

## 조질압연에서의 연신율제어를 위한 set-up 모델 개발

이원호\*

(2000년 11월 24일 접수)

### Development of Set-up Model for Elongation Control in Steel Skin Pass Mill

W. H. Lee

#### Abstract

The mathematical set-up model was developed to reduce the mechanical property deviation in annealed and slightly rolled steel strip. The mechanical peculiarities of skin pass rolling process, such as high friction value and non-circular contact arc, low reduction and non-negligible entry and exit elastic zones as well as central restricted deformation zone are all taken into account. The deformation of work rolls is calculated with the influence function method and arbitrary contact arc shape is permitted. The strip deformation is modeled by slab method and the entry and exit elastic deformation zones are included. The restricted deformation zone near the neutral point is also considered. It was revealed that the new model has better accuracy than present regression model by statistical analysis with actual mill rolling data.

**Key Words :** Skin Pass Rolling, Set-up Model, Elongation Control, Rolling Force

#### Nomenclature :

- a : 각도  $\theta$  지점에서의 작업률 반경  
E : Young 율  
f : 선진율  
h : 롤캡내의 판두께 분포  
 $h_1, h_2$  : 압연전 및 압연후의 판두께  
 $h_n$  : 중립점에서의 판두께  
 $h_s$  : 예비변형 영역 경계지점에서의 판두께  
p : 압연압력  
P : 압연하중

- $\Delta P$  : 압연하중 편차량  
R : 변형되지 않은 상태의 작업률 반경  
 $R_s$  : 상하 작업률 중심간 거리  
 $R_{max}$  : 작업률 표면 변형의 최대크기  
 $\Delta s$  : 롤캡 제어량  
T : 압연 토크  
 $T_b, T_f$  : 후방 및 전방장력  
U : Jortner's influence function  
 $V_1, V_2$  : 압연전 및 압연후의 판속도  
W : 압연판의 폭

\* POSCO 기술연구소 계측제어연구그룹

## 조질압연에서의 연신율제어를 위한 set-up 모델 개발

$\beta$  : 변형된 작업률이 수평선과 이루는 각도  
 $\delta$  : 강판과 작업률의 접촉면에서의 한계 예비 변형량  
 $\varepsilon$  : 연신율  
 $\Delta \varepsilon$  : 연신율 편차량  
 $\eta$  : 두 접촉면의 상대 접근율  
 $\theta$  : 원점으로 정한 작업률 임의 위치로 부터의 각도  
 $\theta_s$  : 예비변형 영역의 경계  
 $\mu$  : 마찰계수  
 $\xi$  : 변형이 되지않은 작업률이 수평선과 이루는 각도  
 $\sigma_y$  : 강판의 항복 응력  
 $\tau$  : 작업률과 강판 사이의 마찰력  
 $\tau_s$  : 예비변형 영역 경계지점에 작용되는 마찰력  
 $\nu$  : Poisson의 비  
 $\phi$  : 압연하중 분포를 얻기 위해 설정된 계산 영역  
 $\phi_0$  : 상하 작업률 중심을 연결한 중심선까지의 각도  
 $\phi_n$  : 중립각

### 1. 서 론

조질압연(skin pass rolling)은 생산된 압연판의 기계적 성질 개선, 제품 표면에의 조도부여 그리고 판의 형상 교정 등의 목적으로 실시되는 대단히 중요한 공정임에도 불구하고 그다지 많은 관심을 끌지 못하고 있었다. 그러나 최근 들어, 수요가의 제품에 대한 요구수준이 까다로워지고 있고, 생산자 측에서도 보다 좋은 제품을 생산하고자 하는 의식이 제고되면서 조질압연에 대한 설비 관리나 제품 생산공정의 표준화등에 관심이 증가하게 되었다.

그런데, 조질압연을 통해 생산된 최종제품의 품질을 분석한 결과, 조질압연의 가장 중요한 목적인 연신율제어의 경우, 어떤 제품은 목표 연신율이 1.1%임에도 불구하고 실제 연신율은 0.9%로부터 1.7%에 이르는 넓은 범위의 편차를 갖고 있어서 수요가의 불만 요인이 되고 있었다. 연신율이 목표치에 미달하게 되면 수요가의 2차가공 공정에서 항복점 연신이 발생하여 제품의 표면품질이 저하하게 된다. 또, 실제 연신율이 목표치 보다 큰 경우에는 수요가의 2차가공 부하증가의 요인�이 된다. 이와 같은 현상의 원인을 분석해본 결과 조질압연기의 초기치 설정 모델인 set-up 모델이 부정확한 것으로 나타났다.

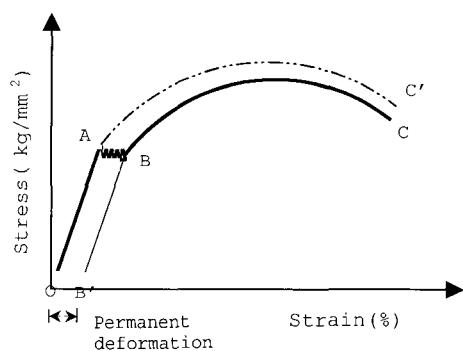
따라서 이러한 문제점을 해결하고자 본 연구에서는 우선 압연현상에 근거한 정확한 압연하중 예측모델을 개발하고자 노력하였다. 문헌조사를 통해 조질압연에 적용 가능한 여러 가지 압연 이론식<sup>(1~10)</sup>들을 분석하고, 실제의 압연조건에 근접하는 형태의 모델을 도출해 내었다.

특히, 본 연구에서는 종래의 연구자가 다루지 않았던 압연판의 탄성변형 영역과 소성변형 영역의 중간에 예비변형 영역이 존재한다는 가설을 세우고, 이것을 고려한 새로운 set-up 모델을 도출하였다. 그리고 새롭게 개발된 모델의 정확성을 검증하기 위해 기존의 모델(회귀분석 모델)은 물론 압연실적 데이터와 비교 분석해 보았다.

### 2. 조질압연에서의 연신율 제어

일반적으로, 냉간압연 및 소둔과정을 거쳐 생산된 강판을 인장실험하게 되면 Fig. 1의 실선, 즉 O-A-B-C를 따르는 기계적 성질을 보인다. 그러나 이와 같은 성질은 2차가공중 A-B구간에서의 불규칙한 소성변형에 의해 제품의 표면품질을 떨어뜨리는 요소로 작용한다. 따라서 이러한 바람직하지 못한 현상을 배제하기 위해 소둔후 조질압연이라고 하는 약간의 압연을 실시하게 된다. 이렇게 된 강판은 Fig. 1의 2점쇄선을 따르는(O-A-C') 기계적 성질을 나타내게 되는 것이다.

한편, 조질압연기는 통상 4단 혹은 6단 압연기로 구성되며, 일반적인 냉간압연기와 마찬가지로 연신제어 기능 및 형상제어기능을 갖추고 있으며 이들은 공정제어용 컴퓨터에 의해 자동제어되고 있다. Fig. 2는 조질압연기를 구동시키고 있는 컴퓨터 및 이에 의한 자동제어 개념도를 나타내고 있다.



**Fig. 1 Mechanical property change of steel strip by skin pass rolling**

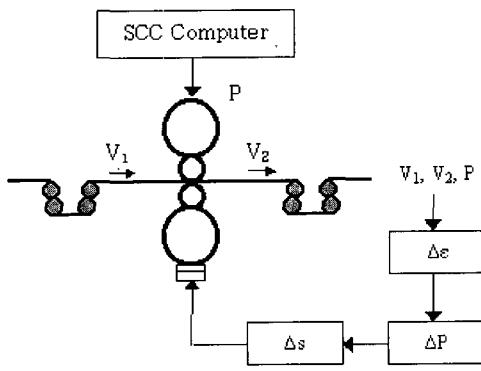


Fig. 2 Configuration of steel skin pass mill and its elongation control logic

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 조질압연기는 압연될 제품의 제조조건을 기준으로 압연기의 초기 설정치(initial set-up value)를 SCC(Supervisory Control Computer)에서 계산하게 되고, 이를 PLC(Programmable Logic Controller)에 전송하고 이를 바탕으로 Feedback 제어를 실시하게 된다.

조질압연기에서 가장 중요시되는 초기 설정치는 압연하중이다. 압연하중은 제품이 필요로 하는 연신율(elongation)을 기준으로 여러가지 작업조건에 의해 결정된다. 따라서 조질압연에 의해 정확한 연신율을 얻기 위해서는 정확한 압연하중의 예측은 필수 불가결한 요소이다.

그러나 대부분의 조질압연기는 압연하중의 예측을 위해 일반 냉간압연에서 사용되고 있는 수식모델을 그대로 사용하거나 압연실적치를 통계분석하여 만든 회귀분석 모델을 사용하고 있다. 일반 냉간압연은 통상적으로 압하율이 10~30% 정도로 비교적 크기 때문에 수식모델을 구성하는 과정에서 압연전후에 발생되는 압연판의 탄성변형은 무시하고 있다.

그러나, 압하율이 2% 이내인 조질압연에서는 압연판 내에서 발생되는 탄성변형을 무시할 수 없으므로, 일반 냉간압연용 수식모델을 사용한 조질압연의 압연하중 예측은 정확도가 저하될 수밖에 없다. 또한, 회귀분석 모델의 경우는 압연조건이 많이 달라지거나 새로운 강종을 개발하는 경우에는 즉시 대처하기 어려운 단점을 안고 있다.

Fig. 3은 통상적인 조질압연기에서 많이 사용되는 회귀분석 수식모델에 의한 압연하중 예측 결과를 압연후

계측된 실제의 값과 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 그다지 정확도가 높지 않음을 알 수 있다. 따라서 회귀분석 수식모델에 의한 정확한 연신율제어는 기대하기 힘들것으로 생각되며, Fig. 4는 예상했던 바와 같은 결과를 나타내는 그림이다.

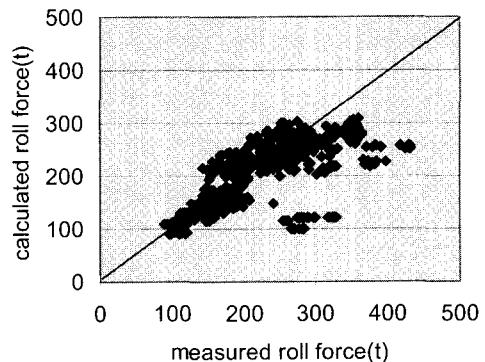


Fig. 3 Rolling force prediction results by existing regression model

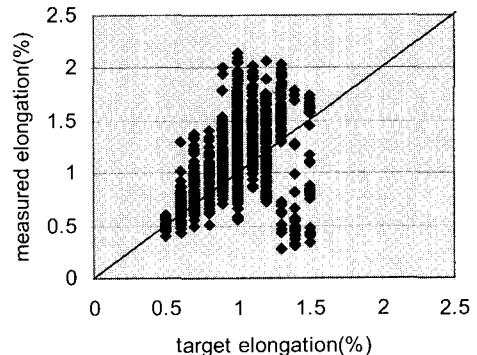


Fig. 4 Elongation control results by existing regression model

### 3. 조질압연용 set-up 모델의 개발

전술한 바와 같이 조질압연은 일반 냉간압연과는 달리 압하량이 대단히 작다. 따라서 롤캡내에서의 압연판의 변형이 냉간압연에서와는 판이하게 다르다. 이것은 압연기의 입출측에서 발생되는 판의 탄성변형을 무시할 수 없기 때문이다. 따라서 이와 같은 압연현상을 고려하고 조질압연의 특성을 반영하여 여러가지의 다른 모델이 검토되었으나 여기서 소개되는 Non-circular arc 모델<sup>(2)</sup>이 조질압연의 특성을 가장 잘 나타내고 있는 것으로 생각된다.

Non-circular arc 모델의 특징을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 접촉호의 길이는 염밀해, 즉 압연이론의 수학적인 관계로부터 구해지며 압연하중에 의해 어떠한 형태의 변형에도 적용이 가능하다.

둘째, 제한된 변형으로부터 기인된 중립점 부근에서의 선형 변형 마찰구간을 고려하였다.

셋째, 롤캡의 입출측에 형성된 탄성변형 구역을 포함한다<sup>(5,7)</sup>.

Non-circular arc 모델의 기하학적인 형태, 즉 압연판의 변형영역의 형태는 Fig. 5와 같다. 그리고 이 모델을 구성하는 모든 방정식은 극좌표를 기준으로 한다.

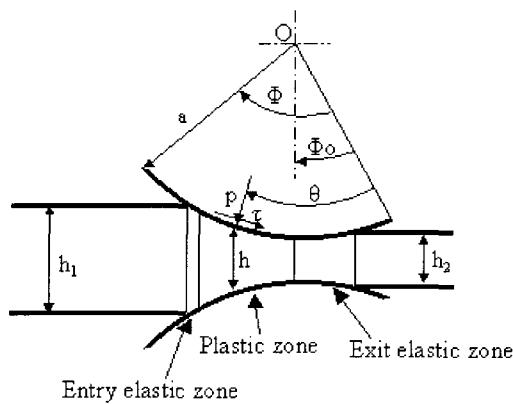


Fig. 5 Deformation zones in roll gap during skin pass rolling

Non-circular arc 모델의 주요 이론식을 나타내어 보면 다음과 같다. 우선, 작업롤의 탄성변형은 압연판에 작용되는 압연압력과 연관이 있으며, 이를 선형 적분방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$a(\theta) = \int_0^\phi U(\theta - t)P(t)dt + R \quad (1)$$

압연판의 두께 분포는 변형된 롤의 반경에 의해 결정되며 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$h(\theta) = R_s - 2a(\theta) \cos(\theta - \phi_0) \quad (2)$$

압연판에 작용되는 압연압력의 분포는 롤캡의 형태와 관련이 있으며 이를 미분방정식으로 나타내면 다음과 같다. 탄성영역에서의 압연압력분포는

$$\frac{dp}{d\theta} = -\frac{2a}{h} \left[ \frac{\tau\nu + p(1-2\nu)\tan\beta}{1-\nu} + \frac{(2h-h_1)\tan\beta E}{h_1(1-\nu^2)} \right] \quad (3)$$

소성변형 영역에서는

$$\frac{dp}{d\theta} = -\frac{2a}{h} (\tau - \sigma_y \tan\beta) + \frac{d\sigma_y}{d\theta} \quad (4)$$

한편, 롤캡내에서는 두 종류의 마찰이 존재한다. 이것은 슬립마찰과 예비변형 마찰이다. 슬립이 발생하는 영역에서는 마찰력이 Coulomb의 법칙인  $\tau = \mu p$ 의 관계식을 따르고, 중심부의 완전 소성영역과 인접한 예비 변형영역(준 소성영역)에서의 마찰계수는 다음과 같이 선형적으로 변한다고 가정하였다. 이 가정은 통상의 냉간 압연이 소성변형 영역중 중립점에서 마찰력이 최고치를 갖으며, 그 전후방향으로 감소되는 형태, 즉 Friction hill을 이룬다고 하는 이론에 근거한 것이다.

$$\tau = \frac{\theta - \phi_n}{\theta_s - \phi_n} \tau_s \quad (5)$$

예비변형 영역의 경계구역은 다음과 같은 식에 의해 구할 수 있다.

$$\left| (\theta_s - \phi_n)R \left( \frac{h_n}{h_s} - 1 \right) \right| = 2\delta \quad (6)$$

중심부에 예비 변형영역이 존재한다고 하는 개념은 롤의 표면에 존재하는 탄성 예비 변형 구역이 압연판의 소성변형과 일치하는 것이다. 따라서 예비 변형영역에 속하는 롤과 압연판이 접촉되고 있는 면에서는 아무런 슬립도 발생하지 않는 것을 의미한다.

Sutcliffe<sup>(11)</sup>에 의하면 어떤 탄성체이고 거친 표면이 부드러운 표면과 접촉하는 경우에는 제한된 범위내에서 예비 변형이 존재한다고 한다. 따라서 이러한 이론적인 근거를 배경으로 한다면 우리가 취급하는 조질압연에서도 제한된 범위에서의 예비변형 구역을 다음과 같이 추정해낼 수 있다.

$$\delta = \frac{2 - \nu}{2(1 - \nu)} \mu R_{\max} \eta \quad (7)$$

일반적으로  $\eta$ 는 0과 1사이의 값을 갖게 되며, 압연의 경우에는 상대적인 접촉량을 이론치의 최대값, 즉  $\eta=1$ 로 가정할 수 있다. 그 이유는 압연판의 경우에는 이미 롤 캡내에서 소성변형에 다다랐기 때문이다.

일단 압연압력과 압연판의 프로파일이 결정되면 압연 하중  $P$ 와 토오크  $T$ 는 압연압력과 마찰력의 분포식을 다음과 같이 적분함으로써 계산이 가능하다.

$$P = \int_0^\phi a(\theta) \frac{\cos \beta}{\cos \xi} [p(\theta) + t(\theta) \tan \beta] d\theta \quad (8)$$

$$T = \int_0^\phi a^2(\theta) [t(\theta) + p(\theta) \tan \xi] d\theta \quad (9)$$

한편, 선진율은 기하학적인 관계로부터 다음과 같은 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$f = \frac{h_n}{h_2} - 1 \quad (10)$$

식(1)로부터 식(10) 까지의 주요 이론식을 이용하여 주어진 압연조건을 대입하여 계산하게 되면 롤의 변형형상은 물론 압연판과 롤과의 사이에 작용하는 응력분포등도 구해낼 수 있게 된다. 그리고 구해진 응력분포를 적분하게 되면 set-up 모델의 궁극적인 목적인 압연하중의 계산을 행할 수 있게 된다. Fig. 6은 개발된 set-up모델을 이용하여 압연하중을 계산해 내는 과정을 나타내는 순서도이다.

#### 4. 해석 및 모델의 평가

조질압연의 물리적인 현상을 근거로 도출된 set-up모델을 이용하여 몇 가지 조건을 변경해 가면서 롤캡내의 현상을 예측해 보았다. Fig. 7은 실제의 조질압연 조건중 압연판의 재질을 달리 했을 때 나타나는 현상을 보여주는 계산 결과이다. Fig. 7의 (a)는 롤캡내의 판두께 변화를 나타내고 있으며, 우측으로부터 좌측으로 압연이 진행되고 있음을 유의해야 한다. 롤캡내에서의 두께 변화는 상당히 복잡한 양상을 띠고 있음을 볼 수 있다.

그리고 Fig. 7의 (b)는 이 때 압연판에 작용되는 수직 방향의 압력분포를 나타낸다. 당연히 소재의 강도가 높은 쪽이 압력의 분포가 크게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 한편, 이 두개의 그림을 함께 비교해 보면, 예상했

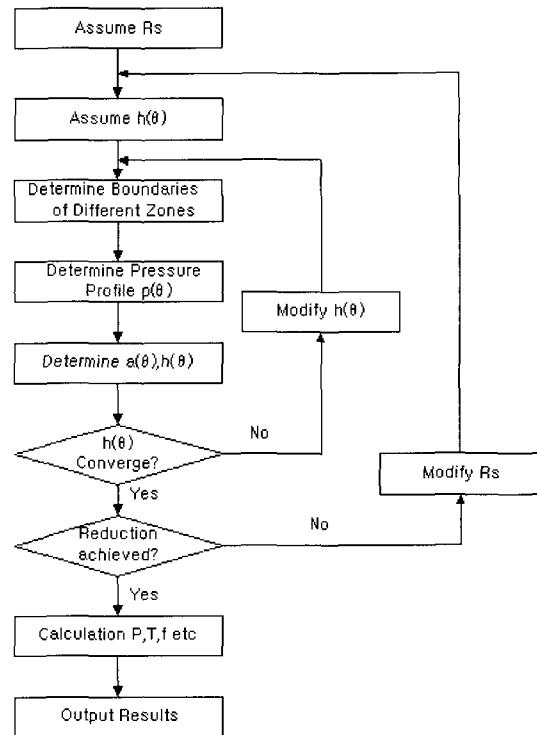


Fig. 6 Flow chart for rolling force prediction algorithm

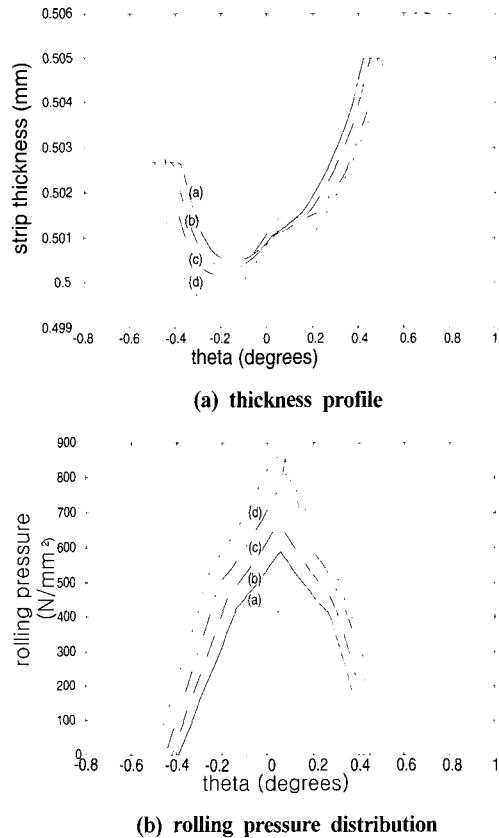
던 바와 같이 동일한 두께의 소재를 동일한 압하율로 압연하더라도 강도가 높은 경우에는 압연기 출측에서의 탄성회복량이 많아지고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 계산 결과는 본 연구에서 도출한 새로운 조질압연 이론식들이 물리적인 현상을 잘 나타내고 있음을 보여주는 것이다.

개발된 새로운 모델이 물리적인 현상을 잘 표현하고 있으므로 이를 실제의 압연기에 적용하여 모델을 평가해 보았다.

개발된 모델, 즉 Non-circular arc 모델을 압연설비에 있는 별도의 컴퓨터에 프로그램을 설치하고 SCC 컴퓨터로 부터의 통신을 통해 수신된 압연조건을 이용하여 압연하중을 계산하고, 이를 실제의 압연하중은 물론 기존 SCC에서 사용중인 압연하중 예측 모델로부터 계산된 압연하중과 비교하였다.

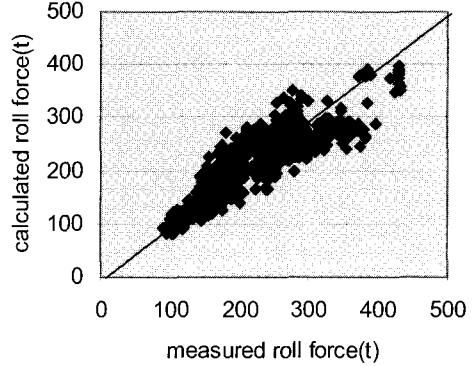
일정기간 동안의 데이터 수집을 통해 충분한 데이터를 확보한 후 개발된 모델의 평가 및 기존 모델과의 비교를 실시해 보았다. 개발모델의 평가에 사용된 코일의 수는 1246매이며 약 1개월간의 데이터이다.



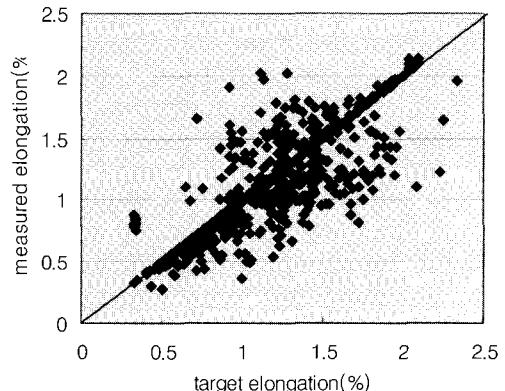
**Fig. 7 Gauge and pressure profile under different yield stresses** ( $R=205\text{mm}$ ,  $h_1=0.505\text{mm}$ ,  $\varepsilon=0.46\%$ ,  $W=1073\text{mm}$ ,  $V_2=37\text{m/min}$ ,  $T_b=2496\text{kg}$ ,  $T_f=3616\text{kg}$ ,  $\mu=0.12$ )  
 (a)  $\sigma_y=210\text{MPa}$ , (b)  $\sigma_y=240\text{MPa}$ ,  
 (c)  $\sigma_y=270\text{MPa}$ , (d)  $\sigma_y=300\text{MPa}$

Fig. 8은 본 연구에서 제안된 Non-circular arc 이론 모델로 계산한 압연하중과 측정된 압연하중을 비교한 것이다. 예측 압연하중이 측정된 값과 비교적 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 3의 기준의 회귀분석 모델과 비교해 보면, 제안된 Non-circular arc 모델이 훨씬 정확한 것임을 알 수 있다.

통계해석 결과 제안된 Non-circular arc 이론 모델로 예측한 압연하중과 측정된 압연하중 사이의 상관계수는 0.9037이고 상대오차는 0.1833으로 나타났다. 참고로 회귀분석모델의 상관계수 및 상대오차는 각각 0.7003 및 0.5096으로 나타났다. 따라서 Non-circular arc 이론 모델은 회귀분석 모델에 비해서는 훨씬 더 정확하다고 할 수 있다.



**Fig. 8 Rolling force prediction results by Non-circular arc model**



**Fig. 9 Elongation control results by Non-circular arc model**

이와 같이 향상된 압연하중 예측 모델을 사용하여 연신율제어를 하게 되면 보다 정확한 연신율 제어가 가능하리라 생각된다. Fig. 9는 새로운 set-up 모델에 의해 압연된 판의 목표 연신율과 예측 연신율의 비교를 나타내는 것으로서, Fig. 3의 회귀분석 모델에 의한 연신율 제어에 비해 훨씬 향상된 것을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

조질압연기를 대상으로 실시된 본 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 개발된 Non-circular arc 이론 모델은 압연하중을 비교적 정확하게 예측할 수 있을 뿐만 아니라 선진율도 잘 계산해낼 수 있기 때문에 측정 압연하중과 선진율을 이용하여 각 코일의 변형저항과 마찰계수를 재계산하는 데 사용하였다. 이러한 방법을 이

용하게 되면 변형저항과 마찰계수의 조정에 있어서 그들이 갖는 물리적 특성을 손상시키지 않고도 비교적 정확한 값을 얻어낼 수 있게 되는 것이다. 개발된 새로운 모델의 정확성을 확인하기 위해, 실제의 압연조건을 이용하여 압연하중을 계산해본 결과 기존에 사용되어 오던 회귀분석 모델에 비해 약 20% 이상의 정확도를 향상시킬 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- (1) Jortner, D., Osterle, J. F., and Zorowski, C. F., 1960, "An Analysis of Cold Strip Rolling", Int. J. Mech. Sci., Vol.2, pp. 179~194.
- (2) Grimble, M. J., 1976, "A Roll-Force Model for Tinplate Rolling", GECJ. Of Science & Tech., Vol.43, No.1, pp. 3~12.
- (3) Fleck, N. A., Johnson, K. L., Mear, M. E. and Zhang, L. C., 1992, "Cold Rolling of Foil", Proc. Inst. Mech. Eng., Part B: J. Eng. Man., 206, pp. 119~131.
- (4) Zhu, Q., 1984, " Deformation Characteristics of the Cross Shear Cold Rolling of Ultra Thin Strip and the Theory of 'Elastic Plug' ", Proc. Adv. Tech. Plastic. 2, p. 1173.
- (5) Yuen, W. Y. D., Nguyen, D. N., and Matthews, D.L., 1996, "Mathematical Modeling of the Temper Rolling Processes", 37th MWSP CONF.PROC., ISS, VOL. XXXIII, Ontario Canada, pp. 165~172.
- (6) Dixon, A. E. and Yuen,W. Y. D., 1995, "A Computationally Fast Method to Model Thin Strip Rolling", Proc. Computational Techniques and Applications Conference 95, Melbourne, Australia, pp. 239~246.
- (7) Domanti, S. A., Edwards, W. J., Thomas, P. J. and Chefneux, I. L., 1994, "Application of Foil Rolling Models to Thin Steel Strip and Temper Rolling", Proc. 6th International Rolling Conference, Duesseldorf, Germany, pp. 422~429.
- (8) Gratacos, P. and Orno, F., 1994, "Elastoplastic Models for Cold Rolling, Application to Temper Rolling", Proc. 6th International Rolling Conference , Duesseldorf, Germany, pp. 441~445.
- (9) Montmitonnet, P., Massoni, E., Vacance, M., Sola, G. and Gratacos, P., 1993, "Modeling for Geometrical Control in Cold and Hot Rolling", Ironmaking and Steelmaking Engineering, Vol.20, No.4, pp. 254~260.
- (10) Haeseling, G., Kastner, S., Kramer, A. and Hartung, H. G., 1998, "New Foil Rolling Theories and Their Importance for Industrial Practice", Material Processing Tech. International, No.6, pp.86~91.
- (11) Sutcliffe, M., P., F., and Johnson, K., L., 1990, "Lubrication in cold strip rolling in the mixed regime", Proc. Ins. Mech. Eng., Vol.204, pp. 249~261.