Journal of The Korea Convergence Society
Vol. 13. No. 4, pp. 287-292, 2022
e-ISSN 2713-6353
DOI : https://doi.org/10.15207/JKCS.2022.13.04.287

판재성형공정에서의 소재 강도에 따른 스프링백 산포의 통계분석

손민규[1], 김세호[2*]
[1]대구대학교 대학원 기계공학과 학생, [2]대구대학교 기계공학부 교수

Statistical Analysis of the Springback Scatter according to the Material Strength in the Sheet Metal Forming Process

Min-Kyu Son[1], Se-Ho Kim[2*]
[1]Student, Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Daegu University
[2]Professor, School of Mechanical Engineering, Daegu University

요 약 본 논문에서는 소재의 강도에 따라 U 채널형상 제품의 판재성형공정에서 발생하는 스프링백 현상의 산포 경향의 분석을 수행하였다. 성형공정의 유한요소해석 및 신뢰성 기반 최적화 기법을 적용하여 인장강도, 항복강도, 소재 두께 등 재질 산포와 마찰계수와 패딩력 등의 공정 산포를 고려하여 산포해석을 실시하였다. 산포해석 결과 산포에 유의한 영향을 미치는 인자는 항복강도와 인장강도 순으로 나타났으며, 소재의 인장강도가 클수록 스프링백 양은 증가하는 반면 스프링백의 산포량이 감소하는 것을 확인하였다. 주요 변형이 발생하는 펀치 어깨부와 다이 어깨부의 변형률과 응력 산포 분석을 통하여 스프링백 산포량 감소의 원인을 분석하였다. 본 논문에 제안된 산포분석 기법을 활용할 경우 불가피하게 발생하는 성형공정의 산포를 예측하고 대응이 가능할 것으로 기대된다.

주제어 : 판재성형공정, 스프링백 산포, 소재강도, 신뢰성 기반 최적화, 유한요소해석

Abstract In this paper, the stochastic distribution of the springback amount is investigated for the stamping process of a U-channel shaped-product with ultra-high strength steel. Using the reliability-based design optimization technique (RBDO), stochastic distribution of process parameters is considered in the analysis including material properties and process variation. Quantification of the springback scatters is carried out with the statistical analysis method according to the material strength. It is found that the scattering amount of springback decreases while the amount of springback increases as the tensile strength of the blank material increases, which is investigated by analyzing the strain and stress distribution of the punch and die shoulder. It is noted that the proposed scheme is capable of predicting and responding to the unavoidable scattering of springback in the sheet metal forming process.

Key Words : Sheet metal forming process, Springback scatter, Strength of materials, Reliability based design optimization, Finite element analysis

*This research was supported by the Daegu University Research Grant, 2018.
*Corresponding Author : Se-Ho Kim(mvksh@daegu.ac.kr)
Received January 3, 2022 Revised January 20, 2022
Accepted April 20, 2022 Published April 28, 2022

1. 서론

차체부품으로 널리 활용되는 강판 소재는 경량화의 요구를 만족시키기 위하여 인장강도가 높은 고강도강의 적용이 확대되고 있다. 소재의 고강도화에 따라 성형성 저하와 스프링백 양 증가에 의한 금형제작 시 개발 시간과 비용이 계속적으로 증가하고 있다. 코일로부터 블랭킹 공정에 의하여 제작되는 블랭크의 재질편차 및 양산공정에서 발생하는 공정조건의 산포에 의하여 성형성 및 스프링백 등 주요 품질에 불량이 발생할 가능성이 존재한다.[1] 재질 산포는 블랭크의 원재료인 코일 로트(lot) 또는 블랭크의 제작 위치에 따라 강도 등 소재의 기계적 물성이 통계적인 분포를 가지는 것을 의미한다. 공정 조건 산포는 성형공정 중에 부과하는 블랭크 재질 이외의 변수값이 통계적 분포를 가지는 것을 의미한다. 프레스의 성형속도 및 가압력, 블랭크 위치, 금형의 형상 불량 및 윤활 조건, 온도 변화 등의 편차가 이에 해당한다.

성공적인 제품을 양산하기 위한 공정변수를 구하여 금형을 제작하는 경우에도 재질과 공정조건 산포의 영향에 의하여 성형성 및 치수 정밀도의 산포 오차가 발생하여 제품 합격 기준을 초과하는 산포로 의한 설계변경이 발생하는 경우도 발생하게 된다. 특히 인장강도 800MPa이상을 가지는 초고강도강 제품을 제작할 경우 산포에 의해 발생하는 스프링백 값의 산포가 크게 증가하는 경우가 많아 설계단계에서부터 스프링백의 절대값 뿐만 아닌 스프링백 산포의 적절한 제어가 요구된다.

본 논문에서는 다양한 인장강도를 가지는 초고강도 강판을 적용한 U 채널형 차체 표준 부품의 성형공정을 대상으로 블랭크 소재의 물성산포 및 공정변수 산포를 고려하고 신뢰성 기반 설계최적화 기법(Reliability based Design Optimization, RBDO)[2]을 활용한 통계적 분석을 수행하여 스프링백 산포의 정량화를 실시하였다. 소재의 인장강도에 따른 변형률과 응력의 산포 분석을 통하여 스프링백 산포에 영향을 미치는 인자의 정량적 분석을 수행하였다.

2. 산포해석 조건

2.1 성형해석 조건

본 논문의 대상부품은 모자형 단면을 가지는 차량 부재를 모사한 U 채널 형상부품으로 형상은 Fig. 1과 같다.[3] 이 제품을 성형하기 위하여 폼(Form) 공법을 적용하여 스프링백 및 산포 양상을 비교하였다. 성형해석을 위하여 구축한 금형의 유한요소 모델을 Fig. 2에 도시하였다. 폼 공법은 상형 펀치, 상형 패드, 하형 다이로 구성되며, 블랭크 소재의 굽힘 변형만을 통하여 원하는 형상을 얻는 방법으로 자중처짐, 패딩, 포밍, 스프링백의 과정으로 진행된다. 블랭크 소재는 길이, 폭, 두께가 각각 300mm, 20mm, 1mm이다. 상용 유한요소 프로그램인 Auto-Form R7 plus[4]을 이용하여 성형공정 해석을 수행하였다.

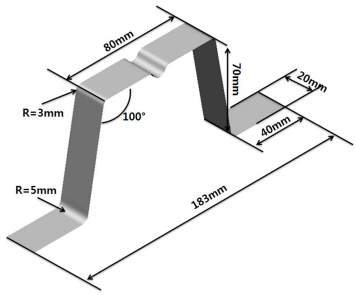


Fig. 1. Shape and dimensions of the U-type standard channel

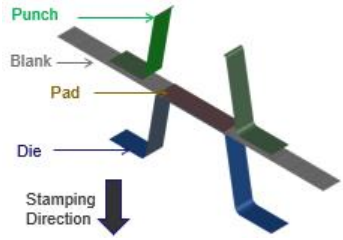


Fig. 2. Finite element model of the stamping analysis

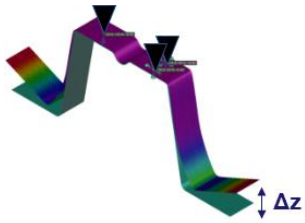


Fig. 3. Location of the fixing points in the springback analysis and definition of the springback amount

금형의 행정거리(cushion stroke)는 75mm이고, 금형과 블랭크 사이는 무윤활 조건으로 가정하여 쿨롱 마찰계수(Coulomb friction coefficient) 0.15를 부과하였다. 스프링백 해석의 구속 조건을 부과하기 위한 절

점으로 변형률이 작은 평면부 중 3점을 적용하였다. 스프링백 양은 Fig. 3에 도시한 바와 같이 성형이 완료된 제품의 플랜지 끝부분 절점에서 금형까지의 높이방향 거리인 Δz로 정의하였다.

해석에 사용된 강판소재의 물성은 Table 1에 도시하였다. 인장강도 780~1470MPa급 소재 4종을 대상으로 분석을 실시하였다.

2.2 산포해석 조건

2.1절에서 기술한 성형해석 결과를 바탕으로 판재성형 통계분석 프로그램인 AutoForm R7-Sigma module[4]을 활용하여 스프링백의 산포를 계산하고 분석하였다. 산포분석을 위한 공정설계변수로 크게 재질산포변수와 공정산포변수로 나누어 선정하였다. 소재가 가지는 기계적 물성의 산포를 의미하는 재질산포변수는 항복강도(YS), 인장강도(UTS), 재료 두께(t)로 선정하였다. 공정 중에 발생하는 변형기구 상의 산포인 공정산포변수로는 패딩력(PF), 마찰계수(μ)를 선정하였다.

Table 1. Mechanical properties of the blank materials used in the stochastic analysis

	DP780	DP980	TRIP1180	MART1470
K (MPa)	1320	1532	1707	2330
n	0.158	0.111	0.085	0.04
ϵ_0	0.0014	0.001	0.001	0.0011
R_{avg}	0.99	0.97	0.89	0.80

Table 2. Amount of scattering for the process variables

Process variable	YS	UTS	t	PF	μ
Average value	-	-	1mm	30kN	0.15
Standard deviation	4%	3%	1%	3.33%	3.33%
Perturbation amount	±10%	±6%	±5%	±10%	±10%

선정된 공정설계변수에 산포를 부과하여 성형해석 및 통계분석을 실시하였다. 블랭크 소재 생산의 사양인 인장강도가 항복강도에 비하여 양호하게 관리되는 점을 감안하여 항복강도에 비하여 인장강도의 편차를 작은 값으로 반영하였다. 항복강도의 산포 범위는 평균값에 섭동량을 ±10%로 부과하였으며, 표준편차는 4%로 가정하였다. Table 2에 선정된 5개 공정설계변수 산포량의 평균, 표준편차, 최대 섭동량을 도시하였다.

3. 산포해석 결과

3.1 스프링백 산포 기여도

본 절에서는 선정된 5개의 공정설계변수의 산포가 스프링백의 산포에 주는 영향도를 정량 비교하였으며, 유의성을 가지는 변수를 도출하였다. 스프링백 산포에 미치는 기여도를 강종에 따라 Table 3에 비교하였다. 4개 강종에서 산포에 미치는 영향도가 큰 변수는 블랭크 소재 두께와 소재의 항복강도로 분석되었다. 전체 스프링백 값에 대한 두 변수의 합계 평균 기여도(Contribution level)가 50% 이상으로 다른 3개의 설계변수와 비교할 때 산포 기여도가 매우 큰 값을 가진다. 또한 폼 공정에서 인장강도보다 항복강도의 유의성이 커 소재물성의 관리가 필요함을 보인 저자의 연구결과[5]와 경향이 일치함을 보이고 있다.

소재의 인장강도가 780MPa, 980MPa, 1180MPa, 1470MPa로 증가함에 따라 통계분석의 정확도를 나타내는 결정계수(R^2)의 값이 각각 88.9%, 87.6%, 76.0%, 71.9%로 낮아지는 경향을 보였다. 블랭크 소재의 인장강도가 증가함에 따라 분석의 정확도가 감소하고 있으며, 이에 따라 항복강도와 두께의 유의성이 감소하고 있음을 보인다.

Table 3. Contribution levels of the process variables to the springback values with respect to the ultimate tensile strength of blank sheet

	DP780	DP980	TRIP1180	MART1470
YS(%)	**37.4**	**29.8**	**39.7**	**24.8**
UTS(%)	7.2	10.2	4.7	5.0
t(%)	**43.9**	**42.3**	**22.8**	**24.9**
PF(%)	2.4	4.1	2.0	0.9
μ(%)	1.1	2.2	4.9	0.9
R^2	0.889	0.876	0.760	0.719

3.2 스프링백 산포 정량화

본 절에서는 블랭크 강종의 인장강도 변화에 따라 스프링백 산포가 보이는 경향을 고찰하기 위하여 각 강종의 스프링백 양의 산포를 계산하고 이에 대한 원인을 파악하였다.

Fig. 4와 Fig. 5에 각각 강종별 스프링백 값의 절대 산포량과 정규화한 스프링백 값의 상대 산포량을 계산한

정규분포 곡선을 도시하였다. 정규화한 스프링백 값은 스프링백 값의 평균에 대한 편차를 백분율로 계산하여 사용하였다. 소재의 인장강도가 증가함에 따라 스프링백 값은 증가하는 반면 스프링백의 절대 표준편차 및 정규화한 스프링백 값의 상대 표준편차는 감소하는 경향을 도출하였다.

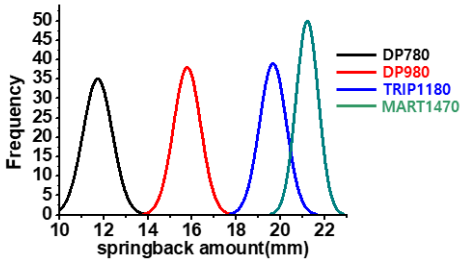


Fig. 4. Probability plot of the springback amount with respect to the ultimate tensile strength of blank sheet

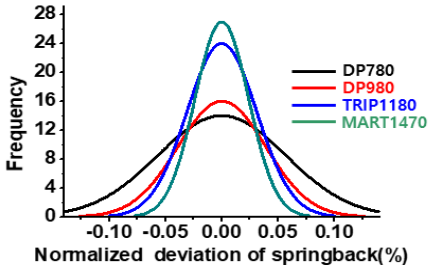


Fig. 5. Probability plot of the normalized springback deviation with respect to the ultimate tensile strength of blank sheet

3.3 스프링백 산포 분석

산포 조건을 고려한 신뢰성 기반의 최적화 기법으로 산포 해석을 실시한 결과 소재의 인장강도가 커질수록 스프링백의 절대값이 커지는 반면에 스프링백의 산포량은 줄어드는 것으로 분석되었다. 산포해석에서 얻은 결과를 분석하기 위하여 스프링백 발생의 원인이 되는 유효 소성 변형률과 유효 응력의 값 및 그 산포의 변화와 경향을 분석하였다. 굽힘 공정의 변형기구 상 스프링백 발생이 원인이 되는 소재의 위치는 응력집중이 발생하는 다이 어깨부와 펀치 어깨부로 Fig. 6에 도시하였다. 비교를 위하여 그림의 펀치 어깨부 3개 점에서의 유효 소성변형률 산포와 유효응력의 산포 평균값을 강종별로 도시하였다. Fig. 7과 Fig. 8에 각각 펀치 어깨부와 다이 어깨부에서 얻어진 결과를 비교하였다.

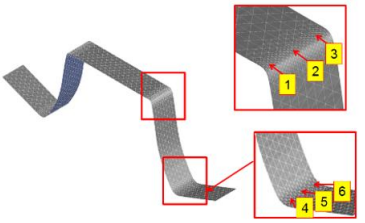
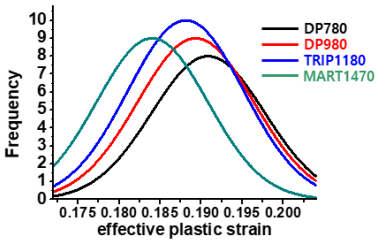
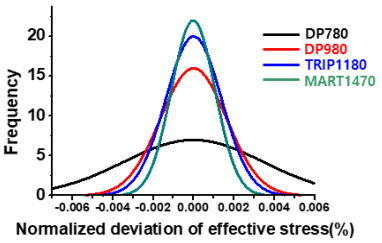


Fig. 6. Measuring location of the deformation amount such as plastic strain and stress at the punch shoulder(1,2,3) and die shoulder(4,5,6)



(a) effective strain

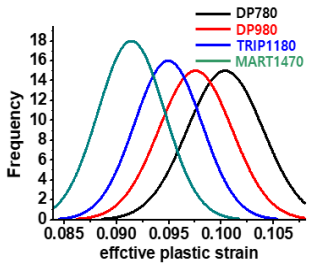


(b) effective stress

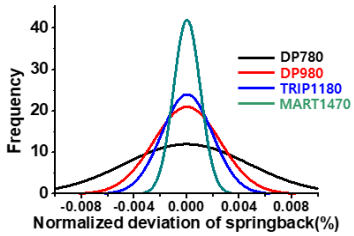
Fig. 7. Probability plot of effective strain and stress at the punch shoulder with respect to the ultimate tensile strength of blank sheet

소재의 인장강도가 증가할수록 펀치와 다이 어깨부 모두 유효 소성변형률의 산포가 감소하고 있으며 유효 응력의 상대 산포값도 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 일반적으로 고강도강 소재의 경우 인장강도의 증가에 따라 낮은 변형경화지수에 의하여 낮은 성형성을 보이며, 이에 따라 국부 변형률에 의한 변형 집중현상이 발생한다. 이에 따라 펀치어깨부와 다이어깨부 등 변형이 집중되는 부위의 변형률의 크기가 감소하게 되며, 이에 따라 변형률의 절대 산포값 역시 감소하게 된다. 응력은 변형률과 비례하는 관계로 응력의 산포값은 변형률의 산포

감소에 따라 감소하게 된다. 또한, 소재 강도가 증가하면 가공경화 현상이 감소하게 되며 변형률 변화에 따른 응력변화가 작아져 응력값의 산포가 감소하는 현상이 발생하게 된다. 스프링백은 응력값에 비례하는 연관관계를 가지므로 응력 산포량의 감소에 따라 스프링백 산포량이 감소하는 현상을 이론적으로 검증할 수 있었다.



(a) effective strain



(b) effective stress

Fig. 8. Probability plot of effective strain and stress at the die shoulder with respect to the ultimate tensile strength of blank sheet

4. 결론

본 논문에서는 고강도강 차체 부품에 널리 사용되는 기본 형상인 U 채널 성형공정에 대하여 통계 기법 기반의 최적화 설계기법을 활용한 스프링백 산포에 관련된 연구를 수행하였다. 폼공정을 적용한 성형공정에서 발생 가능성이 높은 항복강도, 인장강도, 두께 등의 재질 산포와 마찰계수와 패딩력 등 공정산포의 통계적 불확실성을 고려하였다.

판재 강도가 증가함에 따라 스프링백 평균값은 증가하는 반면 스프링백의 산포량은 감소하였다. 소재의 인장강도가 증가할 때 폼 공정에서 변형이 집중되는 펀치와 다이 어깨부의 변형률이 감소하게 되며 이에 따라 변형률의 산포도 감소하며, 결과적으로 응력의 산포가 감소하므로 스프링백 양의 상대적 산포가 감소하는 결과를 보였다.

본 논문에서 제안한 초고강도강 성형 시 스프링백 및 성형성에 관련된 산포 예측기법을 양산공정에 적용할 경우 양산공정에서 예기치 못하게 발생하는 산포불량을 감소시키는데 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

REFERENCES

[1] J. H. Wiebenga, E. H. Atzema, Y. G. An, H. Vegter & A. H. Boogaard. (2014). Effect of Material Scatter on the Plastic Behavior and Stretchability in Sheet Metal Forming. *Journal of Materials Processing Technology*, *214(2)*, 238-252. DOI : 10.1016/j.jmatprotec.2013.08.008

[2] T. Souza & B. F. Rolfe. (2010). Characterising Material and Process Variation Effects on Springback Robustness for a Semi-cylindrical Sheet Metal Forming Process. *International Journal of Mechanical Sciences*, *52(12)*, 1756-1766. DOI : 10.1016/j.ijmecsci.2010.09.009

[3] B. H. Choi, S. H. Kim & H. K. Kim. (2013). Quantitative Evaluation of Shape Accuracy in a Hat-type Product with UHSS according to the Forming Procedure. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, *30(10)*, 1111-1117. DOI : 10.7736/KSPE.2013.30.10.1111

[4] AutoForm. (2018). AutoForm-User Interface R7 Software Manual.

[5] S. B. Bae & S. H. Kim. (2018). Influence of the Material Scattering on the Springback Tendency in the Stamping Process of the UHSS. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, *35(8)*, 791-796. DOI : 10.7736/KSPE.2018.35.8.791

[6] M. K. Son. (2019). *Analysis of the Effect of Springback Scattering by Statistical Analysis Method on Ultra High Strength in the Sheet Metal Forming Process*. M. S. dissertation, Daegu University, Gyeongbuk.

[7] L. Marretta, G. Ingarao & D. Lorenzo. (2010). Design of Sheet Stamping Operations to Control Springback and Thinning : A Multi-objective Stochastic Optimization Approach. International *Journal of Mechanical Sciences*, *52(7)*, 917-927. DOI : 10.1016/j.ijmecsci.2010.03.008

[8] T. Souza & B. Rolfe. (2008). Multivariate Modeling of Variability in Sheet Metal Forming. *Journal of Materials Processing Technology*, *203(1-3)*, 1-12. DOI : 10.1016/j.jmatprotec.2007.09.075

[9] X. Zhang, P. Grimm, B. Carleer, W. Jin, G. Liu & Y. Cheng. (2014). Robust Process Design and Springback Compensation of a Decklid Inner. *Proc. Numisheet 2014*, (pp. 717-721). DOI : 10.1063/1.4850072

[10] S. Tatipala, J. Pilthammar, M. Sigvant, J. Wall & C. M. Johansson. (2018). Introductory Study of Sheet Metal Forming Simulations to Evaluate Process Robustness. *Proc. IDDRG 2018*, (pp. 1-8). DOI : 10.1088/1757-899X/418/1/012111

[11] A. Birkert, B. Hartmann, M. Scholle & M. Straub. (2018). Optimization of the Process Robustness of the Stamping of Complex Body Parts with regard to Dimensional Accuracy. *Proc. IDDRG 2018*. DOI : 10.1088/1757-899X/418/1/012107

[12] F. Pukelsheim. (1994). The Three Sigma Rule. *The American Statistician*, *48(2)*, 88-91. DOI : 10.2307/2684253

[13] Y. Aoues & A. Chateauneuf. (2010). Benchmark Study of Numerical Methods for Reliability-based Design Optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, *412(2)*, 277-294. DOI : 10.1007/s00158-009-0412-2

[14] H. S. Choi & W. J. Chung. (2016). A Numerical Study on Formability Improvement by Adjusting Blank Holding Force. *Journal of Korea Society of Die & Mold Engineering*, *10(1)*, 31-35.

[15] L. Wang & T. C. Lee. (2005). Controlled Strain Path Forming Process with Space Variant Blank Holder Force using RSM Method. *Journal of Materials Processing Technology*, *167(2-3)*, 447-455. DOI : 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.017

손 민 규(Min-Kyu Son) [정회원]

· 2017년 2월 : 대구대학교 기계공학부 (공학사)
· 2019년 2월 : 대구대학교 기계공학과 (공학석사)
· 관심분야 : 판재성형, 통계분석 최적화
· E-Mail : smk8818@naver.com

김 세 호(Se-Ho Kim) [정회원]

· 1993년 2월 : KAIST 정밀공학과 (공학사)
· 1995년 2월 : KAIST 정밀공학과 (공학석사)
· 2002년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
· 2004년 3월 ~ 현재 : 대구대학교 기계공학부 교수
· 관심분야 : 판재성형, 경량부품설계, 통계분석 최적화
· E-Mail : mvksh@daegu.ac.kr