

초고강도 범퍼 빔의 롤 포밍 공정을 위한 플라워 패턴 설계

차태원¹ · 김재홍¹ · 김근호² · 김병민[#]

Design of Flower Pattern in Roll Forming Process for Ultra High Strength Bumper Beam

T. W. Cha, J. H. Kim, G. H. Kim, B. M. Kim

(Received July 26, 2016 / Revised September 13, 2016 / Accepted September 19, 2016)

Abstract

Recently, the roll forming process is one of the most widely used processes for manufacturing automotive part. In this study, flower patterns of roll forming process were designed to manufacture an ultra high strength bumper beam using the finite element analysis. Three types of flower patterns such as the basic type, the rotation type and the split type were designed based on the constant arc length forming method using the design software, UBECO Profil. Finite element analysis was performed to evaluate the suitability of designed flower patterns in terms of the longitudinal strain and the bow defect. The analytical results show that the split type represents more uniform longitudinal strain distributions and a good dimensional accuracy than other types of flower patterns.

Key Words : Roll Forming Process, Ultra High Strength Steel, Flower Pattern, Finite Element Analysis, Longitudinal Strain, Bow

1. 서 론

최근 세계적으로 강화된 연비 규제 및 배기가스 규제를 만족시키기 위하여 초고강도강(ultra high strength steel)을 이용한 자동차 부품의 기술개발이 활발하게 이루어지고 있다. 초고강도강은 우수한 강도를 가지지만 낮은 연성과 과도한 스프링백의 발생, 금형 마모 등의 문제로 기존의 스탬핑 공정으로 성형하기 어렵다.

이에 따라 초고강도강의 성형 공법으로 다단의 성형 롤 사이에 판재를 통과시켜 점진적인 소성변형을 가하여 제품을 생산하는 롤 포밍 공정(roll forming process)이 적용되고 있다[1]. 롤 포밍 공정은

단면의 형상이 일정하고 길이가 긴 제품을 효율적으로 생산하는 공법으로 자동차 부품인 범퍼 빔(bumper beam)을 제조하기에 적합한 공정이다. 현재, 롤 포밍 공정 설계는 설계자의 경험에 의존하고 있기 때문에 효율적인 설계 방법이 필요하다. 이에 따라 최근에 많은 연구자들은 최적화기법 및 유한요소해석을 통해서 롤 포밍 공정에 관한 많은 연구를 수행하고 있다.

Kiuchi 등은 유한요소해석을 통해 길이방향 변형률을 계산하였으며, 해석결과를 기반으로 하여 롤 포밍 공정의 최적화 알고리즘을 제안하였다[2, 3]. Ona와 Jimma 등은 비대칭 채널의 휨 및 비틀림을 방지하기 위한 롤의 압하력 조절 및 오버벤딩(over-

1. 부산대학교 정밀가공시스템 전공

2. ㈜ 아산 중앙기술연구소

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

bending)적용 방법을 제안하였으며, 실험을 통해 검증하였다[4, 5]. Bhattacharyya와 Smith 등은 롤 포밍 공정의 각 패스에서 굽힘 각 및 플랜지(flange)의 길이를 실험과 이론을 통해 예측하였다[6-7]. 기존의 롤 포밍 공정에 대한 연구는 단순한 현상에 대해 수행되었기 때문에 복잡한 형상의 제품에 적용하기에는 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 형상의 초고강도강 범퍼 빔을 롤 포밍 공정으로 제조하기 위한 플라워 패턴을 설계하였다. 플라워 패턴은 일정 호의 길이 방법(constant arc length method)을 기반으로 하여 성형 순서에 따라 기본형(basic type), 회전형(rotation type) 그리고 분배형(split type)으로 설계하였다. 설계된 플라워 패턴을 적용하여 유한요소해석을 수행하였으며 길이방향 변형률(longitudinal strain) 및 보우 결함을 측정하여 플라워 패턴이 제품에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 플라워 패턴 설계

2.1 플라워 패턴 설계 방법

본 연구에서는 범퍼 빔 제품의 형상 난이도를 고려하여, 롤 포밍 공정의 패스 수를 27패스로 설정하였다. 또한, 플라워 패턴의 굽힘각은 3.33°씩 등각도로 증가하도록 하였다. 플라워 패턴의 굽힘 각 설계 방법은 일정 호의 길이 및 일정 호의 반경(constant radius method)으로 구분된다. 두 가지 방법은 식(1)과 (2)에 의해 각 단의 굽힘 반경 및 길이[1]를 계산하여 플라워 패턴을 설계하였다.

$$R_i = 57.2958 \frac{L}{\alpha} - kt \tag{1}$$

$$L = 0.0175 \times (R_i + kt) \times \alpha \tag{2}$$



Fig. 1 Cross section and shape of bumper beam

여기서, R_i 는 내부 호 반경, L 은 호의 길이, α 는 최종형상의 굽힘 각, t 는 판재의 두께 그리고 k 는 굽힘 허용계수이다. 굽힘 허용계수는 초고강도강의 특성을 고려하여 0.5로 설정하였다[1]. 일반적으로, 일정 호의 반경 방법에 비해 일정 호의 길이 방법이 균일한 길이방향 변형률 분포를 가지며, 결함이 적게 발생하는 것으로 알려져 있다[1]. 따라서 본 연구에서는 일정 호의 길이 방법으로 플라워 패턴을 설계하였다.

2.2 성형 순서에 따른 플라워 패턴 설계

본 연구에서는 초고강도 범퍼 빔 제조를 위해 성형 순서에 따른 플라워 패턴을 설계하였다. 플라워 패턴은 설계 프로그램인 UBECO Profil software[8]을 활용하여 설계하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

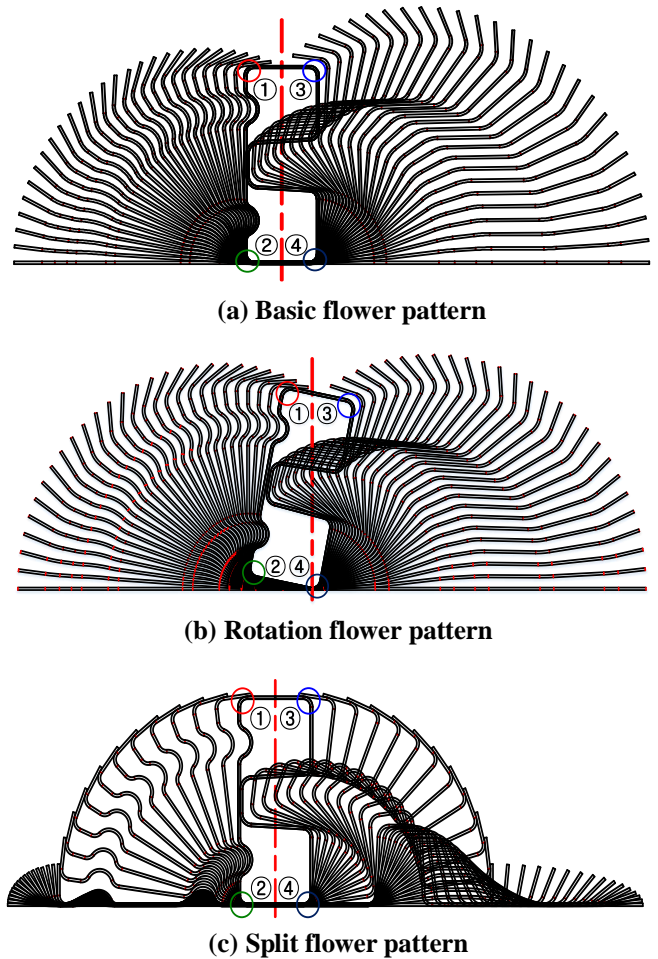


Fig. 2 Flower pattern for manufacturing bumper beam according to deformation procedure

Fig. 2(a)는 일반적으로 많이 사용되는 기본형 플라워 패턴으로 각 패스에서 모든 굽힘각을 동시에 점진적으로 성형하는 방법이다. 기본형 플라워 패턴은 비대칭 단면의 형상에 적용할 경우, 불균일한 성형면적으로 인해 롤 포밍 공정에서 결함이 발생할 가능성이 높다[9].

비대칭 단면인 범퍼 빔을 기본형 플라워 패턴을 적용하여 성형할 경우, 좌우측의 변형길이가 불균일하게 되기 때문에 Fig. 2(b)와 같이 회전형 플라워 패턴을 작성하였다. 회전형 플라워 패턴을 적용하여 성형할 경우, 좌우측의 변형길이가 균일하게 되어 결함이 적게 발생할 것으로 예상된다.

Fig. 2(c)는 분배형 플라워 패턴을 나타낸다. 분배형 플라워 패턴은 플랜지를 먼저 성형하고 마지막에 하단부를 성형하기 때문에 복잡한 형상에 적합한 방법이다. 또한, 분배형 플라워 패턴은 다른 플라워 패턴에 비해, 측면 롤의 사용을 최소화할 수 있는 장점이 있다.

3. 롤 포밍 공정의 유한요소해석

3.1 유한요소해석 조건

본 연구에서는 초고강도 범퍼 빔의 롤 포밍 공정을 수행하여 플라워 패턴이 제품에 미치는 영향에 조사하였다. 적용된 소재는 MART1470 강판이며 인장시험을 통해 기계적 물성을 측정하여 유한요소해석에 반영하였다. 시험편은 금속재료 인장시험편 규격을 참고하여 KS B 0801 표준 시험편 5호로 제작하였으며 인장시험 속도는 2mm/min으로 설정하여 시험을 수행하였다. 인장시험으로 확보된 결과는 Table 1에 나타내었다.

유한요소해석은 상용 소프트웨어인 Abaqus 6.13-Explicit를 사용하였으며 롤 포밍 공정의 해석 조건을 Table 2에 요약하여 나타내었다. 총 패스 수는 27 패스이며, 스탠드간의 거리는 500mm로, 롤의 직경은 420mm로 설정하였다. 롤 포밍 공정에서 성형속도는 20m/min이며 상·하부 롤의 회전속도는 동일하게 유지하였다. 유한요소해석 시, 롤 포밍 공정 해석시간을 단축하기 위해 굽힘부의 메쉬(mesh)크기는 3mm로, 평행부의 메쉬 크기는 5mm로 설정하였다. 또한, 금형과 시편간의 쿨롱 마찰계수(coulomb friction)는 무윤활 조건으로 가정하여 0.1를 부가하였다[9].

Table 1 Mechanical property of materials

Material	MART 1470
Young's modulus	206GPa
Tensile strength	1517MPa
Yield strength	1342MPa
Elongation	7.3%
Thickness	1.3mm
K	2365.92MPa
n-value	0.1224

Table 2 Conditions of FE-analysis for roll forming

FE-simulation S/W	Abaqus 6.13, Explicit
Distance of the stands	500mm
Linear velocity	20m/min
Roll diameter	420mm
Friction coefficient(μ)	0.1
Total number of roll pass	27passes

3.2 성형 롤 설계

본 연구에서는 일반형 플라워 패턴을 활용하여 성형 롤을 설계하였다. 먼저, 롤 포밍 공정에서 일반적으로 사용하는 상·하부 롤만을 이용하여 해석을 수행하였다. 선행 해석 수행 결과, Fig. 3과 같이 14패스에서 결함이 발생할 것으로 예측되었다. 이에 따라, 14패스부터 27패스까지 측면 롤만을 사용하는 조건과 상·하·측면 롤을 사용하는 조건으로 설계를 변경하여 해석을 수행하였다. 측면 롤만을 사용하는 경우, Fig. 4(a)와 같이 휨 결함이 발생한 것을 확인하였다. 상·하·측면 롤을 사용하는 경우에는 Fig. 4(b)와 같이 목표형상과 일치하는 제품을 확보할 수 있을 것으로 예측되었다. 이와 같은 방법으로 회전형 및 분배형 플라워 패턴에 대한 성형 롤 설계를 수행하였으며 이를 Table 3에 나타내었다.

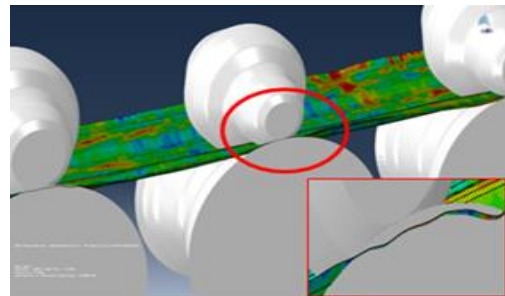
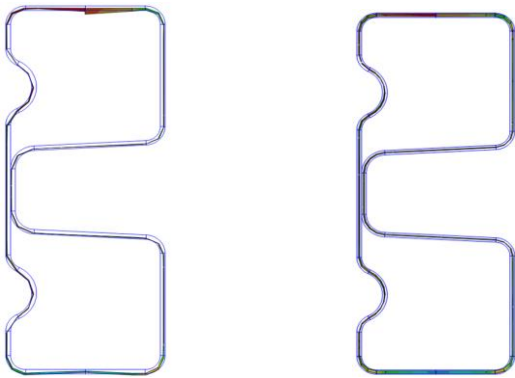


Fig. 3 Defect in the 14th pass



(a) Side roll (b) Upper-lower and side roll

Fig. 4 Shape of bumper beam according to forming roll

Table 3 Results for design of forming roll

Type	Pass no.	Forming roll
Basic flower pattern	1~14passes	Upper and lower roll
	15~27passes	Upper, lower and side roll
Rotation flower pattern	1~14passes	Upper and lower roll
	15~27passes	Upper, lower and side roll
Split flower pattern	1~20passes	Upper and lower roll
	21~27passes	Upper, lower and side roll

4. 유한요소해석 결과

4.1 길이방향 변형률

포밍 공정 중, 소재의 중심 부분은 롤의 입구측에서 압축변형이 발생하고 롤 출구측에서는 인장변형이 일어난다. 반면에 끝단 부분에서는 중심부분과 반대로 변형이 발생하게 된다. 따라서, 불균일한 잔류응력이 발생하여 제품 결함의 원인이 된다[10]. 각 패스별 길이방향 변형률의 편차는 제품 결함의 발생 가능성을 예측할 수 있는 척도가 되며, 편차가 클수록 제품에서 결함이 발생할 가능성이 높다[11].

본 연구에서 플라워 패턴에 따라 Fig. 5에 나타난 주요 성형부의 길이방향 변형률을 예측하였으며[12], 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 일반형 플라워 패턴을 이용한 경우에는 길이방향 변형률의 최대 편차가 0.032%로 나타났으며 회전형 플라워 패턴을 이용한 경우에는 0.018%로 나타났다. 또한 분배형 플

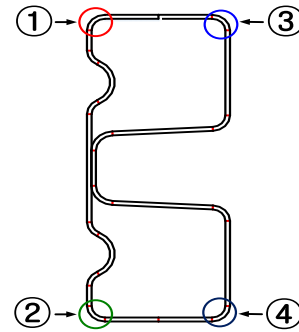


Fig. 5 Measuring points of longitudinal strain

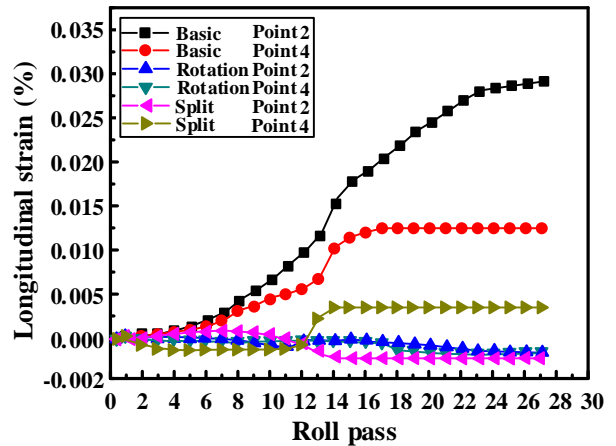
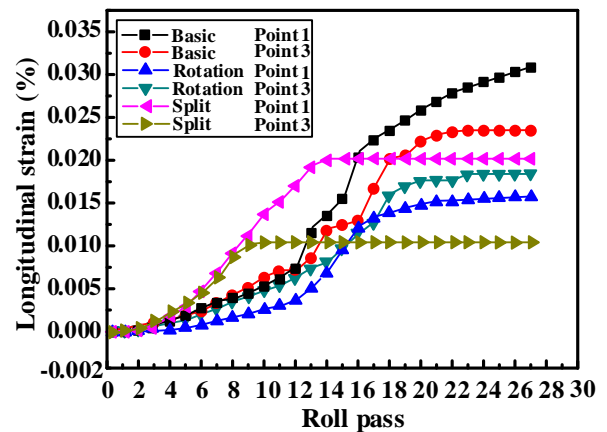


Fig. 6 Longitudinal strain for various flower pattern

라워 패턴을 이용한 경우에는 길이방향 변형률의 최대 편차가 회전형 플라워 패턴을 이용한 경우와 유사한 수준으로 나타났다. 이에 따라 일반 플라워 패턴을 사용하여 제품을 생산할 경우, 결함이 발생하여 최종 제품의 품질이 저하될 것으로 예상된다. 반면에 회전형 및 분배형 플라워 패턴을 사용할 경우, 제품의 결함이 적게 발생할 것으로 예상된다.

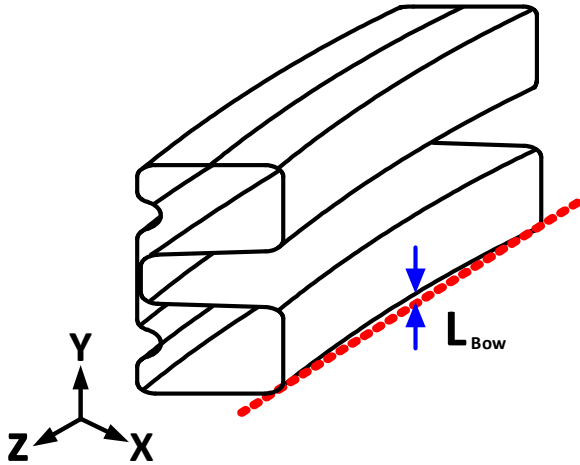


Fig. 7 Measure method on bow

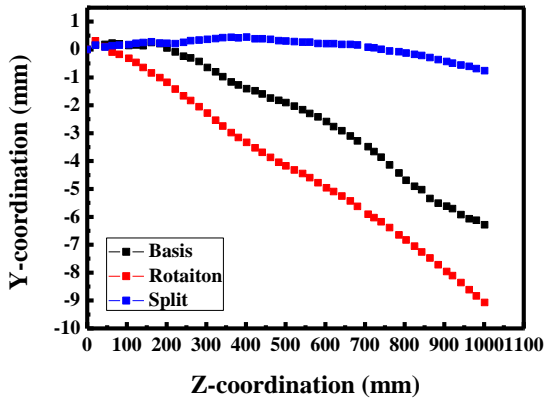


Fig. 8 Bow defect for various flower pattern

4.2 보우 결함

롤 포밍 공정과 같이 길이가 긴 제품을 연속으로 생산하는 공정의 경우, 최종제품의 진직도가 저하될 수 있다[8]. Fig. 7에 진직도가 저하되어 발생하는 결함인 보우 결함을 나타내었다. 보우는 성형된 제품이 수직 방향으로 제품의 휨을 말한다[1]. 롤 포밍 공정에서 소재의 연신과 수축으로 변형률 분포의 불균형으로 인해 결함이 발생한다.

본 연구에서는 플라워 패턴에 따른 보우 결함을 예측하였으며 이를 Fig. 8에 나타내었다. 일반형 플라워 패턴은 6.599mm, 회전형 플라워 패턴은 9.387mm 그리고 분배형 플라워 패턴은 1.205mm의 보우 결함이 발생하였다. 이에 따라 분배형 플라워 패턴을 이용하여 제품을 생산할 경우, 보우 결함이 가장 적게 발생하여 우수한 치수 정밀도를 나타낼 것으로 예상된다.

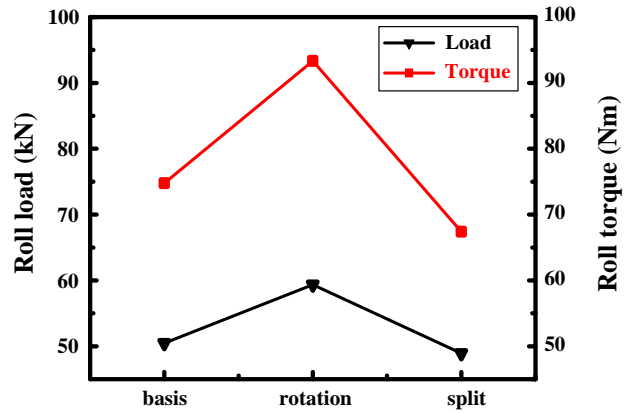


Fig. 9 Roll load and torque on flower pattern

4.3 하중

본 연구에서는 유한요소해석을 통해 플라워 패턴에 따른 롤의 성형하중 및 토크를 평가하였다. 제품 성형 시, 롤의 성형하중 및 토크가 적게 필요할수록 장비의 제약이 적어지며 롤의 마모나 파손의 위험도 감소한다.

플라워 패턴에서 따라 발생하는 최대 성형하중 및 토크를 평가하여 Fig. 9에 나타내었다. 제품 제조 시, 일반형 플라워 패턴은 50.47kN, 회전형 플라워 패턴은 59.35kN 그리고 분배형 플라워 패턴은 48.93kN의 하중이 필요할 것으로 평가되었다. 또한, 플라워 패턴에 따른 토크의 평가 시, 성형하중 평가 결과와 유사한 경향으로 나타났다. 따라서 분배형 플라워 패턴이 범퍼 빔의 제조 공정에 가장 적합할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 초고강도 범퍼 빔을 롤 포밍 공정으로 제조하기 위한 다양한 플라워 패턴을 설계하였으며, 플라워 패턴이 제품에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

- (1) 등각도 성형 및 일정 호의 길이 방법을 기반으로 하여 기본형, 회전형 그리고 분배형 플라워 패턴을 작성하였다. 또한, 유한요소해석을 수행하여 플라워 패턴에 따른 성형 롤을 설계하였다. 초고강도 범퍼 빔의 롤 포밍 공정에서 전반부는 상·하 롤을 후반부는 상·하·측면 롤을 사용할 경우 우수한 제품을 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 유한요소해석 결과를 기반으로 제품 결함의 발생 가능성을 예측할 수 있는 척도가 되는 길이방향 변형률의 편차를 분석하였다. 분석 결과, 회전형 및 분배형 플라워 패턴을 이용하여 제품을 생산할 경우, 결함이 적게 발생할 것으로 예측되었다.

(3) 롤 포밍 공정에서 진직도가 저하되어 발생할 수 있는 보우 결함을 예측하여 평가하였다. 평가 결과, 분배형 플라워 패턴을 이용하여 제품을 생산할 경우, 1.025mm 치수 정밀도를 확보할 수 있을 것으로 예측되었다.

(4) 롤 포밍 공정 설계 시, 주요 고려사항인 롤의 성형하중과 토크를 평가하였다. 평가 결과, 분배형 플라워 패턴을 적용하여 제품을 생산할 경우, 롤의 성형하중은 48.93kN 및 토크는 65.8Nm로 적게 필요할 것으로 예측되었다.

(5) 플라워 패턴이 제품에 미치는 영향을 조사한 결과, 분배형 플라워 패턴이 범퍼 빔의 제조 공정에 가장 적합할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 산업기술혁신사업의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.1005779).

REFERENCES

- [1] G. T. Halmos, 2006, Roll forming Handbook, CRC Taylor & Francis, New York, chapter1 and 5.
- [2] M. Kiuchi, 1973, Analysis Strudy on Cold Roll Forming Process, Report of the Inst. Sci., Univ. of Tokyo, No. 23.
- [3] M. Kiuchi, T. Koudobashi, 1984, Proceedings of the Third International Conference on Rotary Metal Working Process, Kyoto, pp. 423~427.
- [4] H. Ona, T. Jimma, N. Fukaya, 1983, Experiments into Cold Roll Forming of Straight Asymmetrical Channels, J. Mech. Working Technol., Vol. 8, No. 4, pp. 273~291.
- [5] H. Ona, T. Jimma, H. Kozono, 1984, A Computer Aided Design System for Cold Roll Forming, Adv. Technol. Plast., Vol. 1, pp. 508~513.
- [6] D. Bhattacharyya, P. D. Smith, C. H. Yee, I. F. Collins, 1984, The Prediction of Deformation Length in Cold Roll Forming, J. Mech. Working Technol., Vol. 9, No. 2, pp. 181~191.
- [7] D. Bhattacharyya, P. D. Smith., S. K. Thadakamalla, I. F. Collins, 1987, The Prediction of Roll Load in Cold Roll Forming, J. Mech. Working Technol., Vol.14, pp. 363~379.
- [8] PROFIL, Rollform Design Software UBECO, www.ubeco.com.
- [9] S. H. Jeong, 2008, A Study on Roll Forming Simulation of under Rail, Trans. Kor. Soc. Mach. Tool. Eng., Vol.17, pp. 78~85.
- [10] D. K. Kim, 2006, Analysis of Effects of The Roll Forming Process Parameters of Bumper Rail, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 4, pp. 19~23.
- [11] M. S. Tehrani, P. Jartley, H. M. Naeini, H. Khademizaeh, 2006, Localised Edge Buckling in Cold Roll-Forming of Symmetric Channel Section, Thin-Walled Struct., Vol. 44, No. 2, pp. 184~196.
- [12] D. K. Kim, 2010, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 282~285.