

## 후판 압연에서 신경망 알고리즘을 이용한 스키 예측

박준수<sup>1</sup> · 나두현<sup>1</sup> · 정석환<sup>2</sup> · 허승민<sup>2</sup> · 최해진<sup>1</sup> · 이영석<sup>#</sup>

### Prediction of Ski-Effect in Plate Rolling Process using Neural Network Algorithm

J. S. Park, D. H. Na, S. H. Jung, S. M. Hur, H. J. Choi, Y. S. Lee

(Received April 24, 2013 / Revised June 11, 2013 / Accepted July 23, 2013)

#### Abstract

A series of finite element analyses of the rolling process were performed and a neural network algorithm was employed to calculate the amount of ski-effect for an arbitrary thickness of incoming material in the roll gap. Pilot hot plate rolling tests were also conducted to verify the usefulness of the finite element analyzes conducted in this study. In these experiments, plates with thicknesses varying from 25 to 65 mm were tested. In addition, a number of rolling reductions of up to 31% were examined. Finally, a number of circumferential upper and lower rolls were investigated. Experimental validations demonstrated that the neural network algorithm predicted the proper amount of ski when rolling conditions(material thickness, reduction ratio, roll velocity differential) changed arbitrarily.

**Key Words** : Ski, Plate Rolling, Neural Network, Finite Element Analysis, Pilot Rolling Test

## 1. 서론

후판 압연(plate rolling)은 가열로에서 고온(1000°C 이상)으로 가열된 슬라브(slab)를 한 쌍의 워크롤(work roll)을 통과하여 압연시키는 공정이다. 압연되면서 슬라브의 두께가 순차적으로 감소되고 최종적으로 원하는 치수로 가공된다. 본 논문에서는 편상 워크롤을 롤이라고 한다. 워크롤을 통과하여 한 번이라도 압연된 슬라브는 소재(material)로 한다.

후판 압연은 상/하부 롤의 형상이 동일하고 슬라브는 직육면체이기 때문에 상하 대칭이다. 하지만 상/하부 롤 직경 차이, 상/하부 롤 속도 차이, 소재 상/하부의 마찰계수 차이, 소재 내부의 상/하부 온도 차이 등 여러 가지 비대칭 요인이 존재한다. 이러한 비대칭 요인들로 인해 소재의 앞부분이 위로 또는

아래로 휘는 현상이 종종 발생한다. 일반적으로 이 현상을 스키(ski) 라고 한다. 스키 다운(ski down)이 발생하면 소재를 이동시키는 롤러 테이블(roller table)에 충격을 주어서 롤러의 파손이 발생한다. 그리고 스키 업(ski)이 발생하면 압연설비 중 스트리퍼(striper)에 충격을 주어 압연설비의 파손이 발생한다. 따라서 스키가 발생하면 생산 효율성이 많이 떨어진다. 결과적으로 후판압연에서 스키를 제어하여 스키 업과 스키 다운이 발생하지 않는 연구가 필요하다.

스키에 대하여 많은 연구들이 수행되었다. M. Yoshii[1]과 J. S. Lu[2] 등은 소재의 상/하부 마찰계수 차이, 소재의 상/하부 온도차이 주속차(상/하부롤의 속도차이)의 변화에 의한 소재의 스키량 변화를 FEM 으로 계산하였다. Salimi[3] 등은 스키를

1. 중앙대학교 기계공학부

2. 현대제철 기술연구소

# Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Chung-Ang Univ, E-mail: ysl@cau.ac.kr

상/하부 롤의 직경차이, 상/하부롤의 마찰계수 차이, 그리고 상/하부롤의 속도차이를 고려하였다.

M. Philipp[4] 등은 소재의 형상지수(shape factor) (contact length/mean thickness)에 따라 스키 업(ski up), 스키 다운(ski down)이 발생한다고 주장하였다.

그는 스키업(ski up)이 발생하다가 어떠한 형상지수에서 스키 다운(down)이 발생하는 영역을 중립 영역(neutral region) 이라고 하였다.

A. Nilsson[5]은 소재 내부의 온도차이, 롤의 주속차와 압하율을 변화시키면서 스키량을 FEM으로 계산하고 실험 결과와 비교하였다. 그는 기존연구자들 [1~3]과는 달리 스키량을 소재가 휘어져서 발생된 곡률(curvature)이 아닌 소재의 높이로 계산하였다. 소재의 높이는 소재가 500mm압연 되었을 때 소재 상/하 차이를 의미한다.

기존 연구자들[1~5]은 스키발생 원인이 롤의 주속차, 소재의 상하부 온도차이, 압하율이라고 연구하였다. 그러나 그들은 롤과 소재의 접촉에 의해 발생하는 열전달은 고려하지 않았다. 압연 중 상온의 롤과 고온의 소재가 접촉할 때 소재의 접촉 부분 온도가 급격하게 낮아진다. 이로 인해 스키량에도 많은 영향을 주게 된다. 그리고 기존 연구자들은 스키가 발생하는 원인에 대해서만 연구를 하였고 스키를 제어하기 위한 방안에 관련해서는 연구하지 않았다.

신경망 알고리즘은 불완전한 데이터를 이용하여서 추론이 가능하여서 다양한 분야에서 사용된다. M. Bagheripoor과 H. Bisadi[6]는 유한요소법을 이용하여 롤의 압하력을 계산하고 신경망 알고리즘을 이용하여 해석 조건에 없는 압하력을 예측하였다. 하지만 스키를 제어하기 위해 신경망을 사용하여 예측한 연구자는 없었다. 본 연구자는 신경망 알고리즘(neural network)[7]을 이용하여 후판압연 공정에서 스키 제어 방안을 제시하였다.

본 연구자는 스키량에 영향을 미치는 압연 인자를 분석하였다. 압연 인자는 소재의 입측 두께, 압하율(reduction), 상/하부 롤 주속차 3가지이다. 스키를 발생시키는 압연인자를 이용하여 압연 실험을 수행 후 스키량을 측정하였다. 실험에서 측정된 스키량 값과 유한요소법으로 계산된 스키량 값을 비교하여 유한요소해석 모델의 유효성을 검증하였다. 본 연구자는 유한요소해석을 이용하여 다양한 입측 두께, 압하율, 주속차 변화에 따른 스키량 변화를 계산하

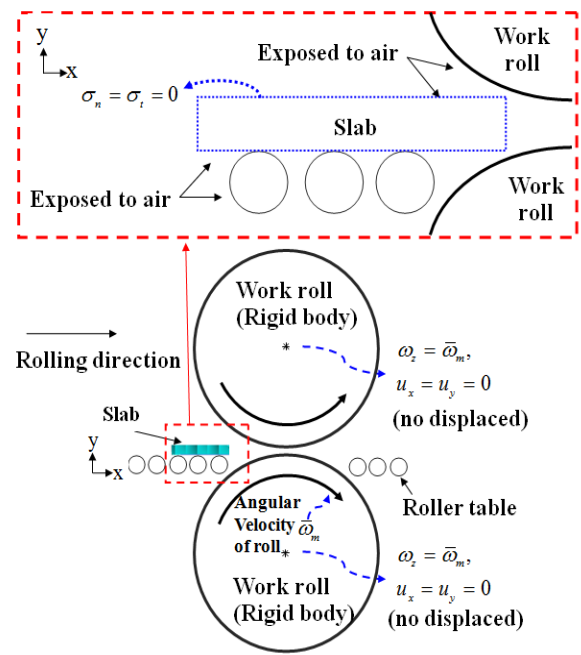


Fig. 1 Thermo-mechanical boundary condition on the rolls and material (slab)

였고 신경망 알고리즘을 사용하여 스키가 최소화되는 주속차 값을 예측하였다. 그리고 검정 실험을 통해 스키가 최소화되는 주속차 값을 검정하여 본 연구에서 개발된 신경망 프로그램에 대한 유효성을 확보하였다.

## 2. 유한요소 해석 모델

### 2.1 유한요소 해석 경계조건

Fig. 1은 압연 유한요소 해석의 열-기계적 경계 조건을 보여준다. 우리는 소재가 가열로에서 나와서 롤러테이블에서 냉각되는 것도 모사하였다. 그러기 위해서는 롤러테이블과 소재의 접촉 열전달 계수를 고려 하여야 한다. 기존 연구자들은 소재가 가공을 할 때 소재가 받는 압력 등에 의해 접촉 열전달 계수가  $5\sim 40\text{kW/m}^2\text{C}$ 라고 하였다[8]. 그러나 본 연구에서는 소재와 롤러 테이블 사이에서는 접촉만 이 존재하기 때문에 기존 연구자들이 사용한 접촉 열전달 계수 보다는 작을 것이라 판단하였다. 그래서 본 연구자는 실험값과 유한요소 결과값을 비교하였다. 그 결과 접촉 열전달 계수가  $3.4\text{kW/m}^2\text{C}$ 일 때 실험값과 가장 유사한 결과를 내는 것을 확인 후 사용하였다.

또한 압연해석을 진행할 때에는 롤과 소재의 열 전달 계수를 설정하여야 한다. 그래서 본 연구자는 기존 연구자들이 압연해석을 하였을 때 사용하였던 소재와 롤의 접촉 열전달계수를  $20\text{kW/m}^2\text{C}$ 를 사용하였다[9]. 롤은 변위가 없고 각속도만 존재한다. 또한 소재의 경우에는 워크롤 및 롤러테이블과 접촉하는 부위 외에는 공기와 대류가 발생한다.

### 2.2 구성방정식

본 연구에서 사용된 소재는 저탄소강(0.15%C)이다. 소재의 응력 변형률 선도는 Shida 식을 이용하여 계산되었다[10]. Shida 식은 변형률 속도에 따른 응력 변형률 곡선을 나타 낼 수 있는 식이다. 사용할 수 있는 조건은 탄소 함유량이 0.07%~1.2%이내, 온도가  $700\sim 1200\text{C}$  이내에 사용할 수 있다.

$$\bar{\sigma} = 0.28 \exp\left(\frac{5.0}{T_n} - \frac{0.01}{C+0.05}\right) \left(1.3\left(\frac{\dot{\epsilon}}{0.2}\right)^m - 0.3\left(\frac{\dot{\epsilon}}{0.2}\right)\right) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10}\right)^n \quad (1)$$

C,  $\dot{\epsilon}$ ,  $\bar{\epsilon}$ 는 탄소 함유량, 변형률 속도, 변형률을 나타낸다. 그리고 m은 변형 경화 계수를 나타내며  $m = 0.41 - 0.07C$ 로 표현 된다. n은 변형률 속도 민감도 계수를 나타내며  $n = (-0.019C + 0.126)T_n + (0.076C - 0.05)$ 로 표현 된다.  $T_n$ 은 온도를 나타내며  $T_n = (T + 273/1000)$ 와 같이 표현된다. 여기서 T는 섭씨 온도를 나타낸다.

### 2.3 유한요소해석 경우의 수

해석조건으로는 압하율을 조업현장에서 사용하는 압하율을 기준으로 10~31% 까지 3% 간격으로 설정하였다. 그리고 주속차는 식 (2)로 표현된다.

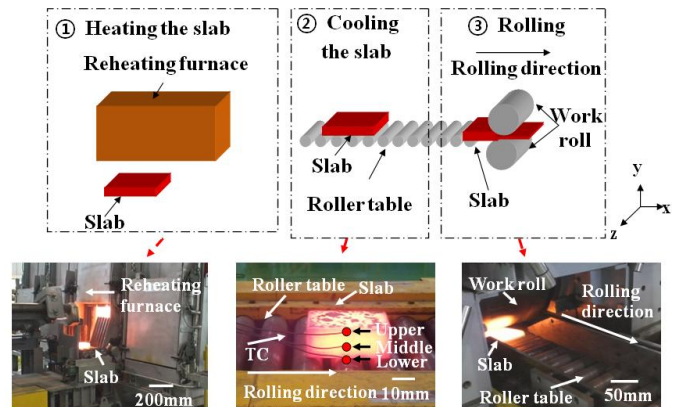
$$\text{주속차(\%)} = \frac{(\text{하부롤 속도} - \text{상부롤 속도})}{\text{하부롤 속도}} \times 100 \quad (2)$$

상부롤 속도가 빠르게 되면 소재의 상부가 가공이 많이 발생하기 때문에 스키가 아래로 향할 가능성이 많다. 그렇기 때문에 조업현장에서는 대부분 하부롤 속도보다 빠르게 설정하여 스키다운이 최대한 억제되게 한다. 그래서 본 연구에서는 하부롤이 빠르다고 가정하고 주속차를 0, 1, 3, 5, 7, 9% 6가지에 대하여 해석을 진행하였다. 그리고 입측두께의 경우는 실험압연기의 성능을 고려하여 5가지 15~65mm 까지 10mm간격으로 설정하였다.

Table 1에 우리가 유한 요소해석을 한 경우의 수는

**Table 1 Variations of parameters for FE simulation**

Parameters	Parameter value change
Thickness	25,35,45,55,65mm
Reduction	10,13,16,19,22,25,28,31%
Difference in peripheral speed	0, 1, 3, 5, 7, 9%



**Fig. 2 Schematic of pilot plate rolling test and life-size photographs corresponding to the reheating furnace, roller table and work roll**

입측 두께 5가지, 압하율 8가지, 상부/하부 롤 주속(peripheral speed) 차이 6가지, 총240가지의 경우의 수를 나타내었다.

## 3. 압연실험

### 3.1 소재를 가열 및 냉각

가열로에서 가열된 소재는 롤러테이블에서 냉각된다. 그리고 압연을 개시 한다(Fig. 2). 가열로에서 가열된 소재가 공기에 의해 또 롤러 테이블 (Roller table) 과의 접촉에 의해 냉각이 되면서 소재두께방향으로 온도차이가 발생한다. 이 때 롤러 테이블과 소재의 접촉 열전달 계수를 선정하여야 한다.

또한 Fig. 2 본 연구자가 실험에 사용하였던 가열로, 롤러테이블, 실험 압연기(현대제철 기술연구소 소재)를 나타내고 있다. 실험 조건은 가장 스키가 뚜렷하게 발생할 것이라고 판단되는 25, 35mm 2가지를 설정하였다. 그리고 압하율과 주속차는 유한요소 해석에서 설정한 압하율을 참고하여 22, 31%로 설정하였다. 이와 같은 실험조건에 관련하여서 Table 2에 명시하였다.

**Table 2 Variations of parameters for rolling test**

Parameter	Parameter value change
Thickness	25,35 mm
Reduction	22,31%
Velocity difference	0,3,7%

본 연구자는 조업현장에 적용되는 슬라브의 온도를 고려하여 가열로 온도를 설정하여 시편을 가열하였다. TC(Thermal Couple)는 소재의 상부(upper), 중부(middle), 하부(lower)에 삽입하여 냉각중 소재 내부에서 온도변화가 측정되었다. Fig. 2의 ②에 소재에 T/C가 삽입된 상태에서 냉각되는 모습이 보인다.

### 3.2 압연

소재가 롤러테이블을 통하여 워크롤(work roll) 앞까지 오면 소재의 표면에 존재하는 스케일은 제거되었다. 스케일이 제거된 후 Table 2에 명시한 조건에 근거하여 압연이 실행되었다.

### 3.3 측정

본 연구자는 압연이 된 소재의 스키량을 측정하였다(Fig. 3).

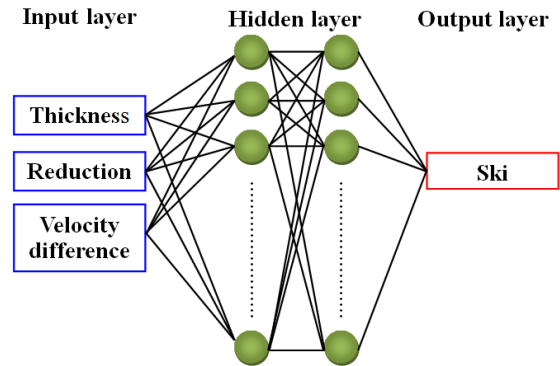
우리는 소재의 밀면과 평행한 연장선을 작도했다(①) 연장선과 수직이 되는 선을 작도하였다(②). 그 후에 수직이 되는 선이 소재와 만나는 거리를 스키량 이라고 정의하였다(③).



**Fig. 3 Side view of material in which the ski is formed after the rolling test**

## 4. 신경망 모델

본 연구에서 우리는 1986년에 러멜하트(Rumelhart) 등이 제안한 다층 퍼셉트론(multilayer perceptron)을



**Fig. 4 Model for neural network used in this study**

이용하여 후관 스키를 제어하였다[6]. 다층 퍼셉트론 신경망은 비선형문제, 패턴인식, 형상분류, 등 여러 방면에서 사용중인 신경망 알고리즘이다. 다층 퍼셉트론 신경망은 입력층, 은닉층, 출력층으로 이루어져 있으며, 그 모형도는 Fig. 4와 같다. 본 연구자는 신경망의 기능 중 함수 근사화 기능을 사용하였다.

함수 근사화 기능은 몇 개의 데이터를 이용하여 미지의 값을 예측할 수 있는 기능이다. 신경망의 입력값으로는 입측두께, 압하율, 주속차를 사용하였고 스키량을 출력하도록 하였다.

## 5. 결과 및 토의

### 5.1 유한요소해석 결과와 실험 결과 비교

#### (1) 소재의 상하부 온도 비교

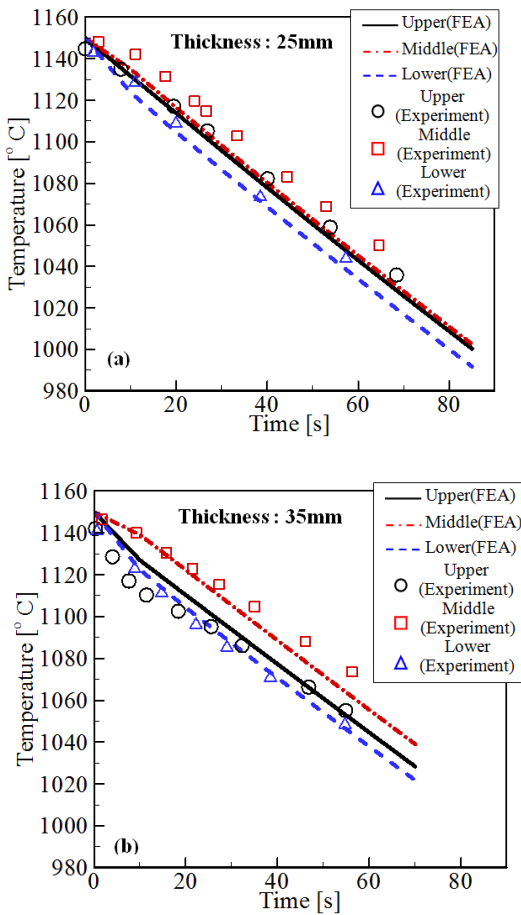
Fig. 5는 실험에서 측정한 입측두께 25, 35mm 소재의 상부(upper), 중부(middle), 하부(lower) 온도와 유한요소해석을 이용하여 계산한 소재의 온도를 비교한 것이다.

우리는 소재의 TC를 삽입한 위치와 동일한 위치에서 유한요소 해석 결과값을 비교하였다. 본 연구자는 유한요소해석과 비교하였을 때 실험값과 유사하게 온도결과가 나오는 것을 확인하였다.

#### (2) 스키량 비교

Fig. 6은 실험에서 측정한 스키량과 유한요소해석에서 계산한 스키량을 비교 한 것이다.

실험 및 FE해석을 수행한 압하율이 중립영역에서 오른쪽에 위치 하여서 모두 스키 다운이 발생한 것이라 판단하였다. 실험과 FE해석결과를 비교하면 동

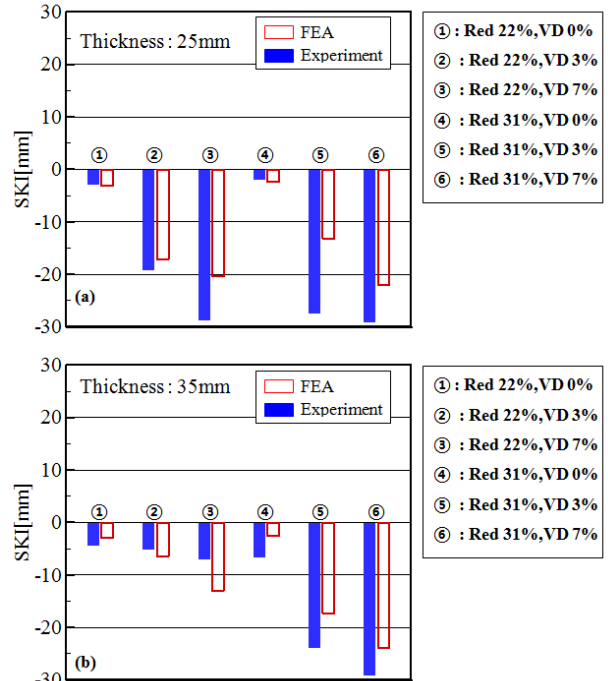


**Fig. 5 Predicted temperature and measured ones at three points for different material thickness (a) 25mm (b) 35mm**

일한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 스키 현상에서 발생하는 특징이라고 판단하였다. 또한 최대 스키량은 ±10mm 이상 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 오차의 원인은 실험에서는 여러가지 외부 변수 들로 인해 발생한 오차라고 판단하였다. 그렇기 때문에 본 연구자는 유한요소해석 결과가 문제가 없다고 판단했다. 그리고 유한요소해석 결과를 신경망 알고리즘에 적용하였다.

### 5.2 유한요소해석 결과를 이용하여 신경망 알고리즘 적용

Table 2에서 명시한 조건으로 유한요소 해석을 한 후 압하량, 입측두께, 스키량에 따른 FE 해석 값 (240개)을 Fig. 7에 심볼(symbol)로 표시하였다. 각각 입측두께 별로 M.Philipp이 주장한 neutral region이 뚜렷하게 나오는 것을 알 수 있다. 기존 연구자들[3]은



**Fig. 6 The amount of ski measured is compared with the predictions for different material thickness (a) 25mm (b) 35mm**

형상비에 따라서 스키량을 계산하였다. 하지만 본 연구자는 형상비가 아닌 압하율 변화에 따른 스키량을 계산하였기 때문에 입측두께가 두꺼워 짐에 따라 neutral region 이 오른쪽 이동하는 것을 알 수 있다.

유한요소 해석 값 240개를 적용하여 인공신경망을 훈련하였다. 그 후 본 연구자는 출력한 내용에 대하여 Fig. 7에 점선으로 표시하였다. 학습된 신경망을 통하여 출력한 결과값에도 neutral region도 보이는 것을 알 수 있다. 이를 토대로 본 연구자는 신경망 알고리즘이 문제없이 적용되었다고 판단하였다.

### 5.3 신경망 알고리즘 검정실험

본 연구자는 학습된 신경망을 이용한 스키제어 가능 여부를 확인하기 위하여 검증 실험을 실시하였다. 검증실험 방법으로는 신경망 학습에 사용되지 않은 입측두께 30mm, 40mm에 대하여 실험을 진행하였다. 입측두께 30mm이고 압하율이 11, 17%, 그리고 입측두께가 40mm이고 압하율이 17%일 때 총 3번의 검증 실험을 수행하였다. 각각의 압연조건에서 스키량이 '0'이 되는 주속차에 관하여서 Fig. 8에 표시하였다.



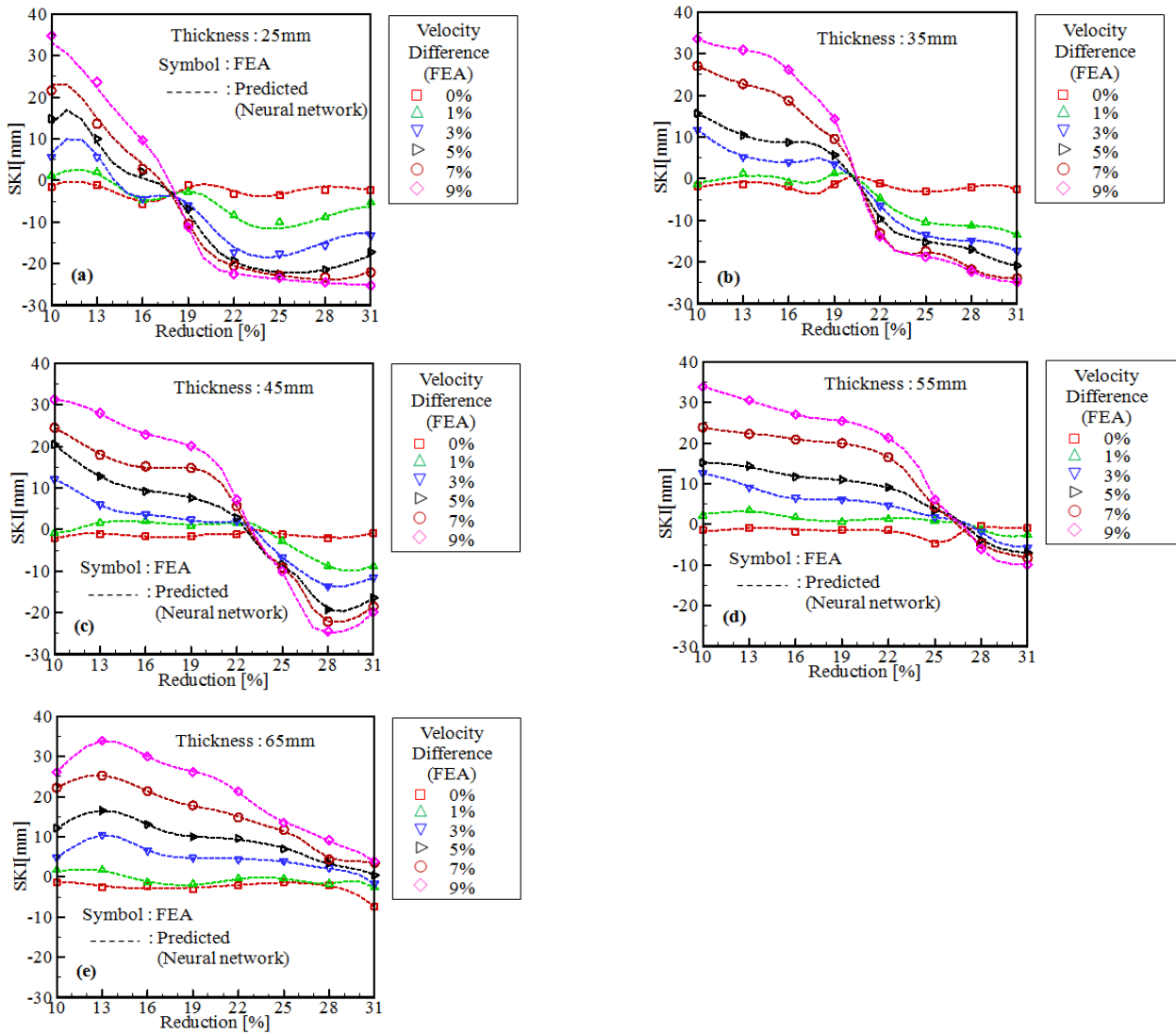


Fig. 7 The amount of ski predicted by FE analysis and those by neural network(a) 25mm (b) 35mm (c) 45mm (d) 55mm (e) 65mm

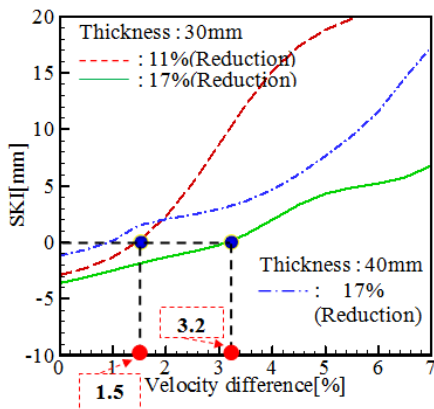


Fig. 8 Application results of the neural network in case that material thickness is 30mm

Fig. 8은 본 연구자가 신경망 알고리즘에 적용하여 입측두께, 압하율, 주속차가 따른 스키량을 출력한 것이다. Fig. 8에 따르면 입측두께 30mm일 때 압하율이 11%일 때는 주속차가 1.5%일 때, 압하율이 17%일 때는 주속차가 3.1%일 때 그리고 입측두께 40mm일 때 압하율이 17%일 때는 주속차가 3.2%일 때 스키량이 '0'이 되는 것을 본 연구자는 확인하였다.

본 연구자는 검증실험 후 소재의 측면의 형상을 비교하였다. 점선은 스키량이 '0'인 이상적인 압연이 되었을 경우이다. 그리고 실선은 실제로 검증실험 후 소재의 측면의 형상을 나타낸 것이다(Fig. 9, Fig. 10). Fig. 9는 입측두께 40mm시편의 형상을 나타낸 것이다.

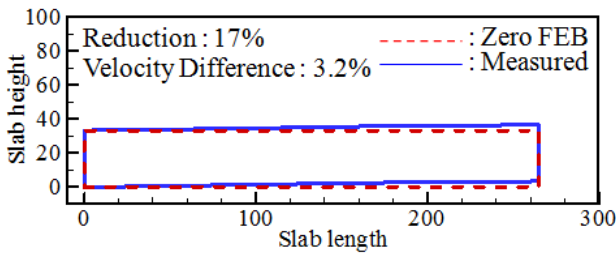


Fig. 9 Side view of material after the rolling test, material thickness before rolling test was 40mm

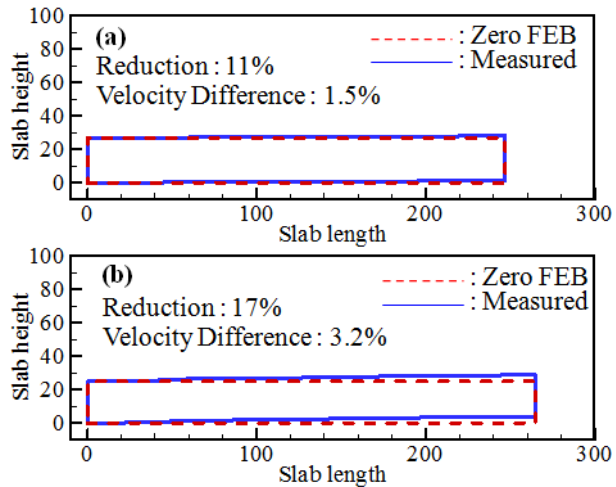


Fig.10 Side view of material after the rolling test, material thickness before rolling test was 30mm, (a) reduction :11% (b) reduction : 17%

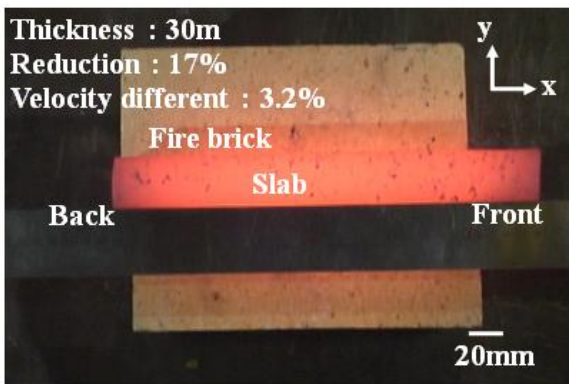


Fig.11 Life-size photograph of material after the rolling test, material thickness before rolling test was 30mm

그리고 Fig. 10은 입측두께 30mm압하율 11%, 주속차 1.5%, 그리고 압하율 17%, 주속차 3.2%의 두번의 검증실험 후 소재의 형상을 나타낸 것이다. 입측두께

30mm, 40mm의 소재의 측면의 형상을 비교하였을 경우 스키가 ±5mm이내로 발생한 것을 알 수 있다. 이는 신경망에서 출력한 결과가 문제없이 적용되었다는 것을 알 수 있다. 그리고 실험 후 소재의 사진을 Fig. 11에 표시하였다.

Fig. 11은 입측두께 30mm, 압하율 17%, 주속차 3%의 검증실험 후 소재의 사진이다. 소재가 스키가 발생하지 않은 것을 알 수 있다. 이것을 토대로 스키를 제어하기에 신경망 알고리즘 적용이 문제 없이 이루어졌다고 판단할 수 있다.

### 6. 결론

본 논문에서는 후판압연 공정에서 스키 발생 주요 원인에 대하여 유한요소해석을 수행 후 분석하였다. 본 연구자는 스키가 발생하는 주요원인으로 소재의 상하부 온도차, 입측두께, 압하율, 주속차가 가장 큰 영향을 끼친다고 판단하였다. 본 연구자는 유한요소 해석결과를 바탕으로 입측두께, 압하율, 주속차를 입력하면 스키량을 예측할 수 있도록 신경망을 학습시켜 스키를 제어 해본 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 스키를 제어하는데 신경망 알고리즘 적용이 적절하다는 것을 검증실험을 통하여 검증하였다.
- (2) 향후 조업현장에 데이터를 측정하여서 신경망 알고리즘에 적용을 하여 실제 조업현장에서 생산성의 향상을 이룰 수 있을 것이라 판단하였다.

### REFERENCES

- [1] M. Yoshii, K. ohmori, T. seto, H. nikaido, H. nishizaki, M. Inoue, 1991, Analysis of Warping Phenomenon In Plate Rolling, ISIJ Int., Vol. 31, No. 9, pp. 973~978.
- [2] J. S. Lu, O. K. Harrer, W. Schwenzfeier, F. D. Fischer, 2000, Analysis of the Bending of the Rolling Material in Asymmetrical Sheet Rolling, Int. J. Mech. Sci., Vol. 42, No. 1, pp. 49~61.
- [3] M. Salimi, F. Sassani, 2002, Modified Slab Analysis of Asymmetrical Plate Rolling, Int. J. Mech. Sci., Vol. 44, No. 9, pp. 1999~2023.
- [4] M. Philipp, W. Schwenzfeier, F. D. Fischer, R. Wodlinger, C. Fischer, 2007, Front end Bending in Plate Rolling Influenced by Circumferential Speed

- Mismatch and Geometry, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 184, No. 1-3, pp. 224~232.
- [5] A. Nilsson, 2007, Front-end Bending in Plate Rolling, *Scand. J. Metall.*, Vol. 30, No. 5, pp. 337~344.
- [6] M. Bagheripoor, H. Bisadi, 2012, Application of Artificial Neural Networks for the Prediction of Roll Force and Roll Torque in Hot Strip Rolling Process, *Appl. Math. Modell.*, Vol. 37, No. 7, pp. 4593~4607.
- [7] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, R. J. Williams, 1986, Learning Representations by Back-propagating Errors, *Nature*, Vol. 323, No. 9, pp. 533~536.
- [8] C. O. Hlady, J. K. Brimacombe, I. V. Samarasekera, E. B. Hawbolt, 1995, Heat Transfer in the Hot Rolling of Metals, *Metall. Mater. Trans. B*, Vol. 26, No. 5, pp. 1019~1028.
- [9] J. G. Lenard, Z. Malinowski, M. Pietrzyk, 1992, Comparison of the Predictive Capabilities of Mathematical Models of the Flat Rolling Process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 34, No. 1-4, pp. 85~92.