**[논문]** 한국소성가공학회지, 제 23 권 제 6 호, 2014
*Transactions of Materials Processing, Vol.23, No.6, 2014*
http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2014.23.6.369


# 가변롤성형 공정을 이용한 단면이 가변하는 프로파일의 형상변수 분석에 관한 연구

박종철[1]· 차명환[2]· 김돈건[2]· 남재복[2]· 양동열[#]

# Investigation of Shape Parameters for a Profile with Variable-cross Sections Produced by Flexible Roll Forming

**J. C. Park, M. W. Cha, D. G. Kim, J. B. Nam, D. Y. Yang**
(Received July 15, 2014 / Revised August 18, 2014 / Accepted September 3, 2014)

**Abstract**

Flexible roll forming allows profiles to have variable cross-sections. However, the profile may have some shape errors, such as, warping which is a major defect. The shape error is induced by geometrical deviations in both the concave zone and the convex zone. In the current study, flexible roll forming was modeled with FE simulations to analyze the shape error and the longitudinal strain distribution along the flange section over the profile. A distribution of analytically calculated longitudinal strains was used to develop relationships between the shape error and the longitudinal strain distribution as a function of the defined shape parameters for the profile. The FE simulations showed that the shape error is primarily affected by the deviations between the distribution of analytically calculated longitudinal strain and the longitudinal strain distribution of the profile. The results show that the shape error can be controlled by designing the shape parameters to control the geometrical deviations at the flange section in the transition zones.

**Key Words** : Flexible Roll Forming, Variable Cross Section, 3D Shapes of Roll-formed Profile

## 1. 서 론

롤성형 공정(Roll forming)은 길이방향으로 긴 판재를 연속적으로 배열된 성형롤에 공급하여 순차적으로 굽힘성형한다. 롤성형 공정은 빠른 속도로 제품 생산이 가능하며, 경량화를 위한 고장력강과 같은 난성형재를 높은 정밀도로 제작이 가능하다. 하지만, 전통적인 롤성형 공정은 단면형상이 일정한 프로파일의 제작에 국한되어 있어 산업에서 요구되는 복잡한 단면형상의 생산에는 한계점이 있다.

가변롤성형(Flexible roll forming) 공정은 성형롤이 장착된 롤 스탠드를 CNC로 순차적으로 제어하여 가변단면(Variable cross section)을 갖는 프로파일의 성형이 가능하도록 하였다[1]. 하지만, 단면이 가변하는 프로파일은 가변롤성형 과정에서 발생하는 부가형상결함으로 인해 산업적 적용이 어렵다. 주요 형상결함인 뒤틀림(Warping)은 Fig. 1과 같이 프로파일의 천이구간에서 발생하는 초기시편과 성형후, 시편간의 편차에 의해 발생한다[2]. 이를 개선하기 위해 가변단면 롤성형 공정에 형상방지를 위한 부가공정들이 개발되었다[3, 4]. 기존의 연구사례들에서는 단일 가변단면을 갖는 프로파일에 대해 형상변형을 비교해 부가공정의 효과만을 분석하였다.

본 연구에서는 산업에 적용될 가변단면을 갖는

1. 한국과학기술원 기계공학과
2. (주) POSCO
# Corresponding Author : Department of Mechanical Engineering, KAIST, E-mail:dyyang@kaist.ac.kr

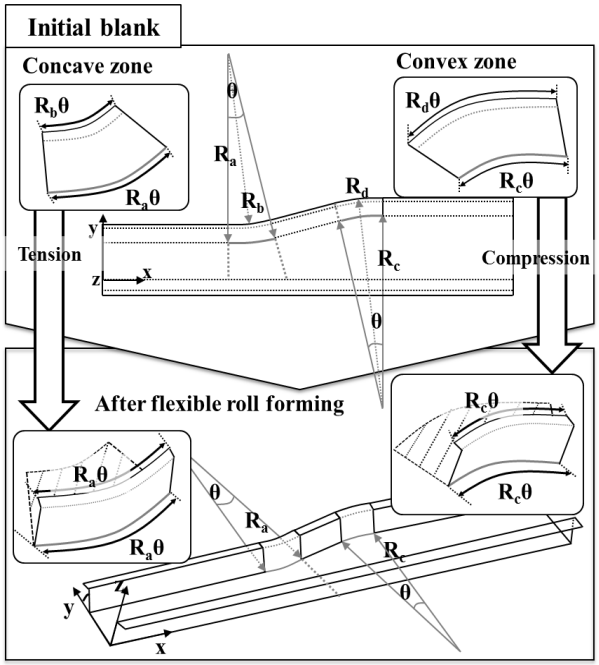


**Fig. 1 Schematics of an initial metal strip of a profile with variable cross-sections and a roll-formed profile fabricated by flexible roll forming**

프로파일의 형상은 다양하여 부가공정의 개발 및 분석에 선행하여 프로파일의 형상변수에 대한 분석과 형상변형의 원인에 대해 분석하였다. 가변단면을 갖는 프로파일의 형상변수와 형상변형량을 정의하고, 이를 통해 형상변수에 따른 정량적인 형상변형의 거동을 분석하였다. 또한, 형상변형의 원인을 분석하기 위해 천이영역의 형상변수에 따른 성형 전후의 기하학적 형상편차를 간단한 이론식으로 계산하고, 이를 해석결과와 비교하였다.

프로파일의 형상변수들은 실험계획법을 통해 분석하였고, 이에 따라 각 형상변수 인자들의 거동을 분석하였다. 각 Case는 실험을 통해 유효성을 검증한 유한요소해석모델을 통해 수행하였다.

## 2. 가변롤성형 공정

가변롤성형 공정은 Fig. 2와 같이 초기시편(Initial metal strip)을 길이방향으로 공급하면 롤 스탠드(Roll stand)의 성형롤에 의해 순차적으로 굽힘성형된다. 시편이 공급됨에 따라 성형롤이 단면의 가변하는 롤 경로(Roll trajectory)를 따라 회전운동과 병진운동하여 가변단면을 갖는 프로파일을 롤성형한다.

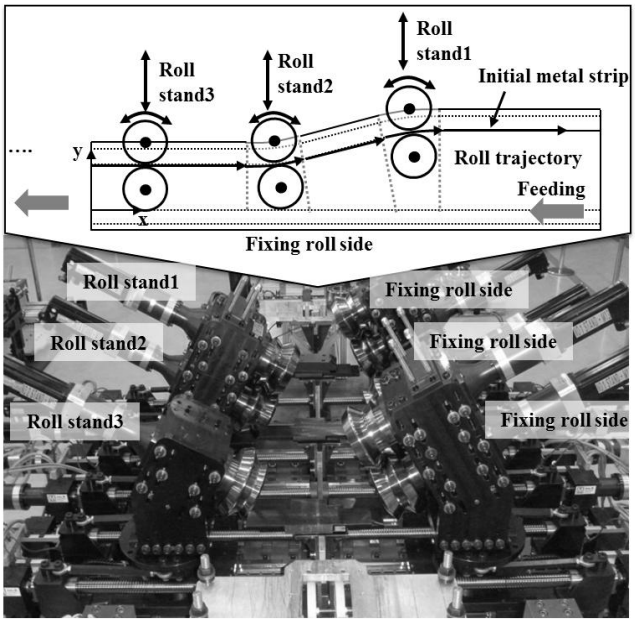


**Fig. 2 Schematic and a figure of flexible roll forming**

## 3. 천이영역의 이론적 형상편차

### 3.1 형상변수의 정의와 이론적 형상편차

Fig. 3은 단면이 가변하는 프로파일의 초기시편 개념도이다. 초기시편은 레이저로 절단하여 일정단면인 변을 절곡선(Folding line)을 따라 절곡하였다. Fig. 3의 절곡된 변은 Fig. 2의 고정 성형롤(Fixing roll side)에 의해 고정되어 소재가 안정적으로 공급되도록 한다. 또한, 한 변만을 성형하여 실험과 해석의 효율을 높이고자 하였다. 가변단면의 형상변수는 Fig. 3과 같이 $R_a$는 오목(Concave)영역에서 성형롤 경로의 곡률반경, $R_c$는 볼록(Convex)영역에서 성형롤 경로의 곡률반경, θ는 천이영역의 가변각도, $B_w$는 플랜지(Flange)영역, $B_f$는 플랜지 끝단(Flange edge)영역, L은 직선영역의 길이로 정의하였다.

Fig. 1에서 언급한 각 천이영역에서 발생한 성형전후의 형상편차는 Fig. 3에서 정의된 형상변수로 오목영역은 식(1)과 볼록영역은 식(2)로 나타낼 수 있다. 일반적으로 롤성형 공정에서 발생하는 부가적인 길이방향 변형률은 고려하지 않고, Fig. 1과 같이 성형전후의 기하학적 형상편차만을 고려한 식이다. 이는 성형후의 프로파일에 형상변형이 없는 상태를 롤경로(Roll trajectory)의 길이와 플랜지 끝단의 길이가 같아질 때로 가정한 것이다.

Fig. 3에서 프로파일의 롤경로선을 기준으로 프로

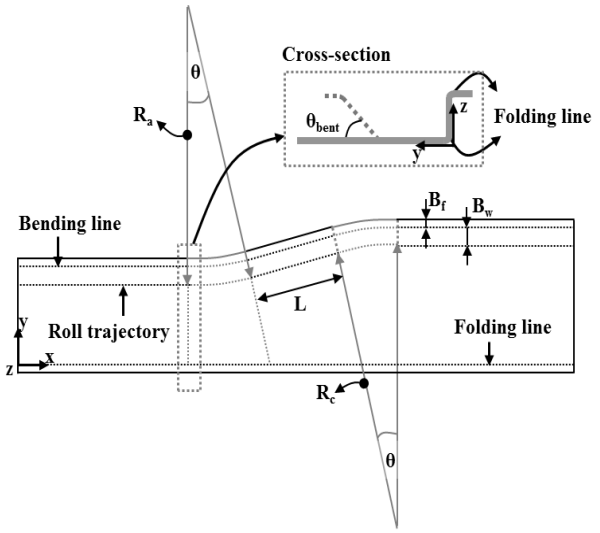


**Fig. 3 Schematics of defined shape parameters of an initial metal strip with variable cross-sections**

파일 플랜지 끝단의 오목영역은 인장변형이 발생하고, 볼록영역은 압축변형이 발생함을 보여준다. $\theta_{bent}$는 가변롤성형 공정에 의한 굽힘각도이며, 굽힘각도가 90°에 가깝게 굽힘될수록 성형전후 프로파일의 형상편차가 커짐을 보여준다.

$$\varepsilon_{conconve} = \int \frac{\Delta x}{dx} = \int_{R_a - B_f - B_w}^{R_a} \left(\frac{dR\theta}{R\theta}\right) = \ln\left(\frac{R_a}{R_a - B_f - B_w}\right)$$

$$= \ln\left(\frac{R_a}{R_a - B_f - B_w}\right) * \frac{\theta_{bent}}{90}, \text{ [at } \theta_{bent}=90°] \quad (1)$$

$$\varepsilon_{convex} = \ln\left(\frac{R_C}{R_C + B_f + B_w}\right) * \frac{\theta_{bent}}{90}, \text{ [at } \theta_{bent}=90°] \quad (2)$$

## 3.2 형상변형 정의

단면이 가변하는 프로파일은 소재의 공급방향 즉, 길이방향으로 시편 전체에 걸쳐 뒤틀림(Warping)이 발생한다. 이를 정량적으로 평가하기 위해 Fig. 4(a)와 같이 플랜지의 측정선(Measured line)을 정의하고, Fig. 4(b)와 같이 국부좌표계(Local coordinate system)를 기준으로 측정선에서 각 노드(Node)점의 z′좌표값을 측정하여 형상변형량을 비교하였다. 이는 형상편차에 의한 프로파일의 뒤틀림이 z′축 방향뿐 아니라 y축과 x′축 방향으로 영향을 미치지만, 측정선의 z′축 좌표값들이 각 축 방향의 형상변형을 포함하고, 길이방향으로의 뒤틀림을 잘 반영할 수 있어 형상변형으로 정의하였다. 이를 정량적으로 비교하기 위해

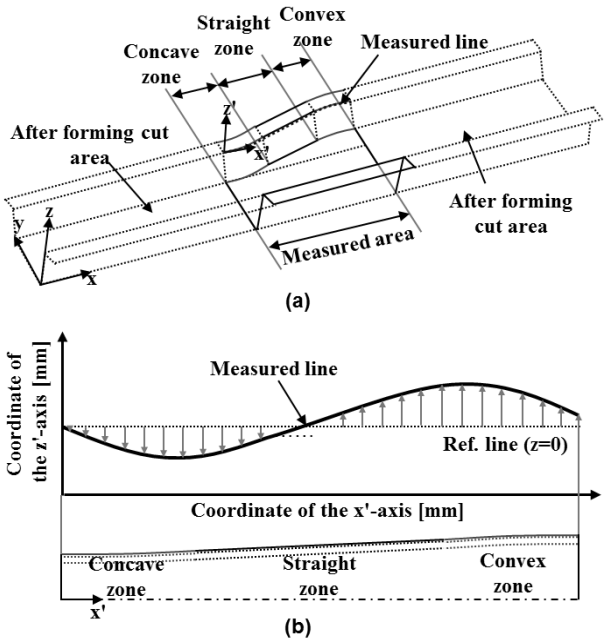


**Fig. 4 Schematics of a profile: (a) Measured line of the profile and, (b) Measured line on the coordinate of x'-axis and y'-axis**

측정선에서 각 노드점의 z′축 좌표값을 측정하여 제곱평균제곱근(Root Mean Square, RMS)값으로 평가하였다. 이는 식(3)과 같다.

$$\varepsilon_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{N} z'^2}{N-1}} \quad (3)$$

## 3.3 길이방향 변형률 분석

본 연구에서는 각 천이영역에서의 기준 길이방향 변형률 값으로 식(1)과 식(2)를 선정하여 길이방향 변형률 분포를 Fig. 5와 같이 나타내었고, 해석결과를 통해 플랜지 영역의 길이방향 변형률 분포를 비교하였다.

이론적으로 계산한 길이방향 변형률의 분포는 Fig. 5에서와 같이 각 천이영역과 직선영역의 경계에서 불연속적인 길이방향 변형률 분포를 갖는다. 하지만, 소재가 길이방향으로 연속적으로 성형되는 롤성형공정은 천이영역과 직선영역의 경계를 포함한 시편의 전체영역에 걸쳐 길이방향 변형률의 분포는 연속적이다.

가변롤성형된 프로파일이 이론적으로 계산된 길이방향 변형률 분포와 같이 불연속적인 분포를 갖

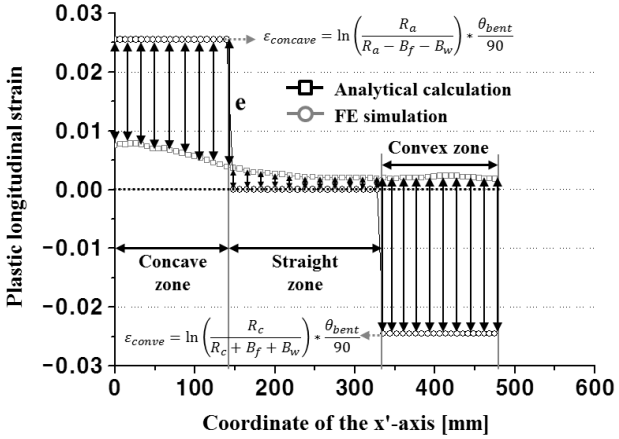


**Fig. 5 Longitudinal strain distributions of the analytical calculation and the FE simulation**

기는 어렵지만, 이론적으로 계산한 길이방향 변형률의 분포는 형상변형을 최소화하기 위한 기준값으로 비교가능하다. 이론적 길이방향 변형률 값과 해석결과를 통해 측정한 각 노드점의 길이방향 변형률 차이를 형상변형률 편차(Geometrical strain deviation)(e)로 정의하고, 각 형상변형률 편차값(e)들을 식(4)와 같이 제곱평균제곱근(RMS)값으로 계산해 형상변형과 함께 분석하였다.

$$\varepsilon_{dev.} = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{N} e^2}{N-1}} \tag{4}$$

## 4. 가변롤성형 공정의 유한요소해석

롤성형공정 과정에서 프로파일 플랜지영역의 길이방향 변형률이 과도하게 발생할 경우, 프로파일의 부가적인 형상결함을 유발해 롤성형공정의 성형롤 설계를 비롯한 공정변수의 제어를 통해 최소화할 필요가 있다[5]. 하지만, 롤성형공정은 부가적인 형상결함을 방지하며 최종제품을 성형하기 위한 정립된 롤설계 방법이 부족하여 FE-code를 이용해 길이방향 변형률을 예측하고, 부가적인 형상결함을 방지하기 위한 롤성형 공정조건을 도출하였다. 특히, 기존 연구사례들에서 상용 FE-code를 이용해 롤성형공정 프로파일의 형상과 길이방향 변형률을 잘 예측할 수 있음을 보여주었다[6, 7].

### 4.1 가변롤성형 공정 모델링

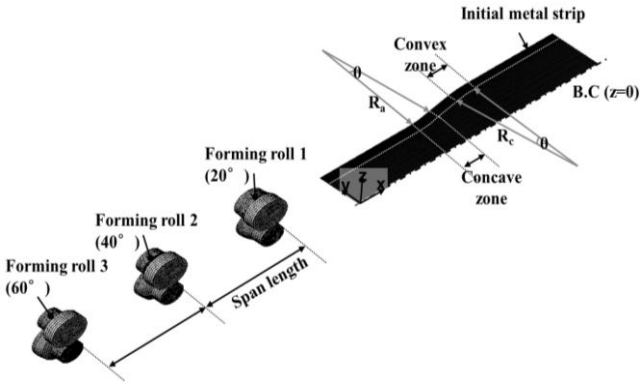


**Fig. 6 FE model of flexible roll forming and an initial metal strip**

본 연구에서는 가변롤성형 소재의 길이방향 변형률을 분석하기 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.10 implicit code를 사용하였다. 요소는 롤성형공정에서 일반적으로 사용되는 사각형 쉘 요소를 사용하였다. 소재는 두께가 1mm인 DP(Dual Phase)980의 물성데이터는 식(5)로 모델링하였다. 물성은 Hooke 식과 Swift의 등방성 경화식으로 나타내었다.

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \tag{5}$$

$\boldsymbol{\sigma}$는 유동응력, K(1404.56MPa)는 소성강도계수, $\varepsilon_0$(0.00637)는 오프셋 변형률, ε은 변형률, n(0.0988)은 가공경화 지수이다. Young의 계수(E)는 210,000MPa, Poisson의 계수(v)는 0.3이다. 마찰계수는 0.1로 선정하였다.

Fig. 6는 가변롤성형 공정의 FE모델이다. 성형롤의 각도는 20°, 40°, 60°이다. 성형롤 간의 공차는 1mm이다. 성형롤의 길이방향 간격(Span length)은 700mm로 실험장치와 동일하다. 초기소재가 x축 방향으로 공급되어 성형롤에 의해 연속적으로 굽힘성형된다. Fig. 2에서와 같이 성형롤은 초기시편의 가변경로를 따라 y축으로 직선운동을 하고, 시편과 성형롤의 접촉지점의 수직축을 중심으로 회전운동한다. 롤경로의 좌표데이터를 입력하여 소재가 공급됨에 따라 성형롤이 이동하도록 모델링하였다. 초기시편의 절곡한 변은 경계조건으로 모델링하였다. 경계조건은 x축의 직선자유도를 부여하여 시편이 공급되도록 모델링하였고, y축과 z축자유도를 구속하였다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 실험조건을 반영한 것으로 절곡한 변이 성형롤에 의해 구속됨을 모델링하기 위해 x축, y축, z축의 회전자유도를 고정하였다.

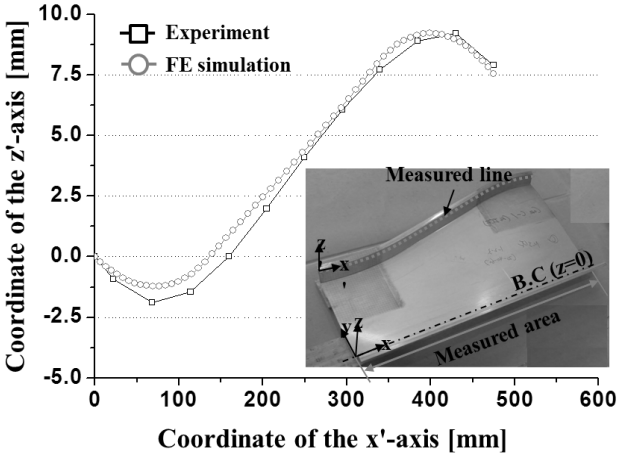


**Fig. 7 Comparisons of the measured line of the profile between the FE simulation and the experimental result**

### 4.2 해석모델의 유효성 검증

실험계획법을 적용할 해석모델의 유효성을 검증하였다. 프로파일의 형상변수는 $R_a$, $R_c$은 800mm, θ는 10° $B_f$는 10mm, 그리고 $B_w$는 30mm로 선정하였다. Fig. 4에서 정의한 측정선(Measured line)을 실험결과와 비교하였다. 실험한 프로파일은 3D 스캐너 (ViALUX zSnapper®, Germany)를 이용해 측정하였다. Fig. 7은 해석결과가 실험결과를 잘 예측함을 보여준다. 이 해석모델을 이용해 단면이 가변하는 프로파일의 형상변수에 대해 분석하였다.

## 5. 형상변형과 길이방향 변형률 분석

### 5.1 실험계획법을 이용한 형상변수 분석

각 형상변수들은 3수준의 직교배열표로 총 9가지 경우에 대해 Table 1과 같이 정리하였다. Fig. 6의 해석모델을 이용해 수행하였다. 직선영역의 길이 L은 200mm로 고정하였다. 천이영역의 $R_a$, $R_c$변수는 동일한 값을 적용하였고, 변수범위는 800mm~1200mm (간격:200mm), θ변수는 10°~15°(간격:2.5°), $B_f$변수는 10mm ~ 20mm(간격:5mm), $B_w$변수는 30mm~50mm(간격:10mm)로 선정하였다. $B_f$와 $B_f$변수들은 볼록영역에서 발생하는 압축변형에 의한 좌굴(buckling)과 같은 추가적인 형상결함을 방지하는 범위 내에서 초기변수 수준의 크기와 범위를 선정하였다. 측정선의 형상변형과 정의한 형상변형률 편차를 분석하였다.

**Table 1 $L_9(3^4)$ orthogonal arrays of the defined shape parameters of profiles with variable cross-sections**

| Case | R [mm] | θ[°] | $B_f$[mm] | $B_w$[mm] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 800(R1) | 10(θ1) | 10($B_f$1) | 30 ($B_w$1) |
| 2 | 800(R1) | 12.5(θ2) | 15($B_f$2) | 40($B_w$2) |
| 3 | 800(R1) | 15(θ3) | 20($B_f$3) | 50($B_w$3) |
| 4 | 1000(R2) | 10(θ1) | 15($B_f$2) | 50($B_w$3) |
| 5 | 1000(R2) | 12.5(θ2) | 20($B_f$3) | 30($B_w$1) |
| 6 | 1000(R2) | 15(θ3) | 10($B_f$1) | 40($B_w$2) |
| 7 | 1200(R3) | 10(θ1) | 20($B_f$3) | 40($B_w$2) |
| 8 | 1200(R3) | 12.5(θ2) | 10($B_f$1) | 50($B_w$3) |
| 9 | 1200(R3) | 15(θ3) | 15($B_f$2) | 30($B_w$1) |

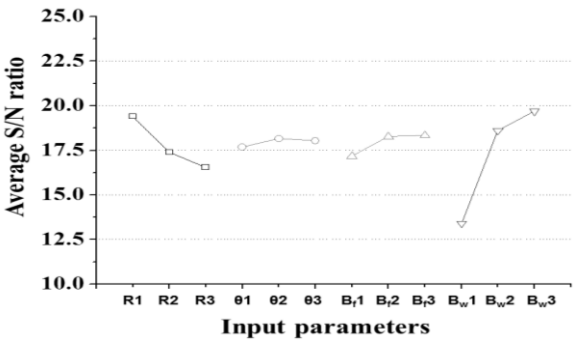


**Fig. 8 Response graphs for shape errors regarding shape parameters**

형상변형과 형상변형률 편차는 망소특성의 S/N비 (Signal-to-Noise ratio)(식6)를 계산해 각 특성을 비교하였다. $y_i$는 실험 데이터, n은 실험횟수이다.

$$SN = -10\log(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i)^2) \quad (6)$$

Fig. 8는 각 형상변수에 따른 형상변형량의 망소특성이고, Fig. 9는 형상변형률 편차의 망소특성을 나타낸 것이다. R변수가 증가함에 따라 형상변형이 감소하고, 형상변형률 편차도 감소하는 경향을 보인다. R변수가 커짐에 따라 식(1)과 식(2)의 절대값이 감소하며 각 오목영역과 볼록영역의 형상변형률 편차가 줄어들어 형상변형량이 감소하는 것을 알 수 있다. θ변수는 식(1)과 식(2)에 반영되지 않으며 형상변형에도 영향이 적었다. 또한, Bf변수는 Fig. 8과 Fig. 9와 같이 R변수나 $B_w$에 비해 형상변형과 형상변형률 편차에 대해 영향이 적었다. 이는 식(1)과 식(2)에서 $B_f$변

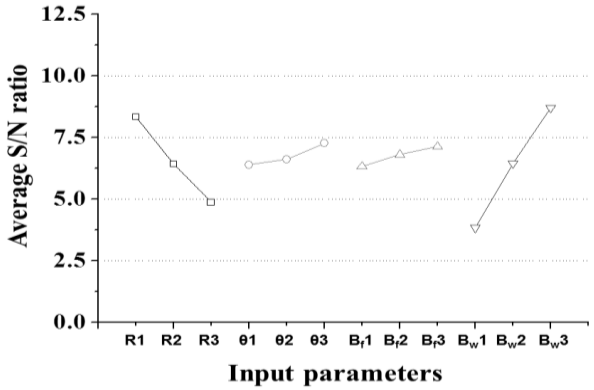


**Fig. 9 Response graphs for geometrical deviations of longitudinal strain regarding shape parameters**

수와 $B_w$변수 간의 영향은 동일하지만, 형상변수 수준의 크기가 $B_w$가 더 크기 때문인 것으로 사료된다.

## 5.2 형상변형과 길이방향 변형률 분포 비교

형상변수 범위에서 실험계획법을 통해 $B_w$변수가 형상변형에 가장 큰 영향을 미치는 주요한 변수임을 확인하였다. $B_w$변수에 따른 형상변형의 원인을 분석하기 위해 R변수는 고정하고, $B_w$변수를 제어한 경우인, Case1, Case2, Case3에 대한 해석결과와 이론적 길이방향 변형률 분포를 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12에서 각각 비교하였다. 또한 각 경우의 형상변형량을 Fig. 13에서 비교하였다.

Case1~Case3의 해석결과에서 $B_w$가 커짐에 따라 측정선의 길이방향 변형률 분포는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 하지만, 이론적으로 계산된 길이방향 변형률의 분포는 커진다. 이에 따라 형상변형률 편차값이 커짐을 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12에서 보여준다. 또한, Fig. 13에서 각 경우의 측정선이 형상변형률 편차가 커짐에 따라 형상변형량이 커짐을 확인할 수 있다.

가변롤성형 과정에서 오목영역에서는 인장변형, 볼록영역에서는 압축변형이 형상변형률 편차를 보상할만큼 발생하지 않은 것을 보여준다. 이론적 길이방향 변형률이 커질수록 형상변형률 편차가 커져 형상변형량을 증가시키는 것을 보여준다. 이는 형상변수 설계를 통해 형상변형률 편차를 제어할 필요가 있고, 이를 통해 형상변형량을 제어할 수 있음을 보여준다.

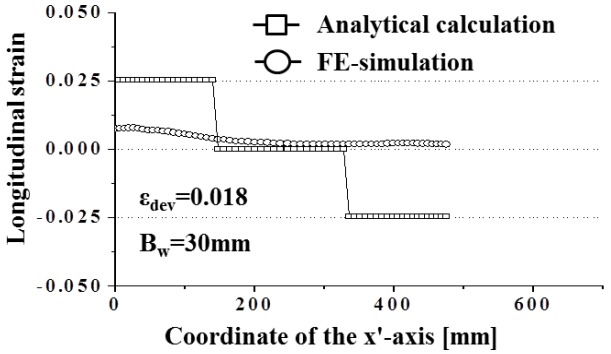


**Fig.10 Geometrical deviation of the Case 1**

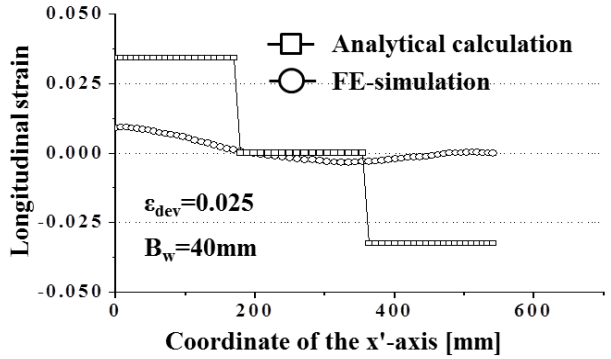


**Fig.11 Geometrical deviation of the Case 2**

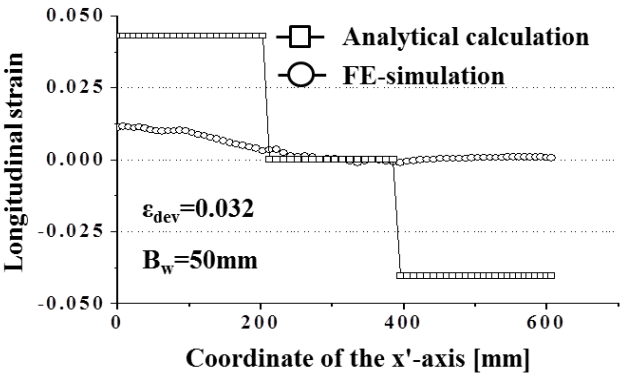


**Fig.12 Geometrical deviation of the Case 3**

Fig. 10, 11, 12에서 이론적으로 계산한 값(Analytical calculation)은 오목영역에서 식 (1)의 값이고, 볼록영역에서는 식 (2)의 값이다. 각 값은 소재가 가변롤성형된 후, 90° 굽힘성형되어 각 천이영역의 플랜지영역에서 이상적으로 성형되어 형상변형이 발생하지 않는 상태로 가정한 값이다. 하지만, Fig. 10, 11, 12에서와 같이 각 해석결과는 천이영역에서 길이방향으로의 변형이 이상적인 성형상태와 비교해 변형이 충

분

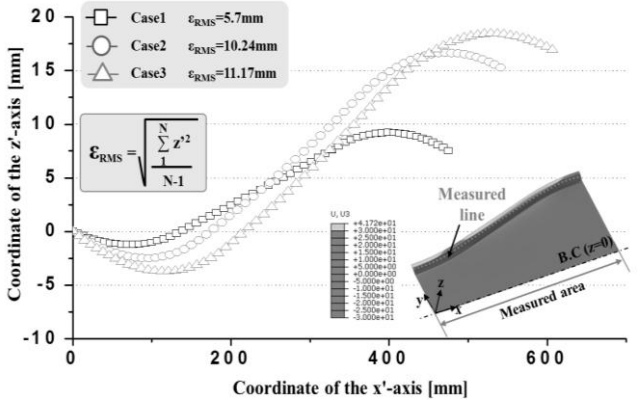


**Fig.13 Comparisons of the measured lines of Case1, Case2, and Case3**

하지 못함을 보여준다. 또한 Case1, Case2, Case3으로 형상변수가 변함에 따라 식 (1)과 식 (2)의 절대값이 커지지만, 해석결과에서 길이방향으로의 변형률은 각 Case가 비슷한 수준임을 확인할 수 있다. 이는 앞서 정의한 형상변형률 편차가 커짐을 의미하며 이로인해 Fig. 13과 같이 Case1, Case2, Case3로 변함에 따라 앞서 정의한 제곱평균제곱근(Root Mean Square, RMS), 즉 형상변형량이 커짐을 정량적으로 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 단면이 가변하는 프로파일의 천이영역 형상변수들을 정의하고, 실험계획법을 통해 형상변수가 프로파일의 형상변형과 형상변형률 편차에 미치는 영향을 분석하였다.

실험계획법에서 형상변수에 따른 형상변형량의 경향이 형상변형률 편차의 경향과 유사함을 확인할 수 있었고, 프로파일 천이영역에서의 형상변형률 편차가 형상변형의 주요한 원인임을 확인할 수 있었다. Case1~Case3의 해석결과에서 측정한 형상변수에 따른 플랜지에서의 길이방향 변형률의 분포는 유사한 경향을 확인하였지만, 이론적 길이방향 변형률 값은 커짐을 확인하였다. 이는 성형전후의 형상변형률 편차가 커지는 것을 확인하였고, 형상변형량을 더 크게 증가시켰다. 이를 통해 R변수와 $B_w$변수에 따라 이론적 길이방향 변형률 값을 제어하여 형상변형량의 수준을 제어할 수 있음을 확인하였다.

향후, 가변롤성형 공정의 산업적 적용을 위해서 임의의 형상변수를 갖는 프로파일에 대해 형상변형을 완전히 개선하기 위해서는 프로파일 플랜지의 길이방향 변형률을 제어가능한 부가공정의 개발이 필수적인 것으로 사료된다.

## 후 기

㈜POSCO의 사외위탁과제를 통해 진행한 연구로 많은 지원에 감사드립니다.

## REFERENCES

[1] P. Groche, G. V. Beritenbach, M. Jöckel, A. O. Zettler, 2003, Proc. of ICIT 2003(ed. K. Kuzman), Celje, Slovenia, pp. 121~126.

[2] A. O. Zettler, 2007, Grundlagen und Auslegungsmethoden für Flexible Profilierprozesses, Univ. of Darmstadt, Germany(in German).

[3] A. Abee, S. Berner, A. Sedlmaier, 2008, Proc. of ICTP 2008(eds. D. Y. Yang, Y. H. Kim, C. H. Park), Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Republic of Korea, pp. 520~527.

[4] S. Berner, M. Storbeck, P. Groche, 2011, Proc. of AIP 2011(ed. G. Menary), AIP Publishing, Belfast, UK, pp. 345~350.

[5] G. T. Halmos, 2005, Roll Forming Handbook, 1st ed., CRC Taylor & Francis, New York.

[6] F. Heislitz, H. Livatyali, M. A. Ahmetoglu, G. L. Kinzel, T. Altan, 1996, Simulation of Roll Forming Process with the 3-D FEM Code PAM-STAMP, J. Mater. Process. Technol., Vol. 59, No.1-2, pp. 59~67.

[7] M. Lindgren, 2007, Cold Roll Forming of a U-Channel Made of High Strength Steel, J. Mater. Process. Technol., Vol. 186, No. 1-3, pp. 77~81.