

〈논 문〉

## 연속냉간압연기 제어모델의 적응수정방법에 관한 연구

이 원 호\* · 이 상 룡\*\*

(1996년 4월 10일 접수)

### A Study on the Adaptive Method of Control Model for Tandem Cold Rolling Mill

W. H. Lee and S. R. Lee

**Key Words :** Tandem Cold Rolling Mill(연속냉간압연기), Control Model(제어모델), Adaptive Method(적응수정방법), Rolling Force(압연하중), Friction coefficient(마찰계수), Flow Stress(변형저항)

#### Abstract

The control model in the tandem cold rolling mill consists of many mathematical theories and is used to calculate the reference values such as the roll gap and the rolling speed for good operation of rolling mill. But, the control model used presently has a problem causing inaccurate prediction of the rolling force. By the parameter identification, it was found that the main factor causing inaccurate prediction of the rolling force was incorrect modeling of the friction coefficient and the flow stress. To get rid of the erroneous factor new adaptive schemes are suggested in this work. Those are a long-time adaptation by the iterative least-square method and a short-time adaptation by the recursive weighted least-square method respectively. The new equations for the friction coefficient and the flow stress are derived by applying the suggested adaptive algorithms. Through the on-line test in an actual mill, it is proved that the rolling force predicted by the new equations is more accurate than the one by the existing equations ever used.

#### 기호설명

$B$	: 판폭 (mm)	$R$	: 압연롤의 반경 (mm)
$C_1, C_2, C_3, C_4$	: 기존의 마찰계수 예측상수	$r$	: 압하율
$C_0, C_v, C_L$	: 새로운 마찰계수 예측상수	$S_R$	: 롤갭 (mm)
$H, h$	: 압연기 입·출측 판두께 (mm)	$t_b, t_f$	: 입·출측 단위장력 (MPa)
$K$	: 압연기의 강성계수 (MN/m)	$V, v$	: 압연기 입·출측의 판속도 (m/s)
$K_T$	: 스탠드간의 장력보정항	$V_R$	: 압연기 롤의 회전속도 (m/s)
$k$	: 냉간변형저항 (MPa)	$Z_p$	: 적응수정계수
$L$	: 총 압연길이 (km)	$\epsilon$	: 대수변형률
$l, m, n$	: 변형저항 예측상수	$\mu$	: 마찰계수
$P$	: 압연하중 (MN)		

#### 1. 서 론

\*회원, 포항제철(주) 기술연구소

\*\*회원, 경북대학교 기계공학과

최근에는 자동차, 건축 및 가전제품을 만드는 데

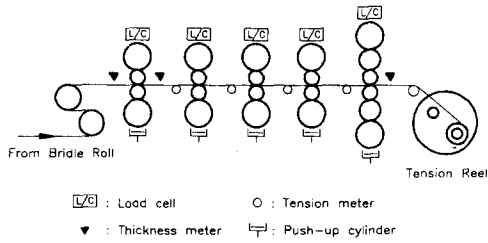


Fig. 1 Configuration of the tandem cold rolling mill

사용되는 냉간압연판을 Fig. 1과 같은 4~5개의 압연기를 연속 배치한, 소위 연속냉간압연기(tandem cold rolling mill)에서 생산한다. 연속냉간압연기는 하나의 압연기만을 가진 역전식 냉간압연기(reversing cold rolling mill)에 비해 생산성이 높은 반면, 압연속도가 빠르고 전후 압연기사이에서 작용되고 있는 압연판내의 장력이 압연판의 품질에 영향을 주기 때문에 공정제어가 대단히 까다롭다. 따라서 대부분의 연속냉간압연기는 빠른 연산속도와 높은 정확도를 갖는 공정제어 컴퓨터(process computer)에 의해 자동제어되고 있다. 이들 공정제어 컴퓨터를 이용하여 실제의 압연기를 구동시키기 위해서는 제어모델(control model)이라고 하는 소프트웨어가 필요하다. 제어모델은 생산자가 원하는 제품이 생산될 수 있도록 압연기의 구동조건을 결정해 주고, 압연작업중 상황의 변화에 따라 설비의 운용조건을 적절히 변경시켜 주는 기능을 갖고 있다.

냉간압연에서 사용되는 제어모델은 오랜 기간 많은 연구<sup>(1-5)</sup>를 통해 얻어진 여러 가지 압연이론식을 바탕으로 기본모델(basic model)이 만들어지며, 실제의 압연기에 적용하기 위해서는 해당 압연기의 특성에 맞도록 기본모델을 적절히 변형하여 사용하고 있다. 제어모델은 이론수식을 바탕으로 만들어지기 때문에 수식모델(mathematical model)이라 부르기도 한다. 만약 정확하지 못한 수식모델에 의해 계산된 제어량을 기준으로 압연을 실시하게 되면 예측된 상황과 동떨어진 결과, 즉 제품의 품질 저하를 초래하게 될 것이다.

한편, 냉간압연판의 품질을 좌우하는 가장 중요한 요소로 압연판의 길이방향 두께정밀도가 있다. 이것은 수요가의 입장에서는 주문한 냉간압연판이 두께편차가 얼마나 작으나 하는 것을 의미하며, 생산자의 입장에서는 냉간압연 코일(coil)의 전체길이에 걸쳐서 어느 정도나 정확한 두께로 생산해내

느냐 하는 것을 의미하는 중요한 기준이 된다. 예를 들면, 수요가가 요구하는 정밀도는 두께편차  $\pm 1\%$ 로서 두께가 0.3 mm인 냉간압연판의 경우 편차가  $\pm 3 \mu\text{m}$  이내에 들 수 있어야 하고, 생산자는 최대의 생산량을 얻기 위해 전체 길이의 95% 이상을 수요가가 요구하는 편차범위 이내로 두께제어를 해야 한다.

따라서 이러한 엄격한 기준에 맞도록 두께제어를 하기 위해서는 해당 압연기의 특성이 잘 반영된 정확한 제어모델의 개발이 전제가 되어야 하며, 실제 압연기에의 적용시에는 모델링시에 고려되지 못한 요인이나 수식화과정에서의 오류 등에 의해 발생될 수 있는 부정확성을 보완할 수 있는 수단을 갖추고 있어야 한다. 제어모델의 부정확에 의해 발생될 수 있는 오류를 최소화하기 위한 수단으로서는 제어모델에 대한 자기학습(self learning) 기능이나 적응수정(adaptation) 기능<sup>(6)</sup>을 부여하는 것 등이 있을 수 있다.

최근의 냉간압연제품에 대한 경박단소화(輕薄短小化) 추세는 생산자의 입장에서는 보다 정밀한 두께제어 수단을 갖추지 않으면 안되게 되었다. 이는 새로운 제어설비, 즉 하드웨어(hardware)에 대한 설비투자는 물론 새로운 환경에 대응할 수 있도록 하는 보다 정확한 제어모델을 필요로 하게 되었다. 제어모델의 경우, 기존의 제어모델이 갖고 있는 모델화 과정에서의 오류를 보완하거나 모델화 과정에서 고려되지 않았던 요인들을 충분히 반영하여 보다 실제상황에 잘 맞도록 개선해 주어야 한다. 그러나 많은 경우의 냉간압연공장에서는 설비투자에 걸맞도록 제어모델의 정확도를 향상시키고자 하는 적극적인 노력보다는, 두께편차가 발생된 부분을 스크랩(scrap)으로 처리하는 소극적인 대응에 그치고 있어서 실수율(yield ratio) 하락의 요인이 되고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 냉간압연제품 생산환경의 변화에 대응하는 보다 정확한 제어모델을 얻기 위해 새로운 적응수정 알고리즘을 제안하였다. 연속냉간압연기를 대상으로 인자분석(parameter identification) 기법을 써서 제어모델을 구성하고 있는 개별 수식모델의 적합도를 검증하였고, 반복 최소자승법(iterative least-square method)이라고 하는 장기적인 적응수정방법(long-time adaptive algorithm)을 사용하여 기존의 모델에서는 고려되지 않았던 중요한 인자를 반영하여 보다 정확한 제어모

델을 구성하였다. 또한 새로운 모델의 실제 플랜트 적용시에도 정확도를 확보하기 위해 단기적인 적응수정방법(short-time adaptive algorithm)의 하나인 순차적 가중치 최소자승법(recursive weighted least-square method)을 적용해 보았다. 이들 두가지의 적응수정방법을 실제의 연속냉간압연기 제어모델에 적용한 결과 대단히 우수한 모델정확도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

## 2. 냉간압연기의 제어모델

### 2.1 냉간압연기의 제어모델

Fig. 2는 냉간압연기의 롤 간극(roll gap)을 중심으로 추후 설명하게 될 여러가지 변수와 압연기간의 관계를 도식적으로 나타내는 그림이다. 연속냉간압연기의 자동제어를 위해 결정되어야 할 가장 중요한 인자로는 각 압연기의 롤 간극  $S_R$ 과 압연속도(rolling speed)  $V_R$ 이 있다. 롤 간극은 압연판의 소성변형은 물론 압연하중에 의한 압연기의 탄성변형을 고려하여 결정되어야 하며, 압연속도는 각각의 압연기 사이에 존재하는 압연판이 체적일정법칙(mass flow constant rule)이 만족되도록 결정되어야 한다. Fig. 3은 냉간압연기 제어모델의 구성도이며, 그림에 나타난 순서에 따라 차례로 계산해 나가면 원하는 두께의 압연판을 생산하기 위한 압연기의 롤 간극과 속도를 결정할 수 있다. Fig.

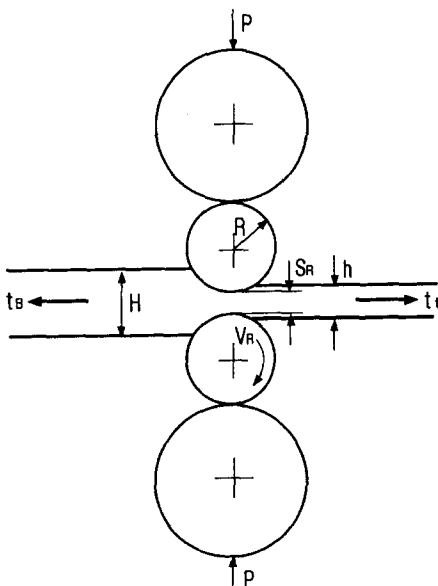


Fig. 2 Physical model of cold rolling process

3에 표시된 여러 단계의 계산과정에 사용된 수식들은 전술한 바와 같이 압연이론식을 바탕으로 구성된 것이고, 이들중 본 연구에서 대상으로 하는 중요한 이론 식만을 간단히 요약하면 다음과 같다.

압연하중 예측식 냉간압연 제어모델에서의 압연하중 예측식은 Bland와 Ford<sup>(2)</sup>가 만든 식을 연속냉간압연기에 적용하기 위해 스탠드간 장력 보정항  $K_T$ 를 고려한 다음과 같은 식이 사용된다.

$$P = B \cdot k \cdot K_T \cdot D_p \cdot \sqrt{R(H-h)} \quad (1)$$

윗식에서  $D_p$ 와  $K_T$ 는 각각 다음과 같다.

$$D_p = 1.08 + 1.79 \cdot \mu \cdot r \cdot \sqrt{1-r} \cdot \sqrt{\frac{R}{h}} - 1.02 \cdot r \quad (2)$$

$$K_T = \left(1 - \frac{t_b}{k}\right) \cdot \left\{1.05 + 0.1 \frac{(1-t_f/k)}{(1-t_b/k)} - 0.15 \frac{(1-t_b/k)}{(1-t_f/k)}\right\} \quad (3)$$

롤 간극 계산식 롤 간극은 압연하중에 의한 압연기의 탄성변형을 고려한 다음 식으로 구해진다.

$$S_R = h - \frac{P}{K} \quad (4)$$

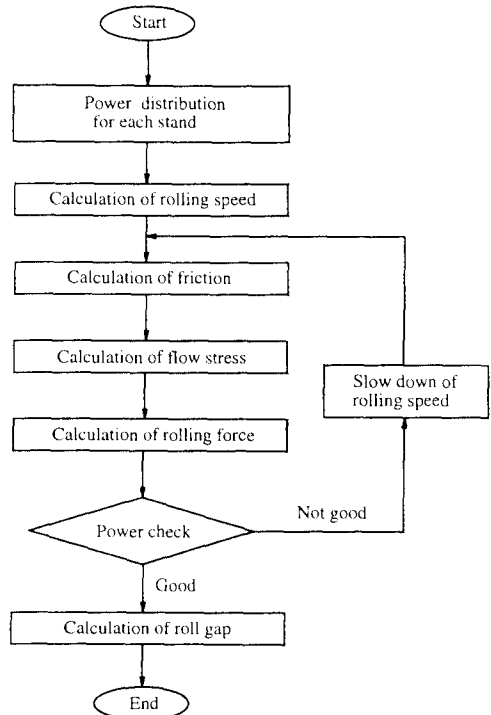


Fig. 3 Skeleton of control model for cold rolling mill

압연판 속도식 모든 스탠드(stand)에서 압연판의 속도는 압연기 입 출측에서 체적일정법칙인 다음의 식이 만족되도록 결정되어야 한다.

$$v = \frac{H}{h} V \quad (5)$$

2.2 모델 재조정의 필요성

제어모델에서의 궁극적인 계산목표인 롤 간극을 계산하는 식 (4)는 선형방정식이므로 압연하중 P 만 결정되면 간단히 구해질 수 있다. 그러나 식 (1)의 압연하중 예측식은 비선형방정식이므로 복잡한 과정을 거쳐 계산되고, 포함된 변수도 많아서 냉간압연 제어모델의 정확도는 압연하중 예측식의 정확도에 의해 좌우될 것이다. 따라서 압연하중 예측식을 냉간압연 제어모델이라 해도 과언이 아니다. 압연하중 예측식을 구성하고 있는 식 (1) 중에서 압연하중 계산의 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 마찰계수(friction coefficient)와 변형저항(flow stress)이다. 이와 같은 중요성에도 불구하고 이들의 크기를 측정하는 방법이 전무하므로 실제값을 확인할 수는 없고, 다만 이론식을 사용하여 계산된 추정값으로 압연하중을 계산하고 있을 뿐이다. 그러나 현재 사용중인 이들 두 변수에 대한 예측식은 물리적인 현상을 적절히 반영하고 있지 못하여 부정확한 압연하중 계산의 원인이 되고 있어서 보다 정확한 예측식을 필요로 하고 있다.

2.2.1 마찰계수 예측식의 문제점

마찰계수를 정확하게 구해 보고자 하는 많은 연구(7~9)가 오랫동안 진행되었지만 정확하고 일반화된 예측식은 아직까지 구해지지 않고 있다. 현재 냉간압연기의 제어모델에서 사용되고 있는 마찰계수의 일반적인 예측식은 식 (6)으로써 압연속도만의 함수로 되어 있다.

$$\mu = C_1 \cdot \left( C_2 + \frac{C_3}{C_4 + V_R} \right) \quad (6)$$

Fig. 4는 식 (6)에 의해 계산된 마찰계수와 압연시 작용된 실제값에 근사한 마찰계수를 비교한 결과이다. 실제값에 근사한 마찰계수는 식 (1)~(3)으로부터 역산한 마찰계수에 압연시 측정된 압연하중을 대입하여 구할 수 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 현재 사용중인 마찰계수 예측식이 실제값과 상당히 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 식 (6)을 사용하여 마찰계수를 계산하게 되면 식

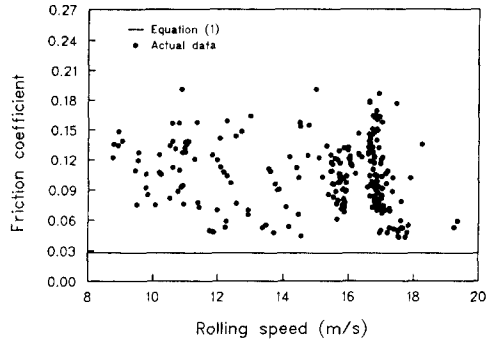


Fig. 4 Comparison of the actual friction coefficient and estimated one by existing equation

(1)의 압연하중 계산시에 큰 오차가 발생될 것이라 쉽게 짐작할 수 있다.

최근의 연구(10)에 의하면 마찰계수는 압연속도 뿐만 아니라 압연롤의 표면상태, 압연유의 종류 그리고 압연유 분사량 등에 의해 영향을 받고 있음이 밝혀졌다. 이들 중 압연유의 종류나 분사량은 설비의 고도화에 따라 일정하게 제어하는 것이 가능하므로 그다지 큰 문제가 되고 있지 않다. 그러나 롤의 표면상태는 롤의 사용량에 따라 달라지게 된다. 즉, 압연중 롤은 동일 위치에서 압연소재와 직접 접촉하면서 계속하여 수습-수백 코일이 압연되면서 지나가므로, 최초에 연삭된 상태로부터 상당량의 압연이 진행된 상태에서는 표면의 거칠기가 감소되어 마찰계수가 감소하는 경향을 나타내는 것이 일반적인 현상이다. 또한 롤이 연삭되어 있던 최초의 표면상태도 마찰계수에 큰 영향을 주게 된다. 예를 들어 표면이 거친 덜-롤(dull-roll)의 경우에는 압연량이 증가함에 따라 표면조도가 급격히 감소되며, 이에 따라 마찰계수도 감소하게 된다. 참고로, 냉간압연에서는 도장성(printability)을 높일 목적으로 필요에 따라 제품의 표면에 미소한 요철을 생성시키기 위해 덜-롤을 사용하는 데, 롤 표면의 요철생성에는 레이저 가공이나 쇼트-피닝방법을 사용한다. 그 외 대부분의 냉간압연판은 연삭된 상태의 롤, 즉 브라이트-롤(bright-roll)을 사용하여 생산하게 된다.

따라서 본 연구에서는 마찰계수의 물리적인 특성인 압연속도 및 압연량의 증가에 따른 마찰계수의 감소를 고려한 다음과 같은 형태의 식을 사용하였다.

$$\mu = C_0 \cdot e^{C_1 \cdot V_R + C_2 \cdot L} \quad (7)$$

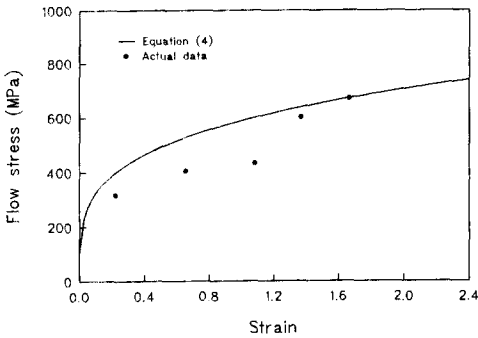


Fig. 5 Comparison of the actual flow stress and estimated one by existing equation

윗 식에서  $L$ 은 압연량을 나타내는 인수로서 연삭된 새로운 롤이 사용된 이래로 압연을 실시한 코일의 총 압연길이를 나타낸다.

2.2.2 변형저항 예측식의 문제점

변형저항은 재료의 가공경화 특성을 나타내는 값으로써, 압연될 소재의 고유상수이다. 냉간압연에서의 변형저항  $k$ 는 대수변형률(logarithmic strain)  $\epsilon$ 의 함수이며, 일반식은 다음과 같다.

$$r = 1 - \frac{h}{H} \tag{8}$$

$$\epsilon = \ln \frac{1}{1-r} \tag{9}$$

$$k = l \cdot (m + \epsilon)^n \tag{10}$$

전술한 바와 같이 변형저항은 압연될 재료의 가공경화 특성을 나타내므로 소재의 종류에 따라 그 특성이 크게 달라지며, 압연하중의 크기에 직접적인 영향을 준다. Fig. 5는 WU5ATI라고 하는 일반 탄소강에 대해 현재의 제어모델에서 사용되고 있는 변형저항 예측식 (10)에 의해 계산된 값과 압연하중으로부터 역산된 실제의 변형저항을 비교한 것으로서 변형저항 예측식의 정확도가 상당히 낮음을 볼 수 있다. 그러나 변형저항의 경우에는 마찰 계수와는 달리 물리적인 특성, 즉 가공경화 특성은 비교적 잘 반영되어 있으므로 기본적인 식 (10)의 형태는 유지한 채, 예측식의 계수인  $l, m, n$ 만을 각 강종에 맞게 수정해도 무방함을 알 수 있다.

3. 연구방법

3.1 제어모델의 재조정 및 적응수정방법

냉간압연기의 제어모델과 실제 플랜트와의 관계

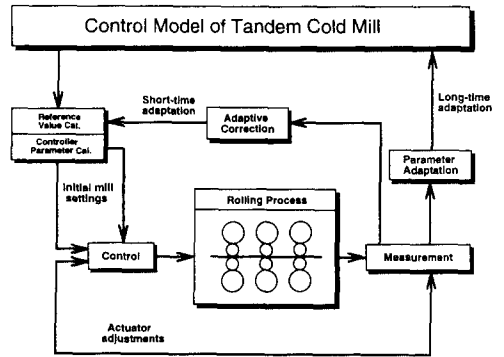


Fig. 6 Relationship between control model and cold rolling process

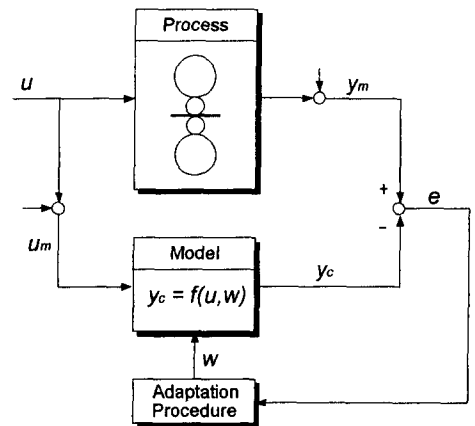


Fig. 7 Principle of the parameter adaptation of control model

를 그림으로 나타내어 보면 Fig. 6과 같다. 압연 전에 수식모델에 의해 계산된 초기 설정치(reference value)로 압연기를 구동시키고, 압연된 결과는 각종 센서를 통해 측정되며, 측정된 결과로부터 최초로 설정된 값이 실제의 결과와 잘 일치하는 지를 판단할 수 있다. 만일 계산된 설정치가 실제 값과 상이할 경우에는 실제 값을 기준으로 하는 적응수정을 실시하여 제어모델의 정확도를 높게 된다. 냉간압연기 제어모델에서의 적응수정방법에는 장기적(long-time)인 적응수정과 단기적(short-time)인 적응수정이 있다.

장기적인 적응수정은 장기간 축적된 압연실적 데이터를 분석하여 새로운 제어모델을 만들어내는 것으로서 적극적인 모델 재조정방법이다. 이는 제어모델을 구성하고 있는 개별인자에 대한 모델링이 잘못되어 오차를 유발한다고 가정하여, Fig. 7에서

볼 수 있는 바와 같이 모델에서 계산된 설정치  $y_c$ 와 측정된 값  $y_m$ 과의 오차를 근거로 인자분석(parameter identification)을 통해, 오차를 유발시키고 있는 개별인자에 대한 모델을 재구성하여 새로운 제어모델을 만들어내는 방법이다.

본 연구의 경우 압연속도만의 함수로 된 기존의 마찰계수 예측식 (6)을 보다 물리적인 현상이 잘 반영되도록 식 (7)과 같이 변경시킴과 동시에, 마찰계수 예측상수인  $C_0$ ,  $C_v$ ,  $C_L$ 의 최적치를 압연 실적데이터로부터 추출해 내는 과정이 장기적인 적응수정방법에 해당한다.

수식모델에서 흔히 사용되는 장기적 적응수정방법으로 최소자승법(least-square method)<sup>(11)</sup>이 있다. 이것은 모델의 수정이 필요한 변수의 실제치  $\hat{w}$ 와 해당변수의 계산치  $w$ 와의 오차를 최소화시키기 위해 아래 식과 같이 정의된 복함수(functional)  $J$ 를 최소화하는 방법을 쓴다.

$$J = \sum_{i=1}^N (\hat{w}_i - w)^2 \quad (11)$$

반면에, 단기적인 적응수정방법은 제어모델을 구성하는 함수의 형태는 그대로 둔 채, 모델에 의해 계산된 값과 실제값의 차이를 보정하기 위해 제어모델의 계수만을 수정(adaptive correction)하는 소극적인 적응수정방법이다. 예를 들어 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 제어모델이  $y_c$ 라고 하는 하나의 함수만으로 구성되어 있을 경우, 함수  $y_c$ 를 구성하는 독립변수인  $u$ 와  $w$ 는 비교적 정확하게 반영되어 있지만 모델을 구성할 때 반영되지 못한 인자나 외부요인에 의해 발생하는 오차는 다음과 같은 적응수정계수  $Z_p$ 를 써서 보정하는 방법인 것이다.

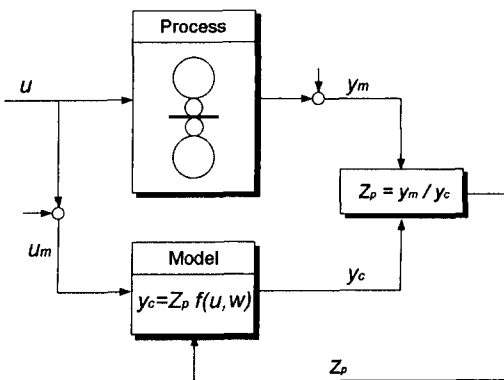


Fig. 8 Principle of the adaptive correction of control model

$$Z_p = \frac{y_m}{y_c} \quad (12)$$

제어모델의 단기적인 적응수정방법으로 많이 사용되는 것에는 순차적 최소자승법<sup>(12)</sup>과 Kalman 필터법<sup>(13)</sup> 등이 있다.

### 3.2 새로운 적응수정 알고리즘의 제안

#### 3.2.1 장기적인 적응수정

실제의 냉간압연공장에서 조사된 결과에 의하면, 2.2절에서 기술한 바와 같이 개별 모델의 부정확함에 의해 압연하중 예측식의 정확도가 약 90% 정도에 머물고 있었다. 그런데 이와 같이 압연하중 계산의 정확도가 낮음에도 불구하고 문제점이 해결되지 않고 있었던 근본적인 이유는 압연하중 예측식을 지배하는 주요변수인 마찰계수와 변형저항의 실제 값을 측정할 수 없기 때문에 모델링된 두 변수의 정확도를 확인할 수가 없어서 부정확하게 모델링된 상태의 예측식을 그대로 사용하고 있기 때문이다.

그러나 본 연구에서는 마찰계수와 변형저항을 측정하지 않고 이들 두변수에 대한 모델 재조정을 할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안해 보았다. 식 (1)~(3)에서 볼 수 있는 바와 같이 하나의 압연하중 식내에는 구하고자 하는 미지의 변수가 두개, 즉 마찰계수와 변형저항이 존재한다. 미지수의 수와 방정식의 수가 일치하지 않으므로 측정된 값이 정확한 압연하중으로부터 마찰계수와 변형저항값을 차례로 역산해내는 것을 반복해가면서 각각의 변수에 대해 식 (11)의 복함수를 최소화하는 소위 반복 최소자승법으로 새로운 모델링을 시도해 보았다.

이 방법은 먼저 두개의 미지변수중 실제 값과 근접된다고 생각되는 변수를 정해(正解)로 가정하고 주어진 방정식을 역산함으로써 나머지 변수의 값을 구해낸다. 그리고 다음에는 새로 구해진 변수를 정해로 하고 다시 한번 주어진 방정식을 역산함으로써, 처음에 정해로 가정했던 변수의 값을 다시 구한다. 이와 같은 방법을 여러 차례 반복하여 두 변수의 값이 각각 일정 값으로 수렴하게 되면 이들을 모두 정해로 하는 것이다. 본 연구의 반복 최소자승법에서는 마찰계수와 변형저항중 상대적으로 정확도가 높다고 평가된 변형저항을 먼저 정해로 가정하고 마찰계수를 구하는 방식을 취하였다. 이때 사용되는 마찰계수 예측식은 본 연구에서 새롭게 제안한 식 (7)이다.

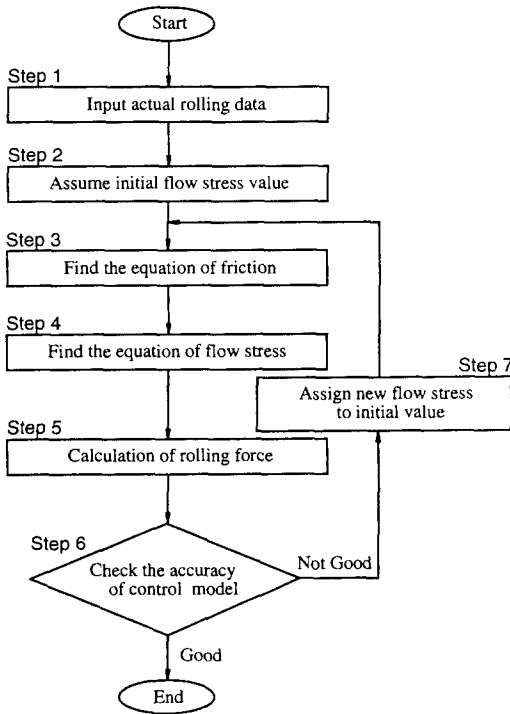


Fig. 9 Flow chart of the new parameter adaptive method

제어모델의 장기적인 적응수정에는 많은 양의 압연실적데이터 수집을 필요로 하고, 수집된 데이터의 분석에는 많은 시간과 비슷한 과정을 여러 번 반복해야 하는 힘든 과정이므로 이를 효율적으로 처리할 수 있는 제어모델 조정용 프로그램을 개발하였다. 프로그램의 순서도는 Fig. 9와 같으며, 순서도에 표시한 각 단계에서 수행하는 내용을 간단히 설명하면 다음과 같다.

우선, 스텝 1은 일정기간의 냉간압연 실적데이터를 정리하여 실행 프로그램 내로 읽혀들이는 과정이며 스텝 2는 기존에 사용되던 변형저항 예측식으로 구한 변형저항을 초기치로 결정하는 과정이다. 다음은 반복 최소자승법에 있어서의 나머지 한 변수인 마찰계수를 구하는 과정으로서 스텝 3과 같다. 압연 실적데이터로부터 마찰계수를 구하는 것은 압연하중식 (1)~(3)으로부터 마찰계수에 대해 역산한 다음 식을 사용하면 된다.

$$\mu_{new} = \mu(P, H, h, k_{old}, R, V_R, t_b, t_f) \quad (13)$$

식 (13)에서  $k_{old}$ 는 스텝 2에서 미리 결정되어 있던 변형저항이고, 나머지 변수들의 값은 압연 실

적데이터를 의미한다. 모든 압연 데이터에 대해 식 (13)을 이용하여 마찰계수를 구하고, 기본 모델에 포함된 오차를 없애기 위해 식 (11)과 같은 복합수를 구하여 최소자승법을 적용하면 마찰계수 예측식의 새로운 계수값을 얻을 수 있다.

다음의 스텝 4는 새로 구해진 마찰계수 예측식을 사용하여 변형저항 예측식을 구하는 과정이다. 마찰계수와 마찬가지로 변형저항도 압연 실적데이터로부터 구해지며, 다음과 같은 식을 사용한다.

$$k_{new} = k(P, H, h, \mu_{new}, R, V_R, t_b, t_f) \quad (14)$$

식 (14)에서  $\mu_{new}$ 는 스텝 3에서 구한 마찰계수 예측식으로 계산된 값이고, 나머지 변수들의 값은 냉간압연 실적데이터를 의미한다. 마찰계수에서와 마찬가지로 식 (14)를 이용하여 변형저항의 실적치를 구하고, 최소자승법을 쓰면 변형저항 예측식의 새로운 계수값을 얻을 수 있다.

한편, 스텝 1로부터 스텝 4까지의 과정을 통해 구해진 마찰계수와 변형저항 예측식의 정확도를 검증하기 위해서는, 새로 구해진 예측식들을 사용하여 압연하중  $P_{cal}$ 을 계산하고 이들을 실제의 값인  $P_{act}$ 와 비교해 보아야 한다. 스텝 5는 새로운 예측식으로 압연하중을 계산하는 과정이며, 스텝 6은 새로 계산된 하중과 실제하중과의 편차를 계산하는 과정이다. 스텝 6에서 계산된 압연하중 편차가 허용편차보다 작을 경우에는 계산을 종료한다.

그러나 허용치를 초과하는 경우에는 앞서의 과정을 반복하는 재계산 과정을 거쳐야 한다. 재계산에 있어서는 처음에 스텝 2에서 변형저항을 기존 예측식을 사용하던 것과는 달리 스텝 4에서 구해진 변형저항 예측식의 새로운 계수값을 사용하여야 한다. (스텝 7) 재계산에 있어서도 스텝 3으로부터 스텝 5의 과정을 반복하되 스텝 6의 조건이 만족하게 되면 앞서와 같이 계산을 종료한다. 이와 같은 계산과정을 통해 구해진 변형저항과 마찰계수 예측상수를 새로운 값으로 결정하면 제어모델을 구성하는 개별변수에 대한 적응수정이 완료된 것으로 한다.

### 3.2.2 단기적인 적응수정

장기적인 적응수정방법을 통해 제어모델을 구성하는 개별 수식들이 비교적 정확하게 모델링되었다 하더라도 이들을 실제의 플랜트에 적용하는 경우에 개별 변수들의 측정치에 포함된 오차나 모델을 구성하는 데 반영되지 못한 외부요인에 의해 정확도

가 떨어질 수 있다. 따라서 이와 같은 문제점을 보완하기 위해, 본 연구에서는 순차적 가중치 최소자승법(recursive weighted least-square method)<sup>(12)</sup>이라고 하는 단기적인 적응수정방법을 적용해 보았다.

장기적인 적응수정방법을 통해 얻어진 예측식의 기본형태를 행렬식으로 표현해보면 다음과 같이 된다.

$$y = H \cdot x \tag{15}$$

윗 식에서 행렬  $y$ 와  $H$ 는 측정가능한 실적데이터이며, 행렬  $x$ 는 단기적 적응수정을 통해 구하고자 하는 계수값을 의미한다. 한편, 본 연구의 대상인 마찰계수 예측식에 대한 식 (15)의 실제 행렬의 형태를 나타내어 보면 다음과 같다.

$$y = \begin{bmatrix} (\ln \mu)_1 \\ (\ln \mu)_2 \\ \vdots \\ (\ln \mu)_i \\ \vdots \\ (\ln \mu)_n \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 1 (V_R)_1 (L)_1 \\ 1 (V_R)_2 (L)_2 \\ \vdots \\ 1 (V_R)_i (L)_i \\ \vdots \\ 1 (V_R)_n (L)_n \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} \ln C_0 \\ C_v \\ C_L \end{bmatrix} \tag{16}$$

여기서,  $i$ 는 압연중 임의의 데이터를 나타내는 첨자이며,  $n$ 은 측정된 데이터의 개수를 나타내지만 순차적 가중치 최소자승법은 측정된 데이터를 차례로 한번씩만 이용하므로 계산해야할 행렬의 크기가 커지는 것은 아니다. 그리고 행렬 (16)내에 자연로그 함수(natural logarithmic function)가 포함된 것은 전술한 새로운 마찰계수 예측식 (7)이 비선형함수인 지수함수로 되어있기 때문에 선형화시키는 과정에서 도입된 것이다. 또한 변형저항 예측식에 대한 식 (15)의 행렬식은 다음식과 같다.

$$y = \begin{bmatrix} (\ln k)_1 \\ (\ln k)_2 \\ \vdots \\ (\ln k)_i \\ \vdots \\ (\ln k)_n \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 1 \ln(m + \epsilon)_1 \\ 1 \ln(m + \epsilon)_2 \\ \vdots \\ 1 \ln(m + \epsilon)_i \\ \vdots \\ 1 \ln(m + \epsilon)_n \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} \ln l \\ n \end{bmatrix} \tag{17}$$

장기적 적응수정방법에 의해 구해진 마찰계수와 변형저항 예측식의 계수 행렬  $x$ 는 압연을 해나가면서 실시하는 단기적 적응수정방법인 다음의 계산 과정을 반복함으로써 보다 정확한 값을 구할 수 있

게 된다.

$$K_i = P_i H_{i+1} [H_{i+1}^T P_i H_{i+1} + R_{i+1}]^{-1} \tag{18}$$

$$x_{i+1} = x_i + K_i [y_{i+1} - H_{i+1}^T x_i] \tag{19}$$

$$P_{i+1} = P_i - P_i H_{i+1}^T [H_{i+1}^T P_i H_{i+1} + R_{i+1}]^{-1} \cdot H_{i+1} P_i \tag{20}$$

윗 식에서  $P = (H^T R^{-1} H)^{-1}$ 이며,  $R = (H^T H)^{-1} H^T$ 는 가중치행렬(weighting matrix)이다. 한편  $x$ 의 초기치인  $x_0$ 는 장기적 적응수정으로부터 얻어진 최초의 마찰계수와 변형저항 예측상수를 사용하였다. 따라서 압연을 진행해나가면서 얻어진 실적데이터들을 이용하여 식 (18)로부터 식 (20)까지를 반복적으로 계산함에 따라 식 (19)의  $x_{i+1}$ , 즉 마찰계수와 변형저항의 예측상수를 보다 정확하게 구해낼 수 있게 된다.

장기적인 적응수정방법은 많은 양의 데이터를 수집한 후 일시적으로 적응수정을 행하게 되므로 오프라인(off-line)방식인 반면 순차적 가중치 최소자승법은 압연작업을 진행해나가면서 행할 수 있는 온라인(on-line) 적응수정방법이다. 따라서 두 가지 방법을 병행하여 사용하게 되면 보다 정확한 제어모델을 가질 수 있게 될 것이다.

#### 4. 결과 및 고찰

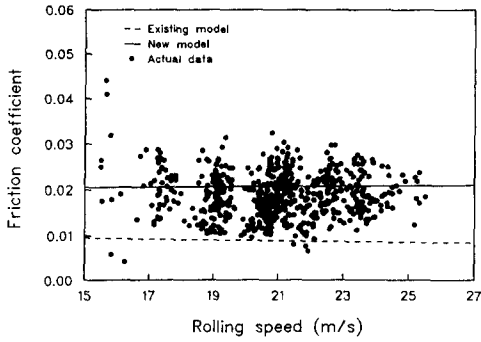
아래의 결과는 냉간압연공장에서 생산된 830 코일 부분의 압연 실적데이터를 수집하고, 앞서 제시한 본 연구의 새로운 적응수정 알고리즘을 적용한 냉간압연 제어모델의 적응수정 결과이다.

##### 4.1 마찰계수 예측식

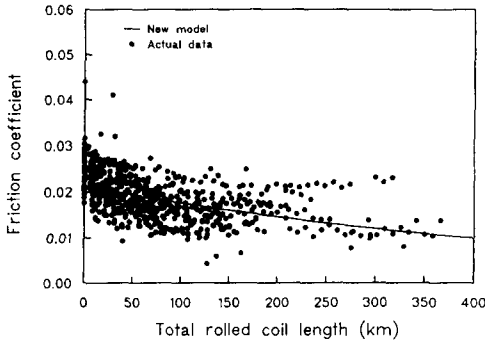
전술한 바와 같이 기존에 사용하던 마찰계수 예측식 (6)은 압연속도만의 함수였으나, 본 연구에서 제안된 예측식 (7)은 마찰계수의 물리적인 특성인 압연속도 및 압연량의 증가에 따른 마찰계수의 감소를 고려하였다. 그리고 식 (7)에서 사용되는 계수  $C_0$ ,  $C_v$ ,  $C_L$ 는 작업물의 초기 표면상태를 고려하기 위해 덜-몰과 브라이트-몰에 대해 별도의 값을 구하게 된다.

Fig. 10은 브라이트-몰에 대한 마찰계수 예측식에 대한 적응수정 결과를 나타내는 것으로써, 그림 중 (a)와 (b)는 각각 압연속도와 누적압연길이에 대한 마찰계수의 변화를 보이는 것이다. 한편, Fig. 11은 덜-몰에 대한 마찰계수 예측식의 적응수





(a)



(b)

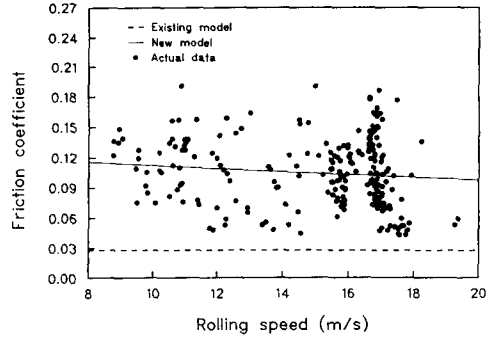
**Fig. 10** Variation of friction coefficient with rolling speed and cumulative rolling length for bright roll

정 결과로써, Fig. 10에서와 마찬가지로 (a)와 (b)는 각각 압연속도와 누적압연길이에 대한 마찰계수의 변화를 나타낸다.

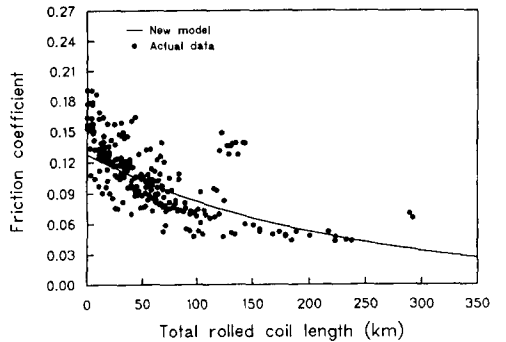
그림내의 점(•)은 측정된 압연하중으로부터 식 (1)~(3) 등을 이용해 역산된 마찰계수, 즉 마찰계수의 실적치를 의미한다. 그리고 실선은 최소자승법을 통해 얻어진 마찰계수 예측식을 나타내는 것으로써, 분석에 사용된 모든 실적 마찰계수를 가장 잘 대표할 수 있는 곡선을 의미한다. 또한, 그림내의 점선은 기존의 마찰계수 예측식을 의미하는데, 기존의 마찰계수 예측식은 압연속도만의 함수이므로 누적압연길이에 따른 마찰계수를 나타내는 (b) 그림에는 점선이 표시되지 않는다. 마찰계수 조정을 통해 얻어진 결과를 정리해 보면 다음과 같다.

(1) 덜-롤의 마찰계수는 브라이트-롤에 비해 6-7배 높으며, 압연속도의 증가에 따라 마찰계수는 대체로 감소한다.

(2) 누적압연량이 증가함에 따라 마찰계수는 급격히 감소하며, 마찰계수의 감소율은 덜-롤이 브라



(a)



(b)

**Fig. 11** Variation of friction coefficient with rolling speed and cumulative rolling length for dull roll

이트 롤에 비해 높게 나타나고 있다. 덜-롤의 경우 물의 극표면부에만 살짝 요철이 형성되어 있으므로 높은 하중을 받으면서 압연소재와 접촉하게 되면 요철부는 쉽게 마모되게 된다. 따라서 초기 가공된 덜 물의 표면은 요철부가 많아 마찰계수가 대단히 높지만, 압연이 진행되면서 요철부가 마모됨에 따라 마찰계수가 급격히 감소하기 때문이다.

(3) 본 연구의 새로운 적용수정 알고리즘을 써서 만들어진 새로운 마찰계수 예측식은 실제의 마찰계수를 비교적 잘 예측하고 있다.

#### 4.2 변형저항 예측식

마찰계수 예측식과는 달리 기존의 변형저항 예측식은 비교적 물리적 특성이 잘 반영되어 있었으므로 새로운 변형저항 예측식은 기존과 동일한 형태의 함수를 사용하되 보다 정확한 변형저항 예측상수  $l$ ,  $m$ ,  $n$ 을 구하는 것으로 하였다. 앞서와 마찬가지로 830 코일본의 압연 실적데이터를 각 강종별로 분류하여 얻어진 변형저항 예측식의 조정결과

중의 일부로써 Fig. 12와 Fig. 13은 각각 W04CBQ (41 코일분)과 W06DNN(139 코일분)에 해당하는 분석결과이다.

결과를 나타내는 그림내의 점(•)은 압연하중을 역산한 변형저항, 즉 변형저항의 실적치를 의미한다. 또한 실선은 최소자승법을 이용하여 얻어진 변형저항 예측식을 나타내는 것으로써, 분석에 사용된 모든 실적 변형저항을 가장 잘 대표할 수 있는 곡선을 의미한다. 그리고 그림내의 점선은 기존의 제어모델에서 사용중인 변형저항 예측곡선을 의미한다. 변형저항 예측식에 대한 적응수정을 통해 얻어진 결과를 정리해보면 다음과 같다.

- (1) W04CBQ강은 기존의 변형저항 예측식에 비해 실적치가 약 10%이상 낮게 나타나고 있다.
- (2) W06DNN강의 경우에는 기존의 변형저항 예측식에 비해 실제의 변형저항이 대부분 높게 나타나고 있다.
- (3) 본 연구의 새로운 적응수정 알고리즘을 써서 만들어진 새로운 계수값을 사용한 변형저항 예측식은 실적 변형저항을 비교적 잘 예측하고 있다.

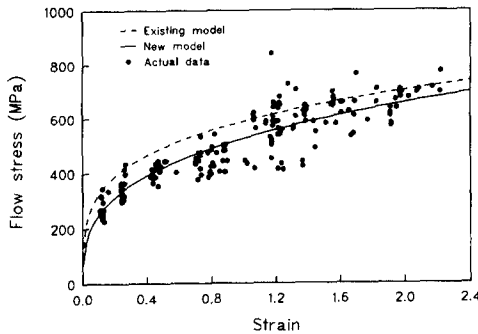


Fig. 12 Flow stress for W04CBQ carbon steel

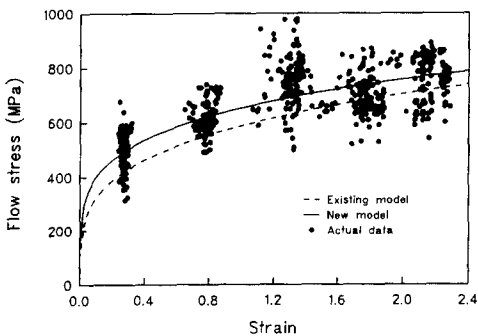


Fig. 13 Flow stress for W06DNN carbon steel

### 4.3 냉간압연 제어모델의 정확도

반복 최소자승법을 이용한 개별변수의 적응수정을 통해 새로 구해진 변형저항과 마찰계수 예측식의 정확도를 확인하기 위해서는 모든 압연조건에 대해 압연하중의 계산값과 실제값을 비교해 보아야 한다. Fig. 14와 Fig. 15는 적응수정 전후, 즉 기존의 제어모델을 사용할 때와 새로 구해진 제어모델을 사용할 때에 대한 압연하중의 계산치와 실제값과의 비교를 한 결과이다. 횡축과 종축은 각각 측정된 실제의 압연하중과 계산된 압연하중을 의미하며, 기존의 예측수식을 사용한 Fig. 14를 살펴보면 대체적으로 계산하중이 실제하중보다 작게 계산된 것을 볼 수 있다. 또 Fig. 14에 나타난 주파수분석(frequency analysis) 결과는 압연하중 예측치의 실적치에 대한 편차정도를 보여주는 것으로써, 기존의 예측수식은 모델오차가 평균 15.6%이며 표준편차는 13.7%로 나타나고 있음을 알 수 있다.

새로 구해진 마찰계수와 변형저항을 사용하여 계산된 압연하중과 실적 압연하중을 비교하는 Fig. 15에서 볼 수 있는 바와 같이 새로운 예측식들을 사용함에 따라 압연하중의 예측정도가 크게 향상되었음을 알 수 있다. 또한 모델오차 분석결과 오차의 평균이 -3.1%, 표준편차는 9.6%로 기존의 모델에 비해 상당히 개선되었다. 따라서 본 연구에서 제안된 새로운 적응수정 알고리즘이 연속냉간압연기의 제어모델의 정확도를 높이는 좋은 방법으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

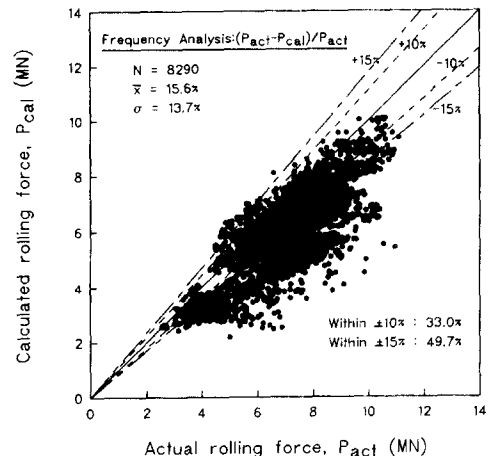


Fig. 14 Accuracy of the existing model for rolling force prediction

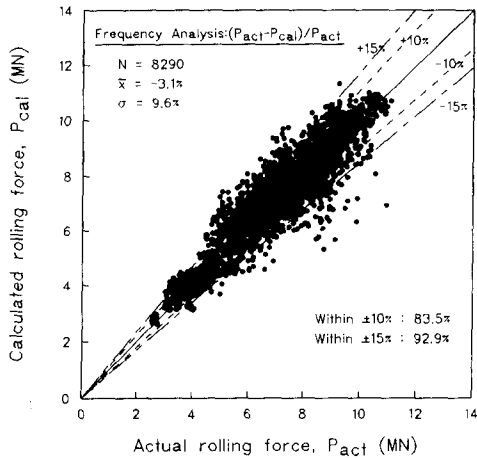


Fig. 15 Accuracy of the new model for rolling force prediction

4.4 냉간압연 제어모델의 온라인 적용

장기적 적용수정을 통해 구해진 새로운 마찰계수 및 변형저항 예측식과 함께 3.2.2에 기술한 순차적 가중치 최소화방법을 연속냉간압연 제어모델에 적용한 후 실제 압연을 실시해 보았다. Fig. 16은 새로운 제어모델을 온라인에 적용한 결과를 나타내는 그림으로써, 다유식과 같이 정의된 압연하중 적중률이라고 하는 파라미터를 이용하여 제어모델의 정확도를 나타내보았다.

$$\frac{P_{act}}{P_{cal}} \times 100 (\%) \tag{21}$$

위 식에서  $P_{act}$ 와  $R_{cal}$ 은 각각 로드셀로 측정된 실제의 압연하중과 압연하중 예측식을 사용하여 계산된 압연하중을 의미한다.

80코일본의 압연실적 데이터를 분석한 결과, Fig. 16에서 볼 수 있는 바와 같이 모든 스탠드에서 새로운 제어모델이 기존의 모델에 비해 압연하중 적중률이 높았으며, 전 스탠드 평균 압연하중 적중률은 기존의 90.4%에서 96.6%로 크게 향상되었음을 알 수 있다. 그림중 제5번 스탠드의 압연하중 적중률이 다른 스탠드에 비해 현저히 낮은 것을 볼 수 있는데, 이는 전술한 바와 같이 5번 스탠드에 제품의 도장성을 높이기 위해 덜-물을 사용하였기 때문인 것으로 생각된다. 덜-물의 경우 압연이 진행됨에 따라 마찰계수의 변화가 매우 심하게 되므로 모델의 정확도에 큰 영향을 주기 때문이다. 그러나 본 연구에서 제안한 장·단기적인 적용수정방법을 계속 사용하게 되면 모델의 정확도는 점차

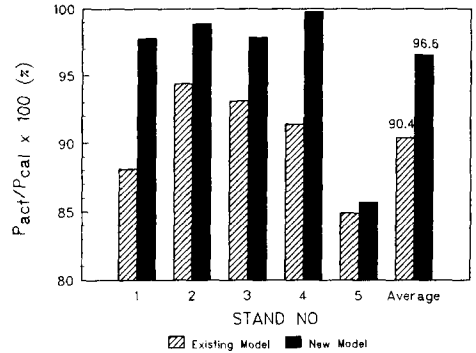


Fig. 16 Comparison of the rolling force prediction accuracy between existing model and new one

향상되어 이와 같은 문제점은 해결될 것으로 생각된다.

5. 결 론

연속냉간압연기의 제어모델에 대한 새로운 적용수정 알고리즘의 적용에 관해 수행한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 기존의 마찰계수 예측식은 실제의 값에 비해 대단히 낮은 값을 제시하고 있을 뿐만 아니라 마찰계수에 영향을 주는 여러 가지 인자들이 충분히 고려되지 않았으므로, 이러한 원인에 의해 압연하중 계산의 정확도가 크게 저하되고 있었다.

(2) 기존의 변형저항 예측식은 압연될 소재의 가공경화 특성이 충분히 반영되어 있지 않기에 마찰계수와 마찬가지로 압연하중 계산에서의 오류 발생원인이 되고 있었다.

(3) 본 연구에서는 앞서 제기된 문제점들을 보완하기 위해 반복 최소화방법이라고 하는 장기적 적용수정방법을 이용하여 마찰계수와 변형저항에 대해 물리적인 특성이 잘 반영된 새로운 예측식을 구해내었다. 또한 이들을 실제 냉간압연 제어모델에 사용함에 있어서 매 압연실적이 반영되어 보다 정확한 예측식을 구할 수 있도록 순차적 가중치 최소화방법이라고 하는 단기적인 적용수정방법도 적용하였다.

(4) 새로운 제어모델을 이용하여 실제의 냉간압연을 실시한 결과, 측정된 압연하중에 대한 계산된 압연하중의 정확도가 96.6%로 기존의 제어모델의 90.4%에 비해 향상되었다. 따라서 본 연구에서 제시한 적용수정방법이 제어모델의 정확도 향상에 크

계 기여했음을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- (1) Orowan, E., 1943, "The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling," *IME Proceedings*, Vol. 150, pp. 140~148.
- (2) Bland, D. A. and Ford, H., 1948, "The Calculation of Roll Force and Torque in Cold Strip Rolling with Tensions," *IME Proceedings*, Vol. 159, pp. 144~152.
- (3) Hitchcock, J. H., 1935, "Elastic Deformation of Rolls during Cold Rolling," *ASME Report of Special Research Committee on Roll Neck Bearings*, pp. 33~44.
- (4) Hill, R., 1950, *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford Univ. Press, pp. 199~210.
- (5) Roberts, W. L., 1972, *An Approximate Theory of Temper Rolling*, Iron and Steel Engineer, pp. 56~68.
- (6) Feldmann, F., 1994, *Adaptation of Rolling Models*, Technical Report of ABB, pp. 1~7.
- (7) Tsao, Y. H., 1978, "Friction and Slip in The Cold Rolling of Metals," *ASLE Transactions*, Vol. 21, No. 1, pp. 20~24.
- (8) Lenard, J. G., 1992, "Friction and Slip in The Cold Strip Rolling," *STLE Tribology Transactions*, Vol. 35, No. 3, pp. 423~428.
- (9) 平野 但, 1983, "板壓延の理論と實際," 日本鐵鋼協會, pp. 207~208.
- (10) Michio, Y., 1987, "Technologies of Flying Gage Change in Fully Continuous Cold Rolling Mill for Thin Gage Steel Strips," *4th International Steel Rolling Conference*, Vol. 2, E36.1-E36.11.
- (11) Bierman, G. J., 1977, *Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation*, Academic Press, pp. 105~109.
- (12) Brogan, W. L., 1992, *Modern Control Theory*, Prentice Hall, pp. 221~226.
- (13) Åström, K. J., 1989, *Adaptive Control*, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 32~37.