

건설기계 Cabin Sunroof 형상비드 배치에 따른 스프링백 개선

배기현^{1, #}

Spring-back Improvement According to the Shape Bead Arrangement of Cabin Sunroof in Construction Equipment

G. H. Bae

(Received March 24, 2021 / Revised March 30, 2021 / Accepted March 30, 2021)

Abstract

This paper addresses the product shape modification for spring-back reduction in the sheet metal forming process of the cabin sunroof which is applied to the construction equipment. Initially, the anisotropic material properties are measured in order to calculate the degree of spring-back by the numerical simulation of the sheet metal forming process. To reduce the spring-back of the stamped part, several design modifications are suggested according to the geometrical bead arrangement on the planar region. The degrees of spring-back are confirmed for various product designs with different use of the geometrical bead. Finally, the spring-back improvement was validated by manufacturing the tryout product with the modified die set for the optimized product shape.

Keywords : Cabin Sunroof, Spring-Back, Sheet Metal Forming, Stamping Tool Design

1. 서론

건설장비는 다양한 건설 공사에 사용되는 기계로 구동 본체 위에 운전석이 설치되는 것이 일반적이다. 이때 운전석은 운전공간 확보 및 경량설계를 위하여 Fig. 1과 같이 다양한 판재 부품을 조립하여 제작된다. 건설기계의 특성상 자동차 등과 같은 일반적인 수송기기 대비 생산대수가 많지 않으므로 생산원가를 절감할 수 있는 성형공법 위주로 채택되고 있다. 따라서 소재사용량을 최소화함과 동시에 성형 후 트리밍 공정을 생략하기 위한 목적으로 포밍 공법이 주로 활용된다. 하지만 포밍 공법은 드로잉 공법 대비 성형품의 과도한 스프링백으로 인하여 치수정밀도 확보가 용이하지 않은 단점이 있다.[1-3] 이로 인하여 운전석 조립 시 용접품질 저하를 야기할 수 있다.[4] 따라서 생산비용 절감을 목적으로 포밍 공법 적용 시 성형품의 스프링백 발생을

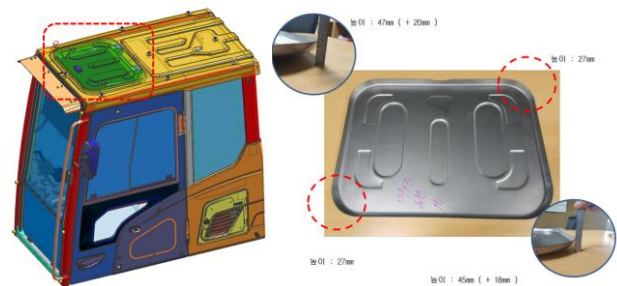


Fig. 1 Cabin Sunroof part and its spring-back problem

최소화할 수 있는 부품 설계가 필수적이다.

기존 건설장비 Cabin Sunroof는 제품의 면강성 강화를 위하여 평면부에 형상비드를 배치하고 있다. 하지만 포밍 공정 시 형상비드는 제품면 내 잔류응력의 비대칭성을 유발하여 성형품의 비틀림을 발생시킨다. 따라서 Cabin Sunroof 제품의 면강성 요구특성을 고려한 형상비드 배치 최적화를 통하여 스프링백 발생을 최소화함으로써 치수정밀도를 개선할

1. 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소, 선임연구원
Corresponding Author : Korea Institute of Industrial Technology, Incheon Regional Division, E-mail: baegh@kitech.re.kr
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0015-4742>

필요가 있다. 즉, 기존 제품형상을 기준으로 형상비드 배치에 따른 스프링백을 정량적으로 분석하여 조립특성 개선 및 생산비용 절감이 가능하다.

본 연구에서는 건설장비 Cabin Sunroof의 면내 형상비드 수정에 따른 스프링백 분석하여 제품설계 최적화를 수행한다. Sunroof용 소재의 인장시험을 수행하여 성형해석용 이방성 물성을 측정한다. 측정된 이방성 물성을 활용하여 성형해석을 수행하고 성형성 및 스프링백 특성을 분석한다. 면내 형상비드 배치에 따른 스프링백 발생량을 정량적으로 분석하며, 이를 기준으로 제품형상을 선정한다. 최종적으로 신규 금형을 이용한 시작품 성형으로 스프링백 개선 효과를 검증한다.

2. 성형해석용 물성 평가

2.1 인장시험 조건

본 연구에서는 소재의 이방성 특성을 성형해석에 고려하기 위하여 압연방향을 기준으로 방향별(0도, 45도, 90도) 인장시험을 수행하였다. 인장시험을 위하여 Fig. 2와 같이 MTS 810 인장시험기를 사용하였다. 시편 변형 영상분석(DIC, Digital Image Correlation)을 위하여 ARAMIS 시스템을 사용하였다.[5-7] 대상 소재는 SPCE 1.54t이며, 압연 방향으로부터 45도 간격으로 ASTM-E8M Subsize 규격시편을 채취하였다. DIC 잉크젯 전용장비를 사용하여 반점패턴(Speckled Pattern)을 인쇄하였다. 시험속도는 준정적 변형률 속도 조건인 0.001 /sec로 선정하였다.

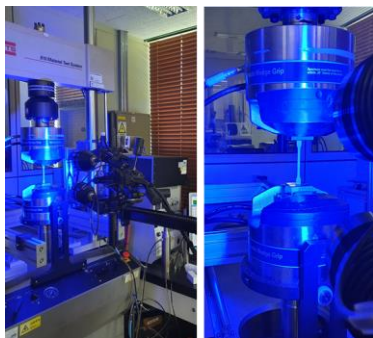
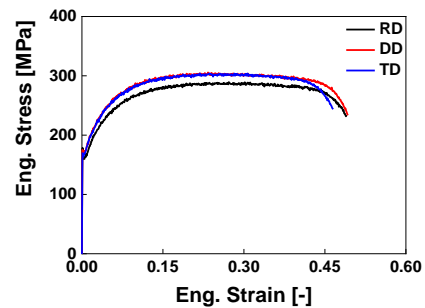


Fig. 2 Tensile testing system (MTS 810 with ARAMIS)

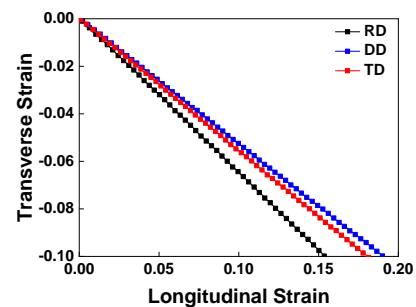
2.2 인장시험 결과

방향별 인장시험 결과를 바탕으로 성형해석 수행을 위한 물성데이터를 확보하였다. Fig. 3은 방향별

유동응력선도 및 r값 측정 결과이다. 인장시험 결과를 통하여 판재 압연 제조공정에 의한 이방성 특성이 명확히 존재함을 확인할 수 있다. 압연방향(RD, Rolling Direction)의 유동응력선도를 이용하여 Fig. 4와 같이 경화식 근사를 수행하였으며, Swift식의 근사성능이 비교적 우수한 것을 확인할 수 있다. 방향별 기계적 물성을 Table 1에 제시하였으며, Table 2에 압연방향 유동응력선도의 경화식 근사결과를 제시하였다. 위의 실험결과를 바탕으로 Cabin Sunroof 부품의 포밍 공정 성형해석을 수행하였다.



(a) Engineering stress-strain curve



(b) r-value

Fig. 3 Tensile testing results according to the loading angle from the rolling direction

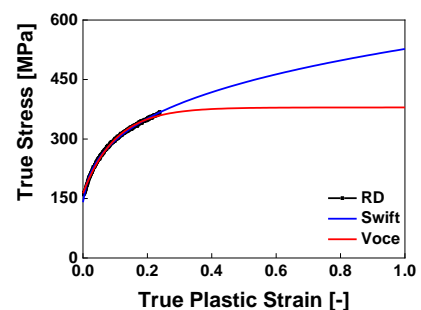


Fig. 4 Fitting result of the true stress-strain curve of the rolling direction using Swift and Voce equations

Table 1 Mechanical properties according to the loading angle from the rolling direction

| Loading angle [°] | σ_y [MPa] | σ_t [MPa] | r-value | ϵ_u [-] | ϵ_f [-] |
|-------------------|------------------|------------------|---------|------------------|------------------|
| 0 (RD) | 164.44 | 290.20 | 1.853 | 0.27 | 0.50 |
| 45 (DD) | 169.68 | 306.69 | 1.148 | 0.26 | 0.48 |
| 90 (TD) | 163.05 | 304.51 | 1.228 | 0.26 | 0.49 |

* σ_y : Yield stress, σ_t : Tensile stress

* ϵ_u : Uniform elongation, ϵ_f : Fracture elongation

Table 2 Coefficients of the hardening equations for the flow stress cure in the rolling direction

| Swift | K [MPa] | ϵ_0 | n | Voce | A [MPa] | B [MPa] | C [-] |
|-------|-----------|--------------|-------|------|-----------|-----------|---------|
| | 526.28 | 0.006 | 0.255 | | 379.56 | 216.41 | 9.94 |

* Swift : $\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n$, Voce : $\sigma = A - B \exp(-C\epsilon)$

3. Sunroof 성형해석

3.1 성형해석 모델 및 조건

Sunroof 부품의 스프링백 경향 분석을 위하여 포밍 공정의 성형해석을 수행하였다. 성형해석은 Autoform R8 프로그램을 사용하였다. 2절에서 획득한 물성평가 결과를 이용하여 Swift 경화모델 및 Hill's48 항복함수를 구성하였다. Fig. 5는 포밍 공정 성형해석을 위한 금형면 형상 및 초기 블랭크 위치를 보여준다. 플랜지 트리밍 공정 생략을 통한 원가절감을 위하여 최적화된 초기 블랭크 형상을 사용하고 있다. 셀 요소를 사용하여 금형면 및 블랭크를 모델링하였다. 블랭크에는 요소 세분화 기법을 적용하여 블랭크의 최소 요소크기를 0.31 mm로 설정하였으며, 두께방향으로 5개의 적분점을 부가하였다. 마찰계수는 0.15로 적용하였다.

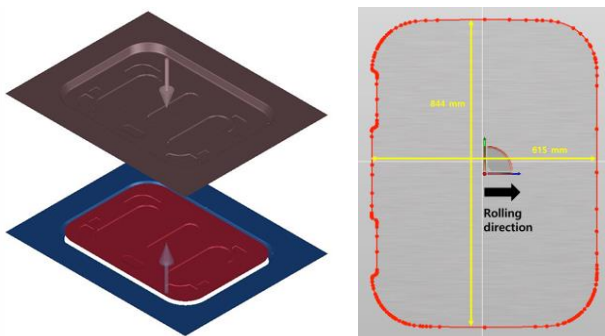
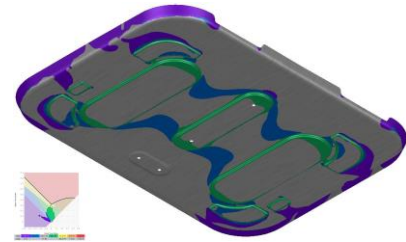


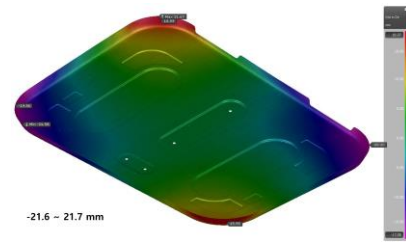
Fig. 5 Tool setup and initial blank shape

3.2 성형해석 결과

포밍 공정의 수치해석을 통하여 Sunroof 부품의 성형성 및 스프링백 발생을 분석하였다. Fig. 6은 최종제품 성형 후 성형한계도 및 스프링백 발생을 도시한 것이다. 포밍 공정 특성상 변형량이 크지 않기 때문에 변형은 모두 안전영역 내에 있는 것을 확인할 수 있다. 금형면 내 형상비드 배치의 비대칭성으로 인하여 비틀림 모드의 스프링백이 주로 발생하는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 1에 제시한 양산부품의 스프링백 발생 경향을 동일하게 예측할 수 있다. 따라서 수치해석을 기법을 이용하여 면내 형상비드 배치에 따른 스프링백 경향을 비교 분석하였으며, 포밍 공법에서 스프링백 저감을 통한 치수정밀도 확보가 용이한 부품 설계안을 선정하였다.



(a) Formability



(b) Spring-back

Fig. 6 Forming simulation result of the sunroof part

4. Sunroof 스프링백 개선

4.1 부품형상 수정

기존 부품형상은 드로잉 공법을 기준으로 스프링백 저감을 위하여 형상비드를 적극 사용하여 설계되었으나, 이후 소재수율 향상 및 원가절감을 위하여 포밍 공법으로 변경되었다. 하지만 변경된 포밍 공법을 고려한 설계 최적화가 수행되지 않아 과도한 스프링백이 발생하고 있는 상황이다. 따라서 포밍 공법의 스프링백 발생 저감을 위하여 외곽부와 중심부의 형상비드 적용 유무에 따른 수정 설계안

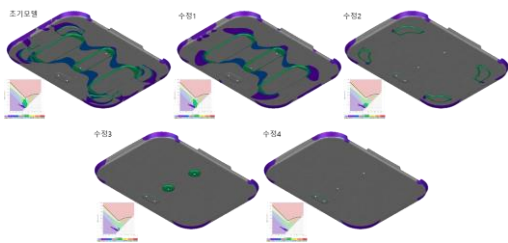
을 Fig. 7과 같이 제시하였다. Sunroof 부품에서는 Fig. 7의 수정4에 유지된 고정부의 요구강성 확보가 핵심이다. 즉, 모든 수정 설계안이 해당 영역의 형상 비드를 유지하고 있으므로 Sunroof 부품의 요구강성 만족에 문제가 없다.



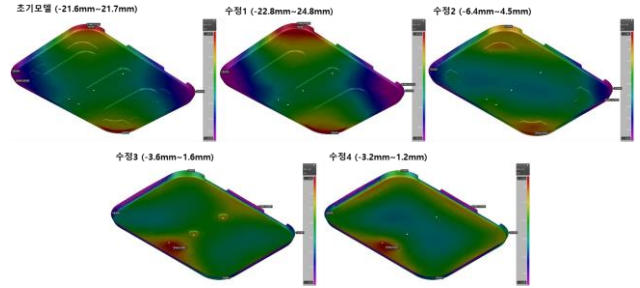
Fig. 7 Design modification of the sunroof considering the shape bead arrangement

4.2 성형해석을 통한 스프링백 분석

제안된 수정 설계안의 포밍 공정 성형해석을 수행하였으며, 성형성 및 스프링백 발생량을 비교 분석하였다. Fig. 8(a)는 부품형상에 따른 성형성 분포를 도시한 것이다. 면내 형상비드 곡률부에서 주로 변형이 집중되고 있으며, 끝단부 플랜지에서의 살물림으로 인하여 주름 경향이 확인된다. 형상비드 삭제에 따라 변형량은 꾸준히 감소하는 경향을 보인다. Fig. 8(b)는 부품형상에 따른 스프링백 발생량을 보여준다. 초기모델의 스프링백은 주로 비틀림에 의하여 발생하고 있으며, 형상비드를 삭제함에 따라 비틀림 모드가 점차 해소되는 경향을 보인다. 이때 중앙부에 배치된 타원형 비드가 삭제된 경우, 스프링백 발생량이 급격히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 면내 형상비드를 모두 삭제한 경우 스프링백 발생량이 최소화되며, 수정3에 사용된 중심부 원형 형상비드는 스프링백 발생에 영향도가 매우 낮은 것을 확인할 수 있다. 최종적으로 Sunroof 손잡이 체결부의 강성 확보를 감안하여 중심부 원형 형상비드를 유지한 설계안(수정3)을 최종안으로 선정하였다.



(a) Formability



(b) Spring-back

Fig. 8 Forming simulation result for various product designs considering the shape bead arrangement

4.3 스프링백 개선 검증

부품형상 수정에 따른 스프링백 개선 효과 검증을 위하여 수정3안에 대한 포밍 금형을 제작하고 프레스 성형을 수행하였다. Fig. 9는 수정 금형으로 제작한 부품을 제시한 것이다. 스프링백 발생량을 정량적으로 분석하기 위하여 OMA사에서 보유한 ATOS 장비를 이용하여 부품 스캐닝 작업을 수행하였으며, Fig. 10과 같이 ATOS Professional 2018 프로그램을 사용하여 금형면 대비 스프링백 발생량을 정량적으로 측정하였다. 스캐닝 결과, 수정 부품의 스프링백 발생량은 ± 1.3 mm 이내 수준으로 측정된다. Table 3은 부품형상 수정 전후의 플랜지 끝단부에서의 최대 스프링백 발생량을 비교한 것이다. 이와 같이 부품형상 수정 및 형상비드 적용 단순화를 통하여 포밍 공법에 적합한 부품 설계안을 선정하였으며, 상당한 크기의 스프링백 저감을 통하여 건설장비 Cabin 조립에 양호한 형상 품질을 확보하였다.



Fig. 9 Stamping product of the modified part design

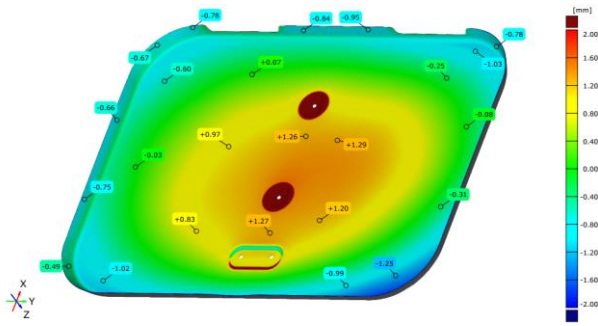


Fig. 10 Measurement of the spring-back distance from the die surface by scanning the stamping product

Table 3 Maximum spring-back distance at the product flange before and after the product design modification

| Spring-back distance | Initial design | Modified design |
|----------------------|----------------|-----------------|
| [mm] | 20.0 | 1.3 |

5. 결론

본 연구에서는 건설기계 Cabin Sunroof 부품의 스프링백 저감을 위하여 형상비드 배치에 따른 최적 설계안을 도출하였다.

(1) 이방성 물성평가 결과를 적용하여 Sunroof 부품의 스프링백 예측을 위한 해석기법을 구성하였으며, 양산 부품과 동일한 스프링백 경향을 확인하여 수치해석의 스프링백 예측 신뢰성을 확보하였다.

(2) 드로잉 공법 기준으로 설계된 부품 형상을 포밍 공법에서 과도한 스프링백을 발생함을 확인하였으며, 포밍 공법에 적합한 부품 형상 최적화가 필요함을 확인하였다.

(3) 부품 면내 형상비드 배치에 따른 스프링백 발생량 비교를 통하여 중앙부 타원형 비드가 스프링백 발생 주요 요인임을 확인하였다.

(4) Sunroof 손잡이부 강성을 고려하여 선정된 수정 설계안의 부품 시성형을 수행하여 ± 1.3 mm 이내 수준의 치수정밀도를 확보함으로써 건설장비 Cabin 조립에 양호한 형상 품질을 확보하였다.

후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 "Add-on

모듈 탑재를 통한 지능형 뿌리공정 기술개발 (KITECH EO-21-0009)"의 지원으로 수행한 연구입니다.

REFERENCES

[1] L. Komgrit, H. Hamasaki, R. Hino, F. Yoshida, 2016, Elimination of Springback of High-Strength Steel Sheet by Using Additional Bending with Counter Punch, J. Mater. Process. Technol., Vol. 229, pp. 199~206, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.08.029>

[2] T. Yoshida, E.J. Isogai, K. Sato, K. Hashimoto, 2013, Springback Problems in Forming of High-Strength Steel Sheets and Countermeasures, Nippon Steel Technical Report, No. 103, pp. 4-10.

[3] J.S. Choi, J.W. Lee, G.H. Bae, F. Barlat, M.-G Lee, 2016, Evaluation of Springback for DP980 S Rail Using Anisotropic Hardening Models, JOM, Vol. 68, No. 7, pp. 1850-1857, <https://doi.org/10.1007/s11837-016-1924-z>

[4] S.H. Kwon, H.S. Lee, Y.S. Lee, S.W. Kim, C.Y. Jung, S. Hong, 2016, Compensation Design to Reduce Springback in Sheet Metal Forming of 1.2GPa Ultra High Strength Steel, Trans. Mater. Process., Vol. 25, No. 5, pp. 301-305, <https://doi.org/10.5228/kstp.2016.25.5.301>

[5] V.-T. Nguyen, S.J. Kwon, O.H. Kwon, Y.S. Kim, 2017, Mechanical Properties Identification of Sheet Metals by 2D-Digital Image Correlation Method, Procedia Eng., Vol. 184, pp. 381-389, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.108>

[6] I.J. Jang, G.H. Bae, J.H. Song, H.S. Kim, N.S. Park, 2020, Fracture Envelopes on the 3D-DIC and Hybrid Inverse Methods Considering Loading History, Mater. Design, Vol. 194, pp. 108934, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108934>

[7] M. Tekieli, S.D. Santis, G.D. Felice, A. Kwiecien, F. Roscini, 2017, Application of Digital Image Correlation to Composite Reinforcements Testing, Compos. Struct., Vol. 160, pp. 670-688, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.096>