[논문] 한국소성·가공학회지, 제 33 권 제 1 호, 2024
Transactions of Materials Processing, Vol.33, No.1, 2024
http://data.doi.or.kr/10.5228/KSTP.2024.33.1.43

DP590 고장력 강판 성형을 위한 굽힘 금형 설계에 관한 연구

천정필[1] · 안동규[2,#]

A Study on the Design of Bending Dies for Forming of DP590 High Strength Steel Sheet

J. P. Cheon and D. G. Ahn
(Received January 11, 2024 / Revised January 23, 2024 / Accepted January 23, 2024)

Abstract

A high strength steel sheet (HSSS) has widely used to improve the specific rigidity of parts and the safety of the passenger in automotive industries. However, the HSSS is difficult to manufacture precise parts through a forming process due to the reduced elongation and the increased elastic recovery. The goal of the paper is to investigate the improved design of bending dies for DP590 HSSS. The over forming type bending dies with cam systems added to the side of the formed part is proposed to improve the quality of the part. The effects of the die design and the forming parameter on formability and elastic recovery characteristics is examined using finite element analyses (FEAs). From the results of FEAs, proper die design and forming parameters are predicted.

Keywords : Bending die design, Improved quality, DP590, Forming parameters, Finite element analysis

1. 서 론

최근 자동차 산업에서는 차체의 강성 보강 및 차량 탑승자의 안전성을 높이기 위해 다양한 연구를 수행하고 있다[1]. 이러한 연구들 중 한가지 방안으로 고장력 강판 (High strength steel sheet) 을 자체 구조에 적용하는 연구들이 활발히 진행되고 있다[2]. 현재 자동차 산업에서 대표적으로 차체 구조에 사용되는 고장력 강판으로는 DP (Dual phase) 계열의 강판을 들 수 있다[3, 4]. 일반적으로 인장강도 590 MPa급의 고장력 강판과 인장강도 980 MPa 급의 초고장력 강판 (Ultra high strength steel sheet) 을 많이 사용하고 있다[3, 4].

고장력 강판은 인장강도가 높기 때문에 차체의 강도와 강성을 현저히 증가시키고 차체의 경량화를 가능하게 한다[5]. 그러나 연신율이 감소하고 탄성회복 (Elastic recovery) 량이 증가하기 때문에 복잡한 형상을 요구하는 성형 공정에서는 적용하기 어렵다[6]. 고장력 강판을 이용하여 자체를 성형하였을 때 가장 큰 문제점으로는 강성의 증가로 인한 성형 제품의 스프링 백 증가와 이로 인하여 제품의 정밀도 저하 및 관련 부품과의 조립의 어려움 등이 발생하여 차체 구조 및 성능에 좋지 않은 영향을 미치게 된다[7, 8]. 이러한 이유로 고장력 강판을 이용한 제품 성형 시 금형 설계와 성형성 분석에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다[8-10].

Ahn 등은 DL 950 고장력 강판으로 차체 내부 보강판을 성형하기 위하여 금형 설계에 따른 최대 성형 하중 및 스프링 백 특성을 해석적으로 분석하였다[9]. 이를 통하여 최적의 금형 설계 조건을 도출하였다[9]. Kwak 등은 V형 굽힘 성형 공정에서 인장강도 590-1,180 MPa 의 고장력 강판을 사용하였을 때, 금형 설계 조건과 재료 두께에 따른 탄성 회복량 및 성형 하중 변화를 해석적으로 고찰하였다[10]. Yang 등은 고장력 강판을 적용한 자동차용 판넬의

1. 조선대학교 일반대학원 기계공학과 박사과정
2. 조선대학교 기계공학과 교수
#Corresponding Author : Dept. of Mechanical Engineering, Chosun University, E-mail: smart@chosun.ac.kr, ORCID: 0000-0002-2111-300X

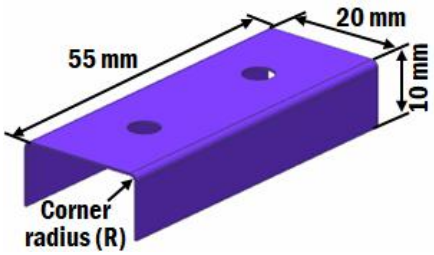


Fig. 1 Design of the fabricated part

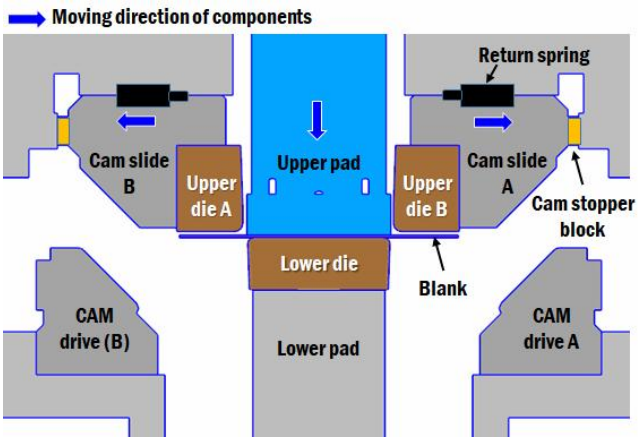


Fig. 2 Design of U bending dies

스프링 백을 보상하기 위한 변위 조정 기반의 금형 설계 기법을 제안하였다[11].

이 연구에서는 DP 590 고장력 강판의 U 형 굽힘 성형시 탄성 회복을 제어할 수 있는 금형 설계를 제안하고자 한다. 3차원 유한 요소 해석을 이용하여 금형 설계 조건 및 성형 공정 변수에 따른 성형 제품의 성형성 및 탄성 회복 특성 변화를 고찰하였다. 이 고찰 결과를 이용하여 제품의 최대 오차 (Maximum error) 측면에서 설계 기준을 만족하는 적정 금형 설계 및 성형 조건을 도출하였다.

2. 성형 제품 및 금형 설계

이 연구에서 성형하고자 하는 제품은 Fig. 1과 같은 55 mm × 20 mm × 10 mm 크기의 U 형 굽힘 성형 제품이다. 이 제품은 DP 590 고장력 판재로 성형하여 제작되며, 판재의 성형 초기 두께는 3 mm 이다.

탄성 회복량을 제어하면서 대상 제품을 성형 하기 위하여 금형을 Fig. 2와 같이 설계하였다. 하형 금형 (Lower die) 의 하부에 하부 패드 (Lower pad) 를 설치하고, 하형 금형 위에 놓인 판재 (Blank) 를 상부

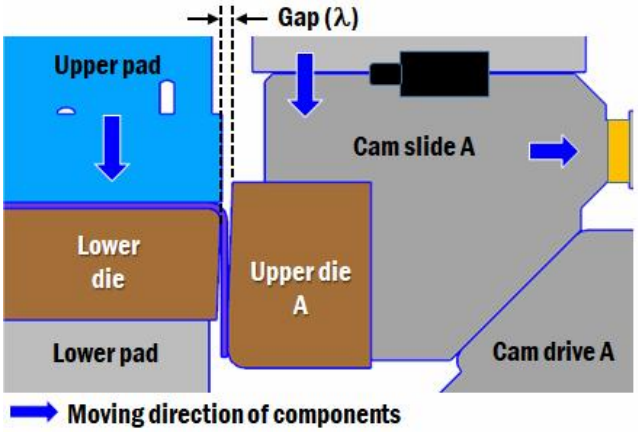
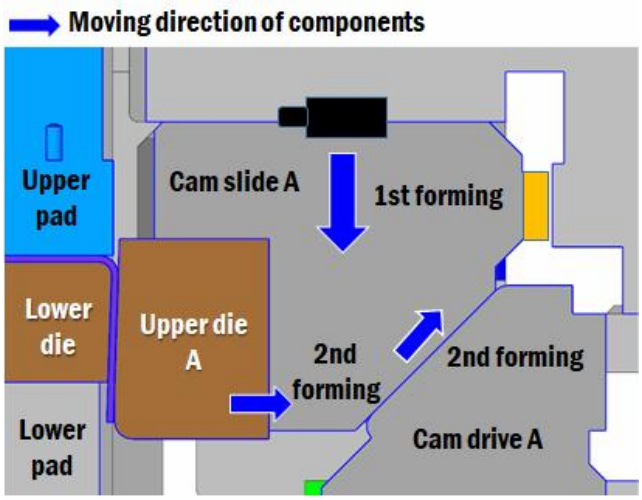


Fig. 3 1st step forming of U bending process and the definition of the gap

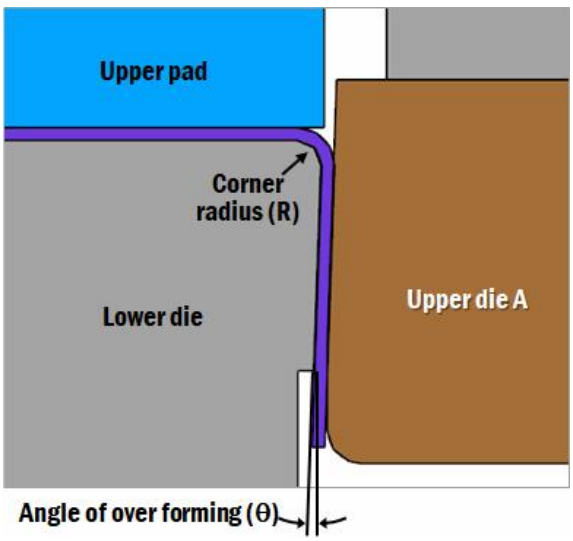
패드 (Upper pad) 가 압축하도록 금형 설계하였다. Fig. 3과 같이 좌/우 측면의 캠 슬라이드 (Cam slide) 부에 부착된 상형 금형 (Upper die) 들이 수직으로 이동하면서 판재를 1차적으로 U 형으로 굽힘 성형하도록 설계하였다. 1차 성형 (1_{st} forming) 전에 하/상형 금형 사이의 간격 (Gap: λ) 을 설정하고, 이 간격을 유지하면서 상형 금형이 수직 방향으로 이동하여 판재의 1차 굽힘 성형이 수행되도록 금형 시스템을 구성하였다.

그 후 Fig. 4(a)와 같이 캠 슬라이드가 캠 드라이브 (Cam drive) 에 접촉하면 캠 드라이브 경사면을 따라 이동하여 상형 금형이 수직 및 수평 방향으로 동시에 이동하여 판재가 금형 형상에 맞게 2차 성형 (2nd forming) 되도록 금형을 설계하였다. 2차 성형시 상형 금형의 수평 방향 미세 이동이 발생한다. 이때 탄성 회복을 보정하기 위하여 Fig. 4(b)와 같이 정해진 각도 만큼 과도 성형 (Over forming) 이 수행되도록 금형을 설계하였다. 금형의 모서리 곡률 반경 (Corner radius: R) 과 과도 성형 각도 (Angel of over forming: θ) 의 정의는 Fig. 4(b)와 같다.

이 연구에서는 금형 설계 변수로는 하형 금형의 과도 성형 각도 (θ) 를 선정하였다. 성형 공정 변수로는 하형과 상형 금형 사이의 간격 (λ), 2차 성형시 상형 금형의 수평 방향 미세 이동 거리 (Δ)및 상형 패드 행정 거리 (Stroke of upper pad: δ) 를 선정하였다. 이 연구에 사용된 하부 금형의 모서리 곡률 반경, 하형과 상형 금형 사이의 간격, 하부 금형의 과도 성형 각도 및 상형 패드 행정 거리의 범위는 Table 1과 같다. 하부 금형의 모서리 반경은 3.0 mm



(a)



(b)

Fig. 4 (a) 1st and 2nd step forming of U bending process; (b) Definition of corner radius (R) and angle of over forming (θ)

Table 1 Conditions of die design and U bending process

R (mm)	λ (mm)	Δ (mm)	θ (°)	δ (mm)
3.0	3.0-4.0	0.1-0.3	0.5-1.5	120-130

로 선정하였다. 하형과 상형 금형 사이의 간격, 2차 성형 시 상형 금형의 수평 방향 미세 이동 거리, 금형의 과도 성형 각도 및 상형 패드 행정 거리는 각각 3.0-4.0 mm, 0.1-0.3 mm, 0.5-1.5° 및 120-130 mm 로 선정하였다.

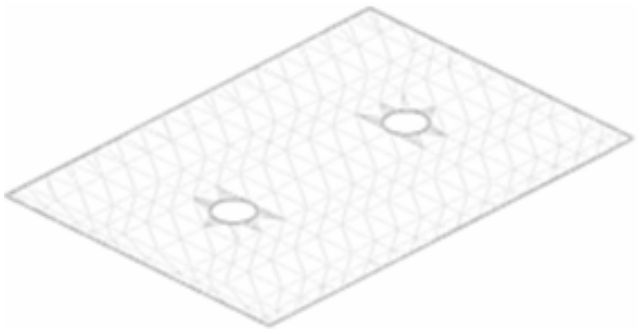


Fig. 5 Initial mesh structure of blank

3. 유한 요소 해석

금형 설계 변수와 성형 공정 변수에 따른 성형 제품의 성형성 및 탄성 회복 특성 변화를 분석/고찰하기 위하여, 3차원 유한 요소 해석 (Finite element analysis: FEA) 을 수행하였다. 3차원 유한 요소 해석을 위하여 상용 성형 해석 프로그램인 AUTOFORM R7.5 을 활용하였다.

성형 해석을 위하여 쉘 요소 (Shell element) 를 사용하여 판재를 나타내었으며, 격자 미세화 (Mesh refinement) 수준은 6으로 설정하였다. Fig. 5는 판재의 최초 유한요소해석 격자 생성 상태이다. 판재의 최초 유한 요소 (Element) 및 절점 (Node) 개수는 각각 1,811 개 및 971 개이다. 격자 미세화가 수행된 성형품의 최종 유한 요소 및 절점 개수는 각각 19,598 개 및 9,013 개이다. 성형 해석을 위한 DP 590 강판의 물성 데이터는 JMATPro 프로그램을 이용하여 도출하였다[12]. 진응력 (True stress) – 진변형율 (True strain) 선도는 식 (1)과 같이 Ludwik 모델을 이용하였다[12, 13].

$$\bar{\sigma} = 355 + 1,082\bar{\varepsilon}^{0.15} \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 과 $\bar{\varepsilon}$ 은 각각 진응력과 진 소성 변형율이다.

항복식은 Hill 의 평면 이방성 (Planar anisotropy) 모델을 이용하였다[14]. JMATPro 프로그램에서 도출된데이터를 기반으로Arcelor V9 모델을 사용하여 해석에 사용할 성형 한계 곡선 (Forming limit diagram: FLD) 을 도출하였다[12, 15]. 금형은 강체로 가정하였다.

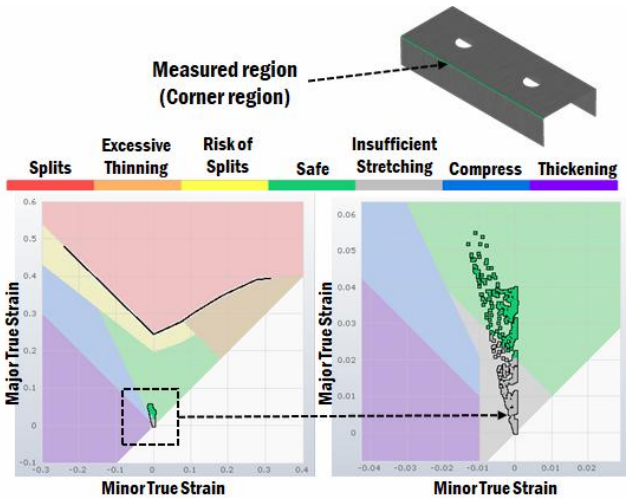


Fig. 6 Formability of the designed die (λ = 3 mm, Δ = 0 mm, θ = 1.5 °, and δ = 120 mm)

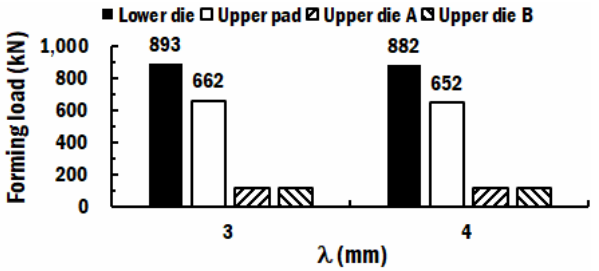


Fig. 7 Forming loads for different gaps (θ = 1.5 ° and δ = 120 mm)

4. 결과 및 고찰

4.1 성형성 및 성형 하중

대상 제품의 성형 조건 중 가장 성형성이 좋지 않을 것으로 생각되는 하형 금형의 과도 성형 각도 1.5 ° 조건에 대한 성형성 분석을 수행하였다. 성형 해석 결과 이 조건에서 U 형 굽힘 성형을 수행할 경우 Fig. 6과 같이 성형품에 결함이 발생 하지 않는 것을 알 수 있었다.

하/상형 금형 사이의 간격에 따른 성형 하중 변화를 분석한 결과, Fig. 7과 같이 하/상형 금형 사이의 간격이 증가할수록 하형 금형과 상형 패드의 하중이 감소하는 것을 알 수 있었다. 성형 하중은 하형 금형에 가장 크게 나타나며, 상형 금형에 발생하는 하중은 하형 금형의 13 % 정도임을 알 수 있었다.

4.2 탄성 회복 특성 (λ = 3 mm)

성형 해석 결과를 이용하여 하형 금형과 상형 금형 사이의 간격이 3 mm 일 때 Fig. 8 및 9와 같이 상형 금형의 수평 방향 미세 이동 거리 (Δ), 하형 금형의 과도 성형 각도 (θ) 및 상형 패드 행정 거리 (δ) 에 따른 성형품의 탄성 회복 특성 변화를 분석하였다. 상/하형 금형들 사이의 간격과 상형 금형의 수평 방향 미세 이동 거리를 동시에 고려하기 위하여 상/하형 금형 사이 총 간격 (Total gap: ϖ) 을 식 (2) 같이 정의하였다.

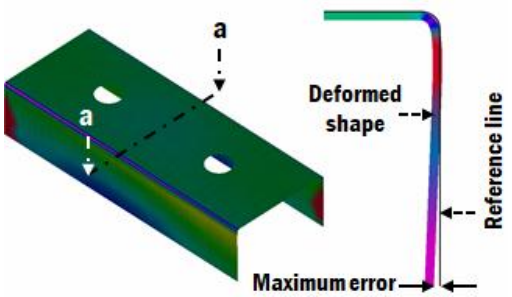
$$\varpi = \lambda + \Delta \tag{2}$$

여기서, ϖ, λ 및 Δ은 각각 상/하형 금형 사이 총 간격, 하형 금형과 상형 금형 사이의 간격 및 상형 금형의 수평 방향 미세 이동 거리이다.

탄성 회복 특성을 분석하기 위한 척도로 Fig. 8(a)와 같이 기준 형상에 대한 성형품의 최대 오차를 측정하였다. 성형품 최종 변형 형상을 측정한 단면과 최대 오차의 정의 및 측정 위치는 Fig. 8(a)와 같다. Fig. 8(b)-(e) 및 9(a)-(b)와 같이 상형 금형의 수평 방향 미세 이동 거리가 증가하여 상/하형 금형 사이 총 간격이 증가함에 따라 최대 오차는 감소하는 것을 알 수 있었다.

이 연구에서 적용된 상/하형 금형 사이 총 간격의 범위에서는 Fig. 9(a)와 (b)와 같이 과도 성형 각도가 1.5 ° 일 때 상/하형 금형 사이 총 간격이 증가에 따른 최대 오차 감소량 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 과도 성형 각도가 1.0 ° 일 때 성형품의 최대 오차가 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 과도 성형 각도가 0.5 ° 일 경우에는 상형 패드 행정 거리가 130 mm 인 경우가 120 mm 인 경우 보다 최대 오차가 작게 예측되었다. 그러나 과도 성형 각도가 1.5 ° 일 때에는 상형 패드 행정 거리가 130 mm 인 경우가 120 mm 인 경우보다 최대 오차가 증가하는 것을 알 수 있었다.

이 제품 성형을 위한 최대 허용 공차 (Tolerance)는 0.5 mm 로 설정하였다. Fig. 9(a) 및 (b)와 같이 상/하형 금형 사이의 총 간격과 과도 성형 각도가 각각 3.3 mm 이고 1.5 ° 인 경우에는 상형 패드 행정 거리에 관계 없이 최대 오차가 모두 최대 허용 공차 이하의 값으로 예측되었다. 이 결과로부터 상/하형 금형 사이의 총 간격이 3.3 mm 이고 상형 패드 행정 거리가 120-130 mm 인 경우를 적정 성형 조건으로 선정하였다. 또한 과도 성형 각도가 1.5 ° 인 경



(a)

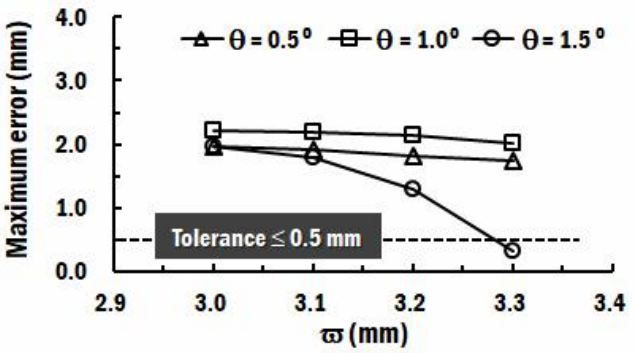
(b)

(c)

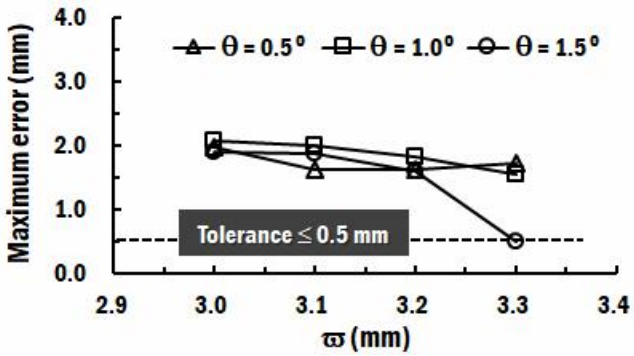
(d)

(e)

Fig. 8 (a) Measured region of maximum error; (b) Deformed shape and maximum error (Δ = 0 mm, ϖ = 3.0 mm, θ = 1.5 °, and δ = 120 mm); (c) Deformed shape and maximum error (Δ = 0.1 mm, ϖ = 3.1 mm, θ = 1.5 °, and δ = 120 mm); (d) Deformed shape and maximum error (Δ = 0.2 mm, ϖ = 3.2 mm, θ = 1.5 °, and δ = 120 mm); (e) Deformed shape and maximum error (Δ = 0.3 mm, ϖ = 3.3 mm, θ = 1.5 °, and δ = 120 mm)



(a)



(b)

Fig. 9 (a) Effects of ϖ and θ on the maximum error of the fabricated part (λ = 3 mm and δ = 120 mm); (b) Effects of ϖ and θ on the maximum error of the fabricated part (λ = 3 mm and δ = 130 mm)

우를 적정 금형 설계 조건으로 결정하였다.

4.3 탄성 회복 특성 (λ = 4 mm)

상/하형 금형 사이 간격이 4 mm 일 때 상/하형 금형 사이 총 간격, 하형 금형의 과도 성형 각도 및 상형 패드 행정 거리에 따른 성형품의 최대 오차 변화를 Fig. 10과 같이 고찰 하였다. 상/하형 금형 사이 간격이 3 mm인 경우와 다르게 상/하형 금형 사이 간격이 4 mm 인 경우에는 하형 금형의 과도 성형 각도가 증가할수록 최대 오차가 증가하는 것을 알 수 있었다.

하형 금형의 과도 성형 각도와 상형 패드 행정 거리가 각각 0.5 ° 와 130 mm 인 경우를 제외하고, 다른 하형 금형의 과도 성형 각도와 상형 패드 행정 거리의 조합에서는 상/하형 금형 사이 총 간격이 증가하여도 최대 오차가 거의 유사하게 예측되는 것을 알 수 있었다.

상형과 하형 금형 사이 간격이 4 mm 인 경우에는

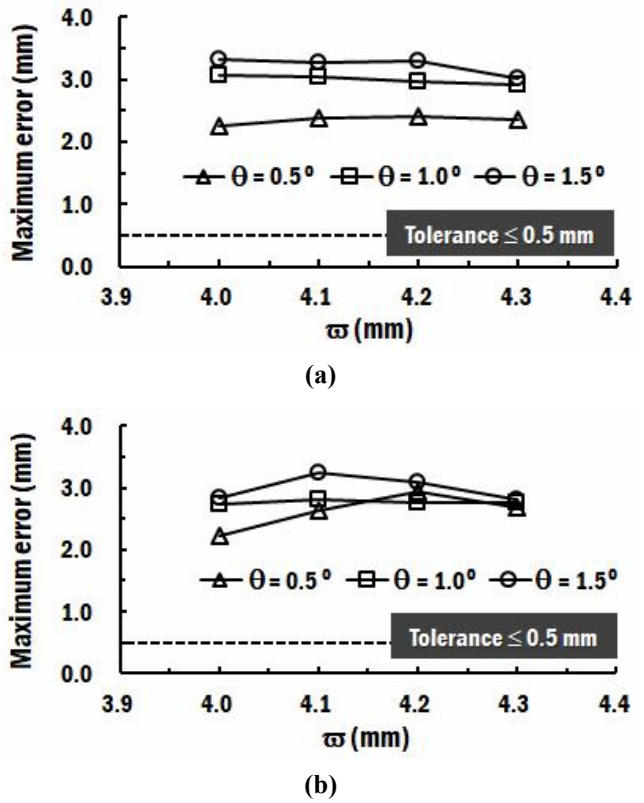


Fig. 10 (a) Effects of ϖ and θ on the maximum error of the fabricated part (λ = 4 mm and δ = 120 mm); (b) Effects of ϖ and θ on the maximum error of the fabricated part (λ = 4 mm and δ = 130 mm)

Fig. 10과 같이 하형 금형의 과도 성형 각도, 상형 패드 행정 거리 및 상/하형 금형 사이 총 간격의 모든 조합에서 예측된 최대 오차가 최대 허용 공차를 초과하는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 상/하형 금형 사이 간격이 4 mm 인 경우에는 상형 금형의 수평 방향 미세 이동 거리를 조절하여 상/하형 금형 사이 총 간격을 감소시키더라도 허용 공차 범위를 만족하는 대상 제품을 성형할 수 없음을 알 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 DP 590 고장력 강판의 U 형 굽힘 성형시 탄성 회복을 제어할 수 있는 금형 설계를 고찰하였다. 또한, 3차원 유한 요소 해석을 수행하여 금형 설계 조건 및 성형 공정 변수에 따른 성형 제품의 성형성 및 탄성 회복 특성 변화를 분석하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 캠 슬라드와 드라이브의 상형 금형의 수평 방향 및 수직 방향 미세 이동으로, 1차 굽힙 성형된 판재에 추가적인 두께 감소와 신장을 가능하게 하여 탄성 회복에 의한 성형 오차를 현저히 감소 시킬 수 있는 DP590 판재용 굽힘 금형 설계를 도출할 수 있었다.

(2) 가장 가혹한 조건인 하형 금형의 과도 성형 각도 1.5 ° 조건에 대한 성형성을 분석하여, 이 연구의 금형 설계 및 성형 조건들을 사용할 경우 DP590 판재 굽힘 성형시 결함이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 금형 설계 조건인 하형 금형의 과도 성형 각도와 성형 공정 변수인 상형 패드 행정 거리 및 상/하형 금형 사이 총 간격에 따른 성형 제품의 최대 오차 변화를 분석하여, 최대 오차가 최대 허용 공차 범위 이하인 조건인 하형 금형의 과도 성형 각도와 성형 공정 변수인 상형 패드 행정 거리 및 상/하형 금형 사이 총 간격을 예측할 수 있었다. 최종적으로 상형 패드 행정 거리가 120-130 mm 일 때 상/하형 금형 사이 총 간격과 하형 금형의 과도 성형 각도가 각각 3.3 mm 와 1.5 ° 인 경우가 적정 성형 및 금형 설계 조건임을 알 수 있었다.

향후 추가적인 유한 요소 해석과 굽힘 성형 실험을 통하여 최적 유한 요소 해석 모델을 도출할 예정이다. 또한, 이 해석 모델로 반복적인 성형 해석을 수행하여 최적 금형 설계 및 굽힘 성형 조건을 도출할 예정이다.

REFERENCES

[1] M. J. Choi, M. J. Song, S. H. Jang, 2001, A Study of Optimization on Vehicle Body Stiffness Using CAE Application, Trans. Korean Soc. Automot. Eng. Vol. 9, No. 6, pp. 129~134.

[2] S. Rosenthal, F. Maaβ, M. Kamaliev, M. Hahn, S. Gies, A. E. Tekkaya, 2020, Lightweigth in Automotive Components by Forming Technology, Automot. Innov., Vol. 3, 195~209, https://doi.org/10.1007/s42154-020-00103-3

[3] C. M. Lee, J. H. Kim, W. J. Oh, B. H. Ryu, 2017, A Study on the Analysis for Upper Seat Track of Automobile Using 1180 MPa Ultra-High Strength Steel, J. Korean Soc. Precis. Eng. Vol 34, No. 8, pp. 525~531,

https://doi.org/10.7736/KSPE.2017.34.8.525

[4] W. Y. Yang, S. Y. Lee, Y. T. Keun, J. Y. Hwang, C. S. Yoon, C. S. Shin, W. S. Cho, 2003, Springback Control in the Forming Processes for High-Strength Steel Sheets, Trans. Mater. Process. Vol. 12, No. 8, pp. 718~723, https://doi.org/10.5228/KSPP.2003.12.8.718

[5] W. Zhang, J. Xu, 2022, Advanced Lightweight Materials for Automobiles: A Review, Mater. Des. Vol. 221, 110994, https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994

[6] B. Chongthairungruang, V. Uthaisangsuk, S. Suranuntchai, S. Jirathearanat, Springback Prediction in Sheet Metal Forming of High Strength Steels, Mater. Des. Vol. 50, pp. 253~266, https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.060

[7] D. C. Ko, J. H. An, M. J. Jang, J. H. Bae, C. H. Kim, B. M. Kim, 2008, Process Design of Seat Rail in Automobile by the Advanced High Strength Steel of DP780, Trans. Mater. Process. Vol. 17, No. 3, pp. 197~202.

[8] 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

[9] D. G. Ahn, D. H. Song, G. B. Noh, G. Y. Han, 2009, Stamping Die Design of Inner Reinforcement Panel for Automotive, Korean Soc. Manuf. Process. Eng., Vol. 8, No. 2, pp. 54~61.

[10] E. J. Kwak, K. Lee, C. H. Suh, Y. H. Lim, 2011, Quantitative Analysis of Elastic Recovery Behavior after Bending of Ultra High Strength Steel Sheet: Spring-back or Spring-go, Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 6, pp. 456~460, http://dx.doi.org /10.5228/KSTP.2011.20.6.456

[11] X. A. Yang, F. Ruan, 2011, A Die Design Method for Springback Compensation Based on Displacement Adjustment, Int. J. Mech. Sci., Vol. 53, No. 5, pp. 399~406, https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2011.03.002

[12] JMATPro, 2022, https://www.sentesoftware.co.uk/jmatpro

[13] Z. Andrija, T. Zvonimir, C. Damjan, H. François, 2022, Indentifiability of Ludwick's Law Parameter Depending on the Sample Geometry via Inverse Identification Procedure, Coupled Systems Mechanics, Vol. 11, No. 2, pp. 133~149, https://hal.science/hal-03482356/document

[14] J. Lian, F. Shen, X. Jia, D.-C. Ahn, D.-C. Chae, S. Münstermann, W. Bleck, 2018, An Evolving Non-associated Hill48 Plasticity Model Accounting for Anisotropic Hardening and R-value Evolution and Its Application to Forming Limit Prediction, Int. J. Solids Struct., 151, pp. 20~44, https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.04.007

[15] S. Jadhav, M. Schoiswohl, B. Buchmayr, 2018, Applications of Finite Element Simulation in the Development of Advanced Sheet Metal Forming Processes, Berg Huettenmaenn Monatsh, 163, pp. 109~118, https://doi.org/10.1007/s00501-018-0713-0