

Edger 압연모델 최적화를 통한 후판압연 실수율 개선

천명식* · 이준정* · 문영훈**

(1998년 12월 10일 접수)

Optimization of edger model to increase rolling yields in the plate mill

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

Abstract

To increase rolling yields by minimizing trimming losses of hot-rolled plate, optimization logic for the edger model has been developed. The logic to determine optimum edging amount model has been formulated on the basis of actual production rolling data. In case of broadside rolling, the fish tail shape at the sides of plate was better for reducing the crop loss and this could be achieved when the edging amount of broadside rolling was increased. At a given broadside rolling ratio, methodology to determine optimum edging amount for the finish rolling which could minimize the width deviation of plate were systematically derived. Therefore, for a given broadside rolling condition and the permissible tolerance in width deviation of plate, it was possible to optimize the edging amount in finish rolling to maximize rolling yields. The application of optimization logic in this study increased rolling yields from approximately 10% to 30% at various longitudinal edging ratios.

Key Words: Plate Mill, Trimming Loss, Broadside Rolling, Longitudinal Rolling, Broadside Edging, Longitudinal Edging, Width Deviation, Crop Length, Finishing Rolling

1. 서 론

근래 후판압연 치수 및 형상 제어기술 측면에서 살펴보면 유압 압하방식의 도입과 두께계의 압연기(mill) 근접설치로 판두께 제어정도가 급격히 향상되었으며 신평면형상 제어기술 개발에 의해 평면형상의 사각화가 이루어져 판폭정도가 향상되었다.⁽¹⁻⁷⁾ 그리고 일부 후판공장에서는 측면전단(side trimming)을 생략하는 무전단(trimming free) 압연기술을 개발하기에 이르렀고⁽⁸⁻⁹⁾ 캠버(camber)와 사행(off-centering) 발생에 대해서는 캠버센서와 압연기 좌우 하중차를 이용한 제어방법등이 개발되어 왔다.⁽¹⁰⁻¹¹⁾

후판품질의 대부분은 가열에서 압연공정으로 판이 제조되는 동안 결정되는데 그 중에서도 압연기술이 중요하다. 특히, 압연후의 판의 평면형상(plane view)을 사각형에 가까운 강판으로 제조하기 위해서는 요구치수에 대한 편차, 평탄도(flatness), 스킨드 마크(skid mark), 판 크라운(crown)에 의한 길이방향 두께편차, 측면 및 선, 후단부의 크롭(crop) 그리고 캠버제어 기술의 확립이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 현재 사용 중에 있는 엣저(edger)압연 수식모델을 압연실측 데이터의 통계분석을 통해 모델링하고 폭 편차(width deviation)와 크롭에 의

* 포항산업과학연구원 압연프로세스연구팀
** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터

한 전단손실(trimming loss)이 최소가 되는 엣지(edger)압연 로직을 개발하고자 한다.

2. 해석방법

2.1 후판압연공정

통상 후판압연공정은 슬라브(slab)를 1~2패스의 고르기 압연(sizing rolling)을 실시하고, 90° 회전시킨 후 2~6패스의 폭내기 압연(broadside rolling)을 실시하여 목표로 하는 폭을 만들고 다시 90° 본래 상태로 회전시킨 후 6~16패스의 길이내기 압연공정(longitudinal rolling 또는 finishing rolling)을 거쳐 후판제품을 제조하게 된다.

Fig. 1은 고르기, 에징(edging), 폭내기 압연공정이고, Fig. 2는 에징, 길이내기 압연공정의 개략도이다.

이 때 폭내기 압연시 실시하는 에징을 폭내기 에징

(broadside edging)이라 하고 길이내기 압연시 실시하는 에징을 길이내기 에징(longitudinal edging)이라 정의한다. 후판압연후 얻어진 낱판의 평면형상은 선, 후단부의 비정상부인 크롭과 폭방향의 폭편차로 표현된다. 여기서, 낱판이라 함은 전단공정(trimming line)을 거치지 않은 압연 판을 의미한다.

2.2 크롭 및 폭편차의 정의

압연종료후의 낱판형상은 슬라브 크기, 폭내기 비(=판폭/슬라브폭, λ_2), 길이내기 비(=폭내기압연후 두께/판두께, λ_3) 그리고 에징량 등의 소재 및 압연조건에 따라 여러 가지 형상이 존재하게 된다. 본 연구에서는 낱판의 평면형상을 관찰해 본 결과 크롭형상을 Fig. 3과 같이 4 종류로 분류할 수 있었으며 대표적인 크롭형상과 수식적 표현은 Fig. 4에 나타내었다.

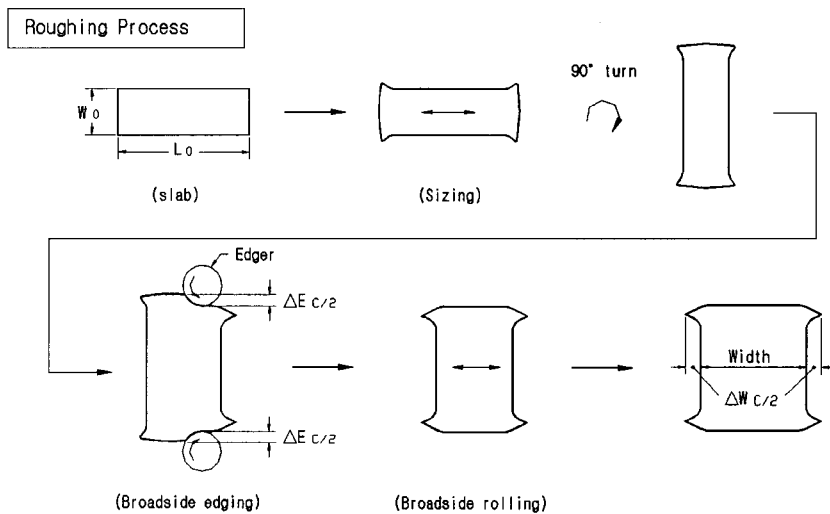


Fig. 1 Schematic drawing of roughing process

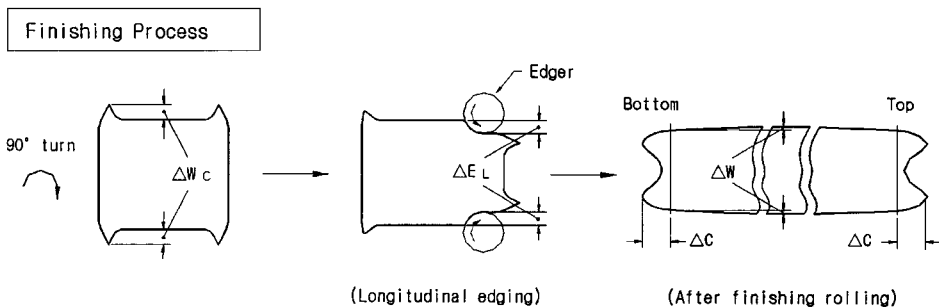


Fig. 2 Schematic drawing of finishing process

크롭은 혀 형상(tongue shape) 을 양의 크롭(positive crop)으로, 피쉬테일(fish tail shape) 형상을 음의 크롭(negative crop)으로 정의하였다. 그리고 크롭길이는 형상별로 선, 후단부의 비 정상부분의 면적을 간략 화하여 계산하고 이를 정상부의 판폭(W_M) 으로 나눈 절대길이로 표현하였다. 또 폭편차는 판길이를 기준으로 볼록한 형상을 양의 폭편차로 오목한 형상을 음의 폭편차로 정의하였

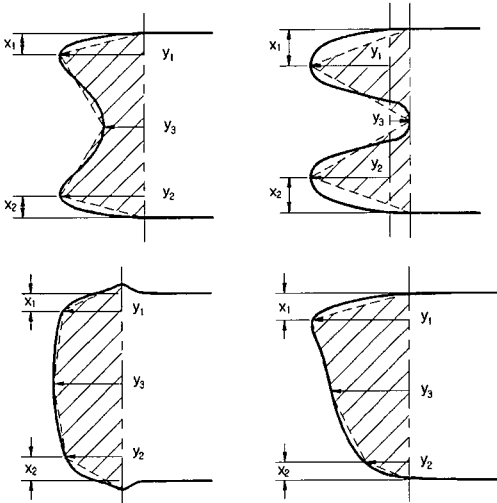


Fig. 3 Schematic drawing of crop patterns after finish rolling

으며, 폭편차량의 크기는 선, 후단부의 평균폭과 중앙부와 의 폭차로써 표현하였다.

2.3 날판의 크롭 및 폭편차 분석

Fig. 5는 폭내기 비에 따른 날판의 폭편차를 측정된 결과이다.

이 그림에서 보면 폭편차량은 폭내기 비(broadside rolling ratio)가 작은 협폭재인 경우, 음의 폭편차쪽으로 증가현상을 보이는 반면 폭내기 비가 큰 광폭재의 경우, 양의 폭편차쪽으로 증가현상을 보인다.

Fig. 6은 길이내기 비(longitudinal rolling ratio)에 대한 날판의 크롭면적을 절대길이로 나타낸 결과로 선단부와 후단부의 크롭을 합한 길이이다.

길이내기 비(λ_3)가 증가할 수록 날판의 크롭길어도 증

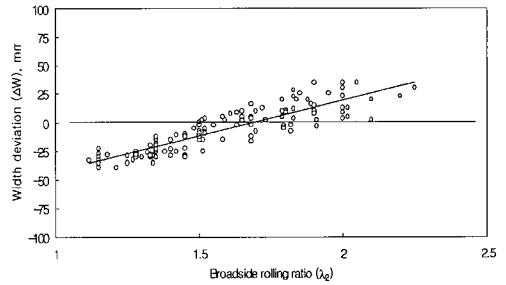
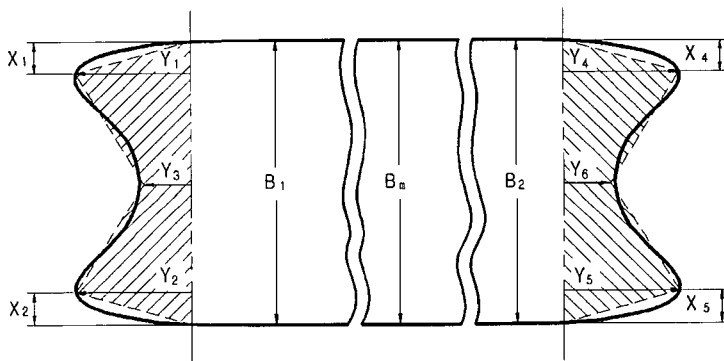


Fig. 5 Width deviation after finish rolling



$$\begin{aligned} \text{Area}^T &= 0.5\{(X_1 Y_1 + X_2 Y_2) + (Y_1 + Y_3)(B_1 / 2 - X_1) + (Y_2 + Y_3)(B_1 / 2 - X_2)\} \\ \text{Area}^B &= 0.5\{(X_4 Y_4 + X_5 Y_5) + (Y_4 + Y_6)(B_2 / 2 - X_4) + (Y_5 + Y_6)(B_2 / 2 - X_5)\} \\ \text{Area} &= \text{Area}^T + \text{Area}^B \\ \Delta C &= \text{Area} / B_M \\ \Delta W &= B_M - 0.5(B_1 + B_2) \end{aligned}$$

Fig. 4 Definition of crop length and width deviation

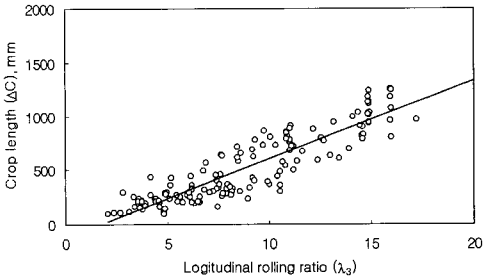


Fig. 6 Crop length after finish rolling

가현상을 보인다. 이러한 현상은 날판길이가 증가함에 따라 수평압연 패스 수도 증가하므로 이미 형성된 크롭길이가 점점 연신되어 증가하기 때문이다. 따라서 날판의 크롭 및 폭편차를 최소화하기 위해서는 이들의 관계를 예측할 수 있는 모델식 개발과 최적화방법을 사용하여 조업조건별로 적정 에징량을 제시할 수 있어야 한다.

2.4 회귀분석 결과

Fig. 7은 폭편차량 예측에 대한 회귀분석 결과로 예측값과 실측값을 비교한 것이다.

예측식은 폭편차량과 에징량, 폭내기압연후의 폭편차량 그리고 길이내기 비와의 상관관계를 비교 분석하였는데 길이내기 비와는 상관성이 적었다.

Fig. 8은 크롭길이에 대한 회귀분석 결과로 예측값과 실측값의 비교를 나타낸 것이다. 예측식은 크롭길이와 관련 인자들 간의 상관관계를 비교 분석하였는데 폭내기후의 폭편차량과는 상관성이 적었으며, 다른 인자들과는 선형적인 관계가 있음을 확인하였다.

따라서 날판의 폭편차량 예측식은 에징량과 폭내기압연

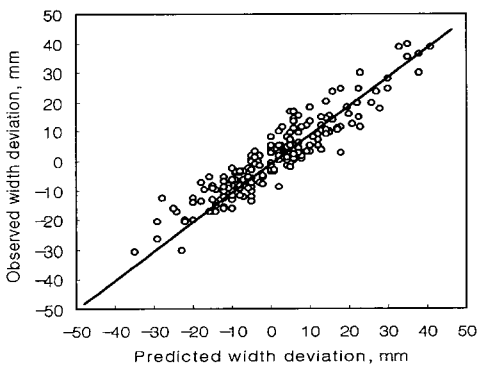


Fig. 7 Comparison with observed and predicted values of width deviation

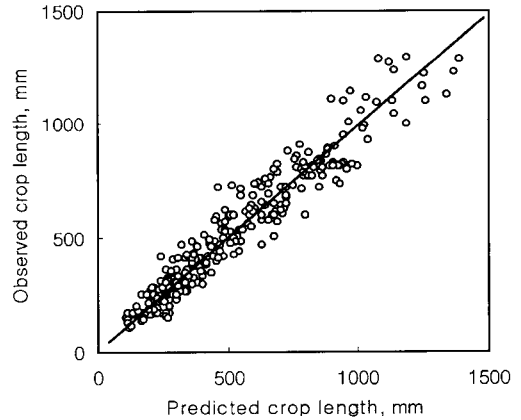


Fig. 8 Comparison with observed and predicted values of crop length

후의 폭편차량의 함수로 그리고 크롭길이에 예측식은 크롭 형태에 따라 에징량과 길이내기 비의 함수로 각각 구성하였으며 이들 식의 형태는 다음과 같다.

(i) 폭내기압연 공정

- 폭편차 예측식(ΔW_C)

$$\Delta W_C = a_1 \Delta E_C + a_2 \lambda_{22} + a_3 \lambda_2 + a_4 \quad (1)$$

여기서, ΔW_C 는 폭내기압연후의 폭편차량(mm), ΔE_C 는 폭내기압연 에징량 (mm), λ_2 는 폭내기 비 (판폭/스라브폭) 을 나타낸다.

(ii) 길이내기압연 공정

- 폭편차 예측식(ΔW)

$$\Delta W = b_1 \Delta E_L + b_2 \Delta W_C + b_3 \quad (2)$$

- 크롭예측식 (ΔC)

$$\Delta C = d_1 \Delta E_L + d_2 \lambda_3 + d_3 (\text{negative crop의 경우}) \quad (3a)$$

$$\Delta C = e_1 \Delta E_L + e_2 \lambda_3 + e_3 (\text{positive crop의 경우}) \quad (3b)$$

여기서, ΔC 는 길이내기압연후의 크롭길이 (top+bottom, mm), ΔW 는 길이내기 압연후의 폭편차량(mm), ΔE_L 은 길이내기 에징량(mm), 그리고 λ_3 는 길이내기 비를 각각 나타낸다

3. 최적 Edging 량 결정방법

엣저(Edger)의 사용은 크롭과 폭편차량을 최소로 하는데 목적이 있으므로 에징효과의 극대화는 실수율 증대와 직결된다 하겠다. 따라서 소재 및 압연조건별로 최적 에징

을 가능하게 하는 로직(logic)의 개발이 매우 중요하다.

3.1 크롭 및 ΔE_L 의 관계

Fig. 9는 길이내기 비에 대한 날판의 크롭길이를 나타낸 것으로 길이내기 에징량이 증가함에 따라 크롭길이가 감소해 가는 현상을 보인다.

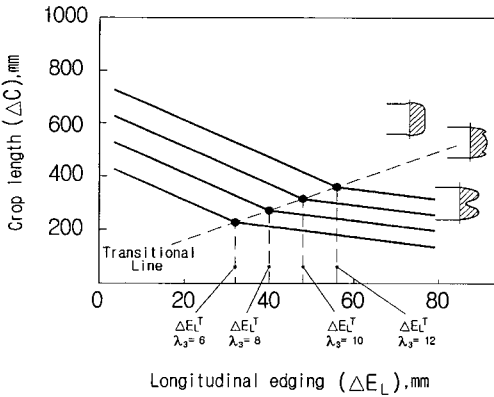


Fig. 9 Relationship between edging and crop length

이 때 크롭형상은 양의 크롭에서 어떤 임계값의 에징량에 도달하게 되면 양 또는 음의 크롭이 서로 중첩된 천이크롭(transitional crop)형으로 발전한다. 이 천이크롭형에서 에징량을 증가시키면 음의 크롭으로 전환하게 되어 크롭길이가 다소 감소한다. 즉, $\Delta E_L < \Delta E_L^T$ 인 조건에서는 길이내기 에징량이 증가할 수록 급격하게 크롭이 감소하다가 $\Delta E_L > \Delta E_L^T$ 인 조건으로 바뀌게 되면 감소효과가 둔화된다. 그러므로 천이크롭 근처의 에징조건이 크롭을 줄이는데 효과적임을 알 수 있다. Fig. 10은 길이내

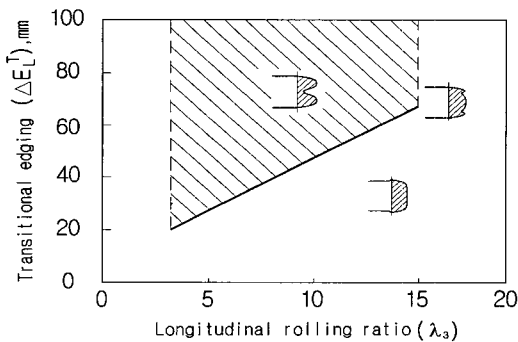


Fig. 10 Relationship between transitional edging and longitudinal rolling ratio

기 비에 대한 천이에징량의 관계를 나타낸 그림이다.

ΔE_L^T 를 기준으로 음의 크롭영역에서 크롭길이가 최소이므로 이 영역이 최적조건임을 알 수 있다.

3.2 폭편차와 ΔE_L 의 관계

Fig. 11은 길이내기 에징량과 날판의 폭편차와의 관계를 나타낸 것으로 에징량이 증가할수록 음의 폭편차에서 양의 폭편차로 전환하게 된다.

이러한 전환은 폭내기 비가 증가할수록 빠르며 어느 조건이나 폭편차를 영으로 하는 에징량이 존재함을 알 수 있다. Fig. 12는 폭편차를 영으로 놓고 폭내기 에징량과 길이내기 에징량과의 관계를 나타낸 것으로 폭내기 에징량이 증가하면 길이내기 에징량도 상대적으로 증가한다.

그리고 폭내기 비에 따라서 폭편차량이 최소로 되는 에징량이 존재하는 데 이 값이 폭내기 비의 증가와 더불어 점점 감소해 감을 알 수 있다.

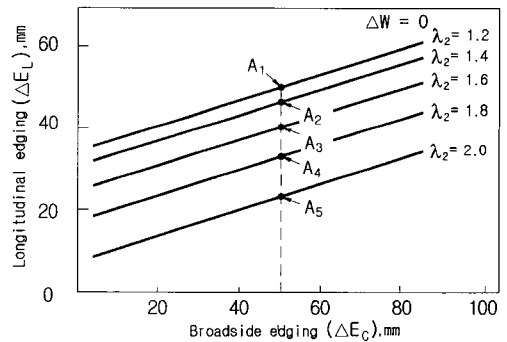


Fig. 11 Relationship between longitudinal and broadside edging

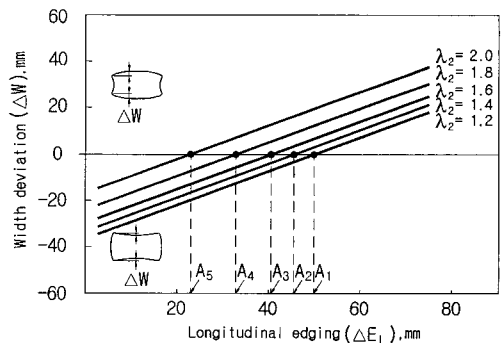


Fig. 12 Relationship between longitudinal edging and width deviation

3.3 전단손실(trimming loss) 최소화 방법

3.1, 3.2 절의 결과에서 알 수 있듯이 크롭을 최소로 하는 에징량이 존재하고 또한 폭편차량을 최소로 하는 에징량이 각각 존재한다. 그러나 두 조건을 동시에 만족하는 해는 존재하지 않는다. 크롭길이를 최소로 하면 폭편차량은 상대적으로 증가하게 되며 이와 반대로 폭편차량을 최소로 하면 크롭길이는 증가하게 된다. 그러므로 압연조건에 따라서 폭편차에 의한 손실을 포함한 전체 전단손실을 계산하고 이를 최소화하는 조건에서 최적 에징량을 결정해야 한다. 최적조건을 도출하기 위해서 Eq.(2) 와 Eq.(3)을 아래와 같이 다시 정리하여 표현하였다.

$$\Delta E_L = (\Delta W - b_2 \Delta W_C - b_3) / b_1 \quad (2)$$

$$\Delta E_L = (\Delta C - d_2 \lambda_3 - d_3) / d_1 \quad (\text{negative crop}) \quad (3a)$$

$$\Delta E_L = (\Delta C - e_2 \lambda_3 - e_3) / e_1 \quad (\text{positive crop}) \quad (3b)$$

Fig. 13은 이들의 관계식으로부터 폭편차가 영인 직선과 이 때의 크롭길이를 좌표상에 나타낸 것이다.

이 그림에서 보면 ΔE_L 과 ΔE_C 사이에는 선형적인 관계가 있으며 두 직선이 만나는 교점이 최적조건임을 알 수 있다. 좀 더 구체적으로 설명하기 위해서 A, B, C, D 교점을 생각해 보자. A점은 폭편차가 최소인 점이며 크롭길이도 최대 폭내기 에징조건에서 최소인 점이다. B점은 ΔE_L 이 증가하므로 크롭은 감소하나 반면에 폭편차는 양의 값을 갖고 증가하게 된다. C 점은 A점과 크롭은 같으나 폭편차가 B점과 같이 증가한다. 또 D점은 ΔE_L 이 감소하므로 크롭이 증가할 뿐만아니라 폭편차도 음의 값을 갖고 증가현상을 보인다. 결과적으로 최적조건은 A 점임을 알 수 있으며 폭내기 에징량(ΔE_C)이 최대일 수록 폭

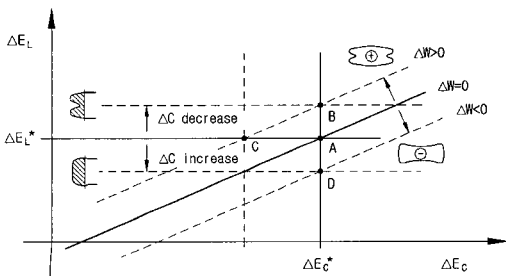


Fig. 13 Diagram for optimal condition to get rectangular shape

편차와 동시에 크롭도 최소화가 가능하다. 그리고 최적 폭내기 에징량(ΔE_C^*)이 결정되면 압연조건에 따라 최적 길이내기 에징량(ΔE_L^*)의 결정도 가능하다.

3.4 최적 edging 량 결정

3.4.1 폭내기 edging 량의 결정(ΔE_C^*)

폭내기 에징량은 $\Delta E_C^* = \Delta E_C$ (max) 조건에서 최적 이므로 가능한 한 폭내기 비에 관계없이 압연가능 범위 (치입조건, 좌굴조건, 최대 압연하중조건)내에서 최대값을 취하는 것이 좋다.

3.4.2 길이내기 edging 량의 결정(ΔE_L^*)

날판의 목표 폭편차량과 폭내기압연후의 관리 폭편차량에 따라 길이내기 에징량이 계산되며 이와 더불어 크롭형상도 결정된다. 여기에서 결정되는 크롭형상에 따라 전단손실(trimming loss)이 최소가 되는 조건에서 다음과 같이 에징량(ΔE_L^*)이 결정된다.

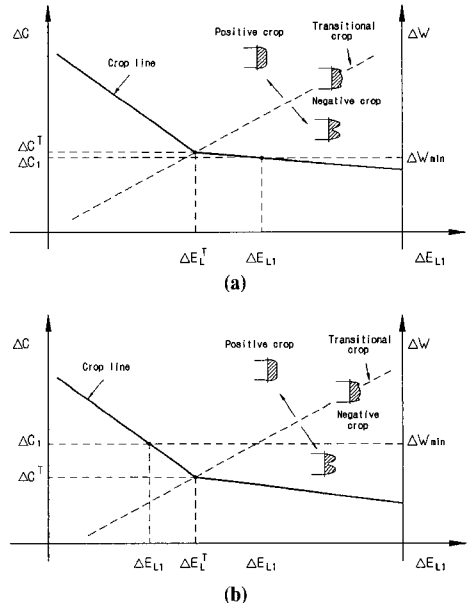


Fig. 14 Optimal condition of longitudinal edging for (a) negative (b) positive crop

(i) 음의 크롭인 경우

이 경우는 Fig. 14(a)와 같이 날판의 목표 폭편차량 (ΔW_{min})과 결정된 폭내기에징 조건을 대입하여 계산된 크롭형상의 결과가 음인 조건이다. 음의 크롭인 경우는 에

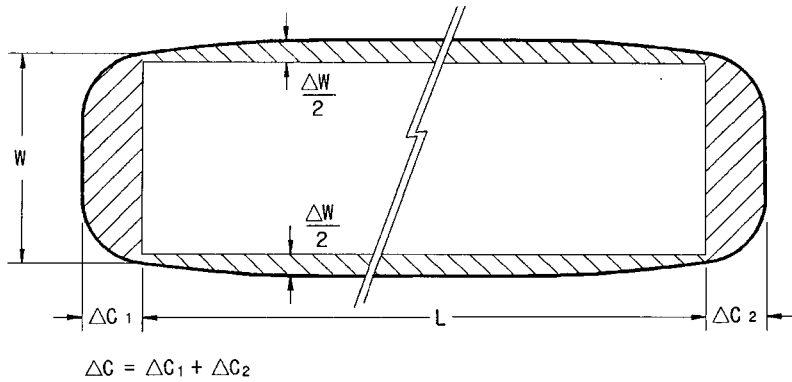


Fig. 15 Schematic drawing of final plan view representing trimming losses

정량을 증가시키면($\Delta E_L^T \rightarrow \Delta E_L$) 크롭길이는 약간 감소하는 반면에 폭편차량은 증가하므로 목표 폭편차량을 초과하지 않은 예정량을 최적값(ΔE_L^*)으로 결정한다.

(ii) 양의 크롭인 경우

이 경우는 Fig. 14(b)와 같이 날판의 목표 폭편차량(ΔW_{min})과 결정된 폭내기에정 조건을 대입하여 계산된 크롭형상의 결과가 양인 조건이다. 양의 크롭인 경우는 예정량에 따라 크롭길이가 급격히 감소하는 장점이 있으므로 폭편차량에 의한 측면크롭을 고려하여 전단손실을 계산하고 이를 최소로 하는 예정량을 결정해야 한다.

Fig. 15에 도식적으로 보였듯이 전단 되는 체적을 간략화하여 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta V = \Delta W \times L + \Delta C \times W \quad (4)$$

여기서, ΔV 는 단위두께당 전단 되는 체적(mm^3), L 은 판길이, W 는 판폭을 나타낸다. ΔV 의 최소화조건을 얻기 위하여 (4)식을 ΔE_L 에 대해 편미분하여 정리하면 주어진 폭내기 예정조건에서 다음 식과 같은 두 가지 관계식이 도출된다.

$$(a) \quad \left. \frac{\Delta V}{\Delta E_L} \right|_{\Delta E_L = \Delta E_L^*} > 0, \quad \frac{L}{W} > \frac{e_1}{b_1} (= 10.38) \quad (5)$$

$$(b) \quad \left. \frac{\Delta V}{\Delta E_L} \right|_{\Delta E_L = \Delta E_L^*} \leq 0, \quad \frac{L}{W} \leq \frac{e_1}{b_1} (= 10.38) \quad (6)$$

(a)의 경우, 길이내기 예정량이 점점 증가함에 따라 전단손실도 증가한다. 즉, 판길이/판폭 비가 증가하면 폭편차에 의한 측면크롭이 증가하여 전단손실을 증가시키게 되므로 더 이상 예정량을 증가시켜서는 안 된다. 따라서 현재 계산된 값을 최적값으로 결정해야 한다.

(b)의 경우, 길이내기 예정량이 증가함에 따라 전단손실은 감소한다. 즉, 판길이/판폭 비가 증가하면 전단손실이 감소경향을 보이며 예정량을 증가시키에 따라 감소해 간다. 이 조건은 폭편차량 보다 크롭의 영향이 더 큰 광폭재에 해당되는 경우이다. 따라서 현재의 예정량을 천이예정량까지 증가시킨 값을 최적 값으로 결정한다.

Table 1 은 본 연구의 모델을 적용하기전과 후의 실수율을 비교하기 위한 것으로 적용전의 전단손실을 100%로 기준하였을 경우의 상대적 전단손실 감소량을 잘 보여주고 있다. Table 1 에서 볼 수 있듯이 본 최적모델의 적용 후 전단손실이 전체적으로 약 10~30% 감소함으로써 후판 실수율이 크게 향상되었다.

Table 1 Change in trimming losses after application of optimization model

| longitudinal edging ratio (λ_3) | before application | after application |
|---|--------------------|-------------------|
| $\lambda_3 < 7.5$ | 100 % | 76.2 % |
| $7.5 < \lambda_3 < 10.0$ | 100 % | 71.3 % |
| $10.0 < \lambda_3 < 12.5$ | 100 % | 74.2 % |
| $12.5 < \lambda_3$ | 100 % | 90.6 % |

4. 결 론

후판 실수율향상을 목적으로 현장 데이터에 근거하여 크롭 및 폭편차량의 최소화해 주는 엷저 최적화 모델개발을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압연가능 범위내에서 폭내기압연시 에징량(ΔE_c)을 증가시키면 음의 폭편차량을 갖는 판이 제조되어 폭편차에 의한 전단손실을 줄일 수 있다.

(2) 길이내기 에징량(ΔE_l) 이 증가하면 크롭의 형태는 혀형상의 크롭에서 피쉬테일형상의 크롭으로 바뀌는 친이 크롭이 존재하며 이 근처의 에징조건이 크롭을 줄일 수 있는 최적조건임을 알 수 있었다.

(3) 엷저 최적화 로직을 적용한 결과 적용전 대비 10~30%의 전단 손실을 줄일 수 있었다.

참고문헌

- (1) 井上正敏 : “厚板壓延에 있어서 치수 및 形狀制御技術의 現況과 動向”, 塑性と加工, 1991, Vol.32, No.363, pp.402~409.
- (2) 小林芳平 外 : “厚板 Edger에 의한 平面形狀改善”,

鐵と鋼, 1981, S1025.

- (3) 河野輝雄 外 : “VH 壓延時의 變形豫測式의 開發”, 塑性加工春季講演會, 1983, No.316, pp.349~352.
- (4) 池谷尙弘 外 : “厚板壓延의 新 平面形狀의 制御方法의 開發”, 鐵と鋼, 1981, pp.457~460.
- (5) 笹治 峻 外 : “Edger法에 의한 厚板의 高實收率 壓延法의 開發”, 鐵と鋼, 1981, pp.139~148.
- (6) 西岐 允 外 : “Edger法에 의한 厚板의 高實收率 向上”, 鐵と鋼, 1981, pp.149~155.
- (7) 時田秀紀 外 : “厚板壓延의 平面形狀의 數式化와 立證”, 鐵と鋼, 1979, S301.
- (8) M.Inoue etc. : “Development of a Process for Manufacturing TFP(Trimming Free Plate)- I, II, III”, Trans. ISIJ, Vol.27, 1987, B51-53.
- (9) 川崎製鐵 : “TFP Edger 設備(水島)”, 石川島播磨技報, 1987, Vol.27, No.3, pp.182~184.
- (10) T. Miyake etc. : “Development of Camber Control System in Plate Rolling”, 4th International Steel Rolling Conference, 1987, C1.1-1.9.
- (11) 山田健 外 : “板壓延의 Camber 制御”, 36回 塑性加工連合講演會, 1985, pp.173~176.