

열간사상압연기에서의 열 및 마멸크라운에
관한 연구

박 해두*, 김 진욱**, 최 재찬***, 백 남주***

A Model for Thermal and Wear Crown
at the Hot Strip Roll Mill

Hae-Doo Park, Jin-Wook, Kim, Jai-Chan, Choi, Nam-Joo, Baek

Abstract

A model predicting thermal and wear crown in order to control strip crown and shape has been investigated at the hot roll mill. A basic equation of predicting wear crown was obtained experimentally whereas thermal crown was approximately analyzed by the integral method.

The calculated result based on the accumulative model of basic equation coincides with that measured under the real rolling conditions.

The effect of wear crown is also analyzed by the longitudinal feeding method of the work roll. The high frequency feeding method is recommended in removing local wear effectively.

기호설명

C_r : 마모계수 R : 반경 u : 열팽창량 θ_m : 평균온도 W_c : 중앙마모량 D : 롤직경 B : 판폭 P : 압연하중
 L : 압연길이 w : 마멸량 n : 압연매수 l_d : 접촉투영길이 N : 접촉회수 H : 냉각계수 K : 열전도율 C : 비열,
크라운량 γ : 비중 q : 발열량 l_r : 침투길이 T : 온도

* 산업과학기술연구소

** 부산대학교 대학원

*** 부산대학교

1. 서론

판재의 압연에 있어서 판크라운 및 평탄도는 판두께와 마찬가지로 제품의 품질과 자체의 공정실수율등에 크게 영향을 미칠 뿐만 아니라 또 다음 공정의 실수율에도 크게 영향을 미치기 때문에 이들을 제어하는 기술이 매우 중요하며 압연의 최신설비화 및 자동화 기술과 함께 최근 급속도로 발달되고 있다.

열연 판크라운으로 영향을 미치는 요인은 물의 탄성 변형, 열크라운 및 마멸크라운으로 크게 구분된다. 물 탄성변형은 압연력, 물굽힘력, 물의 재질등에 영향의 받을 뿐 아니라 압연조건, 소재조건, 설비조건 등에 따라서도 달라진다.

압연조건은 연속압연기의 압하 스케줄 및 압연속도이고, 소재조건은 판폭, 판두께, 강종 및 소재의 온도이며, 설비조건은 압연기의 구성 및 물의 초기 크라운 등이다.

판재를 압연할 때 물은 소재를 가공하는 물의 윤곽선과 마멸 및 열크라운양을 합한 값으로 소재에 작용하는데, 이 마멸 및 열크라운양이 압연작업량 및 작업조건에 따라 점차적으로 변화되므로 이들 마멸 및 열크라운양의 예측모델이 필요하게 된다.^{3) 4)}

열연 공장은 임의 스케줄 압연을 위해 연속압연기 7개 스탠드중에서 4번스탠드에서 7번스탠드까지 작업물 이송압연기를 대상으로 한다.

물 단위의 편성은 압연 중의 물 국부마멸의 현상을 극복하기 위한 것으로 소재폭을 큰 것으로부터 점차 작은 순으로 작업한다는 원칙을 적용하는데, 이때 국부적인 마멸현상을 물의 등장 전체에 분산시킬 수 있도록 작업물을 소재의 폭방향으로 점진적으로 이송시키는 방법을 채용함으로써 동일 폭압연량을 증가시킬 뿐만 아니라 소폭작업이 가능하게 된다.¹⁾ 이러한 모든 작업이 전산기에 의해 자동으로 설정되기 위해서는 열 및 마멸크라운의 예측이 필요하며 여러가지 압연조건 및 상태에 따라 열 및 마모크라운을 온라인상에서 간단히 구할 수 있는 예측 계산식이 도입될 수 있다.

본 연구에서 대표적인 압연조건에 따른 열 및 마모크라운량을 실측하였으며 실측치를 기준으로하여 범용성이 있는 예측치를 구성하였다. 그리고 예측모델을 이용하여 작업물 이송압연기에서의 이송효과를 분석하

기 위해 이송방식 3가지를 가정하여 물 윤곽선의 변화량을 전산기로 모사하여 추적하였고 최적의 이송방식을 설정하는 방법에 관하여 검토하였다.

2. 이론적 고찰

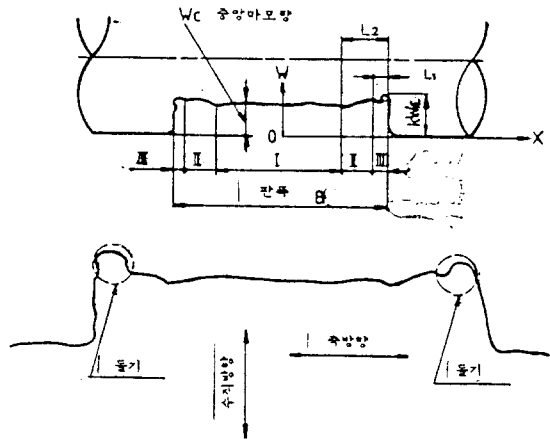
2.1 작업물 마멸 예측 모델

1) 마멸식의 구성

마멸에 의한 작업물 윤곽선의 경사변화를 예측하기 위한 마멸 예측식은 지금까지 몇가지 실험식들이 제안되고 있다. 이러한 실험식에 조업에서 측정된 마멸량 분포를 도입하여 보완하면 거시적인 예측 모델식이 구성될 수 있다. 작업물의 마멸량 W 는 압연압력, 압연재와의 상대 미끄럼, 마찰계수, 물재질등 다수의 인자에 의해 영향을 받는다. 그러나 이들 인자를 모두 고려한 마멸량의 예측식은 복잡하기 때문에, 여기서는 압연하중 P , 압연길이 L , 판폭 B , 접촉투영길이 l_w , 작업물의 한 점이 소재와 접촉되는 회수 $N_c = L/(\pi D_w)$, 물직경 D_w 의 영향이 고려된 다음식을 기준으로 하였다.²⁾

$$W_c \propto \frac{P}{B l_a} N_c = C_f \frac{L}{B l_a} \frac{L}{\pi D_w} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 C_f 는 물재질, 상대미끄럼상태, 압연온도에 의해 정해지며, 각 스탠드별로 실험에 의해 결정될 수 있는 마멸계수이다.



<그림 1> 기본 마멸윤곽선

2) 마멸 윤곽선의 기본형태

작업률에 발생하는 마멸윤곽선은 사다리꼴을 이루며 그림1.에 나타난 것과 같이 판이 접촉되는 영역의 단부에서의 마멸량이 크게되는 경우가 많다.

소재 1매를 압연하였을때 형성되는 마멸형태를 기본으로 할 때 마멸윤곽선의 기본형을 판 단부에서의 돌기 형상을 고려하기 위해 그림1과 같이 I, II, III이 영역으로 구성될 수 있다.

- a)영역 I : 동일량 만큼 마멸된 영역으로 판폭 중앙부에 존재한다. 이 영역은 판폭 전역의 대부분을 점유하고 있다.
- b)영역 II : 판폭의 영향이 완화된 부분으로, 영역 I의 연속선상에서 외곽으로 갈수록 직선적으로 증가한다.
- c)영역 III : 이부분에는 판 단부의 영향을 받아 마멸량이 가장 큰 지점이다. 판폭변동 및 판의 횡진동에 의존되며 영역 내에서는 동일량으로하여 취급한다.

이들 영역에 있어서 마멸량 W 은, 마멸 윤곽선 함수 $W_p(x)$ 을 이용하여, 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$W = W_c \quad W_p(x) \dots\dots\dots (2)$$

여기서

$$W_p(x) \begin{cases} 1.0 \dots\dots\dots \text{영역 I} \\ \frac{k-1}{l_2-1} \left\{ \pm x - \left(\frac{B}{2} l_2 \right) \right\} + 1 \dots\dots\dots \text{영역 II} \\ k \dots\dots\dots \text{영역 III} \\ 0 \dots\dots\dots \text{나머지 영역} \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

단, B은 판폭, k는 영역 I의 마멸량 W에 대한 증가도를 나타낸 계수, l_1, l_2 판폭의 영향을 받는 영역의 길이이다. 이러한 계수들은 실측된 마멸 윤곽선에 의해 결정될 수 있다. 작업률을 이송시키는 경우에는, x를 $x+S$ (S: 이송량)으로 치환하면 된다.

3)누적 마멸 윤곽선 예측 모델

소재를 n매까지 압연할 때의 마멸 윤곽선 W는, 기본 마멸 윤곽선의 총합으로 표현할 수 있으며, 다음식으로 주어진다.

$$W (= W_u / W_L) = \frac{C_{rU} \sum_{i=1}^n \frac{P_i l_i}{B_i l_{di}} W_p^U(x)}{C_{rL} \sum_{i=1}^n \frac{P_i l_i}{B_i l_{di}} W_p^L(x)} \dots\dots\dots (4)$$

이상 서술한 마멸 윤곽선 예측 모델에서 미지계수 C_r, K_w, l_1, l_2 는 실측값들에 의해 결정된다.

4)계수의 결정법

마모계수 C_r 는, 변수 α 와 $\sum_{i=1}^n P_i L_i / (B_i \pi D_i)$ 와 판폭의 중앙 영역의 마모량 W_c 와의 관계에 의해 결정한다. 실측값에 의하면, α 와 W_c 의 사이에는 선형관계가 각각 성립하고, 그러므로 C_r 은 그 기울기로 주어진다.

한편, 마멸 윤곽선에 관한 계수 K_w, l_1, l_2 들은 작업률을 이송하지 않는 방식으로 한단위 압연을 완료했을 때 측정된 마모 윤곽선으로부터 결정한다.

그리고, 압연재와 롤간의 윤활상태, 상대 미끄럼등은, 각 스탠드마다 다르므로 계수도 스탠드 별로 결정하지 않으면 안된다.

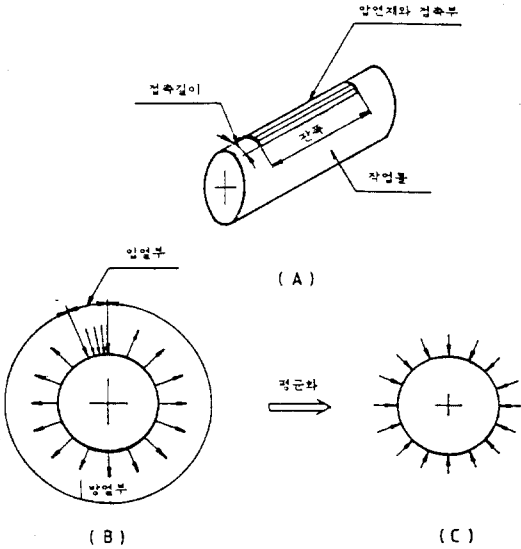
2.2 열 크라운 예측 모델

열간 압연에 있어서, 압연재의 현열, 가공열 및 압연재의 마찰 열등에 의해 작업률은 열 팽창된다. 이 열팽창의 윤곽선을 열 크라운이라고 한다. 열 크라운의 예측은 해석적 방법외에 수치 해법에 의한 계산예가 많이 보고되어 있으나, 비교적 복잡한 과정이 수반된다.^{5), 6)}

본 논문에서는 열팽창 윤곽선의 예측을 위해서 실제 현상을 단순 모델화하여, 해석적 근사법이라할 수 있는 적분법⁷⁾을 통하여 접근하였다.

1)해석방침

작업률은 그림 2의 (A)에 표시한 바와 같이 압연재와 접촉 면에서 입열되고, 나머지 영역에서 방열되면서 회전하고 있다. 이 작업률의 축방향 횡단면을 주목해서 보면, 표면에서는 그림 (B)에 나타난 것같이 비축대칭의 열적분포로 되어있다. 그러나 작업률은 고속 회전하고 있기 때문에 극한 표층을 제외한 내부에서의 온도 분포는 축대칭으로 간주될 수 있다.



〈그림 2〉 열적조건의 축대칭화

이 점을 고려하여 일반적으로 열팽창 계산은 축대칭 문제로 하여 취급한다. 그런데 이 경우에도 이 해법은 복잡하게 되어서 실용적이라고 말하기 곤란하다.

본 연구에서는 열팽창량에 대한 온도 매개변수를 도입하여 평균온도를 구하고, 이 평균온도의 축 방향 분포로부터 그것에 대응한 열 팽창 윤곽선을 구하였다.

2) 기본 예측식

작업 물의 열팽창은 압연 동안의 소재와의 접촉 전 열 및 가공 발열에 의한 가열과 소재간의 압연 간격에 따른 압연 정지시간 동안의 냉각이 반복되므로 작업 방식에 따라 열 팽창의 절대량 및 분포가 변화된다.

이 가열과 냉각의 반복조건을 고려하기 전에 기본적으로 1회의 가열과 냉각에 의해서 생기는 열팽창 분포를 기본 예측식으로 구성한다.

(열 팽창과 평균온도)

그림 3. 에 나타낸 물 반경 R의 단면에 대하여, 반경 방향의 온도 분포를 θ 라 하면, 축대칭 평면 변형률 조건 하에서 원주 표면의 열팽창 u 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{2\alpha}{R} \int_0^R \theta \, dr \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서 α 는 선 팽창 계수이다. 따라서 평균온도

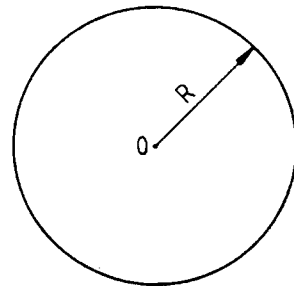
분포 θ^m 에 대하여

$$\theta^m = \frac{2}{R^2} \int_0^R \theta(r) \, dr \quad \dots\dots\dots (6)$$

을 이용하면 (5)식의 u 는 다음과 같이 된다.

$$u = \alpha R \theta^m \quad \dots\dots\dots (7)$$

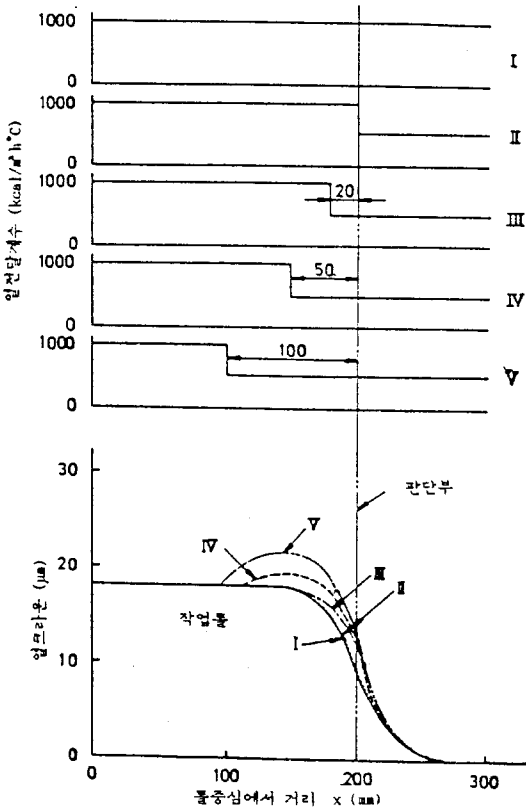
이때, 축방향에서의 탄성적 구속을 무시하기 위해 (7)식에서 열 크라운은 매우 빠르게 형성되는 것으로 가정되었다.



〈그림 3〉 온도 모델

(냉각계수와 열팽창량)

평균온도가 축방향 분포를 예측하기 위한 모델을 도입하기 위하여, 냉각계수의 축 방향 분포 및 열팽창량 분포를 유한요소법⁶⁾을 이용하여 구한 결과 그림4. 와 같았다.

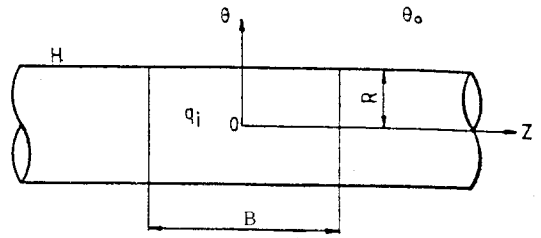


〈그림 4〉 열전달계수 방식에 따른 열팽창 윤곽선 변화

이에 의하면 입열내부의 냉각계수를 변환시키면 열 팽창량분포가 크게 변하는 것을 알 수 있고, 입열부의 외부의 열전달 계수가 변하면 열 팽창량 분포에 대한 영향은 적은 것을 알 수 있다. 본 연구에서는, 경우 I 과 II와의 차이가 적은 것으로 평균온도 모델은 I 의 방식을 채용한다.

(압연시 모델 열 팽창량분포)

그림5.은 평균 온도 모델을 나나낸다. 이 때 반경 R, 축방향으로 무한히 긴 원주를 따라서 온도는 반경 방향으로 동일하고, 축방향x의 함수로 가정한다. 여기에서 입열대신에, 판폭 B에 해당하는 내부발생열을 가지고 온도 θ_0 의 냉매와 냉각계수H로 열교환 하는 것으로 한다.



〈그림 5〉 평균온도 모델

롤의 온도에 대한 기초식은

$$v = \theta - \theta_0 \dots\dots\dots (8)$$

라 하면 다음식으로 나타낸다.

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \begin{cases} \chi \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \nu v + q & (0 \leq x \leq B/2) \\ \chi \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \nu v & (B/2 \leq x) \dots \end{cases} \dots (9)$$

단, 대칭성을 고려하여 $x \geq 0$ 에 대하여만 나타냈다. (9)식의 경계조건 및 초기조건은 다음과 같다.

$$x = 0 \text{ 에서 } v = 0$$

$$t = 0 \text{ 에서 } \theta = \theta_0$$

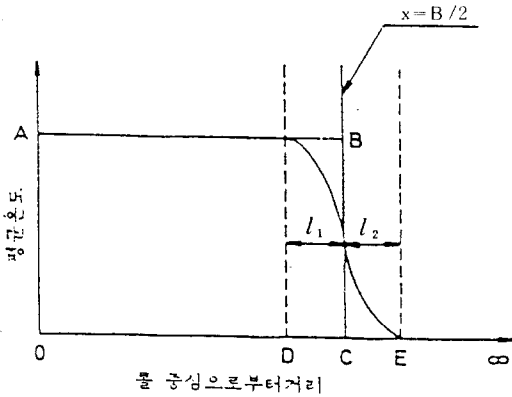
(9)식에서 t는 시간이고 χ , ν 및 q는 다음식으로 정의한다.

$$\left. \begin{aligned} \chi &= \frac{K}{C\gamma} \\ \nu &= \frac{2H}{RC\gamma} \\ q &= \frac{q_i}{C\gamma} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

여기서 K는 열전도율, C는 비열, γ 는 비중, H는 냉각계수, q_i 는 단위 체적당의 발열량으로 된다.

(9)의 해석해를 얻기 위해 그림6.에 나타낸 바와같은 입열부와 방열부와의 경계, 즉 $x=B/2$ 에서 양측으로 향한 침투깊이 개념을 도입한 온도분포를 고려한다.

예로, $x=B/2$ 에서 단열이 되고 열이 아래방향으로 흐르면, 온도 분포는 OABC의 사각형으로 되지만, $x=B/2$ 에서 단열이 되지 않기 때문에 x방향으로 열전도율에 의한 영향이 $x=B/2 - l_1$, $x=B/2 + l_2$ 의 구역에 나타나는 것을 알 수 있다.



〈그림 6〉 침투깊이를 이용한 온도분포

이와같이 취급하면, 온도분포는 O-D, D-C, C-E, E-∞의 4가지 구역으로 나눌 수 있으며, 그 각각에 대하여 다음과 같이 근사적으로 구할 수 있다.

- a) O-D 영역 : 온 θ는 시간에 대한 함수
- b) D-C 영역 :
- c) C-E 영역 : } 온도 분포를 x의 3차식으로 근사
- d) E-∞ 영역 : 온도θ는 θ=θ₀

위의 조건으로 윤곽선 법을 적용하여 (10)식의 해를 구하면 압연시의 온도 분포 θ_R은 다음과 같이 된다.

$$\theta_R = \theta_R^m T_R(x) + \theta_0 \dots\dots\dots (11)$$

여기서 θ_R은 평균온도이며 다음식으로 나타낸다.

$$\theta_R^m = \frac{q}{\nu R} (1 - e^{-\nu R t}) \dots\dots\dots (12)$$

또 온도 분포함수 T_R(x)은 침투 깊이를

$$l_R (=l_1=l_2) = \sqrt{\frac{12x}{e^{\nu t}-1} \left\{ \frac{(e^{2\nu t}-1)}{2\nu} - \frac{2(e^{\nu t}-1)}{\nu} + t \right\}} \dots\dots\dots (13)$$

로 할때

$$T_R(x) = T_R'(x) = \begin{cases} 1 & \dots\dots\dots 0 \leq |x| < B/2 - l_R \\ 1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B}{2l_R} - \frac{|x|}{l_R} \right)^2 & \dots\dots\dots B/2 - l_R \leq |x| \leq B/2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{B}{2l_R} - \frac{|x|}{l_R} \right)^2 & \dots\dots\dots -B/2 \leq |x| \leq B/2 + l_R \\ 0 & \dots\dots\dots B/2 + l_R \leq |x| \end{cases} \quad (14)$$

로 주어진다.
단, l_R > B/2의 경우에는 $\frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{x=0}$ 의해 다음의 해를 중합 시킨다.

$$T_R(x) = T_R'(x) + T_R''(x) = \begin{cases} -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{B}{2l_R} - \frac{x}{l_R} \right)^2 & \dots\dots\dots 0 \leq |x| \leq l_R - B/2 \\ 0 & \dots\dots\dots l_R - B/2 \leq |x| \end{cases} \quad (15)$$

따라서, 압연시의 열팽창 윤곽선 u_R은 (7)식과 (11)로부터, 다음과 같이 나타낼 수 있다.
u_R = α R θ_R^m T_R(x) (16)

(냉각시 열 팽창량 분포)

냉각시의 온도 분포 θ_c에 대해서도, 압연시 모델과 같은 형태의 침투 깊이를 고려한 것을 적용한다. 이 경우, 압연시의 최종 온도 분포 θ_{R1}가 초기치로 되도록 하고, 또한 θ_{R1}에 있어서 침투깊이를 l_{R1}로 한다. 이때 θ_c는 다음 식으로 나타낸다.

$$\theta_c^m = (\theta_{R1} - \theta_0) e^{-\nu(t-t_{R1})} \dots\dots\dots (17)$$

또 온도 분포 함수 T_c(x)는 침투 깊이를

$$l_c (=l_r=l_2) = \sqrt{12\chi(t-t_{R1}) + l_{R1}^2} \dots\dots\dots (18)$$

을 이용하면 (14)식의 l_R 대신 l_c값을 치환한 형태가 된다.

위의 결과로부터 냉각시의 열 팽창 윤곽선 u_c는 (7)식과 (17)식으로부터 다음 식으로 나타낸다.

$$u_c = \alpha R \theta_c^m T_c(x) \dots\dots\dots (19)$$

3) 누적 윤곽선

작업 롤이 마멸등에 의해 사용 한계에 도달하는 기간(물교체주기로 칭한다)내에서 압연 매수 i=n매까지 압연하였을 경우의 열팽창 분포 즉 누적 열크라운은 (2)항에 나타난 1회의 압연 및 냉각(소재 1매 압연)에 의한 열 크라운을 축차적으로 중합시킨 것으로 부터

구할 수 있다.

즉, 상하의 작업 물반경의 합에 대하여 표시하면 다음과 같이 된다.

$$U (=U_v + U_L) = \alpha R [\sum_{i=1}^{n-1} (\theta_{ci}^{mU} T_{ci}^U(x) + \theta_{ci}^{mL} T_{ci}^L(x)) - \theta_{RA}^{mU} T_{RA}^U(x) + \theta_{RA}^{mL} T_{RA}^L(x)] \dots (20)$$

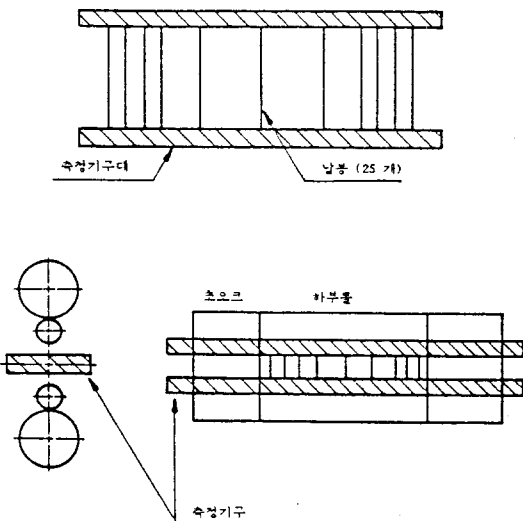
작업 물의 이송 S영향을 고려할 경우, 작업 물의 이송을 고려한 열 크라운의 계산은, 압연기 중심(판폭 중심) 좌표를 S만큼 변환하여 구한다.

3. 실험방법

3.1 실험개요 및 치구

열 및 마멸 크라운의 변화 모델 식의 계수값을 압연 조건(매수 Size등)에 따른 열 및 마멸 크라운 변화량을 냉각시간(압연후 경과시간)별로 실측하여 결정하였다.

실험대상은 두께가 박물, 중후물인 경우와 판폭이 3ft, 4ft, 5ft인 경우의 여러 소재조건으로 분류하여 압연매수가 각기 15, 30, 45매 압연한 직후 상하 작업을 윤곽선과 1차 냉각, 2차 냉각 후의 압연 물 윤곽선을 측정하였다.



〈그림 7〉 작업물 윤곽선 측정치구 및 치구설치 방법

측정은 그림7. 과 같이 납봉을 롤 동장 방향으로 평행하게 나열한 후 롤 간극 사이에 삽입시켜 물을 kissing한 후 변형된 납봉의 직경 변화량을 측정하는 방식을 사용했다.

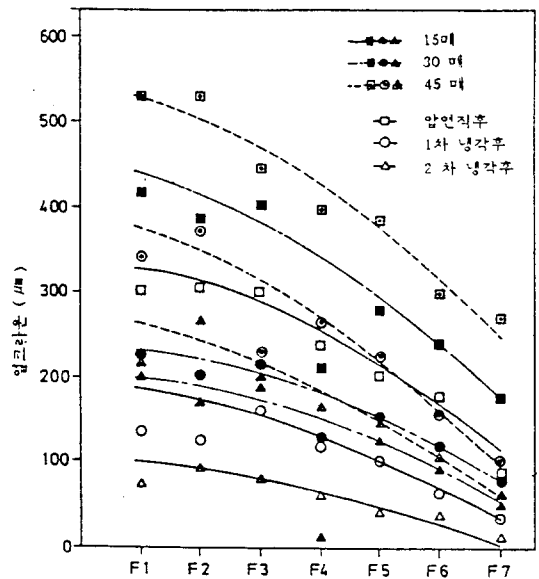
납봉에 의해 측정된 값은 초기 크라운 C_i 과 열크라운 C_t 및 마멸 크라운 C_w 을 모두 합한 롤의 윤곽선이므로 물을 충분히 냉각시켜 열크라운을 제거하면 마멸 크라운이 측정되며, 초기 크라운은 롤연삭시에 측정된 값이 있으므로 열크라운 C_t 는 다음과 같은 결과로부터 얻어진다.

$$C = C_i + C_t + C_w \dots \dots \dots (21)$$

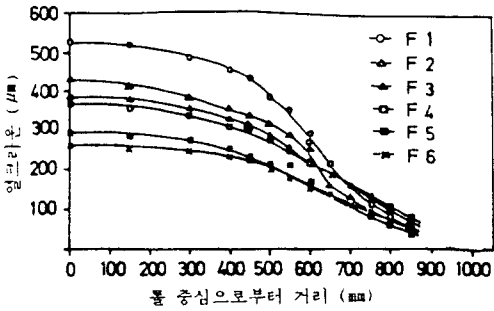
4. 결과 및 검토

4.1 측정치 분석

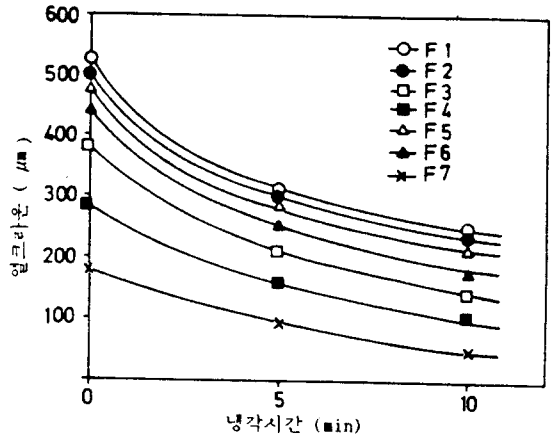
그림8은 중후물 4ft제를 각기 15매, 30매, 45매 압연한 후의 열크라운량을 스탠드별로 나타낸 것이며 측정값은 각기 압연 직후 5분, 10분 냉각후의 열 크라운량이다. 이때 열 크라운량은 F1스탠드가 가장 크며 F7스탠드로 갈수록 적어지는 경향치를 보이고 있다. 그 이유는 전방 스탠드에서 작업물과 소재사이의 접촉 길이가 길고 압하량도 크기 때문이다.



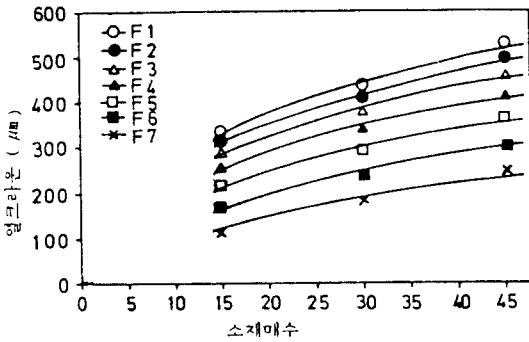
〈그림 8〉 중후물 4ft 각매수 압연후 및 냉각후의 열크라운의 스탠드간 변화



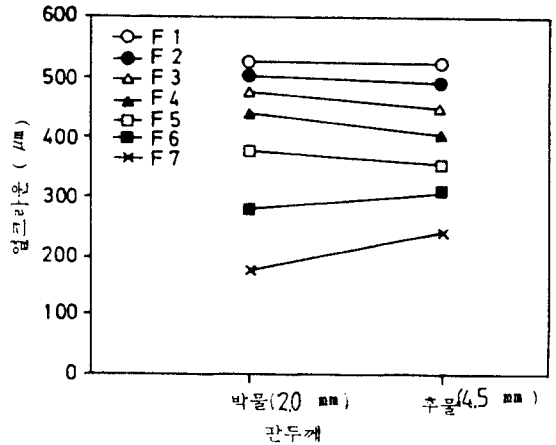
〈그림 9〉 중후물 4ft 45매 압연후 열크라운의 스탠드간 변화



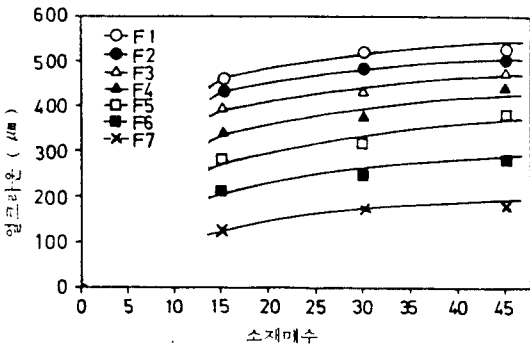
〈그림 12〉 박물 4ft재 압연냉각에 따른 열크라운의 스탠드간 변화



〈그림 10〉 중후물 4ft재 압연매수에 따른 열크라운의 스탠드간 변화



〈그림 13〉 관두께에 따른 열크라운의 변화



〈그림 11〉 박물 4ft재 압연매수에 따른 열크라운의 스탠드간 변화

그림9.는 중후물 4ft소재의 45매 압연후의 열 크라운을 볼 동장 중심으로부터 위치에 따른 열 크라운의 형상을 각 스탠드별로 비교한 것이다. 열 크라운은 F1이 그림9에서 언급한 바와 같이 큰 것을 알 수 있다.

그림10.와 그림11.은 중후물과 박물 4ft재의 압연 매수에 따라 열 크라운의 변화량을 나타낸 것이다. 즉 압연 매수에 따라 열 크라운량은 증가되고 있으며 박물의 경우 후물에 비해 빠른 속도로 열 크라운량이 증가되고 있음을 나타낸다. 이는 박물의 경우 압연시간이 후물에 비해 길기 때문이다.

그림 12. 는 박물 4ft재의 압연 후 냉각 시간 즉, 수냉시간 5분, 10분 후의 열 크라운량의 변화량을 각 스탠드 별로 나타내고 있다. 이들 값으로 모델내의 냉각계수 및 입열계수의 값을 구할 수 있다.

그림 13. 은 폭 4ft재의 박물과 증후물사이의 열 크라운량의 변화량을 비교한 그림이다. 박물재는 후방스탠드에 갈수록 빠르게 냉각되므로 물에 전달되는 열량이 후물보다는 후방스탠드에 적다는 것을 알 수 있다. 전방스탠드에서는 압연길이가 후물보다 길기 때문에 열크라운도 후물보다 큰 것을 알 수 있다.

이상의 실측값들로부터 식(8), (9), (10)의 열크라운의 상수값을 구하면 표1과 같다.

표 1. <표 1> 작업 롤 열크라운 모델의 계수

	스탠드No		F1	F4	F7
	판폭	판두께			
H(열전달계수) ($\times 10$ kcal/mm ² C sec)	박물 4ft		2.1	1.5	1.3
	중후물3ft		0.85	1.0	1.0
	중후물5ft		"	"	"
Q(입열계수) ($\times 10$ kcal/mm ² C sec)	박물 4ft		5.2	3.25	1.3
	중후물3ft		2.35	2.3	1.3
	중후물5ft		3.35	3.25	1.5

4.2 실측치와 모사 모델과의 비교

그림14. 는 1, 3, 7번 스탠드의 박물 4ft재 30매 압연 후의 열크라운과 전체작업롤 윤곽선의 실측값들을 모사 모델을 이용하여 계산한 값들과 비교한 것이다. 이때 전체 작업 롤 윤곽선은 마멸, 열 및 초기 크라운 총합이다. 각 스탠드에서 판의 중심에서는 열 및 총합 크라운량은 크지만 중심에서 멀어질수록 감소현상이 뚜렷함을 알 수 있다.

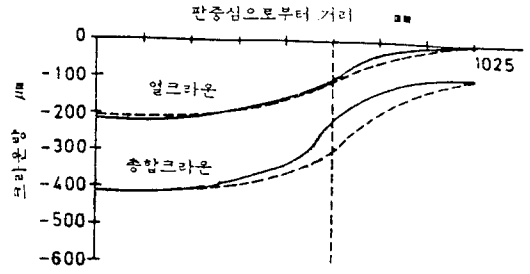
또 그림14에서 본 연구에서 작성된 예측 모델의 결과와 실측치의 경향과 잘 일치되고 있음을 알 수 있다.

4.3 롤의 축방향 이송 형태에 따른 롤 윤곽선의 변화

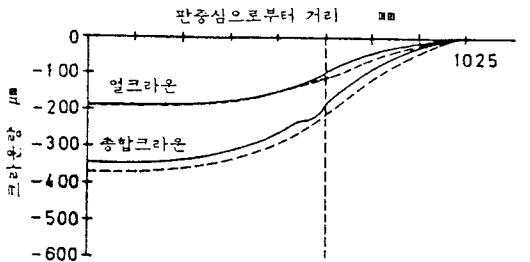
앞절에서 언급한 바와 같이 실측자료로 부터 구한 계수값들을 대입하여 열 및 마멸 크라운 예측 모델을 완성하고 이 모델들을 잘 이용하여 열 및 전체 작업 롤 윤곽선을 추정한 결과 실측치와 계산값들이 잘 일치하고 있는 점으로 보아 이 계산 모델을 이용하여 롤의 축방향 이송에 따른 롤 윤곽선의 변화도 수치 모사가 가능하다.

같은 롤 조건과 압연조건을 작업 롤 이송 압연기에 적용할 경우 이송에 따른 효과를 분석하기 위해 이송

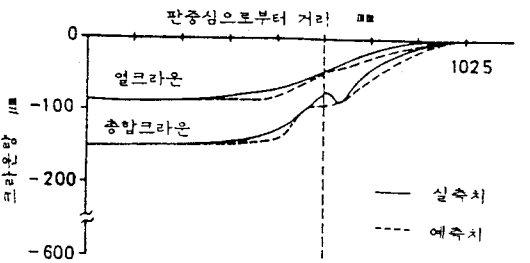
않은 상태와 세가지 이송방식(이송거리 : 최대 +300mm)를 가정하여 비교 하였다.



(a) 1번 스탠드

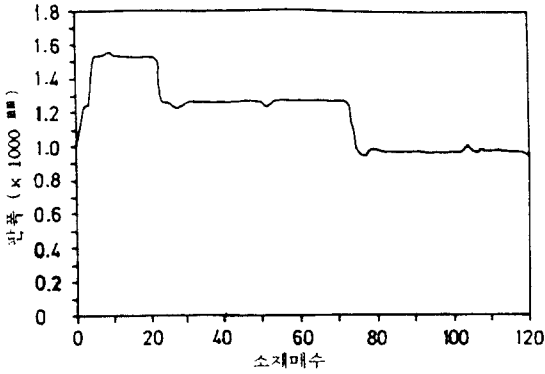


(b) 3번 스탠드



(c) 7번 스탠드

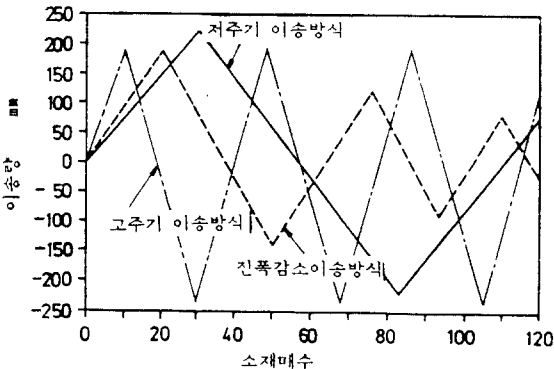
<그림 14> 각 스탠드의 실측치와 모사모델과의 비교



〈그림 15〉 수치모사를 위한 룰단위 편성

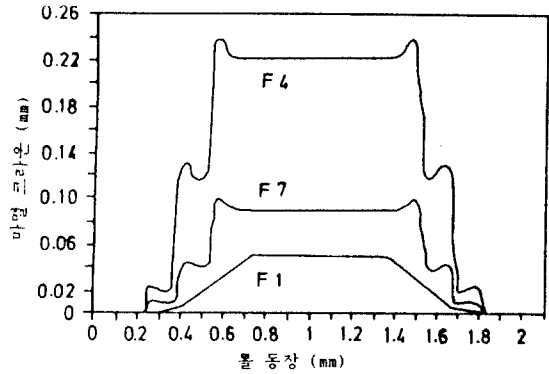
실제 작업상 룰 단위 편성(그림15)는 폭 3ft 1매, 4ft 2매를 초기 조정재로 압연한 후 대폭 5ft 20매, 3ft 47매 순서로 압연하였다. 초기 룰 크라운은 사상압연기 1번 스탠드에서 7번 스탠드까지 각각 다른 초기 크라운을 가지며 각기 F1=-100, F2=-50, F3=+50, F5=+100, F5=+50 μ m이며 F6, F7는 초기 룰 크라운이 0이다.

작업 룰 이송방식(그림16)은 저 주기 방식은 이송량은 압연매당 8mm, 진폭 감소 방식의 경우 이송 진폭을 압연 매수에 따라 감소시키고, 고 주기 방식은 이송량은 압연매당 19mm으로 하여 구성하였다.

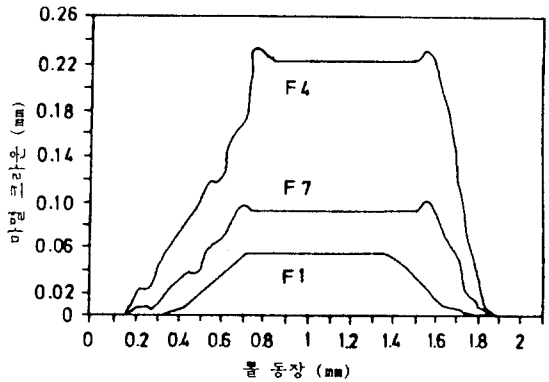


〈그림 16〉 수치모사를 위한 여러가지 작업 룰 이송방식

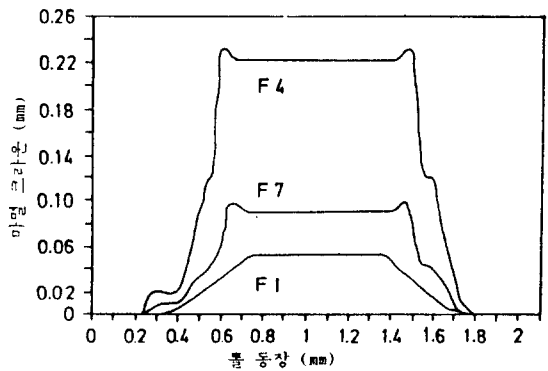
그림17. 은 소재 120매를 압연 한 후의 예측 마멸 윤곽선을 나타낸 것으로 이송방식별로 비교하였다. 이송을 하지않을 경우에는는 각 스탠드마다 소재폭의 영향이 그대로 남아 있으며 5ft, 4ft, 3ft에 따라 단부의 단차를 나타내는 경향이 뚜렷하다.



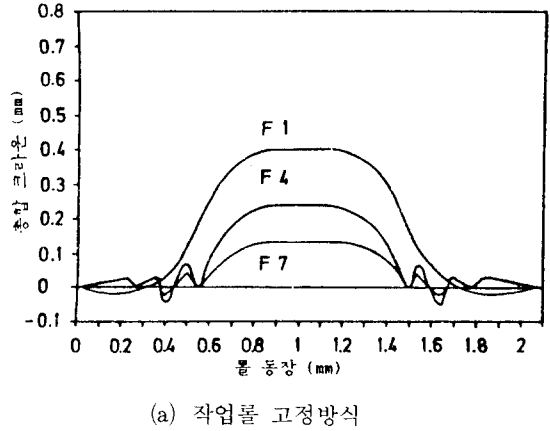
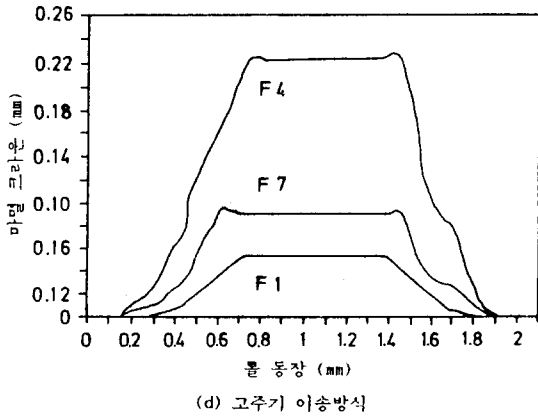
(a) 작업룰 고정방식



(b) 저주기 이송방식



(c) 진폭감소 이송방식



〈그림 17〉 소재 120매 압연후 마멸윤곽선

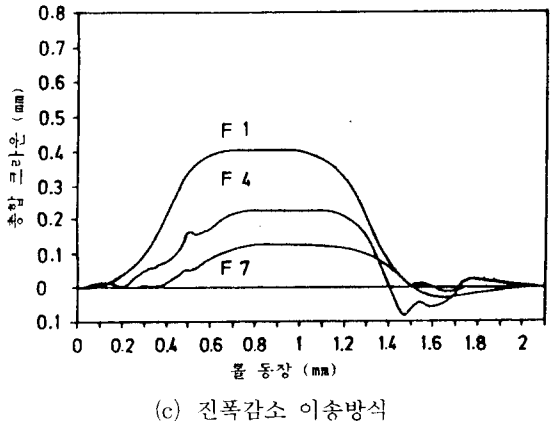
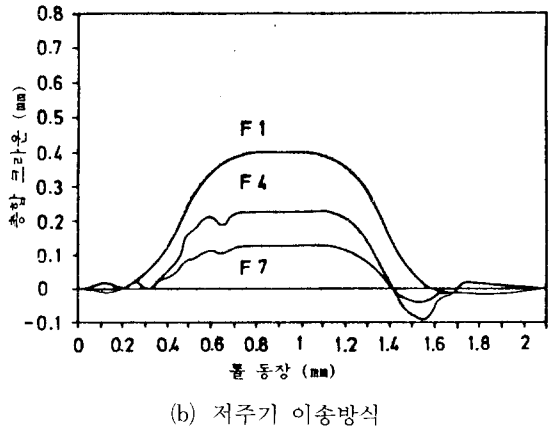
이때 단부에서의 돌기부분은 판단부에서의 마모 경향을 대변하는 것으로써 판단부에서의 소재 온도가 낮기 때문에 열간 변형저항이 크고 따라서 압연하중이 크게 작용되기 때문에 이부분의 마멸이 두드러지게 나타나는 현상이다.

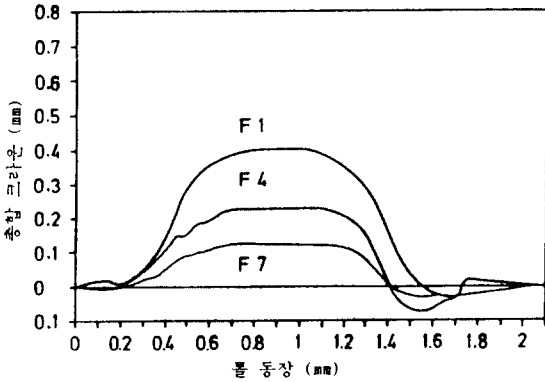
이러한 판폭 단부의 돌기부가 제거되면 소재 폭의 영향을 받은 롤의 국부 마멸 현상이 제각각이라고 할 수 있으며 이에 따른 압연 폭 가변의 제약이 없어지게 된다. 이송방식에 따른 효과를 보면 저 주기 방식이나 진폭 감소방식의 경우 이송을 하지 않는 경우 보다는 판 폭 단부의 돌기부가 많이 감소되고 있으나 완전히 제거되었다고는 할 수 없다.

반면에 고 주기 방식의 경우에선 돌기부가 거의없는 경향치를 보이고 있다. 마멸 형상을 살펴보면 1번 스탠드에서 편차가 없이 동장 전반에 걸쳐 균일한 경향을 보이고 있으나 4번 스탠드에서는 불균일 마멸 경향이 보여주고 있다.

그림 18은 소재 120매를 압연한 후의 마멸결 윤곽선과 열 크라운을 포함한 전체 롤 윤곽선을 이송방식별로 검토한 결과를 나타냈다.

이송을 하지않는 경우에 비해 저 주기 이송 방식이나 진폭 감소 방식의 경우에선 양단의 불균일 윤곽부가 많이 감소되긴하였으나 왼쪽 편에 조그마한 돌기부가 존재하는 것을 보아 마멸 분산 효과가 적은 것으로 알 수 있다. 반면에 고 주기 이송방식에서는 윤곽선이





(d) 고주기 이송방식

그림 18 소재 120매 압연후 작업롤 윤곽선

평탄하게 변하고 있는 것으로 볼때 롤 교환없이 계속 압연이 가능함을 알 수 있으며 화병(coffin)형의 롤 단위 편성을 상당히 완화시킬 수 있는 방법으로 판단 되었다.

따라서 롤단위 편성의 제약조건을 감소시켜 소위 임의의 스케줄 압연에 근접시킬 수 있는 최적이송방식을 찾기 위하여 검토한 결과 고 주기이송방식이 우수한 점을 알 수 있었다.

5. 결론

열간 압연에서 판 크라운 및 판 형상에 영향을 미치는 열 및 마멸 크라운이 예측 모델을 만들기 위해서 여러가지 압연조건에 따라 열 크라운과 마멸 윤곽선을

측정하였으며, 측정된 값을 기초로 하여 예측 모델의 계수값들을 구하였다. 본 연구에서 예측 모델의 계산치는 실측치와 거의 일치됨이 확인 되었다.

이 예측 모델을 이용하여 작업 롤의 축 방향 이송 방식에 따른 롤의 마멸 분산효과를 분석한 결과 롤의 이송간격을 크게 한 고주기 이송방식을 사용할 경우 소재 폭에 따른 국부 마멸 현상이 제거될 수 있음을 확인하였다.

參 考 文 獻

1. 梶原利幸 外, 日立評論, 50, (1974), p. 10
2. 栗律源 外, 板幅方向の變形を考慮した板厚分布 計算方法, 第 33 塑性加工 講演會, (1982) p143
3. 成田 外, UCミル形狀制御 ミステムの開発(第3報), 第 35 塑性加工 講演會, (1984) p. 235
4. 大池 外, 厚板壓延における ロール曲りに ついて, 鐵と鋼, 63(1977), p. 222
5. H. S. Carslow & J. C. Jaeger : "Conduction of Heat in Soild", Oxford, (1959)
6. G. T. Pallone, Transient Temperature Distribution in Work Rolls during Hot Rolling of Sheet and Strip, Steel Engineer, vol. 60-12, Dec, (1983) pp. 21-26.
7. T. R., Goodman, Trans. ASME, Vol. 80, (1959), p. 335