

가변 롤 성형 공정시 길이방향 변형률에 근거한 제품 형상 설계 기술 개발

주병돈¹ · 한상욱¹ · 신세계로¹ · 문영훈[#]

Development of Profile Design Method Based on Longitudinal Strain for Flexible Roll Forming Process

B. D. Joo, S. W. Han, S. G. R. Shin, Y. H. Moon

(Received June 26, 2013 / Revised July 24, 2013 / Accepted July 25, 2013)

Abstract

The use of roll-formed products increases every year due to its advantages, such as high production rates, reduced tooling cost and improved quality. However, till now, it is limited to part profiles with constant cross section. In recent years, the flexible roll forming process, which allows variable cross sections of profiles by adaptive roll stands, was developed. In this study, an attempt to optimize profile design for the flexible roll forming process was performed. An equation that predicts the longitudinal strain for part geometries with variable cross-sections was proposed. The relationship between geometrical parameters and the longitudinal strain was analyzed and investigations on the optimal profile design were performed. Experiments were conducted with a lab-scale roll forming machine to validate the proposed equation. The results show that the profile design method proposed in this study is feasible and parts with variable cross sections can be successfully fabricated with the flexible roll forming process.

Key Words : Flexible Roll Forming, Variable Cross Section, Profile Design, Longitudinal Strain

1. 서 론

롤 성형 공정은 박판소재를 다단으로 구성되어 있는 롤 금형에 장입을 시켜 점진적인 소성 가공을 진행하여 일정한 단면을 가지는 제품을 얻는 성형법으로 고생산성, 저생산비용, 고품질 등의 장점을 가지고 있다[1~5]. 롤 성형 공정을 이용한 자동차 부품에는 범퍼빔(bumper beam), 도어프레임(door frame), 임팩트빔(impact beam), 멤버류(member) 등이 있으며 롤 성형 공정을 이용한 부품의 생산은 지속적으로 확대되고 있다[6~9]. 하지만 기존의 롤 성형 공정은 일정한 단면을 가지는 제품으로만 그 적용이 제한된다는

단점이 있으며 최근에는 롤 성형 공정의 이러한 단점을 보완하여 공정중 롤의 위치를 이동 시킴으로써 가변의 단면을 얻는 가변 롤 성형 공정에 대한 연구가 이루어지고 있다[10~12]. 본 연구에서는 이러한 연구의 일환으로 가변 롤 성형 시 제품 형상 최적 설계 기술 개발을 위한 일련의 연구를 수행하였다. 가변 롤 공정시 단면 형상에 따른 길이방향 변형률을 예측하기 위한 수식을 제안 하였으며 이를 활용하여 단면부 폭, 측벽부 높이, 플랜지 길이 등의 변화에 따른 성형 특성을 분석 하였다. 또한 램 스케일 가변 롤 성형 장치를 이용한 실험을 통하여 제안한 수식을 활용한 제품 형상 설계에 대한 검증을 수행하였다.

1. 부산대학교 정밀기계공학과

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan National University, E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

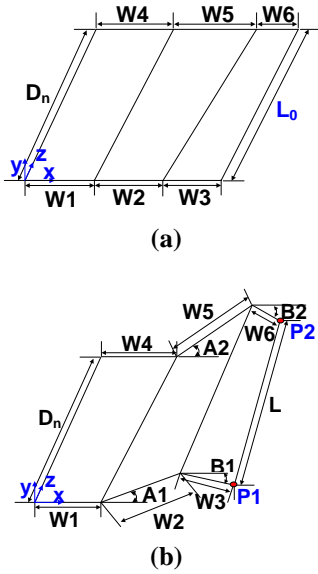


Fig. 1 Schematic of profile change during flexible roll forming process; (a) initial blank, (b) formed blank

2. 길이방향 변형률 예측식

2.1 길이방향 변형률 예측식 제안

가변 롤 성형시의 주요 결함은 길이방향 변형률 편차에 의한 뒤틀림으로 이를 예측하기 위한 수식을 제안 하였다. 수식 유도시 고려된 형상 인자들은 Fig. 1에 나타낸 바와 같으며 성형전 블랭크의 끝단부 길이 L_0 는 아래와 같이 표현 될 수 있다.

$$L_0 = \sqrt{(w_1 + w_2 + w_3 - w_4 - w_5 - w_6)^2 + D_n^2} \quad (1)$$

임의의 N-1번째 롤 스텐드에서의 끝단부 P_1 과 N 번째 롤 스텐드에서의 끝단부 P_2 의 위치는 아래와 같이 나타낼 수 있으며

$$\begin{aligned} P_1 &= (x_1, y_1, z_1) \\ x_1 &= w_1 + w_2 \cos(A_1) + w_3 \cos(B_1) \\ y_1 &= w_2 \sin(A_1) - w_3 \sin(B_1) \\ z_1 &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} P_2 &= (x_2, y_2, z_2) \\ x_2 &= w_4 + w_5 \cos(A_2) + w_6 \cos(B_2) \\ y_2 &= w_5 \sin(A_2) - w_6 \sin(B_2) \\ z_2 &= D_n \end{aligned} \quad (3)$$

형상을 바탕으로 한 길이방향 변형률은 최종적으로 다음과 같다.

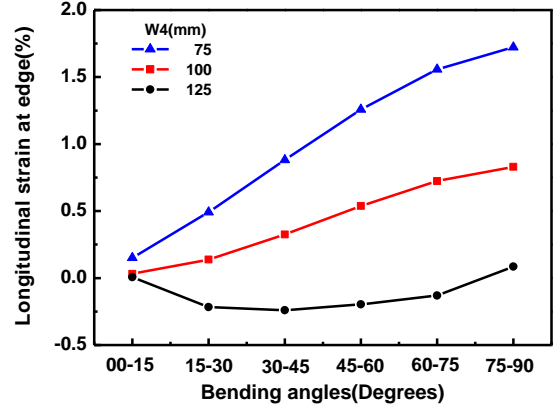


Fig. 2 Longitudinal strain at edge for lower section width(w_4), $w_5 = 100\text{mm}$, $w_6 = 75\text{mm}$

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \ln \frac{L}{L_0} \\ &= \ln \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}}{L_0} \end{aligned} \quad (4)$$

가변 롤 성형 공정을 통한 실성형시 길이방향 변형률은 강종, 성형속도, 마찰조건 등 공정인자에 따라 영향을 받으나 본 연구에서는 형상을 기반으로 하여 길이방향 변형률을 정의하였으며 이를 바탕으로 가변 롤 성형 공정시 소재 물성 및 제품 형상에 따른 최적 설계를 위한 상관관계를 도출하였다.

2.2 길이방향 변형률 예측식을 이용한 특성 분석

제안한 수식을 활용하여 hat형 단면 성형 시 형상에 따른 길이방향 변형률을 분석 하였다. 각 단의 성형양은 15°로 하여 총 6단(0°-15°-30°-45°-60°-75°-90°)의 성형률을 거쳐 90°의 최종 형상을 갖도록 하였으며 롤스텐드간 거리는 350mm, N-1번째 롤에서의 단면부 폭(w_1), 측벽부 높이(w_2), 플랜지 길이(w_3)를 각각 100mm, 100mm, 75mm로 설정하였다. 단면부 폭(w_4)에 따른 영향 분석시 $w_2 = w_5$, $w_3 = w_6$ 으로 설정 하였으며, 또한 측벽부 높이(w_5)에 따른 영향 분석시 $w_1 = w_4$, $w_3 = w_6$, 플랜지 폭(w_6)에 따른 영향 분석시 $w_1 = w_4$, $w_2 = w_5$ 로 설정 하였다.

Fig. 2에 단면부 폭(w_4)의 변화에 따른 길이방향 변형률을 나타내었다. w_4 가 w_1 보다 큰 형태. 즉, 가변 단면 성형시 점차적으로 단면부의 폭이 감소하는 형태의 경우 단면부의 폭이 일정한 일반롤 성형의 경우보다 길이방향 변형률이 낮게 나타났으며

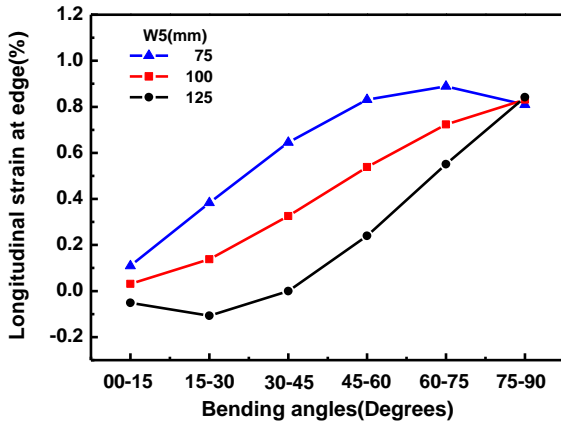


Fig. 3 Longitudinal strain at edge for side wall height (w_5), $w_4 = 100\text{mm}$, $w_6 = 75\text{mm}$

반대의 경우 길이방향 변형률이 일반롤 성형의 경우보다 높게 나타났다. 롤 성형 공정시 길이방향 변형률이 높을수록 주름, 뒤틀림 등의 결함 발생확률이 높아짐[1,3]을 감안 할 때 가변 단면 성형 시에는 단면부 폭이 감소하는 형태가 성형에 유리함을 확인 할 수 있다.

Fig. 3에 측벽부 높이(w_5) 변화에 따른 길이방향 변형률을 나타내었다. w_5 가 w_2 보다 큰 형태. 즉, 가변 단면 성형시 점차적으로 측벽부 높이가 감소하는 형태의 경우 성형 후반부의 길이방향 변형률이 크게 증가하였으며 반대의 경우 성형 초반부에 길이방향 변형률이 크게 증가하였다. 이는 측벽부 높이가 감소하는 형태의 경우 초기롤에서의 성형 각도를 늘리고 성형 후반부의 성형각도를 줄여 길이방향 변형률을 균일하게 배분 해주는 형태의 롤 설계가 필요함을 의미하며 측벽부 높이가 증가하는 형태의 경우 반대의, 즉 성형 초기 성형 각도를 줄이고 성형 후반부의 성형각도를 늘리는 형태의 성형 이력 설계가 필요함을 의미한다.

Fig. 4에 나타낸 플랜지 길이(w_6) 변화에 따른 길이방향 변형률 역시 측벽부 높이(w_5) 변화에 따른 길이방향 변형률 분석 결과와 동일한 경향을 보여 플랜지 길이가 감소하는 형태의 경우 초반부 롤에서의 성형 각도를 늘리고 플랜지 길이가 증가하는 형태의 경우 후반부 롤의 성형각도를 늘리는 형태의 롤 설계가 필요한 것으로 나타났다.

Fig. 5는 이러한 방법을 적용한 성형 이력 최적화의 예로 측벽부 높이가 감소하는 형태인 $w_4 = 100\text{mm}$, $w_5 = 125\text{mm}$, $w_6 = 75\text{mm}$ 인 조건의 길이방향

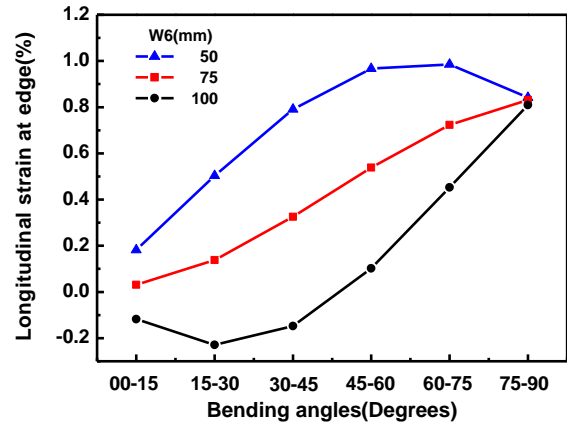


Fig. 4 Longitudinal strain at edge for flange width (w_6), $w_4 = 100\text{mm}$, $w_5 = 100\text{mm}$

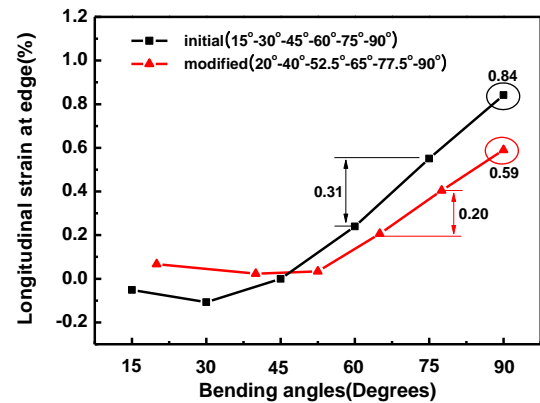


Fig. 5 Longitudinal strain at edge before and after modification of bending angle, $w_4 = 100\text{mm}$, $w_5 = 125\text{mm}$, $w_6 = 75\text{mm}$

변형률을 나타낸다. 성형이력 설계시 측벽부의 높이가 감소하는 형태임을 감안하여 기존의 동일한 15°의 성형각도를 가지는 롤 설계(0°-15°-30°-45°-60°-75°-90°)에서 초반부 성형각도 20°, 후반부 성형각도 12.5°로 수정하여 0°-20°-40°-52.5°-65°-72.5°-90°의 성형이력을 가지도록 변경하였다. 그 결과 동일한 6단의 성형률을 이용하였음에도 최대 길이방향 변형률 및 연속된 두 성형단에서의 길이방향 변형률 변화량 최대값은 기존 0.84 및 0.31에서 0.59 및 0.20으로 감소하여 수식을 통한 길이방향 변형률 예측의 유효성을 확인 할 수 있었다.

3. 실험적 검증

Fig. 6에 장치 구성의 개략도를 나타내었다. 장치는

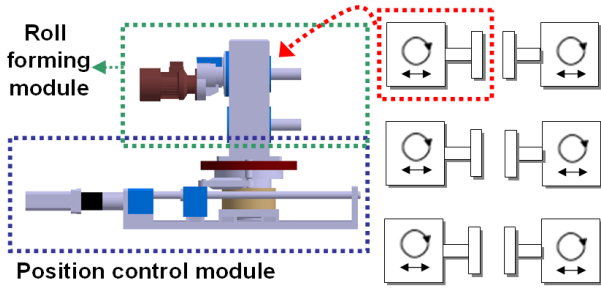


Fig. 6 Schematic of lab-scale flexible roll forming machine



Fig. 7 Lab-scale flexible roll forming machine

3단으로 설계되었으며 각각의 성형단은 폭방향 이송 및 회전이 가능한 마주보는 한쌍의 성형장치로 구성되어 있다. 또한 각각의 성형장치는 성형롤 구동부와 위치 제어부로 구성되어 있다. 제작된 3단 랩 스케일 가변 롤 성형장치를 Fig. 7에 나타내었다. 성형롤 구동부로는 800W급 인버터모터를 이용하였으며 1:200의 감속기를 설치, 성형시 부하를 견딜 수 있도록 하였다. 제어부로는 400W급의 서보모터와 1:100의 감속기를 이용하였으며 엔코더를 통해 위치를 측정하여 정밀도 및 제어능을 확보 할 수 있도록 하였다. 장치 제어를 위한 프로그램은 Labview를 이용하여 제작 하였으며 소재 취입률의 회전 속도, 성형 롤의 회전 속도가 각각 제어 가능하며 각 롤들의 위치 및 각도 또한 개별 제어가 가능하도록 하였다.

시험대상 소재로는 항복강도 145MPa, 인장강도 425MPa, 연신율 42%, 두께 0.8mm의 탄소강을 레이저 커팅하여 이용하였으며 초기 블랭크의 형상은 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 (a) shape A - 단면이 변화하지 않는 형태, (b) shape B - 단면이 일정한 각도로 증가하는 형태, (c) shape C - 변화하지 않다 1/3 지점에서 일정한 각도로 증가하는 형태의 3종류가 이용,

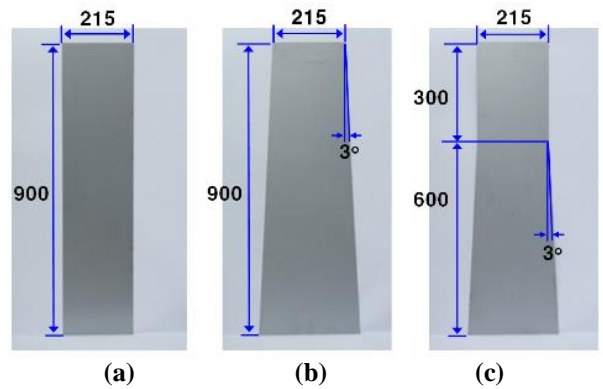


Fig. 8 Dimension of initial blank; (a) shape A, (b) shape B, (c) shape C

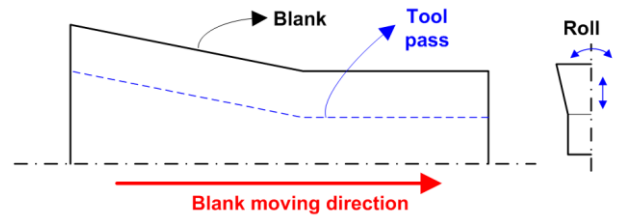


Fig. 9 Tool pass for flexible roll forming of U-channel profile

최종 성형품은 15mm 길이의 플랜지를 가지는 U형 단면을 목표 형상으로 하였다.

Fig. 9에 U형 가변 단면 성형품 제작을 위한 성형 경로 설정 예를 나타내었다. 각각의 성형롤은 블랭크의 최외각 형상을 따라 설정된 공구경로를 따르도록 입력되었으며 15mm의 측벽부 높이를 가지는 성형품을 제작하기 위하여 블랭크 끝단부와 성형롤 벤딩부 사이의 거리를 15mm로 설정 하였다. 각각의 성형롤은 블랭크가 롤에 취입됨과 동시에 구동을 시작하도록 하였으며 3단으로 구성된 장치의 특성상 3단의 성형 후 성형롤을 교체, 성형된 블랭크를 재성형 하는 방법을 이용 하였다.

Fig. 10에 결함없이 제작된 U형 가변 단면 성형품을 나타내었다. 단면이 변화하지 않는 형태 및 단면의 폭이 감소하는 형태의 경우 각단의 성형량 7.5°, 15°, 22.5° 인 조건에서 안정적인 성형이 가능하였으며 단면의 폭이 증가하는 형태의 경우 각 단의 성형량이 7.5° 인 경우와 15°인 경우 안정적인 성형이 가능하였다. 각단의 성형량이 22.5° 인 경우 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 취입불량, 주름, 뒤틀림 등의 결함이 발생하였다. 이러한 결과는 Fig. 2에서 수식을 활용하여 도출한 결과인 단면의 폭이 감소하는

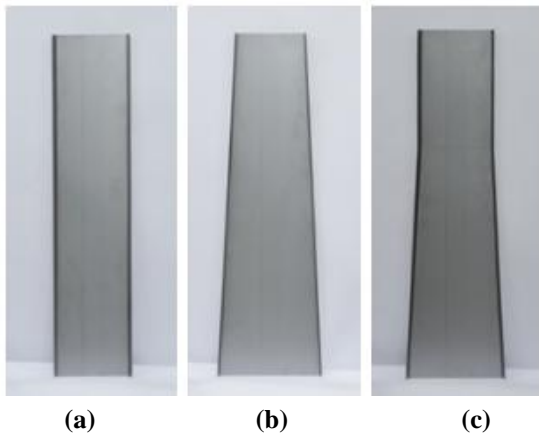


Fig.10 Fabricated flexible roll formed part; (a) shape A, (b) shape B, (c) shape C

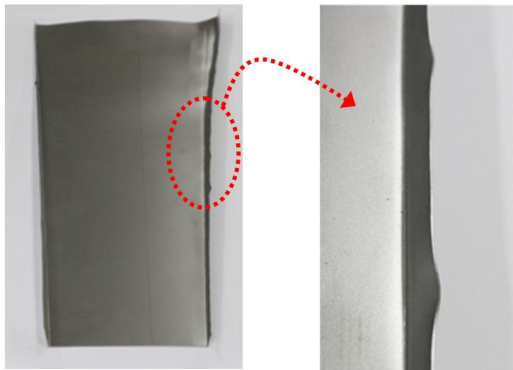


Fig.11 Wrinkling at bending angle of 22.5°

형태의 가변 단면 성형이 단면의 폭이 증가하는 형태에 비하여 유리하다는 결과와 일치하며 이는 제안한 수식을 활용한 가변 단면 성형 특성을 분석은 합당하며 이를 활용하여 가변 단면 성형품을 성공적으로 제작 할 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 가변 롤 성형 시 hat 형 단면 형상의 길이방향 변형률을 예측하기 위한 수식을 제안하였으며 이를 활용, 형상에 따른 길이방향 변형률 특성을 분석하였다. 단면부 폭이 감소하는 형상이 반대의 경우보다 길이방향 변형률 측면에서 유리하며 측벽부 높이 및 플랜지 길이가 감소하는 형상의 경우 초반부 롤에서의 성형 각도를 늘리고 플랜지 길이가 증가하는 형태의 경우 후반부 롤의 성형각도를 늘리는 형태의 롤 설계가 필요하다. 수식을 기

반으로 한 블랭크 및 롤 설계를 통한 실험적 검증 수행 결과 제안한 수식은 합당함을 알 수 있으며 이러한 결과는 제안한 수식을 활용한 단면 형상 및 롤 설계를 통하여 가변단면 성형품을 성공적으로 제작 할 수 있음을 의미한다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부 산업융합원천기술개발사업 1GPa급 이형단면 자동차 차체부품용 일체화 점진성형 기술개발(과제번호: 10040078)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] M. S. Tehrani, P. Hartley, H. M. Naeini, H. Khademizadeh, 2006, Localised Edge Buckling in Cold Roll-forming of Symmetric Channel Section, Thin Walled Struct., Vol. 44, No. 2, pp. 184~196.
- [2] S. C. Heo, Y. H. Seo, B. S. Kang, J. Kim, 2012, Numerical and Experimental Study for Improvement of Formability in Flexible Forming Process, Trans. Mater. Process, Vol. 21, No. 7, pp. 432~440.
- [3] M. Lindgren, 2007, Cold Roll Forming of a U-channel Made of High Strength Steel, J. Mater. Process. Technol., Vol. 186, No. 1, pp. 77~81.
- [4] S. H. Lee, J. H. Kim, 2013, Mechanical Properties of a Complex AA1050/AA5052 Aluminum Alloy Fabricated by an ARB Process, Korean J. Met. Mater. Vol. 51, No. 4, PP. 251~257.
- [5] H. K. Kim, J. H. Cho, H. W. Kim, J. C. Lee, 2012, 6xxx Series Al Sheets with High Formability Produced by Twin-roll Strip Casting and Asymmetric Rolling, Korean J. Met. Mater. Vol. 50, No. 7, pp. 503~509.
- [6] G. Zeng, S. H. Li, Z. Q. Yu, X. M. Lai, 2009, Optimization Design of Roll Profiles for Cold Roll Forming Based on Response Surface Method, Mater. Des., Vol. 30, No. 6, pp. 1930~1938.
- [7] G. Zeng, X. M. Lai, Z. Q. Yu, Z. Q. Lin, 2009, Numerical Simulation and Sensitivity Analysis of Parameters for Multi Stand Roll Forming of Channel Section with Outer Edge, J. Iron. Steel Res. Int., Vol.

- 16, No. 1, pp. 32~37.
- [8] T. S. Lee, G. W. Kim, 2009, Finite Element Analysis for Precision Roll Forming Process of Stainless Slide Rail, J. Kor. Soc. Pre. Eng., Vol. 16, No. 8, pp. 96~103.
- [9] B. D. Joo, S. Y. Kim, D. K. Kim, S. M. Sohn, Y. H. Moon, 2012, Proc. 14th Int. Conf. Metal Forming(editor: J. Kusiak, J. Majta, D. Szeliga), WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, pp. 715~718.
- [10] K. Sweeney, U. Grunewald, 2003, The Application of Roll Forming for Automotive Structural Parts, J. Mater. Process. Technol., Vol. 132, No. 1, pp. 9~15.
- [11] Y. H. Seo, B. S. Kang, J. Kim, 2012, Compensation for Elastic Recovery in a Flexible Forming Process using Predictive Models for Shape Error, Trans. Mater. Process, Vol. 21, No. 8, pp. 479~484.
- [12] K. Mäntyjärvi, M. Merklein, J. A. Karjalainen, 2009, UHS Steel Formability in Flexible Roll Forming, Key Eng. Mater., Vol. 410, pp. 661~668.