

유한요소해석을 이용한 센터필러(고장력강-780MPa)의 스탬핑 공정 설계

방기봉¹ · 성한샘¹ · 광효서² · 김 철[#]

A Study on Stamping of the Center Pillar (High-Strength Steel-780MPa) Using Finite Element Analysis

G. B. Bang, H. S. Seong, H. S. Kwak, C. Kim

(Received October 24, 2016 / Revised March 9, 2017 / Accepted March 10, 2017)

Abstract

Center pillar, which is installed in the center of flank of car body, supports roof and door and ensures the safety of driver by reducing the damage of car body caused by impact. Recently, high-strength steel is widely used to manufacture the center pillar due to high stiffness and fuel efficiency. In this study, material properties of the high-strength steel, whose tensile strength is more than 780MPa, were obtained to produce the center pillar. Stamping was performed by considering the design parameters (blank holder force, press stroke, blank size and pad pressure) used in the actual filed. The drawbeads were included in the stamping process to reduce the amounts of wrinkling and spring back. Using the commercial software, Autoform R5.2 and Minitab, effects of design parameters of the stamping process upon spring back were analyzed and applied to the design process. The restriking process meets the target of under 0.5mm in the amount of spring back.

Key Words : Center Pillar, High-strength Steel, Stamping Process, Design Parameters, Blank Holder Force, Pad Pressure, Springback, Restriking Process

1. 서 론

최근 자동차 산업에서 가장 큰 이슈인 연비 향상과 자동차 충돌 시 안전 확보를 위해, 저렴하고 얇은 두께로 원하는 강성을 유지시킬 수 있는 고장력 강판을 이용한 차체 제작이 이루어지고 있으며 자동차 부품에 적용이 빠르게 증가하고 있다[1~4]. 고장력강의 경우, 제품의 깊이(Depth)가 깊을수록 주름 및 파단이 발생하기 쉽고, 탄성 복원량의 증가로 인하여 스프링백이 크게 발생한다. H. Huh 등[5, 6]은 재료의 경화 거동에 따른 최종 응력 상태의 스프링

백 거동을 분석하기 위해 스탬핑 공정에 대한 여러 변수의 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 차체 좌우 중앙부에 설치되어 루프와 도어를 지지하는 역할을 하며, 차량 충돌 시의 차체파손을 감소시켜 운전자의 안전을 확보하는 Fig. 1의 센터필러에 대한 스탬핑 공정설계를 수행하였다. 780MPa 이상의 인장강도를 가지는 고장력 강판의 인장시험을 통하여 기계적 물성치를 획득하고, 상용 소프트웨어인 Autoform R5.2를 이용하여 현장의 엔지니어와의 인터뷰를 통해서 얻은 스탬핑 공정의 설계인자(블랭크 홀딩 포스, 블랭크, 프레스 스

1. 부산대학교 대학원 기계융합기술학과

2. 부산대학교 기계기술연구원

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ., chulki@pusan.ac.kr

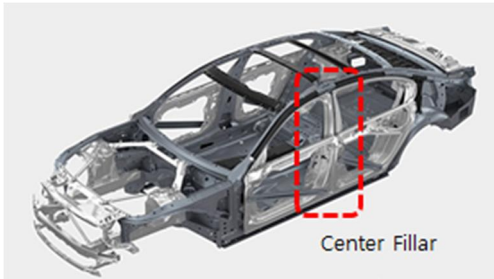


Fig. 1 Center pillar of an automobile body

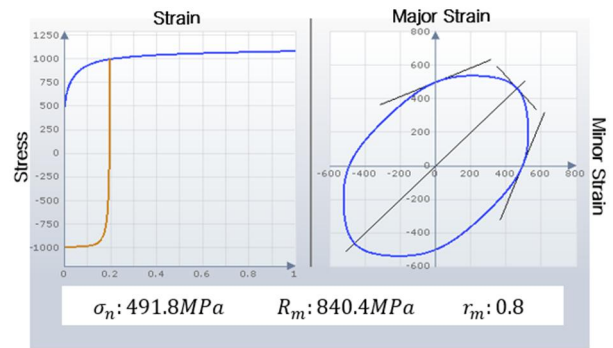


Fig. 2 Application of material properties (JSC780Y) to Autoform

Table 1 Mechanical properties of the JSC780Y

Test item	Unit	Test result	Mean value
Tensile Strength	N/mm ²	838	840.4
		841	
		845	
		841	
		837	
Yield Strength	N/mm ²	488	491.8
		492	
		499	
		493	
		487	
Elongation	%	21	21
		21	
		21	
		21	
		21	

Table 2 Plastic strain ratio of the JSC780Y

Test item	Test result	Mean value	
Ratio of Plastic Deformation (r value)	r ₀	0.83	0.8
		0.76	
		0.82	
		0.76	
		0.83	

트로크 및 패드압)가 스프링백에 미치는 영향을 파악한 후 설계공정에 적용하였다. 또한, 리스트라이킹 공정을 추가함으로써, 정량적 목표치(스프링백 0.5mm이하)를 만족하는 센터필러를 얻을 수 있었다.

2. 센터필러 스탬핑 해석기법 검증

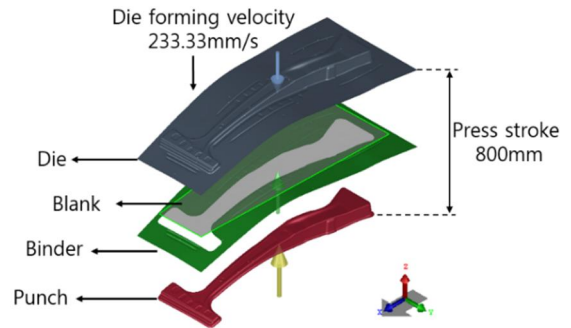


Fig. 3 Finite element model to simulate a stamping process of center pillar

2.1 인장시험을 통한 고장력강의 물성치 확보

센터필러 소재인 780MPa 고장력강(JIS규격 JSC780Y)의 기계적 물성치 확보를 위한 인장시험을 수행하였다. 데이터의 정확성을 위하여 시편 5개에 대한 인장시험의 결과의 평균값(항복강도, 인장강도, 연신율 및 소성변형비)을 사용하였으며, 이를 Table 1 및 Table 2에 나타내었다. 획득한 물성치를 유한요소해석 프로그램인 Autoform에 적용하여 Fig. 2에 나타내었으며, σ_n 은 JSC780Y 소재의 평균 항복강도, R_m 은 평균 인장강도, r_m 은 소성변형비다.

2.2 현장의 스탬핑 공정 조건

2.2.1 현장 설계 변수

현장에서 사용되는 스탬핑 공정 설계변수로는 블랭크 홀딩 포스, 마찰력, 프레스 스트로크, 다이의 성형 속도 및 블랭크 등이 있다. 센터필러 스탬핑의 블랭크 홀딩 포스는 일반적으로 70~85Ton을 사용하므로 시뮬레이션에서는 평균치인 77Ton을 적용하였다.

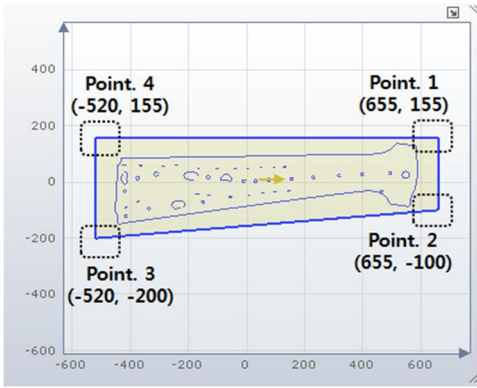


Fig. 4 Shape and coordinates of the initial blank

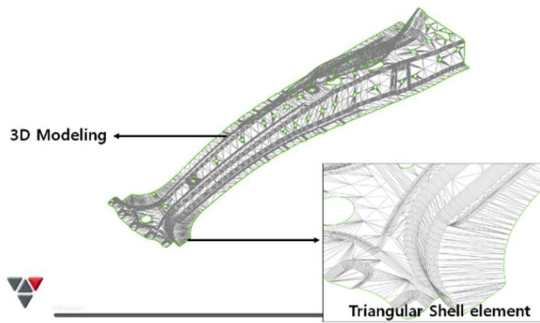


Fig. 5 Mesh for finite element analysis

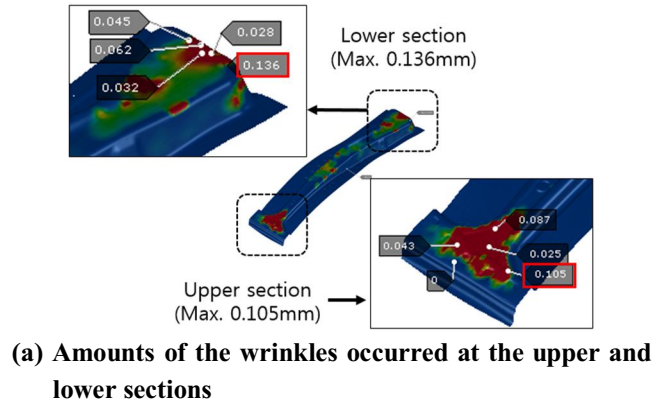
Fig. 3과 같이 유한요소해석을 위하여 다이, 블랭크, 바인더 및 펀치 순서로 배열하였으며, 스탬핑 공정에 적용한 프레스 스트로크 및 다이의 성형 속도는 현장에서 제시한 800mm 및 233.33mm/s이다. 금형의 표면손상, 파단 및 주름 방지를 위하여 펀치 및 다이에 윤활유(mill oil)를 도포하였으며, 바인더와 펀치 및 다이에 적용되는 Mill oil 마찰상수의 경우, Autoform R5.2에서 제공하는 값인 0.15를 적용하였다.

초기 블랭크 형상 및 크기가 최종 형상에서의 주름 및 스프링백에 큰 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 시행착오법을 통하여 블랭크 형상을 결정하였다[7]. 초기 블랭크 사이즈는 현장으로부터 제공 받은 1175×355mm이며, 각 꼭지점의 좌표(x, y)를 Fig. 4에 나타내었다.

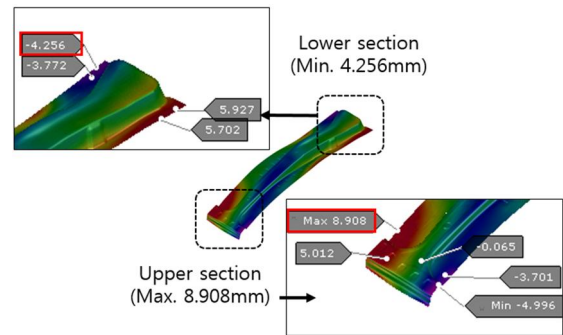
2.2.2 메쉬 생성

해석의 정확성 및 균일한 재료유입을 위하여 Fig. 5와 같이 삼각형 셸 요소(triangular shell element)의 메쉬를 적용하였다.

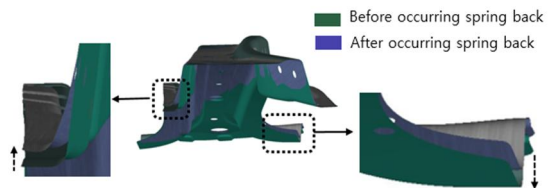
곡면에서 인장 및 압축이 발생하는 경우에는 유연한 성형을 위하여 Autoform에서는 한 곡면에 최소



(a) Amounts of the wrinkles occurred at the upper and lower sections



(b) Amounts of the springbacks occurred at the upper and lower sections



(c) Comparison of the center pillar shapes before and after occurring the springback

Fig. 6 Analysis results of stamping process of the center pillar

6개의 격자가 생성되어야 하므로, 격자간의 거리 0.5mm, 격자공차 0.1mm 및 최대 격자길이는 50mm로 설정하여 메쉬를 생성하였다.

2.3 해석결과 및 고찰

2.2절의 현장에서의 해석 조건을 이용하여 센터필러의 스탬핑 공정을 수행하였으며, 주름 및 스프링백의 발생 경향을 파악하였다. 실제 제작할 센터필러 형상인 성형 전 모델과, 주름 및 스프링백이 발생된 성형 후 모델의 각 메쉬 요소의 위치 변화를 자동 측정하여, Fig. 6과 같이 주름 및 스프링백 량을 나타

내었다.

센터필러 상단부에서 최대 0.105mm 의 주름이 발생하였으며 파단은 발생하지 않았다. 센터필러 하단부에서는 최대 0.136mm 의 국부적인 주름이 발생하였으며 이를 Fig. 6 (a)에 나타내었다.

성형 후 센터필러의 측면을 살펴보면, Fig. 6 (b), (c) 와 같이 스프링백이 발생하며, 이로 인하여 전체 형상이 비틀리게 된다. 상단부 우측 및 하단부 좌측에서 스프링백 -4.996mm ~ +8.908mm 으로 측정되었으며, 스프링백으로 인하여 최대 14mm 정도 비틀림을 확인할 수 있었다.

2.4 시제품 제작

유한요소해석 기법의 타당성을 검증하기 위하여 2.2 절의 현장에서 제시한 조건을 이용하여 Fig. 7 과 같이 실제 센터필러의 시제품을 제작하였다.

시물레이션과 동일하게, 시제품에서도 센터필러의 상단부 및 하단부에서 주름이 발생하였으나, 시물레이션에서 관측되지 않은 오른쪽 상단부 모서리에서 파단이 발생하였다. 이는 윤활유가 현장작업자에 의해서 직접 도포됨에 따라 시물레이션과 균일성의 차이가 나며, 메쉬 조밀성의 오차에서 기인한 것으로 사료된다. 그러나, 실제 스탬핑 공정에서 발생한 주름 및 스프링백이 시물레이션과 대체로 비슷한 경향을 보이기 때문에, 상기에서 수행한 유한요소해석기법을 가지고 주름 및 스프링백을 감소시키기 위한 스탬핑 공정의 해석을 수행하였다.

3. 유한요소해석기법을 이용한 스탬핑 공정 분석

2장의 시물레이션 및 실제 스탬핑 공정에서 발생한 센터필러의 주름을 방지하기 위하여 드로우비드를 설치하였다. 또한, 직교배열표를 이용하여 스탬핑 공정의 4가지 설계인자 (블랭크 홀딩 포스, 드로우비드, 블랭크 크기 및 프레스 스트로크)가 스프링백에 미치는 영향도 분석을 위한 스탬핑 공정의 유한요소해석을 수행하였다.

3.1 주름 방지를 위한 드로우비드 설계

드로우비드는 재료에 인장력을 가하여 재료유입을 조절하는 역할을 하는데, 제품에 존재하는 주름을 제거하기 위하여 드로우비드를 삽입하며 드로우



(a) Wrinkles at the upper and lower sections



(b) Fracture at edge of the right upper section

Fig. 7 Defects of center pillar when using the conditions obtained from the actual filed

Table 3 Comparison of the amount of wrinkles depending on drawbeads

	Without drawbeads		With drawbeads	
	Max	Mean	Max	Mean
Upper section	Max	0.105mm	Max	0.035mm
	Mean	0.052mm	Mean	0.008mm
Lower section	Max	0.136mm	Mean	0.021mm
	Mean	0.061mm	Max	0.009mm

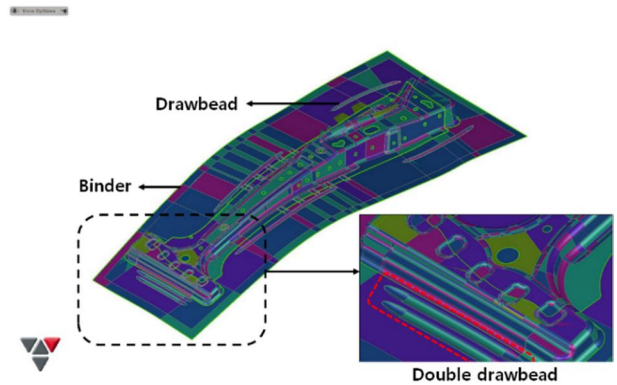


Fig. 8 Drawbeads to reduce the amounts of wrinkling

비드 형상에 따라 주름 및 스프링백 발생량이 달라진다[8]. 센터필러의 스탬핑 공정을 위하여 현장에서 제시한 최대 드로우비드 반경은 3mm 이며, 중단부와 하단부 및 많은 양의 주름이 발생한 센터필러

상단부에 Fig. 8 과 같이 2 중 원형 드로우비드를 생성하였다.

드로우비드 생성 전과 생성 후의 주름 발생량을 Table 3에 나타내었다. 드로우비드로 인하여 주름이 상단부에서 평균 0.048mm, 하단부에서 평균 0.052mm 감소하였으므로, 2중 원형 드로우비드를 설치한 상태에서 스프링백 감소를 위한 스탬핑 공정의 유한요소해석을 수행하였다. 드로우비드에 작용하는 힘은 480~ 490N/mm이며, 두께감소량은 0.12mm로 나타났다.

3.2 스프링백감소를 위한 스탬핑공정설계

직교배열표에 따른 SN비 분석을 통하여 스탬핑 공정의 설계인자(블랭크 홀딩 포스, 드로우비드, 블랭크 크기 및 프레스 스트로크)가 스프링백에 미치는 영향을 분석하였으며, 정량적 목표치(스프링백 0.5mm 이하)를 만족하기 위한 해석 모델을 선정하였다.

3.2.1 직교배열표 생성

현장의 엔지니어와의 인터뷰를 통하여 스탬핑 공정의 설계인자로 블랭크 홀딩 포스, 프레스 스트로크, 블랭크 및 패드압(Restriking공정에서 센터필러 상단에 작용하는 면압)을 선정하여 4인자 3수준의 직교배열표를 생성하였으며 이를 Table 4에 나타내었다.

3.2.2 SN비를 이용한 설계인자가 스프링백에 미치는 영향도 분석

직교배열표의 9가지 모델에 대한 센터필러 스탬핑 공정의 유한요소해석을 수행하였다. 2.3절에서 스프링백이 크게 발생한 센터필러 상하좌우 끝부분을 Fig. 9와 같이 총 4가지 영역으로 나누었고, 나누어진 각 영역에서의 최대값을 대표값으로 선정하여 Table 5에 나타내었다. 직교배열표의 모든 모델에 대하여 상단부(영역 1 및 2)가 하단부(영역 3 및 4)보다 스프링백양이 낮게 나타나는 경향을 보였다. Fig. 10은 No.4 모델에 대하여 4가지 영역에서 발생한 각 영역에서의 최대 스프링백양을 보여준다. 영역 1 및 2에서의 스프링백 최대 발생량이 각각 0.079mm 및 -0.398mm로 정량적 목표치인 0.5mm이내를 만족하지만, 영역 3 및 4에서는 최대 스프링백양이 각각 2.533mm, 1.947mm로 목표치를 만족하지 못함을 알 수 있다.

Table 4 Orthogonal array using 4 design parameters and 3 levels

	BHF	Press Stroke	Blank size	Pad pressure
Unit	Ton	mm	%	Ton
No. 1	70	750	100	80
No. 2	70	800	110	85
No. 3	70	850	120	90
No. 4	75	750	110	90
No. 5	75	800	120	80
No. 6	75	850	100	85
No. 7	80	750	120	85
No. 8	80	800	100	90
No. 9	80	850	110	80



Fig. 9 Section of the center pillar for measuring amount of the springback

Table 5 Maximum amounts of the springbacks at right and left edges of nine center pillars (unit: mm)

	Section1	Section2	Section3	Section4
No. 1	-1.072	-0.559	2.160	2.689
No. 2	0.417	-1.196	2.745	1.999
No. 3	0.503	-2.156	1.393	1.630
No. 4	0.079	-0.398	2.533	1.947
No. 5	0.633	-0.890	0.803	2.577
No. 6	-0.730	-0.782	2.595	3.470
No. 7	-1.849	-2.366	3.413	3.871
No. 8	-0.651	-0.649	1.408	4.136
No. 9	-1.540	-1.822	5.638	3.834

직교배열표에 따른 센터필러의 스탬핑 공정에 대한 유한요소해석 결과를 토대로, 상용 소프트웨어 Minitab을 이용하여 망소특성을 적용한 각 구역별 SN비 및 SN비의 합을 설계인자별로 Table 6에 나타내었고, 이를 통하여 블랭크 홀딩 포스가 스프링백에

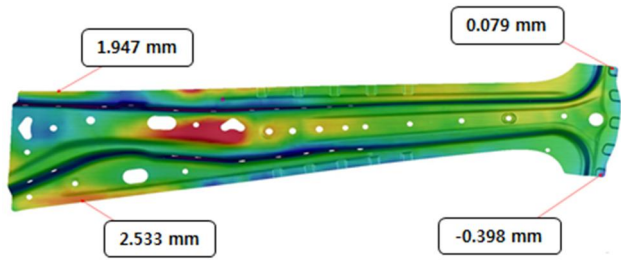


Fig.10 Maximum amount of springback occurred at each section in case of No. 4

Table 6 SN ratio of each design parameter

Section	BHF	Press Stroke	Blank size	Pad pressure
1	11.371	3.717	7.097	10.709
2	6.695	5.107	8.027	3.994
3	4.736	5.449	6.743	4.598
4	5.636	0.196	2.751	2.072
Total	28.438	14.470	24.619	21.373

가장 큰 영향을 미치며 블랭크 사이즈, 패드압 및 프레스 스트로크 순서로 나타남을 알 수 있다.

4. 스프링백 보정을 위한 리스트라이킹 (Restriking) 공정

리스트라이킹 공정 횟수를 최소화하기 위하여, 직교배열표 9가지 경우 중 스프링백이 다른 모델에 비해 가장 낮게 도출된 No.4 모델 (상단부 (영역 1 및 2)에서 정량적 목표치 만족, 하단부 (영역 3 및 4)에서 목표치 불만족)을 선정하여, Autoform의 스프링백 보정기능(Springback compensation)을 이용하여 드로잉 다이로부터 발생한 스프링백양(mm)만큼을 리스트라이킹 다이에 반영하여 스프링백을 줄여가는 과정을 진행하였고 그 최종 결과를 Fig. 11에 나타내었다[9].

4.1 스프링백 보정

스프링백을 줄여가는 3번째 과정을 나타낸 Fig. 11에 의하면 센터필러 상단부에서 발생한 스프링백양(영역 1, 2 각각 0.079mm, -0.398mm)은 정량적 목표치 내에 만족하기 때문에 센터필러 상단 단면부(section A-A)와 같이 스프링백 보정량이 최대 0.8mm인 반면, 하단부에서 발생한 스프링백양(영역 3, 4

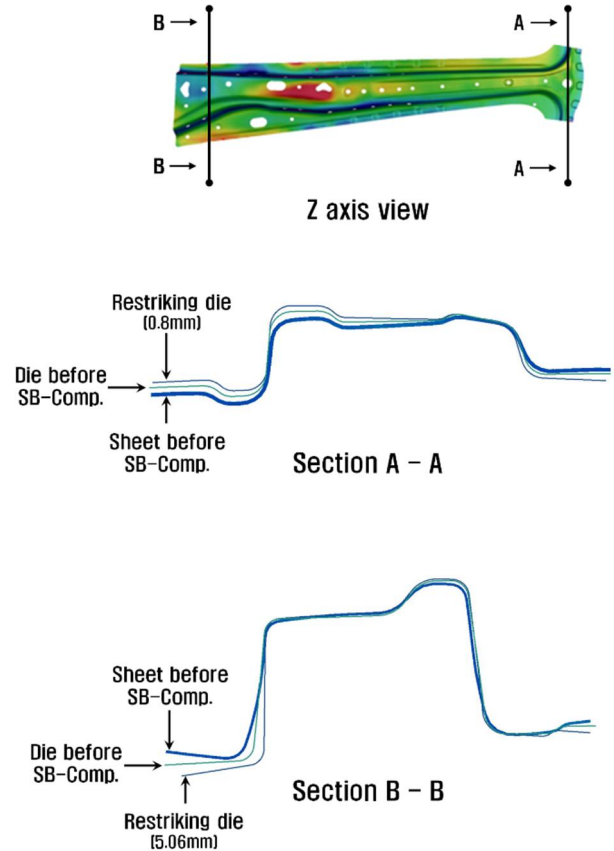


Fig.11 Modification of the die shape for restriking process at each section

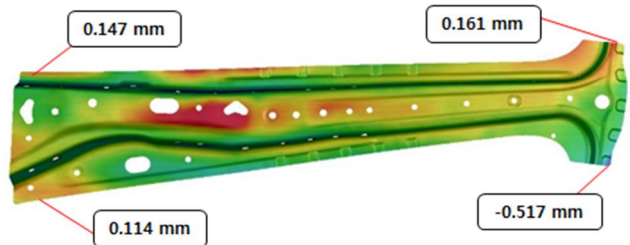


Fig.12 Maximum amounts of the springback occurred at 4 sections after the restriking process in case of No.4

각각 2.533mm, 1.947mm)은 센터필러 하단 단면부(section B-B)와 같이 스프링백 보정량을 최대 5.06mm로 크게 설정하였다.

그 결과, Fig. 12와 같이 영역 1, 2에서 최대 스프링백양이 각각 0.079mm, -0.398mm에서 0.161mm, -0.517mm로 미소 증가하였으나, 영역 3, 4에서 최대 스프링백양은 2.533mm, 1.947mm에서 0.114mm, 0.147mm로 크게 감소하였다.



Fig.13 The prototype satisfied with objective of the amount of the spring back (under 0.5mm) at each section

Table 7 Maximum amounts of the springback of the prototype at 4 sections

Section	Springback	
	Simulation	Prototype
1	0.161 mm	0.327 mm
2	- 0.517 mm	-0.471 mm
3	0.114 mm	0.005 mm
4	0.147 mm	0.098 mm

4.2 센터필러 시제품 제작

유한요소해석을 통해 도출한 센터필러의 스탬핑 공정변수값(블랭크 홀딩 포스: 75ton, 프레스 스트로크: 750mm, 블랭크 사이즈: 110% 및 패드압: 90ton)과 리스트라이킹 공정을 반영했다. 상기의 공정변수값과 리스트라이킹 공정으로 제작된 Fig. 13과 같은 시제품에 대하여 스프링백량을 측정하여 Table 7에 나타내었다. 이를 통하여 모든 영역에서 정량적 목표치인 0.5mm이하를 만족함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 780MPa 이상의 인장강도를 가지는 고장력 강관에 대하여 Autoform 을 이용한 스탬핑 공정 설계를 수행하여 스프링백양(0.5mm 이하)을 만족시키는 센터필러 제품을 제작했다.

(1) 센터필러 소재인 780MPa 고장력강(JSC780Y)의 기계적 물성치 확보를 위한 인장시험을 수행하여, 유한요소해석에 필요한 항복강도, 인장강도, 연신율 및 소성변형 비를 얻었다. 이를 통해 현장에서 사용되고 있는 설계변수를 적용한 유한요소해석 및 시제품 제작 결과 비교를 통하여 스탬핑 공정 해석 기법을 확립하였다.

(2) 센터필러의 스탬핑 공정 시, 많은 양의 주름이 발생한 센터필러 중단부, 하단부 및 상단부에 반경

이 3mm 인 2 중 원형 드로우비드를 생성하여 스탬핑 공정 해석을 수행한 결과, 상단부에서 평균 0.048mm 및 하단부에서 평균 0.052mm 주름이 감소하였다.

(3) 센터필러의 스탬핑 공정설계를 위하여 현장에서 보유하고 있는 설비 사양을 고려한 스탬핑 공정의 설계인자를 선정하였으며, 직교배열표에 따른 SN 비 분석 결과, 블랭크 홀딩 포스가 스프링백에 가장 큰 영향을 미치며, 블랭크 사이즈, 패드압 및 프레스 스트로크 순서임을 알 수 있었다.

(4) 리스트라이킹 공정 횟수를 최소화하기 위하여, 직교배열표 9 가지 경우 중 스프링백이 가장 낮게 도출된 No.4 모델을 선정하였으며, 정량적 목표를 만족하지 못하는 센터필러 하단부(영역 3 및 4)에 패드압을 가해주는 리스트라이킹 공정을 수행한 결과, 센터필러의 모든 영역에서 스프링백량의 정량적 목표치를 만족하였다.

REFERENCES

- [1] W. Y. Yang, S. Y. Lee, Y. T. Keum, J. Y. Hwang, C. S. Yoon, C. S. Shin, W. S. Cho, 2002, Proc. Kor. Soc. Automot. Eng. Symposium, Kor. Soc. Automot. Eng., Seoul, Korea, pp. 1011~1016.
- [2] M. K. Choi, H. Huh, 2012, Investigation of Springback Behavior of DP780 Steel Sheets after the U-bending Process, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 6, pp. 384~388.
- [3] H. J. Choi, Y. J. Jun, S. H. Kim, K. P. Kim, D. H. Kim, Y. H. Lim, 2011, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 315~318.
- [4] S. H. Chang, K. H. Shin, Y. J. Jeon, Y. M. Heo, 2012, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 534~537.
- [5] H. Huh, S. B. Kim, J. H. Song, J. H. Lim, 2008, Dynamic Tensile Characteristics of TRIP-type and DP-type Steel Sheets for an Auto-Body, Int. J. Mech. Sci., Vol. 50, No. 5, pp. 918~931.
- [6] H. Huh, J. H. Lim, S. H. Park, 2009, High Speed Tensile Test of Steel Sheets for the Stress-strain Curve at the Intermediate Strain Rate, Int. J. Automot. Technol., Vol. 10, No. 2, pp. 195~204.

- [7] H. B. Shim, J. K. Park, 2003, Development of Stamping Process Optimization System through the Integration of Blank Design and Nesting, Trans. Mater. Process., Vol. 12, No. 7, pp. 615~622.
- [8] K. P. Kim, S. H. Kim, D. G. Lee, K. C. Jang, 2008, Analysis-based Die Face Design for the Improvement of Surface Quality for a Heat Protect Panel of an Automobile, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 4, pp. 278~283.
- [9] B. G. Kim, I. S. Lee, Y. T. Keum, 2009, Study on the Springback Reduction of Automotive Advanced High Strength Steel Panel, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 6, pp. 488~493.