

〈論 文〉

## 보정함수를 이용한 강판의 열간 압연하중 예측 정도향상

문영훈\* · 이경종\*\* · 이필종\* · 이준정\*

(1992년 10월 29일 접수)

### Improvement of Rolling Force Estimation by Modification Function for Hot Steel Strip Rolling Process

Young Hoon Moon, Kyung Jong Lee, Pil Jong Lee and Joon Jeong Yi

**Key Words :** Deformation Resistance(변형저항), Modification Value(보정계수), Modification Function(보정함수), Learn value(학습계수), Ultra Low Carbon Steel(극저탄소강)

#### Abstract

A new deformation resistance model for hot steel strip rolling process was formulated to improve the accuracy of roll force estimation. To improve the existing deformation resistance model more precisely, a modification function was introduced in this study. For the modification function, several factors considering material and operational conditions have been investigated and the optimal modification function was determined under the principle of minimum variability. The newly formulated modification function was applied to the deformation resistance model for ultra-low carbon steel and showed improved accuracy with about 30% decrease in terms of standard deviation of predicted roll force values against measured ones.

#### 기 호 설 명

$Z$  : Zener-Hollomon parameter  
 $K_f, Km$  : 변형저항, kgf/mm<sup>2</sup>  
 $K_{fm}$  : 평균 변형저항, kgf/mm<sup>2</sup>  
 $\alpha$  : 학습계수(예측 적중도 parameter), %  
 $\alpha_x$  : (x) 번째 압연시 사용될 학습계수  
 $\alpha_{x-1}$  : (x-1) 번째 압연시 사용된 학습계수  
 $G$  : 학습 gain  
 $Km_a$  : 실적 변형저항, Kgf/mm<sup>2</sup>  
 $Km_c$  : 계산 변형저항, kgf/mm<sup>2</sup>  
 $i$ (하첨자) : 조업조건 분류번호  
 $j$ (하첨자) : 압연 스탠드 번호  
 $x$ (하첨자) : 압연순 번호

$\alpha_{ij}, Km_a|ij, Km_c|ij$  : 조업조건 및 해당 스탠드별 학습계수, 실적, 계산 변형 저항  
 $\alpha_{Tj}, Km_a|Tj, Km_c|Tj$  : 전체코일로부터 스탠드별로 얻어진 학습계수, 실적, 계산 변형저항  
 $n_i$  : 조업분류별 해당코일갯수  
 $n_T$  : 전체 코일 갯수  
 $f_i$  : 보정함수  
 $m_{ij}$  : 보정계수  
 $Km_c^m|ij$  : 보정후의  $Km_c|ij$   
 $f(t)$  : 두께 보정함수  
 $f(C_{eq})$  : 탄소당량 보정함수  
 $f(P_b)$  : 밴더(bender) 보정함수  
 $f(s)$  : 스탠드 보정함수  
 $s$  : 스탠드 번호  
 $P$  : 압연하중, Ton  
 $P_b$  : 밴더(bender)력, Ton

\*정회원, 산업과학기술연구소 시스템연구부

\*\*산업과학기술연구소 강재연구부

$P_c$	: 계산 압연하중, Ton
$x$	: 밴더(bender) 효과함수
$B_1, B_2$	: 압연전 폭, 압연후 폭, mm
$B_m$	: 평균반폭, mm
$L_d$	: 접촉장, mm
$Q_p$	: geometric factor
$R$	: 작업 롤의 반경, mm
$H_1, H_2$	: 압연 전, 후의 판 두께, mm
$\Delta H$	: 압하량
$\epsilon$	: 평균 변형량
$\dot{\epsilon}$	: 평균 변형속도, $\text{sec}^{-1}$
$v$	: 압연 속도, m/sec
$r$	: 압하율

## 1. 서 론

강관의 연속 열간 압연공정에서 사상압연 설정모델(finishing set-up model)은 조압연(rough mill) 후단부터 사상압연(finish mill) 출측까지의 압연공정에서 일어나는 형상, 온도, 재질의 변화를 공정인자로부터 예측하고 각 목표치에 맞는 조업을 하기 위해 조업조건을 설정한다. 본 연구에서는 이러한 사상압연 설정모델중 조업조건에 가장 민감한 영향을 미치는 압연하중 예측모델의 개선을 통하여, 사상압연 설정모델의 적중도(precision)를 증가시키는 물론 이를 통한 두께 적중을 향상, 통관성의 향상 및 열연 품질의 향상에 기여하고자 하였다. 압연하중은 압연재료의 변형저항에 의해 거의 결정되어지므로 변형저항 예측모델의 개선이 곧 압연하중의 개선을 의미한다 할 수 있다. 일반적으로 열간 압연은 많은 변수가 독립적으로 혹은 상호작용을 통해 조업에 영향을 미치게 되므로 각 조업변수들의 효과를 수식화시켜 변형저항모델에 정확히 반영하기가 용이하지 않다. 따라서 변형저항 예측모델의 적중도는 한계를 갖게 되며, 모델로 표현키 어려운 미세변수나 오차요인은 학습을 통해 조정함으로써 최적화 될 수 있다. 단순한 계수조정 등으로 가변적이고 복잡한 압연하중을 정확하게 예측하기는 용이하지 않으므로, 본 연구에서는 통계학적인 이론 및 회귀분석에 근거한 보정함수를 모델 수정에 도입하여 조업조건별로 예측오차 요인들을 제거함으로써 예측 모델의 정도를 향상시키고자 하였다. 이를 위해 일반강에 비해 압연하중 모델의 예

측정도가 상대적으로 낮은 극저탄소강을 대상으로 하여 압연조업에 따른 압연하중 예측모델의 오차요인을 조업인자별로 분석하였고, 이로부터 구한 보정함수를 예측모델에 적용시켜 모델의 적중도를 향상시켰다.

## 2. 이 론

### 2.1 열간변형저항 예측식

변형저항이란 재료를 소성 변형시킬때 변형에 따른 유동응력을 의미하며, 고온에서의 유동응력을 열간 변형저항<sup>(1-5)</sup>이라고 한다. 이러한 열간변형저항은 고온변형 장치의 기계적, 전기적 용량을 설계하거나 주어진 용량에서 어느 정도의 고온변형이 가능한지를 판단하는데 중요한 자료가된다. 일반적으로 압연기의 압연하중의 예측하고 조업 설계를 위해 변형저항을 압연변수 및 화학성분의 함수로 표시해야 한다.

종래 변형저항예측식으로 미사카-요시모토(美坂-吉本)식<sup>(2)</sup>과 시다(志田)식<sup>(6)</sup>이 많이 사용되어 왔고, 최근에도 나카사키-기하라(長崎-木原)식<sup>(7)</sup>등 여러가지 실험적 변형 저항식이 제안되고 있는 반면 각 철강사들은 주로 각사의 압연설비 특성에 맞는 변형 저항식으로 개조하여 사용하고 있다. 본 연구의 수정 대상모델인 시다(志田)식<sup>(6)</sup>에 대해 살펴보면 다음과 같다.

• 시험 방법: cylindrical compression(12 mm  $\phi$  × 18 mm l)

• 시험 조건:  $C < 1.2\%$

$$\epsilon < 0.7$$

$$\dot{\epsilon} : 0.1 \sim 100/\text{sec}$$

$$\text{온도} : 700 \sim 1200^\circ\text{C} (\gamma \text{와 } \alpha \text{상 포함})$$

• 변태에 의해 변형저항이 극대인 온도  $T_d(K)$

$$T_t(K) = 950(C + 0.41)/(C + 0.32)$$

$$t_a = T_d/1000$$

$$t = T(K)/1000$$

• 변형저항( $K_f$ ) 식

$$K_f(\text{kgf/mm}^2) = K \{ 1.3(\epsilon/0.2)^n - 0.3(\epsilon/0.2) \} (\dot{\epsilon}/10)^m$$

$$K = 0.28 \exp\{5/t - 0.01/(C + 0.05)\} (t > t_a)$$

$$K = 0.28g \exp\{5/t_a - 0.01/(C + 0.05)\} (t < t_a)$$

$$g = 30(C + 0.9) [t - 0.95(C + 0.49)/(C + 0.42)]^2 + (C + 0.06)/(C + 0.09)$$

$$m = (-0.019C + 0.126)t + (0.075C - 0.05)$$

$$\begin{aligned}
 (t > t_d) \\
 m &= (0.081C - 0.154)t + (-0.019C + 0.207) \\
 &\quad + 0.027 / (C + 0.32) \quad (t < t_d) \\
 n &= 0.41 - 0.07C \quad (1)
 \end{aligned}$$

위의 식(1)을 이용하여 주어진 변형량( $\epsilon$ )에서의 평균변형저항( $K_{fm}$ )은 다음 식에 의해 구해진다.

$$K_{fm} = \int_0^\epsilon (1/\epsilon) \cdot K_f d\epsilon \quad (2)$$

### 2.2 실적 변형저항값의 계산

열간압연 시 실적압연하중값으로 부터 평균 열간 변형저항,  $K_{fm}$ 을 계산하는 방법은 식(3)과 같은 심스(Sims)식(8)이 많이 이용된다.

$$K_{fm}(\text{kgf/mm}^2) = P / (B_m L_d Q_p) \quad (3)$$

여기서  $P$ 는 실적된 압연하중이며,  $L_d$ ,  $B_m$  및  $Q_p$ 는 다음식에 의해 구한다.

$$L_d = \sqrt{R\Delta H} \quad (4)$$

압연전의 판 폭 및 두께를  $B_1, H_1$ 이라 하고 압연후의 판 폭 및 두께를  $B_2, H_2$ 라고 하면  $B_2$ 는 다음식으로 표시된다.<sup>(8)</sup>

$$\begin{aligned}
 B_2 &= B_1 + 0.313 L_d \Delta H / H_1 \quad (B_1 / L_d < 7) \\
 B_2 &= B_1 + 0.313 \{1 - 0.0769(B_1 / L_d - 7)\} \\
 &\quad \Delta H L_d / H_1 \quad (7 > B_1 / L_d > 20) \\
 B_2 &= B_1 \quad (B_1 / L_d > 20) \quad (5)
 \end{aligned}$$

위 식으로부터 평균 판 폭,  $B_m$ 은 다음 식으로 표시된다.

$$B_m = (B_2 + 2B_1) / 3 \quad (6)$$

$$Q_p = 0.8 + (0.45r + 0.04) \sqrt{R / H_1 - 0.5} \quad (7)$$

$$\epsilon = (2/\sqrt{3}) \ln(H_1 / H_2) \quad (8)$$

$$\dot{\epsilon} = 16.67 v / L_d \ln(H_1 / H_2) \quad (1/\text{sec}) \quad (9)$$

따라서 위의 식(4)~(9)과 실적된 압연하중값을 이용하면 식(3)으로부터 열간 변형저항을 구할 수 있다.

## 3. 모델해석 및 수정방안

### 3.1 수식모델의 학습방법

학습은 수식모델을 통해 얻어진 예측치와 실제 압연을 통해 얻어진 실적치의 차이 만큼을 다음 압연 계산시 일정 비율로 보상해 줌으로써 예측적중도를 향상시키는 것을 말한다. 모델에서 예측(계

산)된 변형저항과 실적된 변형저항이 서로 적중되는 정도는 학습계수,  $\alpha$ 로 나타낸다.

$$\alpha = (K_{ma} / K_{mc} - 1.0) \cdot 100 \quad (10)$$

즉  $\alpha$ 가 0(zero)이면 예측치와 실적치가 동일함을 의미하고, 양(positive)의 값을 가지면 예측치가 실적치보다 작음을, 음(negative)의 값을 가지면 예측치가 실적치보다 크음을, 절대값이 크면 클수록 그에 비례해서 예측치와 실적치의 차이가 증가하게 된다. 이러한 학습계수는 압연 특성에 따라 일정 비율(학습 gain:  $G$ )로 다음 압연하중 계산시 순차적으로 계산 압연력에 보상해 줌으로써 실적에 더욱 근접하도록 유도해 준다.

$$\alpha_x = \left( \frac{K_{ma}}{K_{mc}} - 1 \right) \cdot G + \alpha_{x-1} \cdot (1 - G) \quad (11)$$

### 3.2 열간변형저항 모델 해석방법

본 연구에서는 모델에서 예측(계산)된 변형저항과 실적된 변형저항이 서로 적중되는 정도를 표시하기 위한 학습계수,  $\alpha$ 를 모델예측의 적중 척도로 지정하여 수식모델을 해석하였다. 실적 변형저항( $K_{ma}$ )은 압연 시 얻어진 스탠드 별 압연력( $P$ )으로부터 식(3)을 통하여 구하였고, 계산 변형저항( $K_{mc}$ )은 기존 모델에서 사용하고있는 시다(志田)식<sup>(6)</sup> 이용하여 계산하였다. 열간변형저항 수식모델의 해석은, 주요조업변수인 두께, 폭, 탄소당량, 밴더(bender)력 등으로 분류된 데이터를 여러 변수범위의 그룹으로 나눈뒤, 각 그룹별  $\alpha$  값의 평균치와 표준편차를 구하여 각 분류 그룹별 특성을 파악하였고 모델개선에 필요한 정보를 얻었다.

일반적으로 일정한 조업조건으로 압연을 하더라도 얻어지는 변형저항치 및 모델적중율은 평균값을 중심으로 하여 산포하게 된다. 이러한 산포의 원인은 크게 피할 수 있는 원인과 피할 수 없는 원인으로 분류할 수 있다.<sup>(9)</sup> 따라서 변형저항 적중정도가 어떤 값을 중심으로 어느 선까지 달라지는 것은 피할 수 있는 원인에 의한 것으로 간주하여 그 원인을 추구하고 조치를 취하여야 한다. 하지만 이러한 두 요인에 대한 명확한 구분이 어려우므로 합리적 대처방안으로 모델 적중정도의 산포를 효율적으로 감소시킬 수 있는 방안을 마련하고자 하였다. 본 연구에서는 주어진 조업조건하에서 변형저항을 정확히 예측할 수 있도록 하기 위해서 모델 수정방향을 다음 사항들에 초점을 맞춰 실시하였다. 첫째,

변형저항 예측정도,  $\alpha$ , 의 산포(편차)를 줄인다. 즉, 변형저항 예측정도가 조업조건 변화(noise)에 무관하게 항상 일관성을 갖게끔 모델의 최적조건을 구한다. 둘째, 모델을 통해 얻어진 예측치의 평균이 실적치에 접근하도록 한다. 즉, 평균치에 크게 영향을 주는 주요변수들을 선택해 평균치가 목표치에 근접하도록 하는 모델변수들의 조건을 구하여준다. 만약 산포를 최소화시키는 모델변수들의 조건과 평균치를 목표치에 근접시키는 모델변수의 조건이 동일하지 않을 때는 산포를 최소화시키는 조건이 우선한다고 보았다. 셋째, 재현성이 있는지 확인한다. 즉, 자료분석에서 얻어진 최적모델이 실제로 재현성이 있는가를 확인한다. 이때, 예측치가 작업결과치와 맞는가를 광범위한 범위에서 얻어진 실적값들로서 확인한다.

따라서 본 연구에서는 실적값들을 두께, 폭, 탄소당량, 밴더(bender)력 등의 주요 조업변수로 분류한 뒤, 분류된 값들을 여러 변수범위의 그룹으로 나누어, 각 그룹별  $\alpha$ 값의 평균치와 표준편차를 구하는 방법으로 각 분류 그룹별 특성을 파악하였다. 그리고 이들 값들을 최소화시키는 수식모델로 단계적 수정을 가하였다. 이러한 일련의 과정을 반복하므로써  $\alpha$  값의 평균치를 0(zero)에 가깝게 하여 모델의 학습의존도가 줄고, 학습편차가 감소되면 결국 모델의 학습효율이 향상되는 효과를 가져온다고 보았다.

### 3.3 열간변형저항 모델 개선방안

현재 사용중인 변형저항수식,  $Km(\text{old})$ , 을 기본폴로 하고 이 수식에서 생겨나는 오차요인을 식에 직접 보정하기 위해 식(12)과 같은 보정함수를 도입하여 새로운 변형저항수식,  $Km(\text{new})$ , 을 만들었다.

$$Km(\text{new}) = f_1 \cdot f_2 \cdots f_i \cdot Km(\text{old}) \quad (12)$$

이때, 보정함수,  $f_i$ 는 다음의 과정을 통해 구한다. 즉, 식(10)으로부터, 조업조건별 압연 스탠드별 학습계수( $\alpha_{ij}$ )를 고려할 때 변형저항은 식(13)로 표시할 수 있으며 전체 코일로부터 스탠드별로 얻어진 학습계수( $\alpha_{Tj}$ )를 고려할 때 식(14)으로 표시할 수 있다.

$$Km_{c|ij} = \frac{Km_{a|ij}}{1 + \alpha_{ij}} \quad (13)$$

$$Km_{c|Tj} = \frac{Km_{a|Tj}}{1 + \alpha_{Tj}} \quad (14)$$

각각의 그룹 별 조업조건을 통해 구한 모든  $\alpha$  값,  $\alpha_{ij}$ 가 전체 데이터로 부터 스탠드별로 얻어진  $\alpha$  값,  $\alpha_{Tj}$ 에 근접되도록 하면 스탠드별 편차가 감소된다고 할 수 있다. 식(13)를 다시 쓰면

$$(1 + \alpha_{ij}) \cdot Km_{c|ij} = Km_{a|ij} \quad (15)$$

양변을  $(1 + \alpha_{Tj})$ 로 나누면,

$$\left(\frac{1 + \alpha_{ij}}{1 + \alpha_{Tj}}\right) \cdot Km_{c|ij} = \left(\frac{1}{1 + \alpha_{Tj}}\right) \cdot Km_{a|ij} \quad (16)$$

따라서  $Km_{c|ij}$ 에  $\left[\frac{1 + \alpha_{ij}}{1 + \alpha_{Tj}}\right]$ 만큼의 보정이 이루어지면 다음과 같이 조업조건 그룹별 분류를 통해 구한 그룹별 학습계수 값이 전체 데이터로 부터 구한 학습계수에 수렴하게 된다.

$$\begin{aligned} Km_{c|ij}^m &= \frac{1 + \alpha_{ij}}{1 + \alpha_{Tj}} \cdot Km_{c|ij} \\ &= \left(\frac{1}{1 + \alpha_{Tj}}\right) \cdot Km_{a|ij} \end{aligned} \quad (17)$$

$$Km_{c|Tj} = \left(\frac{1}{1 + \alpha_{Tj}}\right) \cdot Km_{a|Tj} \quad (18)$$

즉 식(17)와 식(18)은 보정후 동일 학습계수를 갖게된다.

따라서 보정계수  $m_{ij}$ 는 식(19)과 같이 정의되며, 조업 분류별 보정계수의 평균으로부터 해당 그룹별 분류조건 함수로 보정함수( $f_i$ )를 구하고, 구하여진 보정함수들을 실제 데이터로 시뮬레이션하여 최저 편차를 주는 보정함수를 선택할 수 있다.

$$m_{ij} = \frac{1 + \alpha_{ij}}{1 + \alpha_{Tj}} \quad (19)$$

이와같은 일련의 작업을 반복하면 모델 적중도를 더욱 높일 수 있다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 기존조업모델의 특성 및 문제점파악

열간변형저항모델의 특성 및 문제점 파악을 위한 첫단계로 사상압연 스탠드별 주요 조업변수의 개략적 분포를 구했으며, 이러한 분포로부터 Fig. 1과 같이  $F_1$  스탠드를 기준으로할 때 각 스탠드별 조업변수의 상대치를 얻었다.

Fig. 1의 스탠드별 특성은 변형률이 후단으로 갈수록 급격히 증가함을 나타내며, 온도와 압하율은 감소하는 경향을 갖고 있다. 이러한 조업특성 하에서 현재 사용되고 있는 변형저항 수식모델에서 예

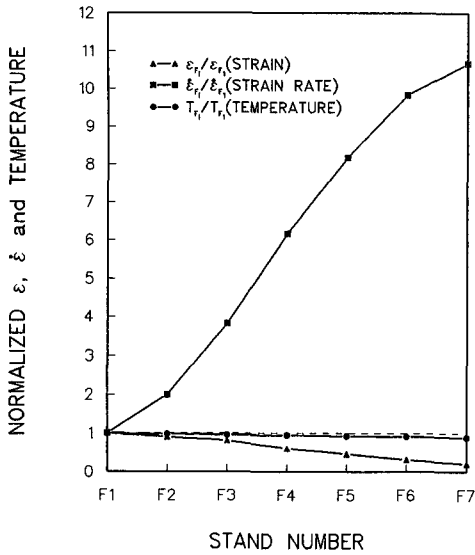


Fig. 1 The typical working condition at each stand

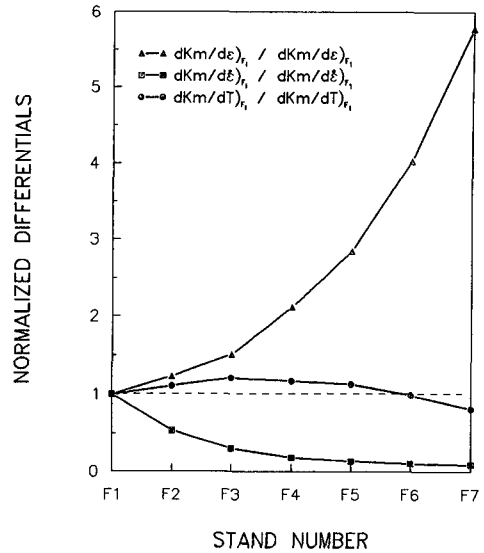


Fig. 2 The variation of normalized differentials with respect to F1 at stand

Table 1 The classification of working data

data	classification range
thickness	below 2.5, 2.5~3.0, 3.0~3.5, 3.5~4.0, above 4.0 mm
width	below 1000, 1000~1200, 1200~1200, above 1400 mm
C-equivalent	0.05~0.06, 0.06~0.07, above 0.07%
bender force	below 70, 70~100, 100~130, 130~160 ton

측되는 값들은 Fig. 2에 보인 바와 같이 전·후단의 조업변수에 대해 어느정도 조정된 값을 갖게되어 스탠드별로 일정 수준이상의 예측정도가 유지되고 있었다.

실제 열간 압연시 조업변수는 동일스탠드내에서도 넓은 범위에 걸쳐 산포하고, 스탠드별로 압연하중 예측정도 또한 많은 차이를 보이고 있어 간단한 모델의 계수조정만으로 열간 변형저항의 적중도 향상이 용이하지 않다. 따라서 이러한 차이의 원인을 규명하기 위해 주요 조업조건 별로 작업 실적을 Table 1과 같이 분류하여, 보다 미시적으로 스탠드별, 조업조건 별 예측정도를  $\alpha$  값을 이용해 분석하였다.

Fig. 3 (a), (b), (c), (d)의 조업분류별 예측정도의 경향을 보면, 두께가 얇아질수록, 탄소당량이 클수록, 그리고 밴더(bender)력이 클수록 예측변형저

항이 실적보다 낮아짐을 보여주고 있다.

#### 4.2 보정함수의 결정 및 적용

각 스탠드별, 조업조건별 분류를 통해 Fig. 3에 나타난 학습계수의 편차를 줄이기 위해 Fig. 3의 네가지 분류중 분류별 경향이 뚜렷하지 않은 폭을 제외한 두께, 탄소당량, 밴더(bender)력에 관한 보정함수를 구하였다. 계산을 거쳐 두께 그룹별로 식(10)을 통해 얻어진 학습계수들로 부터 모델 수정을 위한 보정계수를 식(19)로 부터 구하고 이를 회귀분석함으로써 보정함수를 얻었다. 회귀분석을 통해 얻어진 보정함수는 아래와 같다.

$$f(t) = 2.19 - 0.93 \cdot t + 0.24 \cdot t^2 - 0.02 \cdot t^3 \quad (20)$$

앞의 두께분류와 동일한 방법으로 화학조성 및

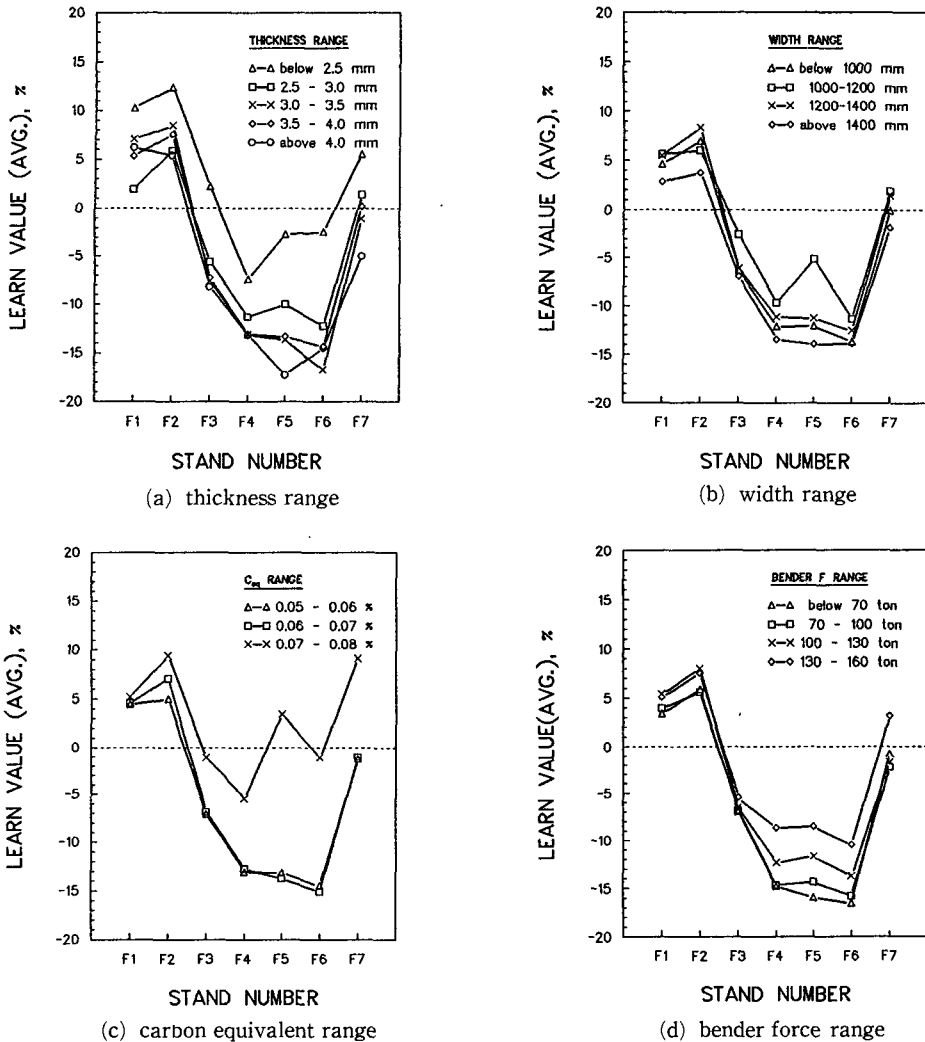


Fig. 3 The original distribution of average learn value( $\alpha$ ) at different

밴더 (bender) 력 보정작업을 실시한 후 얻어진 보정함수는 아래와 같다.

$$f(C_{eq}) = 1.14 - 7 \cdot C_{eq} + 78.4 \cdot C_{eq}^2 \quad (21)$$

$$f(P_B) = 1.52 - 0.016 \cdot P_B + 8.38 \cdot 10^{-5} \cdot P_B^2 \quad (22)$$

이상의 과정을 통해 얻어진 세가지 보정함수는 동시에 하나 이상 사용되어질 수 없다. 즉 세가지 중 편차를 가장 크게 감소시키는 하나의 보정함수가 실제 모델에 적용되고 나면 나머지 두 보정함수는 더이상 유효하지 않다. 편차감소에 가장 효과적인 보정함수를 선정하기 위해 위 세가지 보정함수

를 독립적으로 적용시킨후 현장 데이터로 off-line 검정을 실시하였다. Table 2에 세가지 보정함수를 적용한 결과를 나타내었는데, 탄소당량 보정식이 학습계수의 편차감소에 가장 효과적인 것으로 판명되었다.

따라서 1차보정후의 새로운 모델식은 다음과 같다.

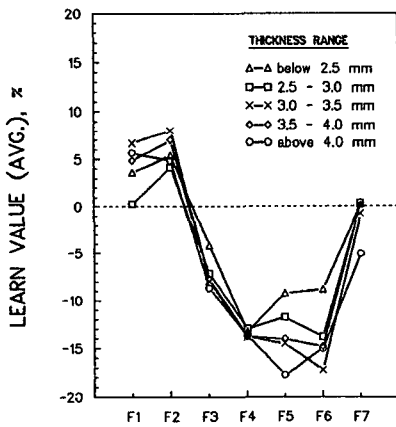
$$Km_1(\text{new}) = f_1 \cdot Km(\text{old})$$

$$f_1 = f(C_{eq}) = 1.14 - 7 \cdot C_{eq} + 78.4 \cdot C_{eq}^2 \quad (23)$$

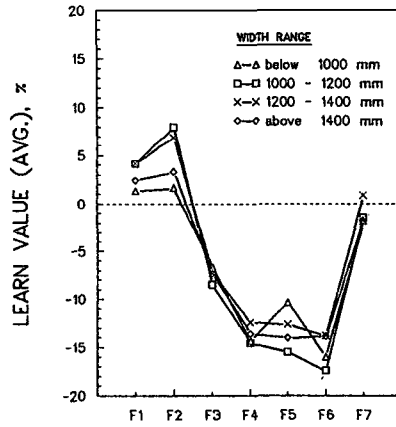
1차보정을 통해 얻어진 새로운 모델식은 전과 동

Table 2 The comparison of effectiveness of three modification functions

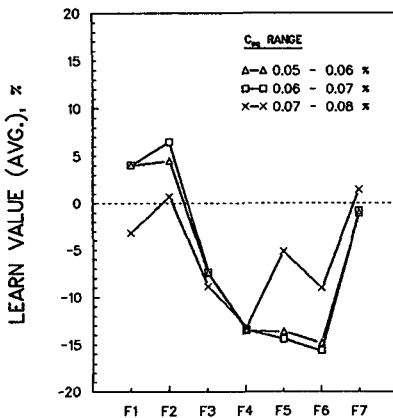
modification function	new model equation	$\alpha$ -value before modification	$\alpha$ -value after modification
thickness function	$Km(new) = f(t) \cdot Km(old)$	7.575	7.524
$C_{eq}$ function	$Km(new) = f(C_{eq}) \cdot Km(old)$	7.575	7.347
bender F function	$Km(new) = f(P_B) \cdot Km(old)$	7.575	7.555



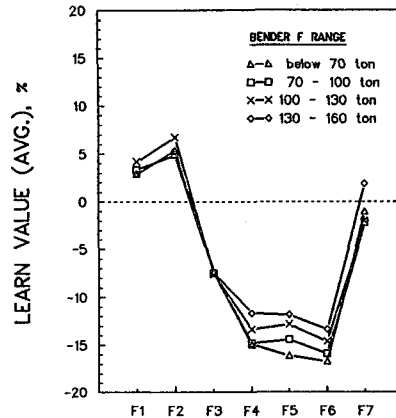
(a) thickness range



(b) width range



(c) carbon equivalent range



(d) bender force range

Fig. 4 The change of average learn value( $\alpha$ ) after modification at different

일한 방법으로 2,3차보정을 반복 실시하여 학습편차를 더욱 감소시킬 수 있는데 세차례의 보정을 통해 얻어진 새로운 모델을 아래에 나타내었다.

$$Km(new) = f_2 \cdot Km_1(new) = f_1 \cdot f_2 \cdot Km(old)$$

$$P = Pc + f_3 \cdot x \cdot P_B \quad (24)$$

여기서,  $f_1 \cdot f_2 = f(C_{eq}) = 1.243 - 9.28 \cdot C_{eq}$   
 $+ 95.57 \cdot C_{eq}^2 - 113.3 \cdot C_{eq}^3$   
 $f_3 = f(P_B) = 1.036 - 0.0015 \cdot P_B$   
 $+ 9.955 \cdot 10^{-6} \cdot P_B^2$

위 식(24)을 적용하여 새롭게 얻어진 조업조건별 학습계수의 분포를 Fig. 4 (a), (b), (c), (d) 에 나타내었다.

이상의 보정작업은 각 스탠드에서의 적중편차를 감소시키기 위한 과정이었고, 다음 단계에서는 스탠드별 학습계수의 절대치 분포를 고려할 수 있는 스탠드보정을 실시하여 예측치와 실적치의 절대값을 근접시키고자 하였다. 식(24)을 적용하여 새롭게 얻어진 스탠드별 학습계수의 평균값이 0(zero)에 근접할수 있도록 앞의 보정과 동일한 방법으로 보정계수를 구했으며 이를 통해 얻어진 보정함수식을(25)에 나타내었다.

$$f(s) = 0.933 - 0.013 \cdot \cos(s) + 0.105 \cdot \sin(s)$$

$$- 0.041 \cdot \cos(2s) + 0.00237 \cdot \sin(2s) \quad (25)$$

따라서 최종 보정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$Km(new) = f_1 \cdot f_2 \cdot f_4 \cdot Km(old)$$

$$P = Pc + f_3 \cdot x \cdot P_B \quad (26)$$

여기서,

$$f_4 = f(s) = 0.933 - 0.013 \cdot \cos(s)$$

$$+ 0.105 \cdot \sin(s) - 0.041 \cdot \cos(2s)$$

$$+ 0.00237 \cdot \sin(2s)$$

Fig. 5에 스탠드 보정후의 학습계수 분포를 나타내었는데, 스탠드별로 큰폭으로 변화하던 학습계수가 0(zero)에 상당히 근접하였음을 보여주고 있다.

### 4.3 열간변형저항 모델 개선효과

이상의 과정을 통해 얻어진 식(26)를 약 1000코일분의 극저탄소강 조업실적을 이용하여 학습계수를 구해본 결과, Fig. 6에 나타난 바와 같이 수정 전 모델에 비해 극저탄소강의 모델적중 편차가 약 30% 감소하는 효과를 보였다. 이는 모델의 예측적

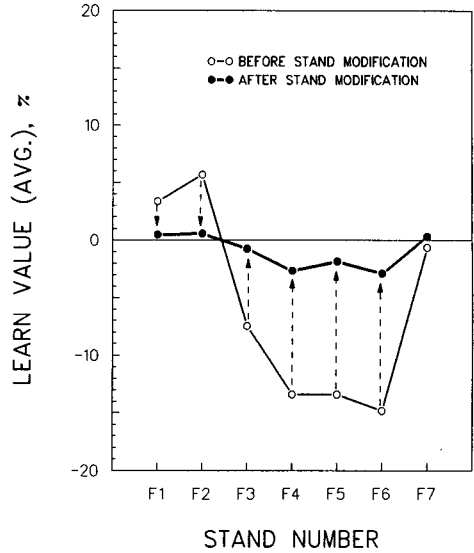


Fig. 5 The change of average learn value(a) after stand modification

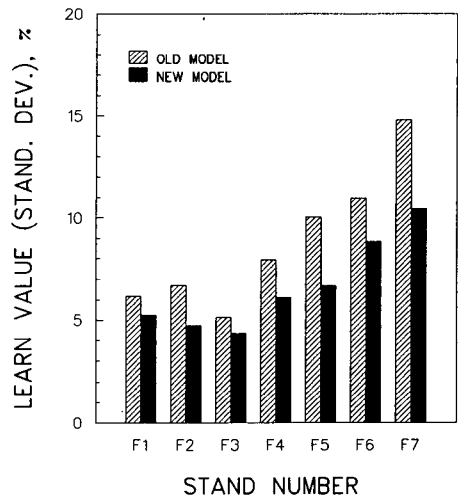


Fig. 6 The change of standard deviation of learn value(a) before and after model modification

중도가 크게 향상되었음을 의미한다.

## 5. 결 론

강판의 열간 압연하중 예측모델의 적중도 향상을 위한 연구결과, 보정함수의 압연하중 예측모델에의 적용은 조업조건 및 스탠드 별 특성을 모델에 직접



반영해 주는 효과를 주게됨으로써 모델의 적중정도를 크게 향상시켰다. 본연구의 보정함수는 각 조업 분류별로 최소 편차원칙을 통해 얻어진 보정계수를 회귀분석하여 구했다. 극저탄소강의 사상압연시 보정함수를 사용한 새로운 모델을 실기적용한 결과 평균편차량이 약 30% 감소되는 효과를 나타내어 모델의 정확도가 크게 개선되었다.

### 참고문헌

- (1) 志田茂, 1965, “變形抵抗 と 壓延荷重,” 日立平論, Vol. 47, No. 9, pp. 1576~1580.
- (2) Yoshida, H., Isobe K., Hirose, Y., Naoi, T., Hamada, K. and Itoh, Y., 1982, “A Mathematical Model of Rolling Load Estimation in Hot Strip Mills,” J. of the JSTP, Vol. 23, No. 252, pp. 63~70.
- (3) Sakai, T. and Ohashi, M., 1981, “The Effect of Temperature, Strain Rate, and Carbon Content on Hot Deformation of Carbon steels,” J. of ISIJ, Vol. 67, No. 11, pp. 2000~2009.
- (4) Wray, P. J., 1982, “Effect of Carbon Content on the Plastic flow of Plain Carbon Steels at Elevated Temperatures,” Met. Trans. A, Vol. 13A, No. 1, pp. 125~134.
- (5) Yada, H., Matsuzu, N., Nadajima, K., Watanabe, K. and Todida H., 1983, “Strength and Structural Changes Under High Strain Rate Hot Deformation of Carbon steels,” Trans. of ISIJ, vol. 23, No. 2, pp. 100~109.
- (6) 志田茂, 1970, “熱間壓延における壓延荷重,” 日立平論, Vol. 52, No. 8, pp. 731~736.
- (7) Nagasaki, C. and Kihara, J., 1988, “Effect of Carbon Content on Deformation Resistance of Carbon Steels in Austenitic Temperature Range,” J. of ISIJ, Vol. 74, No. 7, pp. 1418~1425.
- (8) Sims, R. B., 1954, “The Calculation of Roll Force and Torque in Hot Rolling Mills,” Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 166, pp. 75~81.
- (9) 박성현, 1985, 공업통계학, 대영사, 서울, pp. 210~238.