

냉연판의 엣지드롭 해석 및 제어용 수식모델 개발

송길호* · 박해두* · 진철제** · 신성갑**

(1997년 2월 15일 접수)

Analysis of Edge Drop and Development of Numerical Formula for Edge Drop Control of Cold Rolled Sheet

Key Words : Tandem Cold Rolling Mill(TCM : 연속냉간압연기), Strip Profile(판 프로파일), Edge Drop Set-up(엣지드롭 초기설정), Edge Drop Control(엣지드롭 제어), Roll Deflection(롤 변형), Roll Flattening(롤 편평), Delivery Thickness Profile(출측두께분포)

Abstract

With the introduction of edge drop control system in Tandem Cold Rolling Mill, it is necessary to develop the numerical expression for the set-up and edge drop automatic control of cold rolled sheet. As a first step we developed a simulation program which predicts profile and the amounts of edge drop at the delivery side of each stand by using roll deformation analysis with the slit roll model. And by using the program the effect of various rolling conditions on edge drop was investigated. As a result the relations were obtained between the amounts of edge drop and rolling conditions. Based on above relations, the numerical expression was developed for the set-up and automatic control of edge drop by multi-regression of simulation results for the variation of edge drop amount with each rolling condition.

기호 설명			
$p(x)$: 압연하중분포	I	: 롤의 단면 2차 모멘트
$q(x), r(x)$: 롤간 접촉압력분포	A	: 롤의 단면적
F_w, F_t	: 작업롤 및 중간롤 벤더력	α	: 원단면체의 전단변형에 대한 보정계수
WS_s, UC_s	: 작업롤 및 중간롤 이동량	$u(x)$: 롤에 작용하는 분포하중
P_t	: 전 압연하중	a^*	: 편평변형량
P_1, P_2	: 백업롤 양단에 작용하는 압연하중	D_1, D_2	: 두 원주의 직경
Q	: 압하력 편차	E_1, E_2	: 두 원주의 탄성계수
y_b, y_s	: 롤의 굽힘 및 전단에 의한 변위량	ν_1, ν_2	: 두 원주의 푸아송비
E	: 롤의 종탄성계수	q	: 단위폭 하중
G	: 롤의 횡탄성계수	$\delta(i, j)$: 롤바이트 출구면상의 점 A에서의 변위량
		P	: 단위폭당 하중
		S^+	: 선진역에서의 압연하중

*회원, 포항제철(주) 기술연구소 광양압연연구팀

**포항제철(주) 광양제철소

- S^- : 후진역에서의 압연하중
- k : 접촉호내 임의점에서의 변형저항
- k_i, k_o : 접촉호 입, 출측에서의 변형저항
- h : 접촉호내 임의점에서의 스트립의 두께
- h_i, h_o : 접촉호 입, 출측에서의 스트립 두께
- μ : 마찰계수
- φ_n : 중립점위치
- H_n : 중립점에서의 스트립 두께
- R' : 편평 롤반경
- R : 롤반경
- $N1$: 중간롤의 왼쪽위치
- $N2, N3$: 스트립의 왼쪽과 오른쪽위치
- ΔZ : 롤 분할간격
- CL : 작업롤 테이퍼부와 스트립의 접촉길이
- Γ_H : 열연판 크라운
- W : 스트립 폭
- YP : 스트립의 항복강도
- $a \sim f$: 상수값

1. 서론

최근 수요가 요구하는 냉연강판의 형상 및 폭 방향으로의 두께 균일정도는 점점 더 엄격화, 고정도화되어 가고 있는 추세에 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위한 현재의 폭방향 두께의 고정도 제어기술로서는 작업롤(work roll)에 편 테이퍼(taper)를 가공하여 작업롤과 스트립이 접촉하는 부위의 응력을 완화시켜 스트립 엣지(edge)부의 과압부분을 보상해주는 방법^(1~4)과 최종 스탠드 출측에 엣지드롭(edge drop)량을 측정할 수 있는 계측기(두께계)를 설치하고 이를 이용해 그 편차량을 피드백 제어하는 방법⁽⁵⁾등이 있다. 여기서 엣지드롭 이라함은 스트립 엣지로부터 100 mm지점에서의 두께와 25 mm지점에서의 두께차를 의미한다. 이러한 환경하에서 신설되는 냉연공장에 폭방향 두께 정도를 향상시키기 위해 Fig.1과 같은 엣지드롭 제어시스템이 도입되게 되었는데 그 개요는 다음과 같다. 먼저 압연된 스트립이 압연기에 도달하기 전에 적정 엣지드롭량 형성을 위한 작업롤의 이동량 계산값을 상위 컴퓨터에서 전송받아 1번에서 4번 스탠드까지 초기설정한다. 이 상태에서 스트립이 연속적으로 통과되면서 압연이 행해지게 되는데 이때 압연된 판의 압연결과는 5번 스탠드 출측에 있는 엣지드롭 미터(edge drop meter)가 일정주기로

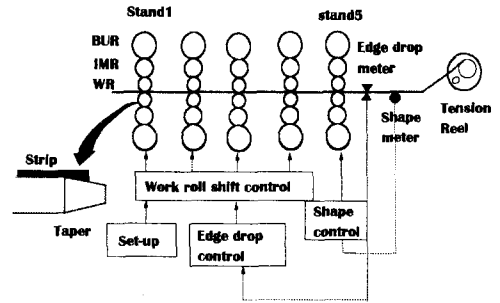


Fig. 1 Edge drop control system in TCM.

엣지드롭량을 측정해서 설정치와 실측치의 편차량을 피드백 제어하게 된다. 이때 제어수단은 초기설정시와 같이 1번에서 4번 스탠드의 작업롤 이동량이다. 한편 5번 스탠드는 형상제어를 위한 스탠드이므로 엣지드롭 제어 대상 스탠드에서 제외되며 작업롤은 테이퍼(taper)롤을 사용한다. 따라서 이와같은 엣지드롭 초기설정 및 피드백제어시 압연조건에 따라 작업롤의 이동량에 대한 제어 출력값을 제시해 줄 수 있는 수식모델이 필요하게 되었다. 이를 위해 롤 분할법⁽⁶⁾을 이용하여 스트립의 폭방향 두께 프로파일 및 엣지드롭량을 예측할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 만들고 이를 토대로 각 압연조건이 엣지드롭량에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 이 계산결과를 바탕으로 엣지드롭 제어시스템의 초기설정 및 제어용 수식모델로 사용할 수 있는 엣지드롭량과 각 압연조건과의 관계를 나타내는 관계식을 도출하였다.

2. 이론해석

2.1 롤 분할모델

일반적으로 냉연판의 엣지드롭 발생기구로는 롤 처짐(deflection) 및 롤의 편평변형(flattening)과 같은 롤의 변형⁽⁶⁾과 스트립의 3차원 변형⁽⁸⁾을 들 수 있다. 이와같은 롤의 변형을 해석하기 위한 방법으로 Fig.2에 나타난 롤 분할모델방법을 이용하는데 그 개요는 다음과 같다. Fig.2는 6단 압연기 중 상부만을 나타내는 것이다. 여기서, 고정된 백업롤(BUR)을 기준으로 중간롤(IMR)과 작업롤(WR)이 일정량만큼 이동($UC\delta, WS\delta$)된 상태에서 힘의 상태를 나타내는 것으로 롤 분할은 백업롤 왼쪽끝을 기준으로 일정등분($2m+1$)분할하는데 보통 20~40등분하면 만족할만한 해의 정도를 얻을

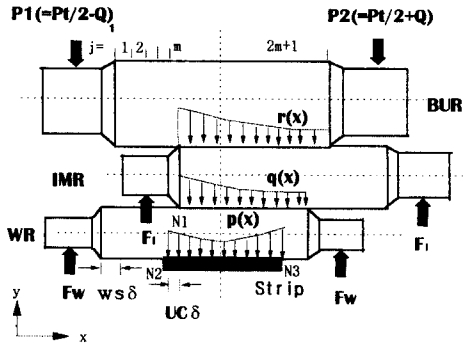


Fig. 2 Force condition of cold rolling mill.

수 있다.⁶⁾ 스트립 및 작업롤의 위치는 백업롤의 왼쪽끝을 기준으로 설정하고 중간롤의 위치는 스트립 왼쪽끝을 기준으로 설정한다. 이때 오른쪽 이동방향을(-), 왼쪽방향을(+)로 취한다. 또한 힘의 방향은 Fig.2와 같이 벤더력이 작용하는 방향을(+)로하고 그 반대방향을(-)로 한다. 이와같은 상태에서 각 분할점에 대한 롤 처짐 및 편평변형 해석을 수행하고 이들 변형을 조합함으로써 각 스탠드 출측에서의 두께분포를 구하게 되는 것이다.

2.2 롤 처짐해석

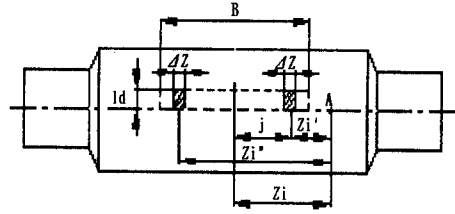
압연시에는 압연하중과 프로파일 액츄에이터(actuator)인 롤 벤딩 시스템에 의해 롤 처짐이 발생하게 된다. 이러한 각 롤의 처짐량은 롤 중앙에서의 처짐량이 없다는 적합조건을 이용하고, 식 (1)과 식 (2)에서 보여주는 보의 굽힘 및 전단방정식으로부터 얻어진 두 해를 합하므로써 구할 수 있다.⁶⁾ 이때 전단에 의한 처짐을 고려하는 것은 롤 배럴길이에 비해 롤 직경이 크기 때문이다.

$$\frac{d^4 y_b}{dx^4} = \frac{u(x)}{EI} \tag{1}$$

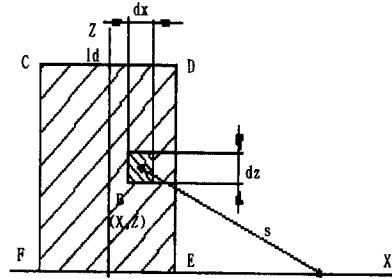
$$\frac{d^2 y_s}{dx^2} = -\frac{u(x)}{\alpha GA} \tag{2}$$

2.3 롤 편평변형 해석

압연시 발생하는 편평변형은 롤간 접촉압력에 의해 발생하는 것과 작업롤이 스트립으로부터 받는 압연하중에 의해 발생하는 것으로 구분할 수 있다. 롤간 접촉압력에 의해 발생하는 편평변형량은 원주의 응력함수를 이용하여 서로 평행한 무한길이를 가지는 두 원주의 편평변형량을 구하는 Föppl식⁶⁾을 이용한다.



(a)



(b)

Fig. 3 Calculation model of roll flattening.

$$a^* = \frac{c}{8} q \left\{ \frac{2}{3} + \ln \frac{2D_1}{b} + \ln \frac{2D_2}{b} \right\} \tag{3}$$

여기서,

$$c = \frac{8}{\pi} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)$$

$$b = \sqrt{cq \frac{D_1 D_2}{D_1 + D_2}}$$

또한 스트립으로부터 받는 압연하중에 의해 작업롤 표면에 발생하는 편평변형량 계산을 위해서는 Fig. 3과 같은 모델을 이용한다. 즉, 롤 배럴길이 중심으로부터 η_i의 거리로 대칭인 미소폭 Δz에서 접촉길이 l_a를 가지는 두 개의 미소면적에 동일한 압력 p'가 작용하는 경우 롤 바이트(roll bite) 출구면상의 점 A에 대한 변위량을 반무한 탄성체로 가정하여 구한다. 다시 말하면 Fig. 3(b)와 같이 xz면내의 폭 w, 길이 l_a의 CDEF내에 같은 크기의 p'가 작용하는 경우를 고려해서 x축상의 점(X_i, 0)에 대한 변위량을 구하게 되는 것이다. 그 편평변형에 대한 유도 결과식은 식 (4)⁶⁾와 같다.

$$\delta(i, j) = \frac{1-\nu_w^2}{\pi E_w} p(j) [F(z_1') + F(z_1'')] \tag{4}$$

여기서,

$$F(z) = \ln \left\{ \frac{\sqrt{(l_a^2 + (z + \frac{\Delta z}{2})^2) + z + \frac{\Delta z}{2}}}{\sqrt{(l_a^2 + (z - \frac{\Delta z}{2})^2) + z - \frac{\Delta z}{2}}} \right\}$$

$$+ \frac{z + \frac{\Delta z}{2}}{l_d} \ln \left\{ \frac{\sqrt{(z + \frac{\Delta z}{2})^2 + l_d^2} + l_d}{|z + \frac{\Delta z}{2}|} \right\}$$

$$- \frac{z - \frac{\Delta z}{2}}{l_d} \ln \left\{ \frac{\sqrt{(z - \frac{\Delta z}{2})^2 + l_d^2} + l_d}{|z - \frac{\Delta z}{2}|} \right\}$$

$$z'_i = |z_i - \eta_j|$$

$$z'_i = z_i + \eta_j$$

2.4 압연하중 계산

압연하중은 압연시 스트립과 작업롤이 접촉하는 접촉길이를 일정등분하여 각 등분에서의 압력분포를 구하여 합하므로써 얻을 수 있는데 이 압력분포는 식 (5)에 나타난 Bland & Ford식⁽⁷⁾에 의해 구해진다.

$$P = R' \int_0^{\varphi_n} S^+ d\varphi + R' \int_{\varphi_n}^{\varphi_i} S^- d\varphi \quad (5)$$

여기서,

$$S^- = \frac{kh}{h_1} \left(1 - \frac{\sigma_1}{k_1}\right) e^{\mu(H_1 - H)}$$

$$S^+ = \frac{kh}{h_2} \left(1 - \frac{\sigma_2}{k_2}\right) e^{\mu H}$$

$$\varphi_n = \sqrt{\frac{h_o}{R'}} \tan \sqrt{\frac{h_o}{R'}} \cdot \frac{H_n}{2}$$

$$H_n = \frac{h_i}{2} - \frac{1}{2} \mu \ln \left\{ \frac{h_i \left(1 - \frac{\sigma_o}{k_o}\right)}{-\frac{\sigma_i}{k_i}} \right\}$$

$$R' = R \left\{ 1 + \frac{16P(1 - \nu^2)}{\pi E(h_i - h_o)} \right\}$$

$$H = 2\sqrt{\frac{R'}{h_o}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{R'}{h_o}} \varphi \right)$$

2.5 압연기에서의 힘의 평형상태

압연기에서의 힘의 평형방정식은 롤간(작업롤과 중간롤, 중간롤과 백업롤) 및 작업롤과 스트립사이의 초기 접촉하중을 구하고 계산의 수렴판정조건에 사용된다. 각 롤별 y방향 힘의 평형상태를 Fig. 2를 참고로 하여 나타내면 다음과 같다.

-작업롤

$$\sum_{j=N_1}^{2m+1} q(j) \cdot \Delta Z - \sum_{j=N_2}^{N_3} p(j) \cdot \Delta Z = 2J_w \quad (6)$$

-중간롤

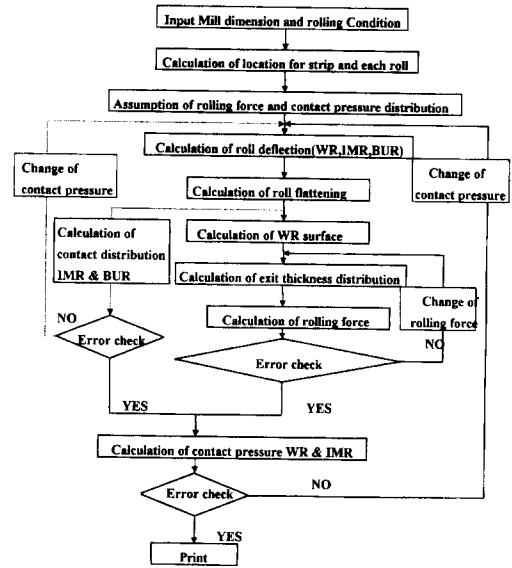


Fig. 4 A flow chart to analyze strip profile and edge drop.

$$\sum_{j=N_1}^{2m+1} \{r(j) - q(j)\} \cdot \Delta Z = 2J_l \quad (7)$$

-백업롤

$$\sum_{j=N_1}^{2m+1} -r(j) \cdot \Delta Z = P + 2J_w + 2J_l \quad (8)$$

2.6 출측 두께분포 계산

상기 과정을 통해 얻은 작업롤의 처짐량(Y_w)과 작업롤의 편평변형량(e) 및 초기조건으로 주어지는 작업롤의 초기 크라운(C_w)을 이용하여 압연후 스트립의 탄성회복을 무시하는 가정을 적용하면 식 (9)와 같은 작업롤의 표면변위(S)를 얻게 된다. 이때 상, 하 대칭으로 해석하였으므로 출측두께 분포는 작업롤 표면변위의 2배가 된다.

$$S(i) = Y_w(i) + e(i) - C_w(i) \quad (9)$$

3. 엣지드롭 해석 시뮬레이션 프로그램

3.1 해석방법

Fig. 4에 엣지드롭 해석절차를 나타내는 흐름도(flow chart)를 나타내었다. 즉 먼저 주어진 압연기 사양 및 압연조건을 이용하여 스트립과 작업롤, 중간롤의 위치를 2.1절에서 설명한 기준에 의해 구한다. 다음에는 초기 압연하중 및 롤간 접촉하중분포를 구하는데 초기 압연하중분포는 압연조건에

Table 1 Rolling conditions used in simulation.

Rolling condition	Stand				
	1	2	3	4	5
Entry thickness (mm)	3.5	2.6	2.0	1.5	1.2
Exit thickness (mm)	2.6	2.0	1.5	1.2	1.18
Width (mm)	1100				
Entrytension (Kgf/mm ²)	4.5	10.5	13.0	13.5	14.5
Exittension (Kgf/mm ²)	10.5	13.0	13.5	14.5	4.0
Rolling force (Ton)	978	880	725	733	583
WR radius (mm)	220	220	220	220	220
WR bender (Ton)	20	20	18.7	11.7	5.75
IMR bender (Ton)	7.5	7.5	7.5	12.7	11.6
IMR shift (mm)	45	45	45	40	40

서 주어진 총 압연하중을 스트립 폭으로 나눈값을 사용한다. 반면 롤간 접촉하중분포는 각 롤에 대한 압연기 힘의 평형방정식인 식 (6), (7), (8)과 기하학적 적합조건을 나타내는 식 (10)를 이용한다. 즉, 평형방정식과 기하학적 적합조건을 이용하여 식(11)과 같이 2차식으로 가정한 압력분포식의 상수값을 Gauss 소거법을 통해 구하여 초기값으로 사용한다. 여기서, $u(x)$ 는 각 롤에서의 접촉압력 분포 또는 압연하중분포를 나타낸다. 이 초기값을 기준으로 롤 처짐 및 편평변형량을 구하여 출측두께 분포를 얻게되는데 흐름도에 나타나있는 것처럼 각 단계에서 계산을 통해 얻은 압력분포값과 초기 수치해석을 통해 얻은 압력분포값의 차가 일정 에러(error) 범위내로 수렴하지 않으면 접촉압력분포를 변경하여 수렴할때 까지 계산을 반복하게 된다.

$$\frac{\partial u(x)}{\partial x} \Big|_{\frac{2m+1}{2}} = 0 \tag{10}$$

$$r(x) = ax^2 + bx + c \tag{11}$$

3.2 계산결과의 기본적 검토

3.1절에서 설명한 판 프로파일 및 엣지드롭 예측 시뮬레이션 프로그램의 검토를 위해 압연기 스탠드 출측 판 프로파일의 기본적인 제어수단인 작업롤 및 중간롤 벤더(F_w, F_l), 중간롤 위치이동($UC\delta$)에 따른 판 프로파일의 변화에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. Table 1은 기본적인 시뮬레이션조건을

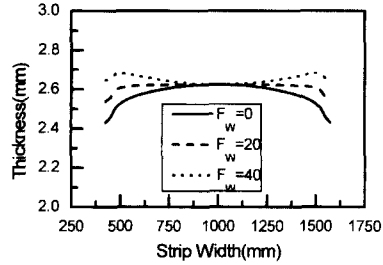


Fig. 5 Variation of strip profile with WR bender.

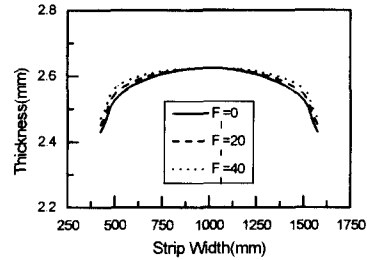


Fig. 6 Variation of strip profile with IMR bender.

나타내고, Fig. 5와 Fig. 6은 상기 계산중 작업롤 벤더력과 중간롤 벤더력 변화에 따른 판 프로파일의 변화경향을 나타낸다. 작업롤 벤더력 증가시에는 벤더력 효과에 의해 스트립의 엣지부 프로파일이 크게 변하는 반면 중간롤 벤더력 증가시에는 상, 하롤의 구속에 의해 엣지부 프로파일이 크게 변하지 않는다. 이것은 작업롤 벤더는 스트립 엣지부 프로파일을 향상시키고 중간롤 벤더는 스트립 중앙부의 프로파일을 향상시키는 판 프로파일 제어 액추에이터의 기능과 잘 일치하는 결과를 나타낸다. 또한 엣지드롭량은 판 프로파일중 특정지점(엣지로부터 100 mm지점과 25 mm지점)에서의 두께 변화를 나타내므로 그 경향은 프로파일의 변화경향과 일치한다.

4. 엣지드롭 초기설정 및 제어용 수식모델 도출

4.1 압연조건별 엣지드롭 변화량 계산

이와같은 엣지드롭 해석 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 수식모델 도출의 기본 단계인 압연조건, 즉 작업롤에 가공된 테이퍼부와 스트립의 접촉길이(작업롤의 위치변경), 열연판 크라운, 강종 및 작업롤 반경, 스트립 폭에 따른 엣지드롭 변화량을 각 스탠드 출측에 대해 계산하였다. 그 중 작업롤

에 가공된 테이퍼부와 스트립의 접촉길이 변화 및

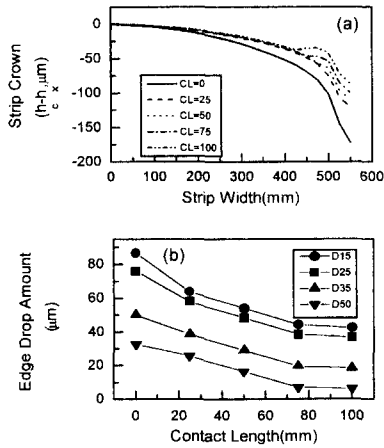


Fig. 7 Variation of strip profile and edge drop amount with contact length.

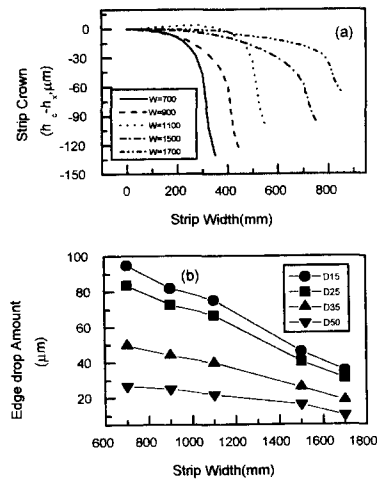


Fig. 8 Variation of strip profile and edge drop amount with strip width.

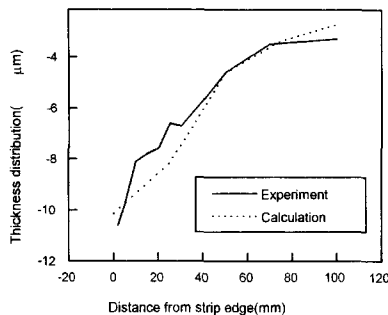


Fig. 9 Comparison of strip profile between experiment result and calculation result for flat WR.

스트립 폭 변화에 대한 엣지드롭 변화량을 대표적으로 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7(a)는 1번 스탠드에서의 작업롤 이동시 1번 스탠드 출측에서의 판 프로파일 경향을 스트립 중심을 기준으로 1/2에 대해 나타낸 것이며, Fig. 7(b)는 이때의 엣지드롭량의 변화를 엣지로부터 25 mm를 기준으로 나타내고 스트립 폭방향으로의 변화도 파악하기 위해 15, 30, 50 mm 지점에서의 변화량도 동시에 나타내었다. 작업롤 테이퍼부와 스트립의 접촉길이가 길어질수록 압연하중 완화에 의해 엣지부 프로파일은 보상되며, 이에 따라 엣지드롭량도 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 Fig. 8(a)는 스트립 폭변화에 따른 1번 스탠드 출측에서의 판 프로파일의 변화를 나타내고, Fig. 8(b)는 그때의 엣지드롭량의 변화를 나타낸다. 스트립 폭이 증가할수록 엣지드롭량이 감소하는 현상을 보이는데 이것은 스트립폭이 증가할수록 압연하중의 분포가 집중하중에서 분포하중으로 변하기 때문이다.

4.2 시뮬레이션결과와 현장실험결과와의 비교

상기의 시뮬레이션결과를 검증하기 위해 테이퍼롤이 투입된 상태에서 롤의 테이퍼부가 스트립과 접촉하지 않는 경우와 테이퍼부가 스트립과 100 mm 접촉하고 있는 경우에서의 결과를 비교하여 각각 Fig. 9 및 Fig. 10에 나타내었다. 또한 시뮬레이션 및 현장실험에 사용된 압연조건은 Table 2와 같다. Fig. 9에서 보는 것처럼 작업롤에 가공된 테이퍼부와 스트립이 접촉하지 않는 경우 스트립의 엣지로부터 100 mm 지점까지의 계산 프로파일과 현장실험으로부터 얻은 프로파일 사이에는 그 값이 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 10에 나

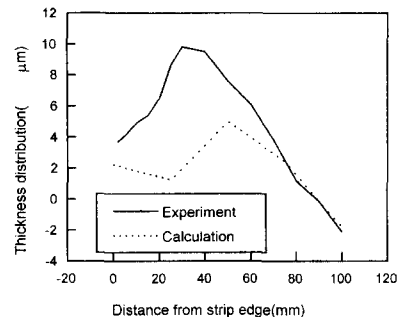


Fig. 10 Comparison of strip profile between experiment result and calculation result for taper WR shift.

Table 2 Rolling conditions used in comparison between simulation results and experiment results.

Rolling condition		Stand	1	2	3	4	5
Entry thickness (mm)			3.16	2.18	1.42	0.97	0.72
Exit thickness (mm)			2.18	1.42	0.97	0.72	0.70
Width (mm)			1160				
Rolling force (ton)			905.8	1152	1024	890	658
Rolling speed (mpm)			31.8	50.6	72.4	100.5	103.4
WR shift (mm)			50	50	50	370	370
IMR shift (mm)			369.3	369.3	101.8	81.5	52
WR bender (Kg/cm ²)			87.6	84	57	70.5	45.6
IMR bender (ton/chock)			49.4	49.0	44.4	37.5	28.3
Back tension (ton)			15.8	26.0	21.3	17.6	15.0
Front tension (ton)			26.0	21.3	17.6	15.0	2.2
WR dia. (mm)	Upper		1420	1420	1420	1420	1420
	Lower		1420	1420	1420	1420	1420
WR dia. (mm)	Upper		619	619	619	619	619
	Lower		619	619	619	619	619
WR dia. (mm)	Upper		511.8	529.3	531	529.5	526.8
	Lower		509	529.3	530	529.9	527.7

타넨 테이퍼부와 스트립이 100 mm 접촉하고 있을 때의 결과에서는 계산 프로파일의 실험으로부터 얻은 프로파일에 비해 대체로 테이퍼부에서의 접촉에 의한 프로파일 개선효과가 작게 평가되고 있음을 알 수 있다. 이는 시뮬레이션 해석시 엣지드롭의 발생원인중의 하나인 압연소재의 3차원 변형을 고려하지 않고 롤의 탄성변형만을 고려하였기 때문인 것으로 추정된다. 또한 스트립 엣지로부터 20 mm ~ 40 mm 사이에서 계산값과 실험값간의 오차가 가장크게 나타나고 있는데 이는 롤 분할모델 해석시 분할간격을 크게 설정하여 실제 압연시 그 효과가 가장크게 나타나고 있는 40 mm 지점에서의 해당 계산값이 없기 때문인데 이는 롤 분할간격을 줄이면 오차를 크게 감소시킬 수 있다.

4.3 압연조건과 엣지드롭과의 관계 도출

엣지드롭 제어용 수식모델을 도출하기 위해서는 4.1절에서의 계산결과를 이용해 각 압연인자와 엣

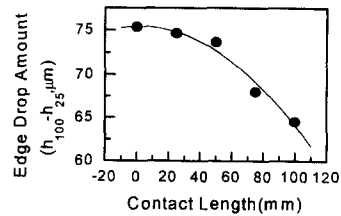


Fig. 11 Relation between edge drop and contact length.

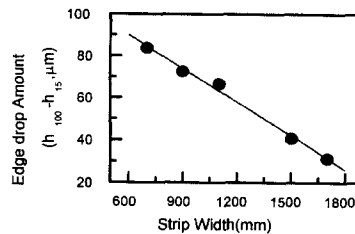


Fig. 12 Relation between edge drop and strip width.

지드롭량과의 관계를 먼저 구해야 한다. 4.1절에서

Table 3 Calculation range of rolling conditions.

Rolling conditions	Calculation range
Strip width (mm)	700~1700
Steel grade	20~47
Hot coil crown (μm)	0~130
Contact length (mm)	0~100
WR radius (mm)	220~280

계산한 압연인자중에서 대표적으로 작업롤 이동량 및 스트립 폭과 엣지드롭량과의 관계를 Fig. 11 및 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 11와 Fig. 12에서 보는 바와같이 작업롤 이동량과 엣지드롭량과는 2차식의 관계를 가지며, 스트립 폭과 엣지드롭량과는 1차식의 관계를 가짐을 알 수 있다. 또한 그림으로는 나타내지 않았지만 열연판 크라운, 강종 및 작업롤 반경등은 엣지드롭량과 2차적인 관계를 보였다.

4.4 엣지드롭 초기설정 및 제어용 수식모델 도출
 최종적으로 엣지드롭 초기설정 및 제어용 수식모델을 도출하기 위해 4.2절에서 구한 각 압연인자와 엣지드롭량과의 관계를 바탕으로 Table 3에 나타낸 압연인자의 변화에 대한 엣지드롭량을 계산하고 이 결과를 중회귀분석함으로써 수식모델을 도출하였다. 이때 제어대상 지점은 엣지드롭의 변화경향을 가장 잘 나타내는 스트립 엣지로부터 15 mm 및 25 mm지점을 선택하였다.⁽⁵⁾ 식 (12) 및 식 (13)에 스트립 엣지로부터 15 mm 및 25 mm지점에서의 엣지드롭량과 압연인자와의 관계를 나타내는 엣지드롭 초기설정 및 제어용 수식모델을 나타내었다.

$$D_{15} = a_{1i} \sum_{i=0}^4 (CL_i)^2 + b_{1i} \sum_{i=0}^4 (CL_i) + c_{1i} \sum_{i=0}^5 (R_i)^2 + d_{1i} \sum_{i=0}^5 (R_i) + e_{15} \cdot (\Gamma_H)^2 + f_{15} \cdot (\Gamma_H) + g_{15} \cdot W + h_{15} \cdot (YP)^2 + i_{15} \cdot (YP) + Const_{15} \quad (12)$$

$$D_{25} = a_{2i} \sum_{i=0}^4 (CL_i)^2 + b_{2i} \sum_{i=0}^4 (CL_i) + c_{2i} \sum_{i=0}^5 (R_i)^2 + d_{2i} \sum_{i=0}^5 (R_i) + e_{25} \cdot (\Gamma_H)^2 + f_{25} \cdot (\Gamma_H) + g_{25} \cdot W + h_{25} \cdot (YP)^2 + i_{25} \cdot (YP) + Const_{25} \quad (13)$$

5. 결 론

압연판의 폭방향 두께편차를 감소시키기 위해 도입되는 엣지드롭 제어시스템의 초기설정 및 제어용 수식모델을 도출하기 위해 압연기 스탠드 출측에서 압연기 사양 및 압연조건에 따른 판 프로파일 변화와 엣지드롭량을 예측할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발하고 이를 이용해 엣지드롭량에 영향을 미치는 제 압연인자의 영향을 검토하였다. 또한 스트립 엣지로부터 15 mm 및 25 mm지점에서의 엣지드롭량과 각 압연인자와의 관계를 구하고 이를 바탕으로 엣지드롭 제어 시스템의 초기설정과 제어에 이용할 수 있는 각 압연인자와 작업롤 이동량의 관계를 나타내는 수식모델을 도출하였다.

참고문헌

- (1) Kunio, K., Ikuo, Y. and Namio, S., 1992, "Edge drop Control of Hot and Cold Rolled Strips by a Tapered-Crown Work Roll Shifting Mill," *Kawasaki Steel Technical Report*, 27, pp. 5~12.
- (2) 小松 富夫, 進 修, 中西 敏修, 1985, "冷間壓延へのK WRSミルの適用(第2報)," 塑性加工春季講演會, pp. 45~48.
- (3) 池田昌則, 大池美雄, 水田篤男, 1993, "テパロール壓延におけるエッジドロップ變形挙動の解釋," 第44回 塑性加工聯合講演會, pp. 165~168.
- (4) Isao Akagi, 1994, "Advanced Edge Drop Control by the One side Tapered-Crown Work Rolls," *CAMP-ISIJ*, 7, pp. 444~494.
- (5) Hiroyasi, Y., Kanji, B. and Sumitada, K., 1992, "Development of Accurate Control Techniques of Strip Shape and Edge drop in Cold Rolling," *ISIJ*, Vol. 79, No. 3, pp. 156~162.
- (6) 日本鐵鋼協會, 1983, "板壓延の理論と實際," pp. 90~95.
- (7) William L. R., 1978 *Cold Rolling of Steel*, pp. 511~515.
- (8) 山田健二, 小川 茂, 阿高松男, 1991, "汎用3次元板壓解釋システムによる延現象の解釋," 第42回 塑性加工聯合講演會, pp. 323~326.