

신경회로망과 퍼지 논리를 이용한 열간 사상압연 폭 예측 모델 및 제어기 개발

Width Prediction Model and Control System using Neural Network and Fuzzy in Hot Strip Finishing Mills

박철재*, 황이철
(Cheol Jae Park and I Cheol Hwang)

Abstract : This paper proposes a new width control system composed of an ANWC(Automatic Neural network based Width Control) and a fuzzy-PID controller in hot strip finishing mills which aims at obtaining the desirable width. The ANWC is designed using a neural network based width prediction model to minimize a width variation between the measured width and its target value. Input variables for the neural network model are chosen by using the hypothesis testing. The fuzzy-PID control system is also designed to obtain the fast looper response and the high width control precision in the finishing mill. It is shown through the field test of the Pohang no. 1 hot strip mill of POSCO that the performance of the width margin is considerably improved by the proposed control schemes.

Keywords : hot strip mill, neural network, width control, finishing mill, fuzzy PID, looper control, statistical testing

I. 서론

최근 고급강을 생산하는데 있어서 제철소간 경쟁이 치열해지고 있고, 수요가의 품질에 대한 요구가 한층 엄격해지고 있어 품질 제어가 더욱 중요해지고 있다[1]. 열간 압연에서 제품의 품질을 결정하는 중요한 요소 가운데 압연 판의 폭은 제철소의 생산성을 판단하는 중요한 인자이므로 정밀한 폭 마진 제어는 특히 중요하다[2,3]. 여기서, 폭 마진은 수요가의 요구 폭에 사이드 트리밍(side trimming)을 위해서 더해지는 여유 폭을 말한다.

열간압연에서 폭 마진을 제어하는 방법은 크게 조압연과 사상압연에서의 폭 제어로 나눌 수 있다. 조압연의 폭 제어는 피드백 폭 제어기(FeedBack Automatic Width Control: 이하 'FB AWC')와 압연 하중(roll force) 폭 제어기(이하 'RF AWC')로 나눌 수 있다. FB AWC는 조압연 출측의 폭 계측기로부터 실측 폭을 측정하여 수직 압연기의 롤 갭(roll gap)을 제어하는 방법이다[4,5]. 또한 RF AWC는 목표 폭 마진을 얻기 위하여, 수직 압연기의 하중을 설정하고 실측된 압연 하중과의 편차를 이용하여 수직 압연기의 롤 갭을 제어하는 방법이다. 그러나 FB AWC의 경우, 수직 압연기와 폭 계측기 사이의 거리가 약 15m 정도 떨어져 있고, 조압연에서의 압연 판 길이는 100m 내외로 짧기 때문에 폭 제어 정도 향상에 기여하기 어렵다. 또한 조압연 공정에서는 수증기, 냉각수, 압연기의 진동 등 주위 환경으로 인하여 폭 측정이 쉽지 않다. RF AWC의 경우, 목표 폭을 얻기 위하여 압연 하중을 정확하게 설정하는 것이 중요하지만, 조압연 공정에서 수평, 수직 압연기의 롤 갭과 압연 하중을 설정하는 RSU(Roughing mill Set Up) 모델은 외란의 영향이 크기 때문에 정도가 높지 않다는 문제점이 있다[6-9]. 따라서 조압연에서의 폭 제어의 문제점

을 해결하기 위하여 사상압연에서 적극적인 폭 제어 기술의 개발이 필요하다.

사상압연에서의 폭 제어는 스탠드간에 설치된 루퍼 시스템을 이용하여 장력을 제어함으로써 장력 변동에 의한 폭 변동을 최소화하는 것을 목표로 하고 있다. 그러나, 압연 판이 압연기에 도달하는 순간 양단 스탠드의 속도 편차에 의해 발생하는 과도한 루프(loop)나 과도한 장력 발생 시, 루퍼가 신속하게 동작하지 못함으로써 장력 제어가 지연되어, 선단부 폭이 목표 폭보다 작은 폭 불량 문제가 발생한다. 이는 (i)번 스탠드와 (i+1)번 스탠드간에 설치되어 있는 루퍼의 경우, 압연 판이 (i+1)번 스탠드에 도달하는 시점부터 약 0.6초 이후에 루퍼가 기동하기 시작하여 안정된 장력 제어를 수행하는데 걸리는 시간은 약 1초 이상이 되기 때문에 발생한다. 여기서, 0.6초의 시간은 압연 판의 주행성과 관련된 시간이므로, 장력 제어 성능을 위하여 임의로 조절하기는 상당히 어렵다. 따라서, 루퍼의 기동시점은 고정되어 있으므로 루퍼가 압연 판에 빠른 시간에 접촉할 수 있는 제어기의 개발이 필요하다.

선진 제철소에서는 정밀한 폭 제어를 위하여 조압연 뿐 아니라 사상압연에서 많은 연구가 진행되었다[10-13]. 조압연에서는 쇼트 스트로크(short stroke), 피드 포워드(feed forward), 압연하중(roll force) 등의 폭 제어기가 개발되었으며[10], RF AWC는 주로 스킨드 마크(skid mark)에 의한 폭 변동을 제어하기 위하여 개발되었다. 유압 AWC와 수직 압연기의 설정 모델도 개발되었으며[11-13], 유압 AWC는 주로 FB AWC의 개념을 도입하였다. 사상압연에서는 1번과 2번 압연 롤을 구동시키는 모터의 전류차를 이용하여 양단 스탠드의 속도 편차를 제어하는 방법이 개발되어 있다[14]. 최종 스탠드 출측에 설치되어 있는 폭 계측기로부터 폭 편차를 측정하여 스탠드간의 루퍼 전류를 조정하는 FAWC(Finishing Automatic Width Control) 제어기가 개발되었으나, 폭 계측기와 전단 루퍼간의 측정 지연(measurement delay)을 해결할 수 있는 방법

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2007. 1. 25., 채택확정 : 2007. 2. 17.
박철재 : 포스코 기술연구소(cjpark@posco.co.kr)
황이철 : 동의대학교 메카트로닉스 공학과(ichwang@deu.ac.kr)

에 대한 연구가 진행중이다[15-17]. 또한 폭 예측 모델을 개발하여 루퍼 시스템에 대한 최적 제어기법을 도입하고자 하는 시도도 있다[18]. 그러나, 조압연에서 폭 변동량을 줄여도 사상압연 입측과 사상압연 구간에서도 폭 변동이 발생할 수 있다. 또한 기존의 연구에서는 조압연 출측의 폭을 설정할 때 사상압연 구간에서 폭 변동량을 고려하고 있지 않으므로, 사상압연에서의 폭 변동을 RSU 모델에서는 고려할 수 없는 문제가 있다.

이 논문에서 수행한 연구 내용은 크게 두 가지로 대별된다. 첫 번째는 사상압연에서의 폭 변동량을 예측하고 이를 사상압연 입측 폭 설정에 반영함으로써 사상압연에서 폭 마진 편차를 줄일 수 있는 새로운 ANWC(Automatic Neural network based Width Control) 제어기를 설계하는 것이다. ANWC 제어기는 사상압연에서 신경회로망을 이용한 폭 변동 예측 모델로부터 개발된다. 여기서, 최적의 신경회로망 입력 변수를 선정하기 위하여 다수의 공정 변수들에 대한 상관계수와 p -값(p -value) 등의 통계적인 접근법(statistical approach)을 이용한다. 두 번째로는, 사상압연기 사이에 설치되어 있는 루퍼 시스템의 응답성을 높여서 선단부에 발생하는 매스플로 불일치(mass-flow unbalance)에 따른 장력 변동을 최소화 함으로써 폭 변동을 최소화 하는 제어 시스템을 설계하는 것이다. 이는 각 동작점(operating point)들마다 PID 제어 계인들을 적절하게 튜닝 함으로써 해결할 수 있으나, PID 제어기는 제철 공정의 특성상 온도 등 여러 가지 외란 때문에 최적으로 조정하기 어려울 뿐 아니라 강중, 사이즈에 따른 압연 작업 조건들이 상이하기 때문에 전체 작업 조건에 맞는 제어 계인을 선정하는 것은 불가능하다. 따라서 이 논문에서는 경험적인 지식을 바탕으로 룰(rule)을 만들고, 이를 기초로 하는 퍼지-PID 제어기를 설계한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 열간압연 공정에 대한 간략한 설명과 함께 종래의 폭 제어 기법중 조압연에서의 FB AWC와 RF AWC, 사상압연에서의 루퍼 제어 시스템에 대하여 설명한다. 제 3장에서는 사상압연에서 ANWC 시스템에 대한 제어 모델을 도출하고 제어기를 설계한다. 제 4장에서는 루퍼 시스템의 응답성을 높이기 위하여 퍼지-PID 제어기를 설계한다. 제 5장에서는 개발된 ANWC 제어기의 포스코 포항 1열연 공장에서의 테스트 결과와 퍼지-PID 제어기의 모의 실험 결과에 대하여 고찰하며, 이 논문의 결론은 제 6장에서 요약된다.

II. 열간압연 공정과 기존의 폭 제어

1. 열간압연 공정

그림 1은 열간압연 공정을 나타낸다. 가열로에서 추출된 압연판은 조압연(roughing mill)과 사상압연(finishing mill) 공정을 거쳐 압연된다. 조압연 공정에서는 주로 압연판의 폭을 제어하고 사상압연 공정에서는 두께와 형상을 주로 제어하게 된다. 조압연 공정에는 2개의 수직 압연기(E1, E2)와 2개의 수평 압연기(R1, R2)가 있고, 사상압연에는 6개의 수평 압연기(F1-F6)가 있다. 사상압연기 사이에는 루퍼(looper)가 있어서 사상압연기 사이의 장력을 일정하게 유지시키는 기능이 있다. 조압연과 사상압연 출측에는 폭 계측기가 각각 RW,

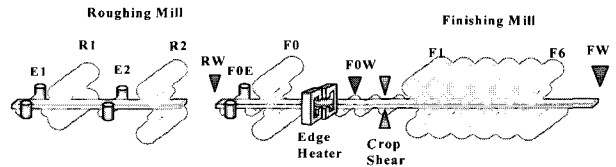


그림 1. 열간압연 프로세스.
Fig. 1. Configuration of hot strip mill.

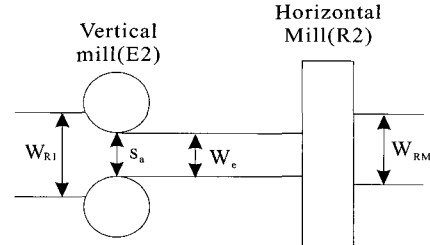


그림 2. 수직, 수평 압연기의 폭 정의.
Fig. 2. Width definition in the vertical and horizontal mill.

FW로 표시되어 있다. 두 공정 사이에는 수직 압연기(F0E)와 수평 압연기(F0)가 있어서 두 공정간의 부하를 조정하는 역할을 한다.

2. 조압연에서의 폭 제어

조압연에서의 폭은 FB AWC와 RF AWC의 두 가지 방법으로 제어된다.

2.1 FB AWC

FB AWC는 조압연 출측 폭 계측기(RW)로부터 측정된 판폭과 목표 판폭과의 오차를 제어하기 위하여 수직 압연기의 갭을 변경하는 방법이다. 수직 압연기와 수평 압연기에서의 폭과 롤 갭을 그림 2와 같이 정의하면, W_e 는 다음과 같이 주어진다[19].

$$W_e = \frac{P_a}{M} + s_a, \tag{1}$$

여기서 M 은 E2의 밀 상수(mill constant), P_a 는 E2의 측정된 압연 하중, s_a 는 E2의 롤 갭이다. E2의 출측 폭 편차는 동작점에서의 압연 하중(P_0)과 (1)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta W_e = \frac{P_a - P_0}{M} + s_a - s_0. \tag{2}$$

또한 수직 압연기(E2)의 롤 갭 제어량은 측정된 조압연 출측 폭 편차(ΔW_{RM})를 최소화 하기 위하여 다음과 같이 연산된다.

$$\Delta s_{FB}^* = -\frac{M + Q}{M} \cdot G_{FB} \cdot \Delta W_{RM}, \tag{3}$$

여기서 위 첨자 '*'는 제어량, Q 는 재료의 강성, G_{FB} 는 FB AWC의 제어기를 나타내고, 보통 PI 제어기로 다음과 같은 구조를 가진다.

$$G_{FB} = G_m + \frac{K_i}{s},$$

여기서 G_m 은 비례게인, K_i 는 적분 게인이다.

2.2 RF AWC

RF AWC는 수평, 수직 압연에 의한 폭 변동량을 최소로 제어하기 위한 방법이다. 일반적으로 W_{RM} 은 W_{R1} , W_e 와 다음과 같은 관계가 있다[19].

$$W_{RM} = W_e + \beta(W_{R1} - W_e), \tag{4}$$

여기서 β 는 폭 회복계수(0.5-0.8) 이다. E2의 압연하중(P_a)은 매스플로 일정 조건으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_a = \frac{MQ}{M+Q} \cdot (W_{R1} - s_a). \tag{5}$$

W_{RM} 은 (1), (4), (5)로부터,

$$W_{RM} = s_a + \frac{P_a}{MQ} \cdot (Q + \beta M) \tag{6}$$

수직 압연기의 압연 하중과 롤 갭은 $\Delta W_{RM}(\Delta W_{RM} > 0)$ 을 최소화하기 위하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta s_{RF}^* = -\frac{\Delta P_a^*}{MQ} \cdot (Q + \beta M), \tag{7}$$

$$\Delta P_a^* = \frac{MQ}{M+Q} \cdot (\Delta W_{R1} - \Delta s_{RF}^*). \tag{8}$$

따라서, RF AWC의 갭 제어 입력은 (7), (8)로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\Delta s_{RF}^* = -\frac{Q + \beta M}{M(1 - \beta)} \cdot G_{RF} \cdot \left\{ \Delta s_a + \frac{\Delta P_a}{MQ} (M + Q) \right\}, \tag{9}$$

여기서 G_{RF} 는 RFAWC의 게인이다.

3. 사상압연에서의 폭 제어

사상압연에는 그림 3과 같이 스탠드간에 루퍼가 설치되어 있다. 여기서, V_{Ri} 는 i 스탠드의 롤 속도, θ 는 루퍼 각도, σ_i 는 스탠드간의 단위 장력을 각각 나타낸다. 루퍼는 양단 스탠드간의 매스플로 불일치로 생기는 장력 변동을 최소로 하기 위하여 루퍼 각도와 장력을 제어한다. 사상압연에서는 루퍼에 의한 장력 변동을 최소로 함으로써, 폭 변동을 최소로 제어하고 있다.

루퍼에 대한 수학 모델과 장력 연산 모델은 뉴턴(Newton) 운동역학과 후크의 법칙(Hooke's law)에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

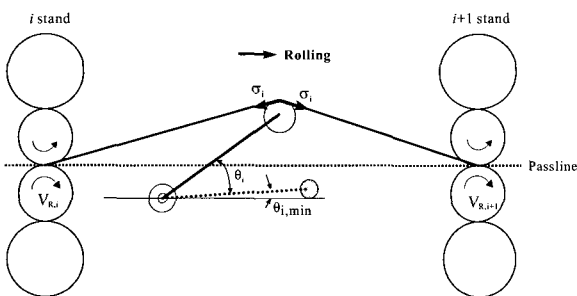


그림 3. 루퍼 시스템의 개략도.
Fig. 3. Configuration of looper system.

$$J\ddot{\theta} = -F_1(\theta) - A_s \sigma F_3(\theta) - D\dot{\theta} + T_{lm}, \tag{10}$$

$$\frac{d}{dt} \sigma = \frac{E}{L} \left\{ \frac{\partial F_2(\theta)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} - (1+f)v_{Re} \right\}, \tag{11}$$

여기서 J 는 루퍼 관성, $F_1(\theta)$, $F_2(\theta)$, $F_3(\theta)$ 는 각도에 대한 영향계수, A_s 는 압연 판의 단면적, D 는 감쇠계수(damping factor), T_{lm} 은 루퍼 모터의 토크, E 는 영률(Young's modulus), L 은 스탠드간 거리, f 는 선진율, v_{Re} 는 스탠드간 롤 속도 편차를 각각 나타낸다.

루퍼 제어기는 (10)과 (11)에 대하여 동작점 근처에서 선형화한 상태공간 모델에 기초하여 설계되며, 현재 PI, CDM, LQ, ILQ, H_∞ 및 MPC 등의 다양한 제어 알고리즘이 적용된 제어 시스템이 개발되어 있다[20-22].

III. 사상압연 ANWC 제이기 설계

사상압연에서는 보통 폭 변동을 고려하지 않은 2차원 압연 모델을 통하여, 롤 갭과 압연 하중을 예측하고 있다. 폭 변동을 고려한 3차원 압연 모델은 현장 작업 시 설정에 걸리는 시간이 길고 복잡하다는 단점이 있기 때문이다. 그러나 2차원 압연 모델은 폭이 일정하다고 가정하므로 폭 변동을 예측할 수 없다. 따라서 이 논문에서는 신경회로망을 이용한 폭 변동 예측 모델을 개발하고, 이를 이용한 제어 시스템을 설계한다.

1. 신경회로망을 이용한 폭 변동 예측 모델

열연 공정과 같이 많은 프로세스 변수들이 연관되어 있는 경우에는 신경회로망의 입력을 어떻게 선정하는가에 따라서 모델의 정도가 달라진다. 따라서, 신경회로망의 입력을 선정하는 방법이 중요한 문제가 된다. 대표적인 기존의 방법은 weight pruning과 PCA에 기초한 방법이 있다[23-25]. Weight pruning에 근거한 방법은 돌출부(saliency)를 측정함으로써 시냅스 가중치(synaptic weighting)와 유효한 변수를 선정하는 방법이다[26]. 그러나, 이 방법은 계산상에 많은 부하가 요구되는 단점이 있다[27]. 그리고 PCA(Principal Component Analysis)는 프로세스 파라미터가 많은 압연 프로세스에 적용하기에는 쉽지 않은 문제가 있다[28,29]. 따라서, 이 논문에서는 통

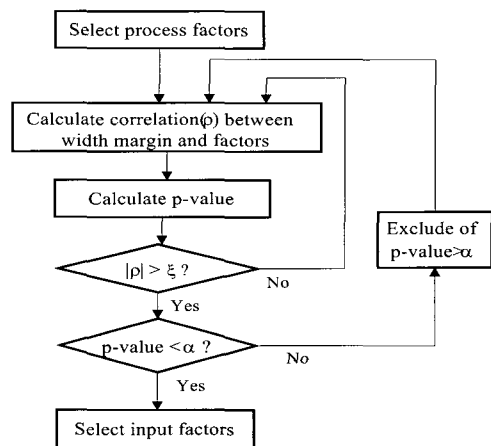


그림 4. 입력 선정 흐름도.
Fig. 4. Procedure of the input variables selection.

표 1. F0 폭마진과 관련된 변수들의 상관계수와 p-값.
Table 1. Correlation and p-value between F0 width margin and factors.

항목	상관계수(ρ)	p-값
조압연 폭	0.605	0
F0 폭	0.469	0
단위장력	-0.37	0
:	:	:
성분 Mn	-0.017	0.385
F4 압연하중	-0.003	0.884

계적인 기법을 이용하여 신경회로망의 입력을 체계적으로 선정한다.

먼저, 사상압연 출측의 폭 마진과 관련된 변수를 신경회로망의 후보 입력으로 선정한다. 일반적으로 사상압연 출측 폭 마진은 7mm로 고정시키기 때문에 사상압연 구간의 폭 변동량을 고려하여 사상압연 입측 폭을 어느 정도로 설정해야 하는지가 중요한 문제가 된다. 따라서 신경회로망의 출력을 F0 스탠드 출측(사상압연 입측)의 폭 마진으로 선정한다. 이 논문에서 신경회로망의 입력은 그림 4와 같은 순서로 선정된다.

- 1단계: 사상압연 입측 폭 마진과 관련된 프로세스 변수를 선택한다. 표 1과 같이 열간 압연의 기존 지식과 경험으로 신경회로망의 출력과 연관이 있는 25개의 변수들이 선정되었다.
- 2단계: 사상압연 입측 폭 마진과 선정된 25개의 입력 변수간 상관계수(ρ)를 구한다. 상관계수 테스트를 위한 데이터는 약 3개월간 수집한 2595 코일이다. 그림 4에서 ξ 는 상관계수를 선정하기 위한 파라미터로 경험적으로 0.17을 선정한다.
- 3단계: 1단계에서 선정된 변수들의 통계적인 유의성(effectiveness)을 검증하기 위하여 p-값(p-value)을 연산한다. p-값은 t-분포 테스트에 의하여 결정되며, T 통계 값은 다음과 같이 결정된다[30].

$$T = \sqrt{n-2} \cdot \frac{\rho}{\sqrt{1-\rho^2}} \quad (12)$$

- 4단계: 3단계에서 구한 p-값과 유의수준(significance level) α 와의 대소 관계를 통하여 사상압연 입측 폭 마진과 선정된 25개의 입력 변수가 통계적으로 유의한지를 검증한다. 즉,

$$\begin{aligned} &\text{reject } H_0 \text{ if } p\text{-value} < \alpha, \\ &\text{accept } H_0 \text{ if } p\text{-value} \geq \alpha, \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 H_0 는 귀무가설(null hypothesis)을 나타낸다. 이 논문에서 H_0 는 $\rho=0$, 유의 수준 α 는 5%로 설정한다.

- 5단계: 4단계의 통계 분석으로 p-값이 유의 수준보다 작은 10개의 입력 변수를 최종 선정한다.

1~5단계로부터 최종 선정된 10개의 입력은 제품 두께, 폭, 성분(C, Si), 1번과 2번 단위 장력, 1번 압하율, 1번 압연하중, 5번 입측 온도, 6번 출측 폭 마진이고 신경회로망 출력은 F0 폭 마진이다.

그리고 신경회로망은 1개의 은닉층(hidden layer)과 tangential

표 2. 신경회로망의 설계 파라미터.
Table 2. Design parameters of neural network.

	Network input	Normalized input	Output
Max	25,1300,250,80,110,120,1,2500,1200,20	0.8	20
Min	1.2,650,0.5,0,20,30,0,500,800,0	-0.8	0

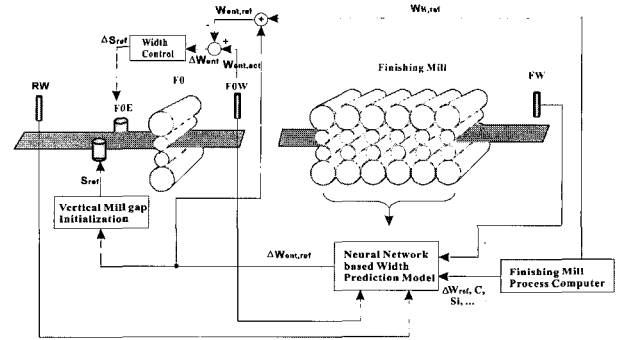


그림 5. ANWC 제어기의 구조.
Fig. 5. Structure of ANWC controller.

sigmoid 비선형 함수를 이용하여 설계한다. 또한 학습을 위한 방법은 Levenberg-Marquadt 역전파(back propagation) 알고리즘을 사용하였다. 학습된 신경회로망을 검증하기 위하여 2513개의 코일 데이터를 수집하였다. 네트워크의 설계 파라미터는 표 2와 같다.

2. ANWC 시스템 개발

그림 5는 이 논문에서 개발한 새로운 폭 제어 시스템을 나타낸다. 먼저 F0 스탠드 출측의 폭 마진을 측정하기 위하여 폭 계측기(F0W)를 설치하였다. 설치된 폭 계측기는 CCD 2030 스테레오 카메라 형태로써 압연 판의 폭 뿐 아니라, 오프 센터량(off-center)도 측정 가능하다.

그림 5에서 새로운 제어기의 기본 알고리즘은 먼저, 사상압연 구간의 폭 변동량을 신경회로망 모델로부터 예측하여, 사상압연 입측의 폭 마진 설정값을 연산한다. 설정된 값을 이용하여, 사상압연 입측에 설치되어 있는 수직 압연기(F0E)의 갭을 설정하고, 폭 변동량은 압연 판의 길이 방향으로 제어하여 폭 변동량을 수정하게 된다.

그림 5의 'Vertical mill gap initialization' 블럭의 알고리즘은 다음과 같다. 먼저, 사상압연 입측 절대 폭 설정값($W_{ent,ref}$)을 다음 식으로부터 연산한다.

$$W_{ent,ref} = W_{H,ref} + \Delta W_{ent,ref} \quad (14)$$

여기서 $\Delta W_{ent,ref}$ 는 신경회로망으로 예측한 사상압연 입측 폭 마진, $W_{H,ref}$ 는 제품 폭을 각각 나타낸다. 다음에 F0 스탠드에서의 폭 퍼짐량을 계산하고, F0E와 F0 스탠드에서의 폭 설정값(W_{F0E})을 다음과 같이 연산한다.

$$W_{F0E} = W_{ent,ref} - W_{F0} \quad (15)$$

수직 압연기(F0E)의 갭 설정값(S_{ref})은 다음과 같다.

$$S_{ref} = W_{F0E} - \frac{P_{F0E}}{M_{F0E}} \quad (16)$$

여기서 P_{FOE}/M_{FOE} 는 수직 압연기의 겹 편차를 나타내고 이는 압연 롤이 강체(rigid body)가 아닌 변형체 임으로 해서 발생하는 편차이다.

이와 유사하게, 그림 5의 'width control' 블록의 제어량도 다음 식으로부터 연산된다.

$$\Delta S_{ref} = \Delta W_{ent} - \frac{\Delta P_{FOE}}{M_{FOE}}, \quad (17)$$

$$\Delta W_{ent} = W_{ent,act} - W_{ent,ref}, \quad (18)$$

여기서 $W_{ent,act}$ 는 폭 계측기(FOW)에서 계측한 실측 폭이다.

IV. 사상압연 루퍼 시스템의 퍼지-PID 제어기 설계

이 장에서는 압연 판의 선단부에서 루퍼 응답성을 향상시켜 품질 정도를 향상 시킬 수 있는 퍼지-PID 제어기를 설계하였다.

1. 제어기의 기본 구조

퍼지 PID 제어기는 일반적으로 두 가지의 제어기, 즉, PID 제어기와 PID 제어기의 제어 게인들을 구하는 퍼지 제어기로 구성된다[31]. 여기서 구성된 PID 제어기의 기본 구조는 (19)와 같이 주어진다.

$$u(t) = K_c \left[e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right] \quad (19)$$

여기서 K_c, T_d, T_i 는 각각 제어기의 비례 게인, 미분 시간, 적분 시간을 나타낸다.

각각의 제어 게인들은 파라미터 α 를 도입하여 다음과 같이 설계한다.

$$K_c = 5\alpha + k_u \quad (20)$$

$$T_i = 0.75 \frac{1}{1+|\alpha|} t_u, \quad T_d = 0.25T_i$$

여기서 k_u, t_u 는 각각 임계 게인, 임계 주기이다. 그림 6은 기본적인 퍼지-PID 제어기의 구조를 나타낸다.

2. 퍼지-PID 제어기 설계

퍼지-PID 제어기를 설계하기 위하여, 그림 6에서 보는 것과 같이 파라미터 α 를 각도 편차와 편차의 시간 미분치에 의해서 선정해야 한다. 제어기 설계는 다음과 같은 순서로 수행된다.

- 1단계: 루퍼 각도의 편차 $e(t)$ 와 편차의 시간 변화율 $\dot{e}(t)$ 을 각각 퍼지 변수인 E 와 R 로 퍼지화한다. 이때 E 와 R 은 각각 다음 식과 같이 7개의 다른 퍼지 집합으로 나타낼 수 있다.

$$E = \{NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL\} \quad (21)$$

$$R = \{NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL\}$$

여기서 NL 은 Negative Large, NM 은 Negative Medium, NS 는 Negative Small, ZO 는 Zero, PL 은 Positive Large, PM 은 Positive Medium, PS 는 Positive Small을 각각 나타낸다. 그림 7은 루퍼 각도의 편차와 편차의 시간 변화율에 대한 퍼지 추론장치(fuzzy inference engine)의 멤버쉽 함수(membership function)를

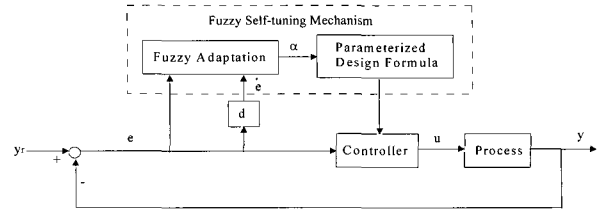


그림 6. 퍼지-PID 제어기의 구조.
Fig. 6. Basic structure of the fuzzy PID controller.

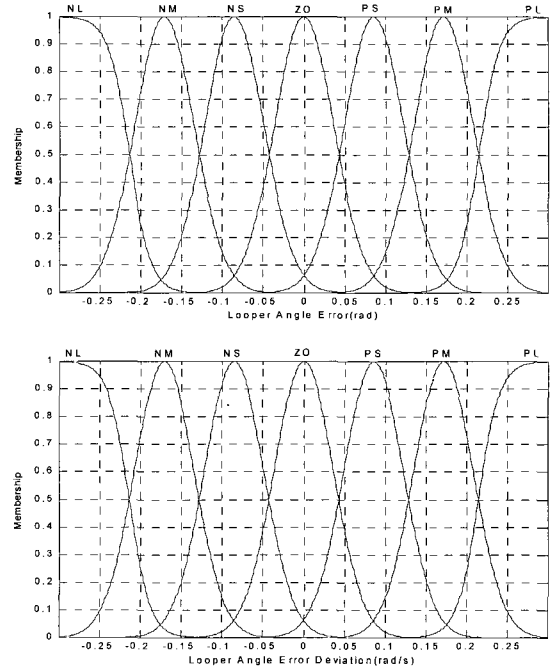


그림 7. 퍼지 멤버쉽 함수.
Fig. 7. Fuzzy membership function.

표 3. 퍼지 변수 Mapping을 위한 퍼지 룰.

Table 3. Fuzzy control rules for mapping of the variables.

E \ R	NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NM	NM	NS	NS	ZO
NM	NL	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PL
PL	ZO	PS	PS	PM	PM	PL	PL

도시하였다.

- 2단계: 표 3은 퍼지 변수 E 와 R 로부터 또 다른 퍼지 변수 H 로 사상(map)하기 위한 퍼지 룰이다. 여기서 H 는 다음과 같은 7개의 퍼지 집합으로 구성된다.

$$H = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\} \quad (22)$$

- 3단계: 퍼지 제어기 설계의 마지막으로 퍼지 변수 H 로부터 비퍼지화(defuzzification) 방법을 통해서 $h(t)$ 를 구한다.

비퍼지화 방법으로서 무게 중심법(center of gravity method)을 사용하였으며, $h(t)$ 가 구해지면 α 는 다음 식과 같은 회귀식으로 구해진다.

$$\alpha(t+1) = \kappa \cdot \alpha(t) + \lambda \cdot h(t), \text{ for all } \alpha \quad (23)$$

여기서 κ 와 λ 는 양의 상수이며 1보다 작은 값으로 적절하게 선정된다. 위의 식에서 $h(t)$ 가 -3에서 3까지 한정(bound)되고 0으로 수렴하는 값이므로 α 도 [-3 3]의 범위 내에서 0으로 수렴하는 값이다. 따라서 PID 제어기의 파라미터들은 평활(smooth)하고 한정된 값을 가진다.

V. 모의실험 및 온라인 테스트 결과

이 장에서는 3장의 ANWC 제어기에 대한 포스코 포항 1열연 공장 온라인 테스트 결과와 4장의 퍼지-PID 제어기에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 고찰한다.

1. ANWC 제어기의 온라인 테스트 결과

1.1 신경회로망 예측 정도 테스트

신경회로망에 근거한 폭 변동 예측 모델의 정도를 분석하기 위하여 1258개의 테스트 코일 데이터를 수집하였다. 표 4는 모델의 정도를 나타낸다. 모델에 의한 폭 마진 예측치와 실제 측정된 폭 마진 사이의 오차가 2mm 이내에 85% 정도의 신뢰도를 가지며, 오차의 표준 편차는 1.69mm로 적용 전의 1.8mm 보다 줄었으며, 이는 폭 예측 모델의 신뢰도가 향상되었음을 나타내고 있다.

1.2 ANWC 제어기의 온라인 테스트

그림 8은 신경회로망 기반 폭 예측 모델을 이용한 ANWC 제어기의 온라인 테스트 결과이다. 그림에서 사상압연 입측에서 측정된 평균 폭 마진('F0W dev.'로 표시)은 10.3mm이고, 모델에 의하여 예측된 F0 폭 마진('F0W set')의 평균은 11mm이다. 약 9초에서, 측정된 F0 폭 마진이 예측된 폭 마진보다 작기 때문에 수직 압연기에 의한 폭 제어('F0E compen') 효과

표 4. 폭 예측 모델의 정도.

Table 4. Performance of the predicted model.

예측 오차[mm]	모든 강종			Stainless 코일		
	<1	<1.5	<2	<1	<1.5	<2
적중율[%]	42.3	62	77.3	45	60	85

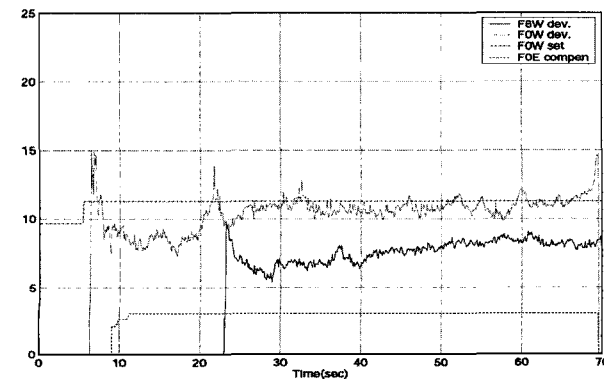


그림 8. ANWC 시스템의 온라인 테스트 결과.

Fig. 8. Test result of the ANWC system.

표 5. 시뮬레이션 조건.

Table 5. Simulation conditions.

조건	Stand	i	i+1
출측 두께[mm]		16.31	9.35
롤 속도[mpm]		330	350
출측 폭[mm]		1240	1240
루퍼 각도[degree]		20	
단위 장력[kg/mm ²]		0.4	

는 약 17초쯤에 나타나고 F0 실측 폭 마진은 그 시점에서 회복되고 있는 것을 볼 수 있다. 수직 압연기의 롤 갭 명령치와 실측치가 차이가 나는 것은 압연기와 폭 계측기 사이의 거리(F0E-F0W: 7m)와 수직 압연기의 응답 지연(delay time: 1.5sec) 때문이다. F6 폭 마진('F6W dev.')은 ANWC 제어에 의하여 목표 폭 마진(7mm)로 수렴하는 것을 알 수 있다.

78 코일의 온라인 현장 테스트를 통하여, 폭 마진의 평균은 8.2mm에서 7.7mm로 6.1% 줄었으며, 표준 편차는 1.6mm에서 1.4mm로 12.5% 줄었다. 폭 마진의 평균과 표준 편차는 압연 판의 사이드 트리밍(side trimming)량과 압연 판의 품질에 각각 관계가 있다. 온라인 테스트 결과 사이드 트리밍량이 크게 줄었으며 품질도 향상되었다.

2. 퍼지-PID 제어기의 모의실험 결과

본 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 4장에서 설계한 루퍼 시스템에 퍼지-PID를 적용한 결과를 설명하고 그 결과를 고찰한다. 시뮬레이션에 사용된 주요 압연 조건은 표 5와 같다.

그림 9는 기존의 PID 제어를 사용한 경우와 본 논문에서 설계한 퍼지-PID 제어를 사용한 두 가지 경우에 대한 루퍼 각도의 시간 응답을 도시한 것이다. 루퍼는 20도를 목표 각도로 하고 있으며, 기존의 PID 제어기 보다 퍼지-PID는 초기에 각도 편차가 큰 경우, 제어 파라미터를 크게 변경하여 초기 상승시간이 줄었으며(1.2초→0.5초), 오버 슈트의 양도 40% 정도 줄었다.

그림 10은 단위 장력의 시간 응답을 도시한 것이다. 퍼지-PID의 경우에는 기존의 제어기에 비해서 초기에 약 0.2 kg/mm² 정도의 과장력이 발생하고 있으나 이는 루퍼의 기동이 빨라서 압연판과 접촉하는 시간이 빠르기 때문에 초기에 큰 장력이 인가된 것으로 보인다. 기존 PID의 경우에는 루퍼가 어느 정도 발생(여기서는 약 25도 정도의 루퍼) 이후에 장력이 발생되며, 이때는 장력이 어느 정도 풀린 시간이므로 장력의 크기가 작다. 그러나 기존 제어기의 경우에는 루퍼가 압연판과 접촉한 이후에 장력의 변동이 오랫동안 지속되는 것을 볼 수 있다.

그림 11은 퍼지-PID 제어기 설계시의 루퍼 각도 편차, 각도편차의 시간 변화율 및 $h(t)$ 를 도시한 것이다. 루퍼 각도가 패스 라인(path line) 아래에 위치해 있을 때에는 루퍼가 압연판과 분리되어 있어서 루퍼 제어 및 장력제어의 효과가 없기 때문에 제어기 설계 시에는 루퍼가 패스 라인 위쪽에 있는 경우에만 제어기를 설계하였다. 따라서 약 0.25초까지는 각도 편차가 검출되지 않는다. 비퍼지화 방법으로 구한 $h(t)$ 는 [-3 3]의 범위 내에서 각도 편차와 편차의 시간 변화율을 줄

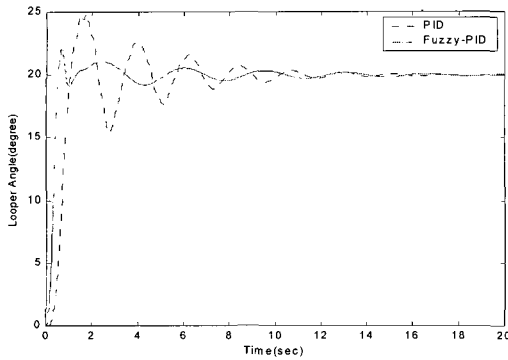


그림 9. 루퍼 각도의 시간 응답.
Fig. 9. Time response of looper angle.

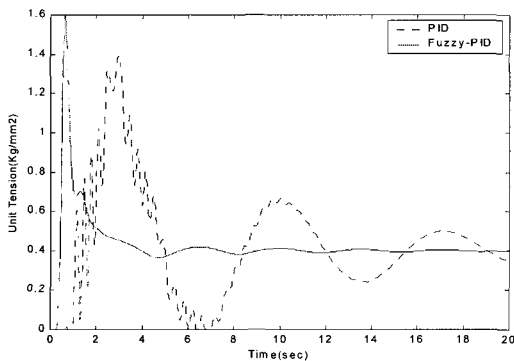


그림 10. 단위 장력의 시간응답.
Fig. 10. Time response of unit tension.

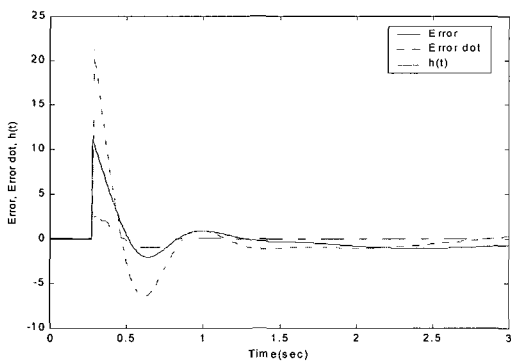


그림 11. $e(t)$, $\dot{e}(t)$, $h(t)$ 의 시간응답.
Fig. 11. Time response of $e(t)$, $\dot{e}(t)$ and $h(t)$.

이기 위하여 제어되고 있으며, 정상 상태에 도달하면 거의 0으로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

VI. 결론

이 논문에서는 사상압연기에서의 폭 제어 성능을 향상시키기 위하여 신경회로망에 근거한 사상압연 입측 ANWC (Automatic Neural network based Width Control) 제어기와 루퍼 퍼지-PID 제어기를 설계하여 포스코 포항 1열연 공장에 적용하고, 모의 실험을 실시하였다.

ANWC 제어기는 사상압연 입측의 측정된 폭과 목표 폭과

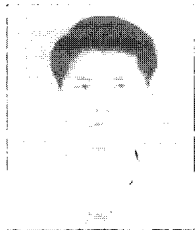
의 오차를 최소로 하기 위하여 제안되었으며, 신경회로망을 이용한 폭 변동 예측 모델을 근거로 설계되었다. 다수의 공정 변수로부터 신경회로망 입력을 선정하기 위하여 통계적인 기법이 사용되었으며, 체계적인 입력 선정 기법을 제안하였다. 퍼지-PID 제어기는 압연 판의 선단부에 루퍼 시스템의 응답성을 높임으로써 선단부의 장력 변동을 줄이고, 폭 제어 성능을 향상 시킬 수 있었다.

특히 ANWC 제어기에 대한 현장 테스트 결과, 폭 마진의 평균과 표준 편차가 각각 6.1%, 12.5% 감소함을 확인 하였다.

참고문헌

- [1] T. Shibahara, "Edger set-up model at roughing train in hot strip mill," *ISIJ*, vol. 67, no. 15, pp. 2509-2515, 1981.
- [2] T. Sasaki, "Mathematical model of width change in the hot strip finishing train," *CAMP-ISIJ*, vol. 9, pp. 304-307, 1996.
- [3] K. Yamada, S. Ogawa, and M. Ataka, "Three dimensional analysis of at rolling using rigid-plastic finite element method coupled with roll deformation analysis," *NUMIFORM92*, pp. 755-760, 1992.
- [4] Isii, "Analysis of width deviation for hot strip finishing mill," *Japan Society for Technology of Plasticity*, pp. 219-222, 1992.
- [5] C. J. Park and D. M. Lee, "Input selection technology of neural network and its application for hot strip mill," *IFAC World Congress*, 2005.
- [6] A. Hacquin and P. Montmitonnet, "Coupling of roll and strip deformation in three-dimensional simulation of hot rolling," *Simulation of Mat. Proc.*, pp. 921-927, 1995.
- [7] A. Helmi and J. Alexander, "Geometric factors affecting spread in hot at rolling of steel," *JISI*, no. 206, pp. 1110-1117, 1968.
- [8] A. Ishii, "Variation of strip width during hot finishing rolling," *CAMP-ISIJ*, vol. 9, pp. 300-303, 1996.
- [9] J. Price, "The hot strip mill looper system," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-9, no. 5, pp. 556-562, 1973.
- [10] A. Mizuta, H. Ibata, Y. Yamamoto, S. Saito, S. Honda, and M. Kitamura, "Control method and its performance," *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 26, p. B21, 1986.
- [11] D. A. Davies, "Application of hydraulic agc and width control to a hot strip mill," *Iron and Steel Engineer*, vol. 66, no. 8, pp. 39-44, 1989.
- [12] Anon, "A new roll force awc system for roughing train in hot strip mill," *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 27, no. 12, p. 993, 1987.
- [13] S. Nakamura, M. Takahashi, and Y. Chida, "Slab width control for hot direct rolling," *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 28, pp. 110-116, 1988.
- [14] H. Yoneda, "Development of accurate width control technology in hot strip finishing mill," *CAMP-ISIJ*, vol. 9, pp. 312-315, 1996.
- [15] T. Ogura, "Advanced width control for hot finishing mill," *CAMP-ISIJ*, vol. 9, p. 324, 1996.
- [16] S. Murata, "Development of width control technology in finishing line of hot strip mill," *CAMP-ISIJ*, vol. 9, pp. 308-311, 1996.
- [17] H. Senda, "Development of the width control system in no.3 hot strip mill at Chiba Works," *CAMP-ISIJ*, vol. 11, p. 356, 1998.
- [18] T. Takahara, "Improvement of width accuracy in Fukuyama

- no.1 hot strip mill," *CAMPISIJ*, vol. 10, p. 391, 1997.
- [19] JISF, *The theory and practice of the steel rolling*. JISF, 1983.
- [20] S. Kunitatsu, T. Fujii, and T. Tsujino, "Quadratic stabilization of ILQ servo systems with generalized reference inputs," *T. SICE*, vol. 39, no. 3, pp. 307-309, 2003.
- [21] H. Imanari, Y. Morimatsu, K. Sekiguchi, H. Ezure, R. Matuoka, A. Tokuda, and H. Otobe, "Looper H-Infinity control for hot-strip mills," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 3, pp. 790-796, 1997.
- [22] J. W. Lee, W. H. Kwon, and J. H. Choi, "On stability of constrained receding horizon control with finite terminal weighting matrix," *Automatica*, vol. 34, no. 12, pp. 1607-1612, 1998.
- [23] D. Yu, J. Gomm, and D. Williams, "Neural model input selection for a mimo chemical process," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 13, pp. 15-23, 2000.
- [24] W. Wu and D. Massart, "Artificial neural networks in classification of NIR spectral data : Selection of the input," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 35, pp. 127-135, 1996.
- [25] A. Back and T. Trappenberg, "Selecting inputs for modeling using normalized higher order statistics and independent component analysis," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 12, no. 3, pp. 612-617, 2001.
- [26] C. Ledoux and J. Grandin, "Two original weight pruning methods based on statistical tests and rounding techniques," *IEE Proc. Vision, Image Signal Process*, vol. 141, no. 4, pp. 230-236, 1994.
- [27] R. Reed, "Pruning algorithms: a survey," *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 4, no. 5, pp. 740-747, 1993.
- [28] J. Luo, B. Hu, X. Ling, and R. Liu, "Principal independent component analysis," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 10, no. 4, pp. 912-917, 1999.
- [29] N. Kambhatla and T. Leen, "Dimension reduction by local principal component analysis," *Neural Comput.*, vol. 9, no. 7, pp. 1493-1516, 1997.
- [30] S. Ross, *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, Academic Press, 2000.
- [31] S. Z. He, "Fuzzy self-tuning of PID controller," *Fuzzy Sets and Systems*, pp. 37-46, 1993.



박철재

1992년 부산대학교 정밀기계공학과 졸업(공학사). 1994년 동 대학원 졸업(공학석사). 2003년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부(박사과정). 1994년~현재 포스코 기술연구소 책임연구원. 관심분야는 모델예측제어, 견실제어, 프로세스

규명 및 제어.



황이철

1961년 10월생. 1987년 부산대학교 기계설계공학과 졸업(공학사). 1991년 동 대학원 졸업(공학석사). 1996년 오사카대 전자제어기계공학과 졸업(공학박사). 1987년~1988년 삼성중공업 근무. 1996년~1998년 부산대학교 기계공학부

국책 교수 근무. 1998년~현재 동의대학교 메카트로닉스공학과 부교수. 관심분야는 프로세스 및 시스템 규명, 견실 제어이론 및 응용.