

고강도강 프론트 사이드멤버의 응력분포 최적화를 통한 스프링백 저감

송정환¹, 김세호², 허 훈^{1#}, 박성호³

Stress-Based Springback Reduction of an AHSS Front Side Member

J. H. Song, S. H. Kim, H. Huh, S. H. Park

Abstract

Optimization is carried out to determine process parameters which reduce the amount of springback and improve shape accuracy of a deep drawn product in sheet metal forming process. The study uses the amount of stress deviation along the thickness direction in the deep drawn product as an indicator of springback instead of springback simulation. The scheme incorporates with an explicit elasto-plastic finite element method for calculation of the final shape and the stress deviation. The optimization method adopts the response surface method in order to seek for the optimum condition of the draw-bead force. The present scheme is applied to the design of draw-bead force in a front side member formed with advanced high strength steel (AHSS) sheets of DP60. Results show that design of process parameter is well performed to decrease the stress deviation through the thickness and to reduce the amount of springback. The present analysis provides a guideline in a design stage for controlling the springback based on the finite element simulation of the complicated parts.

Key Words : Springback, Stress Deviation, Response Surface Method, Optimization

1. 서론

프레스에 의한 판재의 성형가공은 굽힘, 인장, 드로잉 등의 복합적인 변형을 받으며, 재료의 성형성, 이방성과 같은 기계적 특성, 금형의 기하학적 형상 및 금형-재료간의 마찰특성, 블랭크홀딩력, 드로비드력과 같은 공정변수에 의하여 주름, 파단, 스프링백 등으로 대표되는 성형 불량이나 나타난다. 이중 스프링백은 성형 후 판재에서 금형이 제거될 때 정적 평형상태를 유지하기 위하여 판재 내부의 응력이 재분포되면서 발생하는 변형형상으로, 제품의 치수 정밀도를 떨어뜨리게 된다.

판재의 스프링백과 관련하여 과거에는 단순 굽힘에 관한 실험에 바탕을 두어 연구되었으나 최근에는 금형수정에 소요되는 시간과 비용을 절감하기 위하여 유한요소 해석을 통하여 스프링백을 예측하고 설계변경에 반영하고 있다[1].

최근까지 자동차 업계에서는 판재의 성형성 등 기술적인 문제로 인하여 강도는 떨어지더라도 연성과 성형성이 우수한 냉연강판을 선호하였다. 그러나, 전세계적인 환경문제의 대두로 인한 연비효율의 개선과 배기가스 등의 문제 및 충돌안전 성능 향상의 요구로 인하여 경량화를 위한 고강도 강판의 적용에 대한 요구가 계속 증가하고 있다.

1. 홍길동의 소속(바탕, 7pt)

2. 김길동의 소속

교신저자: 이길동의 소속, E-mail:

고강도 강판의 여러 가지 장점에도 불구하고 강판의 강도가 높아질수록 성형성의 저하와 스프링백량의 증가로 치수 정밀도의 제어가 어려워지는 문제점이 있다[2,3].

이러한 고강도 강판의 탄성복원 후 형상 동결성을 확보하기 위하여 대표적으로 두 가지 방법이 사용될 수 있다. 첫째로 스프링백 양을 예측하여 재설계 시 금형의 보정으로 보상하는 방법이다[4,5]. 둘째로 박판 내부의 상태변수를 최적화시켜 탄성 회복을 억제하는 방법이다[6-9]. 스프링백 저감을 위한 공정변수의 최적화에서는 스프링백 해석 후 얻어지는 스프링백 양을 목적함수로 적용하여 이를 최소화하는 공정변수 최적화를 수행하기 때문에 목적함수의 정확도가 매우 중요하다. 그러나, 고강도 강판의 스프링백 해석은 사용되는 항복함수, 요소, 접촉 조건 등에 따라 해의 정확도가 좌우되며[10,11], 형상이 복잡한 부재의 스프링백 해석은 해의 수렴성에도 문제가 발생하여 실제 현상의 모사에 대한 신뢰도를 떨어뜨릴 수 있다.

본 논문에서는 설계 초기에 스프링백을 보정하기 위한 기초 설계로써 박판 부재의 스프링백 저감을 위한 공정변수의 최적화를 수행하였다. 일반적으로 스프링백 저감을 위한 최적화의 목적함수를 구성하기 위하여 스프링백 해석 후의 형상변화를 상태변수로 사용하게 된다. 본 논문에서는 기존의 최적화와는 달리 부가적인 스프링백 해석을 수행하지 않고, 성형해석에서 얻어지는 판재의 두께방향 응력편차를 스프링백 판단의 기준으로 이용하여 두께방향의 응력편차를 최소화하는 설계변수를 결정하도록 하였다. 최적화 수행은 강건 설계 기법으로 널리 알려져 있는 반응표면법(response surface method)을 이용하였으며, 성형공정에서의 파단을 방지하기 위하여 성형한계도의 파단선을 제한조건으로 부과하였다. 두께방향의 응력제어를 통하여 스프링백을 저감하는 방법을 60kg급의 고강도 강판인 DP60이 사용된 차량용 프론트 사이드멤버(front side member)에 대하여 초기 설계단계에서의 스프링백 저감에 적용하였다. 설계변수로 드로비드의 상당 구속력을 선정하였으며, 반응표면법을 이용한 최적화를 수행하여 응력편차의 감소를 통한 스프링백 저감을 확인하였다.

2. 스프링백 저감을 위한 수식화

일반적으로 설계변수 \mathbf{p} 에 대한 최적화 과정은 다음과 같은 목적함수의 최소화로 표현되며, 공정변수를 계산하기 위한 목적함수는 설계자의 요구에 따라 결정된다[12].

$$\text{minimize } \Phi(\mathbf{s}(\mathbf{p}) - \tilde{\mathbf{s}}) \quad (1a)$$

$$\text{subject to } g_i(\mathbf{p}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1b)$$

여기서, \mathbf{s} 와 $\tilde{\mathbf{s}}$ 는 각각 해석에서 구한 상태변수와 설계자에 의하여 요구되는 상태변수이며, Φ 와 g_i 는 목적함수와 제한조건이다.

굽힘이 지배적인 공정은 성형이 완료되면 해중이 될 때까지 두께방향의 응력편차가 재분포되어 탄성회복에 의한 스프링백 현상이 발생한다. 성형 과정에서 두께방향의 응력편차에 기인하여 스프링백이 발생하기 때문에 본 논문에서는 이를 감소시킴으로써 스프링백 양을 줄이는 방안을 최적화 기법을 이용하여 구현하였다. 최적화를 위하여 다음의 식(2a)와 같이 쉘요소의 두께방향 적분점에 대하여 응력의 편차를 줄이도록 하였으며, 식(2b)와 같이 제한조건을 주변형틀이 성형한계도의 파단선을 넘지 않도록 부과하였다.

$$\text{minimize } \Phi = \int_{\Omega_{opt}} (\sigma_{11} - \tilde{\sigma}_{11})^2 d\Omega \quad (2a)$$

$$\text{subject to } g = (\varepsilon_1)_{\max} - \varepsilon_{1c} \leq 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2b)$$

$$\tilde{\sigma}_{11} = \frac{\int_{\Omega_\varepsilon} \sigma_{11} d\tilde{z}}{\int_{\Omega_\varepsilon} d\tilde{z}} \quad (3)$$

여기서, σ_{11} 과 $\tilde{\sigma}_{11}$ 는 요소 좌표계에서 블랭크 길이방향의 응력성분과 목적값이며, ε_1 과 ε_{1c} 는 각각 대수 주변형틀과 성형한계도상의 파단선을 의미한다. Ω_{opt} 는 블랭크 전영역으로 지정하였다. 식(2a)의 목적값 $\tilde{\sigma}_{11}$ 는 식(3)으로 정의하였으며, 이는 두께방향 적분점의 평균값을 의미한다.

식(2)로 표현된 제한 최적화 수식으로부터 최적의 해를 구하기 위한 방법으로 설계 민감도를 얻기 어려운 경우나 최적화 과정에서 국부 최소해

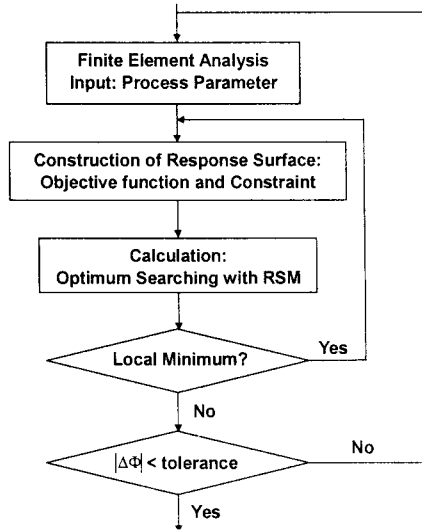


Fig. 1 Schematic diagram of the optimization procedure with the response surface method

로 수립하는 문제에 대하여 우수한 성능을 보이는 반응표면법을 사용하였다. 반응표면법은 설계 공간상의 여러 실험점 \mathbf{p} 에서 계산된 결과로 시스템의 반응 $\Phi(\mathbf{p})$ 를 식(4)의 근사 모델 $\Phi_a(\mathbf{p})$ 로 근사화하고 이로부터 최적치를 탐색하는 방법이다[13].

$$\Phi_a(\mathbf{p}) = \sum_{i=0}^L a_i \Psi_i \quad (4)$$

여기서, L 은 기저함수의 개수이고 Ψ_i 는 근사함수를 구성하는 기저함수이다. 위 식에서 상수 a_i 는 최소자승법을 이용하여 식(5)와 같이 구해진다.

$$\sum_{i=0}^L [\Phi(p_i) - \Phi_a(p_i)]^2 = \sum_{i=0}^L [\Phi(p_i) - a_i \Psi_i]^2 \quad (5)$$

유한요소해석과 반응표면법을 이용하여 최적의 공정변수를 결정하는 과정을 Fig. 1에 도시하였다. 먼저 주어진 공정변수에 대하여 유한요소해석을 수행하고 응력편차 및 주변형률 분포를 계산한다. 유한요소 해석의 결과로부터 목적함수와 구속조건에 대한 반응표면을 계산하고 이를 이용하여 최적의 공정변수를 찾는 탐색을 수행한다. 여기서 목적함수의 변화가 충분히 작으면 수렴으로 판단하여 탐색을 중지하며, 그렇지 않을 경우 실험계획법에 따라 공정변수를 갱신하고 위의 과

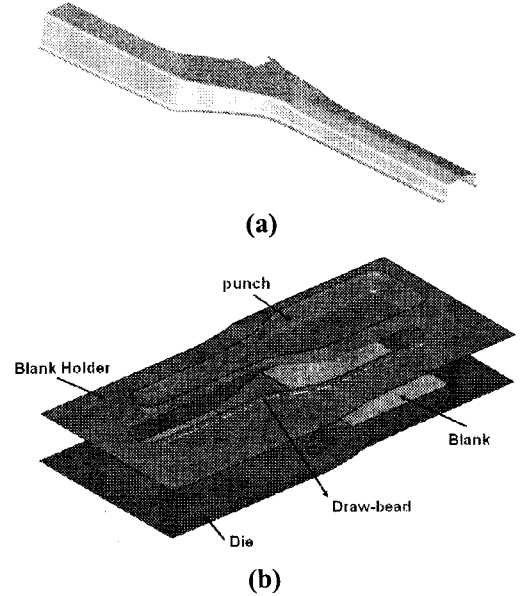


Fig. 2 Description of the outer panel in a front side member: (a) geometric model; (b) Initial setting of tools for the numerical analysis

정을 반복한다. 유한요소 해석은 LS-DYNA3D[14]를 이용하였으며, 최적화 과정은 HyperStudy[15]를 사용하여 반응표면을 구성하고 최적화를 수행하였다.

3. 응력분포 최적화를 통한 스프링백 저감

60kg급의 고강도 강판 DP60 이 사용된 프런트사이드멤버 외판의 스프링백 저감에 적용하였다. 프런트사이드멤버 외판의 형상은 Fig. 2(a)와 같으며, 고강도 강판은 높은 항복강도 및 인장강도로 인하여 성형 후 탄성복원이 많이 일어나 제품의 형상 동결성을 확보하기 어려운 문제점이 있다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 드로비드의 구속력을 설계변수로 선정, 스프링백 저감을 위한 최적화를 수행하였다.

성형해석에서 드로비드는 Fig. 2(b)와 같이 블랭크홀더에 선으로 표현되는 등가 드로비드를 사용하여 해석을 수행하였다. 판재는 두께 2.5mm, 유동응력 곡선은 $\bar{\sigma} = 1023.7(\bar{\epsilon}^n + 0.00126)^{0.16}$ MPa로 표현된다. 성형과정에서 750kN의 블랭크홀딩력을 부가하였으며, 판재와 금형사이의 마찰계수는 0.15로 가정하였다.

외판의 형상변화를 고려하여 총 8개의 설계변

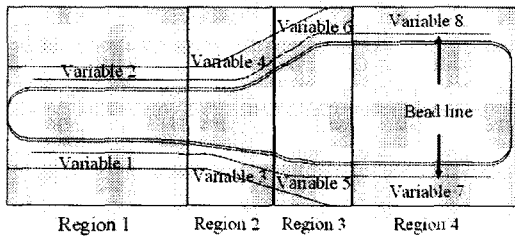
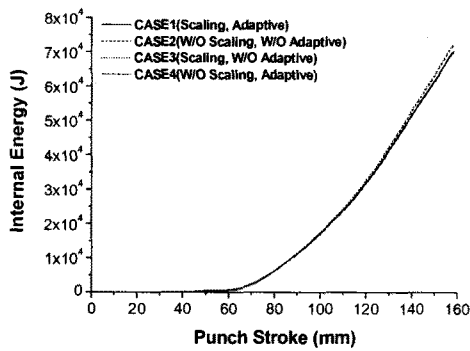
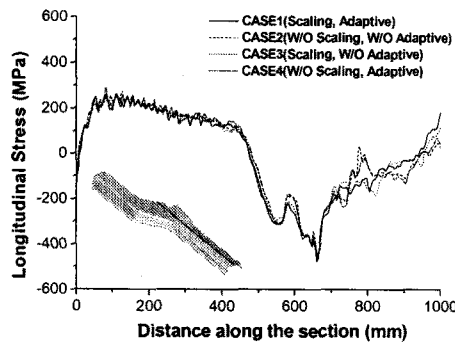


Fig. 3 Selection of design variable and design region for the optimization of draw-bead force



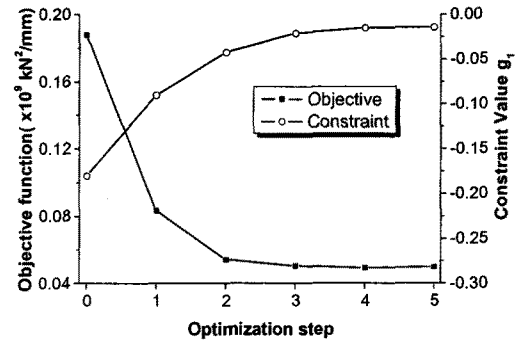
(a)



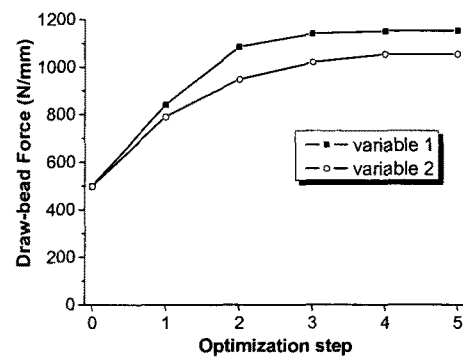
(b)

Fig. 4 Effect of the mass scaling and adaptive mesh: (a) internal energy; (b) stress distribution

수를 선정하였으며, 설계변수의 위치에 따라 Fig. 3에 도시한 총 4개의 설계영역으로 나누었다. 최적화 과정을 단순하게 하기 위하여 각 설계영역에 대하여 해당하는 설계변수를 제외한 다른 변수의 영향은 작다고 가정하고 각 영역에서 두 개의 주 설계변수에 대한 최적화를 수행하였다. 최적화 과정에서 500 N/mm의 드로비드 구속력 분포를 초기 추측치로 이용하였으며, 실험계획법상의 요인설계법으로 설계점을 결정하였다. 반응



(a)



(b)

Fig. 5 Variation of variables during the optimization process in the design region 1: (a) objective function and constraint; (b) design variable

표면법을 이용하여 근사함수를 구성하는 데 있어서 기저함수의 선택은 근사의 정확도에 상당한 영향을 미치게 되는데, 본 논문에서는 전체 탐색의 경우에는 선형 기저함수를 이용하였고, 국부탐색의 경우에는 이차 기저함수를 이용하여 반응표면을 구성하였다.

최적화 과정에서 반복적인 해석을 수행하기 때문에 본 논문에서는 해석시간을 줄이기 위하여 질량보정을 하였으며, 변형형상의 정밀한 모사를 위하여 적응형 격자를 사용하였다. 이에 따른 해석의 신뢰성을 평가하기 위하여 성형과정에서 내부에너지의 변화와 성형 후 응력분포를 Fig. 4에 비교하여 도시하였다. 질량보정 및 적응형 격자를 사용한 경우에 변형과정에서 판재 내부 에너지의 변화가 1% 이내이고 부재 중앙부 단면에서의 응력을 비교한 결과 큰 차이를 보이지 않아 본 논문에서는 질량을 증가시키고 적응형 격자를 사용하여 최적화를 수행하였다.

Table 1 Optimum restraining force of draw-bead

| Design Variable | Draw-bead Force | Design Variable | Draw-bead Force |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Variable 1 | 1151 N/mm | Variable 5 | 1141 N/mm |
| Variable 2 | 1054 N/mm | Variable 6 | 693 N/mm |
| Variable 3 | 1174 N/mm | Variable 7 | 1189 N/mm |
| Variable 4 | 1102 N/mm | Variable 8 | 1013 N/mm |

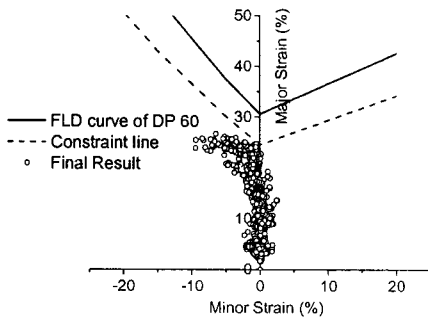


Fig. 6 Principal strain distribution after optimization

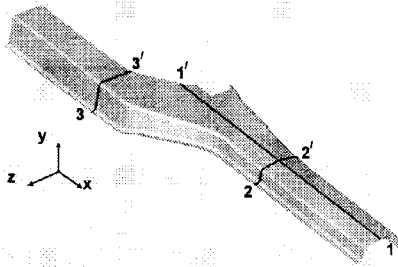
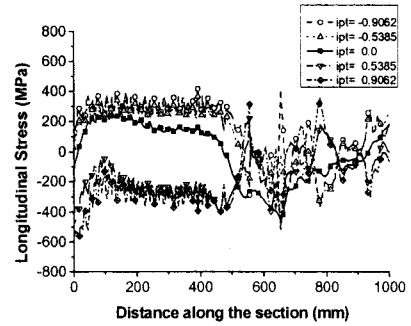


Fig. 7 Location of the designated sections used for the comparison of optimized results

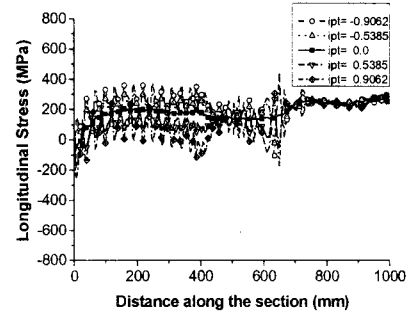
Fig. 5 에 최적화 과정에서 설계영역 1 의 목적함수 및 설계변수의 변화량을 도시하였다. 최적화가 진행됨에 따라 드로비드 구속력이 증가하여 응력의 편차가 감소되다가 제한조건에 의하여 일정한 값을 가지게 된다. 각 설계영역에 대하여 반복적인 계산을 통하여 Table 1 의 최적값을 계산하였다.

최적화 후의 주변형률 분포를 Fig. 6 에 도시하였다. 최적값을 적용하여 성형해석을 수행한 결과, 제한조건에 의하여 주변형률이 성형한계도의 파단선 아래에 위치하고 있으며, 파단의 문제가 발생하지 않을 것으로 예상된다.

최적화 결과의 정량적인 비교를 위하여 Fig. 7 에 도시한 두 단면에 대하여 두께 방향의 응력분포와 두께분포를 조사하였다. Fig. 8 과 Fig. 9 에 단

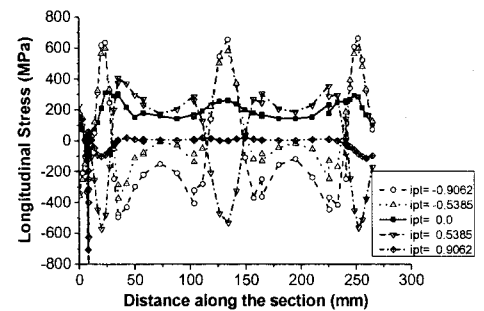


(a)

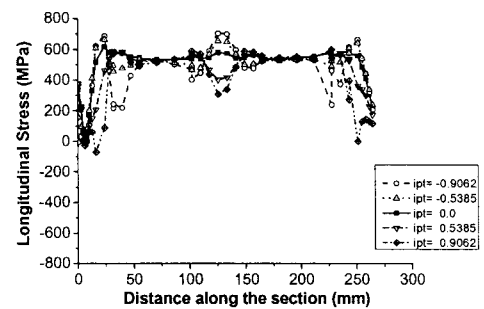


(b)

Fig. 8 Comparison of the stress deviation along the designated section 1-1': (a) before optimization; (b) after optimization



(a)



(b)

Fig. 9 Comparison of the stress deviation along the designated section 2-2': (a) before optimization; (b) after optimization

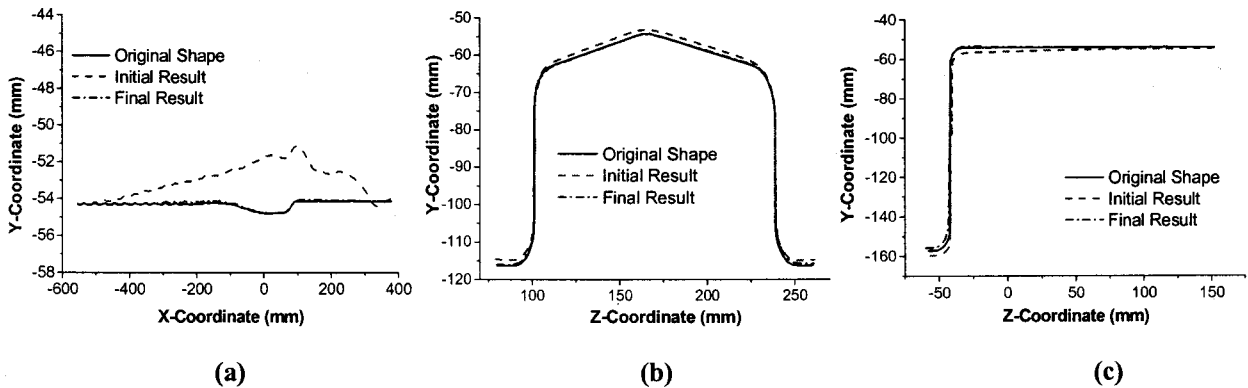


Fig. 16 Comparison of the amount of springback along the designated sections: (a) along the 1-1'; (b) along the 2-2'; (c) along the 3-3'

면에 따른 최적화 전·후의 두께방향 응력분포를 도시하였다. 초기 추정치로 해석을 수행하였을 때 성형과정에서의 굽힘으로 인하여 두께방향의 상부 적분점과 하부 적분점의 응력부호가 서로 다르고 편차가 심하게 나타난다. 그러나 최적화 후에는 드로비드의 구속력으로 파단이 발생하지 않는 범위 내에서 판재에 전체적인 인장력이 부가되어 벽면의 응력상태를 양의 값으로 균일화하였다. 그리고 펀치와 다이의 어깨부에서 굽힘에 의한 응력편차도 최적화를 통하여 크게 감소됨을 살펴 볼 수 있다.

본 논문에서 드로비드 구속력의 최적화를 통하여 응력의 편차를 저감하였다. 이에 따른 최적화 수행 후 스프링백의 양에 대한 정량적인 평가를 위하여 해석에서 얻은 변형형상 및 응력분포를 이용하여 스프링백 해석을 수행하였다. Fig. 10에 각 단면에 대한 최적화 전후의 탄성복원 후 변형형상을 비교하여 도시하였다. 최적화 전의 형상은 스프링백이 많이 발생하고 있으며, 특히 길이방향 및 플랜지 부의 휘어짐이 크게 발생하였다. 최적화를 수행한 결과 부재의 두께방향 응력편차의 감소로 인하여 스프링백 양이 감소하였으며, 벽면의 휘어짐 현상도 크게 감소되어 드로비드의 구속력 부가로 인하여 제품의 형상 동결성이 향상되었음을 살펴 볼 수 있다.

실제 공정에서는 드로비드의 형상과 크기, 재료의 물성치 등에 따라서 비드의 저항력을 계산하여 데이터 베이스화 하고 이를 바탕으로 드로비드의 형상을 결정하게 된다. 따라서 최적의 비드

력을 토대로 이에 따라 비드의 형상 및 위치를 결정하여 실제 금형의 설계에 반영할 수 있기 때문에 본 해석에서 계산한 드로비드의 구속력은 실제 성형공정에서 비드의 설치 시에 유용한 정보로 사용될 수 있다고 판단된다

4. 결론

본 논문에서는 차량용 박판 부재의 스프링백 저감을 위한 공정변수의 최적화를 수행하였다. 성형해석에서 얻어지는 판재의 두께방향 응력편차를 목적함수로 선정하고 이를 최소화하는 설계변수를 결정하도록 하였다. 최적화 수행은 반응표면법을 이용하였으며, 파단을 방지하기 위하여 성형한계도의 파단선을 제한조건으로 부가하였다. 제안된 기법을 굽힘이 지배적인 U-드로벤딩 공정의 블랭크홀딩력 최적화에 적용하고 최적화 전·후의 탄성복원량을 비교하여 효용성을 검증하였다. 그리고, 고강도 강판 DP60이 사용된 프린트 사이드 멤버의 스프링백을 줄이기 위하여 드로비드의 구속력을 최적화 하였다. 최적화 결과 응력편차의 감소를 통한 프린트 사이드멤버의 스프링백 저감을 확인하였다. 이상의 예제를 통하여 제안된 방법이 실제 성형공정에서 공정변수 설계 시에 유용하게 사용될 수 있다고 판단된다.

참고 문헌

[1] 전기찬, 1993, 박판금속의 성형 - 이론과 실제, 반도출판사.

- [2] 양우열, 윤치상, 신철수, 조원석, 금영탁, 이승열, 황진영, 고강도 강판 성형 공정의 스프링백 제어, 2003, 한국소성가공학회지, 제 12 권, 제 8 호, pp. 718~721.
- [3] 김용환, 김태우, 이영선, 이정환, 고강도 TRIP 강판의 스프링백에 대한 연구, 2004, 한국소성가공학회지, 제 13 권, 제 5 호, pp. 409~414.
- [4] A. P. Karafillis, M. C. Boyce, 1996, Tooling and Binder Design for Sheet Metal Forming Compensating Springback Error, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 36, No. 4, pp. 503~526.
- [5] W. Gan, R. H. Wagoner, 2004, Die Design Method for Sheet Springback, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 46, pp. 1097~1113.
- [6] 양재봉, 전병희, 오수익, 2000, 반응표면분석법을 이용한 알루미늄 판재 성형공정의 스프링백 저감에 관한 연구, 한국소성가공학회지, 제 9 권, 제 5 호, pp. 526~532.
- [7] 양우열, 이승렬, 금영탁, 2003, 스프링백 저감을 위한 초기 블랭크 설계, 한국소성가공학회지, 제 12 권, 제 3 호, pp. 208~213.
- [8] G. Liu, Z. Lin, W. Xu, Y. Bao, 2002, Variable Blankholder Force in U-shaped Part Forming for Eliminating Springback Error, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 120, pp. 259~264.
- [9] V. Viswanathan, B. Kinsey, J. Cao, 2003, Experimental Implementation of Neural Network Springback Control for Sheet Metal Forming, *Trans. ASME: J. Eng. Mater. Technol.*, Vol. 125, pp. 141~147.
- [10] B. Haddag, T. Balan, F. Abed-Meraim, 2005, Springback Simulation: Impact of Some Advanced Constitutive Models and Numerical Parameters, *Proceeding of the 6th International Conference NUMISHEET 2005*, Detroit, MI, USA, pp. 286~291.
- [11] S. W. Lee, D. Y. Yang, 1998, An Assessment of Numerical Parameters influencing Springback in Explicit Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 80-81, pp. 60~67.
- [12] H. Huh, S. H. Kim, 2001, Optimum Process Design in Sheet-Metal Forming with Finite Element Analysis, *ASME. J. Eng. Mater. Technol.*, Vol. 123, pp. 476~481.
- [13] R. H. Myers and D. C. Montgomery, 1995, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Design Experiment*, Wiley & Sons. New York.
- [14] LSTC, 2003, *LS-DYNA3D Keyword User's Manual-Version 970*.
- [15] Altair Engineering, 2004, *HyperStudy User's Manual, Version 7.0*.