제5회 압연심포지엄 / 이준정 편
한국소성가공학회 pp. 175~183

열간 사상 압연중 압하력 예측 모델 개발 및 적용

이중형*,곽우진, 황상무***
기계공학과, 포항공과대학교*
광양기술연구소, POSCO**

The development and application of on-line model for the prediction of roll force in hot strip rolling

J. H. Lee*, J. W. Choi*, W. J. Kwak** and S. M. Hwang*
Mechanical Engineering Department, POSTECH*
POSCO Gwangyang Technical Research Laboratories**

Abstract

In hot strip rolling, a capability for precisely predicting roll force is crucial for sound process control. In the past, on-line prediction models have been developed mostly on the basis of Orowan's theory and its variation. However, the range of process conditions in which desired prediction accuracy could be achieved was rather limited, mainly due to many simplifying assumptions inherent to Orowan's theory. As far as the prediction accuracy is concerned, a rigorously formulated finite element(FE) process model is perhaps the best choice. However, a FE process model in general requires a large CPU time, rendering itself inadequate for on-line purpose. In this report, we present a FE-based on-line prediction model applicable to precision process control in a finishing mill(FM). Described was an integrated FE process model capable of revealing the detailed aspects of the thermo-mechanical behavior of the roll-strip system. Using the FE process model, a series of process simulation was conducted to investigate the effect of diverse process variables on some selected non-dimensional parameters characterizing the thermo-mechanical behavior of the strip. Then, it was shown that an on-line model for the prediction of roll force could be derived on the basis of these parameters. The prediction accuracy of the proposed model was examined through comparison with measurements from the hot strip mill.

Key words : hot strip rolling, on-line model, roll force

1. 압하력 모델의 개발 배경

사상압연시 무부하 롤 갭 설정은 압연 개시전 미리 예측된 압하력 정보를 사용하여 수행된다. 따라서 압하력의 정밀 예측은 제품 두께의 정밀제어를 위하여 필수적인 요소가된다. 한편, 벤더력, pair cross 각도 등의 설정에도 압하력 정보를 사용한다. 따라서 판 크라운 및 판 평탄도의 정밀제어에도 압하력의 정밀 예측이 필요하다. 압하력 예측을 위한 기초모델로는 Orowan 모델[1], Sims 모델[2], Alexander 모델[3], Tamano 모델[4] 등이 있다. 하지만 이러한 모델들은 근사해석으로부터 유도되어 정확한 압하력 예측치를 기대하기 어렵다. 본 보고서에서는 가장 정확한 수치해석 기법인 유한요소해석을 통해 여러 압연 공정조건들에 대하여 압하력을 예측하고 이를 수식 모델화하여 현장적용이 가능토록 하였다[5,6]. 먼저, 기존모델의 근간을 이루고 있는 Orowan 모델과 Sims 모델을 기초로하여 현장모델을 설명하고 정상상태 에서의 판의 유동과 온도 그리고 롤의 온도해석을 위한 유한요소 수식화 과정을 설명한다. 유한요소 해석 결과의 현장적용을 위해서 여러 압연공정 변수들을 정의하고 그들의 조합으로 구성된 무차원 변수를 도입하여 구성될 수식모델의 관련변수를 줄이면서 효율을 극대화 한다. 유한요소해석의 정확성은 해석시 사용되는 경계조건과 해석의 대상이 가지는 기계적, 열적 특성치들이 잘 알려져 있을 때 보장된다. 하지만 현장에서 생산되는 수 많은 제품들은 다양한 강종의 분포를 가지고 있으며 이들 강종에 따라 측정되는 실제의

압하력은 똑 같은 압연조건에서도 큰 차이를 보인다. 이의 해결을 위해 신경망 회로이론을 적용하여 다양한 강종과 신강종에 대해서도 정확한 압하력 예측치를 주는 모델을 개발 하였다. 정밀 압하력 예측 모델을 현장에 적용함에 있어 기존의 FSU(finishing mill set up) 모델을 고찰하고 기존 모델과 동일한 방법으로 학습을 행하여 끊임없이 변화하는 압연조건 상황속에서도 안정적인 작업이 이루어 지도록 하였다.

2. 유한요소 해석 모델

서로 다른 이종의 물체가 서로 접촉해 있는 문제를 해결하기 위해선 경계면에서의 열유속을 결정해야 한다. 경계면의 형상을 알 때, 이를 위해 다음과 같은 반복적인 기법이 적용된다(Fig.1).

1. 경계면 Γ_c 에서 롤의 온도를 가정한 후 판에 대해서 유동해석을 행한다.
2. 판의 유동해석을 통하여 얻어진 해를 이용 판의 온도해석을 행한다.
3. 단계 1,2 를 판의 유동, 온도해가 수렴할 때까지 반복한다.
4. 단계 1~3 을 통해 구해진 경계면에서의 열유속을 이용하여 롤의 온도해석을 행한다. 이때, 롤의 경계면에서의 새로운 온도가 구해진다.
5. 롤의 경계면에서의 새롭게 구해진 온도와 열유속을 이용하여 단계 2~4 를 판과 롤에 대해서 수렴할 때 까지 반복한다.

Fig.1 에서, 모델 A,B,C 는 다음과 같은 유한요소 해석 모델이다.

MODEL A : 판의 유동해석을 위한 유한요소 모델
MODEL B : 판의 열해석을 위한 유한요소 모델
MODEL C : 롤의 열해석을 위한 유한요소 모델

유한요소해석을 위한 롤과 판의 유한요소 격자체계와 경계조건을 Fig.2 에 나타내었다.

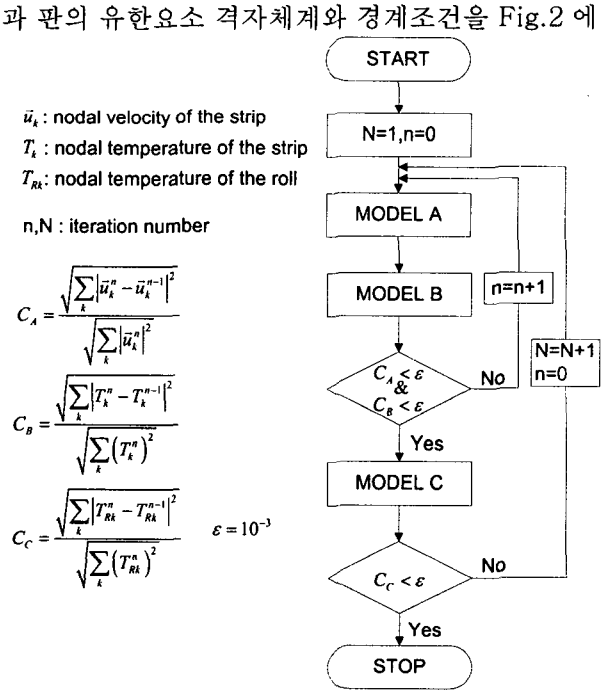

Fig.1 An integrated FE process model for the analysis of the thermo-mechanical behavior of the roll-strip system in hot strip rolling

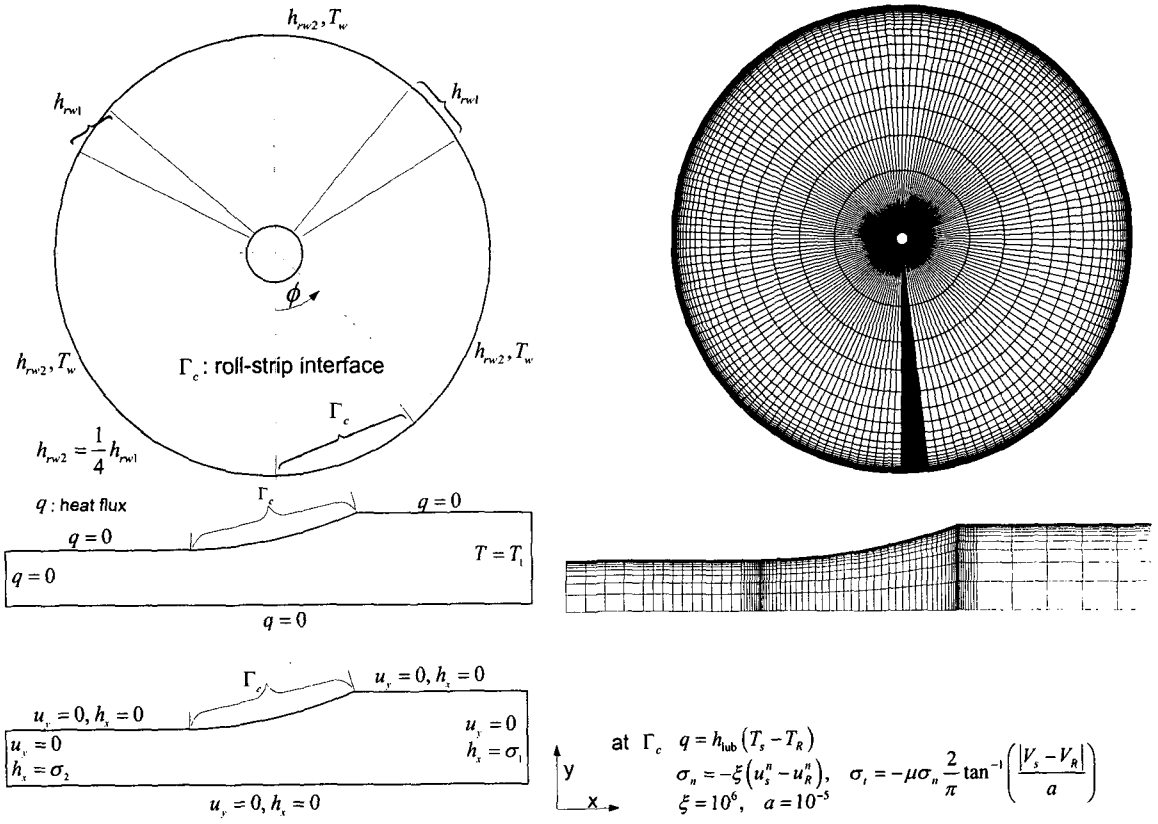

Fig. 2 Boundary conditions and mesh system for the basic FE models

3. 압연의 가설모드

우리는 Fig.3 과 같은 압연의 가설모드를 고찰할 수 있다. 두께 H_1 인 판이 H_2 로 압하될 때 압연방향으로 균일하게 변형하며 마찰 및 전단응력이 존재하지 않는다고 가정한다. 또한 재료의 온도는 입측온도와 동일하며 판의 전후단 장력이 존재하지 않는다고 가정한다. 롤갭내에서의 유효변형율 $\bar{\varepsilon}$ 와 유효변형율 속도 $\dot{\bar{\varepsilon}}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\varepsilon} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h}{H_1} \tag{1}$$

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{2\tan\phi}{h^2} V_2 H_2 \tag{2}$$

여기서, h 는 롤갭내 임의의 지점에서 판의 두께를 나타낸다.

전단응력과 마찰력이 존재하지 않는다는 가정과 평면변형율과 비압축조건으로부터

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}\left\{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2\right\}} = \frac{\sqrt{3}}{2}\sigma_y \tag{3}$$

압연의 가설모드에서 단위 폭당 압하력은

$$F' = \int \sigma_y d\Gamma = \frac{2}{\sqrt{3}} R \int_0^{\phi_1} \bar{\sigma} \cos\phi d\phi \tag{4}$$

여기서, ϕ_1 은 판과롤의 접촉각도이다.

롤갭내에서의 평균온도 T 는 F' 를 계산하기 위해서 필요하나 적절한 계산식이 없다면 초기 판의 온도로 가정하여 계산할 수도 있다. 판의 출측속도 V_2 는 선진율의 계산을 위한 실시간 on-line 모델식[5,6]에 의해 구해 질 수 있다.

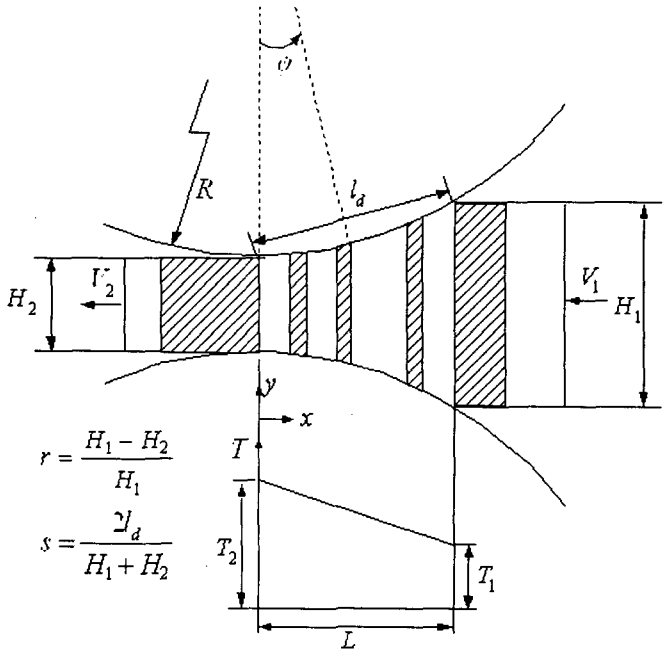

Fig. 3 An hypothetical mode of rolling

4. 유한요소법에 근거한 압하력 예측 on-line 모델의 유도

식(4)는 단위 폭당의 이론적인 압하력이며 실제 폭 W 가 주어 졌을 때의 값은 식(5)와 같이 구할 수 있다. 재료의 유동 응력식[7] $\bar{\sigma}\left(\bar{\varepsilon},\dot{\bar{\varepsilon}},T\right)$ 가 주어져 있다면 식(5)는 수치적으로 계산 가능한 값이다.

$$F' = \frac{2}{\sqrt{3}} RW \int_0^{\phi_1} \bar{\sigma} \cos\phi d\phi \tag{5}$$

여기서, ϕ_1 는 압연시 판과 롤의 접촉각

이때, 유한요소해석을 이용하여 구한 압하력과 이론적인 압하력간의 관계는 여러공정 조건에 대하여 유한요소 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

$$\frac{F_{FEM}}{F'} = f_1(s,r,\mu) \tag{6}$$

여기서,

F_{FEM} : 유한요소해석 압하력 예측치

$s = \frac{2}{2-r}\sqrt{\frac{Rr}{H_1}}$: 형상계수, r : 압하율, μ : 마찰계수

식(6)은 탄소강을 기본으로 하여 개발 되었으며, 여러 다른 재료에 대해서도 성립함을 유한요소 해석을 한 결과 알 수 있었다. 압하력에 영향을 미치는 다른 공정조건들은 분모의 F'의 영향으로 상쇄 되어진다. 하지만 정확한 유동응력식($\bar{\sigma} = \bar{\sigma}\left(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T\right)$)을 알아야만 식(6)이 적용될 수 있는데, 실제 현장에서는 수많은 종류의 판들이 작업 되므로 식(6)을 직접 사용하기는 탄소강을 제외하고 어렵게 된다. 이의 보완을 위하여 현장의 압연공정조건들과 압하력 실측치들을 이용, 신경회로망을 구성하고 모든 재료에 대해서도 적용할 수 있는 실시간 압하력 예측 모델식을 개발하였다.

5. 강종보정을 통한 정밀 압하력 예측모델의 개발

4 절에서 구한 식(6)의 모델을 바로 정밀 모델로 사용하지 못하는 이유는 실제 압연 상황에서 다음의 3 가지 공정변수들의 식 또는 값들을 정확히 알지 못하기 때문이다.

1. 판 변형저항식 ($\bar{\sigma}$)
2. 마찰계수 (μ)
3. 판 온도 (T)

판 두께 및 압하율은 압하력에 큰 영향을 주는 변수들이지만 정밀모델을 사용하면 정확한 압하력 예측이 가능하게 되고 이 때 판 두께 및 압하율의 설정치와 이들의 실측치가 같게 될 것이므로 알고 있는 변수로 분류 할 수 있다. 롤 경은 롤 마모 예측모델이 정확하다는 가정 하에 항상 정확하게 알수있는 변수로 볼 수 있다. 판 폭은 폭퍼짐이 작음을 고려하면 FM(finishing mill) 스탠드 바로 직전 값으로 가정하여도 큰 오차가 없을 것이다. 이외의 공정변수들은 예측치 (또는 설정치) 와 실측치와의 오차가 적거나 압하력에 대한 영향이 적으므로 알고 있는 공정변수로 분류할 수 있다.

현장의 수 많은 실측 자료와 식(6)의 압하력 예측 모델을 이용하여 다음과 같은 관계를 유도한다.

$$\frac{F_{ACT}}{F_{FEM}} = \alpha_A \tag{7}$$

탄소강에 대해서는 식(7)의 값 α_A가 1 근처의 값을 가짐을 알 수 있었고, Nb 또는 Ti 첨가강 등의 특수 원소 첨가강에 대해서는 1 보다 훨씬 큰 값을 가지게 됨을 알 수 있었다. 본 연구에서 α_A는 다음과 같은 성분 및 공정조건의 함수로 보았다.

$$\alpha_A = \alpha_A\left(C, Mn, Nb, Ti, Ni, Cr, ..., \bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T, \delta\varepsilon\right) \tag{8}$$

식(8)의 구체적인 함수 형태는 생산 라인에서 이미 압연된 다양한 강종의 압하력 실적자료와 신경망 이론으로부터 스탠드별로 구할 수 있다. 많은 압연실적을 바탕으로 각각의 스탠드에 대해 신경망 연결가중치 $w_{ij}^{(k)}$ 를 구하여 α_A 에 대한 신경회로망을 구성하였다(Fig.4,Fig.5). 신경회로망의 연결가중치는 forward propagation 과 back propagation 의 단계를 원하는 목표치에 수렴할 때까지 반복함으로써 구해진다.

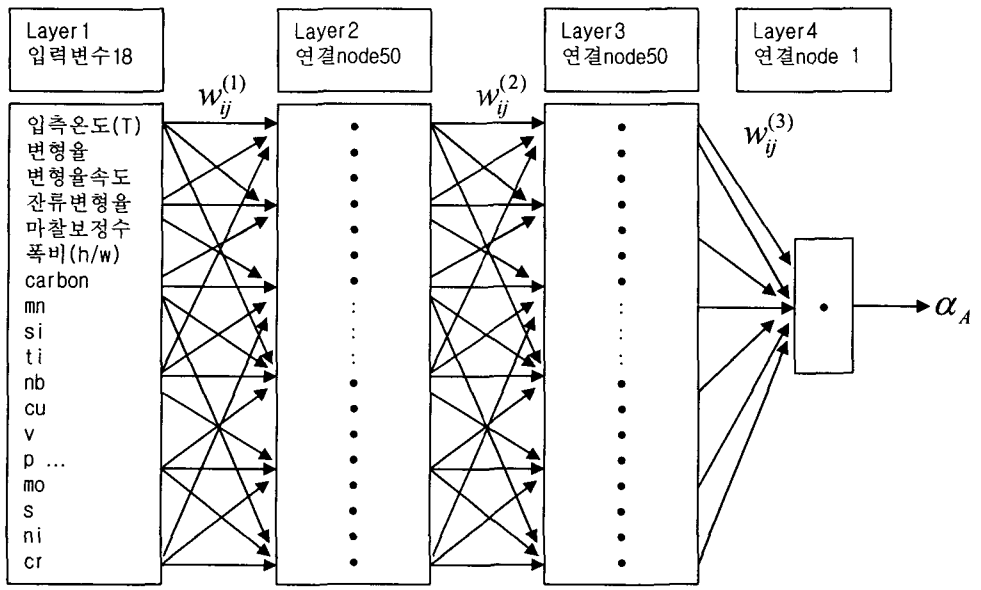

Fig.4 The schematic design of neural network in stand F1 ~ F5

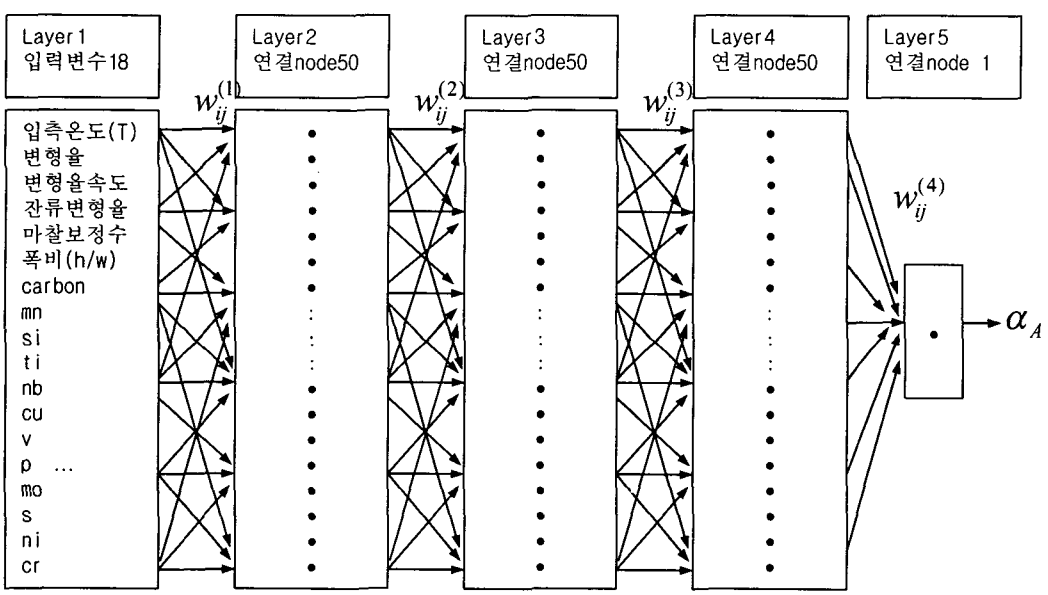

Fig. 5 The schematic design of neural network from stand in F6 and F7

6. 현장 적용 및 결과

현장에서 사용중인 FSU 모델의 구조는 크게 설정 프로그램과 학습 프로그램으로 나누어져 있다. 개발된 압하력 예측 모델은 설정프로그램과 학습프로그램에 Fig.6 과 Fig.7 의 구조를 이루고 있으며, 기존모델과 신모델이 동시에 계산되면서 신모델이 예상치 못한 압연상황을 만났을 때 기존모델이 대치하는 방식으로 만들어 졌다. 실제 on-line 에 적용되기 전 off-line 상태에서 5 번 이상의 학습이

행해진 레코드들에 대해서만 적용되도록 하여 생산라인의 안정성을 확보하였다. 신모델 학습의 방법은 기존모델 대비 큰 차이가 없다.
학습의 단계는 다음과 같다.

단계 1. 현재 작업된 코일에서의 압하력 측정치와 계산치의 비를 구한다.

$$\frac{F_{mea}}{F_{cal}} = \beta = (1+\alpha_{cur})$$

단계 2. β 의 크기에 따라 적절한 상수 G 를 결정한다. β 가 크면 상수 G 가 크게 되며 그 범위는 0 과 1 사이 이다.
단계 3. 이전의 학습계수와 현재의 학습계수를 이용하여 같은 레코드의 코일에 적용될 학습계수를 구한다.

$$\alpha_{new} = G\alpha_{cur} + (1-G)\alpha_{old}$$

단계 4. 비정상적인 압연상황을 검사하여 학습계수가 너무 크거나 작으면 그 상·하한 값으로 고정시키거나 학습을 행하지 않는다.

압하력의 예측은 제품의 두께에 영향을 주므로 본 연구는 각 스탠드별 압하력 예측정도와 두께에 의한 불량율의 정도를 적용 전후로 나타내었다. 압하력 적중율은 기존모델 대비 전체 스탠드에서 0.5% 정도 좋아졌으며 표준편차는 약 1% 좋아졌으나(Table 1), 두께에 영향을 미치는 후단 스탠드에서 신모델의 압하력 적중율이 더 좋아 두께 적중율적인 측면에서는 효과가 그 이상이다. 평균오차과 표준편차의 정의는 다음과 같다.

$$\text{평균오차}(\%) = \frac{1}{N}\sum_{k}\left|100\cdot\frac{F_{cal}^{k}-F_{mea}^{k}}{F_{mea}^{k}}\right| \tag{9}$$

여기서,
F_{cal}^{k} 는 k 번째 코일의 압하력 예측치, F_{mea}^{k} 는 k 번째 코일의 압하력 실측치 이며 N 은 총 코일수이다.

$$e^{k} = 100\cdot\frac{F_{cal}^{k}-F_{mea}^{k}}{F_{mea}^{k}} \qquad \bar{e} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} e^{k} \tag{10}$$

$$\text{표준편차}(\%) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(e^{k}-\bar{e}\right)^{2}}$$

Table1. The comparison between roll force errors predicted from new on-line model and those predicted from POSCO on-line model in hot strip mill I

Stand No.	Average error	Standard deviation	Average error	Standard deviation
	New model(coil number:44122)		Old model(coil number:16805)	
1	4.46(%)	5.08(%)	4.11(%)	5.71(%)
2	3.79(%)	4.85(%)	3.62(%)	5.03(%)
3	3.21(%)	3.86(%)	3.39(%)	4.44(%)
4	3.16(%)	4.27(%)	3.82(%)	5.06(%)
5	3.95(%)	5.44(%)	5.27(%)	7.05(%)
6	3.81(%)	4.70(%)	4.30(%)	6.09(%)
7	4.99(%)	7.25(%)	6.20(%)	8.62(%)
Total	3.91(%)	5.24(%)	4.39(%)	6.26(%)

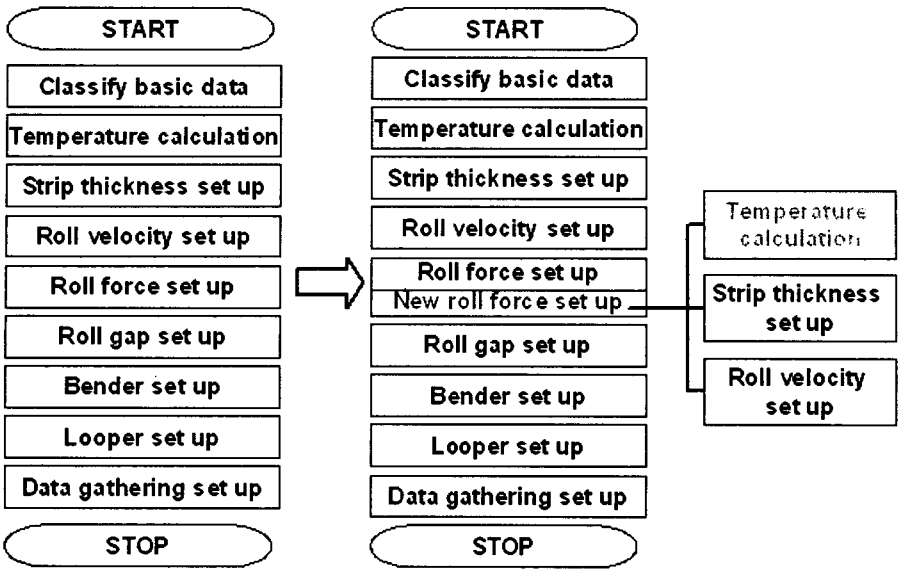

Fig.6 The set up models in hot strip rolling

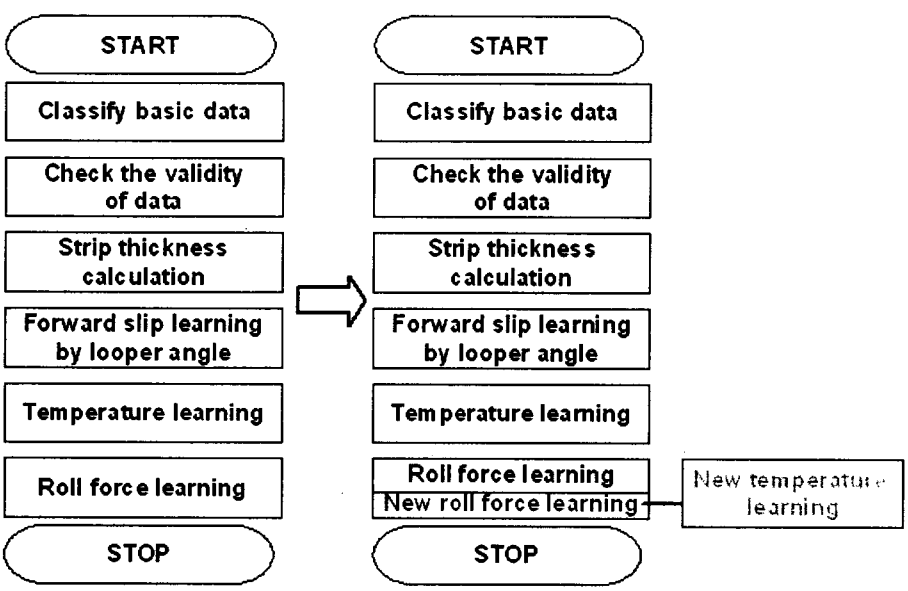

Fig.7 The learning models in hot strip rolling

본 연구는 가장 정확한 수치해석 기법인 유한요소법을 이용하여 압하력예측모델과 온도모델을 개발하였다. 그리고 이 모델들을 현장의 FSU 모델에 삽입하여 적용 하였다. 다양한 강종들에 대한 고려를 위해 신경망회로 이론을 이용한 강종보정계수를 도입하였고 이 결과 학습계수가 기존모델 대비 현저히 낮아져 모델의 학습 의존도를 낮게 하였다. 공대 신모델은 다양한 압연조건을 반영하며 압하력을 예측한다. 하지만 복잡한 압연 상황 속에서 들어오는 압연변수들은 그 자체가 오차를 지니고 있기 때문에 그 오차가 그대로 압하력 예측에 반영 되어 더욱 정밀한 예측을 어렵게 하고 있다. 예상치 못한 압연상황의 발생도 신모델의 정밀한 압하력 예측에 어려움을 주고 있다. 이러한 압연조건들은 설비적인 안정 그리고 측정장치의 정밀화 및 안정화로 개선 가능하지만 모델식 자체도 그 나름대로의 안정성 확보를 위한 프로그램의 구성체계도 갖추어 나가야 한다.

7. 참고문헌

1. E.Orowan: Proc. Instn. Mech. Engrs., 1943, vol.150, pp.140-167
2. R.B.Sims: Proc. Instn. Mech. Engrs., 1954, vol.168, pp.191-200
3. J.M.Alexander: Proc. Royal Soc. London, 1972, vol.A326, pp.535
4. T.Tamano and S.Yanagimoto: Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 1977, vol.43, pp.2885-2892
5. W.J.KWAK,Y.H.KIM,H.D.PARK,J.H.LEE and S.M.HWANG:FE-based On-line Model for the Prediction of Roll Force and Roll Power in Hot Strip Rolling,ISIJ International, 2000, vol.40,pp1013-1018
6. W.J.KWAK,Y.H.KIM,J.H.LEE and S.M.HWANG:A Precision On-Line Model for the Prediction of Roll Force and Roll Power in Hot-Strip Rolling,METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTION A,vol.33A,pp.3255-3272
7. S.Shida: J. Jpn. Soc. Technol. Plasticity, 1969, vol.20, pp.610-617
8. C.C.Chen and S.Kobayashi:Rigid Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression,ASME publication, AMD, 1978,vol.28,pp.163-174
9. A.N.Brooks and T.J.R.Hughes:Streamline Upwind/Petrov-Galerkin Formulations for Convection Dominated Flows with Particular Emphasis on the Incompressible Navier-Stokes Equations,
   Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1982, vol.32, pp.199-259
10. O.C.Zienkiewicz, E.onate, and J.C.Heinrich: Int. J. Num. Meth. Eng., 1981, vol. 11, pp.1497-1514
11. J.H.Beynon, P.R.Brown, S.I.Mizban,R.S.Ponter, and C.M.Sellars: Proc. NUMIFORM ' 86, 1986, pp.213-218
12. A.Kumar, I.V.Samarasekera, and E.B.Hawbolt: J.Materials Processing Tech., 1992, vol.30, pp.91-114
13. M.Pietrzyk, and J.G.Lenard: Thermal-Mechanical Modelling of the Flat Rolling Processes, 1991
14. K.Yamada, S.Ogawa, and S.Hamauzu: ISIJ International, 1991, vol.31, pp.566-570
15. S.M.Hwang, M.S.Joun, Y.H.Kang: ASME J.Eng. for Ind., 1993, vol.115,pp.290-298
16. C.G.Sun, C.S.Yun, J.S.Chung, and S.M.Hwang: Metall. Mater. Trans. A, 1998, vol.29A, pp.2407-2424
17. C.G.Sun, and S.M.Hwang: ISIJ International, 2000, vol.40, pp.794-801
18. J.Hitchcock: ASME Research Publication, 1935, p.286
19. Y.H.Kim et al.: Int. Cong. Stainless Steel ' 99, AIM., p.285
20. Y.Saito, T.Sakai, and K.Kato: 4th Int. Steel Rolling Conf., pp.A.36.1-A.36.9