

형상 엷저 롤을 이용한 열간 조압연 공정의 슬래브 폭 퍼짐 예측 모델

이경훈¹ · 한진규² · 유광현² · 김형진² · 김병민[#]

A Model for Slab Width Spread during Hot Rough Rolling Using a Profiled Edger Roll

K. H. Lee, J. G. Han, K. H. Yoo, H. J. Kim, B. M. Kim

(Received September 3, 2015 / Revised December 10, 2016 / Accepted January 13, 2016)

Abstract

The aim of the current study was to develop an advanced prediction model for the slab width spread during hot rough rolling. Rough rolling consists of both vertical rolling using a set of profiled edger rolls and horizontal rolling using a set of plain work rolls. FE-simulations were performed to investigate the influences of process variables such as initial slab width, initial thickness, sizing draft, edger roll draft and work roll draft on the final slab width variation. From a statistical analysis of the simulation results, an advanced model, which can predict the slab width spread during the edger rolling and horizontal rolling, was developed. The experimental hot rolling trials showed that the newly developed model provided fairly accurate predictions on the slab width spread during hot rough rolling process using a profiled edger rolls.

Key Words : Hot Rough Rolling, Profile Edger Roll, Dog-bone, Width Spread, FE-simulation

1. 서론

열간 압연 공정은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 연속 주조로써 제조된 슬래브를 가열한 후, 사이징 프레스, 조압연기 및 사상압연기에서 열간 성형하여 얇은 두께의 스트립으로 제조하는 것이다. 그 중에서 열간 조압연 공정은 좌우에 위치한 한 쌍의 엷저 롤에 의한 폭 압연과 상하에 위치한 작업 롤에 의한 수평 압연의 반복으로 구성되어있다.

열간 압연 공정에서 판 폭 제어의 핵심은 사이징 프레스 공정 및 조압연기의 엷저 롤에 의한 폭 압연 공정에 있다. Fig. 2는 가역(reverse) 압연이 포함된 열간 조압연 공정 순서를 나타낸다. 홀수 패스에서는 엷저 압연과 수평 압연이 순방향으로 진행되고,

짝수 패스에서는 역방향 수평 압연만 진행된다. 조압연 공정 시, 폭 제어에 영향을 미치는 주요 변수에는 사이징 프레스된 슬래브 단면 형상과 치수, 패스 별 두께 압하율 및 폭 압하율 등이 있다.

현재까지 열연 강판의 폭 퍼짐에 관해서 많은 연구들이 수행되었으나, 대부분 평판 폭 퍼짐 예측 모델들이 실험적 접근을 통해 제안되었다[1~4]. Moon 등은 열간 압연 조업 데이터 분석을 통한 압연조건 별 폭 퍼짐량의 해석을 통해 폭 퍼짐 예측모델을 개발하였다[5]. 위의 Moon 모델은 크게 두께 압연 폭 퍼짐식과 도그본 압연 폭 퍼짐식으로 구성되어 있다. Oh와 Kobayashi는 상계법을 이용하여 판 폭 퍼짐을 예측하는 모델을 최초로 제안하였으며[6], 최근에는 Hwang 등이 이를 개선하여 도그본 형상을

1. 한국해양대학교 기관공학부

2. 현대제철 기술연구소 압연기술개발팀

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

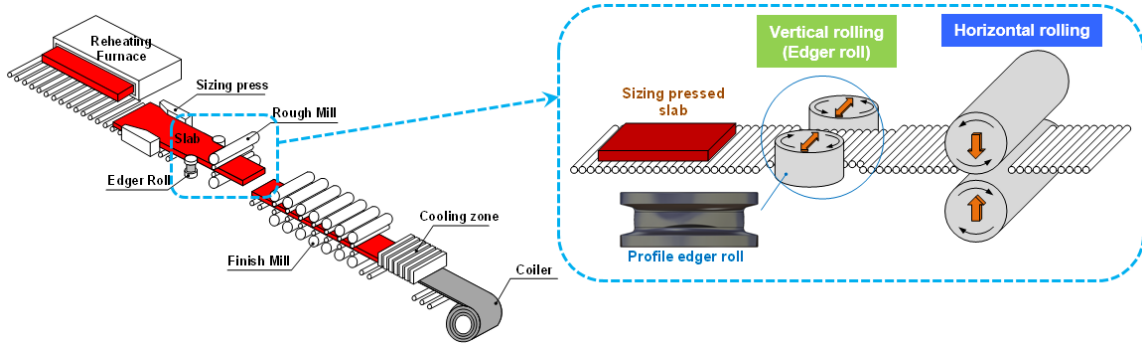


Fig. 1 Schematic illustration of hot rolling process

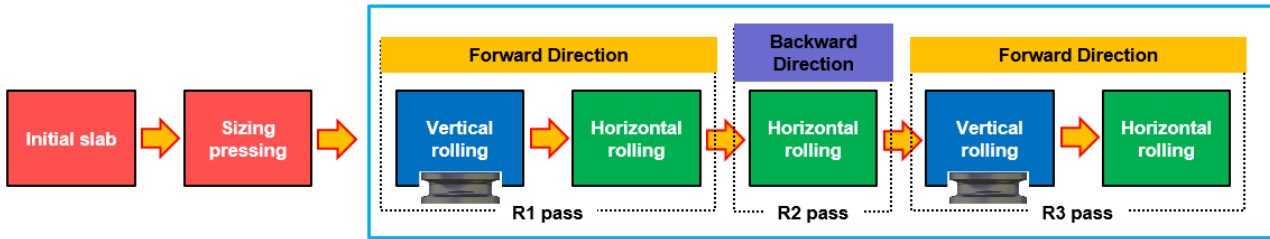


Fig. 2 Process sequence of hot rough rolling process

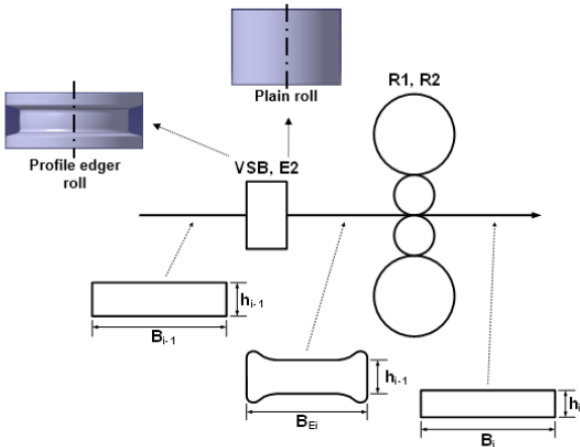


Fig. 3 Cross-sectional shape of rolled slab during rough rolling process

가진 열연장판의 폭 퍼짐 예측에도 적용할 수 있는 모델을 제안하였다[7~8].

하지만 위의 연구들은 대부분 평판에 대한 폭 퍼짐 모델이거나 가열로에서부터 조압연기에 도달하기까지의 슬래브의 변형이력이 고려되지 않았기 때문에 실제 열연 공정에 적용하여 슬래브의 폭을 제어하는데 제한적이다. 또한, 최근 조압연기에 적용되고 있는 엷저 물이 평 물에서 형상 물로 변화되고 있는데, 형상 엷저 물이 슬래브의 폭 퍼짐에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 없다.

따라서 본 연구는 형상 엷저 물을 이용한 열간 조압연 공정의 슬래브 폭 퍼짐 예측 모델을 개발하기 위해 수행되었다. 초기 슬래브의 폭과 두께, 폭 압하량 및 두께 압하량과 같은 공정변수들이 슬래브 폭 변동에 미치는 영향을 조사하기 위해 3차원 유한요소해석을 실시하여 슬래브의 폭 퍼짐량을 측정하였다. 측정된 폭 퍼짐량의 분석을 통해 현장 적용 가능한 폭 퍼짐 예측 모델의 개선안이 제시되었으며 실제 압연라인에서의 조압을 통해 예측 모델의 유효성이 검증되었다.

2. 열간 조압연의 폭 퍼짐 예측 모델 분석

Fig. 3은 폭 압연 및 수평 압연에 의한 슬래브 단면 형상의 변화를 나타낸 것이다. 사이징 프레스된 슬래브의 폭과 엷저 압연 후의 폭을 각각 B_{i-1} 와 B_{Ei} 라 한다. 1 패스 압연 후의 슬래브 폭은 아래 식(1)로 표현될 수 있다. 폭 압연이 생략된 짝수 패스 압연 시에는 ΔB_{Ei} 와 ΔB_{Di} 를 0으로 두어 계산한다.

$$B_i = B_{i-1} - \Delta B_{Ei} + \Delta B_{Hi} + \Delta B_{Di} \quad (1)$$

여기서, ΔB_{Ei} 는 엷저에 의한 폭 압하량, ΔB_{Hi} 는 수평 압연 시 두께 감소에 따른 폭 퍼짐량, ΔB_{Di} 는 도

그분의 형상 회복에 따른 폭 퍼짐량이다. 수평 압연 시 두께 감소에 따른 폭 퍼짐량, ΔB_{Hi} 는 Tafel과 Sedlaczek의 식으로 정의되며[9], 아래 식 (2)와 같다.

$$\Delta B_{Hi} = \frac{\Delta h \cdot B_{Ei} \cdot \sqrt{B_{Ei} \cdot R_{WR}}}{C \cdot (B_{Ei}^2 + h_{i-1} \cdot h_i)} \quad (2)$$

여기서, 두께 압하량, Δh 는 초기두께, h_{i-1} 및 수평 압연 후 두께, h_i 의 차를 나타낸다. R_{WR} 은 작업률 반경이며, C 는 강제 슬래브의 경우 3으로 가정한다.

도그본의 형상 회복에 따른 폭 퍼짐량(ΔB_{Di})은 경험식을 사용하며 식 (3)과 같다.

$$\Delta B_{Di} = \exp \left\{ \left(a_{10} B_{Ei} + a_{11} \frac{\Delta B_{Ei}}{B_{Ei}} \right) \cdot \frac{\sqrt{h_{i-1} \cdot R_{ER}}}{B_{Ei}} \right\} \cdot \Delta B_{Ei} \cdot a_{12} \quad (3)$$

여기서, R_{ER} 는 엿저 롤의 반경을 나타내며, a_{10} , a_{11} 와 a_{12} 는 제어인자 설정 값을 의미한다. 기존 예측 모델에서는 각각 -1.20, -29.48과 0.75의 값을 가진다.

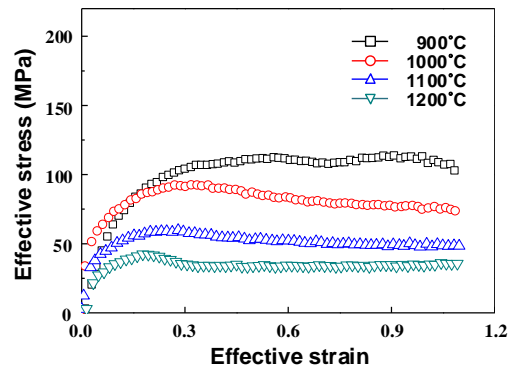
3. 열간 조압연 공정의 유한요소해석

3.1 유한요소해석 조건

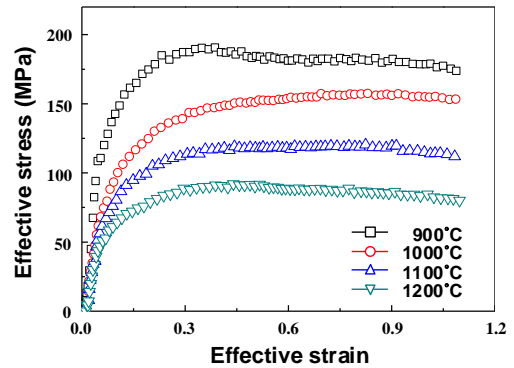
Fig. 4는 자동차 외관재용 소재인 *Steel B*의 응력-변형률 선도를 나타낸다. 고온 압축시험은 Gleeble 장비를 사용하여 변형률 속도 0.1, 10, 50s⁻¹ 및 온도 900, 1000, 1100, 1200°C 범위에서 수행되었다.

사이징 프레스 및 열간 조압연 공정의 해석모델을 Fig. 5에 나타내었다. 상용 유한요소해석 S/W인 DEFORM-3D를 이용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석 시간의 감소를 위해 1/4 해석 모델을 구성하였으며 요소 수는 150,000개로 설정하였다.

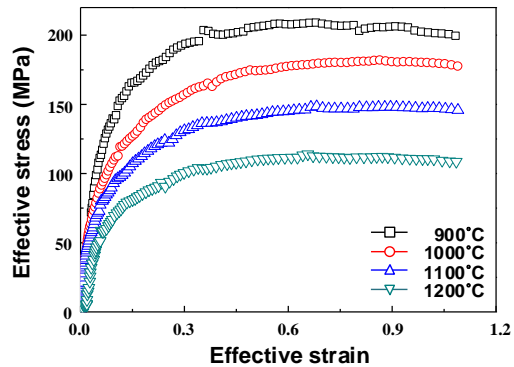
조압연 공정의 일반적인 조압 조건을 Table 1에 나타내었다. 초기 슬래브의 폭과 두께는 각각 1000, 1400, 1800mm와 225, 250mm이다. 가열된 슬래브의 초기 온도는 1200°C였으나, 가열로에서 사이징 프레스로 이송되는 총 15초 동안 공기와의 자연 대류로 인한 열손실이 발생한다. 이에 열전달 해석을 수행 후 온도 변화이력이 고려된 슬래브를 초기 조건으로 설정하였다. 사이징 프레스 공정 시, 슬래브 폭 방향 압하량은 0, 100, 200mm이며, 이송 피치는 380mm이



(a) Strain rate: 0.1 s⁻¹



(b) Strain rate: 10 s⁻¹



(c) Strain rate: 50 s⁻¹

Fig. 4 Stress-strain curves under different temperatures and strain rates

다. 2단 단차 엔빌의 사이징 속도는 172mm/s로 설정하였으며, 선단부에서 미단부까지 동일한 속도로 압하된다. 엔빌 및 각 롤과 슬래브 사이의 마찰상수(m)는 0.6, 계면 열 전달계수와 대류 열전달 계수는 현장조건에 고려하여 각각 11.3N/s·mm·°C, 0.02N/s·mm·°C이다.

조압연 공정은 가역 압연이 포함된 왕복 공정으로 진행된다. 슬래브가 순방향으로 압연이 진행되는

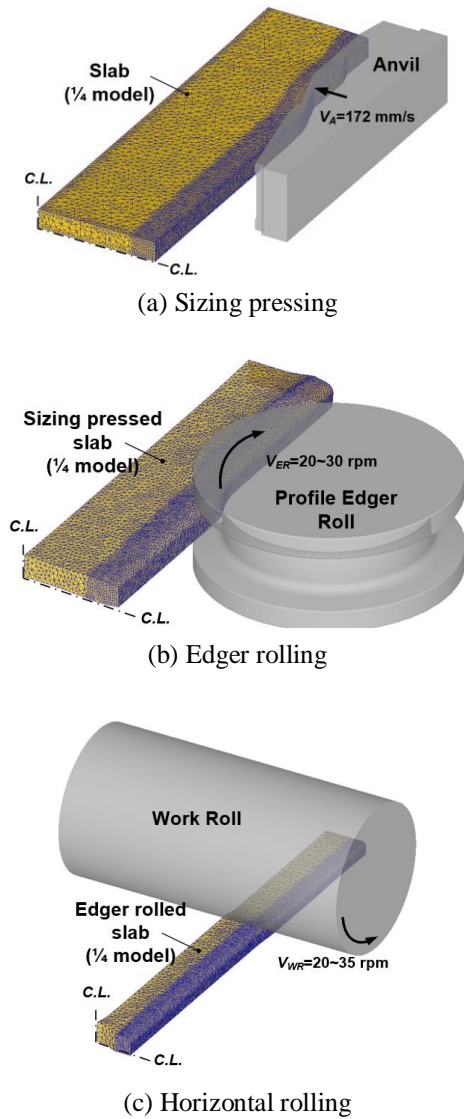


Fig. 5 3D FE-model of hot rough rolling process

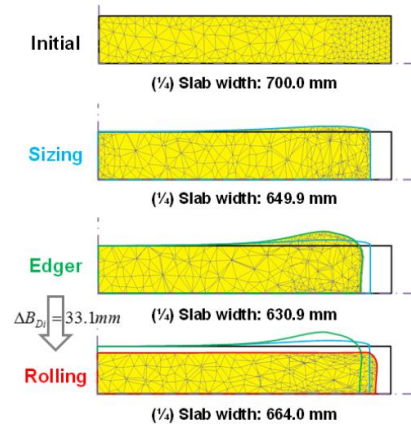
때, 50, 100, 150mm 의 다양한 엷저 롤 압하량에 대하여 해석을 수행하였다. 이때 엷저 롤 회전속도는 20~30rpm($R1, R3$)이며, 작업 롤의 회전속도는 20~35 rpm($R1, R3$)이다. 슬래브가 역방향으로 진행 시에는 엷저 압연이 생략된 채 수평 압연만 수행되며 작업 롤의 회전속도는 대략 30rpm ($R2$) 이며 압하량은 30, 40, 50mm이다.

3.2 유한요소해석 결과

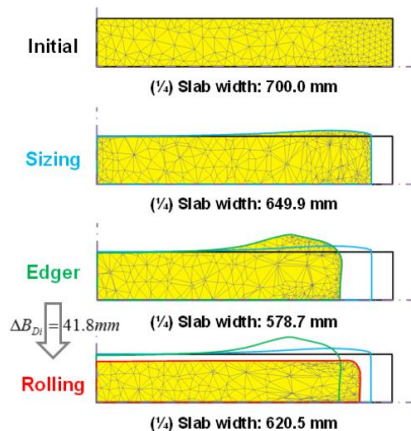
Fig. 6는 초기 슬래브, 사이징 프레스 및 열간 조압연 1패스 공정 후 변형된 슬래브 단면 및 폭 치수를 측정하여 나타낸 그림이다. Fig. 6(a)는 초기 폭 1400mm, 두께 225mm의 슬래브를 사이징, 엷저 롤

Table 1 Input parameters required for of hot rough rolling process

Slab	Geometry	Width	1000, 1400, 1800 mm
		Thickness	225, 250 mm
Sizing Pressing	Anvil	Type	2 Step anvil ($10^{\circ}\sim 20^{\circ}$)
		Velocity	172 mm/s
		Temp.	500 $^{\circ}\text{C}$
	Sizing draft		0, 100, 200 mm
Transfer pitch		380 mm	
Edger Rolling	Roll diameter		1150 mm
	Roll temperature		500 $^{\circ}\text{C}$
	Rotational speed ($R1, R3$)		20~30 rpm
	Roll draft		50, 100, 150 mm
Horizontal Rolling	Roll diameter		1200 mm
	Roll temperature		500 $^{\circ}\text{C}$
	Rotational speed ($R1, R2, R3$)		20~35 rpm
	Roll draft		30, 40, 50 mm



(a) W1400 - T225 - SSP100 - E50 - R30



(b) W1400 - T225 - SSP100 - E150 - R30

Fig. 6 Comparison of slab width variations during hot rough rolling process

Table 2 Width variation of rolled slab under different process conditions

No.	Initial width	Initial thick.	Sizing draft	Edger draft	W.R. draft	Slab width	W.R. draft	Slab width	W.R. draft	Slab width
1	1000	225	0	50	30	494.0	40	495.2	50	495.8
2	1000	225	0	100	30	475.2	40	475.5	50	475.7
3	1000	225	0	150	30	453.7	40	455.1	50	455.8
4	1000	225	100	50	30	452.2	40	452.6	50	453.7
5	1000	225	100	100	30	430.8	40	431.2	50	431.9
6	1000	225	100	150	30	403.6	40	404.6	50	406.0
7	1000	225	200	50	30	399.8	40	401.0	50	402.8
8	1000	225	200	100	30	374.8	40	377.1	50	377.9
9	1000	225	200	150	30	348.2	40	350.3	50	350.9
10	1000	250	0	50	30	491.8	40	492.3	50	492.4
11	1000	250	0	100	30	469.2	40	469.7	50	471.2
12	1000	250	0	150	30	445.3	40	446.0	50	447.4
13	1000	250	100	50	30	443.9	40	444.6	50	446.1
14	1000	250	100	100	30	420.7	40	423.6	50	424.7
15	1000	250	100	150	30	393.9	40	395.5	50	397.3
16	1000	250	200	50	30	392.4	40	393.5	50	394.0
17	1000	250	200	100	30	366.0	40	367.4	50	369.1
18	1000	250	200	150	30	340.0	40	343.0	50	343.7
19	1400	225	0	50	30	698.0	40	698.3	50	701.0
20	1400	225	0	100	30	681.2	40	684.9	50	682.3
21	1400	225	0	150	30	662.1	40	662.6	50	662.7
22	1400	225	100	50	30	664.0	40	665.0	50	667.4
23	1400	225	100	100	30	642.5	40	643.6	50	645.3
24	1400	225	100	150	30	620.5	40	622.6	50	624.3
25	1400	225	200	50	30	614.7	40	616.3	50	621.1
26	1400	225	200	100	30	591.2	40	592.3	50	593.9
27	1400	225	200	150	30	569.8	40	570.1	50	570.2

unit : mm

No.	Initial width	Initial thick.	Sizing draft	Edger draft	W.R. draft	Slab width	W.R. draft	Slab width	W.R. draft	Slab width
28	1400	250	0	50	30	695.2	40	697.6	50	698.7
29	1400	250	0	100	30	674.9	40	675.2	50	675.3
30	1400	250	0	150	30	654.5	40	655.7	50	656.6
31	1400	250	100	50	30	655.3	40	657.7	50	657.8
32	1400	250	100	100	30	632.0	40	633.9	50	635.2
33	1400	250	100	150	30	619.6	40	609.8	50	612.4
34	1400	250	200	50	30	603.0	40	604.3	50	604.6
35	1400	250	200	100	30	578.1	40	579.3	50	580.1
36	1400	250	200	150	30	553.6	40	554	50	555.0
37	1800	225	0	50	30	899.4	40	899.6	50	899.6
38	1800	225	0	100	30	888.7	40	891.7	50	893.8
39	1800	225	0	150	30	870.0	40	872.3	50	873.0
40	1800	225	100	50	30	869.6	40	871.8	50	873.2
41	1800	225	100	100	30	851.6	40	852.6	50	853.6
42	1800	225	100	150	30	834.7	40	835.1	50	836.3
43	1800	225	200	50	30	834.8	40	835.5	50	835.8
44	1800	225	200	100	30	808.4	40	809.7	50	809.9
45	1800	225	200	150	30	789.3	40	788.7	50	787.5
46	1800	250	0	50	30	897.6	40	897.9	50	898.2
47	1800	250	0	100	30	880.0	40	882.9	50	883.4
48	1800	250	0	150	30	859.5	40	863.8	50	864.4
49	1800	250	100	50	30	863.9	40	864.1	50	868.1
50	1800	250	100	100	30	849.2	40	849.3	50	849.4
51	1800	250	100	150	30	820.9	40	821.6	50	821.9
52	1800	250	200	50	30	815.7	40	815.8	50	816.5
53	1800	250	200	100	30	791.3	40	794.1	50	796.5
54	1800	250	200	150	30	772.9	40	773.3	50	774.5

과 작업 롤에서 각각 100mm, 50mm 및 30mm만큼 압하되는 해석을 수행한 결과이다. Fig. 6(b)는 엷저 롤에서 압하량만 150mm로 변경하여 해석한 결과이다. 사이징 프레스 공정이 수행된 후 엷저 압연에서 압하량이 큰 경우, 도그본의 높이와 양이 증가하고 이로 인해 수평 압연 시 폭 퍼짐량이 33.1mm에서 41.8mm로 상대적으로 증가되었다. 특히, 형상 엷저 롤에 의한 엷저 압연이 과대한 경우, 도그본의 최대 높이가 증가되었을 뿐만 아니라, 평롤을 적용한 엷저 압연에서의 단면 형상에 비해 도그본의 최대 높이에서의 변곡점의 기울기가 큰 형상이 나타났다.

사이징 프레스, 형상 엷저 롤에 의한 수직 압연 및 수평 압연공정을 통해 변형된 슬래브 폭의 변화를 Table 2에 나타내었다. 이를 이용해 사이징 프레스 공정의 유무와 형상 엷저 롤의 압하량이 슬래브 폭 퍼짐에 미치는 영향을 조사하였다. 폭 압하량이 증가할수록 폭 퍼짐량도 상대적으로 증가한다. 또한, 슬래브 폭이 증가할수록 폭 퍼짐량이 증가하는데 이는 슬래브 폭의 증가에 따라 도그본 발생높이가 증가하여 수평 압연 시 폭 방향으로의 회복율을 증가시키기 때문이다[5].

4. 폭 퍼짐 예측 수식모델의 개발 및 검증

4.1 제어인자 설정 값 계산

위 식(3)의 폭 퍼짐 예측 수식모델에 사용되는 제어인자 설정 값을 계산하는 절차는 아래와 같다.

① 식(3)은 데이터 피팅을 수행하기 쉽게 식(4)와 같이 치환된다.

② 제어인자 설정 값 중에서 초기 a_{10} 과 a_{11} 은 -1으로, a_{12} 는 1로 가정한다.

③ 주요 공정 변수(ΔB_{Ei} , B_{Ei} , h_{i-1} , R_E)에 따른 폭 퍼짐량(ΔB_{Di})은 Table 2의 유한요소해석 조건 및 결과를 이용하여 식(4)에 대입한다.

④ 계산된 폭 퍼짐량 오차의 평균값이 0으로 수렴될 때까지 제어인자 설정값을 변화시키면서 데이터 피팅을 실시한다.

$$\ln \left(\frac{\Delta B_{Di}}{\Delta B_{Ei}} \right) = \left\{ \left(a_{10} B_{Ei} + a_{11} \frac{\Delta B_{Ei}}{B_{Ei}} \right) \cdot \frac{\sqrt{h_{i-1} \cdot R_E}}{B_{Ei}} \right\} + \ln(a_{12}) \tag{4}$$

$$y = \{ (a_{10} x_1 + a_{11} x_2) \cdot x_3 \} + \ln(x_4)$$

Table 3 New setting values of control parameters

Parameter	a_{10}	a_{11}	a_{12}
Value	-12.87	55.47	4.95

5. 결론

본 연구는 형상 엿저 롤을 이용한 열간 조압연 공정의 슬래브 폭 퍼짐 예측 모델을 개발하기 위해 수행되었다. 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 폭 퍼짐 예측 모델은 엿저에 의한 폭 압하량 (ΔB_{Ei}), 수평 압연 시 두께 감소에 따른 폭 퍼짐량 (ΔB_{Hi})과 도그본의 형상 회복에 따른 폭 퍼짐량 (ΔB_{Di})으로 구성되어 있다.

(2) 도그본의 형상 회복에 따른 폭 퍼짐량(ΔB_{Di})을 고정도화할 수 있는 제어인자 설정값을 Table 3과 같이 정의하였다.

(3) 실제 열간 조압연을 통해 검증실험을 수행한 결과, 실적값과 예측값의 최대오차 및 표준편차가 각각 $\pm 12.22\text{mm}$ 와 4.87mm 로 감소되어 양호한 슬래브 폭 정밀도 개선효과를 확인하였다.

후 기

본 연구는 현대제철 산학연구과제 및 PNU-IFAM 국제공동연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] Z. Wusatowski, 1955, Hot Rolling: A Study of Draught, Spread and Elongation, Iron and Steel, Vol. 28, pp. 49~54, 89~94.
- [2] A. Helmi, J. M. Alexander, 1968, Geometric Factors Affecting Spread in Hot Flat Rolling of Steel, J. Iron. Steel Inst., Vol. 206, No. 11, pp. 1110~1117.
- [3] A. K. E. H. A. El-Kalay, L. G. M. Sparling, 1968, Factors Affecting Friction and Their Effect upon Load, Torque, and Spread in Hot Flat Rolling, J. Iron. Steel Inst., Vol. 206, No. 2, pp. 152~163.
- [4] T. Shibahara, Y. Misaka, T. Kono, M. Koriki, H. Takemoto, 1981, Edger Set-up Model at Roughing Train in Hot Strip Mill, J. Iron. Steel Inst. Jpn., Vol. 67, No. 15, pp. 2509~2515.
- [5] M. S. Chun, J. J. Yi, Y. H. Moon, 1999, Precise width Control Through the Width Spread Compensation in Hot Strip Mill, Trans. Mater. Process., Vol. 8, No. 2, pp. 200~207.
- [6] S. I. Oh, S. Kobayashi, 1975, An Approximate Method

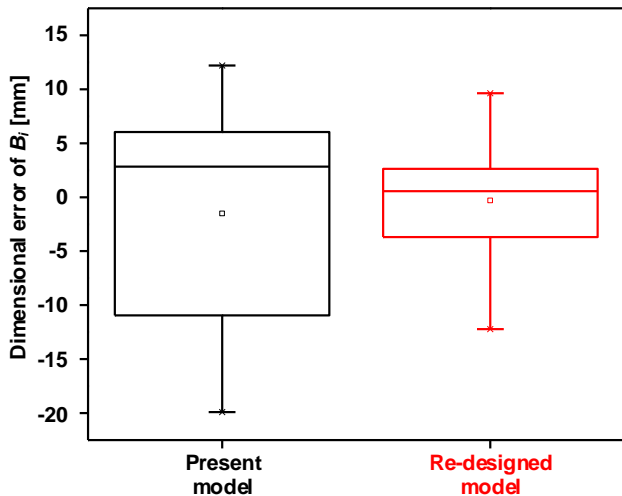


Fig. 7 Comparison of dimensional error between present model and re-designed model

Table 3은 유한요소해석 결과를 데이터 피팅하여 계산된 제어인자 설정 값을 나타낸다. 이 값들을 식 (3)에 대입하면 도그본의 형상 회복에 따른 폭 퍼짐량을 예측할 수 있다.

4.2 폭 퍼짐 예측 수식모델의 검증

제안된 제어인자 설정값의 유효성을 검증하기 위해 자동차 외판재용 소재인 *Steel B*에 대하여 열간 사이징 프레스 및 조압연 실험을 실시하였다. Table 3의 설정값을 적용하여 계산된 슬래브 폭 치수는 조압연된 슬래브의 실적 폭 치수와 비교되었다. 실시된 실험의 횟수는 총 107번이며, 초기 슬래브의 치수와 폭 압하량 및 두께 압하량 등의 다양한 공정 조건하에서 실험이 수행되었다.

Fig. 7에 나타난 것처럼, 본 연구를 통해 재계산된 제어인자 설정값을 적용한다면 슬래브 폭 오차를 크게 감소시킬 수 있다. 두 모델간의 평균값은 큰 차이를 나타내지 않지만, 최대 오차량의 절대값은 19.90mm 에서 12.22mm 로 감소되었다. 또한, 표준편차 값은 9.26 mm 에서 4.87mm 로 47%의 개선효과를 나타내었다.

- for a Three-dimensional Analysis of Rolling, Int. J. Mech. Sci., Vol. 17, No. 4, pp. 293~305.
- [7] D. H. Lee, K. B. Lee, S. M. Hwang, 2014, A New Model for Predicting Width Spread in a Roughing Mill -Part I: Application to Dog-bone Shaped Inlet Cross, Trans. Mater. Process., Vol. 23, No.3, pp. 139~144.
- [8] D. H. Lee, K. B. Lee, S. M. Hwang, 2014, A New Model for Predicting Width Spread in a Roughing Mill -Part II: Application to Flat Rolling, Trans. Mater. Process., Vol. 23, No.3, pp. 145~150.
- [9] N. S. Kim, H. J. Kim, 2002, Metal Forming and Analysis, 3rd ed, Munundang, Seoul. p. 280.