한 소재의 두께는 1.4 mm이다.



(a) tension-compression tension curve



(b) forming limit diagram

Fig. 1 Material curves obtained from the experiments

Table 1 Material parameters for the Yoshida-Uemori model

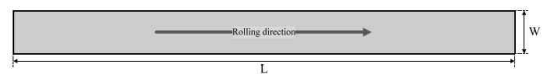
Material	Material Properties					
	α	0.47	b	0.115	R_{sat}	0.1
TRIP1180	c_1	420	c_2	180	m	20
	ξ	140	E_a	170	E	210

3. U-굽힘공정 스프링백 결과 검증

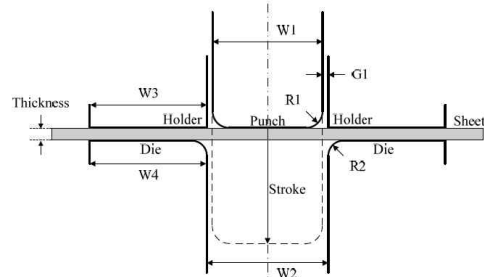
3.1. U-굽힘 성형해석 개요

초고강도 강관 성형 중 일정한 블랭크 홀딩력 (CBHF)의 크기에 의한 스프링백 예측 정밀도를 판별하기 위하여 U-굽힘 공정에 대한 성형해석 및 시험과의 비교를 실시하였다. 스프링백 비교는 NUMISHEET2011⁶⁾의 벤치마크 문제를 활용하여 실시하였으며, 시편과 금형의 개략적인 형상과 치수는 Fig. 2와 Table 2에 각각 도시하였다.

성형해석을 수행하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 AutoForm R7 Incremental⁷⁾을 사용하였다. 블랭크는 쉘요소를 사용하여 분할하고, Hill의 1948 평면이방성을 고려한 항복함수⁸⁾를 사용하였으며, Yoshida-Uemori 모델을 이용한 이동경화 모델을 적용하였다. 블랭크의 초기요소는 20 mm로 분할하였고, 성형 중 최대 6회까지 적용형 요소분할을 실시하여 요소의 최소 길이가 0.31 mm가 되도록 하였다. 일정한 블랭크 홀딩력 부과 시 스프링백 발생량의 차이를 비교하기 위하여 블랭크 홀딩력 10 kN, 30 kN, 50 kN, 70 kN, 100 kN의 5가지를 적용하여 성형해석 및 시험을 진행하였다. 스프링백 발생량을 정량적으로 비교하기 위하여 Fig 3과 같이 펀치부 스



(a) blank



(b) tool setup

Fig. 2 Schematic setup of blank and tools for the 2-D draw bending process

Table 2 Dimensions of the tools for 2-D draw bending [unit : mm]

W1	W2	W3	W4	R1
50	54	89	89	5
R2	G1	Stroke	L	W
7	2	60	300	30

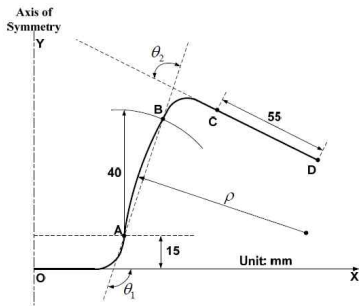


Fig. 3 Measuring method of the springback amounts in the U-draw bending process⁽⁸⁾



Fig. 4 Deformed shapes of the blank in the experiment

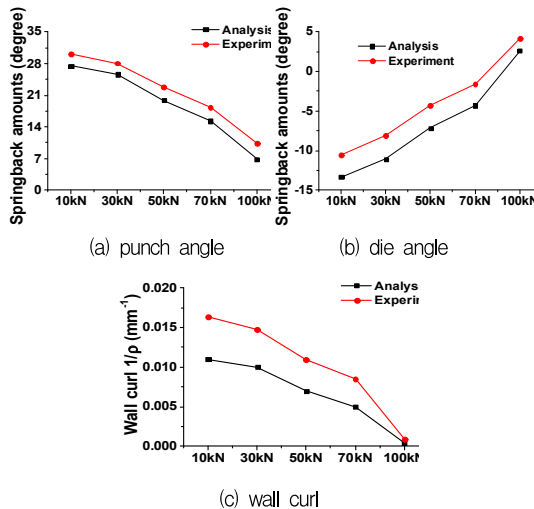


Fig. 5 Comparison of springback amounts according to the blank holding force between analysis and experiment

스프링백 θ_1 , 다이부 스프링백 θ_2 , 벽휩량 ρ 를 측정하였다.

성형시험을 위하여 HIM사의 200 ton 프레스와 16 ton 용량의 NC 다이쿠션을 사용하였다. 시험에서

얻은 시편형상의 예를 Fig. 4에 도시하였으며, Fig. 5에 시험과 해석에서 얻은 스프링백 값을 비교하였다. 펀치부와 다이부의 스프링백 각도의 경향 및 절대값이 시험과 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 블랭크 홀딩력 제어를 통한 성형해석

4.1. 대상부품 및 공정개요

본 논문에서 가변 홀딩력 효과를 확인하기 위한 성형 부품은 프런트 사이드 리어 로어 멤버(front side rear lower member)로 Fig. 6과 같이 차량 앞쪽에 위치하여, 차량의 전방 충돌 시 충돌 에너지를 차량 뒤쪽으로 전달하고 내부 탑승공간을 보호하는 역할을 하는 부재로 높은 강도를 유지하여야 하는 차체 핵심 부품이다. 본 제품은 드로잉 공정을 적용하였다. 제품의 형상과 제1공정을 위한 금형 형상을 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 도시하였다.

4.2. 성형해석 조건

이상의 공정조건을 바탕으로 제1공정인 드로잉 공정의 성형해석을 실시하였다. 해석은 상용 프로그램인 PAM-STAMP 2G 2015⁽⁹⁾를 이용하였으며, 해석을 위한 블랭크와 금형의 유한요소모델을 Fig. 9에 도시하였다. 금형과 블랭크는 각각 강재와 탄소성 변형체로 가정하였으며, 블랭크에 적용형 요소분할을 적용하였다. 두께 방향의 적분점은 5개로 설정하였으며, 금형의 곡률부를 7.5° 간격으로 분할하였으며, 성형시간의 감소를 위하여 요소크기가 작아지는 부분에 밀도를 증가시켜 주는 방법(mass scaling)을 사용하였다.

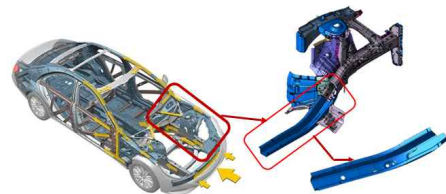


Fig. 6 Position of the front side rear lower member

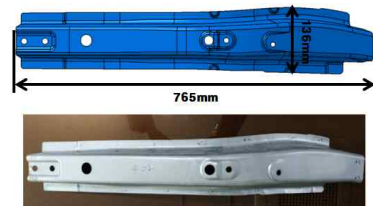


Fig. 7 Shape and dimension of front side rear lower member



Fig. 8 Shape of the tool sets for fabricating prototypes

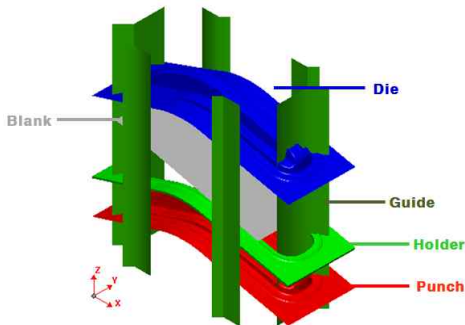


Fig. 9 Finite element model of the tools and the blank for the stamping analysis of the target part

성형해석은 자중처짐, 바인더랩(binderwrap), 펀치 성형, 스프링백으로 4단계에 걸쳐 해석을 수행하였다. 금형의 성형 속도로 5 mm/s를 부과하였으며, 금형과 블랭크 사이의 무윤활 조건으로 가정하여 쿨롱 마찰계수는 0.12로 설정하였다. 펀치행정은 100 mm를 부과하였다.

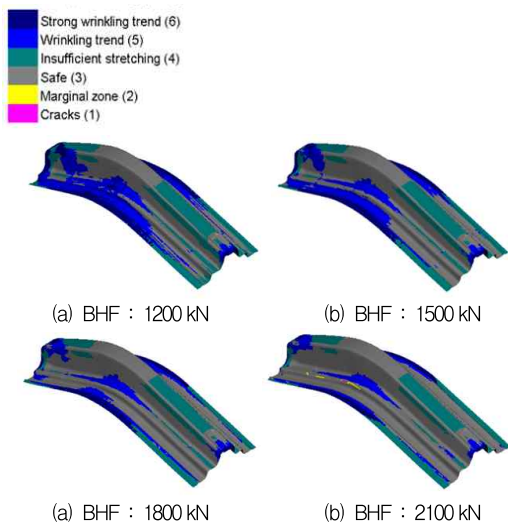


Fig. 10 Forming analysis results for constant BHF cases

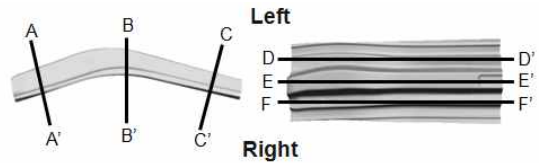


Fig. 11 Measurement positions of springback amounts

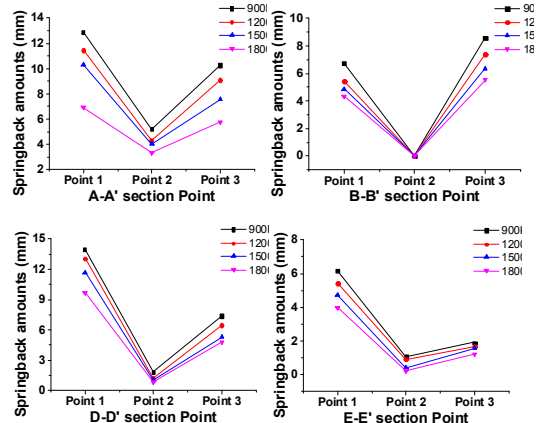


Fig. 12 Comparison of the springback amounts at the measurement sections according to constant BHF

4.3. 일정 블랭크 홀딩력(CBHF) 부과 결과

이상의 해석 조건을 바탕으로 블랭크 홀딩력 제어에 따른 스프링백 특성을 고찰하기 위하여 일정한 블랭크 홀딩력 900 kN, 1200 kN, 1500 kN, 1800 kN, 2100 kN을 각각 부과하여 성형해석을 진행하였다. Fig. 10과 같이 블랭크 홀딩력이 작은 4가지 경우는 파단이 발생하지 않고 성형이 가능하였으나 2100 kN의 경우 최종 행정 4mm 전에서 파단이 발생하였다.

블랭크 홀딩력 증가에 따른 스프링백 변화를 분석하기 위하여 Fig. 11과 같이 제품의 길이, 폭 방향으로 각각 3개의 단면을 분할하고 각각의 단면에서 3개점을 추출하여 단면의 수직방향으로 스프링백 값을 측정하였다. Fig. 12의 스프링백 양의 비교에서 확인할 수 있듯이 블랭크 홀딩력이 증가하면 스프링백 양이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 행정에 따라 구간을 분할하고 블랭크 홀딩력을 제어할 경우 성형성과 스프링백 발생량을 모두 개선할 가능성이 있음을 확인하였다.

4.4. 가변 블랭크 홀딩력(VBHF) 부과 결과

일정한 블랭크 홀딩력을 부과한 결과 홀딩력이 증가하면 스프링백이 감소하는 경향을 보이고 있으나 2100 kN의 경우에는 블랭크의 파단이 발생하는

Table 3 Patterns of the variable blank holding forces

Stroke (mm)	Blank holding force (kN)							
	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5	CASE 6	CASE 7	CASE 8
0~40	900	900	900	900	900	900	900	900
40~70	900	900	1500	1500	1500	2100	2100	2100
70~100	1500	2100	900	1500	2100	900	1500	2100

Stroke (mm)	Blank holding force (kN)							
	CASE 9	CASE 10	CASE 11	CASE 12	CASE 13	CASE 14	CASE 15	CASE 16
0~40	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
40~70	900	900	900	1500	1500	2100	2100	2100
70~100	900	1500	2100	900	2100	900	1500	2100

Stroke (mm)	Blank holding force (kN)							
	CASE 17	CASE 18	CASE 19	CASE 20	CASE 21	CASE 22	CASE 23	CASE 24
0~40	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100
40~70	900	900	900	1500	1500	1500	2100	2100
70~100	900	1500	2100	900	1500	2100	900	1500

문제를 보였다. 스프링백 경향 및 파단 발생의 결과를 바탕으로 행정별 블랭크 홀딩력을 제어하기 위하여 전체 행정을 3구간으로 분할하고, 가장 낮은 홀딩력인 900 kN, 중간값인 1500 kN, 파단이 발생한 가장 높은 값인 2100 kN의 3가지 변수 수준을 이용하여 Table 3와 같이 24가지 가변 홀딩력 조건을 생성하였다. 홀딩력이 변화되는 구간에서는 동적효과를 최소화하기 위하여 2 mm의 행정구간에서 서번하도록 하였다.

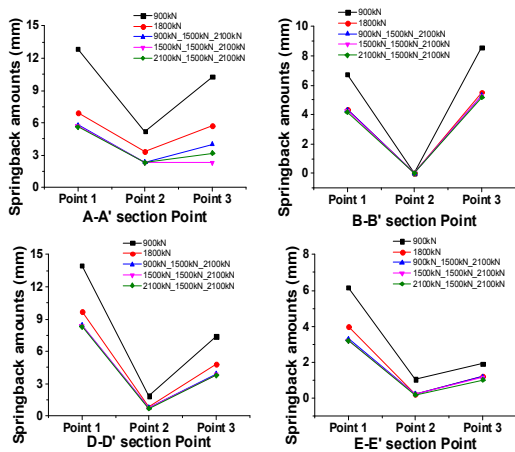


Fig. 13 Comparison of the springback amounts at the measurement sections among the CBHF and the variable VBHF's

해석을 수행한 결과 초기 블랭크 홀딩력이 900 kN, 1500 kN, 2100 kN일 때의 각 조건에서 주름 및 높이 방향 스프링백이 가장 낮은 조건을 추출하여 단면에서의 스프링백을 측정하였다. 이 결과를 일정 블랭크 홀딩력에서 스프링백이 가장 컸던 900 kN과 가장 작았던 1800 kN의 경우와 비교하여 Fig. 13에 도시하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 가변 블랭크 홀딩력을 부과하면 스프링백이 더 효과적으로 감소하였다. 블랭크 홀딩력이 성형 종료 직전의 행정 구간에서 증가하게 되면 블랭크의 파단이 일어나지 않는 범위 내에서 소성 변형을 증가시켜 효과적으로 스프링백이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

5. 성형시험 및 검증

성형해석을 통하여 도출된 가변 블랭크 홀딩력 변화 조건을 이용하여 성형시험을 실시하였다. 시험에 사용된 홀딩력 조건은 Table 3의 CASE 5, CASE 13, CASE 22이다. 사용된 장비는 Amino사의 서보프레스와 가변 홀딩력 부가가 가능한 NC 다이 쿠션이다. 시험에서 얻어진 조건에서 성형된 블랭크 형상을 Fig. 14에 도시하였다. 시제품을 해석과 동일한 단면에서 형상을 측정하여 시험과 해석의 오차를 Table 4에 도시하였다. 시험과 성형해석의 결과는 유사하였으며, 최대 오차는 3 mm로 제품의 끝에서 발생하였다. 이를 제외한 대부분의 단면에서 2 mm 미만의 오차가 도출되었으며, 파단 및 주름 등의 성형성에도 문제가 없음을 확인하였다.



Fig. 14 Shape of the prototype obtained from the experiment with the variable blank holding force

Table 4 Comparison of the springback amounts between the analysis and the experiment

Sections	Springback amounts (mm)								
	CASE 5			CASE 13			CASE 22		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
A-A'	1.31	0.5	0.11	0.89	0.47	0.7	0.01	0.03	0.01
B-B'	1.47	0.0	0.7	1.27	0.0	0.53	0.21	0.0	1.14
C-C'	1.92	0.03	2.95	1.23	0.04	2.48	0.01	0.0	0.23
D-D'	2.04	0.15	0.28	1.84	0.07	0.18	0.18	0.03	0.07
E-E'	0.48	0.12	1.35	0.01	0.08	1.43	1.43	0.02	1.61
F-F'	1.46	0.17	1.72	0.18	0.03	1.47	0.03	0.02	0.03

6. 결 론

본 논문에서는 초고강도강 소재로 냉간 프레스 성형을 실시할 경우 발생하는 주요 불량인 스프링백과 파단을 개선하기 위하여 다양한 공정변수 중 블랭크 홀딩력 제어를 실시하였으며, 이에 따른 변형기구의 변화를 고찰하였다. 블랭크 홀딩력을 행정에 따라 변화시킬 경우 일정한 블랭크 홀딩력을 부과할 때보다 스프링백을 효과적으로 감소시킬 수 있었다. 성형 초기에 낮은 홀딩력을 부과하여 블랭크의 파단을 방지하고, 성형 후반부에 홀딩력을 증가시켜 파단이 발생하지 않는 범위 내에서 스프링백을 감소시키는 방안이 가장 효과적임을 보였다.

참고문헌

1) Lin, Z.Q., Wang, W.R. and Chen, G.L., “A new strategy to optimize variable blank holder force towards improving the forming limits of aluminum sheet metal forming”, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 183, pp. 339-346, 2007.

2) Yossifon, S., Sweeney, K., “Ahmetoglu, M. and Altan, T., On the acceptable blank holder force range in the deep-drawing process”, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 33, pp. 175-194, 1992.

3) Jeong, H.G., “Numerical study on the improvement of formability of automobile panel by blank holding force control”, M. S. Thesis, Graduate School, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 2015.

4) Choi, H.S. and Chung, W.J., “A numerical study on formability improvement by adjusting blank holding force”, *J. D&M Eng.*, Vol. 10, No. 1, pp. 31-35, 2016.

5) Yoshida, F. and Uemori, T., “A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation”, *Int. J. Plasticity*, Vol. 18, No. 5, pp. 661-686, 2002.

6) Chung, K., Kuwabara, T., Verma, R.K., Park, T., Proc. NUMISHEET2011, “Part C Benchmark Problems and Results (eds. Huh H., Chung, K., Han, S.S., Chung, W.J.)”, The Korean Society of Technology of Plasticity, pp. 171-175, 2011.

7) Auto Form, Auto Form-user interface R7 software manual, 2017.

8) Hill, R., “A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals”, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, Vol. 193, No. 1033, pp. 281-297, 1948.

9) ESI Group, PAM-STAMP™ user's manual, 2015.

10) Kwak, J.H., “Evaluation of springback and forming characteristics of ultra high strength steel subjected to blank holding force control”, M. S. Thesis, Graduate School, Daegu University, Gyeongbuk, 2017.