

◆ 특집 ◆ 최신 플라스틱·금속 성형 해석 기술

비선형변형경로를 고려한 가변 블랭크 홀딩력을 통한 자동차 판넬의 성형성 향상

Improvement of Formability in Automobile Panels by Variable Blank Holding Force with Consideration of Nonlinear Deformation Path

정현기¹, 장은혁², 송윤준³, 정완진^{4,✉}
Hyun Gi Jeong¹, Eun Hyuk Jang², Youn Jun Song³, and Wan Jin Chung^{4,✉}

¹ 성우하이텍 금형설계팀 (Die Design Team, Sungwoo Hightech)

² 서울과학기술대학교 대학원 제품설계금형공학과(Department of Product Design and Manufacturing Engineering, Graduate School, Seoul National University of Science and Technology)

³ 현대자동차 툴링센터 프레스금형설계팀 (Press Stamping Tool Design Team, Hyundai Motors Corporation Tooling Center)

⁴ 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

✉ Corresponding author: wjchung@seoultech.ac.kr, Tel: +82-2-970-6390

Manuscript received: 2015.8.28. / Revised: 2015.10.12. / Accepted: 2015.10.12.

In drawing sheet metal, the blank holding force is applied to prevent wrinkling of the product and to add a tensile stress to the material for the plastic deformation. Applying an inappropriate blank holding force can cause wrinkling or fracture. Therefore, it is important to determine the appropriate blank holding force. Recent developments of the servo cushion open up the possibility to reduce the possibility of fracture and wrinkling by controlling the blank holding force along the stroke. In this study, a method is presented to find the optimal variable blank holding force curve, which uses statistical analysis with consideration of the nonlinear deformation path. The optimal blank holding force curve was numerically and experimentally applied to door inner parts. Consequently, it was shown that the application of the variable blank holding force curve to door inner parts could effectively reduce the possibility of fracture and wrinkling.

KEYWORDS: Automobile panel (자동차 판넬), Variable blank holding force (가변 블랭크 홀딩력), Formability (성형성), Servo cushion (서보쿠션), Finite element analysis (유한요소해석)

1. 서론

최근 자동차 산업에서 연비와 이산화탄소 배출의 환경적 문제로 인해 차량 경량화가 이루어지고

있다. 차량 경량화를 위해 고장력 강판의 사용이 증대되고 있으나 기존의 소재를 사용했을 때보다 연신율이 떨어지기 때문에 다양하고 복잡한 디자인을 적용하는 자동차 판넬에 적용이 어렵다. 드

로잉 제품 성형 시 발생하는 문제는 크게 주름과 파단으로 나눌 수 있다. 주름과 파단에 영향을 주는 인자 중 블랭크 홀딩력(blank holding force; BHF)은 그 크기에 따라 제품에 다른 영향을 미친다.

Doege 등¹은 펀치 스트로크에 따라 블랭크 홀딩력이 가변적으로 적용되어야 한다는 기초적인 연구를 진행했다. Lin 등²은 펀치 스트로크에 따른 블랭크 홀딩력의 관계에서 성형 중 주름과 파단이 발생할 수 있는 세 가지 경우를 제시하였다. 이에 따르면 블랭크 홀딩력을 스트로크에 따라 적절하게 조절 함으로써 주름과 파단을 피할 수 있는 가능성을 보였다. Gunnarsson 등³은 자동차 외관 판넬의 성형성을 향상시키기 위해서 감소하는 블랭크 홀딩력 선도가 효과가 있음을 보였다.

가변 블랭크 홀딩력(variable blank holding force; VBHF)을 통한 성형성 향상에 관한 연구는 크게 두 가지 방법으로 나누어지고 있다. 첫 번째 방법은 페-루프 알고리즘을 이용한 방법으로 Kitayama 등⁴은 변위 센서를 이용해 소재 두께를 측정하여, 측정 두께를 변수로 하는 페-루프 알고리즘에 의해 주름과 파단을 피하는 블랭크 홀딩력 선도를 찾는 실험을 하였다. 두 번째 방법은 통계적 분석을 활용한 연구방법으로 Wang⁵과 Chengzhi⁶은 분할된 블랭크홀더의 비대칭 사각 킵 형상의 드로잉에 반응표면법을 활용한 각각의 최적 블랭크 홀딩력을 탐색하였다. 반응표면법은 여러 개의 독립변수들이 복합적으로 작용하여 반응변수에 영향을 줄 때, 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다. 또한, 정현기⁷는 통계적 경향분석을 이용하여 실 자동차 판넬의 성형성 향상에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 차승훈⁸ 등은 자동차 판넬의 성형성 향상을 위해 공정변수의 최적화에 대한 연구를 수행하였으나 블랭크 홀딩력은 일정하게 유지하였다.

기존의 연구 방법인 페-루프 알고리즘은 센서를 통한 NC쿠션의 조작으로 NC쿠션의 반응속도에 의해 즉각적인 최적의 블랭크 홀딩력을 적용하기 힘들다. 센서를 통한 즉각적인 제어가 아닌 사전에 수치적으로 선도를 도출하여 서보 쿠션에 적용함으로써 반응속도에 의한 오차를 최소화 할 수 있다. 또한 기존 연구에서는 선형 성형한계도와 소재 두께 변화만을 고려한 성형성 평가가 진행되었는데 선형 성형한계도와 소재 두께 변화만으로는 비선형 변형 경로를 포함한 성형의 경우 정확한 성형성 평가가 어렵기 때문에 이를 보완한 평가가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 비선형 경로를 고려한 통계적 분석 방법을 활용하여 자동차 판넬 성형의 최적 가변 블랭크 홀딩력 선도 도출 방법을 제시하고자 한다. 또한 실제 산업에서의 적용 가능성을 검토하기 위해 자동차용 판넬 금형에 도출된 가변 블랭크 홀딩력을 적용한 실험 및 해석을 수행하여 제시된 방법의 적용 가능성에 대하여 연구하였다.

2. 연구 방법

2.1 유한요소해석

본 연구를 수행하기 위한 소프트웨어로는 Autoform R3.1 Incremental을 사용하였다. Autoform은 비교적 계산시간이 짧아 많은 횟수의 해석을 필요로 하는 최적화 연구에 적합하다.⁹

2.2 성형성 평가 기준

성형성을 판단하는 기준으로는 여러 가지가 있다. 예를 들어 제품 파단, 주름, 스프링백, 미세면 굴곡 등 여러 가지 인자를 통해 판단할 수 있다. 한편, 제품 파단과 주름에 대한 성형성을 평가하는 기준으로는 성형한계도(forming limit diagram; FLD)를 사용한다. 성형한계도는 성형한계곡선(forming limit curve; FLC)을 기준으로 최종 변형 상태의 위치로 파단 여부를 판단한다. 성형한계곡선은 실험을 통해서 결정된 선도로 소재별로 파단 상태의 주변형률과 부변형률의 관계를 나타낸다.

성형한계도의 종류에는 변형률 기반 성형한계도인 선형 성형한계도, 응력 기반 성형한계도(FLSD),¹⁰ 비선형 성형한계도(non-linear FLD),¹¹ 유효 소성 변형률에 기반한 유효 소성 변형률 성형한계도(EPS FLD)¹²가 있다. 선형 성형한계도는 변형률을 기반으로 평가하기 때문에 직관적인 판단이 가능하다는 장점이 있지만 비선형 경로에 대한 정확성이 떨어진다. 응력기반 성형한계도는 변형률이 아닌 응력에 대한 성형성 평가를 하기 때문에 직관적인 판단이 어려운 단점이 있으며, 유효 소성 변형률 성형한계도는 정확도가 우수하나 데이터 변환 작업이 필요하며 아직 활용이 가능한 프로그램에 제약이 있다. 비선형 성형한계도의 경우 응력기반 성형한계도를 바탕으로 응력값을 변형률값으로 변환하였기 때문에 비선형 경로를 예측할 수 있고 변형률 기반의 한 개의 성형한계곡선으로 직관적인 성형성 판단이 가능하여 활용이 편리하다.

따라서 본 연구에서는 비선형 성형한계도를 사용해 비선형 변형 경로를 고려하여 성형성을 평가한다. 성형성을 수치적인 값으로 표현하기 위한 방법으로 식(1)과 같이 정의된 최대 성형성 지수(maximum failure quotient, γ_{max})를 사용한다. 최대 성형성 지수는 같은 주변형률에서 성형한계곡선상의 주변형률과 최종 변형 상태의 주변형률 간의 값의 비율로써 표현된다. 최대 성형성 지수의 값이 1 이상을 나타내면 파단으로 판정한다. 주름 판정을 변형 상태만으로 판정하기는 곤란하나 근사적으로 초기 소재 두께보다 두께가 일정 수치 이상으로 증가할 시 주름 발생의 가능성이 있다고 판단한다.

$$\gamma_{max} = \text{Max}(\epsilon_1 / \epsilon_{1,FLC}) \quad (1)$$

2.3 통계분석을 이용한 VBHF 선도 도출 과정

Autoform R3.1 Incremental 은 통계 분석 프로그램 모듈인 Autoform Sigma 모듈을 탑재하고 있다. Sigma 모듈은 통계학적 기술을 포함한 소프트웨어로, 이를 이용하여 다양한 설계 인자를 쉽게 정의할 수 있으며, 다수의 시뮬레이션을 자동으로 생성할 수 있다. 설정한 인자의 수준은 무작위로 생성되어 각 설계 인자의 영향도와 민감도를 분석할 수 있다. 가변 블랭크 홀딩력선도 도출 과정은 설계 인자들의 상관관계를 분석하는 설계과정(design process)과 설계과정으로부터 인자들의 상관관계를 파악 하여 목표값에 도달하게 하는 최적의 인자수준을 찾는 최적화과정(optimization process)으로 나뉜다. Sigma 모듈의 최적화 과정은 설계 과정보다 더 많은 해석 횟수를 필요로 하며 최적화의 목표값은 선형 성형한계도 결과로 한정되는 프로그램상의 제한이 따른다.¹³ 본 연구에서는 비선형 변형 경로를 고려할 수 있는 비선형 성형한계도를 사용한다. 따라서 설계과정은 상관관계분석을 활용하지만 최적화 과정은 Sigma 모듈을 사용하지 않고 최적조건의 탐색을 경험적 판단에 의하여 수행한다.

본 연구에서는 가변 블랭크 홀딩력을 최적화하기 위해 Sigma모듈의 설계 과정을 통한 상관관계 분석을 바탕으로 가변 블랭크 홀딩력 선도의 개형을 파악 후 최적 조건을 찾기 위해 인자수준을 조정하며 반복적인 해석을 진행한다. Kitayama 등¹⁴이 제시한 방법을 활용하여, 스트로크를 일정한 간격으로 분할한 뒤 인자로 지정하여 최솟값과 최댓값의 범위를 정하고, 최대 성형성 지수와 소재 두께를 반응변수로 설정한다.

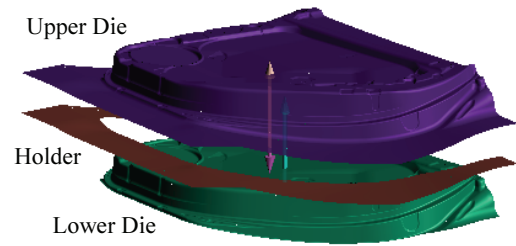


Fig. 1 Door inner 3D model tool position



Fig. 2 Door inner blank outline

3. 연구 결과

3.1 자동차문 내측 판넬 드로잉

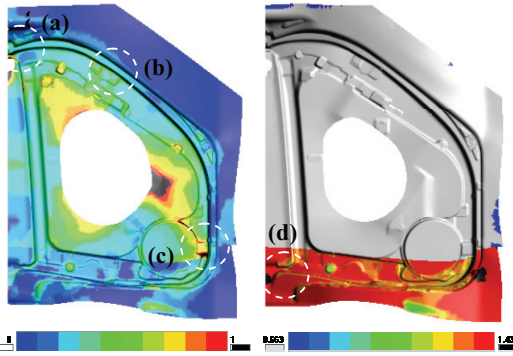
자동차문 내측 판넬(Door inner) 모델은 3차원 shell 모델로 해석을 수행하며, 소재는 SPCUD 0.65t와 같은 소재 1.4t의 맞춤형 재단 용접 블랭크(tailor-welded blank)를 사용하였다. SPCUD는 냉간압연강판으로 성형성이 우수하며 자동차용 외판에 주로 사용된다. 응력-변형률 관계는 Swift 식을 이용해 식(2)와 같이 표현하였다.

$$\bar{\sigma} = k(\epsilon_0 + \bar{\epsilon}_p)^n \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

Figs. 1과 2에 자동차문 내측 판넬 3차원 모델과 금형 및 소재 위치를 나타냈으며, 소재의 물성치는 Table 1과 같다. 판재 변형에 대한 소재의 면방향 성질의 영향이 크지 않고, 해석 시간 단축을 고려해 수직이방성으로 가정하였고 수직이방성계수 1.91을 사용하였다. 성형 스트로크는 180mm이며, 고정 블랭크 홀딩력(constant blank holding force; CBHF)는 1/2 대칭 모델임을 고려해 100ton을 적용하였다.

Table 1 Material properties of SPCUD

Hardening modulus(K, MPa)	566.0
Offset strain(ϵ_0)	0.0123
Strain hardening exponent(n)	0.237
Lankford value of 0°	2.169
Lankford value of 45°	1.641
Lankford value of 90°	2.187



(a) Maximum failure quotient (b) Thickness
 Fig. 3 (a) Maximum failure quotient results and critical sections (b) Thickness results and critical section

3.2 고정 블랭크 홀딩력 적용 결과

Fig. 3은 자동차문 내측 판넬의 최대 성형성 지수와 소재 두께를 나타낸다. 제품으로 사용될 부위의 최대 성형성 지수값이 큰 영역 3곳과 소재 두께가 증가한 영역 1곳을 지정하였다. 최대 성형성 지수가 가장 큰 영역은 평면 변형률(plane strain) 변형 모드로 파단이 발생하였다. 가장 최대 성형성 지수값이 큰 영역은 (a)영역으로 값은 1.16이다. 주름 발생 예상 부위는 소재 용접 부위와 원형 코너 부위이다. 두께 증가가 가장 큰 영역은 (d)영역으로 값은 1.45mm로 약 3.5% 증가하였다.

3.3 최적 가변 블랭크 홀딩력 선도 탐색

180mm의 성형 스트로크를 6개로 균등 분할하여 sigma 모듈을 이용한 통계 분석을 실시하였다. 6개의 스트로크 스텝에서 각각의 블랭크 홀딩력이 설계 변수로 적용되었다. Fig. 4와 같이 블랭크 홀딩력의 최대, 최소 범위는 0ton에서 200ton으로 설정하였다. 해석 횟수는 130회가 수행되었다.

각 영역별 블랭크 홀딩력 변화에 대한 최대 성형성 지수와 소재 두께 변화의 산점도를 Figs. 5와 6에 도시하였다. 산점도로부터 영역별로 성형성에 영향을 미치는 변수들의 영향을 파악할 수 있으며

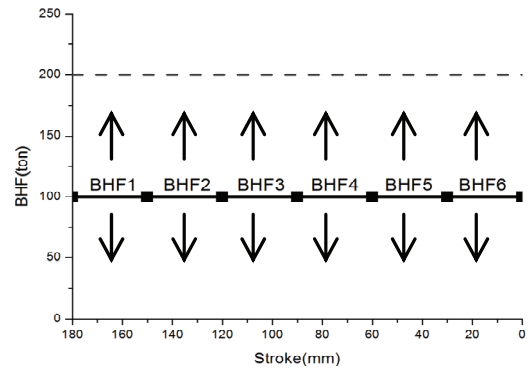


Fig. 4 Design variables

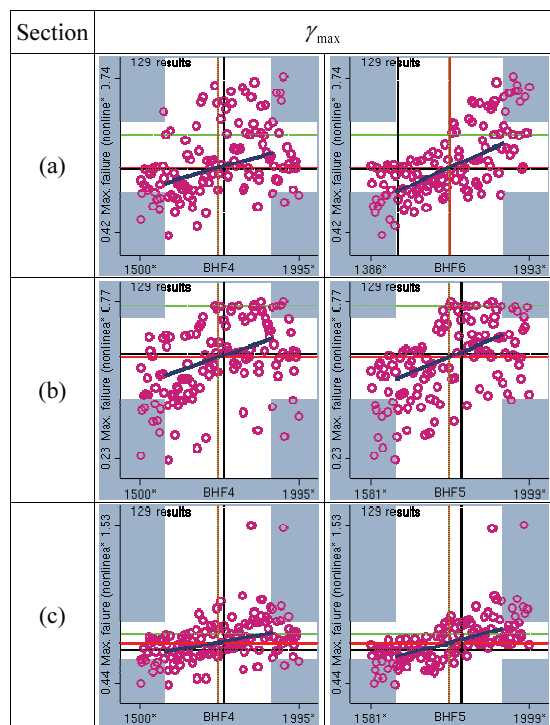


Fig. 5 Scatter diagram of γ_{max} and BHF

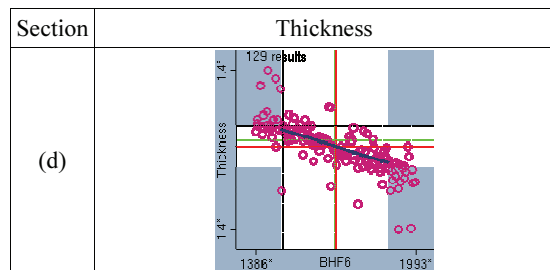


Fig. 6 Scatter diagram of thickness and BHF

Table 2 Result of statistical analysis

	Stroke (mm)	Section	Fracture prevention	Wrinkling prevention
BHF4	90~60	a	▽	-
		b	▽	-
		c	▽	-
		d	-	-
BHF5	60~30	a	▽	-
		b	▽	-
		c	▼	△
		d	-	-
BHF6	30~0	a	▽	△
		b	-	-
		c	-	-
		d	▽	▲

▼: Strongly decreasing BHF ▲: Strongly increasing BHF
 ▽: Slightly decreasing BHF △: Slightly increasing BHF

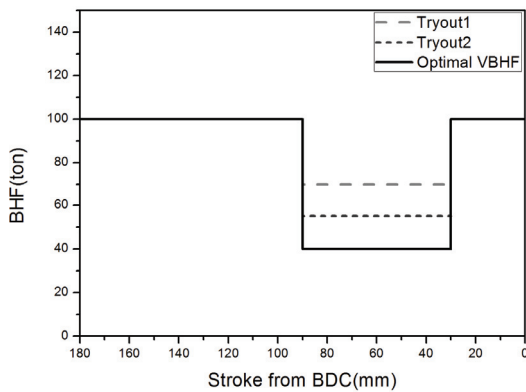


Fig. 7 VBHF trajectory of door inner

도출된 회귀식은 영향의 대소 정도를 나타낼 수 있다.

산점도 결과를 바탕으로 영역별 블랭크 홀딩력에 의한 영향도를 Table 2에 나타내었다. 분석 결과 주름에 의한 영향보다 파단에 의한 영향이 더 커 파단 방지에 초점을 두어 블랭크 홀딩력을 조절하였다. 블랭크 홀딩력 4번, 5번 구간은 블랭크 홀딩력을 낮추어 파단과 주름을 방지할 수 있다. 블랭크 홀딩력 4번, 5번 구간의 블랭크 홀딩력을 70ton, 55ton, 블랭크 홀더가 들리지 않는 최소 블랭크 홀딩력인 40ton을 적용하여 최적 조건을 탐색하였다. 각각의 가변 블랭크 홀딩력 선도는 Fig. 7에 도시하였다. 블랭크 홀딩력 6번 구간은 파단 방지를 위하여 블랭크 홀딩력을 낮춰야 하지만 주름 발생 가능성이 있으므로 초기 적용된 일정한

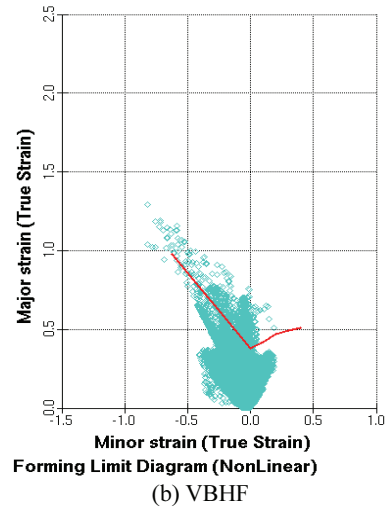
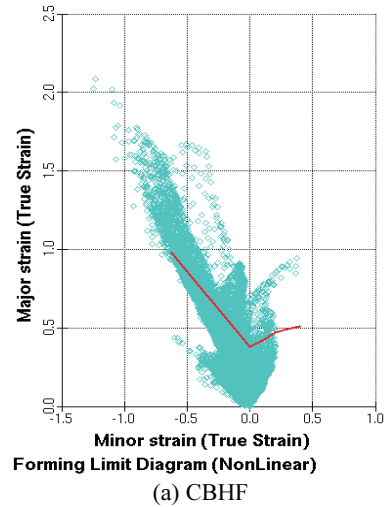


Fig. 8 Comparison of non-linear FLD diagrams; (a) Result of CBHF (b) Result of VBHF

블랭크 홀딩력인 100ton을 유지하였다. Tryout 1과 Tryout 2의 경우 a영역에서 최대 성형성 지수값이 각각 1.09와 1.03으로 파단이 발생하여 최적 조건으로 40ton을 적용하였다. 따라서 최적의 가변 블랭크 홀딩력 선도는 성형 완료 전 90mm 에서 40ton으로 낮아진 뒤 성형 완료 전 30mm 에서 초기 블랭크 홀딩력으로 다시 증가하는 패턴을 보이고 있다.

3.4 결과 비교

고정 블랭크 홀딩력과 가변 블랭크 홀딩력의 비선형 성형한계도 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 가

Table 3 Comparison of γ_{max}

	γ_{max} (max. failure)		Simulation improvement
	CBHF	VBHF	
a	1.16	0.96	17%
b	1.06	0.85	20%
c	1.03	0.78	24%

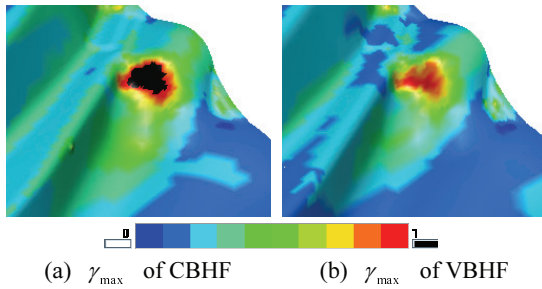


Fig. 9 Comparison of γ_{max} at Section a

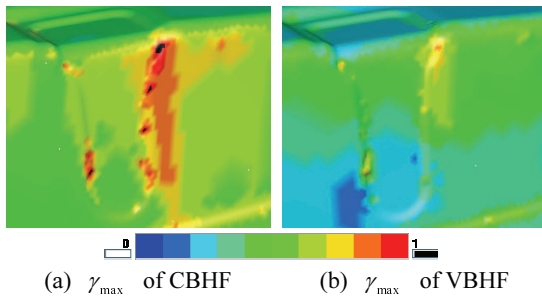


Fig. 10 Comparison of γ_{max} at Section b

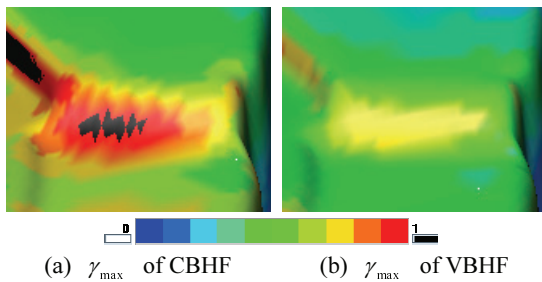


Fig. 11 Comparison of γ_{max} at Section c

변 블랭크 홀딩력 적용 시에 전체적인 변형량이 감소하였으며, 특히 평면 변형에 의한 파단이 감소하였다. 성형한계곡선을 초과한 부위는 트리밍하여 제품으로 사용되지 않기 때문에 성형성 결과는 양호하다.

Table 3과 Figs. 9-11에 영역별 고정 블랭크 홀딩

Table 4 Comparison of thickness

	Thickness		Simulation improvement
	CBHF	VBHF	
d	1.44	1.45	-0.7%

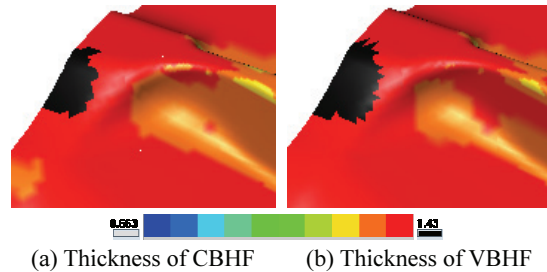


Fig. 12 Comparison of thickness at Section d

력과 가변 블랭크 홀딩력의 최대 성형성 지수 결과를 도시하였다. (a), (b), (c)영역의 경우 가변 블랭크 홀딩력 적용 시 모두 최대 성형성 지수가 감소하였으며 최대 성형성 지수가 1.0 이하로 감소하여 파단 위험이 없는 수준으로 개선되었다. 가장 큰 향상을 나타낸 영역은 (c)영역으로 약 24%의 향상을 보였다. 가장 파단 위험이 높은 (a)영역의 경우 최대 성형성 지수값이 약 17% 감소해 파단 위험을 줄였다. Table 4와 Fig. 12에 소재 두께 결과를 도시하였다. 전체적으로 두께 증가량이 크지 않으므로 주름 발생 위험 증가는 크지 않았으며, 파단 방지에 초점을 맞추어 가변 블랭크 홀딩력 선도를 적용하였기 때문에 (d)영역의 경우 고정 블랭크 홀딩력 적용 시 보다 소재 두께가 약 0.7% 증가하였다.

4. 실제 사례 적용

동일한 자동차문 내측 판넬 모델에 대해 3.3에서 구한 가변 블랭크 홀딩력 선도 패턴을 적용하여 서보프레스에서 실험을 수행하였으며 이에 따른 해석 결과와 비교하였다. 실험에 사용된 금형은 해석모델과는 차이가 있어 파단과 주름을 회피하기 위하여 최소 블랭크 홀딩력을 60ton으로 상향 조정하였고 블랭크 홀딩력 감소 시점을 스트로크 90mm에서 80mm로 조정하였다.

Case 1은 고정 블랭크 홀딩력을 적용한 결과이며 Case 2는 블랭크 홀딩력 감소 후 증가 패턴으로 성형 완료 70mm 전 블랭크 홀딩력을 60%로 감소하고 성형 완료 30mm 전부터 고정 블랭크 홀딩력

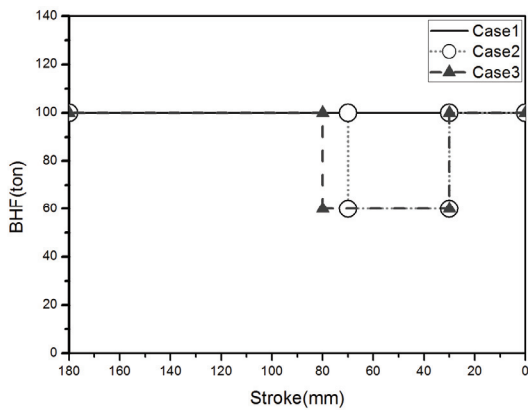


Fig. 13 VBHF trajectories

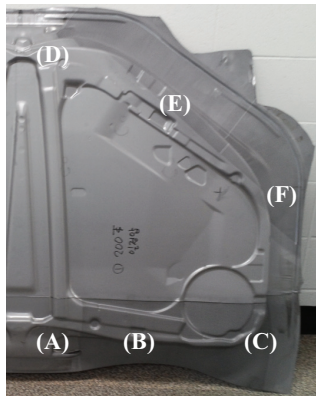


Fig. 14 Experiment part and measured section

과 동일한 블랭크 홀딩력으로 증가시켰다. Case 3은 Case 2와 동일하나 블랭크 홀딩력 감소 시점을 성형 완료 70mm 전에서 80mm 전으로 앞당겼다. 각 case별 가변 블랭크 홀딩력 선도는 Fig. 13에 도시하였다. Fig. 14에 실험에 사용된 자동차문 내측 판넬과 두께감소를 측정 부위를 나타내었다.

두께감소율의 실험 결과와 해석 결과를 Fig. 15과 Fig. 16에 나타내었다. 실험의 경우 Case 1에 비해 Case 3의 두께감소율 결과 평균적으로 약 13.2% 감소되었고, 해석의 경우 평균적으로 약 19.0% 감소되었다. 실험과 해석 모두 Case 1에 비해서 Case 2와 Case 3의 두께감소율이 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉, 가변 블랭크 홀딩력 적용 결과 고정 블랭크 홀딩력 적용 시 보다 두께감소가 낮아 파단이 일어날 가능성이 낮아졌음을 보여준다. 또한 통계적 분석 방법으로 도출한 가변 블랭크 홀딩력 선도의 BHF 감소 시점이 성형 완료

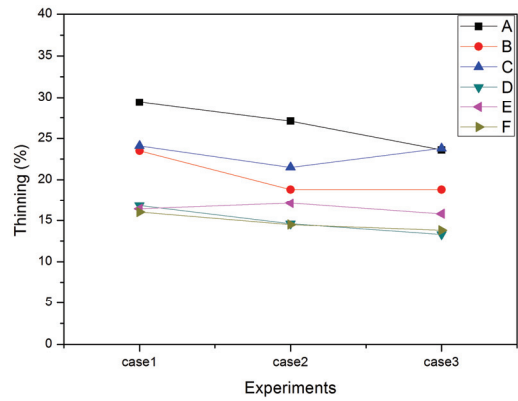


Fig. 15 Experiment results of thinning

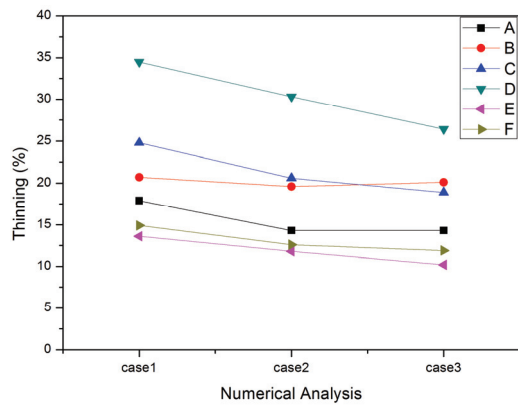


Fig. 16 Simulation results of thinning

전 90mm인 점을 고려하면, BHF 감소 시점이 90mm에 가까운 Case 3이 Case 2보다 두께감소율이 낮은 것은 통계적 분석 결과와 실험 결과가 같은 경향을 보이고 있음을 나타낸다.

실험에 사용된 금형은 양산에 사용되기까지 수차례 현장 수정을 거쳤으므로 유한요소모델링에 사용된 초기 모델 데이터와 일정 부분 차이가 있다. 이로 인해 A영역과 D영역에서 값의 차이가 발생하지만 전체적으로 성형성이 개선되는 같은 경향을 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 자동차 판넬의 성형성 향상을 위해 비선형 변형 경로를 고려한 통계분석 방법을 활용하여 최적 가변 블랭크 홀딩력선도의 도출 방법을 탐색하였다. 자동차 판넬인 자동차문 내측

판넬 모델에 대해 최적 가변 블랭크 홀딩력 선도를 도출하였고, 고정 블랭크 홀딩력 선도 적용과 최적 가변 블랭크 홀딩력 선도 적용 결과를 수치적으로 비교하여 가변 블랭크 홀딩력 선도가 성형성 증가에 효과가 있음을 확인하였다. 또한 최적 가변 블랭크 홀딩력 선도를 적용한 실험을 수행하고 해석과 비교한 결과 두께감소율이 동일하게 감소하여 성형성 개선 효과를 검증하였다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Doege, E. and Sommer, N., "Optimization of the Blank-Holder Force on Deep Drawing of Rectangular Parts," *Stahl Eisen*, Vol. 103, No. 3, pp. 139-142, 1983.
2. Zhong-Qin, L., Wu-Rong, W., and Guan-Long, C., "A New Strategy to Optimize Variable Blank Holder Force towards Improving the Forming Limits of Aluminum Sheet Metal Forming," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 183, No. 2, pp. 339-346, 2007.
3. Gunnarsson, L. and Schedin, E., "Improving the Properties of Exterior Body Panels in Automobiles Using Variable Blank Holder Force," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 114, No. 2, pp. 168-173, 2001.
4. Kitayama, S., Hamano, S., Yamazaki, K., Kubo, T., Nishikawa, H., et al., "A Closed-Loop Type Algorithm for Determination of Variable Blank Holder Force Trajectory and Its Application to Square Cup Deep Drawing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 51, No. 5-8, pp. 507-517, 2010.
5. Wang, L. and Lee, T., "Controlled Strain Path Forming Process with Space Variant Blank Holder Force Using RSM Method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, No. 2, pp. 447-455, 2005.
6. Chengzhi, S., Guanlong, C., and Zhongqin, L., "Determining the Optimum Variable Blank-Holder Forces Using Adaptive Response Surface Methodology (ARSM)," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, No. 1-2, pp. 23-29, 2005.
7. Jeong, H. G., "Numerical Study on the Improvement of Formability of Automobile Panel by Blank Holding Force Control," M.Sc. Thesis, Department of Product Design and Manufacturing and Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 2015.
8. Cha, S. H., Lee, C. J., Lee, S. K., Kim, B. H., Ko, D. C., et al., "An Effective Design Method of Stamping Process by Feasible Formability Diagram," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 26, No. 11, pp. 108-115, 2009.
9. Kubli, W. and Reissner, J., "Optimization of Sheet-Metal Forming Processes Using the Special-Purpose Program Autoform," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 50, No. 1, pp. 292-305, 1995.
10. Stoughton, T. B. and Zhu, X., "Review of Theoretical Models of the Strain-Based FLD and Their Relevance to the Stress-Based FLD," *International Journal of Plasticity*, Vol. 20, No. 8, pp. 1463-1486, 2004.
11. Kubli, W. and Sester, M., "Forming Limit Strain Analysis," US Patent, No. 7870792 B2, 2008.
12. Stoughton, T. B. and Yoon, J. W., "Path Independent Forming Limits in Strain and Stress Spaces," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 49, No. 25, pp. 3616-3625, 2012.
13. AutoForm Engineering GmbH, "AutoForm R3.1 Incremental Manual," 2015.
14. Kitayama, S., Kita, K., and Yamazaki, K., "Optimization of Variable Blank Holder Force Trajectory via Sequential Approximate Optimization with Radial Basis Function Network," *Proc. of the 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2013.