

폭 퍼짐을 고려한 열연공정 압연하중 설정정확도 개선

정 종 엽* · 임 용 택**

(2000년 4월 28일 접수)

Improvement of Rolling Load Prediction with Consideration of Spread in Hot Rolling

Jong-Yeob Jung and Yong-Taek Im

Key Words: Hot Rolling(열간압연), Finishing Mill Set-up(FSU : 마무리압연 설정), Spread(폭 퍼짐), Finite Element Analysis(유한요소해석), Neural Network(신경회로망)

Abstract

Thickness control of hot-rolled strips has become an important issue in recent years because of the need for improving the quality of the hot-rolled strip. In this study, a modifying method of rolling force set-up with consideration of spread was developed to improve the thickness uniformity at the finishing rolling units in hot rolling. Through the analysis of real production data it was found that the accuracy of the rolling force determined from the finishing mill set-up (FSU) model dominantly governed the thickness uniformity in rolled plates at the front. Based on this analysis, several examples were selected to calculate the spread of rolled plate using three dimensional rigid thermo-viscoplastic finite element program. FE analysis results were used to train the neural network system that can predict the spread of hot-rolled plate and the rolling force was modified based on the predicted value of spread. The modified rolling forces were closer to the measured rolling force so it can be expected that the accuracy of thickness uniformity of hot-rolled plate will be improved.

1. 서 론

열연판재의 선단부 두께제어는 마무리압연 설정시스템 (FSU : Finishing Mill Set-up)⁽¹⁾에 의해 결정되어진다. FSU는 압연재가 마무리 압연기에 장입되기전에 압연재의 두께, 폭, 온도, 강종 등의 압연조건에 따라 압연초기단계의 압연동력, 압연하중, 압하위치 등을 설정한다. 따라서 압연재의 선단부 두께제어정도는 FSU에서 계산된 설정값에 의존할 수밖에 없으며, 이에 따라 설정값의 정확도를 높이기 위한 연구들이 이루어지고

있다. 그러나 FSU에서 이용되어지는 수식모델에는 마찰계수, 재료의 변형저항과 같은 측정 곤란한 미지의 변수들이 이용되고 있다. 이러한 변수들은 학습에 의해 구해지고 있는데 현재의 열연공정은 고급강의 생산량 증대 필요에 따라 다양한 강종이 투입되므로써 설정 데이터 변화량이 증가되어 학습에 의한 제어정도가 낮아지고 있기 때문에 선단부의 두께제어 정도가 낮은 상태이다. 그러나 열간압연을 통해 생산되는 판재는 자동차나 가전용 제품의 외판재료 또는 구조용 재료 등으로 바로 이용될 수 있으므로 두께의 불균일과 같은 판재의 결함은 최종제품의 품질에 심각한 영향을 끼치게 되며 따라서 막대한 경제적 손실을 야기하게 된다. 또한 열연판재의 두께 불균일이 심한 경우 판재를 냉간 압연하여 박판으로 성형하는 경우에도 두께오차가 계속 유지되기 때문에 열연판재 선단부의 두께정도를 높이려는

* 한국원자력연구소 핵연료설계기술개발팀

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : ytim@mail.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3227 FAX : (042)869-3210

연구는 철강업계의 중요한 문제이며 각 제철소마다 많은 연구들이 수행되어져 왔다.

일본 KSC 제철소⁽²⁾에서는 기존 FSU 수식 모델에 탄소, 망간, 규소 등의 코일 성분 관련 변수 3종과 권취온도, 열연온도 등의 온도변수를 추가로 고려하여 압연하중 예측성능을 향상시킴으로써 압연재 선단부의 두께정도를 향상시켰으며, 신일본 제철소⁽³⁾에서는 설정모델에 퍼지제어를 적용하여 압연하중을 계산하는 시스템을 개발하여 두께정도를 향상시켰다. 한편 독일 Westfalen 제철소⁽⁴⁾에서는 신경회로망을 이용해 열연공정의 압연하중 예측 성능을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 이 때 신경망의 입력으로는 기존의 수식 모델이 고려하지 않았던 화학적 성분 관련 변수와 온도변수를 추가로 고려하였으며, 기존 수식 모델의 예측치에 대한 보정치를 출력하도록 하는 보정모델을 채용하였다. 프랑스 Sollac 제철소⁽⁵⁾에서도 가공경화 (work hardening) 공정에 신경망을 적용하여 압연하중 예측성능을 향상시켰다. 포항제철에서는 보정함수를 이용하여 열간 압연하중의 예측정도를 향상시키려는 연구⁽⁶⁾와 롤 속도 모델의 개선 등을 통해 선단부 두께편차를 감소시키려는 연구⁽⁷⁾ 등이 수행되었으며, 또한 역전파 알고리즘을 이용한 다층 퍼셉트론의 신경회로망을 실제 조업데이터로 학습시켜 냉연공정의 하중예측 보정모델을 구축하고 기존의 수식모델에 비해 예측오차를 감소시킨 연구⁽⁸⁾도 수행되었다. 한편 정 등⁽⁹⁾은 압연하중의 설정정확도가 열간 압연재 선단부의 두께정확도에 큰 영향을 준다는 사실을 조업데이터의 통계분석 방법을 이용하여 규명하고, 이에 근거한 압연하중 설정용 퍼지시스템을 개발하여 압연하중의 예측성능을 향상시키고 이를 통하여 압연재 선단부의 두께오차를 줄일 수 있도록 하였다.

이와 같이 압연재 선단부 두께제어를 위한 압연하중 설정시스템에 퍼지제어 이론이나 신경회로망 같은 지능형 기법을 도입하는 경우 기존의 수식적인 모델을 보완하여 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 열간압연재 선단부의 두께정도를 결정하는 FSU 수식모델 자체가 선형시스템 이론에 근거하기 때문에 열연공정의 복잡한 비선형성을 제대로 반영하지 못하는 한계가 있으며, 따라서 수식모델의 자체개선에 따른 선단부 두께제어 정도의 향상은 여전히 어려운

과제로 남아있는 실정이다.

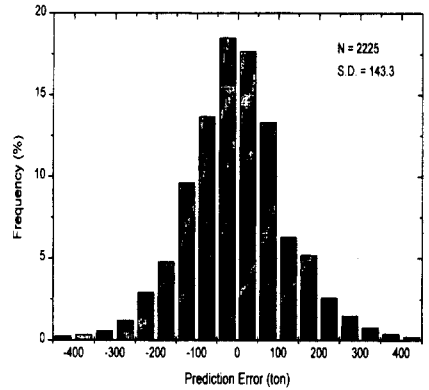
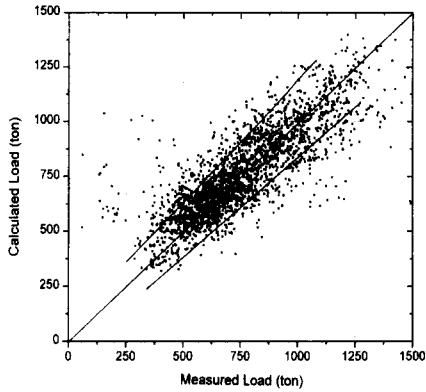
이에 본 연구에서는 마무리 열간압연 도중 압연재에 발생하는 폭 퍼짐 (spread)을 고려하여 압연하중을 좀 더 정확하게 예측함으로써 압연재 선단부의 두께오차를 줄일 수 있는 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해, 실제 조업데이터를 수집하여 공정변수들의 통계분석 처리를 하였고, 변형해석과 열진달해석을 연계한 3차원 유한요소 해석 코드⁽¹⁰⁻¹²⁾를 이용하여 실제 조업조건에 대한 압연재의 폭 퍼짐 양을 구하였다. 그리고 유한요소해석을 통해 구한 폭 퍼짐 양을 신경회로망을 이용하여 학습시키므로써 임의의 조업조건에 대한 폭 퍼짐 양을 실시간으로 예측할 수 있는 시스템을 구축하였다. 이와 같이 구해진 폭 퍼짐 양을 이용하여 압연하중을 보정한 결과 기존의 FSU에 의한 설정하중에 비하여 실측하중에 훨씬 근접한 하중값을 예측할 수 있었다.

2. 열간압연 조업데이터 분석

2.1 두께오차와 하중편차간의 통계분석

이미 정 등⁽⁹⁾은 열간압연공정의 특성을 파악하기 위해 실제 열연공정에서 수집한 압연데이터에 대해 통계분석을 수행 한 바 있으며 그 결과 압연재의 선단부 두께오차를 줄이기 위해서는 공정중의 실측하중과 FSU에 의해 계산되는 설정하중간의 편차를 줄이는 방법이 효과적임을 입증한 바 있다. 그 결과를 간추리면 다음과 같다.

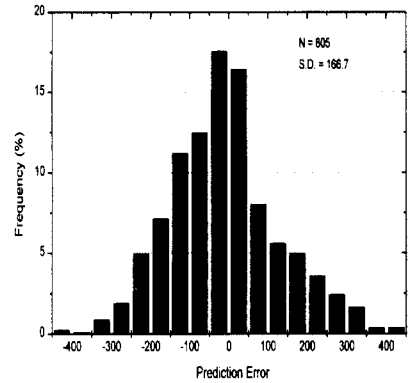
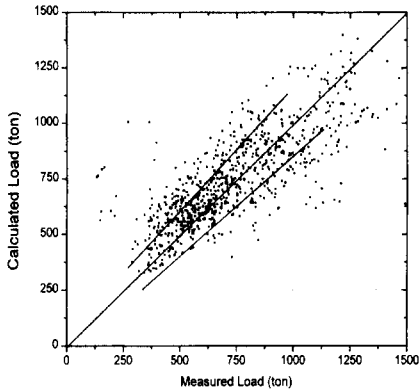
7개의 스탠드로 구성되어 있는 마무리 압연기 (finishing mill)의 마지막 스탠드에서 압연재 선단부 두께오차에 미치는 하중편차 (실측하중과 설정하중 사이의 편차)의 영향을 알아보기 위해 두께오차의 범위에 따라 조업데이터를 다음과 같이 세 가지 경우로 분류하고 각각에 대하여 실측하중과 설정하중 사이의 상관관계를 분석하였다. Case 1 : 전체데이터 (코일 수 : 2225개), Case 2 : 두께오차의 절대범위가 70 μm 이상인 데이터 (코일 수 : 805개), Case 3 : 두께오차의 절대범위가 100 μm 이상인 데이터 (코일 수 : 435개). 이때 실측하중은 어느 정도 정상상태에 이른 후 자동두께제어시스템⁽¹³⁾ (AGC : Automatic Gauge Control)에 의해 제어가 수행될 때 로드셀로부터 측정된 하중값으로 하중설정의 기준으로 이용하



(a) Distribution of measured and calculated loads

(b) Frequency distribution of rolling load deviation

Fig. 1 Results of production data analysis of 'Case 1'



(a) Distribution of measured and calculated loads

(b) Frequency distribution of rolling load deviation

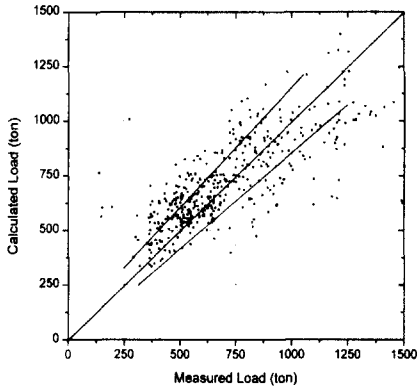
Fig. 2 Results of production data analysis of 'Case 2'

여도 큰 무리는 없다. Fig. 1(a), 2(a), 3(a)에서 볼 수 있듯이 두께오차가 큰 데이터일수록 실측하중과 설정하중 사이에는 선형관계가 약해짐을 확인할 수 있으며, 이러한 양상은 하중편차 범위에 따라 빈도수 분포를 나타낸 Fig. 1(b), 2(b), 3(b)에서도 알 수 있다. Case 1의 경우, 해당 데이터들의 평균 절대두께오차는 12.8 μm , 평균 절대하중 편차는 7.8 톤이며, Case 2와 Case 3의 경우는 각각 22.6 μm , 16.6 톤, 22.9 μm , 19.6 톤이었다. 이러한 분석결과로부터 두께오차를 줄이기 위해서

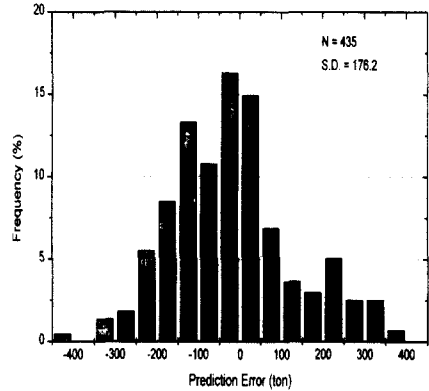
는 실측하중과 설정하중간의 편차를 줄이는 방법이 효과적임을 확인할 수 있으며, 압연하중 설정 정확도를 높임으로써 열간압연재 선단부의 두께 정확도를 높일 수 있다는 연구의 기본방향이 타당함을 입증할 수 있다.

2.2 각 스탠드별 조업데이터 통계분석

Fig. 4에 각 스탠드에서의 실측하중과 설정하중 값을 모든 데이터에 대해 평균한 값을 나타내었다. 이 때 하중값은 단위 폭에 대한 값으로



(a) Distribution of measured and calculated loads



(b) Frequency distribution of rolling load deviation

Fig. 3 Results of production data analysis of 'Case 3'

N/mm의 단위를 갖는다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 실측하중 값이 전반적으로 설정하중 값에 비해 큼을 알 수 있으며, 특히 전반 스탠드가 후반 스탠드에 비해 그 차가 더 커짐을 확인할 수 있다. 이는 실제 공정 중에는 폭 퍼짐이 발생하기 때문에 설정하중에 비해 더 큰 힘이 필요하다는 것을 입증한다고 할 수 있으며, 실제로 압연하중을 설정하는 FSU 수식모델은 압연도중의 폭 퍼짐에 대한 요인이 고려되지 않기 때문에 상대적으로 낮은 하중값을 계산한다고 할 수 있다. 후반 스탠드에서 두 하중값간의 차이가 그리 크지 않은 것은 뒤쪽으로 갈수록 압연재의 두께가 얇아지므로 폭 퍼짐 현상이 거의 발생하지 않기 때문이며, 따라서 전반 스탠드에서 폭 퍼짐 양을 정확히 계산하여 FSU 수식모델에 의한 설정 값을 보정해주면 효과적으로 열간 압연재 선단부의 두께 정도 향상에 기여할 수 있을 것이다.

Table 1에는 각 스탠드에서의 압연조건을 분석한 결과를 나타내었다. 압연재의 입측두께 (h_n), 압하율 (Re), 롤 속도 (R_s), 실측하중 (P_{mea}), 설정하중 (P_{cal}) 등과 같은 공정변수들의 평균값 (mean), 최대값 (max.), 최소값 (min.), 그리고 표준편차 (S.D.) 범위를 각 스탠드 별로 정리하여 나타내었다.

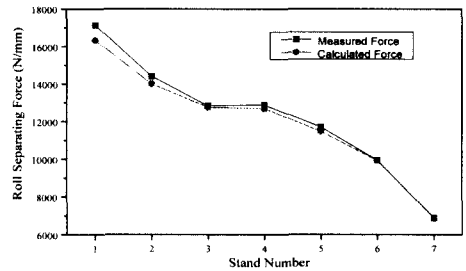


Fig. 4 Comparison of measured and calculated rolling forces at each stand

3. 유한요소해석 이용한 폭 퍼짐 계산

실제 열간압연 공정에서 수집한 조업데이터의 분석 결과로부터 해석대상을 선정하고, 각 경우에 대하여 유한요소해석을 수행함으로써 압연재의 폭 퍼짐 양을 구하고 그 양상을 분석하였다.

열간압연은 통상 재결정 온도 이상의 고온에서 이루어지므로 변형해석과 함께 열전달해석이 동시에 수행되어야 하며, 이로부터 판재의 변형거동 및 온도분포를 예측하고, 원하는 두께를 얻는데 필요한 압연하중을 계산해야 한다. 따라서 본 연구에서는 평형방정식에 강열점소성 (rigid

Table 1 Results of analyzing of the production data

	Stand 1	Stand 2	Stand 3	Stand 4	Stand 5	Stand 6	Stand 7
h_{in} (mm) mean max min S.D.	35.68	22.34	14.16	9.45	6.83	5.22	4.22
	41.2	31.5	24.5	19.0	15.4	12.8	11.0
	27.2	13.5	7.0	4.0	2.6	1.8	1.4
	4.59	3.79	3.31	2.77	2.37	2.07	1.86
Re (%) mean max. min. S.D.	37.43	37.32	34.32	28.55	24.4	20.09	12.82
	56.0	51.0	44.0	35.0	30.4	25.4	18.2
	18.0	21.5	19.5	17.5	14.2	12.0	7.4
	7.34	5.93	4.32	3.49	3.29	2.89	1.76
R_s (mm/sec) mean max. min. S.D.	1422	2334	3657	5175	6939	8826	10241
	1820	3250	5400	7800	10400	13200	16000
	160	200	300	400	400	600	600
	186	376	721	1137	1669	2313	2774
P_{mea} (N/mm) mean max. min. S.D.	17136	14404	12830	12879	11709	9944	6872
	29500	23500	21000	22500	20000	17400	14000
	2000	2000	1500	1500	1000	1200	1000
	3786	3084	2907	3134	2761	2612	2092
P_{cal} (N/mm) mean max. min. S.D.	16335	14000	12834	12681	11473	9932	6905
	29500	22200	23000	21200	19000	17000	12600
	6500	5800	5000	4800	4400	4000	2800
	3575	2930	2909	3026	2561	2529	1822

thermo-viscoplastic) 구성방정식을 적용하여 유한 요소 수식화 한 변형해석 알고리즘과, 비정상 상태의 에너지 방정식을 유한요소 수식화 한 열전달해석 알고리즘을 연계하여 열간압연 공정을 해석하였다. 자세한 유한요소 수식화 과정은 참고 문헌 (12)에 설명되어 있다.

해석예제로 선정된 다양한 경우에 대해 폭 퍼짐 양상을 구한 결과, 앞서 언급했듯이 후반스탠드로 갈수록 폭 퍼짐의 양이 작기 때문에 실측하중과 설정하중간의 차이가 거의 없음을 알 수 있었다. 유한요소해석을 통하여 구한 폭 퍼짐 결과는 신경회로망의 학습에 이용되어, 임의 공정조건에 대하여 폭 퍼짐 양을 예측할 수 있도록 하였다.

3.1 해석예제 선정

앞서 수행한 조업데이터의 분석결과를 이용하여 Table 2와 같이 10가지의 해석예제를 선정하여 유한요소해석을 수행하였다. Table 1의 조업데이터 분석결과에 나타나 있듯이, 각 스탠드마다 일정한 범위의 공정조건 이내에서 압연이 이루어

Table 2 Simulation examples of FE analysis

	h _{in} (mm)	Re (%)	R _s (mm/sec)
Case 1	40	40	1500
Case 2	40	25	1500
Case 3	20	40	1500
Case 4	20	40	5000
Case 5	20	25	1500
Case 6	10	25	1500
Case 7	10	25	5000
Case 8	10	10	5000
Case 9	5	25	5000
Case 10	5	10	10000

지고 있음을 알 수 있다. 즉 스탠드 1에서는 두께가 대략 30 ~ 40 mm 정도인 판재가 압연되며 이 때 압하율은 약 30 ~ 45 %, 롤 속도는 약 1200 ~ 1600 mm/sec 정도의 값을 갖는다. 따라서 이러한 실제 조업조건을 제대로 반영할 수 있도록 해석예제를 선정하였다. 예를 들어 'Case 1'과 'Case 2'의 경우는, 압연재의 두께가 40 mm인 경우로 대부분 스탠드 1에서 압연이 이루어지는 경우이므로 롤 속도 (R_s)는 1500 mm/sec

로 고정시키고 압하율 (Re)은 각각 40%와 25%에 대하여 해석을 수행하도록 예제를 선택한 경우이며, 나머지 경우도 이와 같은 기준으로 예제를 선정하였다. 이 때 압연재의 폭은 해석 편의상 500 mm로 가정하여 해석을 수행하였다.

3.2 폭 퍼짐 해석결과

Table 2에 보인 10가지 경우에 대해 압연재가 롤 사이에 장입되어 원하는 두께까지 압하되는 동안 유한요소해석을 수행하여 압연개시부와 롤 바이트, 그리고 출구부에서의 폭 퍼짐 양을 구하고 양상을 분석하였다.

Fig. 5, 6은 각각 'Case 1' 과 'Case 7'인 경우에 압연재의 중간 높이에서 구한 폭 퍼짐 양상을 압연진행방향 (R.D. : Rolling Direction)으로 보여주고 있다. 두 경우가 압연재의 입측두께와 압하율이 다르기 때문에 롤 바이트 (R.B.)의 길이와 폭 퍼짐 양의 크기는 다르지만, 두 경우 모두 입구부 이전까지는 압연재의 폭이 약간 줄다가 롤 바이트 (R.B.) 내에서는 급격한 폭 퍼짐이 발생하고 출구부 이후에는 뚜렷한 폭 퍼짐의 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 입구부 이전까지 압연재의 폭이 줄어드는 현상은 롤 바이트 내에서 많은 양의 폭 퍼짐이 발생하기 때문에 입구부에서는 압연재의 양이 부족해지므로 발생하는 것이다.

Fig. 7은 'Case 1'과 'Case 2'를 비교한 결과로 입측두께와 롤 속도는 같고 압하율이 각각 40 %와 25 %로 다른 경우의 폭 퍼짐 양상을 보여주고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 압하율이 큰 경우 롤 바이트 내에서의 폭 퍼짐 증가가 큼을 알 수 있는데, 이는 압하율의 증가로 인해 롤과 압연재의 접촉면적이 늘어나고 늘어난 접촉면적으로 인해 많은 폭 퍼짐이 발생하기 때문이다. 한편 압하율이 큰 경우, 롤 바이트 내의 많은 폭 퍼짐으로 인해 입구부에서 폭이 더 많이 줄어드는 현상을 확인할 수 있다.

열간 마무리 압연기의 전방 스탠드와 후방 스탠드에서의 폭 퍼짐 양상을 비교하기 위해 'Case 1'과 'Case 10'의 해석결과를 Fig. 8에 한 그래프로 나타내었다. Table 1에 정리하였듯이 'Case 1'은 압연재의 입측두께가 40 mm, 압하율이 40 %, 롤 속도가 1500 mm/s로 열간 마무리 압연기의 처음 스탠드에 해당하며, 'Case 10'은 마지막 스탠드에서 수행되는 압연조건에 해당한다. 결과에서 알

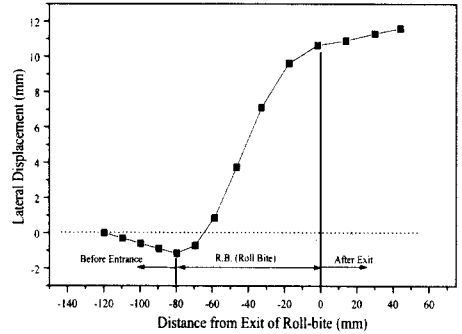


Fig. 5 An profile of the strip edge of 'Case 1' at the center of thickness along the R.D

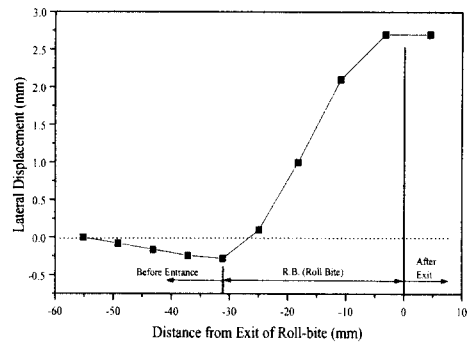


Fig. 6 An profile of the strip edge of 'Case 7' at the center of thickness along the R.D

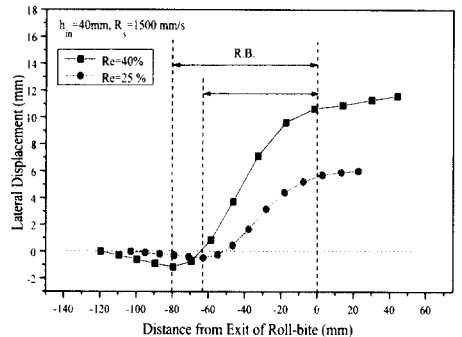


Fig. 7 Influence of the reduction in thickness on the profile of the strip edge

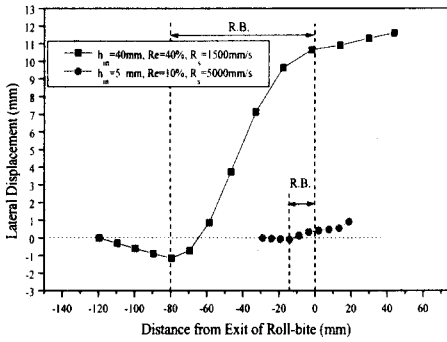


Fig. 8 Comparison of edge profile in the case of 'Case1' and 'Case10'

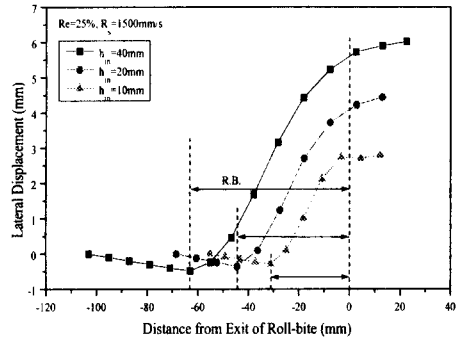


Fig. 9 Influence of the entry thickness on the profile of the strip edge

수 있듯이 'Case 10'과 같이 압연재의 두께도 얇고 압하율도 적어 롤 바이트 내의 변형량이 적은 경우 폭 퍼짐 양도 매우 적음을 확인 할 수 있다. 한편 Fig. 9는 동일 압하율 (25%), 동일 롤 속도 (1500 mm/s)에서 압연재의 입측두께 변화에 따른 폭 퍼짐 양상을 나타낸 결과로, 압연재의 입측두께가 커질수록 롤과 압연재의 접촉길이가 늘어나고, 따라서 많은 양의 폭 퍼짐이 발생함을 알 수 있다. 이러한 해석 결과로부터 마무리 압연기의 후반스탠드에서는 폭 퍼짐에 따른 하중의 증가가 거의 무시될 정도임을 알 수 있으며, 이는 앞의 조업데이터의 분석으로부터 유추한 결과와도 일치함을 알 수 있다.

4. 폭 퍼짐 예측 신경회로망 시스템

조업데이터의 분석결과로부터 선정한 해석예제에 대하여 유한요소해석을 수행하여 여러 공정조건에 대하여 폭 퍼짐 결과를 고찰하여 보았다. 이러한 해석결과를 기반으로 신경회로망 시스템을 구축하여 임의의 공정조건에 대한 폭 퍼짐 양을 예측하도록 함으로써 압연하중 설정 값을 보정하고 궁극적으로 열간압연재 선단부의 두께정밀도를 향상시키도록 하였다.

4.1 신경망 시스템의 구조 및 학습

폭 퍼짐 양 예측을 위한 신경회로망의 입력층

은 압연재의 입측두께, 압하율, 롤 속도의 세개로 하였고, 출력층은 롤 바이트 내의 폭 퍼짐 양 평균값으로 하였다. 폭 퍼짐 양 예측을 하기 위한 신경회로망 구조는 다층 퍼셉트론 (MLP : Multi

Layer Perception) 구조이며, 신경망 출력층의 오차가 최소화 되도록 역전파 (back propagation) 학습방법⁽¹⁴⁾을 이용하여 각 노드들 간의 가중치 (weight)를 조절하였다. 이 때 구성된 신경망은 입력층 (input layer)과 두 개의 은닉층 (hidden layer), 그리고 출력층 (output layer)으로 구성되었으며, 입력층에는 앞서 언급한 바와 같이 압연재의 입측두께, 압하율, 롤 속도 등이 입력되고, 각각 10개씩의 노드를 갖는 두 개의 은닉층을 거쳐 출력층과 연결된다. 출력층에서는 폭 퍼짐 양이 계산되며, 교사신호로 이용되는 각 경우의 폭 퍼짐 값에 대해 학습할 수 있도록 활동함수로 선형 함수를 이용하였고, 은닉층에서는 시그모이드 (sigmoid) 함수를 이용하여 출력값을 -1 ~ +1 사이로 정규화 하였다. 입력층에 사용한 변수값들은 모두 0과 1 사이의 값으로 정규화 되었고 유한요소해석으로 구한 패턴을 이용하여 학습하였으며, 학습 시에 신경회로망의 출력값과 교사신호 간의 최대 오차한계는 0.01로 하여 모든 패턴에 대하여 이 값 이내로 오차가 수렴되도록 학습을 수행하였다.

Fig. 10은 학습시킨 신경회로망을 이용하여 유한요소해석을 수행한 10가지 경우에 대해 폭 퍼짐을 구하여 유한요소해석 결과와 비교한 결과이

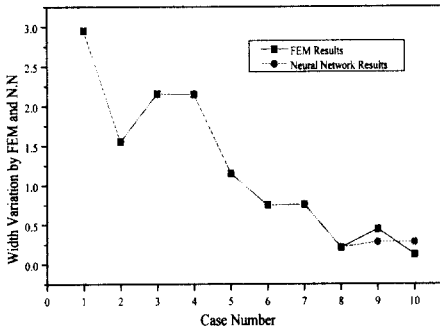


Fig. 10 Comparison of spread between FE and Neural network system results

다. 결과에서 보듯 폭 퍼짐 양이 큰 경우 ('Case 1' ~ 'Case 8')에 대해 10^{-4} 범위의 오차범위 내로 두 결과가 일치함을 확인할 수 있다. 'Case 9'와 'Case 10'의 경우 상대적으로 신경망 예측결과가 좋지 않지만 이 경우는 폭 퍼짐이 크게 압연하중에 영향을 미치지 않으므로 하중보정 시 무시할 수 있으므로 큰 상관성이 없다고 할 수 있다.

4.2 폭 퍼짐 예측 이용한 설정 압연하중 보정
 앞서 구축한 신경회로망을 이용하여 열간압연 마무리 압연기의 각각 스탠드에 대해 2175개의 조업조건을 입력으로 하여 폭 퍼짐을 예측하였다. 그리고 예측된 폭 퍼짐 값을 이용하여 설정하중을 보정하고 새로운 하중값의 평균을 구하였다. 이 때 입력으로 사용된 데이터는 실제 조업데이터이며, 폭 퍼짐을 고려하기 위해 하중 단위를 kN 단위로 환산하였다. 압연도중 발생하는 폭 퍼짐을 고려하여 설정하중을 보정한 결과를 Fig. 11에 나타내었는데, 결과에서 알 수 있듯이 보정된 하중값은 초기 FSU 수식모델에 의해 계산된 설정하중값에 비해 약 5% 가량 향상되어 실측하중에 가깝게 계산되었음을 알 수 있다. 이때, 후반 스탠드에서는 실측하중과 계산하중 사이의 차이가 크지 않기 때문에 스탠드 1에서 스탠드 5까지만 결과를 구하였다. 이러한 결과로부터 폭 퍼짐을 고려하여 압연하중을 설정할 경우 FSU 수식모델로부터 계산된 하중에 비해 좀 더 실측하중에 가까운 하중을 설정할 수 있으며, 이로부

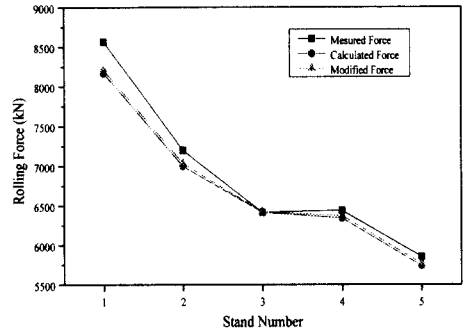


Fig. 11 Comparison of rolling force between measured, calculated and modified forces

터 좀 더 뛰어난 두께정도를 갖는 열연판재를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 열간 마무리 압연시 압연재의 선단부 두께정밀도를 높이기 위해 폭 퍼짐을 고려한 압연하중 보정 방안이 제시되었다. 실제 공정에서 수집한 열간압연 조업데이터의 분석을 통하여 AGC 작동 후 로드 셀로부터 측정된 실측하중과 FSU 모델에서 계산된 설정하중 사이의 하중편차가 작을수록 압연재의 두께오차도 작아짐을 규명하였고, 이로부터 압연하중의 설정 정확도를 높임으로서 두께정밀도를 향상시킬 수 있다는 본 연구의 기본방향을 수립하였다. 조업데이터의 분석결과를 바탕으로 열간 마무리압연기 각 스탠드의 조업조건을 반영하는 해석예제를 선정하였고, 3차원 강열점소성 (rigid thermo-viscoplastic) 유한요소해석 프로그램을 이용하여 폭 퍼짐 양상에 대한 해석을 수행하였다. 해석결과 압연재의 입측두께와 압하율이 클수록 롤 바이트 내에서 많은 양의 폭 퍼짐이 발생함을 확인할 수 있었고, 주어진 조업조건 범위 내에서 롤 속도의 변화는 폭 퍼짐에 큰 영향을 끼치지 못함을 알 수 있었다. 또한 롤 바이트 내의 폭 퍼짐 현상으로 인해 입구부 이전 영역에서 압연재의 폭이 줄어드는 현상도 확인 할 수 있었으며, 마무리 압연기의 후반스탠드에서는 폭 퍼짐이 크지 않

때문에 압연하중에 크게 영향을 끼치지 않음을 알 수 있었다. 이러한 폭 퍼짐 해석결과를 이용하여 신경회로망 시스템을 학습시켜 임의 공정조건에서 폭 퍼짐 양을 예측하고 이를 이용하여 압연 설정하중을 보정할 수 있도록 하였다. 신경망 시스템은 임의 조건에 대해 압연재의 폭 퍼짐 양을 적절히 예측하였고, 압연하중을 보정한 결과 FSU 모델에 의해 계산된 설정하중에 비해 실측하중과의 하중오차가 작아지는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 본 연구의 경우 조업데이터의 양에 한계가 있었고, 해석 예의 경우도 충분치는 않기 때문에 실제공정에 적용할 때는 좀 더 많은 고려가 필요하리라고 생각되며, 계속적으로 다양한 경우에 대한 해석을 수행하고 이 결과를 데이터베이스 화하여 신경망 시스템에 활용한다면 실제공정도 충분히 적용되어 열간압연 초기의 하중설정 정확도를 향상시키고, 압연재 선단부의 두께제어 정도도 높일 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Yamada, F., Sekiguchi, K., Tsugeno, M., Anbe, Y., Andoh, Y., Forse, C., Guernier, M. and Coleman, T., 1991, "Hot Strip Mill Mathematical Models and Set-Up Calculation," *IEEE Tran. on Industry Application*, Vol. 27, No. 1, pp. 131~139.
- (2) Yamashita, M., Yarita, I., Abe, H., Mikuriya, T. and Yanagishima, F., 1987, "Technologies of Flying Gauge Change in Fully Continuous Cold Rolling Mill for Thin Gauge Steel Strips," *IRSID Rolling Conference*, 2(1), pp. E.36.1~E.36.11.
- (3) Terano, T., Asai, K. and Sugeno, M., 1989, *Applied Fuzzy Systems*, AP Professional.
- (4) Portmann, N., 1995, "Application of Neural Networks in Rolling Mill Automation," *Iron and Steel Engineer*, Vol. 72, No. 2, pp. 33~36.
- (5) Pican, N., Alexander, F. and Bresson, P., 1996, "Artificial Neural Networks for the Presetting of a Steel Temper Mill," *IEEE Expert*, Vol. 11, No. 1, pp. 22~27.
- (6) 문영훈, 이경중, 이필중, 이준정, 1993, "보정 함수를 이용한 강관의 열간 압연하중 예측정도 향상," *대한기계학회논문집*, 제17권, 제5호, pp. 1193~1201.
- (7) 문영훈, 한석영, 1993, "열연 강관의 선단부 두께편차 감소를 위한 마무리 압연 설정모델의 개선," 제1회 압연심포지움 논문집-압연기술의 진보, pp. 220~238.
- (8) 이종영, 조형석, 심민석, 조성준, 장민, 조용중, 윤성철, 1996, "보정신경망을 이용한 냉연 압하력 적중률 향상," *Proceedings of KACC*, pp. 1083~1086.
- (9) 정종엽, 임용택, 홍성철, 이주강, 1998, "열연 공정의 선단부 압연하중 설정용 퍼지시스템," *대한기계학회논문집*, 제22권, 제9호, pp. 1625~1638.
- (10) 정종엽, 김수영, 임용택, 1996, "유한요소해석을 이용한 열간압연공정의 장력값 설정," 제2회 압연심포지움 논문집-압연기술 현재와 미래, pp. 220~238.
- (11) Kim, S.Y. and Im, Y.T., 1998, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Non-Isothermal Shape Rolling," *Proc. of the 4th International Conf. on Advances in Materials and Processing Technologies*, K.L., Malaysia, pp. 950-957.
- (12) Kim, S.Y. and Im, Y.T., "Three-Dimensional Finite Element Simulation of Shape Rolling of Bars," *Int. Journal of Forming Processes*, (will be published).
- (13) Ginzburg, V.B., 1993, *High-Quality Steel Rolling-Theory and Practice*, Marcel Dekker, Inc.
- (14) Simon, H., 1994, "Neural Networks - A Comprehensive Foundation," Macmillan Collage Publishing Company, New York.