

열간압연시 폭퍼짐 보상을 통한 폭정밀도 개선연구

천명식* · 이준정* · 문영훈**

(1998년 12월 10일 접수)

Precise width control through the width spread compensation in hot strip mill

M.S.Chun, J.J.Yi and Y.H.Moon

Abstract

To increase dimensional accuracy of strip width, model to compensate width spread during roughing mill has been developed. To measure the amount of width spread during the production rolling more precisely, special roughing rolling procedures for the horizontal rolling and dog-bone rolling were designed in the actual production mill. From the operational data analysis, it is known that the prime factors influencing on the width spread were strip width, strip thickness, edging amount, number of pass and type of edger roll etc.. Based upon the statistical analysis of rolling data, new models which can predict width spread during horizontal rolling and dog-bone rolling were developed and tested on the actual processing conditions for the reliability. The application test showed that newly developed model gave fairly accurate predictions on the width spread during roughing passes.

Key Words: Width Spread, Hot Strip Rolling, Width Control, Roughing Mill, Horizontal Rolling, Dog-Bone Rolling, Edge Rolling

1. 서론

압연강판의 품질관리 항목 중에서도 치수관리가 대단히 중요하며 그 중에서도 최근 폭 정밀도 개선에 관한 관심이 높아지고 있다. 폭 정밀도개선은 품질뿐만 아니라 전단 손실량(trimming loss)을 줄여 실수율 향상에도 크게 기여하게 된다. 근래 압연강판의 폭 정밀도에 대한 관심이 높아지는 주요 이유로는 연속주조기(continuous caster)에 의한 슬라브(slab) 생산량의 증대와 함께 슬라브 폭 집적화에 따른 폭 조정량의 확대 및 에너지 저감을 위한 가열로 저온추출로 인해 스킨드 마크(skid mark)등과 같은

폭 정밀도를 저하시키는 요인이 새로이 발생하기 때문이다.⁽¹⁾ 따라서 열간압연 판폭제어기술에 대한 광범위한 연구가 현재 진행 중에 있으며⁽¹⁻¹⁵⁾ 본 연구에서는 이 중에서도 열간압연 판 폭정밀도 향상에 필수적인 인자로 작용하는 조압연 폭압연 및 수평압연시의 폭퍼짐(width spread)량을 보상해줌으로써 열연코일의 폭 정밀도를 개선시키고자 한다.

2. 열간압연시의 폭변형 이론

2.1 수평압연

* 포항산업과학연구원 압연프로세스연구팀
** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터

빌렛(Billet)과 같은 판폭비(판폭/ 판두께)가 작은 강판의 열간압연에 대한 폭퍼짐에 있어서는 이전부터 실험적인 검토가 이루어져 다양한 실험식이 제안되어 왔다.^(10~15) 그러나 이들의 식을 판폭비가 큰 후판 또는 박판 스프라브의 압연에 적용할 경우, 압연방향의 변형에 비해 폭방향의 변형이 작은 평면변형(plane strain) 조건에 근접하기 때문에 상당한 오차가 생길 수 있다. 따라서 모든 압연조건에 공통으로 적용할 수 있는 식보다는 각 열연조건 특성에 맞는 폭 퍼짐 예측식을 개발하여 사용하는 것이 정밀도 향상 측면에서 효과적이다. 수평압연시의 폭변형거동은 Fig. 1과 같이 정상부와 선, 후단부의 비정상부로 나뉘어지며 폭퍼짐율(φ)은 다음과 같이 정의 된다.

$$\varphi_m = (W_1 - W_0)/W_0 \quad (\text{middle}) \quad (1)$$

$$\varphi_{t,b} = (W_{t,b} - W_0)/W_0 \quad (\text{top, bottom}) \quad (2)$$

여기서 φ_m 은 정상부의 폭퍼짐율이고, $\varphi_{t,b}$ 은 선, 후단부의 폭퍼짐율로 정상부의 폭퍼짐율과 다르다. 폭퍼짐율에 영향을 미치는 주요인자로는 압하율, 판폭비(판폭/판두께), 판두께비(물경/판두께)등을 들 수 있으며 그 외에도 압연온도, 마찰계수, 강종의 영향을 받는다. 일반적으로 폭퍼짐율은 압하율이 클수록, 판폭비가 작을수록 증가하나 강종, 압연온도 그리고 윤활상태 등에 따라서 다소 차이가 있다. 대개 압연판의 선, 후단부는 정상부 보다 폭퍼짐량이 크게 발생하는데 이러한 현상은 정상부에서는 롤 바이트(roll bite) 전후의 미변형부에 의해 폭퍼짐이 구속되는 반면에 비정상부의 선, 후단부에서는 그 구속력이 약해져 상대적으로 압연방향으로의 연신도 작아지기 때문이다. 이들 폭퍼짐은 판폭비가 큰 경우에는 판폭의 영향을 거의 받지 않는다.

2.2 폭압연

Fig. 2는 폭압연(또는 에지압연, edge rolling) 및 도그본(dog bone) 발생부를 수평압연하였을 경우의 판폭 변화거동을 나타낸 그림이다.

여기서 Fig. 2(b)는 도그본 발생부만을 수평압연하였을 경우의 평면 및 단면형상이고, Fig. 2(c)는 두께압연까지 실시한 경우의 평면 및 단면형상이다. 일반적으로 폭압연에서는 판폭에 비해 폭압하량(또는 edging량이라고 함)이 매우 작으므로 판폭 증감부의 구속작용을 받는다. 이 때 판폭 에지부에는 국부적인 소성변형으로 판두께가 부풀어 오르는 소위 도그본(dog bone) 모양이 형성된다. 폭압연시 발생된 도그본은 그 다음 수평압연의 실시로 일부는 판길이방향으로 유동하고 일부는 판폭방향으로 회복된다. 조압연시 폭압연의 목적은 판폭이나 두께압연에 의한 폭퍼짐을 없애 목표판폭에 맞도록 에지압연을 실시하는 데 있으므로 폭방향으로의 회복율을 최소로 해야한다. 폭압연효율(η)이라 함은 "전체 도그본 발생부중 폭방향으로 회복되지 않는 율"로 정의되며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\eta = \frac{W_0 - W_1}{W_0 - W_e} = \frac{W_0 - W_1}{\Delta W_e} \quad (3)$$

여기서 W_0 는 초기 스프라브 폭, W_e 는 폭압연후의 폭, W_1 는 도그본 발생부를 수평압연한 후의 폭 그리고 ΔW_e 는 폭압하량이다. η 는 패스당 폭압하량이 증가할수록 증가하며 광폭재로부터 협폭재로 향할수록 증가한다.

폭압연시 도그본의 형상은 정상부와 선단부가 서로 다르다. 즉, 도그본의 폭과 높이가 비정상부에서는 선단으로 향할수록 감소해 간다. 그리고 정상부와 비교하여 선, 후단부에서 폭이 줄어드는 현상이 발생하는데 이를 폭수축(width shortage)이라 하며 수식으로 표현하면 다음과 같다.(Fig. 2 참조)

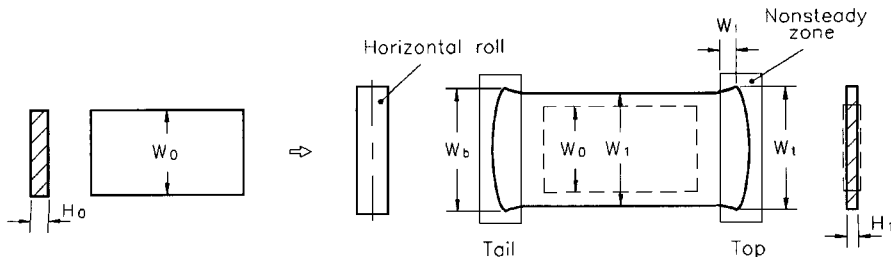


Fig. 1 Width variation at head and tail ends during horizontal rolling

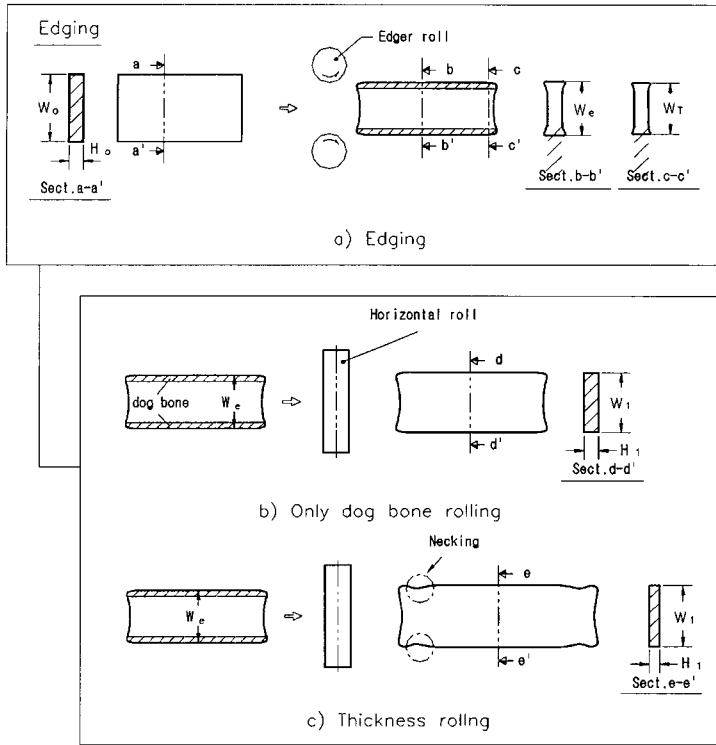


Fig. 2 Width variation at head and tail ends during edge rolling

$$(\Delta W_s)_{t,b} = W_e - W_{t,b} \quad (4)$$

여기서 W_e 는 폭압연후의 폭, W_t 는 선단부 폭, W_b 는 후단부 폭, $(\Delta W_s)_{t,b}$ 는 선단 및 후단의 폭수축량을 나타낸다. 폭수축량은 도그 본 압연 시 더욱 증가하는데 후단보다 선단부가 훨씬 크고 폭압하량이 증가할수록 증가되는 현상을 보인다. 그러나 이 폭수축 현상은 수평압연(두께압연)시 선후단부 폭퍼짐에 의해 어느 정도 보완될 수 있으나 수직 및 수평압연의 반복실시로 새로운 폭네킹(necking)현상을 유발하기도 한다.

2.3 폭 및 수평압연시의 폭퍼짐 거동

Fig. 3은 폭압연 및 수평압연중의 소재의 단면형상의 변화양상을 나타낸 그림이다.

초기두께, 폭, 길이를 각각 H_0, W_0, L_0 에지압연 후의 두께, 폭, 길이를 각각 H_e, W_e, L_e 이라 하고, 수평압연 후의 두께, 폭, 길이를 각각 H_1, W_1, L_1 이라 하면 수평압연 시 두께압연만 실시하였을 경우의 폭퍼짐량(ΔW_h) 과 도그 본(dog bone)발생 부만 수평압연 하였을 경우의 폭퍼짐량(ΔW_d)으

로부터 1패스 압연후의 판 폭은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$W_1 = W_e + \Delta W_h + \Delta W_d \quad (5)$$

이때 수평압연 만 실시하였을 경우의 폭퍼짐량은 판두께 방향과 판 폭방향의 변형도의 비로써 정의되는 폭퍼짐계수(C_h) 로부터 구해진다.

$$C_h = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_h} = \frac{\ln\left(\frac{W_1}{W_0}\right)}{\ln\left(\frac{H_1}{H_0}\right)} = \frac{\text{판폭 방향의 변형도}}{\text{판두께 방향의 변형도}} \quad (6)$$

(6)식을 다시 정리하면

$$\left(\frac{W_1}{W_e}\right) = \left(\frac{H_e}{H_1}\right)^{C_h} \quad (7)$$

따라서, 수평압연 폭퍼짐 식은 (8) 식으로 쓸 수 있다.

$$\Delta W_h = W_1 - W_e = \left\{ \left(\frac{H_e}{H_1}\right)^{C_h} - 1 \right\} \cdot W_e \quad (8)$$

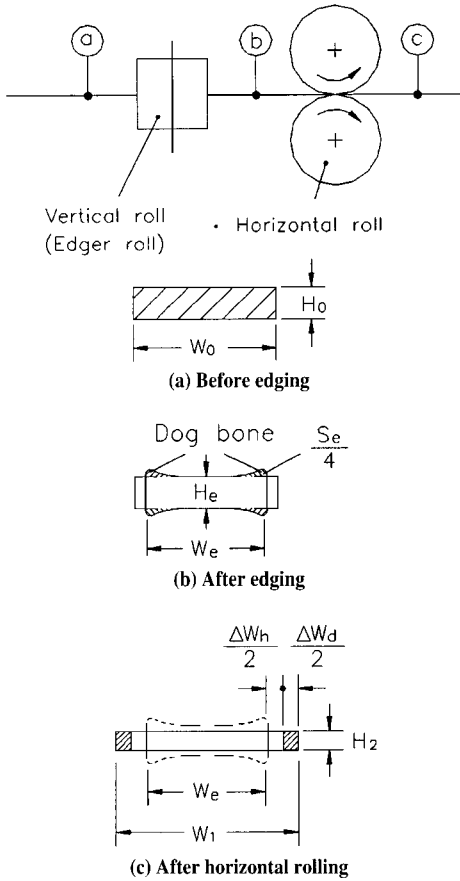


Fig. 3 Cross-sectional deformation of slab after edging and horizontal rolling

도그 본 발생 부만을 수평압연 하였을 경우의 폭퍼짐량을 표현하기 위해서 폭퍼짐 계수(C_d) 를 (9)식으로 정의한다.

$$C_d = \frac{\ln\left(\frac{H'_e}{H_0}\right)}{\ln\left(\frac{W_1}{W_0}\right)} = \frac{\ln\left\{\frac{H_e + S_e/W_e}{H_0}\right\}}{\ln\left(\frac{W_1}{W_e}\right)} \quad (9)$$

여기서, S_e 는 도그 본 발생 부의 면적, H'_e 는 폭압연후의 단면을 사각형으로 환산하였을 경우의 두께이다.

수평압연 전, 후의 체적일정조건을 적용하면 (10), (11) 식으로 표현된다.

$$W_e \cdot H_e \cdot L_e = (W_e + \Delta W_h) \cdot H_1 \cdot L_1 \quad (10)$$

$$S_e \cdot L_e = \Delta W_d \cdot H_1 \cdot L_1 \quad (11)$$

(10), (11)식을 도그 본 압연에 의한 폭퍼짐량으로 나타내면 (12)식으로 된다.

$$\Delta W_d = \frac{(W_e + \Delta W_h)}{(W_e \cdot H_e)} \cdot S_e \quad (12)$$

(9)식을 다시 정리하면

$$H'_e = H_1 \cdot \left(\frac{W_0}{W_e}\right)^{C_d} - \frac{S_e}{W_e} \quad (13)$$

이 되며, (13)식에서 에지압연후 판 중앙부의 두께는 불변이라는 가정 ($H'_e = H_0$)과 $\Delta W_e/W_e \ll 1$ 의 관계로부터 도그 본 발생부의 면적은

$$S_e = W_e \cdot H_e \cdot \left\{ \left(\frac{W_0}{W_e}\right)^{C_d} - 1 \right\} \quad (14)$$

이 된다. (14)식을 (13)식에 대입하고, 폭압하량 $\Delta W_e = W_0$ 의 관계로부터 다음 식이 유도된다.

$$\Delta W_d = W_e \cdot \left(\frac{\Delta W_h}{W_e} + 1\right) \cdot \left\{ \left(\frac{\Delta W_e}{W_e} + 1\right)^{C_d} - 1 \right\} \quad (15)$$

$\Delta W_h/W_e \ll 1$ 조건으로부터 식을 간략 화하여 나타내면

$$\Delta W_d \approx C_d \cdot \Delta W_e \quad (16)$$

이 된다. 따라서 1패스 압연후의 판 폭은 다음 식으로 표시된다.

$$W_1 = W_e + \left\{ \left(\frac{H_e}{H_1}\right)^{C_h} - 1 \right\} \cdot W_e + C_d \cdot \Delta W_e \quad (17)$$

여기서 두께압연 폭퍼짐계수 C_h 와 도그 본 압연 폭퍼짐 계수 C_d 는 압하량, 판폭, 판두께, 물경등 폭퍼짐에 영향을 미치는 인자의 함수로 구성된다. 식(17)에서 볼 수 있듯이 폭퍼짐계수(C_h, C_d)의 예측 정밀도가 열연강판 폭퍼짐보상을 통한 판폭 정밀도 향상효과와 직결되므로 이들 계수의 정밀설정이 무엇보다 중요하다.

3. 폭퍼짐 모델식 구성

3.1 수평압연시 폭퍼짐량 예측

실험대상은 협폭, 광폭재 각각 1매로 두께 230 mm 전에 폭 900 mm, 1420 mm 의 스텔을 사용하였으며

Table 1 과 같이 동일한 패스스케줄에 의해 실험하였다.

Fig. 4의 조압연 공정에서 폭압연기(edge rolling mill)와 R₂ 스탠드 전, 후면에 설치된 폭압연기(E₁, E₂)의 갭을 모두 열고 슬라브(slab)에서 바(bar)상태까지 수평압연만 실시하여 폭퍼짐량을 측정하였다.

실험시 R₂ 스탠드 전, 후단에 설치된 폭계(WG : width gauge)를 이용하여 압연후 판폭을 출력하였는데 R₁ 공정은 3패스 두께압연후에 그리고 R₂ 공정은 매 패스마다 폭계를 기동시켰다. 압연 종료후에는 공냉후 비정상부(top, bottom)는 300 mm 간격으로 그리고 정상부는 3 m 간격으로 폭을 측정하였다.

Fig. 5는 폭계 출력값을 이용하여 각 패스별로 구해진 폭퍼짐량 측정결과이다.

결과에서 알 수 있듯이 동일한 압연조건에서 판폭이 클수록 폭퍼짐량이 상당히 작아짐을 알 수 있다. 누적 폭퍼짐량을 비교해 보면 폭 901 mm 일 때의 폭퍼짐이 51 mm 인데 반해 폭이 1424 mm 일 때의 폭퍼짐량은 22 mm 로 절반에도 못미친다. 또 한가지 알 수 있는 사실은 R₁ 출측의 총 두께압하량은 열팽창을 고려하여 63 mm 이며 이때의 폭퍼짐은 14 mm 인데 반해 R₂₋₁ 패스시의 두께압하량은 50 mm 일때 약 15 mm의 폭퍼짐이 발생하였다. 일반적으로 압하량이 증가하면 폭퍼짐량은 지수함수적으로 증가하므로(식(7)) 총 63 mm 압하량조건이 50 mm 압하량 조건보다 폭퍼짐이 커야한다고 생각할 수 있다. 그러나 중요한 사실은 총 63 mm 압하량 조건일때는 3 패스로 나누어 압연하였기 때문에 누적된 전체 폭퍼짐량은 한 패스에 50 mm 압하를 준 조건보다 폭퍼짐량이 작을 수 있다. 따라서 수평 또는 폭압연시 폭퍼짐량 계산은 압하량을 기준으로 계산하면 안되며 각 패스마다의 압하량

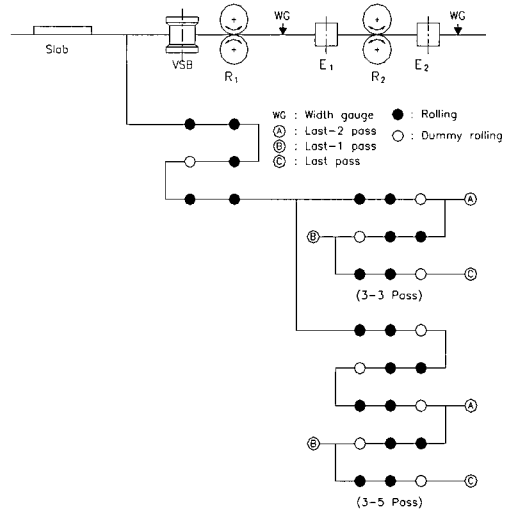


Fig. 4 Schematic drawing of roughing process design for dog-bone rolling

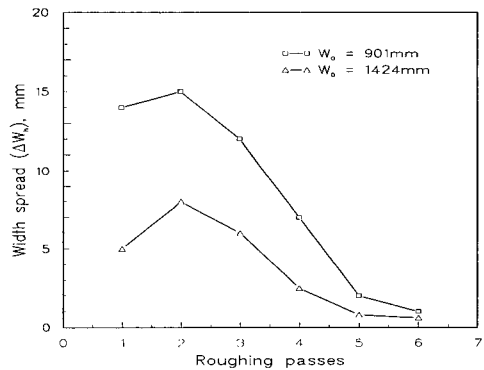


Fig. 5 Width spread by horizontal rolling without edging at roughing stands

Table 1 Test condition for horizontal rolling

(unit: mm)

slab size		total thickness reduction	class	R ₁ stand			R ₂ stand				
thick	width			R ₁₋₁	R ₁₋₂	R ₁₋₃	R ₂₋₁	R ₂₋₂	R ₂₋₃	R ₂₋₄	R ₂₋₅
230	901	198.2	roll gap	200	180	170	120	50	50	40	35
	1424		reduction	33.2	20	10	50	30	30	10	5
			WG	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON

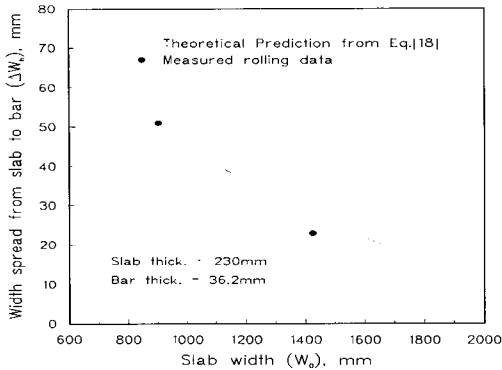


Fig. 6 Comparison with test results and predicted values

을 기준으로 계산해야 한다. 수평압연시 측정된 폭퍼짐량으로부터 구해진 두께압연 폭퍼짐계수 C_h 는 식(18)의 형태를 가졌는데 이는 현재 널리 사용되고 있는 Modified Kalay and Sparing 식⁽¹⁵⁾ 과 유사한 형태이다.

$$C_h = a \cdot \exp\left[\left(W_1/H_1\right)^b \cdot \left(W_1/L\right)^c \cdot \left(H_1 \cdot R\right)^d\right] \quad (18)$$

여기서 a, b, c, d 는 무차원 상수, $c = c_1 \cdot (W_1/H_1)$, $d = d_1 \cdot (W_1/H_1)$

Fig. 6은 실기압연을 통해 측정된 실측치와 식(18)을 이용하여 계산된 폭퍼짐량을 비교 한 것으로 양호한 폭퍼짐 예측정밀도를 보임을 알 수 있다.

3.2 도그 본(Dog bone) 압연 시 폭퍼짐 예측

3.2.1 폭 실적값 추출공정

Fig. 7에 도그 본 압연시의 폭퍼짐현상을 규명하기 위한 조압연 공정을 나타내었다.

R_2 공정의 전, 후면에는 E_1, E_2 엣저(edger)와 폭계가 설치되어 있다. 본 연구에서는 압연중 폭측정이 가능한 R_2 공정의 좌우 폭계를 이용하여 압연종료 2 패스전, 1 패스전, 종료패스시 정상부의 폭을 측정하였다. 폭계 실적값은 2 패스전, 1 패스전, 종료패스시의 선, 후단부를 제외한 정상 부만을 평균한 값이다. 각 패스마다 측정된 폭은 두께압연 시의 폭퍼짐량과 도그 본 압연 시의 폭회복량이 합하여진 값으로 도그 본 압연시의 폭퍼짐량을 산출하기 위해서 식(18)을 사용하였다.

Fig. 8은 슬라브 두께 230 mm, 폭 1270 mm일 때 폭압하량에 따른 도그 본 압연시의 폭퍼짐량을 나타낸 결과이다. 결과에서 보듯이 폭압하량이 증가할수록 폭퍼짐량도 증가

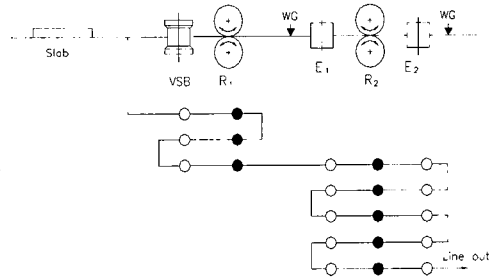


Fig. 7 Schematic drawing of roughing process design for horizontal rolling

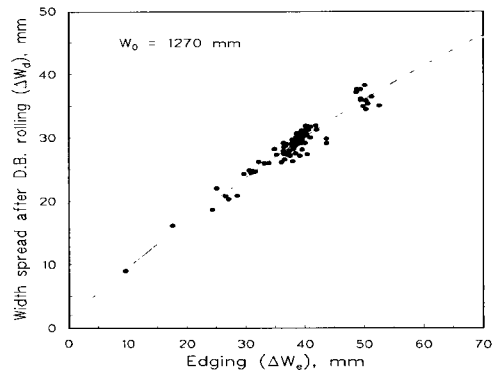


Fig. 8 Relation between width spread and edging amount ($W_0 = 1270$ mm)

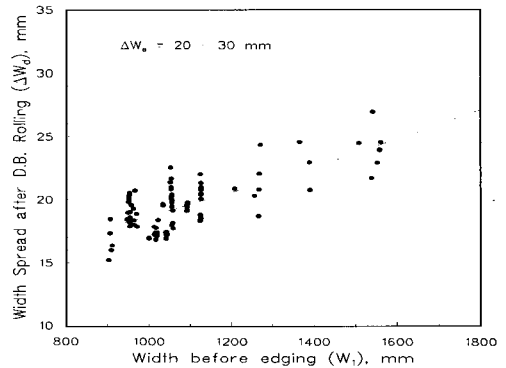


Fig. 9 Effect of initial width on width spread

한다. 폭압연효율을 생각하면 폭압하량이 작을수록 수평 압연 시 대부분 폭방향으로 다시 회복되므로 효율이 점점 감소한다. 따라서 가능한 패스당 폭압하량을 증가시키는 것이 폭압연효율 측면에서 효과적이다. Fig. 9는 판폭의 영향을 알아보기 위해서 폭압하량이 30~40 mm 조건일 때 판폭에 대한 폭퍼짐량의 결과이다.

판폭이 증가할 수록 폭퍼짐량이 증가경향을 보이는데 이러한 현상은 판폭이 증가하면 도그 본 발생높이가 증가하여 수평압연시 판폭방향으로의 회복율을 증가시키기 때문이다.

3.2.2 엣저(Edger)롤의 영향

Fig. 4 와 Fig. 7의 압연공정도에서 R₁ 스탠드 전면의 엣저(edger)는 VSB(Vertical Scale Breaker)로써 Fig. 10에 보인바와 같이 그루브(groove) 타입의 엣저롤이고, R₂ 스탠드 전, 후면의 엣저인 E₁, E₂는 평(flat) 타입의 엣저롤이다.

이러한 엣저롤(edger roll)의 형태가 폭압연효율에 미치는 영향을 검토하기 위해서 Fig. 11과 같이 동일한 압연 조건에서 폭압하중에 따른 폭퍼짐량의 관계를 알아보았다.

이 결과에서 평 엣저에 의한 폭퍼짐보다 그루브 엣저에 의한 폭퍼짐이 작다는 사실을 알 수 있다. 협폭재의 경우보다 광폭재의 경우가 평 타입과 그루브 타입간의 폭퍼짐의 차이가 더 큰데 이는 판폭이 증가할수록 그루브 타입의 폭압연효율이 증가함을 보인다. 결국 그루브 타입의 엣저가 폭압연 효율 측면에서 우수한데 이는 그루브 각도에 따라 폭압연 후의 도그 본 발생폭을 판폭방향으로 증가시켜 수평압연 시의 회복복량을 줄이기 때문이다. 따라서 폭압연시의 폭퍼짐 모델은 그루브 엣저영역과 평 엣저영역으

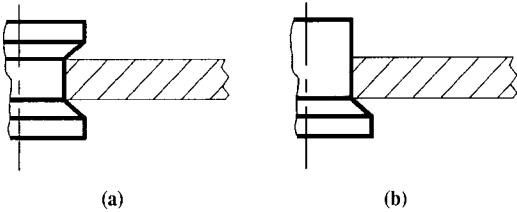


Fig. 10 Schematic drawing of (a) grooved edger roll and (b) flat edger roll

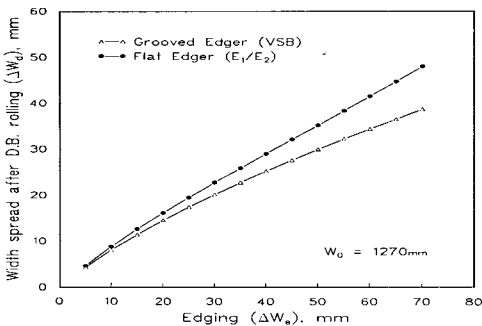


Fig. 11 Effect of edger roll type on width spread

로 나누어 폭퍼짐량을 계산해야 한다. 도그 본 압연시 측정되어진 폭퍼짐량으로부터 고정밀 폭퍼짐예측을 위하여 폭퍼짐에 영향을 미치는 인자 즉, 판폭, 판두께, 폭압연 후의 폭, 폭압하중간 상관관계를 검토한 후 이들의 관계로부터 회귀분석을 통해 폭퍼짐계수(C_d)를 얻었다.

$$C_d = \text{Exp} \left[A \cdot (\Delta W_d / W_1)^a \cdot (W_1 / W_c)^b \cdot (W_1 / H_1)^c \right] \quad (19)$$

여기서, A, a, b, c 는 무차원 상수이다.

도그 본 압연 시 폭퍼짐량은 롤타입에 따라 서로 상이하므로 그루브 엣저영역과 평 엣저영역을 분리하여야 하므로 식(19)의 A, a, b, c 값은 두 경우 값이 별도로 지정된다.

3.2.3 도그 본 압연시 폭퍼짐 예측식 효과 검증

도그 본 압연시 폭퍼짐 예측식 효과의 검증을 위해 식(19)를 이용하여 예측된 폭퍼짐량과 실측 폭퍼짐량을 그루브 엣저와 평 엣저로 나누어 비교하였다. 평 엣저의 폭퍼짐량은 Fig.12 에 비교하였고, Fig.13 에는 그루브 엣

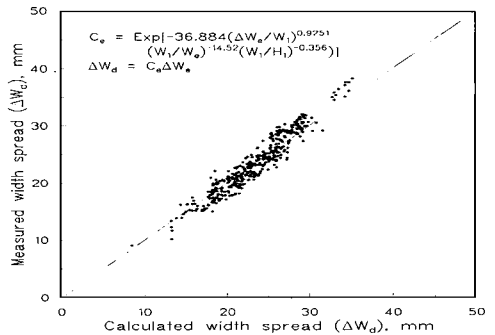


Fig. 12 Comparison with measured and calculated values of width spread for flat type edger roll

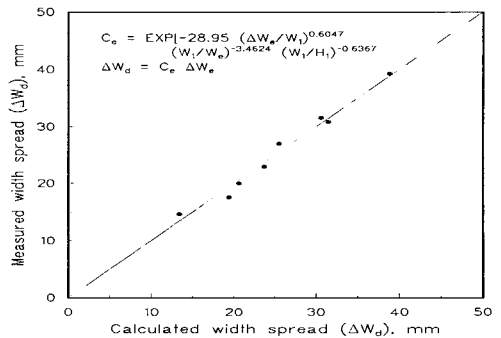


Fig. 13 Comparison with measured and calculated values of width spread for grooved type edger roll

저의 경우를 나타내었는데 실측값과 계산값과의 오차가 ± 3 mm 범위로 아주 양호함을 보인다.

4. 결 론

열간압연의 폭퍼짐량 보상을 통한 폭정도개선을 목적으로 실압연 측정값 분석을 통한 압연조건별 폭퍼짐량의 해석을 통해 폭퍼짐 예측모델을 구하였다. 폭퍼짐예측 모델은 크게 두께압연 폭퍼짐식과 도그 본 압연 폭퍼짐식으로 구성하였으며 도그 본 압연 시의 폭퍼짐은 그루브 엷저영역의 폭퍼짐과 평 엷저영역의 폭퍼짐으로 나누어 예측정밀도를 높였다. 이들 폭퍼짐식으로부터 주어진 입력조건에 따라 결정된 두께압연 및 폭압연량을 이용하여 실기압연을 통해 검증시험을 시행한 결과 실측값과 예측값의 편차가 ± 3 mm 이내의 양호한 폭정밀도 개선효과를 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) 松本紘美 : “板壓延에 있어서 板 Profile 및 形狀의 理論”, 日本鐵鋼協會, 技術講座, 1980, p.56~59.
- (2) 阿高松男 : “熱間 薄板壓延에 있어서 寸數, 形狀制御 技術의 現況과 動向, 塑性と 加工”, 1991, 第32卷, 第363號, pp.410~418.
- (3) 守田義之 外 : “熱延 粗壓延에 있어서 板幅制御 開發”, CAMP-ISIJ, 1989, Vol.2, p.482.
- (4) 山口道廣 外 : “水直, 水平壓延에 있어서 幅퍼짐에 대한 考察”, 第29回, 塑性加工 連合講演會 論文集, 1978, pp.142~144.
- (5) 井端治廣 : “熱延工場 粗壓延에 있어서 自動板幅制御”, 鐵と鋼, 1985, S1144.

- (6) 橋本 肇 外 : “Dog Bone 壓延法에 의한 壓延特性”, CAMP-ISIJ, 1988, Vol.1, p.563.
- (7) 日野裕之 外 : “熱間壓延에 있어서 幅制御 system의 開發”, 日本機械學會 論文集 (C편), 1990, 第56卷, 526號, pp.276~281.
- (8) 田添信廣 外 : “熱間仕上 Stand間 Edger에 의한 Edge Drop 制御”, CAMP-ISIJ, 1992, Vol.5, pp.475~478.
- (9) 北村 章 外 : “多變數制御에 의한 熱延 仕上 Mill 板幅制御 모델開發”, CAMP-ISIJ, 1989, Vol.2, pp.1469~1470.
- (10) V.B. Ginzburg : “Width Change of Flat Rolled Products”, Rolling Mill Technology series, 1989, Vol.3, pp.1~36.
- (11) A.W. McCrum : “Progress Report on the Experimental Investigation of Spread, Load and Torque in Hot Flat Rolling”, BISRA Report MW/AL, 10/56.
- (12) A. Helmi and J.M. Alexander : “Geometric Factors Affecting Spread in Hot Flat Rolling of Steel”, J. of the Iron and Steel Institute, 1968, No.206, pp.1110~1117.
- (13) Z. Wusatowski : “Hot Rolling ; A study of Draught, Spread and Elongation”, Iron and Steel, 1955, Vol.28, pp.49~54.
- (14) El-Kalay and Sparling : “Factors Affecting Friction and Their Effect upon Load, Torque, and Spread in Hot Flat Rolling”, J. of the Iron and Steel Institute, 1968, No.206, pp.152~163.
- (15) 芝原 隆 外 : “Hot Strip 粗壓延 Edger Set-Up 開發”, 鐵と鋼, 1981, 第15號, pp.253~259.