

# 유한요소해석과 반응표면법을 이용한 앵글바의 폭퍼짐 예측 및 공형설계에 관한 연구

## Roll Profile Design Considering Spread in Shape Rolling of Angle Bar by FE-analysis and Response Surface Method

이상진<sup>1</sup>, 고대철<sup>2</sup>, 이상곤<sup>3</sup>, 김병민<sup>1,✉</sup>

Sang Jin Lee<sup>1</sup>, Dae Cheol Ko<sup>2</sup>, Sang Kon Lee<sup>3</sup>, and Byung Min Kim<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

<sup>2</sup> 부산대학교 부품소재 산학협력연구소 (Industrial Liaison Innovation Center, Pusan National Univ.)

<sup>3</sup> 한국생산기술연구원 녹색전환기술센터 (Green Transformation Technology Center, KITECH)

✉ Corresponding author: bmkim@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2319

Manuscript received: 2012.5.21 / Revised: 2012.9.29 / Accepted: 2012.10.13

*In this paper, a method for prediction of spread is proposed to design proper roll profile taking into account spread in shape rolling of angle bar. The effect of the process variables on spread, such as draught ratio, bending angle and aspect ratio, is analyzed by FE-analysis and response surface method (RSM). Roll profiles for equal angle bar are designed with the spread predicted by the regression equation. Effectiveness of the designed roll profiles are verified by FE-analysis in which the flange length, strain distribution, mean strain and roll torque are compared with those by Geuze. Finally, the proposed method is applied to the design of roll profile for unequal angle bar. As a result, the final product can be obtained within the allowable tolerance of  $\pm 0.5$  mm in length. Therefore, it is found that the prediction of spread can improve the efficiency of design roll profile in shape rolling of angle bar.*

Key Words: Shape Rolling (형상압연), FE-analysis (유한요소해석), RSM (반응표면법), Spread (폭퍼짐), Angle Bar (앵글바)

### 1. 서론

빔(beam)이나 로드(rod), 바(bar)와 같이 이형 단면을 가진 제품들은 주로 형상압연과 유니버설(universal) 압연으로 제조되고 있다. 유니버설 압연은 수평롤 만으로는 형상 가공이 쉽지 않은 H, I, T, U 형 부품에 주로 쓰이는 반면 형상 압연은 라운드, 직사각형, 타원형, L 형 등과 같은 상하롤의 형상만으로 성형 가능한 제품에 적용되고 있다.<sup>1,2</sup> 특히 L 형은 앵글바(angle bar) 또는 앵글 섹션(angle section)으로 부르며, 주로 교량이나 건축, 조선 및 구조용 부품 등으로 쓰인다. 형상압연에 의한 제품

은 LM 가이드, 자동차 도어 힌지 및 터빈 블레이드 등의 정밀 부품에도 점차 확대 적용 되고 있다.<sup>3</sup>

형상압연에서 앵글바와 같은 난형상 제품을 가공하기 위해서는 공형설계 시 정확한 폭퍼짐을 예측하는 것이 중요하다. 부정확한 폭퍼짐 예측은 미충만 또는 과충만 현상을 발생시키게 된다. 특히 과충만으로 소재가 롤갭 사이에 끼여 공형 롤에 감기게 되면 가이드 및 장비에 큰 파손을 가져오게 된다. 폭퍼짐 예측은 공형설계에서 중요한 요소이지만 현장에서는 주로 경험에 의존해 공형설계가 이루어지며, 많은 시행착오 끝에 제품생산이 이루어지고 있다. 이는 공정설계 기간을 연장

하게 되어 제품 단가 상승의 원인이 된다.

형상 압연시 정확한 폭퍼짐 예측을 위해 Geuze<sup>4</sup>는 폭퍼짐에 가장 큰 영향을 미치는 압하량을 인자로 계산식을 제안하였으며, Dehez<sup>5</sup>는 연신률 계수를 이용하여 폭퍼짐을 계산하였다. Mróz와 Milenin<sup>6</sup>은 소성변형에서 전위 이론을 유한요소법에 접목시켜 앵글바에 대한 성형해석을 수행하였다. Shinokura와 Takai<sup>7</sup>는 소재의 형상을 고려하여 실험적인 조사에 따른 간단한 폭퍼짐식을 제안하였다. 또한 Mori와 Osakada<sup>8</sup>에 의해 소재의 폭퍼짐뿐만 아니라 변형구간에서의 압연하중 및 평균 변형률 등을 분석할 수 있는 시뮬레이션 방법이 제안되었다. Lee와 Goldhahn<sup>9</sup>은 초기소재의 곡률반경을 선형보간하여 형상압연시 출구부 소재단면형상 예측모델을 개발하였다. 최근에는 복잡한 형상의 폭퍼짐, 연신율 및 압연 토크 등을 CAD (Computer-Aided-Design) 프로그램으로 도출하는 연구가 진행되었다.<sup>10,11</sup> 또한 추론을 통하여 가능한 모든 경로를 탐색 후 최적의 경로를 선정해 주는 전문가 시스템이 도입되어 최대 단면감소율을 가지면서 패스 수를 최소화할 수 있는 공형설계 방법이 제안되었다.<sup>12</sup>

본 연구에서는 폭퍼짐 예측을 통한 등변 및 부등변 앵글바의 형상압연을 위한 공형설계 방법을 제안하고자 한다. 폭퍼짐 예측을 위하여 폭퍼짐에 영향을 미치는 공정변수에 대해 유한요소해석 후 반응표면법(RSM: Response Surface Method)을 이용하여 회귀식을 도출하였다. 예측된 폭퍼짐량으로 공형의 플랜지 길이를 계산하였으며, 폭퍼짐 예측의 정확성을 높이기 위해서 Gothic 법과 같이 플랜지 굽힘이 없는 간단한 설계물을 사용하였다. 기존 설계 방식과 비교하기 위해 현장에서 주로 사용되는 Geuze<sup>4</sup>의 폭퍼짐식을 이용하여 등변 앵글바의 공형을 설계하였다. 설계의 유효성을 검증하기 위하여 유한요소 해석을 수행한 후 치수 오차, 변형률 분포, 평균 변형률과 압연 토크를 비교분석하였다. 또한 제안한 설계방법을 부등변 앵글바의 공형설계에 적용하였고, 유한요소 해석을 통하여 치수오차 및 변형률 분포를 분석하였다.

## 2. 실험계획법에 따른 성형해석

### 2.1 변수 평가를 위한 성형해석 모델

본 연구에서는 형상 압연시 폭퍼짐에 영향을 미치는 인자를 평가하고 영향도에 따른 회귀식을

도출하여 등변 앵글바의 정확한 폭퍼짐량 예측 및 공형설계를 수행하고자 한다. 압하율(Draught ratio:  $h(\%)$ ), 소재의 굽힘각도(Bending angle:  $\alpha^\circ$ ), 초기 소재의 종횡비(Aspect ratio:  $\lambda$ )의 변화에 대한 영향도 평가 및 폭퍼짐량을 예측하기 위해서 Fig. 1 과 같은 모델을 설정하였으며, 최종제품의 대칭성을 고려하여 1/2 단면에 대한 3 차원 성형 해석을 수행하였다. 온도, 마찰계수, 롤 속도 역시 폭퍼짐에 영향을 미치는 인자이지만, 사상 공정에서 소재의 온도 변화가 크지 않고 롤 속도에 대한 폭퍼짐의 영향이 거의 없으며, 마찰계수는 온도와 롤 속도에 관련된 인자이므로 본 연구의 변수평가에서는 제외되었다. 따라서 온도, 마찰계수, 롤 속도는 고정된 값으로 해석을 수행하였으며, 마찰계수( $\mu$ )는 Chitkara와 Hardy<sup>13</sup>의 식(1)에 따라 계산하였다.

$$\mu = (0.94 - 0.0005t - 0.056v) \quad (1)$$

여기서,  $t$ 는 소재의 온도( $^\circ\text{C}$ ),  $v$ 는 롤 속도(m/s)이다.

Table 1 에 성형해석을 위한 공정 조건을 나타내었으며, 성형해석은 상용 유한요소해석 소프트웨어인 DEFORM-3D 로 수행하였다.

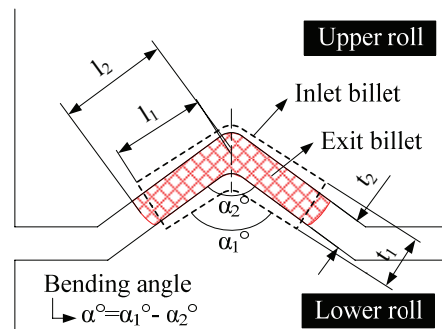


Fig. 1 FE-analysis model for RSM ( $\alpha_1^\circ$ : angle of inlet billet at corner,  $\alpha_2^\circ$ : angle of exit billet at corner)

Table 1 Conditions of FE-analysis for shape rolling

Process conditions	Value
Material	SS400 (ASTM A36)
Temperature of material ( $^\circ\text{C}$ )	1050
Mean diameter of roll (mm)	$\varnothing$ 300
Bending angle ( $^\circ$ )	0.5, 7.25, 15
Coefficient of friction ( $\mu$ )	0.35
Roll speed (m/s)	1.2

### 2.2 실험계획법에 의한 직교배열표

형상 압연시 압하율(h(%)), 소재의 굽힘각도( $\alpha^\circ$ ) 및 중횡비( $\lambda = t_n / l_n$ )에 따른 폭퍼짐량을 알아보기 위해 공정조건의 변화에 따른 성형해석을 실시하였다. 성형해석을 실시하기 전에 최소의 성형해석 횟수로 최대의 정보를 얻기 위해 실험계획법에 의한 직교배열표를 Table 2 와 같이 작성하였다. 압하율(5 ~ 45%)과 굽힘각도(0.5 ~ 15°)는 일반적인 범위에서의 최대 및 최소값으로 각각 설정하였고, 중횡비는 플랜지 길이( $l_n$ )와 두께( $t_n$ )의 비로 0.16 ~ 1 의 값을 사용하였다.

Table 2 Orthogonal arrays for the FE-analysis

Case	$\alpha^\circ$	h(%)	$\lambda$	Case	$\alpha^\circ$	h(%)	$\lambda$
1	15	25	0.58	9	15	5	0.16
2	7.75	5	0.58	10	15	45	1
3	7.75	25	1	11	0.5	45	1
4	7.75	45	0.58	12	15	45	0.16
5	7.75	25	0.58	13	0.5	45	0.16
6	7.75	25	0.16	14	0.5	5	1
7	0.5	5	0.16	15	15	5	1
8	0.5	25	0.58				

### 3. 변수 영향도 평가 및 폭퍼짐 예측

#### 3.1 성형 해석 및 반응표면분석 결과

각 case 에 대한 성형해석 후 폭퍼짐 결과를 Table 3 에 나타내었다.

Table 3 Results of FE-analysis for spread

Case	Spread (mm)	Case	Spread (mm)	Case	Spread (mm)
1	4.24	6	3.80	11	4.63
2	0.76	7	0.40	12	6.34
3	2.65	8	2.42	13	4.00
4	5.61	9	2.35	14	0.58
5	3.17	10	5.37	15	2.08

Table 3 의 결과를 반응표면분석한 결과 Fig. 2 와 3 의 그래프를 얻을 수 있었으며, 분석결과 압하율, 굽힘각도, 중횡비 순으로 폭퍼짐에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 폭퍼짐은 압하율에 크게 의존하는 것으로 분석되며, 압하율과 굽힘각도의 증가에 따라 폭퍼짐도 증가하나, 중횡비의 증가에 대해서는 다소 감소하는 것으로 나타났다.

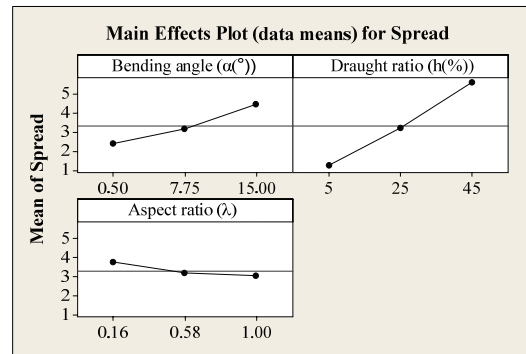
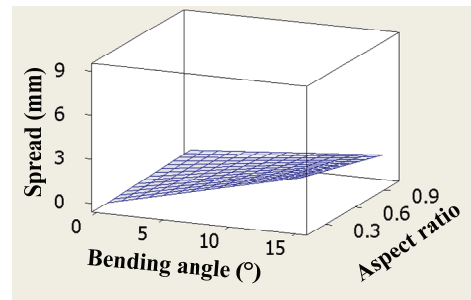
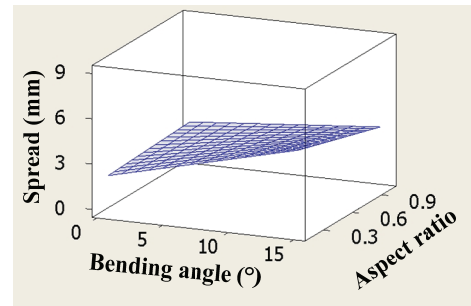


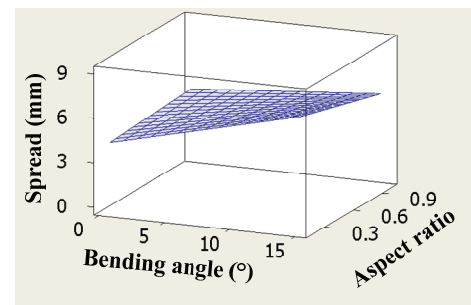
Fig. 2 Main effects on spread by RSM



(a) Draught ratio: 5%



(b) Draught ratio: 25%



(c) Draught ratio: 45%

Fig. 3 Effect of bending angle and aspect ratio on spread at various draught ratio using RSM

분석결과의 경향에 따라 case 12 와 case 14 에서 최대, 최소값이 나타날 것으로 예상하였으나, 폭퍼짐은 case 12 와 case 7 에서 최대, 최소값을 나타내었다. 이러한 원인을 Fig. 3 의 반응표면법에 의한 3 차원그래프를 통해 분석하였다.

Fig. 3 은 3 가지 압하율에 대하여 굽힘 각도와 중횡비에 따른 폭퍼짐을 나타낸다. 압하율의 크기에 따라 폭퍼짐 변화가 크게 나타나며, 3 차원 그래프의 뒤틀림은 굽힘각도와 중횡비의 교호작용이 있음을 보여준다. 이러한 중횡비와 굽힘각도와의 교호작용으로 인하여 굽힘각도가 7.75° 이하에서는 중횡비의 증가에 따라 폭퍼짐이 증가하지만 7.75° 이상에서는 중횡비가 증가함에 따라 폭퍼짐이 감소하는 현상이 나타난다. 이는 굽힘각도와 중횡비가 반비례 관계를 가지기 때문으로 판단된다. 따라서 case 7 에서 가장 작은 폭퍼짐이 발생하는 것으로 분석된다.

**3.2 폭퍼짐 예측을 위한 회귀식 도출**

반응표면법 분석을 통한 회귀 계수 값을 Table 4 에 나타내었다. 항목의 유효성을 평가하는 P 값이 0.05 이하로 나타나야 하며, 그 이상의 값이 나타났을 때 이를 제외하고 재분석하게 된다. 1 차 분석 결과 No. 0, 1, 2, 8 항목을 제외한 모든 항목들이 0.05 이상의 값을 나타내었다. 여기서 직교성이 보장되면 각 항들끼리 독립이지만 직교성이 없으면 항들간의 의존성이 있다.<sup>14</sup>

Table 4 Estimated regression coefficients for spread

No.	Term ( $X_n$ )	1st analysis		5th analysis	
		$\beta_n$	P	$\beta_n$	P
0	Constant	-1.64	0.00	-1.68	0.00
1	B	0.14	0.00	0.24	0.00
2	D	0.15	0.00	0.15	0.00
3	A	1.03	0.17	0.44	0.02
4	B*B	0.01	0.45	-	-
5	D*D	0.01	0.87	-	-
6	A*A	0.45	0.74	-	-
7	B*D	0.01	0.17	-	-
8	B*A	-0.17	0.01	-0.17	0.01
9	D*A	-0.05	0.07	-	-

\* B: Bending angle, D: Draught ratio, A: Aspect ratio

따라서 직교성이 있는 7, 9 번 항목을 제거하고 2 차 분석하게 되며, 직교성이 보장되지 않는 2 차항 (No. 4, 5, 6)의 제거는 P 값의 크기 순으로 한 번에 하나씩 제거 후 분석하게 된다. 이에 따라 다섯 번에 걸친 분석 끝에 No. 0, 1, 2, 3, 8 만이 유효항으로 나타났으며, 이에 따른 회귀식(2)이 도출되었다.

$$S = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_8 X_8 \quad (2)$$

여기서 S는 폭퍼짐,  $X_n$ 은 Table 4 에서의 각 항목이며  $\beta_n$ 은 각 항목에 대한 회귀계수이다.

**4. 공형설계 및 결과 분석**

**4.1 등변 앵글바에 대한 공형설계**

본 연구에서는 정확한 폭퍼짐 예측을 위해 플랜지의 굽힘이 없는 Gothic 법으로 Fig. 4 와 같은 등변 앵글바의 형상 압연을 위한 공형설계를 수행하였다.

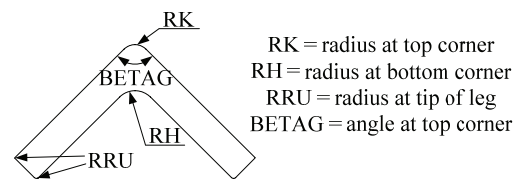


Fig. 4 Parametric representation of the final pass for the equal angle bar

Step 1: 초기 소재의 단면적 및 패스 수 계산

Fig. 5(f)와 같은 제품의 단면적( $A_n$ : 1005 mm<sup>2</sup>)과 길이( $l_n$ : 4000 mm)는 수요자의 요구에 따라 결정되었으며, 초기 소재의 길이( $l_0$ : 1200 mm)는 규격품의 길이 또는 재고품으로부터 결정된다. 따라서 초기 소재의 단면적( $A_0$ : 3400 mm<sup>2</sup>)은 식(3)을 이용하여 구할 수 있게 된다. 일반적으로 패스 수는 보유한 압연장비 수 또는 압연 토크 허용량에 따라 결정되기도 하지만, 본 연구에서는 식(4)로부터 패스 수( $n$ : 5)를 결정하였다.<sup>5</sup> 여기서 평균 단면감소율( $R_a$ )은 25%로 선정하였다.

$$V_0 = V_n = A_0 \cdot l_0 = A_n \cdot l_n \quad (3)$$

$$n = \frac{\ln(A_n / A_0)}{\ln(1 - R_a)} \quad (4)$$

**Step 2: 압하계수 결정**

일반적으로 앵글바의 공형 설계 시 패스의 진행에 따라 가공 오차를 줄이기 위해 압하량을 서서히 감소시킨다. 또한 첫 번째 패스에서는 초기 사각바가 앵글 형상으로 성형되기 때문에 형상의 비틀림 등을 방지하기 위해 압하량을 비교적 낮게 설정하게 된다. 압하량은 압하계수( $\gamma_n$ )에 따라 결정되며, 첫 번째 패스를 제외하고 압하계수가 선형적으로 감소되는 값( $\gamma_1;1.45, \gamma_2;1.55, \gamma_3;1.45, \gamma_4;1.35, \gamma_5;1.25$ )을 취하였다. 압하계수의 최적값( $\gamma_1;1.41, \gamma_2;1.57, \gamma_3;1.45, \gamma_4;1.35, \gamma_5;1.2$ )은 공형 설계 후 단면 감소율을 고려하여 일부 수정하였다.

압하계수와 마찬가지로 패스의 진행에 따라 단면감소율도 함께 감소하게 되며, 각 패스의 단면 감소율은 25% 내외로 하고 마지막 패스에서는 가공 오차를 줄이기 위해 15% 범위에서 가공된다.

**Step 3: 플랜지 두께 및 길이 계산**

각 패스의 플랜지 두께( $t_n$ )는 식(5)와 같이 Step 2에서 결정된 압하계수( $\gamma_n$ ) 값을 직전 패스 두께( $t_{n+1}$ )로 간단히 계산된다. 그러나 형상압연에서의 플랜지 길이를 계산하는 것은 아직 어려운 문제로 남아있다. 왜냐하면 판재압연에서는 폭퍼짐이 거의 일어나지 않지만 형상압연에서는 폭퍼짐을 무시할 수 없으므로 이를 고려해야 하기 때문이다.

따라서 폭퍼짐량을 예측하여 형상을 설계 하는 것이 중요하다. 최종 제품 치수로부터 역설계 시 직전패스의  $l_4$  의 길이는 최종 제품 치수인  $l_5$  와 폭퍼짐량(S)의 차이므로 회귀식 (2)를 통해 예측된 폭퍼짐량으로 식 (6)에 따라 구할 수 있게 된다.

$$t_n = t_{n+1} \cdot \gamma_n \tag{5}$$

$$l_n = l_{n+1} - S \tag{6}$$

**Step 4: 굽힘각도 및 모서리 곡률 계산**

굽힘각도는 패스 1 을 제외하고 12°, 6°, 1.5°, 0.5° 로 결정되었다. 앵글바의 각 모서리 부분의 곡률 값은 식 (7)-(9)에 의해 계산된다.<sup>2</sup>

$$RK_n = RK_{n+1} + 0.5\gamma_n \tag{7}$$

$$RH_n = RH_{n+1} + 0.5\gamma_n \tag{8}$$

$$RRU_n = RRU_{n+1} + 0.5(t_n - t_{n+1}) \tag{9}$$

**Step 5: 초기소재의 사이즈 결정**

초기소재의 사이즈는 Step 1 에서 소재 단면적을 구하였고, Step 2 에서 압하계수에 의한 세로 길이가 결정됨으로 가로 길이가 계산된다. 따라서 가로 및 세로 길이는 33 x 52 로 결정된다.

제시된 공형설계 방법을 통해서 Fig. 5 와 같이 패스의 진행에 따라 23, 26, 24, 22, 15% 로 단면감소율이 첫 번째 패스를 제외하고 점차 감소하는 공형의 형상 및 치수가 설계되었다.

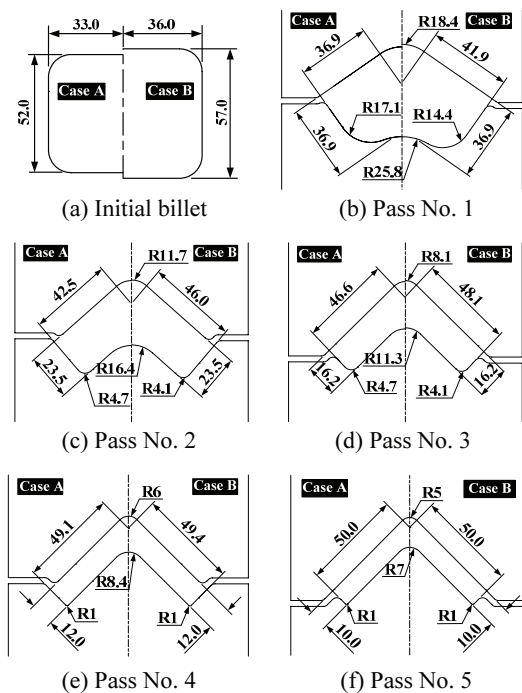


Fig. 5 Roll shapes designed by RSM (Case A) and Geuze's method (Case B)

일반적인 Geuze 의 폭퍼짐 식(10)에 따라 앵글바의 플랜지 길이  $l_5$ 로부터  $l_4, l_3, l_2, l_1$ 를 식 (11)으로 순차적으로 구하여 각 패스의 공형을 역설계 하였다. 폭퍼짐 계수(c)는 실험에 의해 연강에서는 0.35 로 결정되었다.

$$\Delta b = c(t_n - t_{n+1}) \tag{10}$$

$$l_n = l_{n+1} - c(t_n - t_{n+1}) \tag{11}$$

여기서  $\Delta b$ 는 폭퍼짐,  $t_n$ 은 패스 수( $n$ )에 따른 앵글바의 플랜지 두께이다.

Geuze의 폭퍼짐 식에 의해 설계된 공형의 형상 및 치수는 Fig. 5에 반응표면법에 의해 설계된 것과 같이 비교하여 나타내었다. 여기서 초기 소재의 사이즈는 압하계수( $\gamma_1; 1.55, \gamma_2; 1.57, \gamma_3; 1.45, \gamma_4; 1.35, \gamma_5; 1.2$ )와 단면 감소율을 고려하여 36 x 57로 설계되었다. 각 방법의 폭퍼짐 계산 차이에 따라 각 패스에서 플랜지 길이에 차이가 발생하였으며, 패스 1에서 각각 36.9, 41.9 mm로 나타나 플랜지 길이의 차가 5.0 mm 발생하였다. 플랜지 길이의 차이로 인해 설계된 공형의 단면감소율(23, 27, 27, 24, 16%)은 반응표면법에 의해 설계된 공형의 단면감소율보다 다소 높게 나타났다. 또한 초기 소재 사이즈 결정에도 영향을 미쳐 Fig. 5(a)와 같이 가로 및 세로의 길이 차이가 발생하였다. 모서리부 곡률은 일반적으로 쓰이는 소재의 곡률에 따라 R5로 결정하였다.

4.2 유한요소해석을 통한 검증

본 연구에서 제안한 공형설계 방법으로 설계된 공형(Case A)과 Geuze의 폭퍼짐 식에 의해 설계된 공형(Case B)은 유한요소해석을 통해 소재의 플랜지 길이, 변형률, 평균 변형률 그리고 압연 토크에 대해서 비교 분석하였다. 온도(1050°C)와 롤 속도(1200 mm/s)는 실제 현장에서 사용되는 값으로 결정하였고, 마찰계수( $\mu: 0.35$ )는 식(1)로 도출하였다. 성형 해석 후 변형률 분포와 치수 오차는 Fig. 6에 나타내었다.

패스의 진행에 따라 앵글바의 안쪽 코너부와 플랜지 상하부에 변형률이 증가하는 경향을 보인다. Case B의 경우 마지막 패스에서 3.0에 가까운 높은 변형률이 분포되고 있으며 국부적으로 높은 변형이 나타나기 때문에 파단의 우려가 있다. Case A에서는 도출된 회귀식의 사용에 따라 폭퍼짐에 미치는 인자들이 고려되어 각 패스의 플랜지 길이가 계산되기 때문에 마지막 패스에서 +0.2 mm의 오차를 가지는 앵글바를 도출할 수 있었다. 반면 Case B에서는 패스 1을 제외하고 각 패스마다 과충만 현상이 발생되어 마지막 패스에서 +3.8 mm의 과충만이 발생되었다. 각 패스에서의 평균 변형률( $\epsilon_m$ )은 식(12)에 의해 계산되었다.<sup>15</sup>

$$\epsilon_m = \sum_{i=1}^n \bar{\epsilon}_i A_i / \sum_{i=1}^n A_i \quad (12)$$

여기서,  $\bar{\epsilon}_i$ 는 유효 변형률,  $A_i$ 는  $i$  번째 요소의 단면적이다.

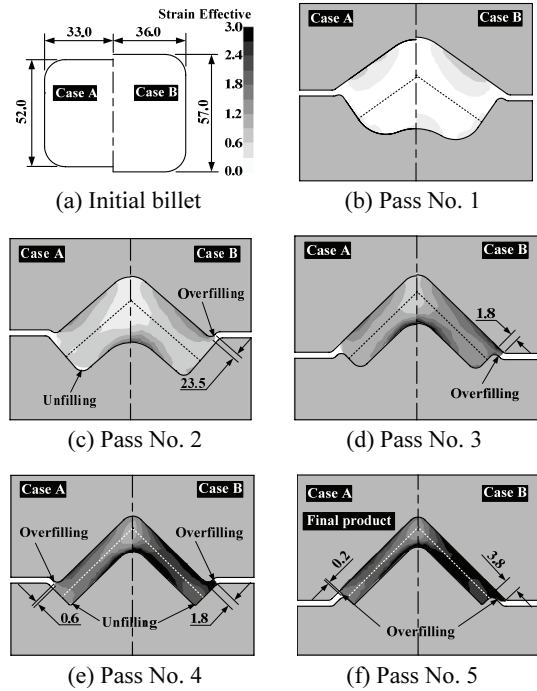


Fig. 6 Roll shapes designed and effective strain distribution of exit billet by RMS (Case A) and Geuze's method (Case B)

Table 5에 계산된 평균 변형률 값을 나타내었다. 패스 1부터 Case B가 Case A보다 높은 평균 변형률을 가지는 것으로 나타나며, 마지막 패스에서 Case A는 1.94, Case B는 2.75로 큰 차이를 보인다. 이는 부정확한 폭퍼짐 예측으로 소재가 공형 내에서 유동할 공간이 부족하기 때문으로 판단되며, 그 결과로 3.8 mm의 과충만이 발생하였다.

Table 5 Mean strain obtained by RMS (Case A) and Geuze's method (Case B)

Pass No.	Case A	Case B
1	0.22	0.29
2	0.61	0.70
3	1.27	1.59
4	1.47	2.11
5	1.94	2.75

Case A, B 에 대한 성형해석 후 패스에 따른 압연 토크 값을 Fig. 7 에 나타내었다. Case A 의 경우 패스의 증가에 따라 단면감소율이 감소하므로 압연 토크 값도 함께 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 Case B 의 경우, 패스 1 에서는 과충만 또는 미충만 없이 소재가 변형되었으나, 두 번째 패스부터는 단면감소율의 감소에도 불구하고 소재의 과충만으로 압연 토크 값이 패스 1 (torque: 12.2 kNm) 보다 5.6 kNm 증가하였고, 각 패스에서 Case A 보다 압연 토크 값이 크게 나타남을 볼 수 있다. 이러한 압연 토크 값의 증가는 소재의 폭퍼짐량이 예측된 폭퍼짐량을 초과함에 따라 간접 압하량이 증가하고, 소재의 일부가 롤갭 사이로 돌출하였기 때문이다. 따라서 Geuze 가 제안한 폭퍼짐 계수는 특정한 조건에서는 만족할 수 있지만, 실제 소재의 재질, 온도, 압하율, 롤과 소재의 마찰, 각 패스의 단면 형상, 굽힘각도 등의 많은 변수들에 의해 변하기 때문에 폭퍼짐을 예측하는 것은 정량적인 하나의 값으로 대표하기 쉽지 않음을 보여준다. 또한 폭퍼짐 방향으로 소재의 이동이 제한된 형상압연에서 정확한 폭퍼짐 예측에 의한 공형설계는 중요하다고 할 수 있다.

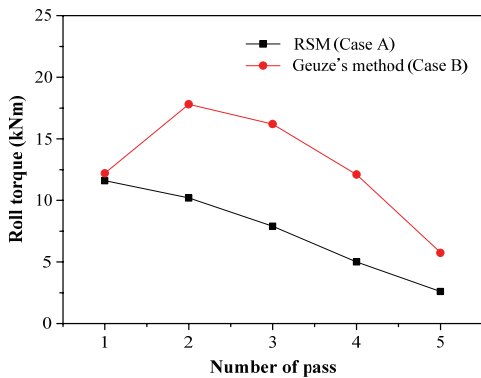


Fig. 7 Comparison of roll torques between RSM (Case A) and Geuze's method (Case B)

4.3 부등변 앵글바에 대한 공형설계

부등변 앵글바(Fig. 8(f))는 좌우 비대칭 형상을 가지며 등변 앵글바 보다 형상 난이도가 높은 제품이다. 이러한 난성형성 제품을 형상압연하기 위해 본 연구에서 제안한 방법으로 공형설계 및 이에 대한 성형해석을 수행하였다. 각 패스의 단면 감소율은 25, 24, 21, 20, 15%이며, 설계된 공형의 형상과 치수, 성형 해석 후 소재의 치수와 변형률 분포는 Fig. 8 에 나타내었다.

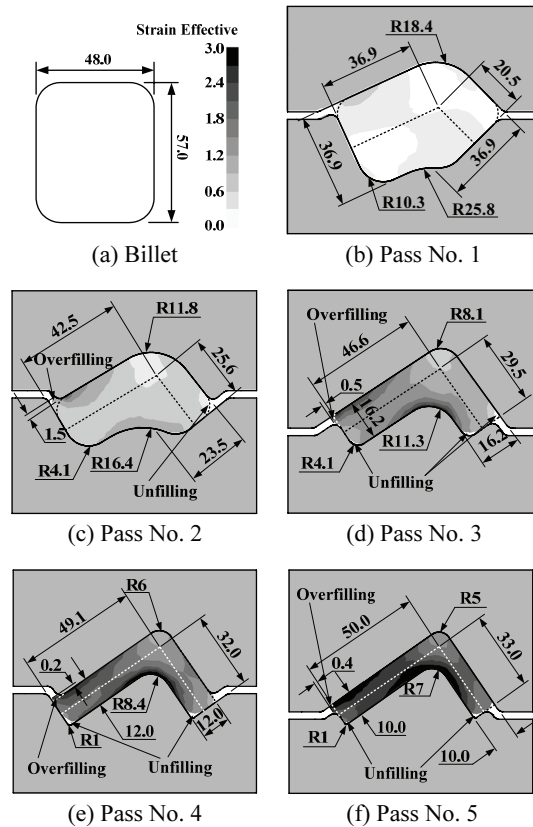


Fig. 8 Dimension and effective strain distribution of exit billet in shape rolling of unequal bar designed by RSM

성형 해석 결과 각 패스에서 미소한 과충만과 미충만 영역이 발생하였으며 마지막 패스에서 긴 플랜지는 +0.4 mm, 짧은 플랜지에서는 끝단부에 미충만 영역(-0.36 mm)이 발생하였다. 이는 비대칭 형상으로 인하여 긴 플랜지 쪽으로 소재가 유동하므로써 발생한 오차라고 생각된다. 소재내부의 변형률은 패스의 진행에 따라 점차 증가하였으며 안쪽 코너부에서 가장 큰 변형률을 나타내었다. 또한 플랜지 코너부 각도 변화에 따라 플랜지의 윗면 끝단부에서 상대적으로 높은 변형률이 발생하였다.

부등변 앵글바의 치수 오차를 줄이고 변형률 분포를 더욱 균일하게 만드는 개선 방법이 요구되지만, 본 연구에서는 최종 제품의 허용 오차범위 ( $\pm 0.5$ )를 만족하는 공형을 설계할 수 있었다. 따라서 본 연구에 의한 방법은 특정 소재와 온도에서 압하율, 굽힘각도, 중횡비의 변화에 따라 정밀한 형상과 치수를 가지는 등변 및 부등변 앵글바의

공형설계가 가능함을 제시하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 유한요소해석과 반응표면법을 이용한 폭퍼짐 예측 및 공형설계에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 등변 앵글바의 공형설계시 정확한 폭퍼짐 예측으로 각 패스의 플랜지 길이를 계산하기 위하여 유한요소 해석 및 반응표면법을 이용한 설계방법을 제안하였다.

(2) 등변 앵글바에 본 연구의 설계 방법을 적용하여 공형설계한 후 성형 해석한 결과 최종패스에서 +0.2 mm 의 허용범위 내의 오차가 발생하였고, 기존 설계 방법과는 달리 압하량, 굽힘각도, 중형비의 변화에 대해서도 정밀한 설계가 가능함을 보였다.

(3) 앵글바의 변형률 분포를 분석한 결과 소재의 변형이 국부적으로 치중되지 않고 형상 압연된 소재의 단면 전체에 균일한 변형이 이루어졌음을 확인하였고, 마지막 패스에서 소재의 평균 변형률이 1.94 로 과도한 변형 없이 제품의 성형이 가능함을 보였다. 또한 패스의 진행에 따라 단면감소율의 감소와 함께 토크 값도 감소하는 경향을 나타내었다.

(4) 부등변 앵글바의 최종 패스에서 긴 플랜지에 +0.4 mm 의 과충만과 짧은 플랜지의 미충만 영역 (-0.36 mm)이 발생하였으나, 허용 가능 범위이므로 설계방법의 적용이 가능함을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 지역산업기술개발사업(과제번호: 700086422)과 2012년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(한국연구재단-2012R1A5A1048294).

## 참고문헌

1. Altan, T., Oh, S. I., and Gegel, H., "Metal forming fundamentals and applications," American Society for Metals, pp. 249-276, 1983.
2. British Steel Corporation, "Roll Pass Design," Chorley & Pickersgill Ltd., pp. 173-210, 1975.
3. Boer, C. R. and Pruvot, F. C., "CAD/CAM for rolling

- complex shape profiles," Annals of the CIRP, Vol. 34, No. 1, pp. 253-257, 1985.
4. Korea Iron & Steel Association, "Shape Steel Rolling Industrial Education: Human Resources Development Council for Iron and Steel Industry," 2009.
5. Wusatowski, Z., "Fundamentals of rolling," Pergamon Press, pp. 585-589, 1969.
6. Mróz, S. and Milenin, A., "Numerical modeling of the metal flow and stock bending during the rolling of unequal angle bar," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, pp. 561-565, 2006.
7. Shinokura, T. and Takai, K., "A New Method for Calculating Spread in Rod Rolling," J. Applied Metalworking, Vol. 2, No. 2, pp. 147-160, 1986.
8. Mori, K. and Osakada, K., "Finite Element Simulation of Three-Dimensional Deformation in Shape Rolling," Int. J. for Num. Meth. in Eng., Vol. 30, pp. 1431-1440, 1990.
9. Lee, Y. S. and Goldhahn, G., "Prediction Model of the Exit Cross Sectional Shape in Round-Oval-Round Pass Rolling," Int. J. KSPE, Vol. 2, No. 1, pp. 87-93, 2001.
10. Bursal, F., Sevenler, K., and Raghupathi, P. S., "Computer Aided Analysis of Metal Flow in the Rolling of Rods and Structural Profiles," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 28, No. 4, pp. 475-482, 1988.
11. Kwon, H. C. and Im, Y. T., "Interactive computer-aided-design system for roll pass and profile design in bar rolling," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 123, pp. 399-405, 2002.
12. Kim, S. H. and Im, Y. T., "A Knowledge-Based Expert System for Roll Pass and Profile Design for Shape Rolling of Round and Square Bars," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 89-90, pp. 145-151, 1999.
13. Chitkara, N. R. and Hardy, G. H., "Rolling of I-section beams using lead as a model material: Some experimental results," Int. J. Mech. Sci., pp. 557-594, 1977.
14. Minitab Inc., "Minitab Statistical Software," <http://www.minitab.co.kr/>
15. Lee, J. H., Son, I. H., Chon, S. H., and Park, J. K., "Design guideline of multi-pass equal channel angular extrusion for uniform strain distribution," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 191, pp. 39-43, 2007.