

〈技術論文〉

젠지미어 압연기 롤 변형해석

이영호* · 김종택* · 한석영* · 이준정* · 김종근**

(1990년 7월 19일 접수)

Analysis of Roll Deformation for Sendzimir Rolling Mill

Y.H. Lee, J.T. Kim, S.Y. Han, J.J. Yi and J.K. Kim

Key Words : Sendzimir Rolling Mill(젠지미어 압연기), AS-U-Roll, 1st. Intermediate Roll(1차 중간롤), Crown(크라운), Shifting(쉬프팅), Shape Control(형상제어), Strip Profile(판 프로파일)

Abstract

Sendzimir rolling mill is widely used for rolling hard materials such as stainless steel due to its small work roll diameter and shape controllability using two effective actuators, AS-U-Roll crown adjustment and 1st. intermediate roll shifting. However, in comparison with 4-high or 6-high mills, it is noteasy to get good strip or excellent flatness because Z-mill has small diameter of work rolls which are easily deformed by load. A new mathematical model based on the method of dividing roll and strip into multo-portions was used to develop strip profile prediction software. Using the developed software, several influencing factors related to rolled strip profile for Z-Mill were tested analytically and characterized for the effective shape control. The effects of adjusting shape control actuators of Z-Mill on strip profile were also exmined and discussed in detail.

기 호 설 명

- A_r : 롤의 단면적
- D : 롤 직경
- E : 탄성계수
- G : 강성계수
- I : 단면 2차 모멘트
- K : 스프링 상수
- L : 롤 길이
- m : 롤간 접촉점의 수
- n : 분할구간 수
- p_i : 롤의 i 위치에 작용하는 단위길이당 압연하중
- q_i : 롤의 i 위치에 작용하는 단위길이당 접촉하중

- U_{ix}, U_{iy} : t 롤의 X - Y 방향 축심변위
- u_i : 롤 왼쪽에서 i 위치까지의 거리
- W_i : i 번째 분할구간의 길이
- X^t, Y^t : t 롤의 i 위치에서의 X - Y 방향 강제변위
- α_{ij} : 축심변위 영향계수(부록 1 참조)
- σ_{ij} : j 지점에 하중 작용시의 i 위치에서의 변위
- θ : 롤에 작용하는 하중과 X -축 사이의 각도

1. 서 론

대표적인 클러스터 압연기인 젠지미어(Sendzimir) 압연기(Z-Mill)는 가역식 압연기으로써 스테인리스 강판, 전기강판 등과 같은 특수강의 냉간압연에 널리 사용되고 있다. Z-Mill은 소경의 작업 롤을 사용하기 때문에 고속 대압하 압연이 가능하

*정회원, 산업과학기술연구소 압연연구부
**산업과학기술연구소 압연연구부

고, 다른 형식의 압연기에 비해 얇고 경도가 높은 소재를 정도높게 압연할 수 있다.

압연판 형상제어 시스템의 설계는 현대 철강산업에서의 주요관심분야중의 하나로써 이 분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^(1~6). 압연판의 형상은 압연시에 작업물의 변형에 의한 판폭방향 두께 편차 때문에 발생하는 내부 잔류응력 분포에 의해 결정되는데 양호한 판형상을 얻기 위해서는 작업물의 변형을 조절하여 판폭방향의 두께편차를 최소화하여야 한다.

Z-Mill은 1차 중간 롤의 쉬프팅(1st. IMR-Shift)와 백업롤 크라운 조정장치(AS-U-Roll)와 같은 두가지의 효율적인 형상제어설비가 있으나 복잡한 기계적 구성과 작업롤이 소경이고 Barrel의 길이가 길기 때문에 4단이나 6단 압연기 비해 형상제어가 어렵다. Z-Mill의 효율적인 판형상 제어를 위해서는 전술한 형상제어설비의 특성을 파악하여 작업롤 및 최종적으로 압연판에 미치는 영향을 명확히 해야 한다.

본 논문에서는 Z-Mill의 압연판 형상 예측을 위한 이론 및 컴퓨터 시뮬레이션에 관한 사항과 설비 조건, 압연조건, 소재조건이 판형상에 미치는 영향에 대해 논하고자 한다.

2. 압연기의 구성

2.1 젠지미어 압연기의 구성

젠지미어 압연기(이하 Z-Mill)는 Fig. 1에 보인 바와 같이 8개의 A-H로 명시된 반침축, 6개의 2차 중간롤(2nd. IMR: I-N), 4개의 1차 중간롤(1st. IMR: O-R), 두개의 작업롤(S, T)들로 구성되어 있다. 롤은 4개의 외부 2차 중간롤(I, K, L, N)에 의해 구동이 되며 롤간의 마찰력에 의해 1차 중간롤 및 작업롤을 구동시킨다. I-T로 명시된 롤들은 양단에 지지점이 없어 자유롭게 부양될 수 있다. 반침축(A-H)은 Fig. 2에 보인 바와 같이 7개의 반침 베어링들로 나뉘어져 있다. 반침 베어링들은 하나의 축(shaft)에 배치되며 샤프트는 8개의 새들(saddle)에 의해 지지되어 있다. 새들은 압연기 하우징에 고정되어 있으며 롤사이와 샤프트 양단에 위치하고 있고 편심링을 포함하고 있다.

(1) 상·하부 Screwdown Operation

상부 screwdown 작업은 B, C샤프트에 의해 작동되고 하부는 F, G샤프트에 의해 행해진다. 샤프트

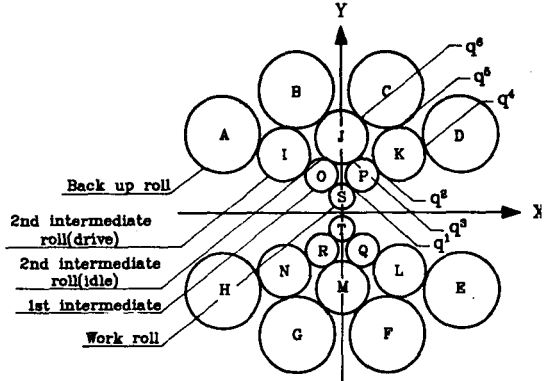


Fig. 1 Structure of Sendzimir mill

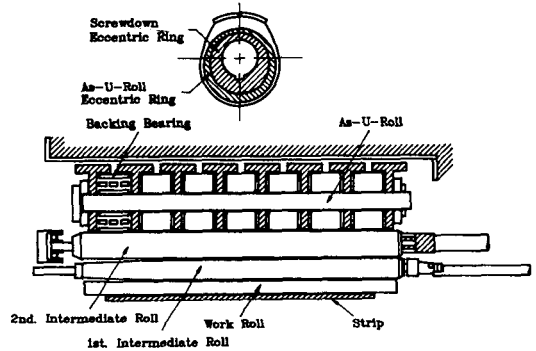


Fig. 2 Backing shaft assembly and front view of upper rolls

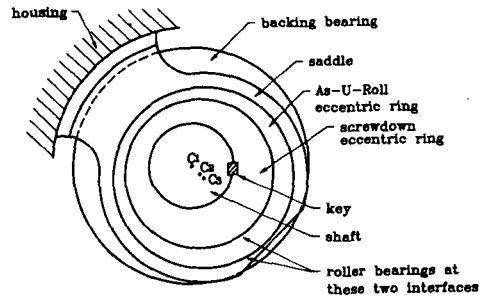


Fig. 3 Saddle details for shaft B and C

트 B, C의 새들 구성은 Fig. 3에 보인 바와 같으며 샤프트 F, G도 구성도 같으나 AS-U-Roll의 편심링이 제외되어 있다. 샤프트가 회전할 시에 편심 screwdown링도 함께 회전하여 샤프트의 중심 C2가 새들 중심 C1을 중심으로 회전함으로써 샤프트와 압연기 하우징 사이의 거리를 조정하게 된다. 샤프트와 screwdown 편심링은 key로 연결되어 있

어서 동시에 움직이기 때문에 샤프트 양단은 압연기 하우징과 평행을 유지한다. Screwdown은 롤 I, J, K, O, P, S를 위·아래로 움직여서 압연중에 두 작업롤의 위치를 조정하여 passline 설정, 압연두께 설정 및 작업을 교체시에 사용된다. 롤 A, H, D, E도 편심링이 있으며 쌍으로 조절되고, 주로 롤 마멸을 보상하는데 사용된다.

(2) AS-U-Roll 크라운 조정

롤 B, C는 screwdown 편심링과 새들 사이에 AS-U-Roll 편심링이 장치되어 있는데, 이 편심링은 샤프트 및 screwdown 편심링과 관계없이 독립적으로 회전이 가능하여 (Fig. 3) 이 편심링의 중심 C3가 중심 C1에 대해 회전하는 효과를 주어 샤프트를 변형시켜 최종적으로 작업롤의 변형을 주게 된다. B, C축의 링들은 쌍으로 움직이게 되는 데 구동은 웹 기어를 이용한다. AS-U-Roll 편심링은 새들 위에 8개의 AS-U-Roll 랙들에 의해 구동되는데 이 랙들은 개별적 조정이 가능토록 되어 있어서 롤에 대한 부분적인 압연조절을 통한 판의 크라운을 조정한다.

(3) 1차 중간 롤 조정

1차 중간롤은(O-R) Fig. 2에 보인 바와 같이 한쪽 끝이 테이퍼로 되어 있어서 판단부의 형상을 제어하는데 사용된다. 테이퍼 형식 및 량은 판쪽, 강종등에 따라 차이가 있으며 양호한 판형상 제어를 위하여 1단 테이퍼 및 1단 테이퍼를 개량한 3단 테이퍼와 같은 스텝을 이용한 롤이 사용되고 있다. 이 롤들은 축방향으로 쉬프트가 가능하며 상·하부 롤들은 독립적으로 이동이 가능하여 일정 한도 내에서 판 단부의 압력을 제어 하여 edge drop를 제어할 수 있다. 또한 판폭이 다른 제품을 연속적으로 압연하고자 할 때 큰 융통성을 부여한다.

3. 연구내용

3.1 롤의 굽힘변형

롤의 굽힘변형 해석은 롤 barrel부를 작은 영역으로 분할하고, 압연하중, 롤간 접촉하중의 분포에 대한 변위의 적합조건을 이용하여 변위를 구한다^(4,6). 본 연구에서는 松田⁽⁴⁾ 등이 제안한 분포하중 롤 분할 모델 (Fig. 4)을 사용하였다.

이 모델은 각 구간에서의 하중이 선형적으로 분포하기 때문에 적은 분할구간수로도 정도 높은 해를 얻을 수 있으며 특히 판단부에서의 하중처리가 정

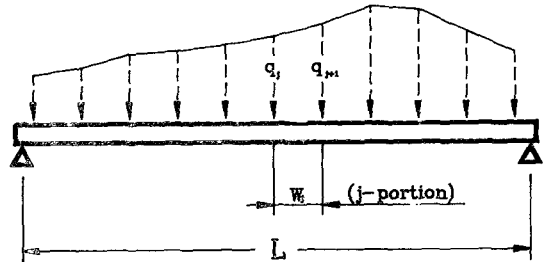


Fig. 4 Linearly distributed load in each portion

확하다. 해석에 사용한 가정은 다음과 같다.

(1) 상·하 작업롤의 연결선과 압연판 단면의 중심점과의 교점을 원점으로 하고 압연방향을 X축, 판두께 방향을 Y축, 판폭 방향을 Z축으로 하는 좌표계에서 구성 롤들이 Fig. 1에서와 같이 X 및 Y축에 대해 상하 좌우 대칭이다(1/4만 해석).

(2) Thermal 크라운에 의한 롤 프로파일의 변화는 없다고 가정한다.

(3) 백업롤의 강제변위는 없다고 가정한다.

(i) 롤 축심 변위식

롤의 축심변위는 롤에 작용하는 외력에 의하여 결정되므로 4단이나 6단 압연기의 경우 외력이 한 방향(Y-방향)으로만 작용하나 Z-Mill과 같은 클러스터 압연기의 경우에는 롤에 작용하는 힘의 작용방향이 일정하지 않기 때문에 2차원의 변위(X-Y 방향)를 고려해야 한다. 또한 롤 초크가 없이 롤들이 고정되지 않은 상태에서 압연되며 쉬프팅등과 같은 요인에 의하여 롤의 길이 방향에 대해 좌·우 비대칭 압연이 되므로 강제변위도 좌·우 비대칭으로 고려해야 한다⁽³⁾. Fig. 4에서 j구간에 작용하는 선형 하중에 의한 i위치에서의 변위를 표시하면 다음과 같이 된다.

$$\delta_{ij} = a1_{ij}q_j W_j + a2_{ij}q_{j+1} W_j \tag{1}$$

그러므로 전체 하중에 의한 i위치에서의 변위는

$$\delta_i = \sum_{j=1}^{n+1} \delta_{ij} \tag{2}$$

방정식 (1)과 (2)를 조합하면 다음과 같이 된다.

$$\delta_i = \sum_{j=1}^{n+1} A_{ij} q_j \tag{3}$$

여기서 A_{ij}는 부록 (1)의 영향계수 a1 및 a2의 합수로서 다음과 같이 정의된다.

$$A_{ij} = a1_{ij} W_j + a2_{ij} W_{j-1} \quad (j=2 \sim n) \tag{4a}$$

$$A_{ij} = a1_{ij} W_j \quad (j=1) \tag{4b}$$

$$A_{ij} = a2_{i,j-1} W_{j-1} \quad (j=n+1) \tag{4c}$$

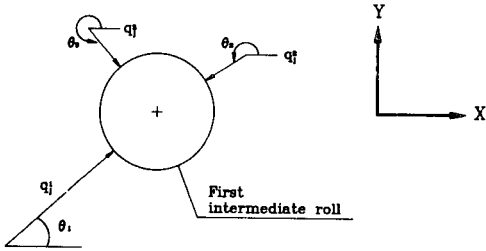


Fig. 5 Loads acting on a roll

식 (3)에서 롤의 강체변위와 롤에 작용하는 하중의 방향(Fig. 5)을 고려하여 t -롤축의 i 위치에서의 X - Y 방향 축심변위를 구하면 다음과 같다.

X -방향 변위

$$U_{i,x}^t = \sum_m \left(\sum_{j=1}^{n+1} A_{ij}^m q_j^m \cos \theta_j^m \right) + X_0^t + (X_L^t - X_0^t) u_i / L \quad (5a)$$

Y -방향 변위

$$U_{i,y}^t = \sum_m \left(\sum_{j=1}^{n+1} A_{ij}^m q_j^m \sin \theta_j^m \right) + Y_0^t + (Y_L^t - Y_0^t) u_i / L \quad (5b)$$

여기서

- m : 롤의 접촉개수
- t : t -롤
- X_0^t, Y_0^t : t -롤의 $i=0$ 위치에서의 X -방향 및 Y -방향 강체변위
- X_L^t, Y_L^t : t -롤의 $i=L$ 위치에서의 X -방향 및 Y -방향 강체변위

작업롤에 대해서는 압연하중(p)과 1차 중간 롤 사이의 접촉하중(q)에 의한 Y -방향 변위만이 존재하므로 다음과 같다.

$$U_{i,y}^t = \left(\sum_{j=1}^{n+1} A_{ij}^t q_j^t \sin \theta_j^t \right) + \sum_{j=1}^{n+1} A_{ij}^t P_j / 2 + Y_0^t + (Y_L^t - Y_0^t) U_i / L \quad (6)$$

(ii) 힘과 모멘트 평형식

각 롤에 작용하는 힘 및 모멘트의 평형 방정식은 집중 하중법(3)에서와 달리 한구간 내에서 선형 분포하중이 작용하기 때문에 구간 양단의 선합에 의한 총합으로 결정된다.

먼저 X - Y 방향의 힘의 평형은 각각 다음과 같다.

X -방향

$$\sum_m \left(\sum_{j=1}^m (q_j^m \cos \theta_j^m + q_{j+1}^m \cos \theta_{j+1}^m) W_j^m \right) = 0 \quad (7a)$$

Y -방향

$$\sum_m \left(\sum_{j=1}^m (q_j^m \sin \theta_j^m + q_{j+1}^m \sin \theta_{j+1}^m) W_j^m \right) = 0 \quad (7b)$$

작업롤의 경우, Y 방향의 힘의 평형만 고려하므로

$$2 \sum_{j=1}^n \{ q_j^1 \sin(\pi + \theta^1) + q_{j+1}^1 \sin(\pi + \theta^1) W_j^1 \} + \sum_{j=1}^n (P_j + P_{j+1}) W_j^1 = 0 \quad (8)$$

각 롤에 작용하는 X - Y 축에 대한 모멘트의 평형식은 다음과 같다.

X -축

$$\sum_m \left[\sum_{j=1}^n \{ 3z_j + w_j^m \} q_j^m \sin \theta_j^m + (3z_j + 2w_j^m) q_j^m + \sin \theta_j^m \} w_j^m \right] = 0 \quad (9a)$$

Y -축

$$\sum_m \left[\sum_{j=1}^n \{ 3z_j + w_j^m \} q_j^m \cos \theta_j^m + (3z_j + 2w_j^m) q_j^m + \cos \theta_j^m \} w_j^m \right] = 0 \quad (9b)$$

작업롤의 경우

$$2 \sum_{j=1}^n \{ (3Z_j + W_j^1) q_j^1 + (3Z_j + 2W_j^1) q_{j+1}^1 \} \sin(\pi + \theta^1) W_j^1 + \sum_{j=1}^n \{ (3Z_j + W_j^1) P_j + (3Z_j + 2W_j^1) P_{j+1} \} W_j^1 = 0 \quad (10)$$

(iii) 변위 적합조건식

Foppel⁽⁷⁾의 식에 의하면 접촉하는 롤간의 편평량은 작용구간 내의 접촉하중에 비례하며 편평량은 접촉 방향으로의 롤 축심의 변위와 크라운, 테이퍼 등에 의한 간격으로 표시된다. Fig. 6에 보인 바와 같이 t -롤과 T -롤 사이의 접촉하중은 Foppel의 식에서 알 수 있듯이 두 롤의 편평량과 접촉점에서의 롤 축심변위량에 의해 결정된다. 접촉하중은 접촉하는 두 롤의 축심변위 (U), 무하중시의 롤 갭 (C), 두 롤 사이의 스프링 상수(K)에 의해 다음과 같은 수식으로 표현된다.

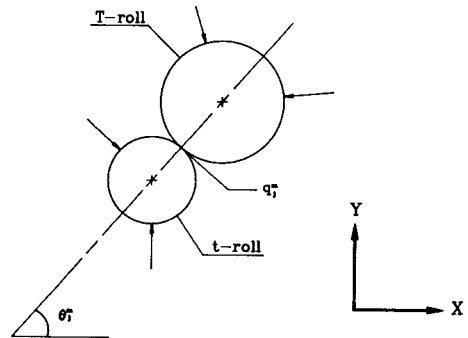


Fig. 6 A pair of mating rolls

$$q_j^m = K_j^m \{ (U_{j,x} \cos \theta_j^m + U_{j,y} \sin \theta_j^m) - (U_{j,x} \cos \theta_j^m + U_{j,y} \sin \theta_j^m) - C_j^m \} \quad (11)$$

축심변위식 (5), (6)을 식 (11)에 대입하여 정리하면 6개의 변위 적합조건식을 구할 수 있다. 스프링 상수(K)는 작업롤, 1차 및 2차 중간롤 간에는 solid롤⁽⁷⁾에 대한 상수를 사용하였으며 2차 중간롤과 받침 베어링 간에는 Hattori⁽⁸⁾ 등이 실험에 의해 결정된 값을 사용하였다.

식 (1)~(11)을 행렬로 처리하고 물체체에 대한 강성 방정식으로 조립, 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [AA] & [SS] \\ [FF] & [O] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (Q) \\ (R) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (P) \\ (S) \end{pmatrix} \quad (12)$$

$(6n+12) \times (6n+12) \quad (6n+12) \times 1$
 $(6n+12) \times 1$

다시 간략하면

$$[A](X)=[F] \quad (13)$$

의 형태가 된다. 식 (12)에서 분할 행렬의 내용은 다음과 같다.

- [AA] : (6n×6n) 축심변위 행렬
- [FF] : (12n×6n) 힘·모멘트 평형 행렬
- [SS] : (6n×12) 대칭·비대칭 강제변위 행렬
- [Q] : (6n×1) 접촉하중 결과 벡터
- [R] : (12×1) 강제변위 결과 벡터
- [P] : (6n×1) 압연하중 및 1차 중간롤의 테이퍼 및 슈프팅 AS-U-Roll의 크라운 처리 벡터
- [S] : (12×1) 압연하중에 의한 힘 및 모멘트 처리 벡터

3.2 Z-Mill 형상제어 시뮬레이션

시뮬레이션 소프트웨어는 주요인자(압연, 소재 및 설비조건)에 대해 작업롤의 변형 및 판형상을 계산할 수 있도록 FORTRAN 컴퓨터 프로그램으로 작성하였다. 구성은 입력 데이터 처리, 압연하중 계산, 영향계수 계산, 행렬 조합처리, 행렬 계산, 접촉조건 처리, 경제조건 처리, 출력처리 등이다.

프로그램 입력 데이터는 롤 크기, 입·출력 판두께, 강중, 입·출측 장력, 판폭, AS-U-Roll 크라운량, 1차 중간롤 슈프팅량 등이다. 데이터들을 입력한 후에 판폭에 대한 분할구간 조정, 출측 판두께에 대한 롤 클러스트의 배치 및 각도를 결정하고, Bland & Ford식⁽⁹⁾을 이용하여 소재의 변형저항에 대한 압연하중을 결정한다. 각 롤에 대한 영

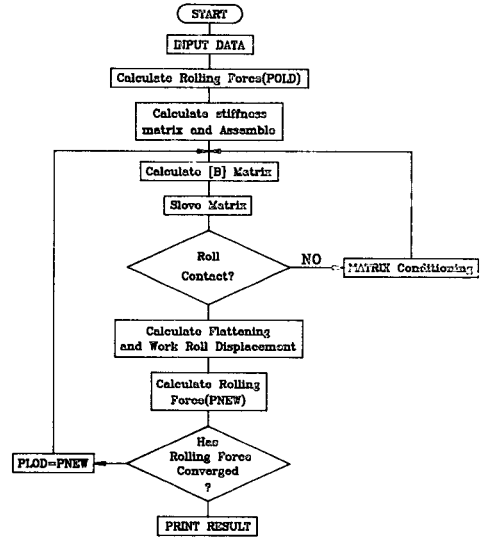


Fig. 7 Flow chart of Strip Profile Prediction Model

향계수를 계산한 후 식 (12)의 [AA]를 결정하고 힘·모멘트 평형 [FF] 및 대칭·비대칭 강제변위 [SS]를 결정하여 식 (13)의 [A] 행렬을 구성하고 압연하중, 힘·모멘트 평형과 1차 중간롤의 테이퍼량, 슈프팅량, AS-U-Roll 크라운량에 의해 결정된 무하중시의 롤 갭을 결정된 후 식 (13)의 벡터 (F)를 조립한 후 각롤의 접촉하중 및 강제변위를 결정하였다. 식 (13)의 해는 factorizing 및 gaussian elimination을 사용하여 구했다. 계산도중 발생하는 롤의 비접촉 문제는 접촉하중을 0으로 하고 행렬을 재구성하여 접촉하중 및 강제변위를 다시 계산토록 하였다. 접촉하중 및 강제변위를 이용하여 작업롤의 축심변위를 계산하고 압연하중에 의한 작업롤의 편평량⁽¹⁰⁾을 더하여 판두께 프로파일을 결정하였다. 이때 판두께는 판의 중심부의 두께가 목표 두께가 되도록 하였다. 수렴조건은 압연하중의 수렴을 이용하였으며 신·구 하중차이가 1 ton이하(전체 압연하중의 1~2%)가 될때까지 반복 계산 하였다. Fig. 7은 시뮬레이션 소프트웨어의 흐름도를 보인 것이다.

3.3 압연판 형상 영향인자 분석

개발된 프로그램을 사용하여 Z-Mill에 대한 소재조건, 형상제어, 설비 등이 압연판 프로파일에 미치는 영향을 검토하였다. 사용한 소재는 STS 304로써 계산에 사용된 롤 크기 및 압연조건은

Table 1 Roll dimensions and rolling conditions used for calculation.

(a) Roll dimensions, in mm

Roll type	Diameter	Length
Work roll	86.0	1875.0
First intermediat roll	138.0	1820.0
Second intermediate roll (Drive)	234.0	1800.0
Second intermediate roll (Idle)	234.0	1750.0
Ba. k ₂ -up roll	406.4	171.0

(b) Rolling conditions

Strip width	Strip thickness(mm)		Tension stress(kg/mm ²)	
	Entry	Exit	Entry	Exit
915.0	1.94	1.59	28.0	25.9
1220.0	4.0	3.4	28.0	25.9
1524.0	4.0	3.4	28.0	25.9

* Friction coefficient : 0.08

* Young's Modulus : 21,000kg/mm²

* Modulus of Rigidity : 8,400kg/mm²

Table 1과 같다. 본 연구에서는 Z-Mill의 형상제어 설비인 1차 중간 롤의 테이퍼 형식과 슈프팅량 AS-U-Roll 크라운량의 판 프로파일에 미치는 영향을 다음과 같은 조건에 대하여 검토하였다.

(1) 판폭의 변화에 의한 영향

판폭이 판두께 프로파일에 미치는 영향은 1차 중간롤의 테이퍼가 없는 것으로 가정하였고 AS-U-Roll의 크라운 변화에 의한 영향만 고려하였다. 입측 및 출측 판두께는 각각 4.0mm 및 3.2mm로 하여 계산하였다. AS-U-Roll의 크라운 패턴은 크라운이 없는 경우와 있는 경우에 대하여 검토하였다.

(2) 1차 중간 롤 테이퍼형식에 의한 영향

1차 중간 롤의 테이퍼형식이 판 프로파일에 미치는 영향은 테이퍼가 없는 경우, 1단 테이퍼의 경우 (Fig. 8a), 그리고 3단 테이퍼의 경우 (Fig. 8b)에 대해 검토하였다. Table 2의 롤1, 롤2, 롤3은 각각 915.0, 1220.0, 1524.0mm의 판폭에 사용한 규격이다.

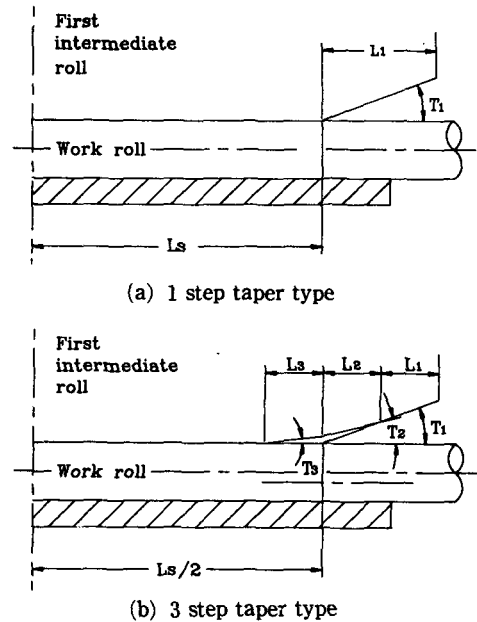


Fig. 8 Taper profile and dimensions of first intermediate roll

Table 2 Dimensions of taper 1st. intermediate roll

(a) 1 step taper

	Roll 1	Roll 2	Roll 3
Taper angle	10.0/10,000	10.0/10,000	10.0/10,000
Taper length	760.3	565.0	427.0

(b) 3 step taper

		Roll 1	Roll 2	Roll 3
Taper angle	1st. step	20/10,000	20/10,000	15/10,000
	2nd. step	6.23/10,000	6.70/10,000	3.75/10,000
	3rd. step	1.84/10,000	2.50/10,000	1.88/10,000
Taper length	L1	496.7	380.0	272.0
	L2	163.6	185.0	155.0
	L3	120.7	144.0	154.0

(3) 1차 중간 롤 슈프팅에 의한 영향

슈프팅에 의한 판 프로파일의 변화는 Table 2(b)의 3단 테이퍼 롤에 대해 검토하였다. 슈프팅은 0mm인 경우 롤 barrel 중간 부분에서 테이퍼

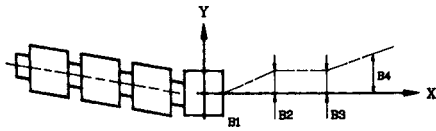


Fig. 9 Back-up roll camber (AS-U-Roll)

끝까지의 길이를 1000mm로 하고 테이퍼의 시작부분은 이 길이에서 L1, L2, L3의 합을 뺀 값으로 했다(Fig. 8(b)). 쉬프팅은 테이퍼의 시작부분이 롤 barrel 중간 부분으로 이동하는 거리로 하였으며 분할 구간점에서의 작업롤과 1차 중간 롤간의 간격을 계산 하도록 하였다. 쉬프팅에 의한 판 프로파일의 변화는 쉬프팅 거리를 0에서 150mm까지 50mm 간격으로 검토하였다. AS-U-Roll 크라운은 없는 것으로 하였다.

(4) AS-U-Roll 크라운에 의한 영향

AS-U-Roll 크라운은 2차 중간롤로 부터 백업롤과 2차 중간 롤 사이의 간격으로 Fig. 9와 같이 B1, B2, B3, B4로 표시하였다. 크라운은 2차 중간 롤과의 간격으로 나타내는데 패턴의 값들을 소프트를 중심으로 backing bearing의 바깥쪽 끝의 값을 의미하며 다른 bearing과의 연결은 선형적인 분포를 갖도록 했다. 크라운은 (+) 크라운(-) 및 (-) 크라운(-)에 대하여 검토하였다. (+) 크라운의 경우 4가지 패턴에 대해 계산하였고 (-) 크라운의 경우 3가지 패턴에 대해 계산하였다. 사용한 패턴의 종류는 Table 3과 같다. 형상제어 설비의 조합에 의한 영향도 검토하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 판폭의 변화에 의한 영향

Fig. 10(a)는 크라운이 없는 경우로써 판폭의 변화에 대한 판 프로파일을 보인 것이다. 판폭의 변화에 대한 edge drop량이 거의 일정하였으며 판두께가 감소하는 구간(판 단부에서의 거리)은 판폭이 증가하에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이와 같은 경향은 AS-U-Roll 크라운의 변화를 준 경우에도 유사하였다(Fig. 10(b)). 1차 중간롤을 테이퍼가 없는 평롤로 하였기 때문에 압연시에 상·하부 작업롤의 판이 걸치지 않는 부분에서 접촉(roll kissing)하는 경향을 보였다. 작업롤의 접촉 현상은 압하력이 크고 판폭이 작을수록 현저하였으며

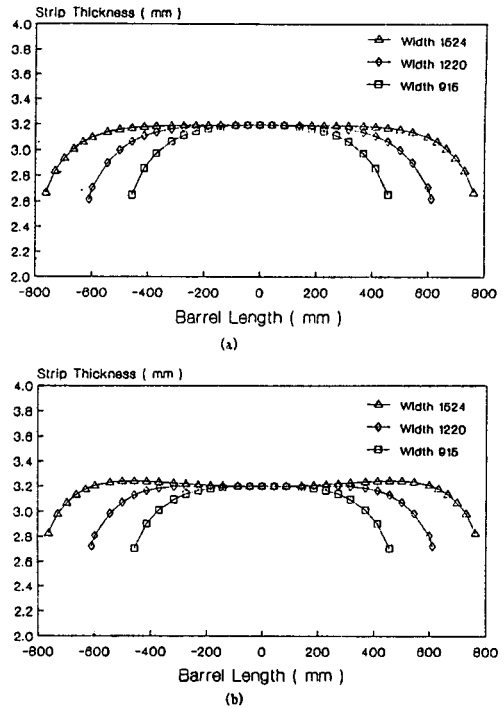
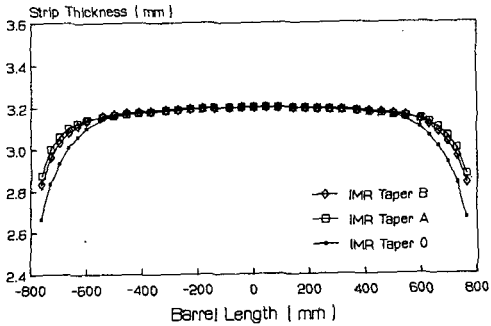


Fig.10 The effects of strip width variation on thickness profile of transverse direction of strip without taper of 1st. intermediate roll. (a) no crown, (b) crown pattern A

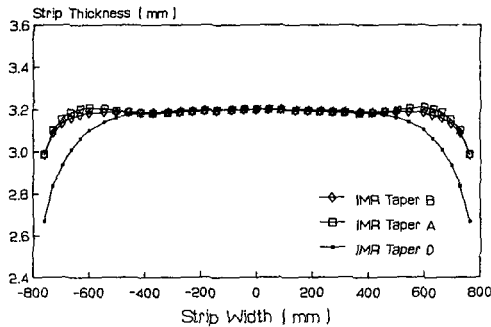
이는 작업롤이 소경이기 때문에 외력에 의해 쉽게 변형되기 때문이다. 테이퍼 롤의 경우 작업롤의 접촉현상은 발생하지 않았다.

4.2 1차 중간 롤의 테이퍼에 의한 영향

테이퍼 형식이 판 프로파일에 미치는 영향은 Fig. 11과 같다. 그림에서 테이퍼 0은 테이퍼가 없는 경우, 테이퍼 A는 1단 테이퍼의 경우, 테이퍼 B는 3단 테이퍼를 나타낸다. 일반적으로 판두께가 판중심에서 edge방향으로 갈수록 점차적으로 감소하다가 edge부에서 급격히 감소하였다. 1단 혹은 3단 테이퍼롤이 평롤에 비해 edge drop량 및 범위가 작았으며 쉬프팅시에 테이퍼롤의 효과를 더욱 명확히 알 수 있다. 1단 테이퍼와 3단 테이퍼에 의한 판 프로파일은 쉬프팅이 0mm일 때는 유사하지만 쉬프팅을 증가시킬 경우 3단이 1단에 비해 양호함을 알 수 있다. 쉬프팅이 100mm의 경우 (Fig. 1(b)) 3단은 edge부를 제외한 부분에서는 양호하지만 1단은 quater buckle이 발생하였으며 이와 같



(a)



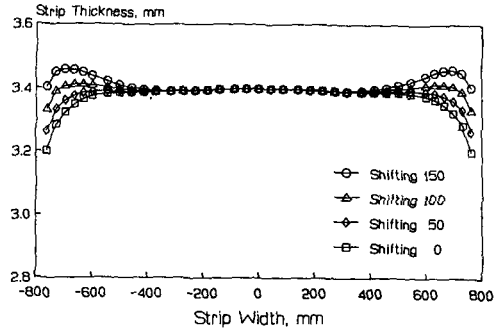
(b)

Fig.11 The effects of 1st. IMR taper type on strip thickness profile for strip width of 1524.0mm. Strip thickness reduction (a) No shifting, (b) shifting 100mm.

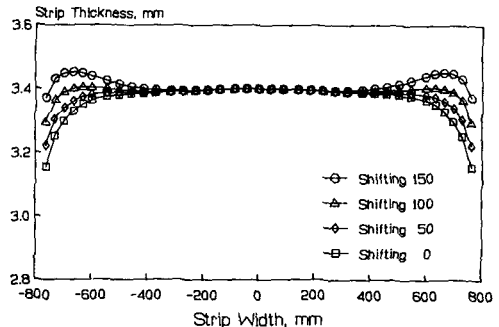
은 현상은 테이퍼 각도와 판폭이 증가할수록 증가하였다. 쉬프팅량을 계속 증가시킬 경우 1단은 quarter buckle과 center wave가 동시에 발생하였으나 3단은 center wave만 발생하였다. 그러므로 판 edge 부위의 제어를 위해서는 3단이 1단보다 제어 범위 및 형상 측면에서 더 효율적임을 알 수 있다.

4.3 1차 중간 롤의 쉬프팅에 의한 영향

1차 중간 롤의 쉬프팅이 판 프로파일에 미치는 영향은 Fig. 12와 같다. 쉬프팅을 증가시킬수록 edge drop은 급격히 감소하였으나 quarter buckle 혹은 center wave와 같은 판형상 불량이 발생하는 경향을 보였다. 이와 같은 형상불량은 압연력(압하율), 판폭, 테이퍼 형식에 따라 정도 및 형태가 다른 데 일반적으로 압하율 및 판폭이 증가할수록, 테이퍼 각도가 클수록 증가하는 경향을 보였다. 또한 쉬프팅을 과도하게 할 경우 헝폭에서는 center wave가 발생하였으며 광폭에서는 quarter buckle



(a)



(b)

Fig.12 The effects of 1st. IMR shifting on strip thickness profile for strip width of 1524.0mm. Strip thickness reduction (a) from 3.8mm to 3.4 mm, (b) from 4.0mm to 3.4mm

및 center wave가 동시에 발생하였다. 이는 1차 중간롤의 쉬프팅 효과가 edge 부분에만 작용하기 때문이며 특히 광폭의 경우 판두께가 판중심에서 테이퍼 시작부분까지는 계속 감소하다가 테이퍼 부분에서는 판 edge부까지는 증가함에 따라 quarter buckle이 발생하게 된다. 그러므로 1차 중간롤 쉬프팅만으로는 양호한 판 프로파일을 얻기는 불가능하며 edge drop을 최소화 하기 위해서는 압연력, 판폭, 테이퍼 형식에 따라 적정량을 설정하는 것이 바람직하다.

4.4 AS-U-Roll 크라운에 의한 영향

AS-U-Roll 크라운이 판 프로파일에 미치는 영향은 Fig. 13과 같다. Fig. 13(a)는 (+)크라운에 의한 영향을 보인 것으로 크라운량을 증가시킬수록 폭방향의 판 프로파일이 양호해지며 edge drop은 소량 감소하였다. 크라운 패턴에 따른 판 프로파일은 압연력 및 판폭에 의한 영향을 받는데 압연력 및 판폭이 클수록 크라운량을 증가시키는 것이 바

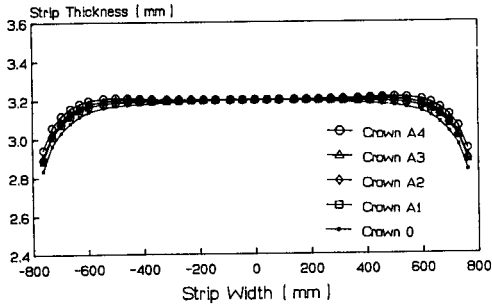
람직하다. 그러나 크라운량을 적정치 이상 설정 할 경우 center wave가 발생할 수 있으므로 주의하여야 한다. AS-U-Roll 크라운만에 의한 판형상에의 영향은 판 크라운을 균일하게 하며 edge drop 보 상에는 큰 효과가 없음을 알 수 있다.

Fig. 13(b)는 Table 3의 (-) 크라운 패턴에 대한 쉬프팅이 없는 경우의 판 프로파일을 보인 것이다. (-) 크라운을 증가시킴에 따라 판 두께는 판

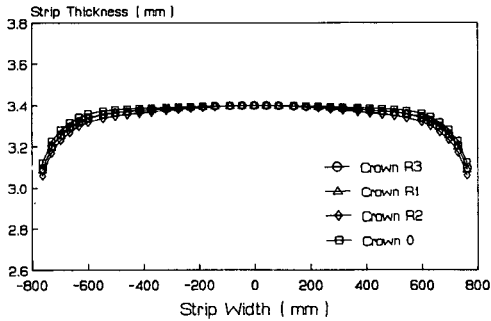
의 중심부 대비 점차적으로 감소하여 quarter buckle이 발생됨을 알 수 있다. (-) 크라운은 판 형상 측면에서 Z-Mill의 경우 사용하지 않는 것이 바람직하다.

4.5 AS-U-Roll 크라운 및 1차 중간 롤의 조합에 의한 영향

AS-U-Roll 크라운과 1차 중간롤 쉬프팅의 조합이 판 프로파일에 미치는 영향은 Fig. 14에 보인다. Fig. 14(a)는 1차 중간롤 쉬프팅 및 AS-U-Roll 크라운의 개별적인 효과와 조합에 의한 효과를 비교한 것으로서 형상제어 설비를 적절히 조정함으로써 양호한 판 프로파일을 얻을 수 있었으나 edge drop 현상은 상존하였다. Fig. 14(b)는 테이퍼 형식 변화시에 쉬프팅 및 크라운의 조합효과를 보인 것으로서 테이퍼 각도의 증가에 따라 edge drop량이 감소하였고 형상제어 설비의 조정



(a)

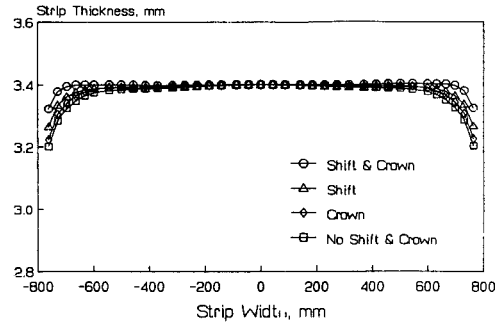


(b)

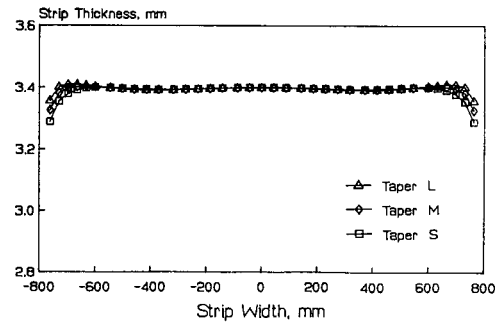
Fig.13 The effects of AS-U-Roll crown on strip thickness profile without 1st. IMR shifting for strip width of 1524.0mm. (a) (+) crown, (b) (-) crown

Table 3 AS-U-Roll crown pattern, in mm

Crown pattern		B1	B2	B3	B4
(+) Crown	A1	0.0	0.0	0.0	0.1
	A2	0.0	0.0	0.05	0.1
	A3	0.0	0.03	0.06	0.1
	A4	0.0	0.0	0.0	0.5
(-) Crown	R1	0.04	0.04	0.01	0.0
	R2	0.08	0.04	0.01	0.0
	R3	0.05	0.0	0.0	0.0



(a)



(b)

Fig.14 The effects of combination of AS-U-Roll (+) crown and 1st. IMR shifting on strip thickness profile for on strip width of 1524.0mm. (a) the effects of independent and combination, (b) the effects of combination for various taper type

해 양호하 판 프로파일을 얻을 수 있었다. 우수하 판 프로파일을 얻기 위한 형상제어설비의 조정량은 전술 했던 압연력, 판폭, 테이퍼 형식에 따라 달리 설정되어야 한다.

5. 결 론

Z-Mill의 형상제어를 위한 압연 판 프로파일 예측 소프트웨어를 개발하였으며 형상제어 설비인 1차 중간 롤과 AS-U-Roll이 판 프로파일에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 판 폭의 변화에 대한 판 프로파일의 영향은 1차 중간롤의 테이퍼가 없는 경우에 edge부에서의 drop량은 큰 차이가 없었으나 판폭에 증가할수록 판 두께가 감소하는 구간이 감소하였다. AS-U-Roll 크라운 조정에 의한 판 프로파일은 크라운량이 클 경우 center wave가 발생한다.
- (2) 1차 중간 롤의 테이퍼형식에 대한 판 프로파일은 3단 테이퍼가 1단 테이퍼보다 우수하였다. 1단 테이퍼경우 쉬프팅량이 증가할수록 quarter buckle이 발생하였다.
- (3) 1차 중간 롤의 쉬프팅에 의한 영향은 edge drop을 감소시키는데는 매우 효율적이지만 쉬프팅량을 증가시킬수록 center wave가 발생한다.
- (4) AS-U-Roll 크라운 패턴 설정은 edge부를 제외한 부분에서의 판형상에 큰 영향을 주었다. 크라운량을 증가시킬수록 판 프로파일이 양호해지지만 과도할 경우 center wave가 발생한다. (-) 크라운의 경우 center wave는 억제하지만 quarter buckle이 발생하는 경향을 보인다.
- (5) AS-U-Roll 크라운과 1차 중간 롤의 쉬프팅의 조합에 의한 판형상제어는 판폭 및 테이퍼 형식에 따라 조정해야 하며 적절한 조합의 경우 양호한 판형상을 얻을 수 있었으나 본 연구에서 사용한 패턴으로는 center wave 및 edge drop을 동시에 제어하기는 불가능하였다.

참 고 문 헌

- (1) Sendzimir, M.G., 1980, "Cold Mills for Stainless Steel", AISE Year Book, pp.467~480.
- (2) Gunawardene, G.W.D.X. et al., 1981, "Static Model for Sendzimir Cold Rolling Mill", Metals Technology, pp.274~283.

- (3) Mizuta, A. et al., 1982, "Analysis of Roll Deflection in a Twenty-High Mill", J. Japan Society for Tech. of Plasticity, Vol.23, No.163, pp.1245~1252.
- (4) Matsuda, T. et al., 1987, "An Analysis of Roll Deformation of Sendzimir Mill", Proc. 4th Intl. Steel Rolling Conf., Vol.2, pp.E.39.
- (5) Yamamoto, H. et al., 1988, "Simulation of the Shape Controllability of Strip Rolled by a Cluster Mill", J. Japan Society for Tech. Plasticity, Vol.29, No.327, pp.374~382.
- (6) Shoet, K.N. et al., 1986, "Roll Bending Methods of Crown Control in 4-High Mill", J. Iron and Steel Inst., 206.
- (7) Stone, M.D. et al., 1965, "Instant Crown Control in Rolling Mills", J. Iron and Steel Engineer, pp.73~83.
- (8) Hattoril, S. et al., 1984, "Effects of Roll Arrangements and Roll Sizes on Shape Controllability of Cluster Mills", Advanced Technology of Plasticity, Vol.2, pp.1230~1235.
- (9) Bland, D.R. and Ford, H., 1948, "The Calculation of Roll Force and Torque in Cold Strip Rolling with Tensions", Proc. Inst. Mech. Eng. Vol. 159, pp. 144~153.
- (10) 板壓延의 理論과 實際, 1983, 일본철강협회, pp. 92~94.

부 록

롤 축심변위의 영향계수

Fig. 15에 보인 바와 같이 j 구간에서의 선형하중 $(1/2(P_{j+} + P_{j+1}))$ 은 균일 분포하중 $P_j W_j$ 와 비균일 분포하중 $1/2(P_{j+1} - P_j) W_j$ 와 같이 구성되어 있다. j 구간에 하중이 작용할 때 임의의 i 위치에서의 변위는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_{ij} &= f_{1ij} q_j W_j + f_{2ij} \frac{1}{2} (q_{j+1} - q_j) W_j \\ &= (f_{1ij} - \frac{1}{2} f_{2ij}) q_j W_j + \frac{1}{2} f_{2ij} q_{j+1} W_j \end{aligned}$$

여기서 f_{1ij} 는 균일분포하중에 의한 계수이고 f_{2ij} 는 비균일분포하중에 의한 계수이며 식(1)과 비교하면

$$a_{1ij} = f_{1ij} - \frac{1}{2} f_{2ij}$$

$$a_{2ij} = \frac{1}{2} f_{2ij}$$

Singularity function을 이용한 보의 굽힘 변형해석을 이용하여 굽힘 및 전단력에 의한 굽힘을 고려하