

신경망 함수를 이용한 자동차강의 변형저항 개발 및 압연하중 예측

곽우진*

포스코 기술연구소, 공정제어연구그룹*

Development of Flow Stress equation of High strength steel for automobile using Neural Network and Precision Roll Force Model

W. J. Kwak*

Rolling Technology & Process Control Research Group,
POSCO Technical Research Laboratories*

Abstract

The flow stress value was calculated by comparing predicted and measured roll force. Using basic on-line roll force model and logged mill data the flow stress equation of high strength steel for automobile was derived. The flow stress equation consists of the flow stress equation of carbon steel and flow stress factor calculated by neural network with input parameters not only carbon contents, strip temperature, strain, and strain rate, but also compositions such as Mn, P, Ti, Nb, and Mo. Using the flow stress equation and basic roll force model, precision roll force model of high strength steel for automobile was derived. Using test set of logged mill data the flow stress equation was verified.

Key words : hot strip rolling, flow stress, neural network, roll force, high strength steel

1. 서론

갈수록 엄격해지는 환경규제로 인하여, 자동차의 배기가스량을 줄이기 위해 차체의 경량화를 위한 노력을 많이 기울이고 있다. 이러한 노력의 일환으로 기존의 강철로 이루어진 부품들을 강도가 높고 무게는 가벼운 플라스틱이나 알루미늄으로 대체하려는 시도가 있지만, 아직까지는 가격경쟁력에 있어 철을 대체하는 데는 역부족이다. 지금까지는 차체의 경량화를 위해 철의 강도를 높여 부품의 부피를 줄이는 연구가 많이 진행중이고, 현재까지 여러가지 고강도 강종이 설계되어, 많은 철강 제품이 생산되고 있다.

고강도의 철강 제품은 일반 탄소강과는 달리 고용강화 뿐만 아니라 석출, 재결정, 상변태와 같은 현상들을 제어해서 목적하는 제품 특성을 얻기 때문에 열간변형저항이 탄소함량 이외에도 다른 화학성분들에 많은 영향을 받는다. 현재까지 개발된 자동차용 강종은 여러가지 화학성분중에서 주로 Mn, P, Ti, Nb, Mo 과 같은 화학성분에 의해 열간변형저항값이 결정된다.

열간압연공정을 이용해서 여러가지 다양한 제품을 생산할 때 결함없이 목적하는 제품을 얻기 위해서는 압연공정에서 제어가능한 여러가지의 공정변수들을 적절하게 결정 해주어야 한다. 목표

두께를 얻기 위해서는 압연기의 탄성변형을 고려해서 롤갯을 적절히 설정해주어야 한다. 압연기의 탄성변형량은 압연기의 탄성계수와 스트립-롤 사이의 압연하중 값에 의해 결정이된다. 압연기의 탄성계수값은 압연기 마다의 고유한 물성치이다. 압연하중은 압하율, 폭과 같은 공정조건 이외에도 변형상태, 온도에 따른 강종마다 고유의 물성치인 열간변형저항값에 의해서 결정이된다. 결국 정밀한 롤갯 설정을 위해서는 정밀한 압연하중 예측 및 열간변형저항 예측 기술이 필요하다.

열간압연 시스템은 소성유동 및 열전달, 롤과 스트립의 접촉과 같은 현상들이 복합적으로 작용하고 있어 변형저항값을 알고있다해도, 정밀한 압연하중값을 얻기가 힘들다. 많은 연구자들이 압연에 대한 연구를 진행해왔었지만, 최근에 들어서야 유한요소해석과 같은 방법으로 정밀한 해석을 통해 정밀한 압연하중값을 얻을 수 있게되었다. 유한요소해석과 같은 방법은 해의 신뢰도는 높지만, 계산시간이 많이 소요된다. 제품을 생산하기 위한 공정설계에는 정밀하게 예측하는 것 뿐만 아니라 제품 생산전에 짧은 시간내에 공정설계가 이루어져야 하므로 현재로서는 유한요소해석 시스템을 on-line 공정설계에 이용할 수는 없다. 이 때문에 본 논문에서는 해의 정밀도를 유한요소해석 결과와 같은 수준으로 얻을 수 있는 한편, on-line 계산이 가능한 예측 모델식(1)을 이용하였고, 3장에서 소개하고 있다.

유한요소해석 결과를 기초로하여 개발한 On-line 예측 모델은 정밀한 압연하중 예측값을 얻을 수 있으나, 자동차강의 고온 압연하중값 예측을 위해서는 여러가지 종류의 자동차강의 변형저항 특성을 반영해주어야 한다. 일반 저탄소강에 대해서는 일반적으로 알려져있는 Shida(2) 등의 변형저항식을 이용하면 되지만, 합금강들에 대해서는 필요한 모든 강종의 변형저항 함수를 얻기가 힘들기 때문에, 본 연구에서는 조업 데이터로부터 개별 강종의 변형저항 특성을 반영해 줄 수 있는 신경망(3) 함수를 도입하였다.

2. 열간변형저항

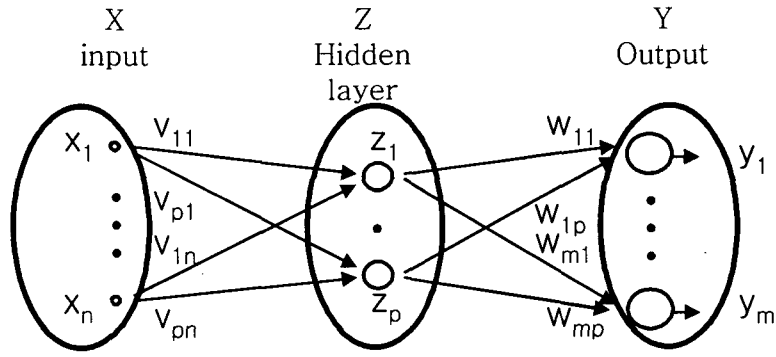
2.1 자동차강의 열간변형저항

자동차에 사용되는 강은 인장강도 기준으로 200~1200 MPa 범위내에서 많은 종류가 개발되어 생산되고있다. 이들 규격약호들은 주로 최종제품의 인장강도를 기준으로 분류되고있다. 하지만, 고온에서의 변형저항은 인장강도와 항상 비례하지만은 않는다. 인장강도는 달라도 열간변형저항은 동일한 경우도 존재한다. 화학성분이 동일하지만 열간압연후 열처리 방법이 다를 경우가 이에 해당한다.

자동차강의 열간변형저항을 구하기 위해서는 각 강종마다 또한 각 온도, 변형률속도, 화학성분에 따라 고온인장시험을 해서 구할 수 있다. 또는 압연조건을 정밀하게 제어한 모의압연실험을 통해서 압하력 비교 방법으로 열간변형저항을 구할 수도 있다. 이러한 방법들은 실험 조건에서는 정밀한 변형저항값을 얻을 수 있으나, 실험횟수의 한계로인해 일부강종에 대해서만 행해지게되고, 또한 열간압연의 다양한 조건을 포함하지 못하여 제한된 공정조건에서만 이용가능하다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 풍부한 조업실적이 있을경우 이를 이용하여 압하력 비교 방법으로 변형저항을 구할 수 있다.

2.2 열간변형저항 수식모델

일반 탄소강에서의 열간변형저항 모델은 Shida(2), Misaka식과 같이 탄소함량, 온도, 변형률속도, 변형률의 함수 형태로 이루어져 있다. 그런데, 이와 같은 모델은 변형율이 높아 동적재결정이 일어나는 영역에서는 사용할 수가 없는 문제점이 있다. 이를 보완하기위해 동적재결정 현상을 고려한 변형저항 모델들이 제안되고 있다. 그런데, 이러한 모델들은 특정 합금강에 대해서 개발되었다. 많은 화학성분들의 효과를 수학적함수로 표현하기는 아주 어렵기 때문이다. 이 때문에, 본



input (neuron : 10 EA)
 x_1 : strip temperature
 x_2 : strain rate
 x_3 : strain
 x_4 : ratio of width to strip
 $x_5 \sim x_{10}$: C, Mn, P, Ti, Nb, Mo

Hidden layer
 F1~F5: 1 hidden layer (50 EA)
 F6,F7: 2 hidden layer (50, 50 EA)

output (neuron : 1 EA)
 y : factor of flow stress

Fig. 1 Multi-layer neural network

논문에서는 많은 강종의 다양한 화학성분을 고려할 수 있기 위해서 신경망(3) 함수를 도입하였다. 변형저항 함수를 도출하기 위해서 스탠드별로 각각 독립적인 신경망을 구성하여 모두 7개의 신경망으로 이루어져있다. 각 신경망의 구조는 Fig. 1 와 같다. 신경망의 입력 변수들로는 strip 입측온도, 변형률속도, 변형률, 폭과 Strip 두께비, 그리고 C, Mn, P, Ti, Nb, Mo의 6가지 대표 화학성분, 모두 10가지의 입력변수를 채택하였다. 중간층(Hidden layer)의 갯수는 스탠드별로 다르게 설정하였다. 기본적으로 1개의 중간층을 사용하고있으나, 후단 2 스탠드에서는 미세결정으로 인한 잔류변형을 누적효과로인해 비선형성이 크기 때문에 2개의 중간층을 이용하였다. 출력값은 변형저항 팩터(α)값으로써 다음의 식과 같이 자동차강의 열간변형저항 모델 계산에 이용된다.

$$\bar{\sigma}_{hss} = \alpha \cdot \bar{\sigma}_c$$

$$\alpha = \alpha(T, \dot{\epsilon}, \epsilon, W/H, C, Mn, P, Ti, Nb, Mo)$$

이때, W 는 strip의 폭, H 는 strip 두께, $\bar{\sigma}_c$ 는 일반탄소강의 열간변형저항, α 는 변형저항팩터, $\bar{\sigma}_{hss}$ 는 자동차강의 열간변형저항을 나타낸다.

3. On-Line 압연하중 예측 수식모델

3.1 변수, 무차원함수들

P는 소성발열량(P_d) 와 마찰열(P_f)의 합인 $P_d + P_f$ 로써 단위폭당 총발열양이고, P^* 는 $P_d^* + P_f^*$ 로써 장력이 없을때의 단위폭당 총발열양이다. F 는 단위폭당 압연하중, F^* 는 장력이 없을때의 단위폭당 압연하중, 그리고 f_s 는 선진율, f_s^* 는 장력이 없을때의 선진율로 표기한다. 장력이 없을때의 압연동력, 하중값 P^*, F^*, f_s^* 들은 가설모드의 동력값인 P 과 유한요소 해석결과로부터 도출한 Table 1의 모델수식으로 정밀하게 구할수 있다.

$$P' = V_2 H_2 E'$$

$$E' = \int \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \int_{H_2}^{H_1} \frac{\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T)}{h} dh$$

$$\bar{\varepsilon} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h}{H_1}, \quad \dot{\bar{\varepsilon}} = \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{\tan \phi}{h^2} V_2 H_2, \quad T = T_1 + \frac{1}{2} \Delta T$$

여기서, $\Delta T = T_2 - T_1$. 주목할 것은 V_2 와 T_2 는 앞서 기술 했듯이 유한요소 해석모델로부터 정밀하게 예측할 수 있다.

본 논문에서는 장력까지 포함한 압연동력, 하중, 선진율값을 구하는 방법을 소개한다. 그러기 위해서 $P/P^*, F/F^*$ 의 무차원 함수를 도입하여 장력의 영향을 고려해주었다.

3.2 전후방 장력 영향도 고려

전방장력 σ_1 , 후방장력 σ_2 는 다음과 같이 σ_m 을 도입해서 t_1, t_2 로 무차원화 시킬수 있다.

$$t_1 = \sigma_1 / \sigma_m$$

$$t_2 = \sigma_2 / \sigma_m$$

$$\sigma_m = \bar{\sigma}(\varepsilon_m, \dot{\varepsilon}_m, T)$$

여기서, $\varepsilon_m = \frac{\int \bar{\varepsilon} d\Omega}{\int d\Omega}, \quad \dot{\varepsilon}_m = \frac{\int \dot{\bar{\varepsilon}} d\Omega}{\int d\Omega}, \quad \bar{\varepsilon} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h}{H_1}, \quad \dot{\bar{\varepsilon}} = \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{\tan \phi}{h^2} V_2 H_2$ 이고,

온도 T 는 스트립의 평균온도이지만 적절한 모델이 없을 경우는 스트립 입측온도 T_1 을 이용해도 무방하다. $\bar{\varepsilon}$: 변형률, $\dot{\bar{\varepsilon}}$: 변형률속도, h : 스트립두께, H_1 : 스트립입측두께, ϕ : 출측기준 각도, σ_m : 평균 변형저항, V_2 : 스트립출측속도, Ω 는 Fig. 2에서와 볼 수 있듯이 롤갭 (roll gap)에서의 스트립 영역이다.

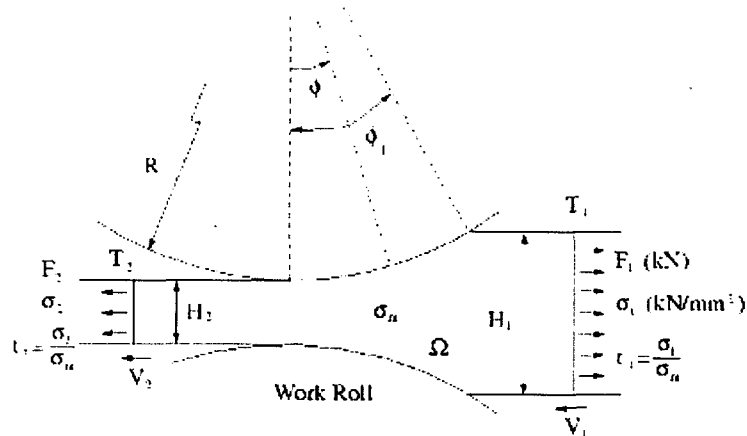


Fig. 2 Schematic diagram of hot rolling and process parameters

전, 후방 장력을 포함한 일련의 유한요소공정 시뮬레이션을 각 교란세트 (perturbed sets) - 기준 공정 세트에서 적어도 다음의 공정변수들중 한가지는 변화시킴: 스트립 재료, 롤반경(R), 롤각속도(ω), 스트립 입측온도(T_1) - 에 대해서 수행하였다.

교란공정에서 무차원화 시키지 않은 장력(σ_1, σ_2) 값을 일정하게 유지시킬 경우는 무차원 함수값들은 이들 공정변수에 영향을 받는다. 이에 반해 무차원화 시킨 장력(t_1, t_2)을 도입하여 일정하게 유지시킬 경우 $P/P^*, F/F^*, f_s$ 의 무차원 함수들은 이들 공정변수에 거의 영향을 받지 않음이 밝혀졌다.

앞의 결과들로부터 아래와 같이 단위폭당 압연동력, 압연하중 그리고 선진율을 결정할 수 있다

$$P_q/P_q^* \text{ (or } F/F^*) = 1 + at_1 + bt_2 + ct_1t_2$$

여기서 a, b, c 는 s, r, μ 의 함수이다.

$f_s - f_s^*$ 는 t_1, t_2 에 따라 선형적으로변하기 때문에 $f_s - f_s^*$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_s - f_s^* = dt_{12}$$

여기서 d 는 s, r, μ 의 함수이며, t_{12} 는 다음과 같이 정의된 유효장력이다.

$$t_{12} = t_2 - t_1 \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}$$

이때 t_{12} 에서의 t_1, t_2 의 조합에 대해서 $f_s - f_s^*$ 의 값은 동일하고 $t_{12} = 0$ 를 만족하는 전후방장력은 선진율에 영향을 주지않음을 알 수 있다.

Table 1. Mathematical expressions(1) for $f_s \cdot P/P^*$ and $P/R\omega F$

$$f_s = 0.0048914 - 0.02909\mu + 0.42262r - 0.0058703\alpha + 0.031745\mu^2 \quad (\text{A-1})$$

$$\begin{aligned} &+ 0.68881r\mu - 1.7152r^2 + 0.0319\alpha\mu - 0.22413\alpha r + 0.00097891\alpha^2 \\ &- 0.87795r\mu^2 + 4.1419r^2\mu - 0.63324r^3 - 0.027919\alpha\mu^2 - 0.8103\alpha r\mu + 1.3149\alpha r^2 \\ &- 0.0041996\alpha^2\mu + 0.093593\alpha^2r - 2.9166r^2\mu^2 + 0.89133\alpha r\mu^2 - 0.80781\alpha r^2\mu \\ &+ 0.29699\alpha r^3 + 0.052652\alpha^2r\mu - 0.30145\alpha^2r^2 \end{aligned}$$

$$\frac{P}{P^*} = 1.3279 + 7.0338\mu + 0.92543r - 0.68385s - 37.657\mu^2 - 15.021r\mu \quad (\text{A-2})$$

$$\begin{aligned} &+ 3.7968r^2 - 1.3637s\mu - 0.45699sr + 0.40331s^2 + 84.614\mu^3 + 69.279r\mu^2 \\ &- 15.359r^2\mu + 8.1608s\mu^2 + 3.0464sr\mu - 0.97710sr^2 + 0.11401s^2r - 0.10207s^3r \\ &- 9.694\mu^4 - 141.92r\mu^3 + 41.213r^2\mu^2 - 16.257s\mu^3 - 6.8752sr\mu^2 + 0.42907s^2\mu^2 \\ &- 0.085630s^2r\mu + 0.14575s^2r^2 - 0.018926s^3r + 0.012153s^4 + 25.144\mu^5 + 98.654r\mu^4 \\ &- 33.209r^2\mu^3 + 8.9833s\mu^4 + 7.2123sr\mu^3 - 0.39651s^2r\mu^2 + 0.30170s^2r^2\mu \\ &- 0.042234s^3\mu^2 - 0.012293s^3r^2 + 0.0014318s^4\mu + 0.0012960s^4r - 0.00057787s^5 \end{aligned}$$

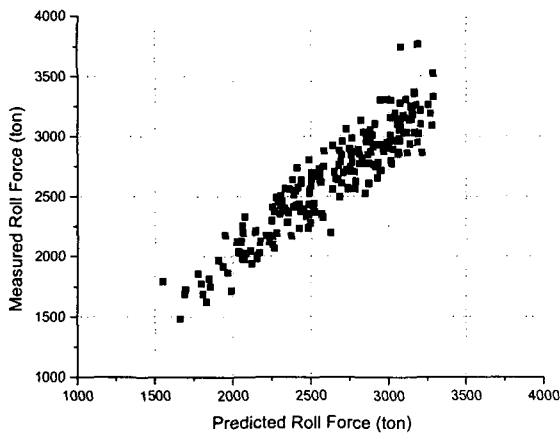
$$\frac{P}{R\omega F} = 1.1683r - 1.451\alpha r + 0.20337r^2 + 0.90187\alpha^2 r + 1.1169r^3 - 0.30378\alpha^3 r \quad (\text{A-3})$$

$$- 1.4188\alpha r^3 + 0.042717\alpha^4 r - 0.017804\alpha^3 r^2 + 0.43945\alpha^2 r^3$$

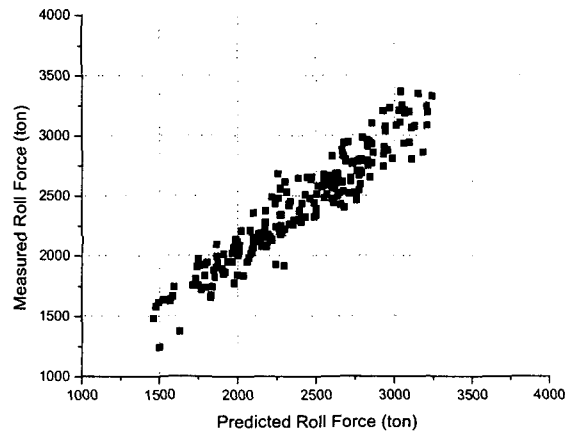
where $\alpha = \log_e(s)$, s : shape factor, r : reduction, μ : coulomb friction coefficient

4. 자동차강 열간변형저항 모델의 검증

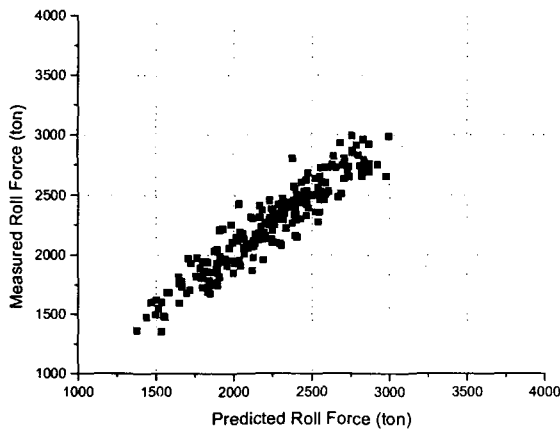
약 1500 가지의 조업 데이터를 이용하여 Back-propagation 학습기법을 이용해서 신경망 네트워크 가중치(weight)들을 구하였다. 이렇게 구한 신경망 구조의 변형저항 모델을 이용해서 Fig. 3 과 같이 약 220 가지의 조업 데이터에 대해서 예측 압연하중값과 실측값을 비교함으로써 검증을 해 보았다. 그 결과 다양한 강종에 대해서 정밀한 압연하중값을 예측할 수 있음을 알 수 있다.



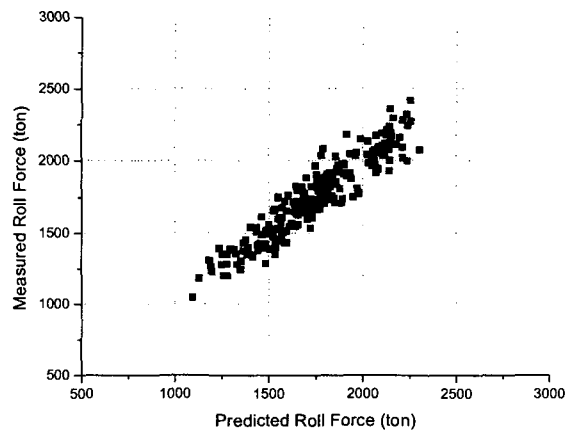
(a) F1 stand



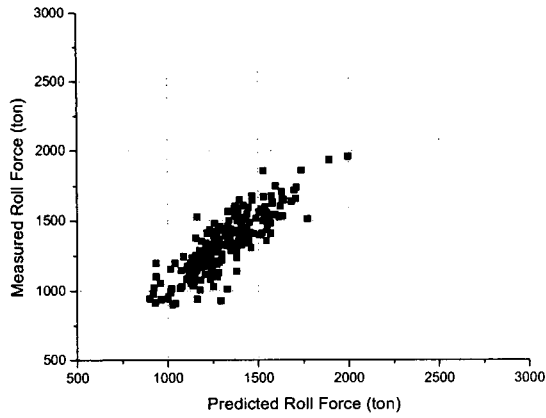
(b) F2 stand



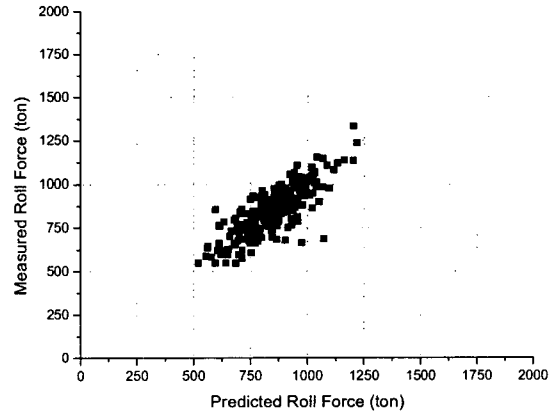
(c) F3 stand



(d) F4 stand



(e) F5 stand



(f) F7 stand

Fig. 3 Verification of Multi-layer neural network through the comparison of the rolling force between measured and predicted values.

기존모델의 압연하중 예측값과 실측의 오차와 새로운 열간변형저항 모델을 이용하여 예측한 압연하중값과 실측값의 오차를 비교하였다. Table 2 에서 볼 수 있듯이, 새로운 변형저항 팩터 함수를 이용할 경우 오차의 평균 및 분산이 줄어들음을 알 수 있다.

Table 2 The summary of the improvement of predict accuracy of roll force

Stand No.	오차평균(%)		오차 표준편차(%)	
	개선전	개선후	개선전	개선후
F1	2.9	-0.1	12.3	6.2
F2	0.5	-0.2	12.4	5.9
F3	0.04	-0.6	13.2	5.4
F4	0.2	0.1	13.6	5.7
F5	-1.8	-1.0	14.7	8.7
F6	-3.9	-0.5	16.7	9.5
F7	-2.0	1.0	18.3	11.2

이때 오차는 압연하중 예측값과 실측값의 차이를 나타낸 것이다.

5. 결론

유한요소해석 결과를 기초로한 정밀 압연하중 예측 수식모델과 조업데이터를 이용하여 자동차강의 다양한 합금강에 대한 열간변형저항 특성을 반영하는 신경망 함수를 도출하였다. 조업 데이터에 대해 검정한 결과 다양한 강종에 대해 적용가능한 정밀도를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 열간압연중 마지막 스탠드의 미재결정의 효과를 반영할 수 있다면 현재까지 개발한 on-line 수식 모델은 사상열간압연의 정밀한 공정제어에 이용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. W.J.Kwak, Y.H.Kim, J.H.Lee, and S.M.Hwang, Metallurgical and materials transactions

- A, Vol.33A, pp. 3255-3272 (2002)
2. S. Shida, J. Jpn. Soc. Technol. Plasticity, Vol. 20, pp. 610 (1969)
3. J.A. Freeman and D.M. Skapura, Addison Wesley (1992)