

CCD 폭 측정 시스템 및 퍼지 PID를 이용한 CFWC 제어기 설계

CFWC Scheme for Width Control using CCD Measurement System and Fuzzy PID Controller in Hot Strip Mills

박 철 재*
(Cheol Jae Park¹)

¹School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu University

Abstract: In this paper, we propose a CFWC (CCD and fuzzy PID based width control) scheme to obtain the desired delivery width margin of a vertical rolling mill in hot strip process. A WMS(width measurement system) is composed of two line scan cameras, an edge detection algorithm, a glitch filter, and so on. A dynamic model of the mill is derived from a gauge meter equation in order to design the fuzzy PID controller. The controller is a self-learning structure to select the PID gains from the error and error rate of the width margin. The effectiveness of the proposed CFWC is verified from simulation results under a width disturbance of the entry in the mill. Using a field test, we show that the performance of the width control is improved by the proposed control scheme.

Keywords: hot strip mills, vertical rolling mill, CCD camera, dynamic model, fuzzy PID, width margin control, roughing mill, edge detection, edger control

1. 서론

최근 강판의 압연에 있어서 최신 기술들이 개발되어 생산성이나 치수, 형상 등과 같은 품질이 크게 향상되었고 제조 가능한 범위도 확대되었다. 열간압연에서의 품질 제어도 강판의 길이 방향으로 두께와 폭을 균일하게 제어하는 치수제어에서 평탄도, 판 크라운 제어 및 평면 형상제어까지 확대되었다[1,2].

열간압연에서 강판의 폭은 그림 1에서 보는 것과 같이 제품 폭, 강판 내의 폭 마진 평균(mean of width margin), 강판 간의 폭 마진 평균의 편차로 관리한다. 강판 내의 폭 마진을 설정하는 이유는 압연에서 장력이나 압연 조건 등의 변동으로 폭 불량(width shrinkage)이 발생할 가능성이 있기 때문이다. 보통 열간압연에서는 폭 마진을 7mm 정도로 설정하고 있으며, 고객은 마진을 절단(trim)하고 사용하므로 폭 마진이 클수록 생산량은 떨어진다[3].

열간압연에서 강판의 폭은 조압연(roughing mill), F0 압연, 마무리 압연(finishing mill) 순서로 압연된다. 폭 측정 시스템(WMS: Width Measurement System)은 조압연 출측, 마무리 압연 출측에 각각 설치되어 있다. 조압연에서는 목표 폭 마진을 제어하기 위하여 AWC (Automatic Width Control)가 설치되어 피드포워드 AWC, 피드백 AWC, 압연 하중을 이용한 폭 제어(roll force AWC) 등의 제어가 실시

된다. F0 압연은 강판의 폭 압연을 위한 수직 압연기인 F0 엣저(edger), 두께 압연을 위한 수평 압연기로 나눌 수 있다. 일반적으로 마무리 압연 공정에서의 폭 변동은 조압연에 비해서 무시할 수 있기 때문에 마무리 압연의 입측 폭과 제품 폭이 같다고 가정한다. 이와 같은 가정으로 F0 압연기에서 수평압연 시 폭 퍼짐량을 예측하여 폭 변동이 없도록 F0 엣저에서 폭을 압연한다[4]. 그러나 F0 압연기의 폭 퍼짐량을 정확하게 예측하기 어렵다. 이는 롤 갭과 압연 하중을 설정하는 모델이 외란의 영향을 많이 받고, 모델에서 고려할 수 없는 인자들이 너무 많기 때문이다. 더욱 중요한 이유는 F0 압연기의 출측 폭을 측정하는 계측기가 없기 때문에 마무리 압연 입측의 폭도 알 수 없다. 따라서 F0 압연 공정에서 정확한 폭을 측정할 수 있는 WMS는 열간압연의 폭 마진을 제어하는데 반드시 필요하다고 할 수 있다. 열간압연에서 WMS는 CCD 카메라가 많이 사용된다. F0 압연에서 CCD 카메라를 이용할 때 중요한 것은 제철소

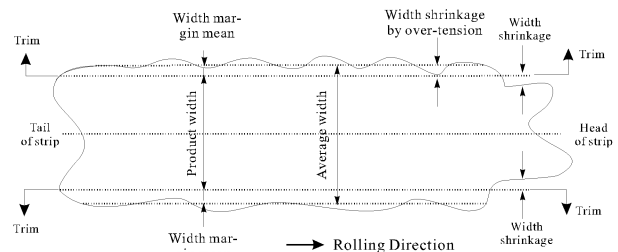


그림 1. 열간 마무리 압연 후의 강판의 평면도.
Fig. 1. Plan view of hot strip after finishing mill.

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received August 20, 2013 / revised September 15, 2013 / accepted October 4, 2013

박철재: 대구대학교 기계자동차공학부(cjpark@daegu.ac.kr)

※ 이 논문은 2011학년도 대구대학교 학술연구비지원에 의한 논문임.

의 환경과 에지 검출이다. 압연 공정에서의 수증기, 냉각수, 진동 등의 주위 환경은 에지를 검출하는데 잡음으로 작용할 수 있으므로 적절한 필터링이 필요하다.

열간압연에서 폭 마진을 제어하기 위한 연구는 조압연과 마무리 압연에서 진행되고 있다. 조압연에서는 RSU (Roughing Mill Setup)에 의하여 정확한 롤 갭, 압연하중, 온도를 예측할 수 있는 모델을 개발하고 있다[5-8]. 기본적인 접근은 힘의 평형 조건으로부터 상미분 방정식을 재료의 항복조건식과 계면의 마찰조건을 연결해서 특정한 경계조건을 이용하여 수치 계산하여 모델의 정도를 높이고 있다. 조압연에서 강판의 길이 방향으로 폭을 제어하는 방법으로는 폭 예측 모델을 이용하는 피드포워드 AWC, 조압연 출측의 WMS를 이용하는 피드백 AWC가 있다[9,10]. 또한 조압연의 스킵드 마크에 의한 강판의 가공경화가 온도 외란으로 작용하는 문제를 해결하기 위한 제어도 진행되고 있다[11]. 마무리 압연에서 폭은 주로 압연 스탠드 간의 루퍼(looper)에 의한 장력을 이용하여 간접적으로 제어된다[12-14]. 종래에는 루퍼 각도에 의하여 장력을 제어하는 방법이였으나 최근에는 루퍼 각도와 장력을 독립적으로 제어하는 비간접 제어가 주로 실시된다. 또한 루퍼에 작용하는 토크 모델의 정도를 향상시켜서 모델 예측제어(MPC), ILQ, CDM 등의 제어 방법이 적용되고 있다[15-17]. 그러나 기존의 연구들은 다음과 같은 문제점이 있다. 첫째, 기존에는 조압연과 마무리 압연 각각의 공정에서 폭을 제어하기 때문에 조압연에서 폭이 변동하더라도 마무리 압연에서는 그 영향을 고려할 수 없었다. 둘째, 마무리 압연 입측에 폭 측정 시스템의 부재로 입측 폭에 대한 정확한 정보를 알 수 없어서 폭 모델의 정도에만 의존한다는 문제점이 있다.

본 논문에서 수행한 연구 내용은 크게 두 가지로 대별된다. 첫째, 마무리 압연 입측 폭의 정확한 정보를 알기 위하여 CCD를 이용하는 폭 측정 시스템을 개발한다. 이를 위하여 열간압연 공정의 폭 측정 신호의 필터링 방법과 에지를 검출하는 방법에 대하여 서술한다. 둘째, CCD를 이용하여 측정된 마무리 압연 입측 폭과 조압연 출측 폭을 이용하여 퍼지 PID 제어를 개발하여 F0 엣지의 폭 제어 알고리즘(CFWC: CCD and fuzzy PID based width control)을 개발하는 것이다. 개발된 제어 알고리즘을 바탕으로 시뮬레이터를 개발하고 시뮬레이션 결과를 바탕으로 열간압연 공장에서 온라인으로 테스트하여 알고리즘의 정당성을 분석한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 제어대상 프로세스에 대하여 설명하고 폭 제어의 문제점들을 서술한다. III 장에서는 CCD 폭 측정 시스템과 필터링 방법 및 에지 검출 방법에 대하여 서술한다. IV 장에서는 퍼지 PID 제어를 이용한 CFWC 제어 모델을 도출하고 제어를 설계한다. V 장에서는 개발된 CFWC 제어를 현장과 같은 조건에서 시뮬레이션하고, 그 결과를 바탕으로 실시한 온라인 테스트 결과를 분석한다. 이 논문의 결론은 VI 장에서 요약한다.

II. 제어대상 프로세스와 폭 제어 문제

1. 제어대상 프로세스

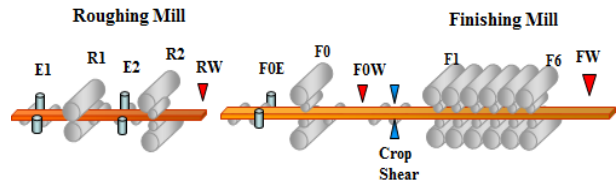


그림 2. 열간압연 조압연, F0 및 마무리 압연.

Fig. 2. Roughing, F0 and finishing mill of hot strip mills.

그림 2는 제어대상 프로세스인 열간압연 공정을 나타낸다. 열간압연 공정은 크게 조압연과 F0 압연 및 마무리 압연으로 나눌 수 있다. 조압연에서는 주로 강판의 폭을 압연하여 일정한 폭으로 생산할 수 있도록 하며, 2개의 수직 압연기(E1, E2)와 2개의 수평 압연기(R1, R2)로 구성되어 있다. 수직 압연기에는 압연 하중을 이용하여 폭을 제어하기 위한 압연 하중 AWC 및 조압연 출측 폭계(RW)를 이용한 피드백 AWC로 구성된다. 수평 압연기에서는 폭 퍼짐이 있으며 이를 예측하기 위한 폭 퍼짐 예측모델에 대한 연구가 진행되고 있다[5].

F0 압연은 마무리 압연 입측에서 폭을 수직 압연하기 위한 F0 엣지(F0E: F0 edger)와 길이 방향으로 압연하기 위한 수평 압연기(F0 압연기)가 있다. F0 압연에서는 주로 마무리 압연기와의 장력 제어를 통하여 압연 강판의 직진성을 양호하게 하여 안정적인 압연이 가능하도록 한다. 그림에서 F0W(F0 WMS)는 본 연구에서 개발한 WMS가 설치된 위치이며 마무리 압연기의 입측에 설치되어 정확한 폭 제어를 가능하게 한다.

마무리 압연기는 보통 6~7개의 압연기로 구성되며 정밀한 제품을 생산하기 위한 두께, 폭 및 형상제어기가 설치되어 있다. 압연기 간에 설치된 루퍼는 강판의 높이 및 장력을 제어하며 강판의 직진성을 좋게하고 압연에 의한 강판의 버퍼링 역할을 담당한다. 마무리 압연기의 출측에는 FW(F6 WMS)라고 하는 WMS가 설치되어 있다.

2. 기존 폭 제어의 문제점

기존의 공정에서는 RSU에서 RW 목표 폭, FSU (Finishing Mill Setup)에서 FW 목표 폭을 각각 설정한다. 그러나 조압연에서 AWC를 이용하여 RW를 정밀하게 제어한다 하더라도 F0 압연기에서 수직 및 수평 압연에 의해 강판이 압연될 때 정밀 제어가 되지 않으면 제품 폭은 불량일 수도 있다. 이는 기존의 공정에서는 F0W가 설치되어 있지 않아 그림 2의 F0W를 정확하게 측정하기 어렵기 때문이다.

그림 3은 기존의 폭 제어에 의한 폭 마진 불량 데이터를 나타낸다. 그림의 점선은 RW 폭 마진, 실선은 FW 폭 마진을 각각 나타낸다. 조압연은 강판의 길이가 약 10m 이고, 마무리 압연은 약 1km 이기 때문에 데이터의 개수가 차이가 있다. 그림에서 조압연 폭 마진의 평균과 표준편차는 각각 18mm, 0.84mm 이고, 마무리 압연의 경우에는 16mm, 1.3mm 이다. 즉, 강판의 길이 방향으로 조압연 출측에서는 0.84mm의 편차로 폭 제어가 실시되어 마진이 양호하였으나 마무리 압연 입측에서는 정확한 폭 마진을 알 수 없다. 이로 인하여 마무리 압연에서 폭 마진 편차가 1.3mm로 약

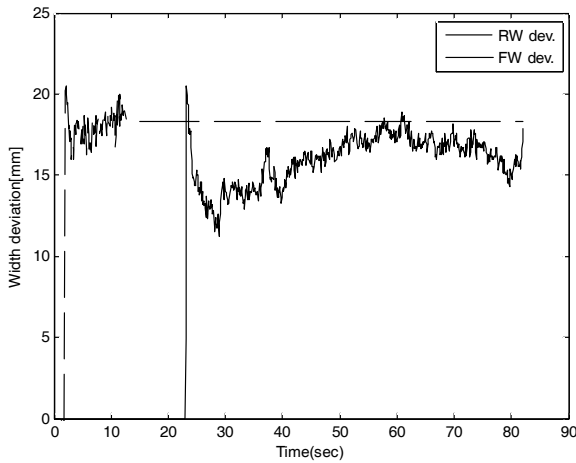


그림 3. 기존의 폭 제어에 의한 폭 마진 불량.

Fig. 3. Problem of width margin by conventional control.

35.3% 정도 폭 마진 편차가 증가하였으며, 이로 인하여 생산성이 크게 떨어지는 문제가 발생한다.

이상과 같은 문제점으로부터 마무리 압연에서 강판의 폭 제어를 위해서는 마무리 압연 입측의 폭 제어가 중요하며 이를 위한 WMS 및 제어 방법의 개발이 필요하다는 것을 알 수 있다.

III. CCD 폭 측정 시스템 개발

1. WMS 개요

본 연구에서는 열악한 환경에서 연속적으로 강판의 폭을 측정하도록 CCD 스테레오 WMS를 개발하였다. 측정 가능한 강판의 폭 정밀도는 $\pm 0.5\text{mm}$, 최대 측정 폭은 2400mm이며 실시간으로 온라인 측정한다. 강판의 영상은 고정도 렌즈와 필터를 구비한 두 개의 CCD를 통해 획득하며 각각의 CCD는 강판의 폭 방향으로 라인 스캔된 파형을 출력한다. 이러한 파형으로부터 엣지 추출 알고리즘을 통해 강판의

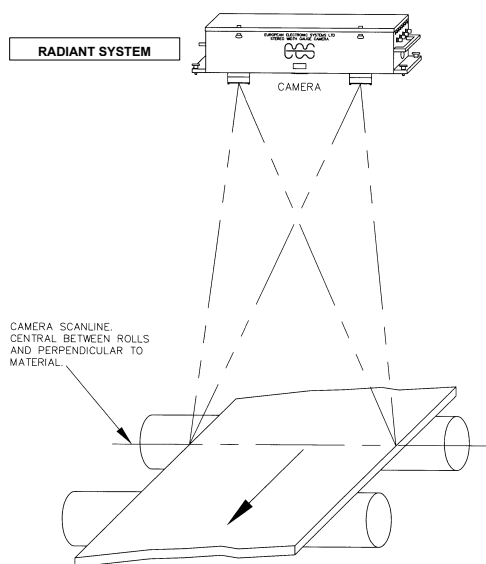


그림 4. CCD 카메라 어셈블리 위치.

Fig. 4. Position of camera assembly for CCD.

좌측 엣지와 우측 엣지의 위치를 추출한다. 그림 4는 카메라 어셈블리와 강판을 나타내고 있다.

본 카메라의 프로세서 캐비닛은 WMS의 제어와 모니터링을 위해 설치하였으며, 제어와 모니터링 패널, 프로세서 카드 랙, 서킷 브레이크 패널, 외부 통신 패널 등으로 구성되어 있다.

WMS는 옵티컬 베드(optical bed), 카메라 전자장치, 카메라 전원, 내부 냉각판 등으로 구성되어 있다. 옵티컬 베드는 Delsa에서 제조한 두 개의 CCD 라인 스캔 카메라로 구성되어 있다. 각각은 2048개의 어레이를 가지고 있으며 각 어레이는 4MHz의 8비트 디지털 데이터를 생성한다. 각각의 라인 스캔 카메라는 옵티컬 베드에 정확하게 정렬, 보정되어 장착되며 베드 내의 온도 측정을 위한 센서도 별도로 부착되어 있다. 카메라 전자장치는 Delsa 카메라 유닛과 캐비닛간의 인터페이스를 수행하는 카메라 인터페이스 PCB를 포함한다. 카메라 인터페이스 PCB는 카메라 데이터 신호, 제어 신호 및 파워 신호를 조작한다.

2. 엣지 추출 알고리즘

강판으로부터 입력된 영상은 밝기에 따라 CCD 카메라에 의해 1바이트의 빛의 강도 정보(light intensity)로 변환되며, 이는 0-255의 범위를 갖게 된다. 또한 CCD 카메라는 0-2047의 총 2048개의 픽셀을 가지고 있다.

강판의 좌측 또는 우측 엣지의 정확한 위치를 추출하기 위해 강도 정보 값의 최대 변화량을 가지는 부분을 엣지로 인식한다(그림 5). 강판의 자발광으로부터 엣지를 추출하는 열간 압연의 경우 좌측 엣지의 강도 변화량은 양의 값을 가지며, 우측 엣지의 강도 변화량은 음의 값을 가지게 된다.

엣지 추출 프로세스가 시작되면 관심영역(AOI: Area Of Interest)의 추출을 시작한다. 관심영역은 파라미터 설정 화면으로부터 설정된 스트레스홀드 값(threshold factor of AOI)에 의해 추출된다. 이렇게 추출된 AOI의 교차점(AOI crossing)은 정확한 엣지 추출을 위한 출발점이 된다. 다음으로 AOI의 교차점으로부터 엣지 영역(AOI to edge offset)

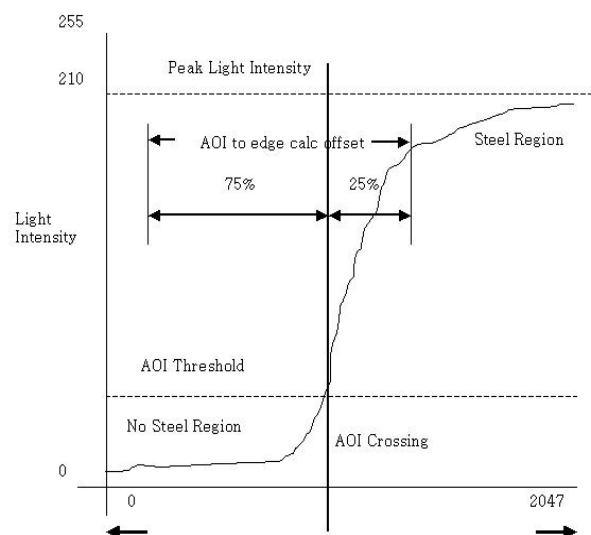


그림 5. 엣지 추출 알고리즘.

Fig. 5. Algorithm of edge detection in WMS.

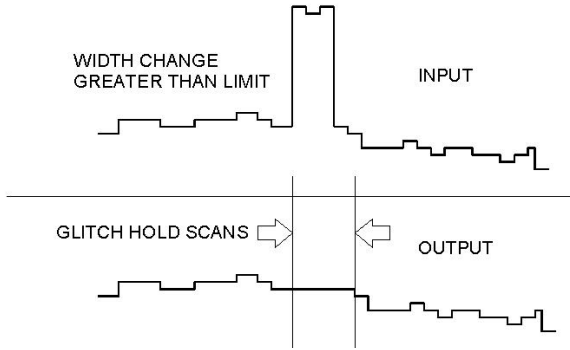


그림 6. Glitch 필터의 노이즈 보상.
Fig. 6. Compensation of noise for glitch filter.

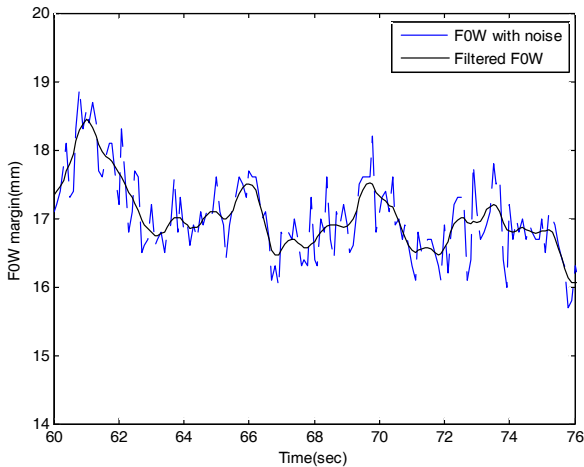


그림 7. Glitch 필터의 필터링 결과.
Fig. 7. Result of filtering using glitch filter.

만큼 이동된 픽셀의 위치에 대해 밝기 값의 변화율을 얻는다. 이러한 변화율은 ΔX 로 설정된 픽셀 거리에 대해 밝기 값의 차이로 결정되며 읍셋 영역 전체에 대해 ΔX 만큼 이동시켜 가며 각 픽셀에 대한 변화율을 구한 후 가장 큰 변화율 값을 가진 픽셀을 엡지점으로 판단한다.

3. 폭 측정 신호의 필터링

열간 압연에서 폭 측정 시 센서 자체의 노이즈와 주변 환경의 불균일성 등의 영향이 크기 때문에 이로부터 잘못된 정보를 얻을 수 있다. 따라서 강판 폭과 중심 위치 계산을 위하여 본 연구에서는 glitch 필터를 설계하였다[18]. Glitch의 방법은 크게 이전 데이터와 비교하는 방법과 이전 데이터들의 평균과 비교하는 방법의 두 가지로 구분할 수 있으며 glitch의 크기, 최대 크기 등의 파라미터를 사전에 설정할 수 있다. 그림 6과 7은 glitch 필터의 노이즈 보상 방법과 필터링 결과를 각각 나타내었다.

IV. 퍼지 PID 폭 제어기 설계

1. 수직 압연기(FOE)의 모델링

마무리 압연의 입측에서 폭 제어를 설계하기 위하여 FOE 압연기를 모델링한다. FOE 압연기의 폭과 롤 갭은 다음과 같은 게이지미터(gaugemeter) 식으로 나타낼 수 있다[10].

$$W = S + \frac{P}{K_m} \tag{1}$$

여기서 W 는 FOE 압연기 출측 폭, S 는 압연기의 롤 갭(gap), P 는 압연 하중, K_m 은 압연기 강성(stiffness) 이다. 압연 하중은 롤 반경(R), FOE 압연기의 입측 폭(W_0) 및 출측 폭(W), 마찰계수(μ), 변형저항(a_1) 등의 함수이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = f(R, W_0, W, \mu, a_1) \tag{2}$$

열간압연의 동특성으로부터 FOE 압연기를 모델링하기 위하여 게이지미터 식 (1)의 미소 변동량을 고려한다.

$$\delta W = \delta S + \frac{\delta P}{K_m} \tag{3}$$

압연 하중 (2)의 미소 변동은 다음과 같이 된다[19].

$$\delta P = \left(\frac{\partial P}{\partial R}\right)\delta R + \left(\frac{\partial P}{\partial W_0}\right)\delta W_0 + \left(\frac{\partial P}{\partial W}\right)\delta W + \left(\frac{\partial P}{\partial \mu}\right)\delta \mu + \left(\frac{\partial P}{\partial a_1}\right)\delta a_1 \tag{4}$$

(4)를 (3)에 대입하면 다음과 같이 FOE 압연기의 동특성을 나타내는 동적 모델링을 얻을 수 있다.

$$v_s \delta S + v_R \left(\frac{\delta R}{R}\right) + v_{W_0} \left(\frac{\delta W_0}{W_0}\right) + v_\mu \left(\frac{\delta \mu}{\mu}\right) + v_{a_1} \left(\frac{\delta a_1}{a_1}\right) + v_W \left(\frac{\delta W}{W}\right) = 0 \tag{5}$$

여기서

$$v_s = \frac{K_m}{K_m - \left(\frac{\partial P}{\partial W}\right)}, v_\lambda = \frac{1}{K_m - \left(\frac{\partial P}{\partial W}\right)} \frac{\lambda}{W} \left(\frac{\partial P}{\partial \lambda}\right) \\ v_W = -1,$$

이고 λ 는 R, W_0, μ, a_1 등을 나타낸다.

2. 퍼지 PID 제어기 설계

퍼지 PID 제어기는 PID 제어 게인들을 퍼지 자기학습(self-learning) 방법으로 구한다. PID 제어기의 구조는 다음과 같다.

$$u_{PID}(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \tag{6}$$

PID 제어 게인들은 파라미터 α 를 도입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다[20].

$$K_p = 5\alpha + k_u \\ T_i = 0.75 \frac{1}{1+|\alpha|} t_u, \quad T_d = 0.25 T_i \tag{7}$$

여기서 k_u, t_u 는 각각 임계 게인, 임계 주기이다.

그림 8은 퍼지 PID 제어기의 구조를 나타낸다. RSU로부터의 폭 마진 설정값($w_{ref, fOE}$)의 오차 $e(t)$ 와 오차의 시간 변화율 $de(t)$ 로부터 PID 제어 게인들을 자기학습하며 FOE

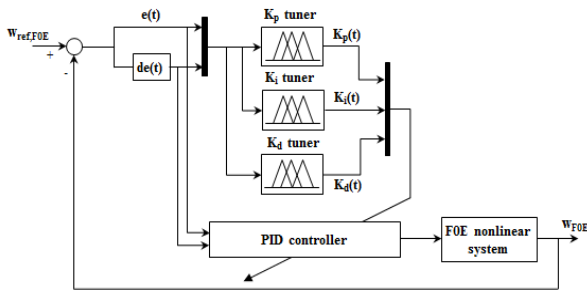


그림 8. 퍼지 PID 제어기의 구조

Fig. 8. Structure of fuzzy PID controller.

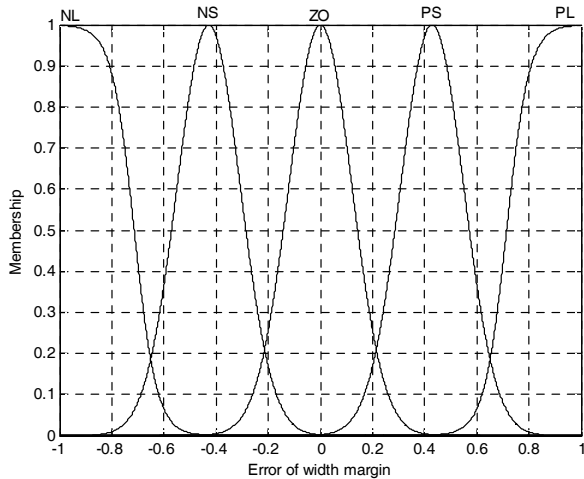


그림 9. 폭 마진 오차의 멤버쉽 함수.

Fig. 9. Membership function of width margin error.

동적 모델로 입력되는 구조이다.

제어기를 설계하기 위하여 $e(t)$ 와 $de(t)$ 를 각각 퍼지 변수인 E와 R로 퍼지화하며 다음과 같이 5개의 퍼지 집합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E &= \{NL, NS, ZO, PS, PL\} \\ R &= \{NL, NS, ZO, PS, PL\} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 NL은 negative large, NS는 negative small, ZO는 zero, PS는 positive small, PL은 positive large를 각각 나타낸다. 그림 9는 $e(t)$ 에 대한 퍼지 멤버쉽 함수를 나타낸다. $e(t)$ 의 입력은 -1~1, $de(t)$ 는 -0.2~0.2의 값을 가지며 가우시안 멤버쉽 함수의 형태이다.

퍼지 변수 E와 R로부터 출력의 퍼지 변수 H로 사상(mapping) 하기 위한 퍼지 규칙은 삼각형 형태의 멤버쉽 함수를 사용한다. 여기서 H는 -1~1의 퍼지 집합으로 구성된다.

퍼지 변수 H로부터 비퍼지화의 기법인 무게 중심법을 사용하여 $h(t)$ 를 구한다. $h(t)$ 가 구해지면 (7)식의 α 는 다음과 같은 회귀식으로부터 구할 수 있다.

$$\alpha(t+1) = \kappa \cdot \alpha(t) + \lambda \cdot h(t) \quad (9)$$

여기서 κ 와 λ 는 양의 상수이며 1보다 작은 값으로 적절히 선정된다.

그림 10은 CCD WMS와 퍼지 PID 제어기로 구성된 폭

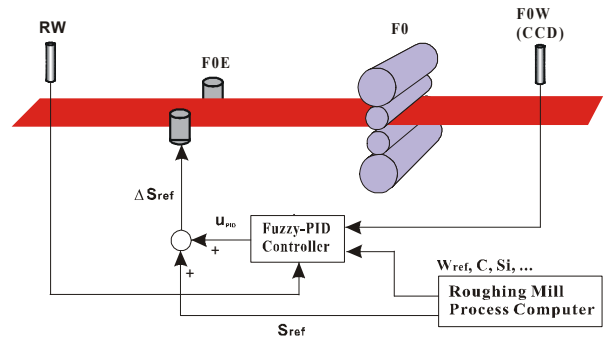


그림 10. F0E 압연기의 폭 제어 시스템의 구조

Fig. 10. Structure of width control system in F0E rolling mill.

제어 시스템을 나타낸다. 폭 제어기는 조압연 프로세스 컴퓨터에서 폭 설정값(W_{ref}) 및 탄소(C), 실리콘(Si) 함유량 등의 정보를 입력 받고, FOW, RW 등의 실측치를 수집한다. 그리고 (6)과 같이 계산된 제어 입력(u_{PID})을 이용하여 F0E 압연기의 롤 갭을 제어함으로써 폭을 정밀하게 제어할 수 있다.

V. 시뮬레이션 및 온라인 테스트

1. 퍼지 PID 제어기의 시뮬레이션

본 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 앞에서 설명한 제어기의 알고리즘을 검증하고 결과를 고찰한다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 주요 압연 조건을 나타낸다.

F0E 압연기의 입측 폭의 변동은 다음과 같이 외란(d)으로 정의한다.

$$d = d_1 + A_1 \sin 2\pi f_1(t) + A_2 \sin 2\pi f_2(t) \quad (10)$$

여기서 d_1 은 계단(step) 입력으로써 계단입력 시간은 1sec, 폭 변동량은 1mm 이다. 그리고 사인형태의 외란을 생성하기 위하여 $A_1 = 0.1\text{mm}$, $A_2 = 0.05\text{mm}$, $f_1 = 0.2\text{Hz}$, $f_2 = 1\text{Hz}$ 를 각각 인가하였다.

그림 11은 입측 폭 외란, 기존의 PID 제어기와 제안한 퍼지 PID 제어기에 대한 폭 마진의 시간 응답을 나타내었다. PID 제어기는 외란의 영향을 충분히 제거할 수 없는 구조이기 때문에 외란의 진폭과 주기를 크게 줄이지 못하는 것으로 나타났다. 퍼지 PID 제어기는 $e(t)$ 와 $de(t)$ 의 변화에 대하여 정상상태 오차와 오버슈트가 거의 없이 바람직한 제어 응답을 나타내었다. 본 논문에서는 Mamdani의 퍼지 추론 방법(fuzzy inference method) [21]을 사용하여 제어기의 성능을 향상시켰다.

그림 12는 두 제어기의 제어 입력을 나타내었다. PID 제어기의 제어 입력은 작게 계산되어 외란을 줄이기 어렵다.

표 1. 퍼지 PID 알고리즘 검증을 위한 시뮬레이션 조건.

Table 1. Simulation conditions for fuzzy PID control algorithm.

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|-----------|-------|--------------|-------|
| 조압연 폭(mm) | 1,330 | 압연하중(ton) | 55 |
| 제품 폭(mm) | 1,300 | 롤 직경(mm) | 1,080 |
| 롤 속도(mpm) | 68 | 밀 강성(ton/mm) | 100 |

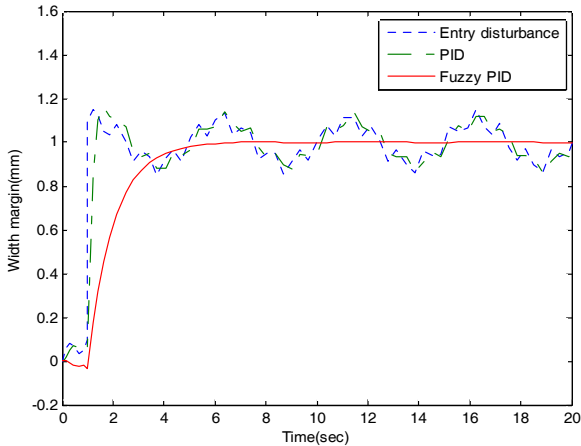


그림 11. 제안한 제어기의 폭 마진 시간 응답.
Fig. 11. Time response of width margin for proposed controller.

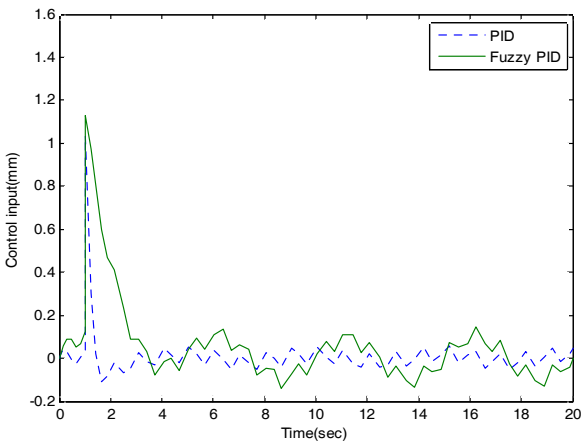


그림 12. 제어 입력의 시간 응답.
Fig. 12. Time response of control input for proposed controller.

퍼지 PID 제어기의 입력 $e(t)$ 는 폭 마진 오차를 크게 줄여서 0이 되는 방향으로 제어되고 있음을 알 수 있다. 그림에서 PID 제어기의 입력 평균과 편차는 각각 0.001mm, 0.033 mm 이며, 퍼지 PID 제어기는 각각 0.99mm, 0.078mm 로써 제안된 제어기의 입력이 크게 작용하고 있음을 알 수 있다.

2. 온라인 테스트 결과

그림 13은 개발된 CFWC 시스템을 열연 공장에서 온라인으로 테스트한 결과를 나타내었다. 그림의 점선은 F0 압연기의 출측에서 CCD WMS로 측정된 폭 마진이고 실선은 마무리 압연 출측에서 측정된 폭 마진이다. RSU, FSU에서 출력된 FOW, FW의 목표 폭은 각각 10mm, 7mm 이다. 약 10sec에 FOW의 마진이 목표 폭보다 작기 때문에 퍼지 PID 제어가 시작된다. 그러나 실제로 폭 제어의 효과가 나타나는 시점은 그림에서 보는 것과 같이 폭 마진이 증가하기 시작하는 약 19sec 이다. 이것은 FOW의 WMS와 F0E 사이의 거리(약 7m)에 의한 측정지연과 F0E의 롤 갭을 제어하는 액츄에이터의 응답지연 때문이다. 폭 마진 데이터는 식 (10)과 같이 저주파에 해당되며, 이와 같은 측정지연과 응답지연이 제어에 미치는 영향은 향후 많은 연구가 필요하다.

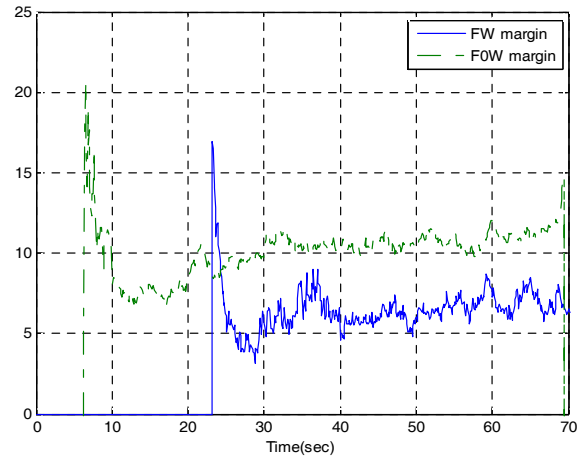


그림 13. CFWC 시스템의 온라인 테스트 결과.
Fig. 13. Test result of CFWC system.

온라인 테스트 결과 FOW 폭 마진의 평균과 표준편차는 각각 9.95mm, 0.7mm, FW 폭 마진의 경우는 각각 6.97mm, 0.5mm 로써 목표 폭 마진으로 수렴하였다. 이는 그림 3의 종전의 테스트 결과보다 평균은 44.7%(18 → 9.95), 표준편차는 16.7%(0.84 → 0.7) 정도 향상된 것을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 열간압연 공정에서 마무리 압연기의 입측 폭 마진을 제어하기 위하여 CCD를 이용하는 WMS를 개발하고, 퍼지 PID 제어기에 근거한 CFWC 제어기를 설계하였고 시뮬레이션을 통해 알고리즘을 검증하고, 열연 공장에 온라인으로 테스트 하였다.

개발된 WMS는 자발광 타입의 두 개의 라인 스캔 카메라로 구성된 옵티컬 베드를 사용하였고 관심영역에서의 스트레스값을 설정하여 엣지를 추출하였다. 폭 측정 시의 노이즈 등을 제거하기 위하여 glitch 필터를 설계하였다.

퍼지 PID 제어기를 설계하기 위하여 수직 압연기의 동특성을 게이지미터 식으로부터 유도하였다. 제어기는 폭 마진 설정값의 오차와 오차의 시간 변화율로부터 PID 제어 계인을 선정하는 자기학습 구조이다.

제안한 CFWC 제어기에 대한 현장 테스트 결과, FOW 폭 마진의 평균과 편차는 각각 44.7%, 16.7% 감소하여 치수제어의 정도가 크게 향상된 것을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

[1] K. Yamada, S. Ogawa, and M. Ataka, "Three dimensional analysis at rolling using rigid-plastic finite element method coupled with roll deformation analysis," *NUMIFORM 92*, pp. 755-760, 1992.

[2] T. Sasaki, "Mathematical model of width change in the hot strip finishing train," *CAMP-ISIJ*, vol. 9, pp. 304-307, 1996.

[3] T. Shibahara, "Edger set-up model at roughing train in hot strip mill," *ISIJ*, vol. 67, no. 15, pp. 2509-2515, 1981.

- [4] X. Z. Du, Q. Yang, C. Lu, A. L. Wang, and T. A. Kiet, "Optimization of short stroke control preset for automatic width control of hot rolling mill," *Journal of Iron and Steel Research*, vol. 17, no. 6, pp. 16-20, 2010.
- [5] 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.
- [6] A. Helmi and J. Alexander, "Geometric factors affecting spread in hot at rolling of steel," *JISI*, no. 206, pp. 1110-1117, 1968.
- [7] A. Ishii, "Variation of strip width during hot finishing rolling," *CAMP-ISIJ*, vol. 9, pp. 300-303, 1996.
- [8] J. Price, "The hot strip mill looper system," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-9, no. 5, pp. 556-562, 1973.
- [9] X. L. Zang, X. T. Li, and F. S. Du, "Head and tail shape control in vertical-horizontal rolling process by FEM," *Journal of Iron and Steel Research*, vol. 16, no. 5, pp. 35-42, 2009.
- [10] C. J. Park and I. C. Hwang, "Width control systems with roll force automatic width control and finishing vertical mill automatic width control in hot strip mill," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 206, no. 1-3, pp. 143-151, 2008.
- [11] 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.
- [12] S. Murata, "Development of width control technology in finishing line of hot strip mill," *CAMP-ISIJ*, vol. 9, pp. 308-311, 1996.
- [13] H. Yoneda, "Development of accurate width control technology in hot strip finishing mill," *CAMP-ISIJ*, vol. 9, pp. 312-315, 1996.
- [14] T. Ogura, "Advanced width control for hot finishing mill," *CAMP-ISIJ*, vol. 9, p. 324, 1996.
- [15] S. Kunimatsu, 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.
- [16] 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.
- [17] C. J. Park and I. C. Hwang, "New tension control at the head of strip in hot strip finishing mill," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 206, no. 1-3, pp. 69-77, 2008.
- [18] W. C. Tsai, C. B. Shung, and D. C. Wang, "Accurate logic-level power simulation using glitch filtering and estimation," *IEEE Asia Pacific Conference on Digital Object Identifier*, pp. 314-317, 1996.
- [19] G. M. Liu, H. S. Di, C. L. Zhou, H. C. Li, and J. Liu, "Tension and thickness control strategy analysis of two stands reversible cold rolling mill," *Journal of Iron and Steel Research*, vol. 19, no. 10, pp. 20-25, 2012.
- [20] S. Z. He, S. Tan, F. L. Xu, and P. Z. Wang, "Fuzzy self-tuning of PID controller," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 56, no. 1, pp. 37-46, 1993.
- [21] E. Hennebach and W. Dilger, "Algebraic operations on a class of Mamdani-controllers," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 101, no. 2, pp. 253-259, 1999.



박철재

1992년 부산대학교 정밀기계공학과 졸업(공학사). 1994년 동 대학원 졸업(공학석사). 2008년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 1994년~2008년 포스코 기술연구소 근무. 2008년 9월~현재 대구대학교 기계자동차공학부 교수. 관심분야는 모델예측제어, 건설제어, 프로세스 규명 및 제어, 메카트로닉스 등.