

금형보정 모듈을 이용한 초고강도강 자동차부품용 프레스금형의 자동보정

이정흠¹ · 김세호[#]

Automatic Tool Compensation for an UHSS Automotive Component Using a Compensation Module

J. H. Lee, S. H. Kim

(Received September 14, 2015 / Revised November 25, 2015 / Accepted December 23, 2015)

Abstract

In the current study, automatic tool compensation is accomplished by using a finite element stamping analysis for a center roof rail made of UHSS in order to satisfy the specifications for shape accuracy. The initial blank shape is calculated from a finite element inverse analysis and potential forming defects such as tearing and wrinkling are determined by the finite element stamping analysis based on the initial tool shape. The blank shape is optimized to meet the shape requirements of the final product with the stamping analysis, and die compensation is determined with the information about springback. The specifications for shape accuracy were successfully achieved by the proposed die compensation scheme using the finite element stamping analysis. The current study demonstrates that the compensation tendency is similar when the proposed scheme is used or when the compensation is performed by trial and error in the press-shop. This similarity verifies that the automatic compensation scheme can be used effectively in the first stage of tool design especially for components made from UHSS.

Key Words : Automatic Tool Compensation, UHSS, Springback, Tool Design

1. 서론

최근 환경 규제에 따라 온실가스 및 유해물질 배출규제가 강화되고 있으며, 자동차 업계는 주로 차체 경량화를 통하여 설계 및 생산 관점에서 규제에 대응하고 있다. 경량화뿐만 아니라 충돌 안정성 및 구조 안정성 등을 동시에 만족하기 위해 초고강도강을 개발하여 자동차 부품 제작을 위한 프레스 성형공정에 적용하고 있다.

초고강도 강판의 적용으로 제품 성형 시 소재 강도가 높아짐에 따라 기존의 연강이나 고강도 강판에 비해 탄성 복원량이 증가하여 치수 정밀도를 얻

기 어려운 문제가 발생한다[1]. 스프링백(springback)은 판재 성형에서 나타나는 대표적인 성형 불량으로 윤활, 제품의 형상, 마찰 등과 같이 여러 인자들에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 초고강도 강판 성형 시 스프링백 문제를 해결하기 위한 다양한 연구가 진행 중에 있다. 스프링백 예측이 어려운 경우 초도 금형 제작 및 시험성형 후 정확한 금형 보정량의 파악이 불가능하여 제작 시간 및 비용이 대폭 증가하는 문제점이 있다. 최근 박판성형 해석 프로그램과 연동된 금형 자동보정 프로그램이 산업현장에서 사용되고 있으며, 일부 좋은 성과를 내는 것으로 알려져 있다[2].

1. 대구대학교 대학원 기계공학과

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Daegu University, E-mail:mvksh@daegu.ac.kr

본 논문에서는 자동차용 고강도 부품인 레일 루프 부재(member-rail roof center) 생산용 프레스 금형의 성형해석과 연계된 자동금형 보정을 수행하였다. 보정금형에 의하여 성형해석을 수행하고 해석 상의 스프링백 등을 정량적으로 파악하고 문제점을 고찰하였으며, 기존 방식으로 보정한 금형 데이터와 결과를 비교하였다.

2. 연구 대상품 및 성형공정 개요

2.1 레일 루프 부재

본 논문의 대상은 레일 루프 부재로 Fig. 1에 도시한 바와 같이 차량의 루프 중앙에 위치한다. 본 부재는 측면충돌 및 전복사고 시 승객을 보호하는 중요한 기능을 하게 되며, 부품의 특성상 초고강도강으로 제작된다. 레일 루프 부재는 특성상 성형 후 비틀림이나 스프링백 등의 과도한 불량률이 있을 경우 조립에 문제가 발생하기 때문에 금형설계 단계부터의 정확한 치수 정밀도 관리가 필요하다. Fig. 2에는 제품의 형상 및 치수를 도시하였다.

2.2 레일 루프 부재의 성형 공정

레일 루프 부재의 성형은 Fig. 3과 같이 3개 공정으로 성형한다. 제1공정(OP10)은 제품의 기본형상을 성형하는 폼(form) 공정이다. 제2공정(OP20)에서는 스프링백을 보정하기 위하여 재성형을 수행하는 리스트라이크(restrike) 과정을 수행한다. 제3공정(OP30)은 성형 후 적재 시 공기에 의한 제품의 압착을 방지하기 위한 엠보싱(select form) 성형과 피어싱(piercing) 및 트림(trim) 공정으로 이루어진다.

3. 성형공정해석 및 블랭크 최적화

금형보정 모듈을 사용하여 스프링백을 감소시키기 위해서는 금형보정을 수행하기 전 성형공정해석을 통하여 파단 및 주름 등 성형성에 문제가 없는지 판단해야 한다. 또한, 폼 성형의 경우 초기 블랭크 형상이 소재 사용률 및 치수 정밀도와 밀접한 연관이 있으므로 초기 블랭크의 결정이 중요하다. 본 논문에서는 초기 블랭크 형상을 결정하기 위하여 PAM-STAMP 2G 2012[3]의 역전개 해석(inverse analysis) 기법을 적용하여 초기 블랭크 외곽선을 도출하였으며, 성형해석과 동시에 최적화 기법을 이용



Fig. 1 A typical rail roof center member

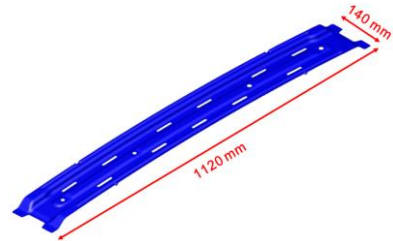


Fig. 2 Schematic shape and dimension of the rail roof center

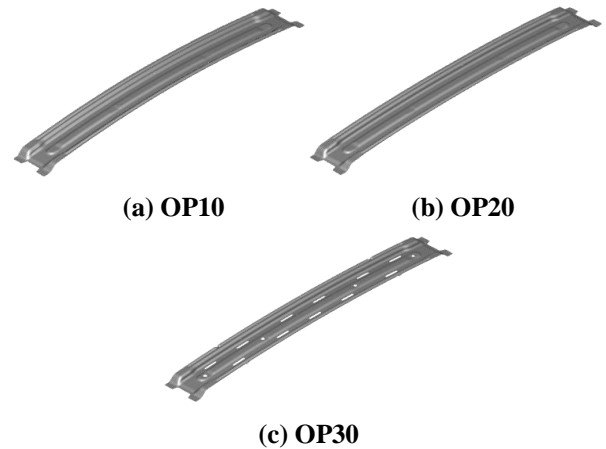


Fig. 3 Schematic forming process of the rail roof center

하여 최종 제품 데이터와 외곽선이 일치하는 블랭크 최적화(blank shape optimization)를 수행하였다. 이후 최적화된 블랭크 외곽선을 이용하여 성형공정해석을 재수행하고 금형보정 모듈의 기본 데이터가 될 스프링백 해석을 수행하였다.

3.1 재료 물성

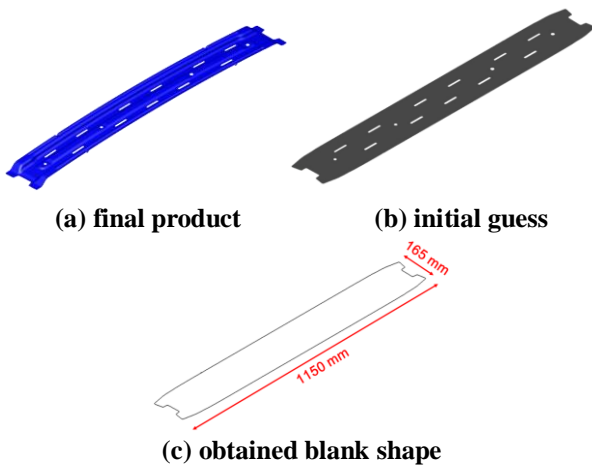
대상 부품용 소재는 인장강도 980MPa급의 초고강도 냉연강판인 SPFC 980Y이다. 강판의 기계적 물성과 각 계수들은 Table 1에 도시하였다. 항복합수는 Hill의 1948 평면이방성 모델[4]을 사용하였고, 소재의 인장-압축 거동을 적용하기 위하여 이동경화(kinematic hardening) 이론 중 하나인 Yoshida-Uemori

Table 1 Mechanical properties of the SPFC980Y

YS(MPa)	757	\bar{R}	0.818
UTS(MPa)	1089	K(MPa)	1510
E_o (%)	8.2	ϵ_0	0.00345
E_f (%)	14.7	n	0.09415

Table 2 Material parameters for Yoshida-Uemori model

α_0 (GPa)	0.39	b (GPa)	0.2	R_{sat} (GPa)	0.15
C_1	400	C_2	600	m	30
ξ	60	E_a (GPa)	160	E (GPa)	206

**Fig. 4 Initial blank shape estimated from the finite element inverse analysis**

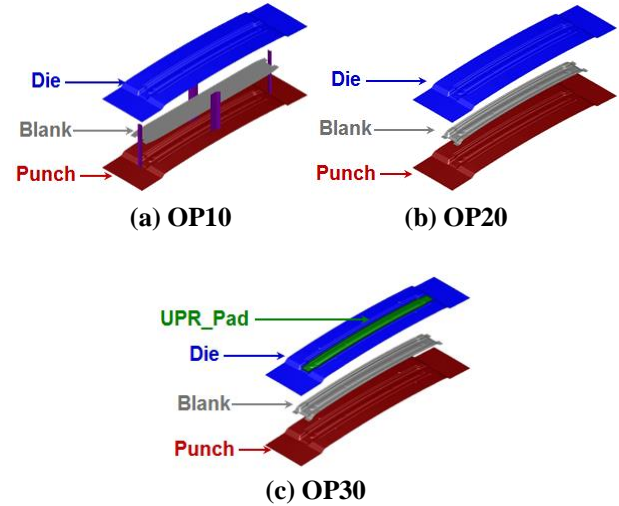
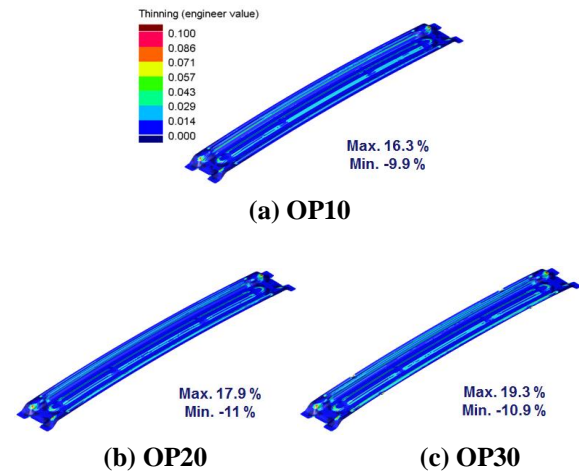
모델[5]을 이용하였다. 성형해석에 사용된 이동경화 모델의 각 계수들은 Table 2에 도시하였다.

3.2 성형공정해석

대상 부품의 성형해석 시 파단 또는 주름 등 성형 결함이 발생할 경우 자동 금형보정 시 원하는 결과를 얻는 것은 불가능해진다. 따라서, 초기에 유한요소 성형해석을 통하여 기초 성형성을 판단한 후 파단이나 주름의 문제가 없음을 확인하고 스프링백 해석을 수행하였다. 이를 위하여 초기 블랭크 형상을 결정하고 성형해석을 수행하였으며, 성형해석 결과를 파단 및 주름 관점에서 문제점을 검토하였다.

3.2.1 초기 블랭크 형상 결정

초기 블랭크의 형상을 결정하기 위하여 유한요소 역해석을 이용하여 제품 형상으로부터 단순 역전개

**Fig. 5 Finite element system of tools and blank for the stamping analysis of the rail roof center****Fig. 6 Distribution of the thickness reduction ratio at each forming stage**

를 실시하여 초기 블랭크 외곽선을 도출하였다. Fig. 4에 역전개 과정 및 최종으로 얻어진 초기 블랭크 외곽선을 도시하였다.

3.2.2 성형 해석 조건

2.2절에 설명한 성형공정 정보와 도출된 초기 블랭크 외곽선을 이용하여 성형공정의 유한요소해석을 진행하였다. 해석을 위한 금형과 블랭크 형상을 Fig. 5에 도시하였다. 블랭크는 변형체로 가정하여 BLT(Belytschko-Lin-Tsay) 쉘요소[6]를 사용하여 모델링하고, 블랭크의 초기 요소 크기가 10mm가 되도록 분할하였다. 요소의 두께방향 적분점의 수를 5개

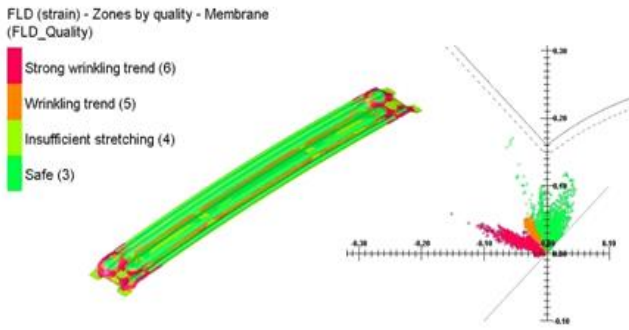


Fig. 7 Principal strain distribution with the forming limit diagram at the final forming stage

로 설정하였다. 해석시간을 단축하기 위하여 질량 증가법(mass scaling)을 사용하였다.

3.3 성형해석 결과

3.2절의 조건으로 성형해석을 수행하였으며, 결과로 얻어진 두께 감소율과 성형한계도상의 주변형률 분포를 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였다. 제1, 2, 3공정에서 얻어진 최대 두께감소율은 각각 16.3%, 17.9%, 19.3%였다. 성형된 제품의 형상 및 성형한계도상의 변형률 결과를 확인한 결과 성형 시 파단 또는 주름의 발생이 예측되지 않아 주어진 성형조건으로 블랭크 형상 최적화를 실시하였다.

3.4 블랭크 형상 최적화

폼 성형의 경우 최종단계의 불필요한 트리밍 공정을 생략하기 위하여 초기 블랭크 형상을 정확하게 예측하는 것이 중요하다. 3.2절에서 도출한 초기 블랭크 형상은 제품을 단순히 역전개하여 얻어진 결과이므로 성형 후 최종제품의 외곽선과 오차가 발생하게 된다. 이 오차를 최소화하기 위해 블랭크 형상 최적화를 실시하였다. 블랭크 형상 최적화를 위한 목적함수는 제품 데이터와 비교하여 성형제품의 외곽선이 허용 오차 0.2mm 안에 만족하도록 설정하였다. 블랭크 형상 최적화를 실시한 결과 최대 오차는 0.419mm, 최소 오차는 0.079mm, 평균 0.079mm로 허용 오차 0.2mm를 99.34%의 영역에서 만족하였다.

3.5 스프링백 예측

최적화된 블랭크 형상을 이용하여 성형해석을 수행하고 스프링백 결과를 도출하였다. 제품 데이터

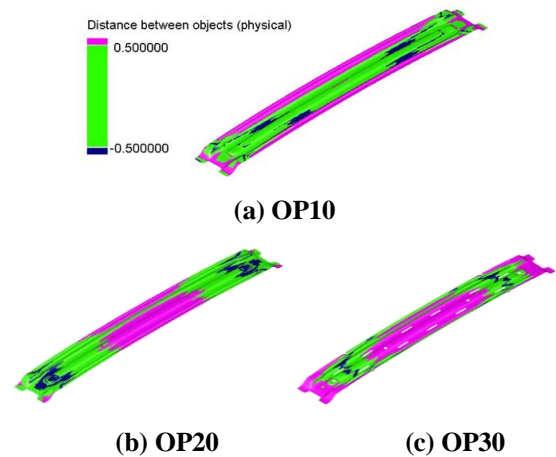


Fig. 8 Distribution of the springback amounts from the stamping analysis with the initial tool shape

기준으로 스프링백 분포를 각 공정별로 Fig. 8에도 시하였다. 모든 공정에서 얻은 해석결과가 플러쉬(flush)의 허용 공차범위인 $\pm 0.5\text{mm}$ 를 만족하지 못하였다. 최대 오차는 제 1,2,3공정에서 각각 4.98mm, 2.24mm, 4.59mm로 나타났다. 스프링백은 제1공정에서 비드부와 길이방향 끝부분, 제2공정에서 길이방향으로 중앙부, 제3공정에서 길이방향 끝부분과 중앙부에서 많이 발생하였으며, 해당 영역의 금형보정이 필요하다는 것을 확인하였다.

4. 금형보정 모듈을 활용한 자동보정

금형을 기계 가공하기 위한 전단계로 성형해석을 수행하고 스프링백 크기가 형상정밀도 조건 내로 예측될 경우 설계를 종료하고 가공이 진행된다. 성형해석 결과 형상정밀도가 만족되지 못할 경우 금형 형상의 보정을 실시하게 되며, 이를 유한요소해석 및 최적화 기법을 활용하여 자동으로 보정하는 기능을 활용할 수 있다. 자동 보정 기법은 성형해석에서 계산된 스프링백 양이 설정된 형상오차 내로 만족할 때까지 금형의 형상 보정을 진행하게 된다. 단, 보정 중 금형에서 언더컷(undercut)이 발생할 경우 해석은 중단되고, 중단되기 전까지의 보정안 중 최적의 보정안을 제시하게 된다.

본 논문에서는 PAM-STAMP 2G 2012의 자동보정 모듈(die compensation)을 활용하여 레일 루프 부재용 프레스 금형의 자동보정을 실시하고 성형해석 상에서 얻어진 형상정밀도를 검증하였다. 그리고 본 기

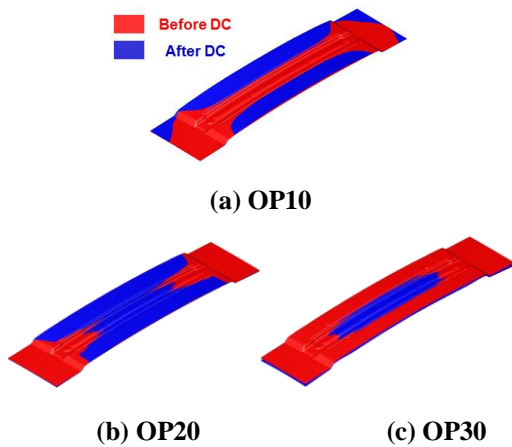


Fig. 9 Comparison of the tool shapes before and after the automatic tool compensation

법과 별개로 현장에서 시행오차에 의하여 보정한 최종 금형의 형상을 비교하여 적용된 기법의 타당성 및 문제점을 고찰하였다.

4.1 자동 금형 보정 결과

제3절에서 설명한 해석조건을 활용하여 레일 루프 부재의 성형 해석을 수행하고 자동보정 모듈을 적용하여 금형설계를 실시하였다. 제 1, 2, 3 공정에서 각각 5, 2, 6회의 반복계산이 수행되었다. 최종적으로 보정된 금형의 형상을 Fig. 9에 도시하였다. 보정 전 금형면을 측정 기준으로 한 스프링백 해석 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 제1공정과 제2공정용 금형은 플러시 기준 허용오차를 전영역에서 만족하였으나, 제3공정용 금형은 95.6%의 영역에서만 치수 정밀도를 만족하였다. 제3공정의 경우 스프링백이 중앙부와 끝부에서 많이 발생하였는데, 끝부의 스프링백을 보정하기 위해 금형의 해당부위를 아래 방향으로 보정하게 되는 것을 확인할 수 있다. 금형 끝부가 아래 방향으로 보정됨에 따라 엠보싱 부위에 서 언더컷이 발생하여 해석이 중단되었으며, 해당 시점까지 얻은 금형 형상을 결과로 도출하였다. 95% 이상의 영역에서 형상 정밀도를 만족하였으므로 보정결과를 실제 금형제작에 적용하는데 문제가 없다고 판단하였다. 최대 스프링백 크기는 제1, 2, 3공정에서 각각 0.972mm, 0.513mm, 1.024mm로 측정되었다.

4.2 금형 형상 비교

자동 금형보정을 실시한 후 얻어진 결과로부터

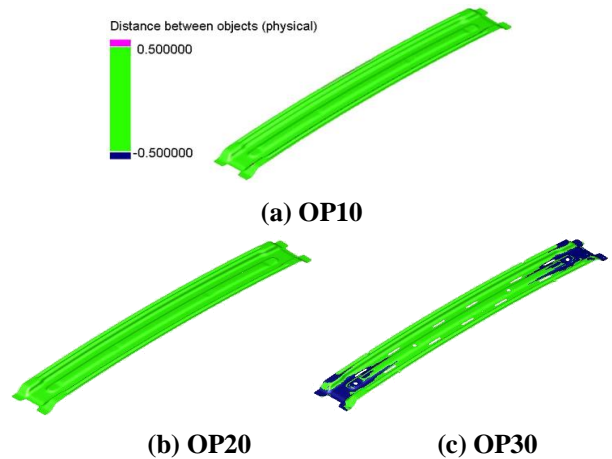


Fig.10 Distribution of the springback amounts after the automatic tool compensation

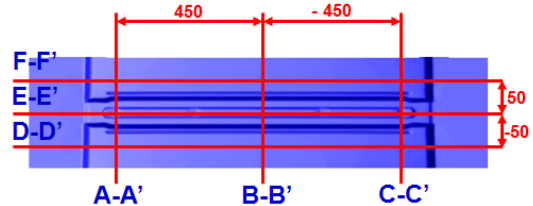


Fig.11 Measuring sections for the tool shape and the springback amount

금형면의 형상을 비교하였다. 비교에 사용된 형상은 초도 금형, 제품 데이터, 현장 보정 금형, 자동 보정 금형으로 총 4가지이다. 형상비교를 위하여 길이와 폭 방향으로 단면을 분할하여 비교하였으며, 사용된 단면의 위치와 금형면 정보는 Fig. 11에 도시하였다. Fig. 12과 Fig. 13에 각각 제1공정용과 제2공정용 금형의 단면형상을 비교하였다.

제1공정의 금형을 비교한 것을 살펴보면 초도 금형과 제품 데이터의 형상이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 자동 보정금형은 중앙부를 약 1.09 mm 하향하고 플랜지부를 약 5.19mm 상향시켜 스프링백을 보정하는 방식을 활용하였음을 확인할 수 있다. 현장 보정 금형은 중앙부를 약 0.19mm 하향하고, 플랜지부를 약 0.49mm 상향하여 보정하였다. 자동보정의 경우 현장 보정치보다 더 큰 양의 보정값이 부과된 것으로 확인된다. 끝부에서 부분적인 보정량의 차이가 발생하였으나 동일한 방법으로 스프링백 보정이 적용된 것을 확인할 수 있었다.

제2공정의 금형을 비교한 결과 현장보정과 자동

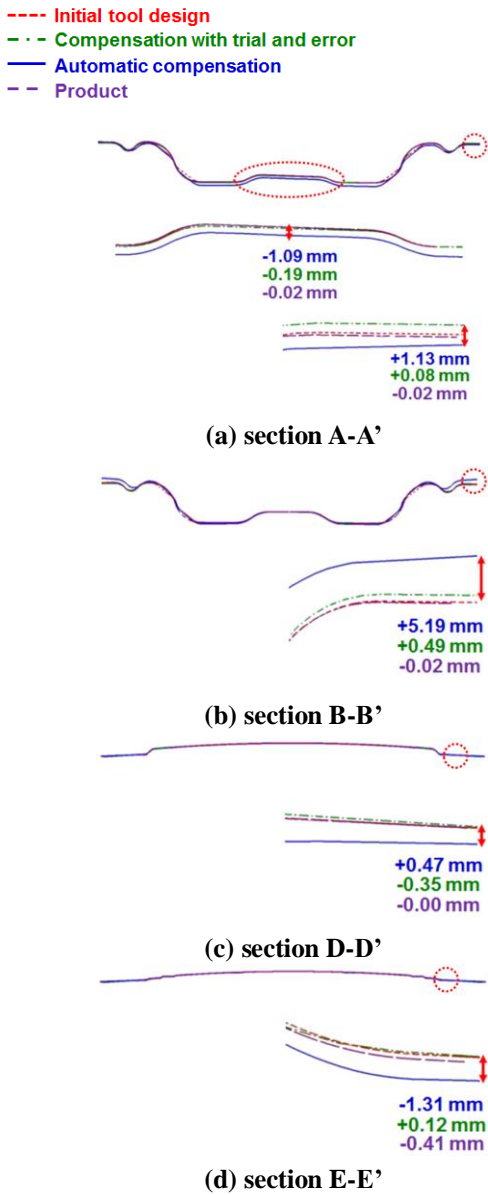


Fig.12 Comparison of the tool shapes for the OP10 stage along the designated cross sections

보정에서 얻은 형상차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 자동보정의 경우에는 제1공정에서 대부분의 금형보정을 수행하였고, 반면에 현장보정의 경우에는 주로 제2공정에서 리스트라이킹으로 스프링백을 보정한 것으로 유추할 수 있다. 즉, 자동보정 기능을 활용하고 현장에서의 일부 보정을 추가한다면 리스트라이킹 공정 없이 제 1공정만으로도 실제 제품에 가까운 형상을 성형할 수 있다는 것을 의미한다.

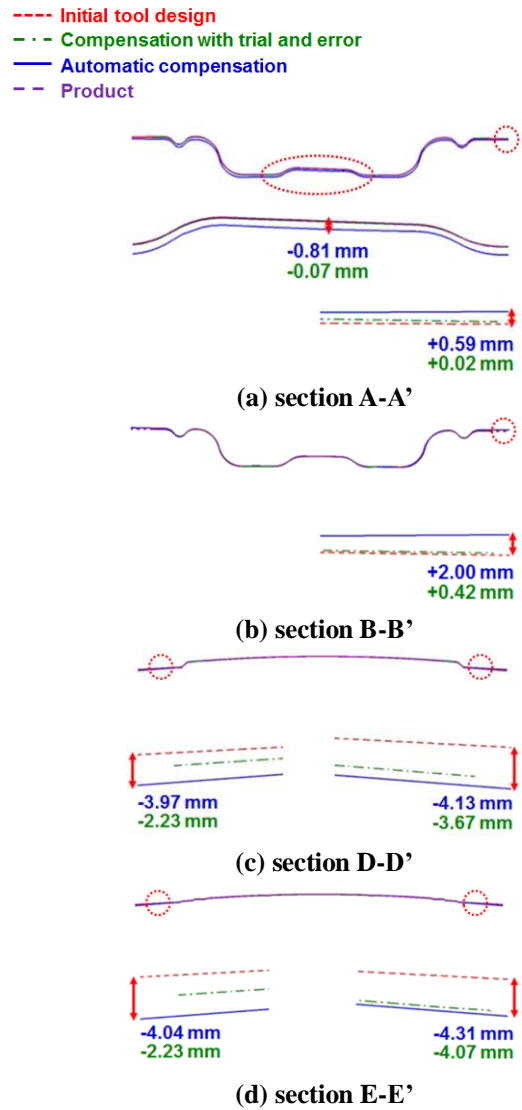


Fig.13 Comparison of the tool shapes for the OP20 stage along the designated cross sections

4.3 스프링백 예측결과 비교

본 논문에서 적용한 자동보정 금형과 현장보정 금형 및 초도금형을 이용하여 성형공정해석을 진행 하고 성형제품의 스프링백 양을 예측하였다. 스프링백에 의한 형상오차는 제품면을 기준으로 측정하였다. Fig. 14에 형상오차 결과를 비교하였다. 최대 형상오차는 초도와 현장보정 및 자동보정 금형의 경우 각각 3.95mm, 1.55mm, 0.84mm로 나타났으며, 두 가지 보정의 경우 중앙부와 끝부의 스프링백이 유사한 경향으로 감소한 것으로 확인되었다. 자동보정의 경우 현장보정과 약 0.7mm의 최대 형상오차를

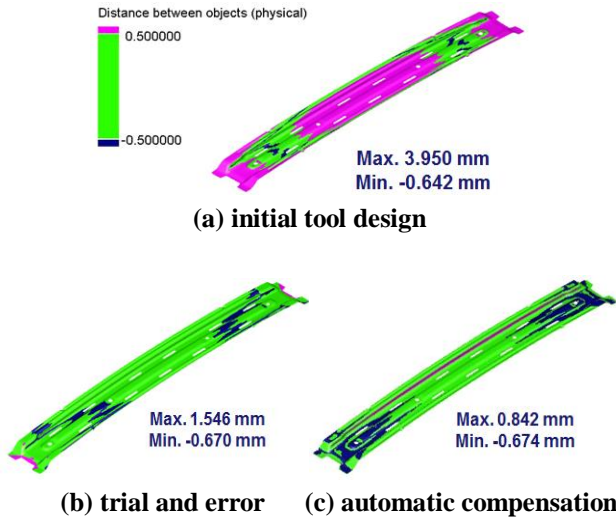


Fig.14 Distribution of the springback amount according to the compensation scheme

보이고 있으며, 이는 금형의 설계단계에서 해석과 자동보정 기능을 활용한 후 현장의 시험성형 과정에서 약간의 사상을 거치면 양산이 가능함을 의미한다. 현장보정 금형은 성형제품이 플러쉬 오차 기준 $\pm 0.5\text{mm}$ 를 만족하는 금형으로 해석상의 오차 기준 불만족은 초고강도강 성형해석 시의 스프링백 예측 정확도 문제[7]에 기인한 것으로 파악된다.

5. 결론

본 논문에서는 시험성형 및 금형보정 과정에서 많은 시간과 비용이 소요되는 초고강도강 판재부품을 성형하기 위한 프레스 금형의 자동보정 기능의 유용성을 검증하기 위하여 연구를 진행하였다. 인장강도 980MPa급의 레일 루프 부품용 프레스 금형의 자동보정 과정을 수행하고 스프링백 보정의 효용성 및 현장중심의 보정방식과의 차이를 비교하였다. 본 논문에서 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 금형보정 전 초기설계안의 성형문제점을 검증하기 위하여 초기 블랭크 형상 설계, 해석을 통한 불량 검증을 수행하였으며, 품 공정용 초기 블랭크 형상을 최적화하여 보정전 금형의 초기 공정설계안을 도출하였다.

(2) 형상오차 기준인 플러쉬 오차 $\pm 0.5\text{mm}$ 를 만족

하도록 성형해석과 연계된 자동 금형보정을 실시하였으며, 최종성형된 제품이 95.6%의 영역에서 오차 기준을 만족하는 것을 확인하였다.

(3) 자동보정 방식과 시행오차법에 의한 현장보정 방식의 결과를 비교하였을 때, 정량값의 차이는 있지만 전반적인 보정 경향은 유사하게 나타났다. 이는 자동보정 후 약간의 현장수정 작업을 거치면 금형보정 작업의 시간 및 비용을 절감할 수 있는 가능성이 있다는 것을 의미한다.

후 기

이 논문은 2015 학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의한 논문임.

REFERENCES

- [1] AHSS Application Guidelines Version 5.0, <http://www.worldautosteel.org/projects/ahss-guidelines/>
- [2] D. Y. Lee, B. S. Choi, J. H. Hwang, I. K. Baek, K. Y. Choi, 2009, Springback Control of an Automotive Surround Molding Part using Automatic Die Compensation Module, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 3, pp. 210~216.
- [3] ESI Group, 2012, PAM-STAMPTM, User's Manual.
- [4] R. Hill, 1948, A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals, Proc. Roy. Soc. Lond. A, Vol. 193, No. 1033, pp. 281~297.
- [5] F. Yoshida, T. Uemori, 2002, A Model of Large-Strain Cyclic Plasticity Describing the Bauschinger Effect and Workhardening Stagnation, Int. J. Plast., Vol. 18, No. 5-6, pp. 661~686.
- [6] T. Belytschko, J. I. Lin, C. Tsay, 1984, Explicit Algorithms for the Nonlinear Dynamics of Shells, Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 42, No. 2, pp. 225~251.
- [7] D. G. Jung, S. H. Kim, J. D. Rho, 2014, Investigation of the Prediction Accuracy for the Stamping CAE of Thin-walled Automotive Products, Trans. Mater. Process., Vol. 23, No. 7, pp. 446~452.