반응표면법을 이용한 차체용 프론트 사이드 멤버의 스프링백 저감

송정환¹⁾ · 허 훈^{*1)} · 김세호²⁾ · 박성호³⁾

한국과학기술원 기계공학과¹⁾ · 대구대학교 자동차·산업·기계공학부²⁾ · POSCO 기술연구소³⁾

Springback Reduction in Stamping of Front Side Member with a Response Surface Method

Junghan Song¹⁾ · Hoon Huh^{*1)} · Seho Kim²⁾ · Sungho Park²⁾

¹⁾ Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Science Town,
Daejeon, 305-701, Korea

^{*2)} Department School of Automotive, Industry and Mechanical Engineering, Daegu University,
15 Naeri, Jillyang, Gyungbuk, 712-714, Korea

³⁾ POSCO Technical Research Laboratories, 699 Cumho-dong, Gwangyang-si,
Jeonnam, 545-090, Korea

Abstract: Springback is a common phenomenon in sheet metal forming since the elastic recovery of the internal stresses is induced after removal of the tooling. The numerical analysis of springback is a complicated time-consuming job and its result is greatly effected by a type of the yield function, finite elements used and the constraint condition for eliminating a rigid body motion. In this paper, optimization of the draw-bead force is carried out utilizing the response surface method in order to reduce springback and improve shape accuracy of a deep drawn product. In the optimization process, the tendency of springback is evaluated qualitatively without springback simulation usually done with the implicit solving scheme. Instead of springback simulation, the amount of stress deviation along the thickness direction in the deep drawn product is used as an indicator of springback. The stamping process is analyzed for a front side member formed with advanced high strength steel (AHSS) sheets such as DP60. The analysis procedure fully covers the binder-wrap, stamping, trimming and springback processes with the commercial elasto-plastic finite element code LS-DYNA 3D. The effect of the restraining force of draw-beads is confirmed with the decreased stress deviation. The analysis result shown in the final springback simulation demonstrates that the present analysis provides a guideline for controlling the evolution of springback based on the finite element simulation of complicated auto-body members.

Key words : Springback(스프링백), Front Side Member(프론트사이드멤버), Response Surface Method(반응표면법), Stress Deviation(응력편차), Draw-bead(드로우비드)

1. 서 론

프레스에 의한 판재의 성형가공은 굽힘, 드로잉, 스트레칭 등의 복합적인 변형의 작용과 재료의 성형성, 이방성과 같은 기계적 성질, 금형의 마찰 및 윤활조건, 블랭크 홀딩력, 드로오비드력과 같은 공정변수에 의하여 주름, 크랙, 스프링백과 같

은 성형 불량이 나타난다. 이러한 성형 불량 중 스프링백은 판재가 금형에 의하여 강제적으로 변형이 발생한 후 금형으로부터 이탈되었을 때 판재 내부의 응력이 정적 평형상태를 유지하기 위하여 응력상태가 재편되면서 발생하는 변형형상으로 제품의 치수 정밀도를 떨어뜨려 조립 불량의 원인이 된다. 판재의 스프링백과 관련하여 과거에는 단순 굽힘에 관한 실험에 바탕을 두어 연구되었으나 최근에는 유한요소 해석을 통하여 스프링백과 같은 성형 불량을 예측하고 있다¹⁾.

최근까지 자동차 산업에서는 판재의 성형성

* To whom correspondence should be addressed.
hhuh@kaist.ac.kr

등 기술적인 문제로 인하여 강도는 떨어지더라도 연성과 성형성이 우수한 냉연강판을 선호하였다. 그러나 전 세계적인 환경문제의 대두로 인한 연비효율의 개선과 배기가스등의 문제로 인하여 경량화를 위한 고강도 강판의 적용에 대한 요구가 증대되고 있다. 하지만 강판의 강도가 높아질수록 스프링백의 증가로 치수 정밀도의 제어가 어려워지는 문제점이 있다.

이러한 고강도 강판의 스프링백 후 치수 정밀도를 높이기 위하여 Liu²⁾등은 가변 블랭크홀딩력으로 U 드로우벤딩 후 스프링백을 저감하였으며, Gan 과 Wagoner³⁾는 변위조정법(Displacement Adjustment Method)을 제안하여 금형설계에 적용하였으며, Chou 와 Hung⁴⁾은 굽힘 변형의 스프링백 저감을 위하여 반응표면법을 이용 다이간극과 펀치반경을 최적화하였다. 그리고 Altan⁵⁾ 등은 민감도해석을 이용 초기 블랭크를 최적화하여 스프링백을 저감하였다. 국내에서는 Oh⁶⁾등이 반응표면법을 이용하여 알루미늄 판재의 스프링백 저감에 관한 연구를 수행하였으며, Keum⁷⁾등은 초기 블랭크의 최적화를 통하여 스프링백을 저감하였다. 이러한 대부분의 스프링백 저감을 위한 연구에서 공정변수의 최적화를 위하여 스프링백 해석 후 얻어지는 스프링백 양을 목적함수로 적용하여 최적화가 수행된다. 그러나 고강도 강판의 스프링백 해석은 사용되는 항복함수, 요소, 접촉조건 등에 따라 해의 정확도에 문제가 있으며, 복잡한 부재의 스프링백 해석은 수렴성에도 문제가 발생하여 최적화의 신뢰도를 떨어뜨릴 수가 있다.

이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 스프링백 해석을 수행하지 않고, 성형해석에서 얻어지는 판재의 두께방향 응력편차를 스프링백 판단의 기준으로 이용하여 최적화를 수행하였다. Fig. 1 에 도시한 DP 60 으로 성형된 프런트사이드멤버의 외판에 대하여 드로우비드 구속력을 설계변수로 사용하고 판재의 두께방향 응력편차를 최소화하는 스프링백 저감을 위한 수식화를 구성하였다. 최적화수행은 강건설계 기법으로 널리 알려져 있는 반응표면법을 이용하였으며, 성형공정에서의 파단을 방지하기 위하여 성형한계도의 파단선을 제한조건으로 부가하였다. 최적화의 결과로 응력편차의 감소를 통한 프런트사이드멤버의 스프링백 저감을 확인하여 제안된 기법의 효용성을 검증하였다.

Figure 1. Shape of outer panel in front side member

2. 스프링백 저감을 위한 수식화

굽힘이 지배적인 공정은 성형이 완료되면 해중이 될 때까지 탄성회복에 의한 스프링백 현상이 발생하여 정확한 형상을 얻기가 어렵다. 박판성형에서 형상 동결성을 확보하기 위하여 대표적으로 두가지 방법이 사용될 수 있다. 첫째로 스프링백 양을 금형의 보정으로 보상하는 방법이다. 둘째로 박판 내부의 상태변수를 최적화시켜 탄성 회복을 억제하는 방법이다. 본 해석에서는 프런트사이드멤버 성형공정에서 드로우비드 구속력의 최적화를 통하여 박판의 두께방향의 응력 편차를 줄임으로써 스프링백 양을 줄이는 연구를 최적화 기법을 이용하여 구현하였다.

최적화를 위하여 다음과 같이 두께방향 적분점에 대하여 박판의 길이방향 응력의 편차를 줄이도록 하였으며, 제한조건으로 성형한계도의 파단선을 넘지않도록 하였다.

$$\min. \Phi = \int_{\Omega_{opt}} (\sigma_{11} - \tilde{\sigma}_{11})^2 d\Omega \quad (1-a)$$

$$\text{subject to } g_1 = (\varepsilon_{1,i})_{\max} - \varepsilon_{1c} \leq 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1-b)$$

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

$$\tilde{\sigma}_{11} = \frac{\int_{\Omega_E} \sigma_{11} d\hat{z}}{\int_{\Omega_E} d\hat{z}} \quad (2)$$

식(1)로 표현된 제한 최적화 수식으로부터 최적의 해를 구하기 위한 방법으로 본 논문에서는 설계 민감도를 얻기 어려운 경우나 최적화 과정에서 국부 최소해로 수렴하는 문제에 대하여 우수한 성능을 보이는 반응표면법을 사용하였다⁸⁾. 반응표면법은 설계공간상의 여러 실험점 p 에서 계산된 결과로 시스템의 반응 $\Phi(p)$ 를 식 (3)의 근사 모델 $\Phi_a(p)$ 로 근사화하고 이로부터 최적치를 탐색하는 방법이다.

$$\Phi_a(p) = \sum_{i=0}^L a_i \Psi_i \quad (3)$$

여기서 L 은 기저함수의 개수이고 Ψ_i 는 근사함수를 구성하는 기저함수이다. 위 식에서 상수 a_i 는 최소자승법을 이용하여 식 (4)와 같이 구해진다.

$$\sum_{i=0}^L [\Phi(p_i) - \Phi_a(p_i)]^2 = \sum_{i=0}^L [\Phi(p_i) - a_i \Psi_i]^2 \quad (4)$$

유한요소해석과 반응표면 분석법을 이용하여 최적의 공정변수를 결정하는 과정을 Fig. 2에 도시하였다. 먼저 주어진 공정변수에 대하여 유한요소해석을 수행하고 응력 편차 및 주변형을 분포를 구한다. 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 과정을 반복한다.

Figure 2. Schematic diagram of the optimization procedure with response surface method.

3. 프런트사이드멤버의 스프링백 저감

3.1 성형 해석 및 최적화 해석 조건

프런트사이드멤버 외판의 성형해석은 상용 외연적 탄소성 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D를 이용하여 수행하였다. 해석을 위한 판재 및 금형은 Fig. 3과 같다. 성형해석에서 드로우비드를 직접 모델링하지 않고 블랭크 홀더에 선으로 표현되는 등가 드로우비드를 사용하여 해석을 수행하였다⁹⁾. 판재는 두께 2.5 mm의 DP60으로 유동응력 곡선은 $\bar{\sigma} = 1023.7(0.00126 + \bar{\epsilon})^{0.16}$ MPa로 표현된다. 성형과정에서 75 ton의 블랭크홀딩력을 부가하였으며, 판재와 금형사이의 쿨롱마찰계수는 0.15로 가정하였다. 해석시간을 줄이기 위하여 질량보정을 하였으며, 변형형상의 정밀한 모사를 위하여 적응형격자를 사용하였다.

프런트사이드멤버 외판의 스프링백 저감을 위한 설계변수로서 본 논문에서는 드로우비드의 구속력을 최적화하였다. 외판의 형상변화를 고려하여 총 8개의 설계변수를 선정하였으며, 설계변수의 위치에 따라 Fig. 4에 도시한 총 4개의 설계영역으로 나누고 각 설계영역에 대하여 해

Figure 3. Initial setting for tools and blank for the forming analysis of outer panel.

Figure 4. Location of draw-beads and selection of design variable.

Figure 5. Variation of variables during the optimization process on the design region 1

Figure 6. Thickness and principal strain distribution after optimization

Table1. Optimum restraining force of draw-bead obtained from the response surface method

Design Variable	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8
Restraining Force (N/mm)	1151	1054	1174	1102	1141	963	1189	1013

당하는 설계변수를 제외한 다른 변수의 영향은 작다고 가정하고 각 영역에서 두 개의 주 설계변수에 대한 최적화를 수행하였다.

최적화 과정에서 500 N/mm의 드로우비드 구속력을 초기 추측치로 이용하였으며, 실험계획법 상의 요인설계법으로 설계점을 결정하였다. 반응표면법을 이용하여 근사함수를 구성하는데 있어서 기저함수의 선택은 근사의 정확도에 상당한 영향을 미치게 되는데, 본 논문에서는 전체 탐색의 경우에는 선형 기저함수를 이용하였고, 국부탐색의 경우에는 이차 기저함수를 이용하여 반응표면을 구성하였다.

3.2 최적화 결과

스프링백 저감을 위한 드로우비드 구속력의 최적화를 반응표면법을 이용하여 수행하였다. Fig. 5에 최적화 과정에서 설계영역 1의 목적함수 및 설계변수의 변화량을 도시하였다. 최적화가 진행됨에 따라 드로우비드 구속력이 증가하여 응력의 편차가 감소되다가 제한조건에 의하여 일정한 값을 가지게 된다. 각 설계영역에 대하여 반복적인 최적화를 통하여 Table 1의 최적값을 계산하였다.

최적화 결과를 적용하여 프런트사이드멤버의 성형해석을 수행, Fig. 6의 두께 분포와 주변형률

Figure 7. Comparison of the stress deviation through the thickness integration point along the designate section1

Figure 8. Comparison of the stress deviation through the thickness integration point along the designate section1

분포를 도시하였다. 최적값을 적용하여 성형해석을 수행한 결과 최적화 과정에서의 제한조건에 의하여 주변형틀이 성형한계도의 파단선 아래에 위치하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7에 단면 1을 따라서 각 두께의 적분점에서 박판의 길이방향의 응력을 도시하였다. 초기 추정치로 해석을 수행하였을 때에는 두께방향의 응력편차가 매우 심하고, 상부 적분점과 하부 적분점의 응력분포가 서로 다른 부호를 가짐을 관찰할 수 있는데, 이러한 현상은 스프링백을 유발하는 원인이 된다. 최적화 후의 응력분포로부터 드로우비드의 구속력이 부가되어 두께방향 응력의 분포가 균일해지며, 모두 같은 부호를 가지게 되어 스프링백의 양이 크게 감소할 수 있음을 확인할 수 있다. Fig. 8에 도시한 단면 2에 대해서도 두께방향 응력의 분포가 균일하게 나타나 프런트사이드멤버 전체적으로 스프링백의 양이 줄어들 것을 예측할 수 있다.

Figure 9. Designated sections for the comparison of the amount of springback

최적화 수행후 스프링백의 양에 대한 정략적인 평가를 위하여 해석에서 얻은 변형형상 및 응력분포를 이용하여 스프링백 해석을 수행하였다. 스프링백 해석은 LS-DYNA 3D의 내연적 내연적 기법을 사용하여 수행하였다. 스프링백 해석 후 Fig. 9에 도시한 3개의 절단면에 대하여 스프링백 후의 형상을 비교하였다.

Figure 10. Comparison of the springback along the designate section

Fig. 10에 스프링백 후의 변형형상을 최적화 전과 최적화 후에 대하여 도시하였다. 최적화 전의 형상은 스프링백이 많이 발생하고 있으며, 특히 길이방향 및 플랜지 부의 휘어짐도 크게 발생한다. 최적화를 수행한 결과 스프링백의 양이 감소하였으며, 벽면의 휘어짐 현상도 크게 감소됨을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 프런트사이드멤버의 외판에 대하여 스프링백을 저감하기 위하여 드로우비드 구속력을 설계변수로 사용하고 판재의 두께방향 응력편차를 최소화하는 최적화를 수행하였다. 최적화 수행은 반응표면법을 이용하였으며, 성형공정에서의 파단을 방지하기 위하여 성형한계도의 파단선을 제한조건으로 부가하였다. 최적화의 결과로 응력편차의 감소를 통한 프런트사이드멤버의 스프링백 저감을 확인하여 제안된 기법의 효용성을 검증하였다.

References

1. 김용환, 김태우, 이영선, 이정환, “고강도 TRIP 강 of 스프링백에 대한 연구”, 2004, 한국소성가공학회지, 제 13 권, 제 5 호, pp. 409~414, 2004.
2. G. Liu, Z. Lin, W. Xu and Y. Bao, “Variable Blankholder Force in U-shaped Part Forming for Eliminating Springback Error” *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 120, pp. 259~264, 2002.

3. W. Gan and R. H. Wagoner, “Die Design Method for Sheet Springback”, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 46, pp. 1097~1113, 2004.
4. Chou, C. H. and Hung, I. N., “Finite Element Analysis and Optimization on Springback Reduction”, *Int. J. Mach. Tool. Manu.*, 39, 517~536 (1999).
5. H. Palaniswamy, G. Ngaile and T. Altan, “Optimization of Blank Dimensions to Reduce Springback in the Flexforming Process”, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 146, pp. 28~34, 2004.
6. 양재봉, 전병희, 오수익, “표면분석법을 이용한 알루미늄 판재 성형공정의 스프링백 저감에 관한 연구”, 한국소성가공학회지, 제 9 권, 제 5 호, pp. 526~532, 2000.
7. 양우열, 이승렬, 금영탁, “스프링백 저감을 위한 초기 블랭크 설계”, 한국소성가공학회지, 제 12 권, 제 3 호, pp. 208~213, 2003.
8. H. Huh and S. H. Kim, “Optimum Process Design in Sheet-Metal Forming with Finite Element Analysis”, *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol.*, Vol. 123, pp. 476~481, 2001.
9. 김세호, 허 훈, 송정환, “자동차용 부재 금형설계의 공정변수 결정을 위한 CAE 프로세스 적용”, 한국자동차공학회 논문집, 제 13 권, 제 3 호, pp. 64~73, 2005.
10. *LS-DYNA 3D Keyword Manual*, Livermore Software Technology Cooperation.
11. *HyperStudy 7.0 User's Manual*, Altair Engineering.