

# 후판 압연에서 작업롤 초기 크라운 설정

Establishment of Initial Work Roll Crown in Finishing Plate Mill

김 종택\*, 서 재형\*, 정 병환\*\*

\* POSCO 기술연구소 시스템연구팀

\*\* 포항제철 후판부

## ABSTRACT

To find a way for establishing work roll initial crown according to roll conditions, computer simulation for predicting plate crown in plate mill is done and effects of roll conditions on plate crown is analysed. Roll gap profile and plate crown are measured to be compared to the calculated values. As a result, a regression equation to establish work roll initial crown according to roll conditions such as backup roll diameter, backup roll crown and work roll crown is obtained.

Key Words : Finishing Plate Mill(후판 사상압연기), Work Roll(작업롤), Plate Crown(판 크라운), Backup Roll(보강롤), Initial Crown(초기 크라운)

## 1. 서론

후판 제조공정은 크게 나누어 가열로, 조압연기(roughing mill) 및 사상압연기(finishing mill) 등으로 구성되어 있다. 슬라브(slab)를 가열로에서 필요 온도로 가열하고 가열된 슬라브를 조압연기에서 중간 두께까지 압연한 후, 사상압연기에서 다시 목표 두께까지 가역압연(reverse rolling)하여 후판(plate)으로 제조하게 된다. 사상압연기는 4단(4-high)롤로 구성되어 있고 1셋트의 작업롤을 이용하여 강종, 판 사이즈 및 패스(pass)수 등이 다양한 압연작업을 수행하게 된다.

일반적으로 압연작업시 압연조건이 동일할지라도 보강롤(backup roll, BUR) 직경, 보강롤 크라운(crown), 작업롤(work roll, WR) 직경 등의 롤조건이 다르면 롤 탄성변형에 차이가 발생하기 때문에, 압연된 판의 판크라운 역시 달라지게 된다. 후판 사상압연에서는 이러한 차이를 보강롤 직경, 크라운 및 작업롤 직경에 대응하여 작업롤의 초기 크라운을 변경시켜 보상하므로써 동일 압연조건에서는 동일한 압연판 크라운이 얻어지도록 하고 있다. 작업롤의 초기 크라운(initial crown)은 롤연마시에 결정되며 압연작업

시 및 제품 품질에도 크게 영향을 미치는 중요한 요소이다. 즉, 작업롤의 초기 크라운이 너무 크게 설정되면 압연작업 중 판의 중앙부가 크게 연신되고, 너무 작게 설정되면 판의 엣지(edge)부가 과대 연신되어 압연판의 평탄도가 불량하게 된다.<sup>1), 2)</sup> 또한 이와같은 원인에 의해 압연 패스 수를 임의로 작업자가 변경시키게 되어 작업성에 영향을 미치는 경우도 있다. 작업롤의 초기 크라운 결정은 지금까지 작업자의 오랜 경험에 의해 롤의 직경 및 크라운에 따라 결정되어 왔으나 실제 경험이 없는 작업영역 등에서는 부정확한 설정치를 보여왔다. 근래 압연기의 롤 탄성변형 해석에 관한 여러가지 연구가 진행되어<sup>3), 4)</sup>, 압연판 자체의 형상 및 크라운에 대한 분석은 많았지만 압연기 작업롤의 초기 크라운 결정에 관한 검토는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 후판 사상 압연기의 롤 탄성변형 해석을 통하여 롤의 직경 및 크라운이 롤 변형(판 크라운)에 미치는 영향을 분석하였고, 롤갭 측정실험 및 판크라운 측정을 통하여 롤 탄성변형 해석의 정도를 확인하였으며, 압연기의 롤조건(보강롤 직경, 작업롤 직경, 보강롤 크라운)에 따라, 적정 작업롤 초기 크라운을 설정할 수 있는 방안을 제시하였다.

## 2. 연구 내용

### 2.1 후판 사상 압연기 개요

Fig.1에 후판 사상압연기의 개략도를 보였다. WR의 길이가 BUR의 길이보다 약간 길게 구성되어 있고, BUR 엣지부와 WR과의 접촉점에서 발생하는 집중하중을 방지하기 위해 테이퍼를 부여하도록 구성되어 있다. 또한 롤갭에 압연재가 없는 경우 상부 롤이 떨어지는 것을 방지하고 롤의 안정을 유지하기 위해 힘(balance력) J를 항상 가하도록 되어 있으며, 압연시 탄성적인 롤굽힘에 의해 판 중앙부보다 엣지(edge)부가 많이 압연되는 것을 보정하기 위해 일정량의 2차 곡선 형태인 롤크라운을 부여하고 있다 (Fig. 2 참조). 그리고, 후판에 있어서 압연판 크라운(crown)에 대한 정의는 판폭 중앙의 두께 (Hc)와 판 엣지부로부터 100 mm 떨어진 지점에서의 판두께 (He)의 편차 (즉, 판 크라운 = Hc - He)로 정의하여 사용하였다.

### 2.2 롤갭 프로파일(roll gap profile)의 측정 방법

압연기 상.하 WR의 폭방향 롤갭 분포를 측정하기 위해 롤갭 측정용 치구를 제작하였다. 롤갭 프로파일 측정 치구는 Fig. 3과 같이 사다리 모양의 양쪽 supporter에 직경 15 mm의 납봉을 폭방향 200 mm 간격으로 체결하여 제작하였다.

압연기의 롤 탄성변형에 의한 롤갭 변화량의 측정은 다음과 같은 순서로 진행하였고 측정시의 작업 및 롤 사양은 Table 1과 같다.

- 상.하 작업롤을 연마하고 이 작업롤의 폭방향 직경분포를 직경측정기를 이용, 100 mm 간격으로 측정하여 롤의 초기 크라운 산출하였다.

- 상.하 작업롤을 압연기에 조립하여 WR balance력을 가하였다.

- 롤갭 open후 롤갭 측정치구를 WR 사이에 넣고 일정량 압하(롤갭 close)를 가하였다.(압하력 측정)

- 롤갭 open후 측정치구를 꺼내어 압하가 가해진 각 위치의 납봉 두께를 마이크로미터를 이용 측정하여 납봉의 두께차이를 롤갭 프로파일로 취하였다.

### 2.3 4단 압연기 롤 탄성변형 해석<sup>10)-12)</sup>

4단 압연기의 롤 탄성변형은 BUR 축의 굽힘, WR 축의 굽힘, BUR와 WR 접촉부의 탄성변형(편평변형), 압연재와의 접촉에 의한 WR의 편평변형 등으로 구성된다.

롤 탄성변형 해석에는 Fig.4 와 같은 분할모델을 이용하여, 좌.우대칭을 고려 하였고, 압연 길이 방향의 롤 변형은 무시하였다.

또한, 압연 롤의 분할시 분할 간격을 필요에 따라 조절 가능하도록 하였으며, WR의 기준점은 WR의 balance력이 가해지는 지점인  $O_w$ , BUR의 기준점은 압연하중이 가해지는 지점인,  $O_b$  로 취하였다. 해석에 이용한 수식을 정리하면 다음과 같다.

#### (가) 힘의 평형 방정식(WR)

$$\sum_{j=1}^{N_{WB}} R(j) \cdot DWB(j) - \sum_{k=1}^{N_w} P(k) \cdot DW(k) = J \quad \dots(1)$$

여기서,

k : WR 분할 구역 번호

j : WR/BUR 접촉영역에서 분할구역 번호

R(j) : WR/BUR간 작용되는 단위폭당 접촉선압(kg/mm)

P(k) : 압연재로부터 WR에 걸리는 단위폭당 선압

$P_c$  : 압연하중

DWB(j) : WR/BUR 접촉영역에서 분할구간 번호 j의 분할폭

DW(k) : WR 분할구간번호 k의 분할폭

J : WR balance력

#### (나) 롤 축중심 변위의 계산

- WR의 축중심 변위

$$Y_w(i) = - \sum_{j=1}^{N_{WB}} R(j) \cdot DWB(j) \cdot \alpha_{w2}(i, j) + \sum_{k=1}^{N_w} P(k) \cdot DW(k) \cdot \alpha_{w1}(i, k) \quad \dots(2)$$

- BUR의 축중심 변위

$$Y_b(i) = \sum_{j=1}^{N_{WB}} R(j) \cdot DWB(j) \cdot \alpha_b(i, j) \quad \dots(3)$$

여기서,

$Y_b(i), Y_w(i)$  : BUR, WR의 축심변위

$\alpha_{w1}(i, k), \alpha_{w2}(i, j)$  : WR 축심변위의 영향계수

$\alpha_b(i, j)$  : BUR 축심변위의 영향계수

#### (다) WR/BUR간 접촉부 변위의 적합조건

$$Y_b(i) - Y_w(i) + \Delta Y_{BW} + R(i) / K_1 = - \{R_{cw}(i) + R_{cb}(i)\} / 2 \quad \dots(4)$$

여기서,

$K_1$  : WR/BUR간 스프링 상수

$R_{cw}(i), R_{cb}(i)$  : 직경당 롤 초기 크라운, convex

크라운의 경우 양의 값으로 취하였다.

$\Delta Y_{BW}$  : WR, BUR의  $O_w, O_b$  점의 상대 변위

(라) 폭방향 입연판 두께 프로파일

$$H(i) = H(c) + (Y_w(i) - Y_w(c) + W_s(i) - W_s(c)) * 2.0 - R_{cw}(i) + R_{cw}(c) \quad \dots (5)$$

여기서,

- H(i) : 분할구간 i에서의 판 두께
- H(c) : 판 중앙에서의 판 두께
- Y\_w(c) : 롤 중앙부에서의 WR 축중심 변형량
- W\_s(i) : 분할구간 i에서 판과의 접촉에 의한 WR의 편평 변형량
- W\_s(c) : 판 중앙부에서의 WR 편평 변형량
- R\_{cw}(c) : 롤 중앙부에서의 롤 크라운 량

#### 2.4 컴퓨터 시뮬레이션

식 (1), (4)에서 방정식의 수는,  $N_{WB} + 1$  개 이고 미지수는  $R(i) N_{WB}$  개,  $\Delta Y_{BW}$  1개 등  $N_{WB} + 1$  개로 되어 연립방정식을 행렬로 처리하고 방정식 전체에 대해 조립하여 압연판 폭방향 판프로파일 계산을 위한 프로그램을 작성하였다. 축심변위 영향계수는 양단지지도에 대한 치질식을 이용하였고 롤간 스프링 상수는 Foppel식을 그리고 WR 편평식은 Tozawa식을 이용하였다. 시뮬레이션 프로그램은 압연재의 폭, 두께 등의 소재조건, 압하율 장력 등의 운전조건, 롤 사이즈 등의 설비조건 등을 입력할 수 있는 입력과, 압연하중의 계산, 영향계수의 계산, 매트릭스의 조합 및 계산, 접촉조건의 처리, 출력처리 등으로 구성되어 있다. 계산 방법은 먼저 출측 목표 두께에 따라 각 폭방향 위치에서의 압연하중식을 이용 계산하고, 각 롤의 축심변위 영향계수를 계산한 후, 연립방정식을 풀어  $R(i)$  및  $\Delta Y_{BW}$  를 구하였다. 연립방정식은 gaussian elimination 방법을 이용하였고, 구해진  $R(i)$ 에 의해 WR 및 BUR의 축심변위를 구할 수 있고 판과 접하는 WR의 편평변위를 계산할 수 있다. 계산도중 발생하는 롤간 비접촉 문제는 접촉하중을 0으로 하고 행렬을 재구성하여 계산하였다. 이 때 압연기의 롤 변형과 압연재의 폭방향 변형이 적합하는 조건을 구할 필요가 있는데, 여기서는 반복계산에 의해 양자의 적합조건을 구하였다. Fig. 5는 계산 순서를 보인 것이다.

롤 탄성변형 해석 프로그램의 정도확인용 위해 롤갭 프로파일 측정치와 계산치를 비교하였고, Table 2의 압연조건을 선택하여 실제 압연된 판크라운을 감마선 두께 측정기를 이용하여 측정하고 이를 계산치와 비교하여 프로그램의 정도를 확인하였다. 또한, WR직경, WR크라운, BUR 직경 및 BUR 크라운 등의 롤조건이 압연판 크라운에 미치는 영향을 분석하였다.

#### 2.6 WR 초기 크라운 설정

WR 초기 크라운 설정 방법은 롤 조건이 변함에 의해 발생하는 판 크라운의 변화를 WR 초기 크라운을 통해 보상하는 방식을 택하였다. 즉 주어진 압연조건(Table 2)을 취하여 롤 조건(WR직경, BUR 직경 및 BUR 크라운)을 조합 가능한 전범위에 대해 변화시키면서, 항상 동일한 판 크라운이 생성되도록 하는 WR 초기 크라운량을 계산하였다. 이 계산 데이터를 이용 롤 조건 변화에 대응해 압연기 연마시에 결정해야할 WR 초기 크라운량 계산용 회귀수식을 얻었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 롤갭 프로파일 측정결과 및 계산치와의 비교

Fig. 6은 Table 1의 조건하에서 롤갭 프로파일 측정치와 시뮬레이션 프로그램을 이용한 계산치의 비교를 보인 것으로, 판폭 중앙부가 엷지부에 비해 롤갭이 좁은 형태를 나타내고 있다. 초기 WR 크라운이 직경당 0.45 mm 엷지만, 압연기에 WR을 체결한 후 WR balance력 및 님봉 압연에 의한 압하력 등의 작용으로 롤갭 변화가 약 1 mm 이상 발생하였고, 계산치와 측정치는 양호하게 일치하고 있다. 또한, 기준 압연 조건(Table 2)에 대한 실제 압연된 판크라운 측정치는 0.267 mm 였고 시뮬레이션 프로그램을 이용한 계산치는 0.260 mm로 역시 실제 압연에 대한 계산정도도 양호함을 확인하였다.

#### 3.2 롤 조건이 압연판 크라운 변화에 미치는 영향

Fig. 7은 Table 2의 조건하에서 BUR 직경만을 변화시킨 경우 압연판의 크라운 변화를 보인 것으로 직경이 증가하면 판 크라운이 감소하는 것을 보여주고 있다. 이는 동일 압연조건하에서 BUR 직경이 증가하면 BUR의 강성이 증가하고 이에 의해 BUR의 굽힘이 감소하게 된다. BUR 굽힘이 감소하면 롤 중앙부에서 BUR/WR 간 접촉하중이 증가하고, 이 증가량에 의해 WR 중앙부 굽힘이 감소된다. 따라서 압연판의 크라운은 감소하게 되는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 Table 2의 조건하에서 BUR 크라운만을 변화시키면서 계산한 판폭방향 두께 프로파일을 나타낸 것으로, BUR 크라운이 증가하면 압연판의 크라운은 감소하게 됨을 보여주고 있다. 이는 동일 압연조건하에서 BUR 크라운이 증가하면 BUR/WR간 접촉압력이 롤중앙부에서 증가하게 되고, 이에의해 압연판의 크라운은 감소하게 되는 것으로 판

단된다.

### 3.3 WR 초기 크라운 결정

Table 3은 BUR직경 2000mm, WR직경 1600mm 인 조건에 대해 BUR의 크라운을 변화시킨 경우 보상해야할 WR 초기 크라운 값을 계산한 것이다. 3.2항에서 보이는 바와같이 BUR 크라운이 증가하게 되면 압연 판크라운은 감소하는 경향을 보이기 때문에 이를 보상하는 WR 초기 크라운은 감소하게 된다. 이와 같은 방법으로 사용가능 롤 모든 롤 조건(BUR 직경, WR직경, BUR크라운)에 대한 WR 초기 크라운 보상값을 계산하였고 이 데이터를 근거로 식 (6)과 같은 WR초기 크라운 결정용 수식을 작성하였다.

$$R_{CW}(c) = \begin{matrix} A_1 \times \ln(D_B) & + & B_1 \times \ln(D_W) \\ + & C_1 \times \ln(C_B) & + & A_2 \times \ln(1/D_B) \\ + & B_2 \times \ln(1/D_W) & + & C_2 \times \ln(1/C_B) \\ + & A_3 \times (1/D_B)^2 & + & B_3 \times (1/D_W)^2 \\ + & C_3 \times (1/C_B)^2 & & \end{matrix} \dots (6)$$

여기서,

- $R_{CW}(c)$  : WR 설정 Crown
- $D_B$  : BUR 직경(mm)
- $D_W$  : WR 직경(mm)
- $C_B$  : BUR Crown(mm)
- $A_1 \sim A_3$  : 회귀계수
- $M$  : Intercept

## 4. 결 론

후판 사상압연기의 작업롤 초기 크라운 설정을 위한 이론해석 및 실험을 통해 다음의 결론을 얻었다.

1) 4단 압연기 롤 탄성변형 해석 프로그램에 의한 물값 예측치는 실험결과와 양호하게 일치하였다.

2) BUR직경, BUR 크라운 및 WR 직경이 증가하면 압연판의 판 크라운은 감소하게 되므로 작업롤 크라운을 감소시키는 방향으로 보상하여야 한다.

3) 롤 조건( BUR 직경, BUR 크라운, WR 직경) 등의 변화에 대응하여 실조업에서 사용 가능한 WR 초기 크라운 결정 수식을 작성하였다.

## 5. 참고문헌

- (1) 日本塑性加工學會, 1993, "板壓延(塑性加工技術 시리즈 7)", corona社, 日本, pp.13 - 23
- (2) 金 鐘澤 外, 1993, "젠지미어 압연기에서 Quarter Wave 방지", 대한기계학회 논문집, 제17권, 제2호, pp257 - 266
- (3) 이 영호 外, 1989, "젠지미어 압연기 롤 변형해석", 대한기계학회, Vol. 14, No. 6, pp. 1689 -1699
- (4) 河野 外, 1975, "로우 비데칭 압연의 롤 변형식", 제26회 소성가공연합강연회, p.49
- (5) A. Mizuta 外, 1987, "다단압연기의 형상제어 특성", 소성가공, Vol. 28, No. 321, pp. 1042 - 1047
- (6) 松下 哲 外, 1981, "20단 젠지미어 압연기의 롤 변형 해석(제2보)", 제32회 소성가공연합강연회, pp. 169 - 172
- (7) 松下 哲 外, 1985, "20단 젠지미어 압연기의 롤 변형 해석(제3보)", 제32회 소성가공연합강연회, pp. 121 - 124
- (8) 小川 茂 外, 1991, "Cluster 압연기의 간이형상해석 모델의 도출", 제42회 소성가공연합강연회, pp. 481 - 484
- (9) HARA K, et al, 1991, "Shape Controllability for Quarter Buckles of Strip in 20-high Sendzimir Mills", ISIJ, Vol.31, No.6, pp.607-613
- (10) 일본철강협회, 1983, "판압연의 이론과 실제", pp.89 - 95
- (11) Shohet K.N. et al, 1968, "Roll Bending Methods of Crown Control in Four-High Plate Mills", JISI, Vol. 11, p. 1088
- (12) 戶澤 外, 1970, "Roll의 변형과 압연분포에 미치는 롤 크라운의 영향", 소성가공, Vol. 16, No. 171, pp. 345 - 351

Table 1 Conditions for measuring roll gap profile

Dia. of BUR (mm)	2000
Dia. of WR (mm)	1000
Length of BUR barrel(mm)	4598
Length of WR barrel(mm)	4724
Value of $L_4$ (mm)	5918
Value of $L_5$ (mm)	5918
Crown of BUR (mm)	0.3
Crown of WR (mm)	0.45
Force for balance ton/chock	200

Table 2 Rolling Conditions for calculating plate crown

Dia. of BUR (mm)	1900
Dia. of WR (mm)	1020
Crown of BUR (mm)	0.35
Crown of WR (mm)	0.40
Plate width(mm)	2500
Plate thickness of entry side	27.0
Plate thickness of exit side	22.0

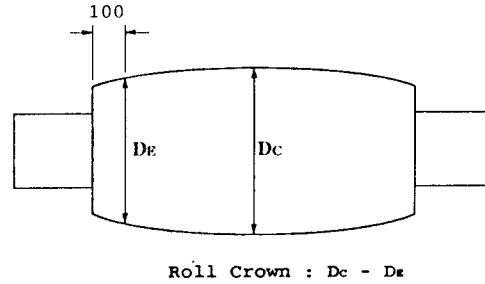


Fig.2 Definition of roll crown

Table 3 Example for calculated WR initial crowns

(Unit : mm)

BUR Dia.	WR Dia.	BUR crown	WR initial crown
2000.0	1060.0	0.200	0.360
		0.230	0.360
		0.260	0.340
		0.290	0.320
		0.320	0.320
		0.350	0.300
		0.380	0.280
		0.410	0.260
		0.440	0.260
		0.470	0.240
		0.500	0.220

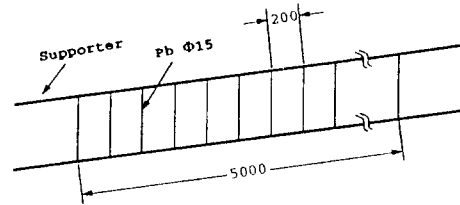


Fig.3 Apparatus for measuring roll gap profile

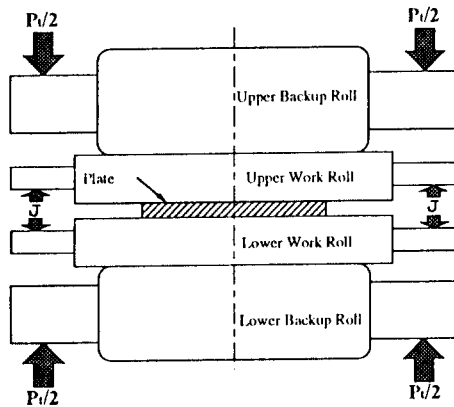


Fig.1 Structure of 4-high mill

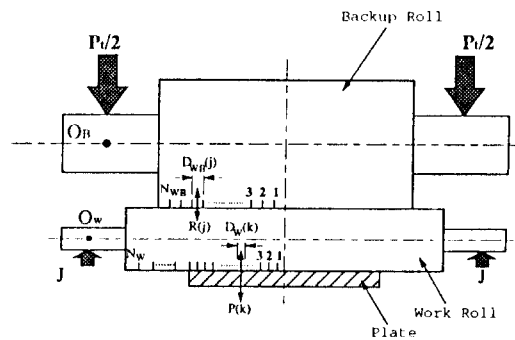


Fig.4 Analysis model of 4-high mill

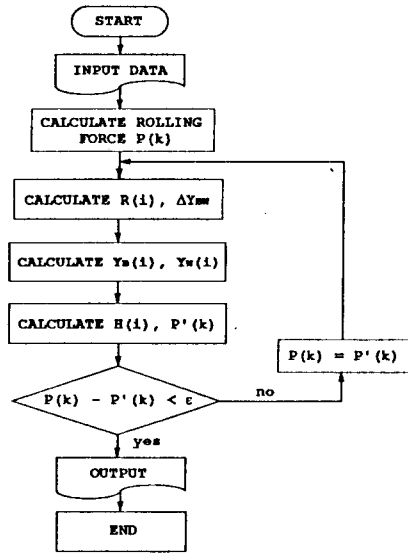


Fig.5 Flow chart for calculating plate thickness profile

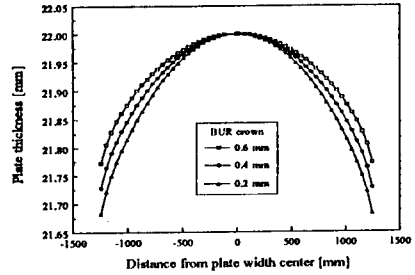


Fig.8 Effect of BUR crown on plate thickness

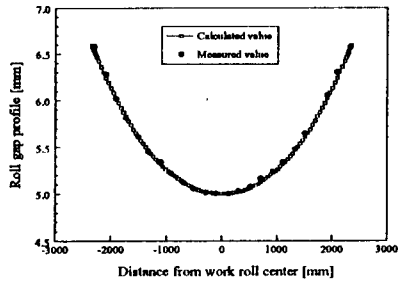


Fig.6 Comparison between calculated and measured roll gap

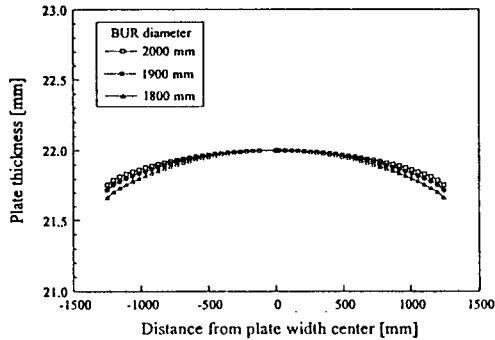


Fig.7 Effect of BUR diameter on plate thickness