

< 논 문 >

열간 마무리압연 설정의 정도향상을 위한 동적 설정법

문영훈* · 이준정*

(1996년 3월 23일 접수)

A Dynamic Set-up Technique for High Accuracy Set-up of Continuous Hot Strip Finishing Mill

Y. H. Moon and J. J. Yi

Abstract

A dynamic mill set-up technique was developed to achieve a more precise roll gap set-up of the finishing mill stands for steel strip rolling. In the conventional mill set-up model, the set-up values such as roll gap and roll speed are determined before the sheet bar reached the entry side of the finishing mill train and maintained constant until the strip top end passes through the last stand. In the way, however, a dynamic set-up logic, that gives a way to adjust the roll gap value of the final mill stand for the strip ingoing from the ahead of the front stand, was developed and attached to the existing set-up model. The roll gap modification is based on the analysis of the observation in the third stand of the finishing mill train. The dynamic set-up model was proved very effective for the more precise mill set-up and for operational stability in the hot strip finishing mill train.

Key Words : Hot Strip Finishing Mill(열간 마무리압연), Finishing Mill Set-Up Model(마무리압연 설정모델), Dynamic Set-Up(동적 설정), Gaugemeter Model(압하위치 설정 모델), Roll Force Model(압연하중 설정모델), Correlation Coefficient(상관계수)

1. 서 론

마무리압연 설정 모델(finishing mill set-up model: FSU 모델)^(1,3)은 조압연(roughing mill) 후 단부터 마무리압연(finishing mill) 출측까지의 압연공정에서 일어나는 형상, 온도, 재질의 변화를 측정가능한 공정인자로부터 예측하고 이를 통해 마무리압연 각 스탠드의 롤갭(roll gap)과 롤속도(roll speed)를 설정하는 모델이다.

이러한 마무리압연 설정모델의 정확도는 마무리압연을 포함한 열간압연 조업전반에 영향을 미치게

되고, 선단부 두께적중도를 좌우함으로써 압연중의 두께제어 시스템(automatic gauge controller)^(4~6)에도 영향을 주게되므로 열연품질 확보측면에서도 중요한 모델이며, 롤속도를 설정하기 때문에 연속 스탠드간의 통판 안정성에도 직접 영향을 미치는 모델이다. 본연구에서는 열연강판 선단부 두께편차의 감소를 통한 열연품질 향상 및 실수율 개선을 이루기 위한 노력의 일환으로 선단부 두께에 직접 영향을 미치는 롤갭 설정 정밀도를 개선시키기 위해 전단 스탠드의 압연실적을 이용하여 최종 스탠드의 롤갭을 재조정하는 동적 재설정모델(dynamic set-up model)을 개발하여 롤갭 설정 정밀도를 향상시키고자 하였다.

*포항산업과학연구원 압연설비엔지니어링연구팀

2. 마무리압연 설정모델 (finishing mill set-up model :FSU)의 기본이론

Fig. 1에 마무리압연공정을 도식적으로 나타내었다.

마무리압연 설정모델은 Fig. 1에서 보인바와 같이 조압연(roughing mill) 후단부터 마무리압연(finishing mill) 출측까지의 물겂과 물속도를 설정하는 모델이다. 따라서 마무리압연기의 정확한 설정을 위해 압연공정과 관련된 여러 변수를 이용한 복잡한 계산과정을 거치게 되는데 이러한 계산은 마무리압연 설정모델을 구성하는 여러 요소모델들이 유기적으로 관여하게 된다.

Fig. 2에 마무리압연 설정모델의 설정과정을 간략하게 나타내었는데 이와 관련된 주요 요소모델별 기본특성을 아래에 나타내었다.

(1) 압연온도 예측모델

마무리압연 온도예측모델은 Fig. 1의 조압연 출측에서부터 크롭 전단기(crop shear :C/S)까지의 이송 테이블(roller table)상에서의 공냉구간 온도강하모델 (마무리압연 입측온도 예측식) 과 크롭 전단기로 부터 마무리압연 출측까지의 공냉, 스케일 제거(descaling) 및 스탠드간 냉각등에 의한 수냉구간의 온도예측모델(각 스탠드의 압연온도 및 마무리압연 출측온도 예측식)로 구성되어 마무리압연중의 온도관련 이력을 예측해준다.

(2) 압연 동력곡선 예측모델

마무리압연 동력곡선모델은 조압연 출측두께로

부터 마무리압연 출측두께(코일 목표두께)까지 압연하는데 소요되는 누적소요동력과 이 누적소요동력을 치수별 부하배분율로 배분한 각 스탠드별 소요동력을 계산하는 모델로서 각 스탠드간 예상 소요동력으로 부터 스탠드별 출측두께(압하량)를 결정해 준다.

(3) 압연하중 예측모델

스탠드별로 정해진 압하량으로 압연을 하기 위해 걸리게 되는 압연하중을 소재의 변형저항(압연온도, 합금성분, 변형량, 변형률의 함수)으로부터 예측하는 모델로서 이는 압연기의 물겂을 결정하는데 중요한 역할을 한다.

(4) 압하위치 예측모델

압하위치 예측모델(gaugemeter model)^{(1),(3)}은 압연 스탠드별 출측두께가 목표두께와 일치하도록 압연물의 물겂을 설정하는 모델로서 압연하중에 의한 압연기의 탄성변형량(mill spring량), 롤 회전시 구심력에 의한 롤 축수의 윤활유막두께변화량(oil film량)등을 보상하여 최종 물겂을 설정하는 모델이다.

(5) 압연속도 예측모델

압연시 각 스탠드별 질량일정법칙(mass balance)에 기초하여 안정된 통판을 이뤄질 수 있도록 각 롤의 속도를 계산해 주는 모델로서, 롤 주속과 출측판의 속도차를 계산해 주는 선진율 모델,^(7~9) 롤 속도모델, 롤 회전수 모델들로 구성되어 압연속도관련 계산을 수행한다.

Fig. 2의 마무리압연 설정계산은 일반적으로 2회에 걸쳐 행한다. 2회의 차이점은 설정계산의 기동

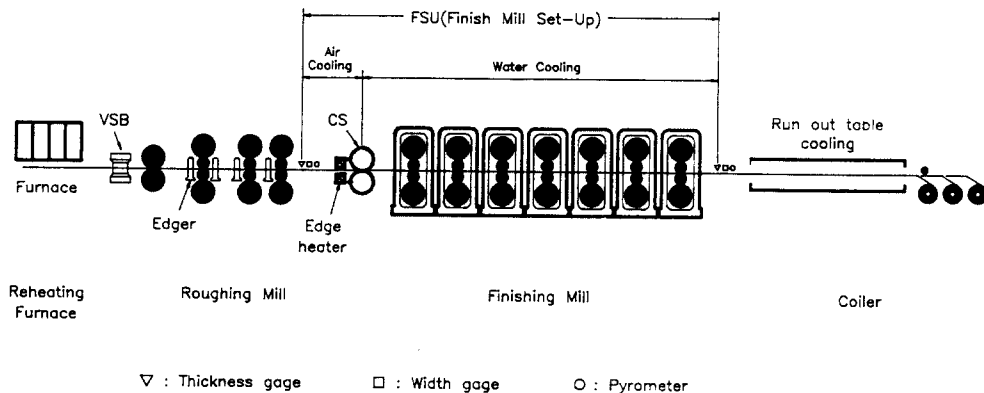


Fig. 1 Schematic drawing of hot strip rolling process

3. 연구내용

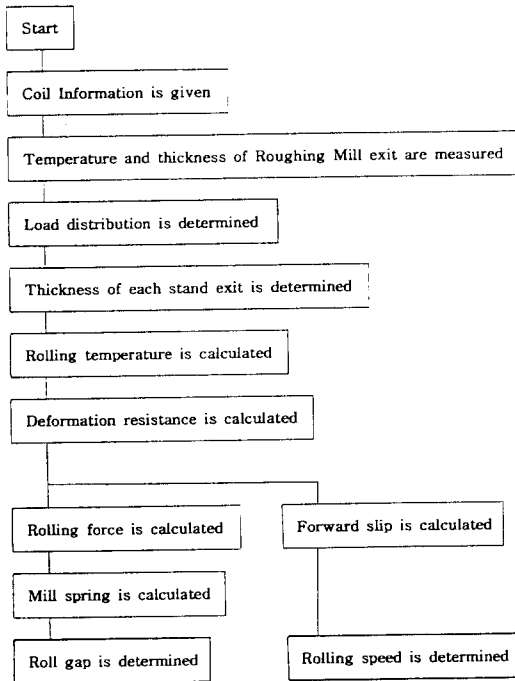


Fig. 2 Finishing mill set-up sequence

시점과 마무리압연입측온도의 사용방법에 있고 그 외에는 똑같은 계산을 행한다. 제 1차 설정계산은 압연재가 조압연 출측온도계 위치를 통과하면서 압연재 선단부의 온도가 측정된 직후에 기동한다. 설정계산은 소재 선단부 실적온도에서 소재가 정상적으로 마무리압연기 입측까지 반송된다고 가정하여 그 시간을 계산하여 마무리압연 입측온도를 예측한다. 그 후 그 온도에 맞는 압연동력, 압연하중, 압하위치 등을 Fig. 2의 순서에 따라 계산한다. 제 2차 설정계산은 압연재가 마무리압연 입측온도계 위치를 통과하면서 선단부의 온도가 측정된 직후에 기동되어 예측온도가 아닌 실적 마무리압연 입측온도를 이용하여 1차와 같은 계산을 행함으로써 1차 설정값을 미세조정 한 후 마무리압연 설정이 종료된다. 마무리압연 설정이 종료되면 압연재의 선단부는 마무리압연기의 최초 스탠드(#1 스탠드)로부터 스탠드별로 설정된 값에 따라 순차적으로 연속압연이 되며 최종 스탠드(#6 스탠드)를 통과하면서 목표두께의 코일을 얻게된다.

3.1 동적 재설정 모델개발

'2'절에서 설명된 마무리압연 설정모델은 계산을 통한 설정이므로 수식으로 표현이 불충분한 여러 공정변수들로 인해 실조업후에 측정된 값들과는 어느 정도의 오차를 갖게될 수 밖에 없어, 목표로 하는 압연재의 최종두께를 만족시키지 못하는 경우가 발생하게 된다. 이러한 오차는 일반적으로 스탠드별 설비특성에 관한 분석이 충분치 못한 상황에서 일률적인 모델의 적용으로 스탠드별 특성이 반영되지 못하는 부정확성, 압연온도의 예측모델이 주변 환경의 변화를 모두 고려하지 못하므로 생기는 온도예측 부정확성, 강종이나 조업변수에 따른 변화를 충분히 고려하지 못한 압연하중 예측모델의 부정확성, 압연기의 탄성변형량(mill spring)을 정확하게 반영하지 못하는 롤갭(roll gap)설정치의 부정확성, 스탠드간 통관속도를 설정해주는 압연속도 모델의 부정확성등 여러 요인들이 복합적으로 작용하여 실 조업변수와 상당한 오차를 보일 수 있다.

따라서 본 연구에서는 가변적인 여러변수에 의해 그 정확도가 제한되는 설정모델의 정확도를 증가시키기 위해, 통계학적 이론에 근거한 스탠드별 예측오차간의 상관성을 파악함으로써, 판의 선단부 두께편차에 직접적인 영향을 미치고 있는 최종스탠드에서의 예측오차량이 전단 스탠드에서의 예측오차량과 동일한 비율로 발생한다는 가정하에서 이 오차량을 감소시킬 수 있는 동적설정모델을 개발하고자 하였다. 즉, 동적설정은 '2'절에서 설명한 1, 2차 설정이 종료된 후 판이 마무리압연기에 치입되어 판선단부가 마무리압연기의 전단(#1, #2, #3) 스탠드를 통과한 직후 얻어진 측정값과 설정치의 편차를 계산하여 이때의 설정오차를 이용하여 최종(#6) 스탠드의 설정치를 압연판이 후단 스탠드에 도달하기전에 재조정하여줌으로써 최종 스탠드에서의 설정오차를 최소화하는 동적(dynamic)개념의 설정로직(logic)을 개발하였다.

Fig. 3에 이러한 동적설정의 원리를 도식적으로 나타내었다.

Fig. 3에서 보인바와 같이 동적설정은 전단 스탠드의 실적을 이용하여 전단의 설정오차를 계산한 후 이로부터 동적설정식을 통해 최종 스탠드의 설정오차를 예측하여 롤갭을 보상해 주는 과정을 거

치게 된다.

Fig. 4에 이러한 과정을 나타내었다.

3.2 전단 및 후단 스탠드 상관성분석

동적설정 기본원리로 볼 때, 동적설정의 효과가 극대화되기 위해서는 전단 스탠드의 설정오차와

후단스탠드의 설정오차가 직접적으로 높은 상관관계를 보여야만 동적설정의 효과를 기대할 수 있다. 따라서 효과적인 동적설정을 하기 위해서는 전단 스탠드의 설정오차와 후단 스탠드의 설정오차사이의 광범위한 상관성 분석을 통해 가장 영향도가 높은 공정변수를 선정하는 것이중요하다. 일반적으로 어느 한 독립변수가 특정 종속변수에 미치는 영향을 알고자 할때에 상관계수⁽¹⁰⁾가 도입되는데, 본 연구에서도 전, 후단 스탠드의 상관성을 공정변수별로 Eq. (1)에 나타난 상관계수(correlation coefficient : R-value)를 구한 후 가장 상관성이 높은 변수를 선택하여 동적설정의 변수로 사용하였다.

$$R\text{-Value} = \frac{\text{Covariance}(X, Y)}{(\text{Variance } X \cdot \text{Variance } Y)^{1/2}} \quad (1)$$

3.3 동적 재설정식 작성

마무리압연 각 스탠드의 롤 갭은 Eq. (2)의 압하 위치 기본식(gaugemeter Eq.)으로 부터 계산한다.

$$S_i = h_i - \frac{P_i - P_i^0}{M_i} + O_n + G M_i \quad (2)$$

- 여기서, S_i : i스탠드 롤 갭, h_i : i스탠드 출측두께
- O_n : i스탠드 oil film 양
- M_i : i스탠드 mill 정수
- P_i : i스탠드 압연하중
- P_i^0 : i스탠드 영조압연하중
- $G M_i$: i스탠드 gagemeter error 보정항

따라서 압연후 얻어진 각 스탠드별 출측두께편차(측정두께-예측두께)는 Eq. (2)로 부터 Eq. (3)과 같은 오차요인에 기인하여 발생하였다 할 수 있다.

$$\Delta h_i = \Delta S_i + \frac{\Delta P_i}{M_i} - \Delta O_n - \Delta G M_i \quad (3)$$

여기서, Δh_i : i스탠드 출측두께편차 ΔS_i : i스탠드 롤갭편차,

ΔP_i : i스탠드 압연하중 편차 ΔO_n : i스탠드 oil film 양 예측편차

$\Delta G M_i$: i스탠드 gagemeter error 보정항

본연구의 동적설정은 전단 스탠드의 실적으로부터, 후단 스탠드의 롤갭 ΔS_i 를 보상하는 형태이므로 전단 스탠드에서 회수가가능한 조업실적($\Delta P_i, \Delta V_i$)으로 Eq. (3)이 표현되어야 한다. 따라서 실적치로 회수가 불가능한 $\Delta O_n, \Delta G M_i$ 는 3차 설정계산시 무시한 후, 실조업 적용시 이에 상응하는 양

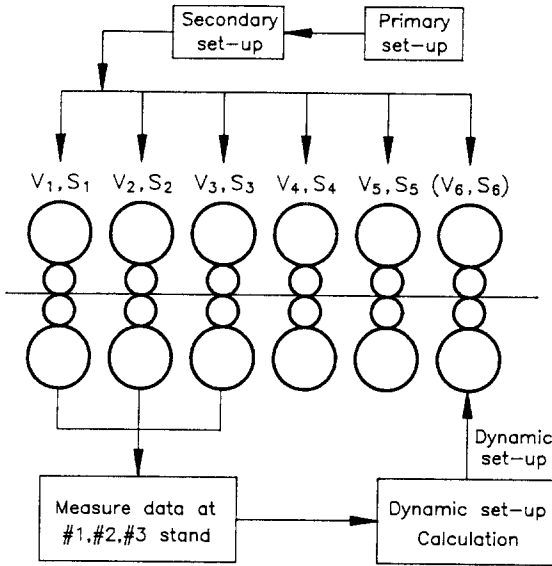


Fig. 3 Principle of dynamic set-up

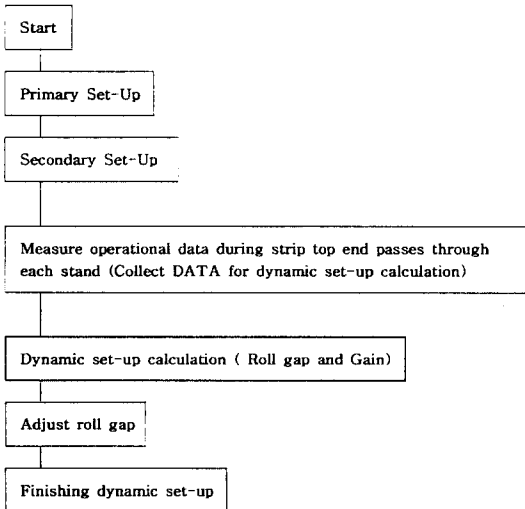


Fig. 4 Dynamic set-up sequence

만큼의 게인 (gain) 조정을 통해 보상하였다.

$\Delta O_n = \Delta GM_i = 0$ 라 가정하면 Eq. (3)은 Eq. (4)와 같이 나타내어 진다.

$$\Delta Si = \Delta hi - \frac{\Delta Pi}{Mi} \quad (4)$$

따라서 최종 스탠드의 동적설정 물값은 Eq. (5)의 형태로 보상하였다.

$$\begin{aligned} S(\text{보상 물값}) &= S(2\text{차 설정}) + G S^*(\text{동적설정 보상량}) \\ &= S(2\text{차 설정}) + G(\Delta h_6 - \Delta P_6/M_6) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 G : ΔOf_6 와 ΔGM_6 보상 게인 (gain)

Eq. (5)의 동적 설정수식에서 최종 스탠드 물값을 재설정해 주기위해 최종 스탠드와 상관성이 가장 높게 나타난 스탠드의 해당 실적을 이용하여 최종 스탠드의 Δh_6 와 ΔP_6 를 예측하여 보상하고, ΔOf_6 와 ΔGM_6 보상 게인 (gain), G 는 별도의 방법을 통해 구하였다. 동적설정의 효과를 최대화 시킬 수 있는 최적 게인 (gain)을 선정하는 방법으로, 본 연구에서는 전단 스탠드에서 회수가 가능한 조업실적 (ΔPi , ΔVi)을 이용하여 설정오차를 예측해줌으로써 적정 게인 (gain)을 선정하였다. 많은 변수에 의해 복합적으로 영향을 받고 있는 압연기 특성상 동적설정식의 일률적인 적용보다는 압연특성에 따라 게인 (gain)을 신중적으로 적용하는 것이 동적 설정의 효과를 극대화 시킬 수 있기 때문에, 설정오차가 크게 예상되는 경우에는 가능한 높은 게인 (gain)을 적용시켜 동적 설정의 효과를 극대화하고 예상 설정오차가 적을 경우에는 낮은 게인 (gain)을 적용함으로써 전 코일에 대해 일정 게인 (gain)을 적용하는 것보다 설정의 효율성을 증가시키고자 하였다.

이를 위해 최종 스탠드 두께편차 (FSU thickness error)를 종속변수로 하고 전단스탠드의 압연하중편차 (ΔPi), 압연속도편차 (ΔVi)를 독립변수로 한 중회귀분석을 실시하여 최종 스탠드 두께편차와 가장 높은 상관성을 보이는 회귀식을 구함으로써 게인 (gain)을 결정할 수 있는 인자를 정하였고 이를

근거로 가변 게인 (gain) 값을 정하였다.

4. 연구결과

3절에서 나타난 동적설정로직 (logic)을 실 적용하기 위해 실 조업실적을 통하여 Eq. (5)의 동적설정 수식을 작성하였다. Eq. (5)의 설정 보상량을 구하기 위해 전, 후단 스탠드의 상관성 분석을 실시하여 최종 스탠드의 조업변수와 가장 상관성이 높은 전단 스탠드의 조업변수를 선정하였다. 상관성 분석결과 최종 스탠드인 #6 스탠드와 근접한 스탠드일수록 상관계수가 크게 나타났으나 (Table 1) 동적 재설정을 통한 최종 스탠드의 물값 재조정 시간을 확보하여야 하므로 #3 스탠드 이후의 스탠드는 동적설정용 조업실적으로 고려하는 것이 불가능하였다.

따라서 본 연구에서는 #3 스탠드 이전의 스탠드 중 #6 스탠드와 상관성이 가장 큰 #3 스탠드의 조업실적을 이용하여 동적재설정을 실시하였다. 상관성 분석결과 #3 스탠드의 압연하중 편차, ΔP_3 를 이용하여 최종 스탠드 (#6)의 Δh_6 와 ΔP_6 를 예측하는 것이 가장 효과적인 것으로 나타나, Eq. (5)의 물값 설정 보상량을 Eq. (6)을 통해 구했다.

$$S^*(\#6 \text{ 스탠드 설정 보상량}) = \Delta h_6 - \Delta P_6/M_6 \quad (6)$$

위식의 후단 Δh_6 와 ΔP_6 값을 전단 ΔP_3 으로 예측하기 위해서, 전단실적 (ΔP_3)을 이용한 최종 스탠드 두께편차보상량 (Δh_6) 계산식과 압연하중편차 보상량 (ΔP_6) 계산식을 7 두께구분별로 회귀분석을 통해 각각 구하였다.

전단실적 (#3 스탠드)을 통한 최종 스탠드 물값 보상목표치 (Δh_6)는 두께별로 Eq. (7)의 형태로 얻어졌다.

$$\Delta h_6 = A1 + A2 X + A3 X^2 \quad (7)$$

여기서 $X = \Delta P_3 / P_{\text{set},3} = [P_{\text{act},3} - P_{\text{set},3}] / P_{\text{set},3}$

$A1, A2, A3$: 두께별 상수

$P_{\text{act},3}$: # 3 스탠드 실측압연하중

$P_{\text{set},3}$: # 3 스탠드 설정압연하중

Table 1 Correlation coefficient at each stand with respect to #6 stand

Stand No.	#1 stand	#2 stand	#3 stand	#4 stand	#5 stand	#6 stand
R-value	0.212	0.345	0.543	0.560	0.782	1.000

전단실적(#3 스탠드)을 통한 후단 압연하중(ΔP_6) 보상목표치는 두께별로 Eq. (8)의 형태로 얻어졌다.

$$\Delta P_6 = P_{set,6} [B1 + B2 X + B3 X^2] \quad (8)$$

여기서 B1, B2, B3 : 두께별 상수

게인(gain)량(G)은 선단부 두께편차(FSU error)와 가장 높은 상관관계를 보인 ΔP_3 와 ΔV_1 를 이용하여 아래와 같은 인자(P-value)를 정한 후 이 값의 변화에 대해 각각 다른 게인(gain)을 적용하였다. 중회귀분석을 통해 얻어진 P-Value의 형태는 Eq. (9)와 같았으며, Fig. 5에 이를 통한 게인(gain) 선정과정을 나타내었다.

$$P-Value = \Delta P_3 + \Delta V_1 / k_1 \quad (9)$$

여기서 $k_1 = 500 - 3500$ (두께 그룹별 상수)

Fig. 5에서 작은 점(small dot)으로 표시된 것이 P-value가 -0.07 에서 0.04 사이의 값을 갖는 경우로서 이 범위내에서는 마무리압연 선단부 두께편차(FSU error)가 $50\mu m$ 이내의 양호한 두께정확도를 대부분 나타내는 반면 이 범위를 벗어나는 P-value를 갖는 경우(large dot)는 두께편차가 큼을 알 수 있다. 따라서 계산된 P-value가 -0.07 에서 0.04 이내의 값을 갖는 경우에는 적은 게인(gain)을 적용하여 2차 설정의 정확도를 가능한한 유지하도록 하였고 이값을 벗어나는 경우에는 3차 설정에 가중치를 줌으로써 2차 설정의 오차를 최대한 수정할 수 있도록 하였다. 상기 분석방법을 통한 각 두

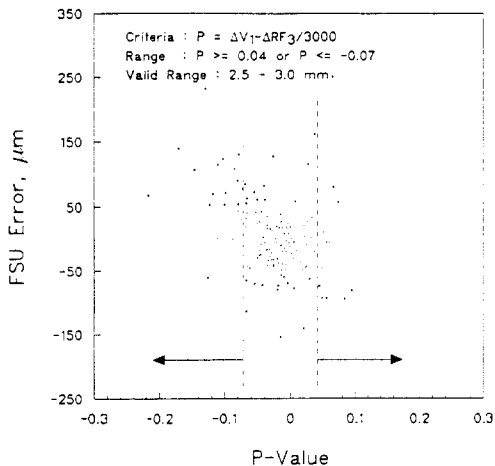


Fig. 5 P-Value vs. thickness error of strip end

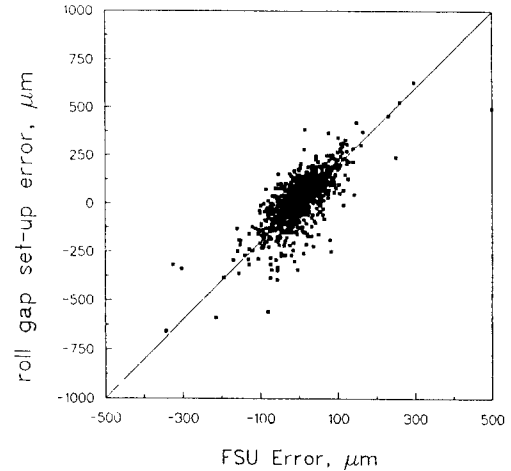
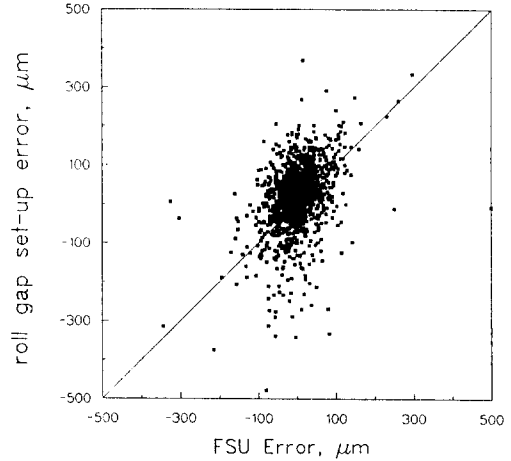


Fig. 6 (a) FSU error of strip end vs. roll gap set-up error before dynamic set-up
(b) FSU error of strip end vs. roll gap set-up error

께별 적정 게인(gain)은 다음과 같다.

$C1 < P-Value < C2$: $G = 0.0 - 0.4$ (3차 설정 영향도 최소화)

$P-Value < C1$: $G = 1.0 - 1.2$ (3차 설정 영향도 최대화)

$C2 < P-Value$: $G = 1.0 - 1.2$ (3차 설정 영향도 최대화)

여기서 $C1 = -0.06 \sim -0.08$, $C2 = 0.04 \sim 0.05$ ($C1, C2$ 는 두께 그룹별 상수)

본연구의 동적재설정식을 이용하여 롤갭 재설정

을 실시해본 후 얻어진 선단부 두께편차(FSU error)와 롤갭 설정편차 사이의 상관성을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에 보인바와 같이 재설정전에 비해 동적 재설정후의 롤갭편차가 선단부 두께편차와 현저히 높은 상관성을 보임을 알 수 있는데, 이는 재설정 후의 선단부 두께편차는 롤갭편차의 재설정에 의해 현저히 개선될 수 있음을 직접적으로 보여주고 있다. 본 연구의 동적 재설정모델을 실 압연생산라인에 적용한 후 장기간에 걸친 선단부 두께편차 개선 정도를 확인해본 결과, 동적 재설정으로 인한 적중을 증가정도가 약 5~6%에 이르는 것으로 나타났다.

5. 결 론

열간 마무리압연설정모델의 롤갭 예측적중도 개선을 위하여 동적 재설정법을 개발하였고 이를 실 생산라인에 적용한 결과 선단부 두께편차가 크게 감소하는 효과를 얻었다. 전, 후단 스탠드간의 높은 상관성으로 부터 전단 스탠드의 설정편차를 이용하여 후단 스탠드의 설정편차를 동적으로 재조정하기 위해 조업실적을 이용한 회귀분석을 통해 재설정식을 작성하였고, 두께별로 최적 게인(gain)을 적용할 수 있는 인자(parameter)를 만들어냄으로써 동적 재설정의 효과를 극대화하였다.

참고문헌

(1) K. Kimura, T. Nunokawa, M. Honjyo and R. Takahashi, 1991, "Development of gauge control system with interstand thickness gage for hot

strip mill", 鐵と鋼, Vol. 77, No. 4, pp. 58~65.
 (2) Y. Oike et. al., 1991, "Improvement of rolling force model in hot strip mill", CAMP-ISIJ, Vol. 4, p. 1554.
 (3) T. Morita, M. Konishi, S. Ashizawa and S. Honda, "New gauge control method for hot rolled strip", 神戸製鋼技報, Vol. 33, No. 1, pp. 61~65.
 (4) S. Kuroda, S. Goto, K. Kadono and S. Hanada, 1993, "Improvement of gauge accuracy in No. 1 cold tandem mill at KSC's Mizushima Works", 鐵と鋼, Vol. 79, No. 3, pp. 134~140.
 (5) M. Saito, T. Yamane, Y. Morita, T. Kikuchi, R. Shimizu and T. Kawasaki, 1990, "Development of high accuracy control system for hot strip mill", NKK Tech. Reports, No. 132, pp. 39~46.
 (6) Y. Misaka and R. Takahashi, 1981, "Computer control of hot strip mill", 鐵と鋼, Vol. 67, No. 15, pp. 60~70.
 (7) V. Piispanen, 1978, "Forward slip in the hot rolling of sheet", Scandinavian Journal of Metallurgy, Vol. 7, pp. 88~90.
 (8) Y. Bakhtinov, 1988, "Forward and backward slip during rolling", Steel in the USSR, Vol. 18, pp. 364~367.
 (9) M. Jarl, 1988, "Friction and forward slip in hot rolling", Scandinavian Journal of Metallurgy, Vol. 17, pp. 1~7.
 (10) 박성현, 1985, 공업통계학, 대영사, 서울, p. 210