

# 열간 사상압연에서 스트립 폭 퍼짐의 공정변수 영향 및 예측에 관한 연구

전준배<sup>1</sup> · 이경훈<sup>2</sup> · 한진규<sup>3</sup> · 정진우<sup>3</sup> · 김형진<sup>3</sup> · 김병민<sup>#</sup>

## The Effect of Process Variables on Strip Width Spread and Prediction in Hot Finish Rolling

J. B. Jeon, K. H. Lee, J. G. Han, J. W. Jung, H. J. Kim, B. M. Kim

(Received March 25, 2016 / Revised May 30, 2016 / Accepted May 31, 2016)

### Abstract

Dimensional accuracy of hot coil is improved by precise control of thickness profiles, flatness, width and winding profile. Especially, precise width control is important because yield could be increased significantly. Precise width control can be improved by predicting the amount of width spread. The purpose of this study is to develop the advanced prediction model for width spread in hot finish rolling for controlling width precisely. FE-simulations were performed to investigate the effect of process variables on width spread such as reduction ratio, forward and backward tension and initial width at each stand. From the statistical analysis of simulated data, advanced model was developed based on the existing models for strip width spread. The experimental hot rolling trials showed that newly developed model provided fairly accurate predictions on the strip width spread during the whole hot finishing rolling process.

**Key Words:** Width Spread, Hot Finishing Rolling, FE-simulations, Reduction Ratio, Tension

## 1. 서 론

열연 코일은 Fig. 1과 같이 연속 주조로 제조된 스트립을 재가열하여 조압연과 사상압연을 통해 요구 치수로 제조된다. 열연 코일의 치수 품질은 폭과 길이에 따른 두께 프로파일, 평탄성, 폭, 권취 형상 등을 정밀 관리함으로써 개선될 수 있다. 특히 폭 정밀도가 개선되면 전단 손실량이 감소되고 실수율이 크게 향상되므로 이에 대한 관심이 높아지고 있다.

압연 공정에서 폭 퍼짐은 두께 압하 시의 폭 방향으로 제한되지 않는 모서리 부근의 국부변형에 의해 발생한다. 폭 퍼짐은 두께 압하량, 압연 속도,

입측 소재 폭, 두께, 온도, 강종, 롤 경, 롤과 소재의 표면 상태, 장력 등 다양한 변수의 영향을 받는다. 폭 퍼짐량을 예측함으로써 열연 코일의 폭 정밀도를 개선할 수 있으며 이와 관련된 많은 연구가 수행되었다.

Raghunathan 등은 AA5xxx 계열 두 종의 열간 압연에서 폭 퍼짐 예측 식을 개발하기 위해 열간 압연 실험을 수행하였다. 폭 대 두께 비, 폭 대 접촉투영 길이 비 등 무차원 변수들의 폭 퍼짐 예측 식을 개발하였다[1]. Laasraoui 등은 강의 재료 구성방정식 개발에 앞서 적절한 재결정 관계를 규명하기 위하여 저 탄소강들의 이중 가격압축 실험(double-hit

1. 부산대학교 기계공학부 정밀가공시스템전공

2. 한국해양대학교 기관공학부

3. 현대제철 기술연구소 압연기술개발팀

# Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l University, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

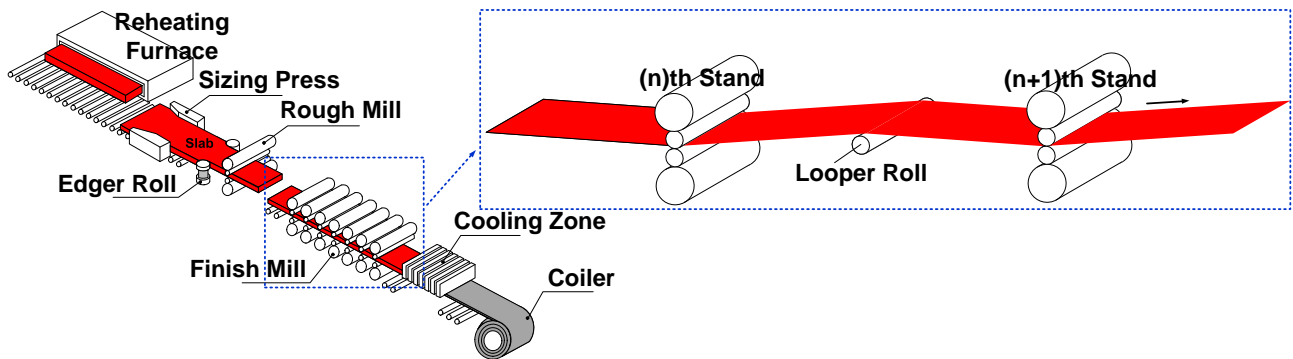


Fig. 1 Schematic illustration of hot rolling process

compression tests)을 수행하였다. 재결정 시간과 변형률 속도, 예비 변형의 관계를 수식화 하였다[2].

Micari 는 열간 압연 시 소재의 변형과 온도 분포를 분석하기 위해 3차원 해석을 수행하고 실험을 통해 검증하였다. 폭 대 두께 비, 압하율에 따른 변형률 및 온도 분포, 폭 퍼짐량을 분석하였다[3]. Angleov 등은 2차원 단열 정상상태 수치해석을 통해 마찰상수, 압연속도, 압하량, 롤 속도가 상대 접촉 속도, 롤 압력 및 변형률 속도 분포에 미치는 영향을 조사하였다[4]. Hwang 등은 다양한 압연 조건이 롤 갭에서 재료의 불균일 변형 거동에 미치는 영향을 조사하기 위해 수치해석과 실험을 수행하였다[5]. Chun 등은 실 압연 측정값 분석을 통해 두께 압연 폭 퍼짐식과 도그본 압연 폭 퍼짐식으로 구성된 열간 압연의 폭 퍼짐 예측 모델을 개발하였다[6]. Jung 등은 사상압연에서 하중 설정 정확도 향상을 위해 하중 설정 시스템에 폭 퍼짐량을 고려하였으며, 유한요소해석 결과와 인공신경망을 사용하여 다양한 조건에서 폭 퍼짐량을 예측하였다[7]. Hong 등은 사상압연에서 과도한 스탠드간 장력 발생을 예방하기 위해 장력 제어 시스템을 개발하였다. 장력을 실시간으로 측정하고 분석, 제어하도록 하였으며, 실 공정에 적용하여 효과를 확인하였다[8]. Esteban 등은 저탄소강의 사상압연 1 스탠드에서 폭 퍼짐 거동 분석을 위해 유한요소해석과 실험을 수행하였다. 재료 물성 실험 결과를 소성발열에 의한 재료연화효과를 고려하여 보정하였다. 또한, 마찰계수와 장력이 압연하중, 토크 및 폭 퍼짐량에 미치는 영향을 조사하였다[9].

위와 같이 단일 스탠드 압연시의 롤 갭 내 소재의 변형거동을 예측하기 위한 다양한 연구가 수행되었다. 하지만 열간 사상압연과 같은 수평압연 공

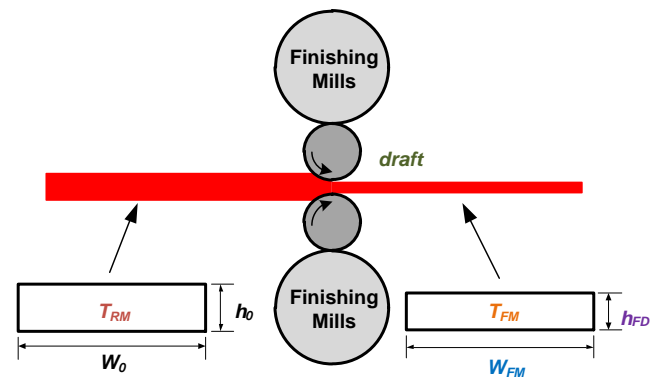


Fig. 2 Cross-sectional shape of rolled strip during finishing rolling process

정에서 각 스탠드의 압연 조건과 스탠드간의 장력 등에 따른 폭 변화를 예측하고 이를 적용하여 폭 정밀도를 개선한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 전체 7 스탠드로 구성된 열간 사상압연 공정에서 스트립 폭 퍼짐을 예측하기 위한 기존의 폭 퍼짐 예측 모델을 분석하였다. 그리고 각 스탠드에서 압연 변수들이 폭 퍼짐에 미치는 영향을 유한요소해석을 통해 분석하였다. 기존의 폭 퍼짐 예측 모델에서 고려되었던 변수들과 각 스탠드에서의 영향도 분석 결과를 고려하여 사상압연 전체 스탠드에서 스트립의 폭 퍼짐량을 예측하는 모델을 개발하였다. 개발된 예측 모델의 유효성을 열간 사상압연 실험 결과와 비교하여 검증하였다.

## 2. 열간 사상압연의 폭 퍼짐 예측 모델 분석

본 장에서는 조업 현장의 경험식들을 분석하였다. Fig. 2 는 사상압연 공정에서 스트립의 폭 퍼짐에 영향을 줄 수 있는 인자들을 나타낸다. 식 (1)은 7 스

텐드로 구성된 열간 사상압연 공정에서 최종 두께와 목표 폭, 압하량, 공정 전 후의 스트립의 온도로 구성된 예측 모델이다.

$$\Delta W_{FM} = A_0 + A_1 \cdot \sqrt{h_{FM}} + A_2 \cdot W_{FM} + A_3 \cdot \Delta h + A_4 \cdot T_{RM} + A_5 \cdot T_{FM} \quad (1)$$

여기서,  $\Delta W_{FM}$  은 사상압연 공정에서 폭 퍼짐량(mm),  $h_{FM}$ ,  $W_{FM}$  는 압연 후 재료의 두께(mm)와 목표 폭(mm),  $\Delta h$  는 두께 압하량(mm),  $T_{RM}$ ,  $T_{FM}$  은 각각 압연 전, 후의 재료의 표면 온도(°C)이다.  $A_0 \sim A_5$  는 모델 제어인자이다. 식 (2)는 스탠드간 장력과 각 스탠드에서의 압하율, 접촉 투영길이를 구성된 폭 퍼짐 예측 모델이다.

$$\Delta W_{FM} = \sum_{i=1}^7 C \cdot R_i \cdot l_{di} - \sum_{i=1}^7 \{W_i \cdot \exp(A) \cdot \sigma_{Ti}^n \cdot \exp(-\frac{B}{T_i + 273})\} \quad (2)$$

여기서,  $W_{R4} - W_7$  는 사상압연 후의 폭 수축량(mm),  $W_i$ ,  $\sigma_{Ti}$ ,  $T_i$  는 각각  $i$ 번째 스탠드의 입측 폭(mm), 장력(kgf/mm<sup>2</sup>), 온도(°C), 그리고  $R_i$  는 압하율,  $l_{di}$  는 접촉 투영길이를 롤경, 압하량 곱의 제곱근인  $\sqrt{R\Delta h}$  로 근사되는 값이다.  $A, B, C, n$  은 모델 제어인자이다. 우변의 첫 번째 항은 두께 압하에 의한 폭 증가를 고려한 항이며, 두 번째 항은 장력에 의한 폭 수축을 고려한 항이다.

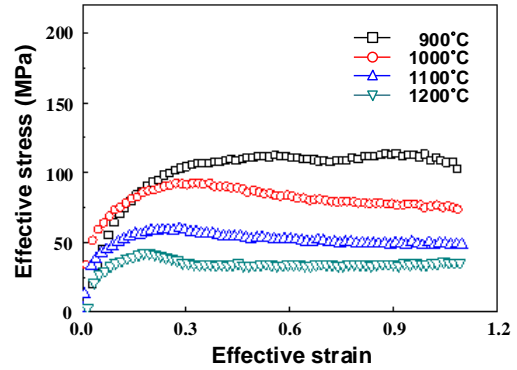
### 3. 열간 사상압연 공정의 유한요소해석

#### 3.1 유한요소해석 조건

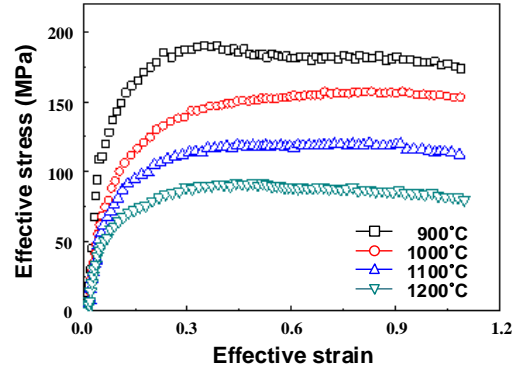
본 연구에서 사용된 자동차 외판재용 소재인 Steel A의 응력-변형률 선도를 Fig. 3에 나타내었다. 물성 평가를 위해 고온 압축시험은 Gleeble 장비를 사용하여 변형률 속도 0.1, 10, 50 s<sup>-1</sup>, 온도 900, 1000, 1100, 1200 °C 범위에서 수행되었다.

Fig. 4는 사상압연 해석 모델을 나타낸다. 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM 3D를 사용하여 3차원 압연해석을 수행하였다. 해석 모델을 1/4로 구성하여 해석시간을 단축하였다.

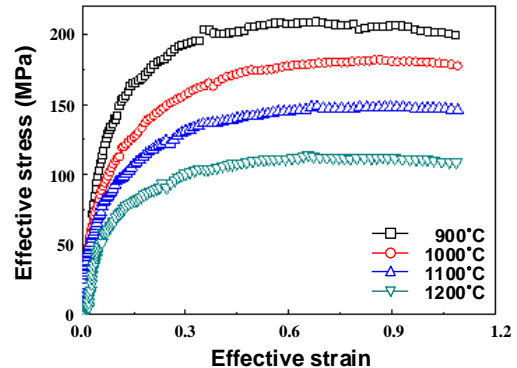
사상압연 공정변수가 폭 퍼짐에 미치는 특성을 파악하기 위해서는 많은 해석 횟수가 필요하다. 따라서, 적은 해석 횟수로 신뢰성을 가지는 효율적인



(a) Strain rate: 0.1 s<sup>-1</sup>



(b) Strain rate: 10 s<sup>-1</sup>



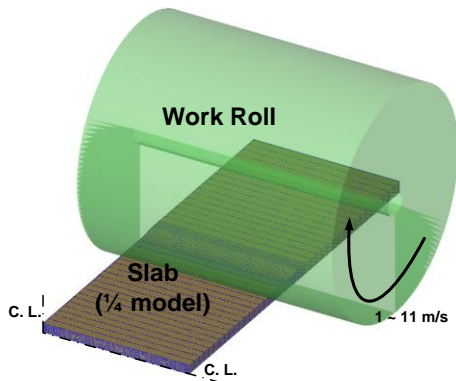
(c) Strain rate: 50 s<sup>-1</sup>

Fig. 3 Stress-strain curves under different temperatures and strain rates

해석을 수행하는 것이 중요하다[10]. 본 연구에서는 각 스탠드의 초기 재료 폭, 전방장력, 후방장력 및 압하율의 4개 변수를 3수준으로 한 Box-Behnken 실험계획법을 적용하여 해석 모델을 설계하였다. Table 1에 주요 공정변수와 그 수준값을 나타내었다. 전체 스탠드에서 초기 재료의 폭은 875, 1348.5, 1822 mm 이며, 두께, 전방장력, 후방장력, 압하율, 속도, 온도, 롤경 등은 각 스탠드의 현장 조건을 고려하여

**Table 1** Input parameters required for hot finishing rolling process

Stand No.	Width (mm)		Forward Tension (MPa)		Backward Tension (MPa)		Reduction Ratio (%)		Roll Speed (m/s)	Thickness (mm)	Temperature (°C)	Roll Diameter (mm)
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.				
1	875	1,822	4.1	11	-	-	36.7	58.1	1.57	36.96	1046.62	823.74
2			5.1	10.1	4.1	11	33	45.4	2.59	20.17	981.4	798.1
3			5.6	11.7	5.1	10.1	27.6	39.1	3.91	12.22	978.69	774.26
4			2.7	12.5	5.6	11.7	25.8	35.9	5.68	8.09	972.26	749.21
5			5.9	45.1	2.7	12.5	20	29.9	7.64	5.57	963.12	624.58
6			6.7	25.3	5.9	45.1	13.6	23.2	9.48	4.16	955.39	653.58
7			-	-	6.7	25.3	9.7	16.7	11.09	3.38	942.45	682.23



**Fig. 4** 3D FE-model of hot finishing rolling process

설정하였다. 롤과 재료 사이의 마찰상수( $\mu$ )는 0.6, 계면 및 대류 열전달 계수는 현장조건을 고려하여  $11.3 \text{ N/s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $0.02 \text{ N/s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C}$  이다[11].

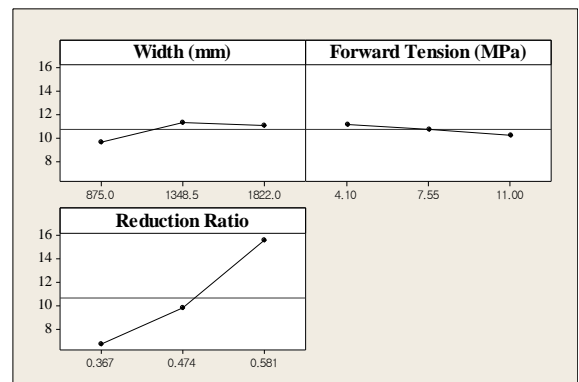
### 3.2 유한요소해석 결과

사상압연 1 스탠드에서 주요 변수에 따른 스트립의 폭 퍼짐량을 Table 2에 나타내었고, 각 변수의 영향도를 Fig. 5에 나타내었다. 1 스탠드에서는 압하율이 폭 퍼짐에 가장 큰 영향을 보이며, 압하율이 증가할수록 폭 퍼짐량이 증가한다. 폭과 전방 장력은 폭 퍼짐에 큰 영향을 나타내지 않으며, 폭의 증감에 따라서는 폭 퍼짐량이 일정하게 변하지 않는다. 사상압연 공정 전반부에 해당하는 2~4 스탠드까지도 유사한 경향을 나타낸다.

Table 3과 Fig. 6에는 7 스탠드에서 스트립의 폭 퍼짐량과 각 변수의 영향도를 나타내었다. 7 스탠드에서는 후방 장력이 가장 큰 영향을 보이며, 후방장력이 증가할수록 폭 퍼짐량은 감소한다. 또한 압하율이 증가하더라도 폭 퍼짐량은 감소하는데 이는 전반부 스탠드에 비해 재료의 두께가 얇아지고, 통관

**Table 2** Width spread of rolled strip under different process conditions at 1st stand in finishing rolling

No	Width (mm)	Forward Tension (MPa)	Reduction Ratio (%)	Width Spread (mm)
1	1348.5	11.00	36.7	6.52
2	1822.0	7.55	36.7	7.05
3	875.0	7.55	36.7	6.52
4	1348.5	7.55	47.4	10.19
5	875.0	4.10	47.4	9.74
6	1822.0	4.10	47.4	10.81
7	1348.5	7.55	47.4	10.19
8	1822.0	11.00	47.4	9.73
9	875.0	7.55	58.1	13.34
10	1348.5	11.00	58.1	15.80
11	875.0	11.00	47.4	8.82
12	1348.5	4.10	36.7	7.23
13	1348.5	7.55	47.4	10.19
14	1348.5	4.10	58.1	16.83
15	1822.0	7.55	58.1	16.47



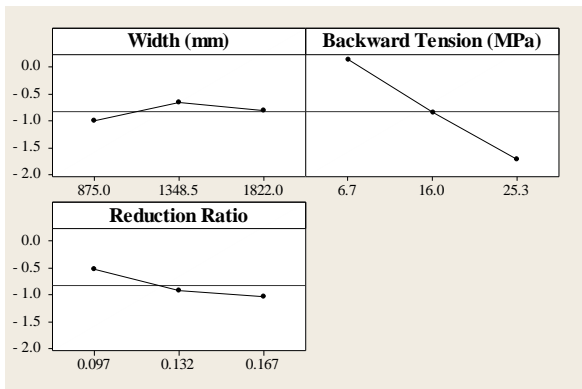
**Fig. 5** Effect of process variables on width spread at 1st stand in finishing rolling

**Table 3 Width spread of rolled strip under different process conditions at 7th stand in finishing rolling**

No	Width (mm)	Backward Tension (MPa)	Reduction Ratio (%)	Width Spread (mm)
1	1348.5	16.0	13.2	-0.74
2	875.0	25.3	13.2	-2.70
3	1348.5	16.0	13.2	-0.74
4	875.0	16.0	16.7	-1.14
5	1348.5	25.3	9.7	-1.02
6	1822.0	16.0	9.7	-0.58
7	1348.5	16.0	13.2	-0.74
8	1348.5	6.7	16.7	0.23
9	875.0	6.7	13.2	0.19
10	1822.0	25.3	13.2	-1.45
11	875.0	16.0	9.7	-0.39
12	1822.0	16.0	16.7	-1.42
13	1348.5	6.7	9.7	-0.07
14	1822.0	6.7	13.2	0.15
15	1348.5	25.3	16.7	-1.77

**Table 4 Value of control parameters**

Parameter	Value	P-value	Parameter	Value	P-value
$\alpha_0$	-9261.7	0.958	$\alpha_{13}$	-324.2	0.000
$\alpha_1$	-60.78	0.002	$\alpha_{14}$	0.01	0.021
$\alpha_2$	-1.90	0.003	$\alpha_{15}$	0.08	0.000
$\alpha_3$	24.42	0.131	$\alpha_{16}$	-4.28	0.000
$\alpha_4$	7.44	0.000	$\alpha_{17}$	16.61	0.000
$\alpha_5$	-690.51	0.000	$\alpha_{18}$	0.00	0.034
$\alpha_6$	2947.00	0.014	$\alpha_{19}$	0.65	0.000
$\alpha_7$	1.50	0.928	$\alpha_{20}$	-0.01	0.000
$\alpha_8$	-0.18	0.000	$\alpha_{21}$	0.97	0.000
$\alpha_9$	0.00	0.001	$\alpha_{22}$	-4.48	0.000
$\alpha_{10}$	-0.01	0.000	$\alpha_{23}$	2.03	0.000
$\alpha_{11}$	0.00	0.001	$\alpha_{24}$	91.27	0.000
$\alpha_{12}$	-23.60	0.000	$\alpha_{25}$	-4.06	0.000



**Fig. 6 Effect of process variables on width spread at 7th stand in finishing rolling**

속도의 증가로 장력도 함께 커지기 때문이다. 사상압연 공정 후반부에 해당하는 5, 6 스탠드에서도 경향은 동일하다.

상기 결과로부터 영향도가 높은 전반부 스탠드의 압하율과 후반부 스탠드에서의 장력이 추가로 폭퍼짐 예측 모델에 고려되어야 할 것이다.

#### 4. 폭 퍼짐 예측 수식모델의 개발 및 검증

##### 4.1 폭 퍼짐 예측 수식모델의 개발

앞의 결과를 바탕으로 개발될 폭 퍼짐 예측 모델

을 구성하였다. 고려한 변수로는 식 (1)과 (2)의 기존 예측 모델에서 고려한 소재의 사상압연 전, 후 온도, 소재의 형상을 나타내는 입측 두께 및 판폭비, 그리고 해석 결과 가장 영향력이 큰 변수로 확인된 1 스탠드의 압하율과 7 스탠드에서의 후방장력 등이다. 상기 변수들의 고려하여 사상압연 공정에서 폭 퍼짐 예측 모델을 식 (3)과 같이 구성하였다[6]. 예측 모델은 각 변수들의 개별 항과 제곱 항, 두 변수간의 교호작용을 고려한 항으로 구성된 완전 이차 형태이다. 각 항의 유의확률과 제어인자를 Table 4에 나타내었다. 각 변수의 제곱항과 두 변수의 교호 작용을 고려한 항 중 유의확률이 높은 항은 제외하였다.

$$\Delta W = \sum_{i=0}^{25} \alpha_i \cdot x_i \quad (3)$$

$i$	$x_i$	$i$	$x_i$	$i$	$x_i$
0	Const.(=1)	9	$T_0^2$	18	$T_0(W_0/h_0)$
1	$h_0$	10	$T_1^2$	19	$T_0 r_1$
2	$T_0$	11	$(W_0/h_0)^2$	20	$T_1(W_0/h_0)$
3	$T_1$	12	$(v_1)^2$	21	$T_1 v_1$
4	$W_0/h_0$	13	$(r_1)^2$	22	$T_1 r_1$
5	$v_1$	14	$(BT_7)^2$	23	$(W_0/h_0) r_1$
6	$r_1$	15	$h_0 T_1$	24	$v_1 r_1$
7	$BT_7$	16	$h_0 v_1$	25	$r_1 \cdot BT_7$
8	$h_0^2$	17	$h_0 r_1$		

여기서  $h_0$ 는 소재의 초기 두께,  $T_0$ 는 소재의 초기 온도,  $T_1$ 은 사상압연 후 온도,  $r_1$ ,  $v_1$ 은 1 스탠드의 압하율과 속도,  $BT_7$ 은 7 스탠드의 후방장력,  $\alpha_0 \sim \alpha_{25}$ 는

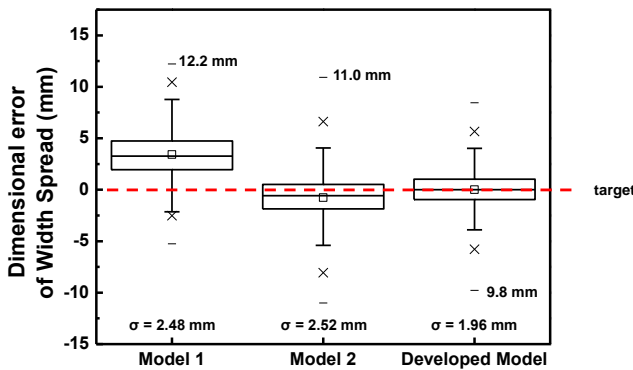


Fig. 7 Dimensional errors of each prediction model

예측 모델의 제어인자이다.

#### 4.2 폭 퍼짐 예측 수식모델의 검증

개발된 식의 유효성을 검증에는 자동차 외판용 소재인 Steel A의 열간 사상압연 조업 결과를 사용하였다. 총 2181개의 코일의 조업 데이터를 사용하였으며, 조업 조건에서 개발된 예측 식과 기존 예측 식의 계산 값을 실제 폭 퍼짐량과 비교하였다.

Fig. 7에 나타난 것처럼, 최대 오차는 모델 (1) 12.2 mm, 모델 (2) 11.0mm, 개발된 모델 9.8mm 이며, 표준편차는 또한 각각 순서대로 2.48, 2.52, 1.96mm 로 개발된 모델에 의한 예측 값이 기존 식 보다 목표 값에 가깝게 분포한다.

### 5. 결론

본 연구는 열간 사상압연 공정에서 스트립의 폭 정밀도 향상을 위해 폭 퍼짐 예측 모델을 개발하였다. 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 기존 예측 모델에서는 스트립의 최종 두께, 목표 폭, 공정 전후의 온도, 압하량, 각 패스의 압하율, 접촉 길이, 장력 그리고 스트립 온도 등을 고려한다.

(2) 각각의 스탠드에서 압하율, 전방장력, 후방장력, 판 폭을 변수로 해석조건을 설정하여 유한요소 해석을 수행하였다. 사상압연 전반부인 1~4 스탠드에서는 압하율, 후반부인 5~7 스탠드에서는 후방장력이 큰 영향을 미친다.

(3) 기존의 모델과 유한요소해석 결과를 바탕으로 공정 전 소재의 두께, 사상압연 전, 후의 소재 온도, 1 스탠드의 압하율과 속도, 7 스탠드의 후방장력 등으로 사상압연 전체 공정에서의 폭 퍼짐량 예측할

수 있는 모델을 식 (3)과 개발하였다.

(4) 실제 열간 사상압연 조업 데이터와 예측 모델을 통한 계산 값의 차는 최대 오차 1.2mm 감소되어 예측 정도 개선 효과를 확인 하였다.

### 후 기

본 연구는 현대제철 산학연구과제 및 PNU-IFAM 국제 공동 연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.

### REFERENCES

- [1] N. Raghunathan, T. Sheppard, 1989, Lateral Spread during Slab Rolling, Mater. Sci. Technol., Vol. 5, No. 10, pp. 1021~1026.
- [2] A. Laasraoui, J. J. Jonas, 1991, Recrystallization of Austenite after Deformation at High Temperatures and Strain Rates-Analysis and Modeling, Metall. Trans. A, Vol. 22, No. 1, pp 151~160.
- [3] F. Micari, 1992, Three-dimensional Coupled Thermo-mechanical Analysis of Hot Rolling Processes, J. Mater. Process. Technol., Vol. 34, No. 1, pp. 303~310.
- [4] T. Angleov, A. Nedev, 1997, Finite-element Analysis of a Hot-rolling Problem with Nonlinear Friction, Adv. Eng. Software, Vol. 28, No. 9, pp. 555~561.
- [5] Y. M. Hwang, H. H. Hsu, 1999, An Investigation into the Plastic Deformation Behavior at the Roll Gap during Plate Rolling, J. Mater. Processing Technol., Vol. 88, No. 1, pp. 97~104.
- [6] 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.
- [7] J. Y. Jung, Y. T. Im, 2000, Improvement of Rolling Load Prediction with Consideration of Spread in Hot Rolling, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 24, No. 11, pp. 2836~2844.
- [8] W. K. Hong, P. H. Kim, Y. H. Moon, J. J. Yi, 2001, Hot Strip width Control Method by using Looper Tension Measuring System in Finishing Mill, J. Mater. Process. Technol., Vol. 111, No. 1, pp. 74~78.
- [9] L. Esteban, M. R. Elizalde, I. Ocana, 2007, Mechanical Characterization and Finite Element

- Modeling of Lateral Spread in Rolling of Low Carbon Steels, J. Mater. Process. Technol., Vol. 183, No. 2, pp. 390~398.
- [10] G. E. P. Box, D. W. Behnken, 1960, Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables, Technometrics, Vol. 2, No. 4, pp. 455~475.
- [11] K. H. Lee, J. G. Han, J. H. Park, B. M. Kim, D. C. Ko, 2015, Prediction and Control of Front end Curvature in Hot Strip Finishing Mills, Adv. Mech. Eng., Vol. 7, No. 11, pp. 1~10.