

포항제철 2열연 사상 압연에 대한 개선된 학습 제어의 현장 적용 연구

정 오성, 백 기남, 허 명준, 최 승갑, 정 해연  
산업과학기술연구소 제어연구부, 포항제철 열연1부

A Study of the Application of an Improved Learning Control on the Finishing Mill in No.2 Hot Strip Mill plant in POSCO

Ho-Seong Jeong, Ki-Nam Paek, Myung-Joon Hur, Seung-Gap Choi, Hae-Yeon Jeong  
RIST Control Research Lab., POSCO No.1 Hot Rolling Dept.

ABSTRACT

The main purpose of Set-up control of hot strip mill plant is to obtain the most regular thickness. Then the learning or adaptive computer control in hot strip rolling mill has been developed. But it is very difficult to keep the inter-stands load distribution ratio uniform; so that the deviation of strip flatness is not avoidable. This leads to the degradation of quality of the products.

In this report, an improved method base on the steepest descent method including the computation of optimum step size. This method is applied to the off-line simulation. In consequence, the better balances of inter-stands load distribution is achieved in addition to improvements of output thickness of hot strip mill in POSCO.

1. 서론

현재 열연 제품의 생산은 제품의 고附加價値 획득을 위해 폭상강종 및 큰 변형저항 값을 가진 재료를 압연하는 비율이 점차 증가하고 있으며 보다 얇고 보다 넓은 폭의 열연 코일 생산이 증가하는 추세에 있다. 아울러 수요자의 제품치수 정도에 대한 요구도 날로 높아지고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위해서 포항제철에서는 일차기 計算機 制御가 도입되었다. 하지만, 계산기 제어에 의한 제품의 價數 精度는 전적으로 계산기 제어용 각종 수식 모델의 정도에 따라 좌우된다고 해도 과언이 아닐 것이다. 따라서 계산기 제어에 의한 제품의 치수정도 향상을 위한 방안으로 학습 등을 통한 계산 정도의 향상을 꾀하고 있다.

포항제철의 열연공장 사상압연 Set-up 제어에서는 Set-up 모델에 의한 계산 결과와 실적치를 비교하여 그 오차를 감소시키는 방향으로 數式 모델을 修正하고 있다. 사상壓延 Set-up의 目的은, 2熱延의 경우 첫번째 스탠드로부터 마지막 스탠드까지의 각각의 압연기에 대해 良好한 適板性을 제공하게 될 基準值를 設定하며, 압연기 출구에서의 板厚를 正確히 實現하는 것이므로 열연 코일의 치수 정도에 직접적인 영향을 미치게 된다.

포항제철에서는 Roll의 열팽창 및 마찰로 인한 Roll 간격의 변화에 따른 판후 誤差를 補正하기 위하여 單習을 하며, 그 방법으로는 指數平滑法을 사용하고 있다. 그러나, 압연하중 모델 학습시, 오차를 포함한 판후를 사용하게 되므로, 변형저항의수정계수가 실제와는 달라지게 되며, 압연 하중 계산치의 스탠드간 負荷 均衡이 무너지 수 있으므로 다른 학습 방법이 필요해진다.

본 연구에서는 스탠드간 負荷 均衡과 각 스탠드 出口에서의 板厚 精度를 모두 포함하는 적절한 目的函數를 선정하여 이 목적함수를 最小化하는 壓延荷重을 계산해내어 판후의 치수 정도 뿐만 아니라 각 스탠드간 부하 균형을 유지할 수 있는 방법을 도출해내어, 2열연 사상압연 라인에 대해 off-line 시뮬레이션을 통하여 實工程에서의 適用 可能性을 調査하여, 實操業에 適用할 수 있는 基礎를 確立하였다.

2. 現 板 두께 制御用 數式 모델

POSCO Set-up 모델의 계산 과정에서는 각 스탠드의 速度와 出側 板厚가 決定된 以後, 재도의 변형에 필요한 壓延荷重을 각 스탠드에서 구해낸다. 압연 하중 모델식은 POSCO 2열연에서도 사용되는 Sims 모델이며 다음과 같다.

P = K · W · Ld · Qp (1)

k = S + P / M (2)

여기서, 위 식에서의 常數 및 變數값들은 다음과 같다. P는 壓延荷重을 나타내며, 단위는 ton이다. K는 變型抵抗이며, 단위는 ton/mm<sup>2</sup>이다. W는 壓延材의 幅으로서 단위는 mm이다. Ld는 압연 Roll과 압연재의 接觸 長이를 나타낸다. 또 Qp는 壓下力의 函數이다. k는 압연재의 출속 판후이며, 단위는 mm이다. S는 압연재가 압연되기 전의 Roll간격으로 단위는 mm이다. 그리고 M은 압연 Roll의 밀 정수(Mill Modulus)이며, 단위는 ton/mm이다. 위의 값들에 대한 상세한 식은 실프로세스 제어에 직접 사용되지는 않으며, 대개 근사화된 실험식을 사용한다. 압연 Roll 간격 初期值 推定時에 앞서 나온 Sims의 모델이 사용되기는 하지만, 압연 진행중에 Roll간격을 조정하는 경우에는 계산 시간의 문제 등 여러 가지 문제점으로 Sims식을 그대로 사용하지 않고 다음과 같은 線型化된 數式을 사용한다.

P = Q (H - h)
k = s + P / M

2.1. 각 스탠드 出團 板厚 決定 方法

목표로 하는 압연 코일 두께를 얻기 위한 각 스탠드 압하량의 결정은 각 스탠드 負荷 配分比를 기준으로 한다. 이렇게 하는 이유는 특정한 스탠드의 부하가 극도로 커지게 되어 실질적으로 압연가능한 범위를 제한할 수 없으므로, 미리 각 스탠드의 주전동기의 용량에 거의 맞도록 부하 배분을 하며, 또한 각 스탠드의 압하량은 適板性 및 strip의 形狀에 직접 영향을 미치므로, 여러 가지 목표 판후에 대해서 각 스탠드별로 거의 같은 부하 배분비를 갖도록 하기 때문이다. 임의의 한 스탠드에서의 필요한 power를 구해보면 다음과 같이 된다.

$$P = K \cdot \ln \frac{k_{i-1}}{k_i}$$

이 성립된다. 여기서, K는 임의의 상수이다. 그러나, 실제로 변형이 진행되면 변형저항이 커지므로, 위 식 도출시 가정했던 장력-두께의 비례 관계가 깨어지게 되므로 실제로는 近似式을 사용한다.

2.2. 각 스탠드의 速度 決定과 power check

mass-flow 일정의 법칙에 의해, 각 스탠드에서의 출속 판 두께와 각 스탠드의 속도를  $k_i, V_i$ 로 두면,

$$k_1 \cdot V_1 = k_2 \cdot V_2 = \dots = k_7 \cdot V_7$$

이 성립된다. 따라서 i번째 스탠드의 速度  $V_i$ 는

$$V_i = \frac{k_7}{k_i} \cdot V_7$$

이 된다. 그러나, 각 스탠드의 Roll의 回轉數는 산진율, 실조업에의 압하율, 압연온도, 윤활조건에 따라 결정되므로 近似式을 사용하고 있다. 압연에 필요한 power는 각 mill 전동기의 허용 부하이내에 있을 필요가 있으며, 각 스탠드의 속도가 구해진 시점에서 power check를 한다. 世上 Mill Motor는 直流 電動機로서 速度 制御는 Ni-Nbse 경우 電壓 制御를 하고, Ni-Sbse 인 경우 界磁 制御를 하고 있다. AGC에서는 통판시 속도를 최대 속도 이하에서 약간의 여유를 남기는 것이 필요한 것으로 되어 있다. 즉 각 스탠드의 속도의 상한을 초과할 경우에는 부하 균형을 변경시켜 각 스탠드의 회전비를 변경시켜 재설정을 할 필요가 있다.

2.3. 壓延 荷重 모델의 學習

압연 하중 모델은 앞서의 식(1)과 같다. 압연 하중 모델의 학습에는 압연 하중의 계산 오차가 變型 抵抗의 計算 誤差에 의해 생기는 것을 고려하여, 변형 저항의 계산치를 修正한다. 즉 변형 저항의 수정 계수를  $kc$ 로 두면, 학습후의 압연 하중 계산치는 다음과 같이 된다.

$$P_c = kc \cdot P$$

여기서의 P는 식(1)의 P이다. 또한 수정 계수  $kc$ 의 계산 방법은 다음과 같은 지수평활법에 의한다. 즉,

$$kc = \alpha \cdot kc^{(t-1)} + (1-\alpha) \cdot Pa / (ka \cdot Wa \cdot Lda \cdot Qpa)$$

이다. 위 식에서  $kc^{(t-1)}$ 은 前回 壓延에서의 修正 係數이고,  $kc$ 는 今回 壓延에서의 修正 係數이다. 또  $\alpha$ 는 指數 平滑 利得, 나머지 각 항들에 있는 첨자  $a$ 는 각 항들에 대한 前回 壓延에서의 實績值이다. Lda식에 내부에 Roll gap 및 압연 하중 實績值  $Se, Pa$ 를 가지고 있으며, gauge meter식에 의해 계산한 각 스탠드에서의 판후  $hc, i$ 를 가지고 있다.  $dHo$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$dHo, i = hc, i - hc, i-1$$

2.4. Gauge meter의 學習

각 스탠드의 出團 板厚는 다음과 같은 gauge meter식으로 계산을 한다.

$$kc = S + \frac{P}{M}$$

판후 계산 오차의 주요 원인은 Roll의 열팽창 및 마찰에 의한 Roll간격의 변화 등이므로, 이 誤差를 補正하기 위해서 학습을 한다. Roll 간격 보정량을 OFFSET으로 두면, 학습후의 판후 계산치는

$$kc = S + \frac{P}{M} + \text{OFFSET}$$

이 된다. 보정량 OFFSET의 계산 방법은 다음과 같은 지수 평활법에 의한다.

$$\text{OFFSET} = \rho \cdot \text{OFFSET} + (1-\rho) \cdot (ka \cdot Sa - \frac{Pa}{M})$$

이다. 여기서 OFFSET은 前回 壓延에서의 補正量, OFFSET은 今回 壓延에서의 補正量,  $\rho$ 는 指數 平滑 利得이다.  $ka$ 는 F7 스탠드 출속 X-ray 實測 板厚와 각 스탠드의 壓延 速度를 포함하고 있으며, mass-flow가 일정하다는 가정하에 계산하여 구한 값을 사용한다.

2.4. 既存 學習 方法의 問題點

기존 학습 제어 방법에는 다음과 같은 문제점이 있다. 첫째, 압연 하중 모델 학습시 변형 저항만을 수정하고 있으며, 식에 나타난 바와 같이 판후는 실질적으로 나타나지 않고, 板厚 모델에 의한 計算值를 사용하고 있으므로 誤差를 포함하고 있다고 봐야 할 것이다. 둘째, 판후 모델 학습시 mass-flow 일정의 법칙이 적용된다는 가정하에 계산한 판후가 올바르게 생각되고 계산을 하고 있다. 그러나, mass-flow 일정의 법칙이 항상 성립하는 지를 알 수 없다. 또한, mass-flow 일정의 법칙을 적용하여 판후 계산을 할 경우 적용되는 先達率의 값이 不正確하면 板厚 計算에 誤差가 생긴다. 셋째, 壓延 荷重 모델 학습시에 誤差를 포함한 板厚를 가지고 계산을 하게 되므로 실제 적용되어야 할 변형 저항의 수정 계수가 아닌 다른 값으로 계산된다. 따라서 압연 하중 모델의 정도 향상이 어렵게 되며, 압연 하중 계산치의 스탠드간 균형이 무너지게 된다.

3. 改善된 學習 方法의 現場 適用性 調査

개선된 학습 방법은 각 스탠드간 부하 균형과 판후 정도를 동시에 평가할 수 있는 目的 函數를 (3)식과 같이 선정하여, steepest descent 방법을 사용하여 이 목적 함수를 最小化함으로써 우리가 원하는 제어를 할 수 있다. 이것을 정성적으로 풀어보면, 식(3)은 계급함들의 합이므로 아래로 볼수록 2차 함수의 꼭지점이 되는 것이며, 이 점을 찾아내는 것이 본 연구의 주안점이 되는 것이다.

$$J = \sum_{i=1}^7 (\frac{Pa, i}{Pc, i} - 1)^2 + \sum_{i=1}^6 \lambda_i (\frac{Pa, i}{Pc, i} - \frac{Pa, i+1}{Pc, i+1})^2 \quad (3)$$

식(3)을 보면, 첫 항은 각 스탠드에서의 실제 압하력과 계산 압하력의 비에서 1을 뺀 것이므로, 실제 압하력과 계산 압하력이 같다면 0이 될 것이다. 따라서 첫 항은 각 스탠드별 壓下 精度를 체크하는 항이다. 그리고 두 번째 항을 보면 알 수 있듯이 합이 6번 이뤄지게 되어 있다. 이것은 각 스탠드간의 負荷 均衡을 나타내고 있는 것이다. 각 스탠드별로는 압하 정도가 높다고 하더라도, 즉

(실적치/계산치)의 값이 잘 맞더라도, 압하력이 실제 압하력이 계산 압하력을 중심으로 아래-위로 변화하면 負荷 均衡 상에 문제가 발생하게 된다. 이것을 수식을 통해 알아보면 다음과 같이 된다. 우선  $i$ 번째 스탠드와  $(i+1)$ 번째 스탠드에 대해 實入出側 板厚를  $H_i, h_i, H_{i+1}, h_{i+1}$ 로 두고서  $i$ 번째 스탠드의 출속 계산치가  $\Delta h_i$ 만큼 참값로부터 벗어나 있는 경우를 생각해 보기로 한다. 만약 인 경우는  $i$ 번째 스탠드와  $(i+1)$ 번째 스탠드의 압하력은 식 (4), (5)와 같은 관계식으로 표현될 수 있을 것이다. 반대의 경우에는 부동호만 바뀌게 될 것이다. 따라서(3)식의 두번째 항의 의미는 자명해진다.

$$P_{c,i,i} = F_i (H_i^2, h_i^2 + \Delta h_i) < F_{i+1} (H_{i+1}^2, h_{i+1}^2) = P_{c,i+1,i} \quad (4)$$

$$P_{c,i,i+1} = F_{i+1} (h_{i+1}^2 + \Delta h_i, H_{i+1}^2) > F_{i+1} (h_{i+1}^2, H_{i+1}^2) = P_{c,i+1,i+1} \quad (5)$$

여기서의 함수  $f_i(H_i, h_i)$ 는 식(6) 을 의미한다.

$$f_i(H_i, h_i) = W_i \cdot K_i \cdot \sqrt{R_i \cdot \Delta H_i \cdot Q_{p,i} \cdot k_{c,i}} \quad (6)$$

식 (3) 에 대한 最適解를 구하는 논리는 그림1의 flow chart에 상세하게 나타내었다.

그림2부터 4까지는 本 研究의 방식에 따른 結果值와 既存의 방식에 의한 結果值를 比較하고 있으며, 각 그림에서 실선으로 표시된 부분이 기존의 학습 방식에 의한 각 스탠드별 압연 하중의 오차를 %로 나타낸 것이며, 2점 세선으로 쌓여 있고 그 내부는 점들로 이뤄진 것이 개선된 방식에 의한 것이다. 먼저 그림2는 기존의 방식에 의하여 목표 출속 두께 3720 $\mu$ m에 실적치가 3 $\mu$ m 오차가 생긴 좋은 경우이며, 두께가 적중만 경우에 해당된다. 이때의 bar두께는 35800 $\mu$ m이다. 그리고 개선된 방식에 의한 실적은 목표 두께 1750 $\mu$ m에 실적치가 1748 $\mu$ m로 역시 두께는 적중된 경우이며, loop limit를 걸지 않았으며, 이때 10회의 looping을 하였다. 그리고 目的 函數값이 0.865145에서 0.860456으로 減少하였다. 이 두 가지 경우에 대해 스탠드별 하중 오차의 퍼센트를 總對值로 위하여 疊算하여 比較해 보면, 그림과 영오차선이 이루는 面積을 구해보면, 負荷 均衡의 정도를 대략 알 수 있게 될 것이다. 이 값을 나타낸 것이 표1이다. 그림3의 조건은 기존 방식의 경우 bar두께 35400 $\mu$ m, 목표판두 3030 $\mu$ m, 실적 판두 2900 $\mu$ m이다. 그리고 개선된 방식에 의한 경우는 목표판두 1710, 실적판두 1704로서 두께 정도면 뿐 아니라, 표1에 나타난 부하 균형면에서도 우수한 점을

보이고 있다. 따라서 목적 함수값도 0.857991에서 0.836720으로 그림5에 비해 많이 감소하였다. 이 경우도 그림2의 경우와 같이 loop limit가 걸리지 않은 상태이다. 그림4의 조건은 기존 방식의 경우 목표 두께 1650 $\mu$ m에 아주 잘 적중만 경우이다. 개선된 방식의 경우에도 목표 두께 1650 $\mu$ m에 잘 적중하고 있으며, loop limit를 걸어 looping을 4회 실시한 걸과이지만, 목적 함수가 0.85145에서 0.857934로 감소하였으며, 표1에 나타난 바대로 負荷 均衡面에서 優秀한 점을 보이고 있다. 이상에서 알 수 있는 바와 같이 개선된 방식의 경우 loop limit가 있는 경우에도 기존 방식보다는 우수한 성능을 보이며, 그림2와 3과 같이 기존 방식보다 박판인 경우에 대해서도 개선된 방식이 오히려 학습 제어 성능이 나아짐을 발견할 수 있다.

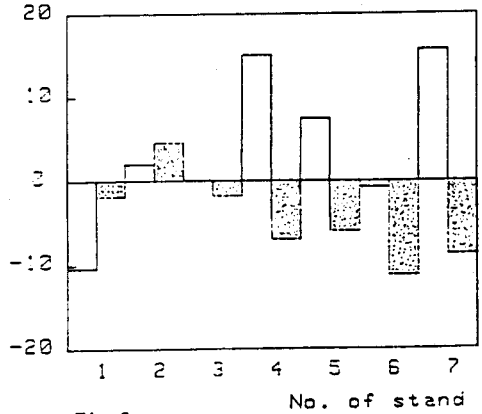


Fig.2

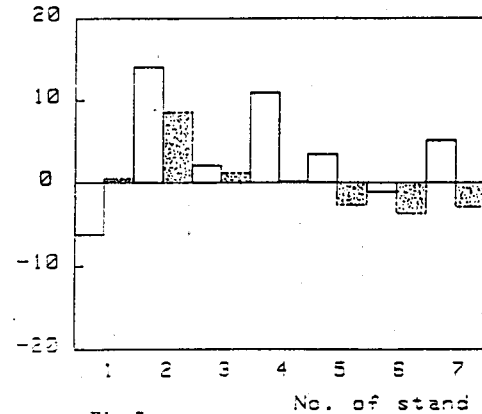


Fig.3

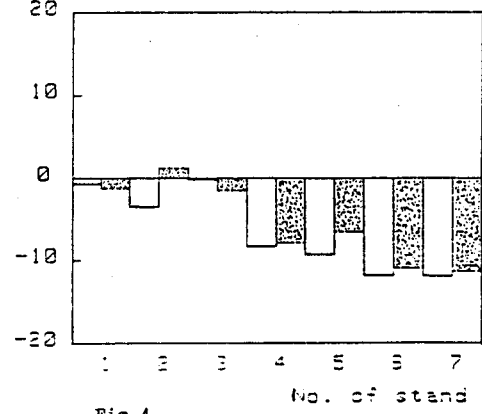


Fig.4

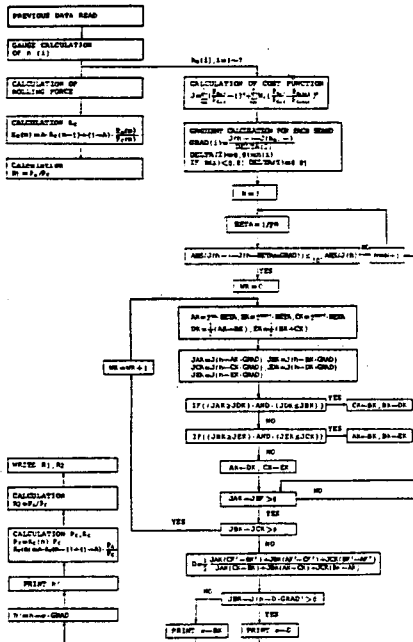


Fig. 1. Detail Flow Chart of Improved Method

	by conventional method	by improved method
Fig.2	51.41	41.31
Fig.3	43.01	19.716
Fig.4	45.481	40.6

Table 1. Comparison between results by conventional and improved method

4. 結論

본 연구에서는 2熱延 仕上板延 設定 모델의 演算 方式에 最適制御 理論을 導入한 學習 方式에 대해 現場 適用性을 調査한 결과 다음과 같은 結論을 얻게 되었다.  
 즉, off-line 시뮬레이션 결과 負荷 均衡과 板厚 誤差를 동시에 포함하는 目的函數의 도입으로 스펀드간 負荷 均衡이 改善되었고, 본 연구에서 제시한 학습 方式이 포함되어 있는 Subroutine이 동작될 때에도 現場 계산기에 미치는 時間上의 問題는 거의 없는 것으로 判明되었다. 따라서 본 研究의 結果에 대한 實操業 適用은 2熱延 新設化가 完成되는 時点에서 loop limit 및 再計算을 필요로 하는, 즉, 安眠 하중식, gauge meter식 등의 서브루틴을 數次 呼出할 때 on-line real time 관련 사항 동안 再檢討하면, 適用上 별 문제가 없을 것이다.

참고문헌

1. 森田 權外 3人, "熱延仕上げミルにおける新しい先端板厚制御方法", 神戸製鋼技報, Vol.33, No.1, 1983, pp61-65
2. H.W.Seyfried, D.Ströle, "Application of adaptive control in rolling mill area, especially for plate mills", Proc.6th IFAC World Congress, Boston, 1975, pp.1-8
3. T.Katayama, T.Merita, M.Konish, "An adaptive computer control in hot strip rolling", IFAC Control Science and Technology(8th Triennial World Congress) Kyoto, Japan, 1981, pp.2495-2500
4. M.Atkens, M.L.Dertouzos, R.N.Spann, S.J.Mason, Systems, Networks, and Computation: MUTIVARIABLE METHODS, Mc Graw-Hill, New York, 1974
5. R.W.Daniels, An Introduction to Numerical Methods and Optimization Tecnicques, North-Hollands, New York, 1978