

열간 사상압연 선단부 폭 제어 시스템 개발

박철재*, 이덕만**

Development of Width Control System at Top of Strip for Hot Finishing Mill

Cheol Jae Park and Duk Man Lee

Key Words : Fuzzy PID, Looper (루퍼), Height Control(높이제어), Width Control(폭제어), Hot Strip Mill (열간압연)

Abstract

This paper presents the design method of the new controller for looper system in hot strip finishing mill. Looper response time is related to the performance of the tension control to reduce the delivery width error. The quality of the hot strip product, especially width deviation at the top of the strip, is influenced greatly by the precision of tension control. In this paper, a new fuzzy PID control system is designed to obtain the fast looper angle response and the high control precision. The computer simulation to verify the performance of the new controller is executed. From the results of the simulation, the tension control can obtain better performance than that of the conventional PID case.

1. 서론

최근 열연 공장의 품질 제어 수준은 크게 향상되었으며, 특히 두께의 경우에는 두께 편차가 $\pm 50\mu\text{m}$ 에 거의 99% 이상이 적중함으로써 두께 정도는 수요가의 요구 수준에 거의 만족하고 있다. 그러나 두께 정도가 향상되는 수준인 반면 사상압연 출측 폭의 제어 정도는 크게 떨어지고 있다.

사상압연 출측 폭의 경우에는 크게 2 가지의 이슈가 있다. 그것은 선단부 폭 불량에 따른 문제와 전장 폭 마진 평균 및 편차 제어 문제로 크게 나눌 수 있다. 먼저, 후자의 경우에는 조압연과 사상압연의 설정 및 제어가 큰 영향을 미치고 있다. 조압연의 설정은 주로 폭 퍼짐 예측모델 및 Dog Bone 폭 회복 모델 등과 같은 모델들과 관련이 깊으며, 제어의 측면은 조압연 AWC(Automatic Width Control) 제어 정도 항상과 관련이 있다. 사상압연의 경우에는 사상압연 폭 퍼짐 예측 모델, 장력 Preset 설정 모델 및 사상압연 셋업 정도 항상 등과 같은 모델 정도가 전장

폭 마진 평균 및 편차에 큰 영향을 끼치게 된다. 또한 제어적인 측면에서는 피드 포워드 AWC, 피드백 AWC 및 루퍼 다변수 제어기의 성능 등에 절대적인 영향이 있다.

최근까지 열연 공장의 폭 제어는 조압연에서 주로 다루어졌다. 사상압연에서는 주로 두께 편차를 제어하는 것을 목표로 했으며 그 결과 선단부 폭 불량 및 전장 폭 마진 문제는 항상 문제점으로 지적되어 왔다. 그러나 일본 등 선진 제철소에서는 사상압연에서 적극적인 폭 제어를 수행하고 있다. 일명 사상압연 장력 AWC 라고 부르는 이와 같은 제어를 통하여 폭 제어에서 상당한 기술력을 보유한 것으로 판단된다. 예를들면, Kawasaki 의 Mizushima 제철소에서는 F2-3 간 폭계 출력치와 F2-3 간 목표치와의 편차폭을 F1-2 간 Looperless 장력에 피드백하는 FB-AWC, F1 하중으로 추정된 온도변동을 모델식으로 계산하여 피드포워드하는 FF-AWC 의 기능을 가진 제어기들을 설계하였다. 또한 NKK¹⁾의 Keihin 제철소에서는 사상압연 스탠드간(F5-6 간, F6-7 간)에 폭계(2 차원 CCD Camera)의 출력을 No.3~6 루퍼에 피드백하여 장력을 변화 시키는 방법으로 판 폭을 제어한다. 역시 NKK 의 Fukuyama 제철소에서는 고정도 폭

* 포항제철 기술연구소 계측제어연구그룹

** 포항제철 기술연구소 계측제어연구그룹

그림 2 는 루퍼 제어 시스템의 블록도를 나타낸다.⁴⁾ 일반적으로 루퍼 제어 시스템은 두 가지 제어 모드가 있는데, 이는 그림에서 보는 것과 같이 루퍼 높이 제어기와 CRCC(Current Reference Calculation Controller) 모드이다. CRCC 제어 모드는 상위 컴퓨터에서 인가된 단위 장력 명령치를 이용하여 루퍼 모터의 베이스 전류를 계산하여 스탠드간의 장력을 일정하게 유지하는 기능을 한다. 이 블록선도에서 사용된 기호들은 표 1 과 같다.

Table 1. Parameters used in block diagram

기호	설명
σ	스탠드간 단위장력
ω	루퍼 각속도
θ	루퍼 각도
V_R	작업 롤 속도
V_S	압연 판 속도
E	압연 판의 Young Ratio
K_{10}	장력 피드백 계수
L	스탠드간 거리
f	선진율(Forward Slip)
T_v	메인 모터 시정수
ϕ	루퍼 모터의 토크 정수
g_L	루퍼 모터와 루퍼간의 기어비
J	루퍼 모터와 루퍼의 Inertia
F1	각도와 토크간의 영향계수
F2	루퍼 각속도와 압연 판 속도간의 영향계수
F3	장력과 루퍼 모터 토크간의 영향계수
Z	루퍼 Damping
$C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}$	루퍼 Cross 제어 게인
s	라플라스 연산자

3. 루퍼 시스템의 퍼지-PID 제어기 설계

기존의 루퍼 높이 제어기에 설계되어 있는 PID 제어기는 다음과 같은 문제점이 있다. 즉, 압연 판이 압연기에 치입하는 순간 양단 스탠드간의 속도 편차에 의해 발생하는 과도한 루프나 과도한 장력 발생시 루퍼가 신속하게 동작하지 못함으로써 장력 제어가 지연되고 이로 인하여 선단부 폭 불량과 같은 문제점들을 야기 시킨다. 이와 같은 문제들은 물론, PID 제어 게인들을 적절하게 튜닝 함으로써 해결할 수 있으나, PID 제어기는

제철 공정의 특성상 온도 등 여러 가지 고려하지 못하는 외란 때문에 적절하게 튜닝하기 어려울 뿐 아니라 강종, 사이즈에 따른 압연 작업 조건들이 상이하기 때문에 전체 작업 조건에 맞는 제어 게인을 선정하는 것은 불가능하다.

따라서 본 논문에서는 선단부에서 루퍼의 응답성을 향상시켜 품질 정도를 향상 시킬 수 있는 퍼지-PID 제어기를 설계하였다.

3.1 제어기의 기본 구조⁵⁾

퍼지 PID 제어기는 일반적으로 두 가지의 제어기, 즉, PID 제어기와 PID 제어기의 제어 게인들을 구하는 퍼지 제어기로 구성된다. 여기서 구성된 PID 제어기의 기본 구조는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 K_c , T_d , T_i 는 각각 제어기의 비례 게인, 미분 시간, 적분 시간을 나타내며 온라인으로 튜닝된다.

각각의 제어 게인들은 파라미터 α 를 도입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_c = 5\alpha + k_u \quad (2)$$

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

여기서 k_u , t_u 는 각각 임계 게인, 임계 주기라고 하며, 이는 비례 제어 시스템이 안정한계에 도달할 때까지 비례제어 게인을 증가 시켰을 때, 그때의 제어 게인 및 그 때의 진동 주기를 각각 나타낸다. 기본적인 퍼지 PID 제어기의 구조는 그림 3 과 같이 나타낼 수 있다.

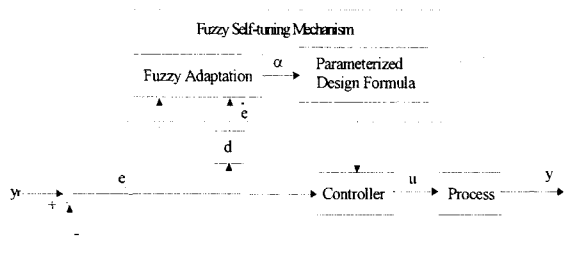


Fig. 3. Basic structure of the fuzzy PID controller

3.2 퍼지 Adaptation

퍼지 PID 제어기를 설계하기 위하여는 그림 3 에서 보는 것과 같이 파라미터 α 를 각도 편차와 편차의 시간 미분치에 의해서 선정해야 한다. 따라서, 먼저 루퍼 각도의 편차 $e(t)$ 와 편차의 시간 변화율 $\dot{e}(t)$ 을 각각 퍼지 변수인 E 와 R 로 퍼지 화하며 E 와 R 은 각각 다음 식 (3)과 같이 7 개의 다른 퍼지 집합으로 나타낼 수 있다.

$$E = \{NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL\} \quad (3)$$

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

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 Small 을 각각 나타낸다. 그림 4 는 루퍼 각도의 편차와 편차의 시간 변화율에 대한 퍼지 추론장치 (Fuzzy Inference Engine)의 소속 함수(Membership Function)를 도시하였다.

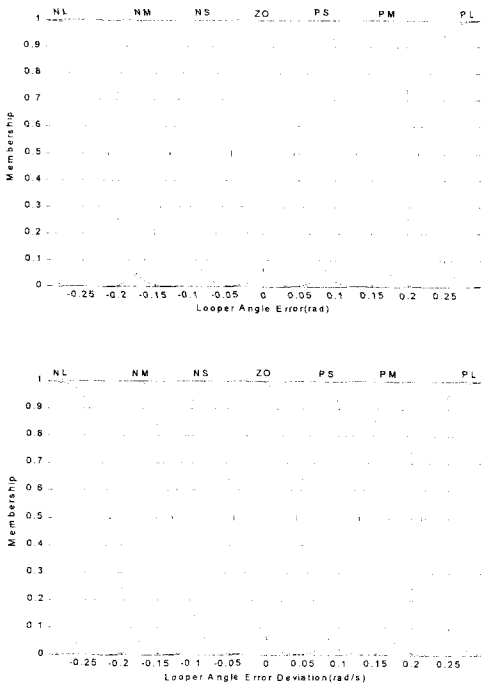


Fig. 4. Fuzzy membership function

다음 표 2 는 퍼지 변수 E 와 R 로부터 또 다른 퍼지 변수 H 에의 사상(Map)을 위한 퍼지 룰이다. 여기서 H 는 다음과 같은 7 개의 퍼지 집합으로 구성된다.

$$H = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\} \quad (4)$$

Table 2. Fuzzy control rules

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

퍼지 제어기 설계의 마지막으로 퍼지 변수 H 로부터 비퍼지화(Defuzzification) 방법을 통해서 $h(t)$ 를 구한다. 비퍼지화 방법은 많이 사용하는 무게 중심법(Center of Gravity Method)을 사용하였다. $h(t)$ 가 구해지면 α 는 다음 식 (5)와 같은 회귀 식으로 구해진다.

$$\alpha(t+1) = \beta \cdot \alpha(t) + \gamma \cdot h(t) \quad \text{for all } \alpha \quad (5)$$

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

4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

지금까지 앞 장에서는 루퍼의 응답성을 개선하여 선단부 판 폭 불량과 같은 품질 불량 문제를 해결하기 위하여 퍼지 PID 제어기를 설계하였다. 본 장에서는 2 장에서 모델링한 사상압연 루퍼 시스템에 퍼지 PID 를 적용한 결과를 설명하고 그 결과를 고찰한다. 시뮬레이션에 사용된 주요 압연 조건은 표 3 과 같다.

Table 3. 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	

그림 5 는 기존의 PID 제어기를 사용한 경우와 본 논문에서 설계한 퍼지 PID 제어기를 사용한 두 가지 경우에 대한 루퍼 각도의 시간 응답을 도시한 것이다. 루퍼는 20 도를 목표 각도로 하고 있으며 기존의 PID 제어기의 경우보다 퍼지 PID 의 경우에는 초기에 각도 편차가 큰 경우 제어 파

라이터를 크게 변경하여 초기 상승시간이 줄었으며(1.2 초→0.5 초), 오버 슈트의 양도 40% 정도 줄었다.

그림 6은 두 가지 경우에 대한 단위 장력의 시간 응답을 도시한 것이다. 퍼지 PID의 경우에는 기존의 제어기에 비해서 초기에 약 0.2Kg/mm^2 정도의 과장력이 발생하고 있으나 이는 루퍼가 압연 판에 빨리 닿아서 초기에 큰 장력이 인가된 것으로 보인다. 기존의 PID의 경우에는 루퍼가 어느 정도 발생한(여기서는 약 25도 정도의 루프) 이후에 장력이 발생되며, 이때는 장력이 어느 정도 풀린 시간이므로 장력의 크기가 약간 적다. 그러나 PID의 경우에는 치입 이후에 장력의 변동이 오랫동안 지속되는 것을 알 수 있다.

그림 7은 퍼지 PID 제어기 설계시의 루퍼 각도 편차, 편차의 시간 변화율 및 $h(t)$ 를 도시한 것이다. 루퍼 각도가 패스 라인(Path Line) 아래에 위치해 있을 때에는 루퍼가 압연 판과 분리되어 있어서 루퍼 제어 및 장력제어의 효과가 없기 때문에 제어기 설계시에는 루퍼가 패스 라인 위쪽에 있는 경우에만 제어를 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 줄이기 위하여 제어되고 있으며 0으로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

그림 8은 식 (5)에서 구한 $\alpha(t)$ 의 시간 응답을 도시하였다. $\alpha(t)$ 에 의해 PID 제어기의 계인들은 루퍼 각도 편차에 따라 튜닝되어 바람직한 각도 응답을 나타낸다.

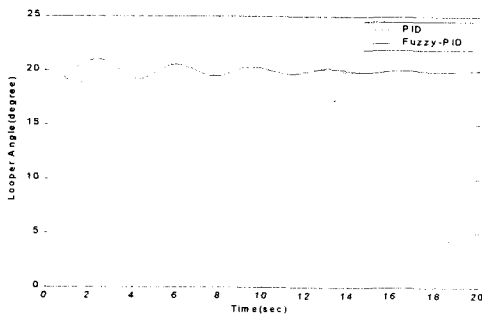


Fig. 5. Time response of looper angle

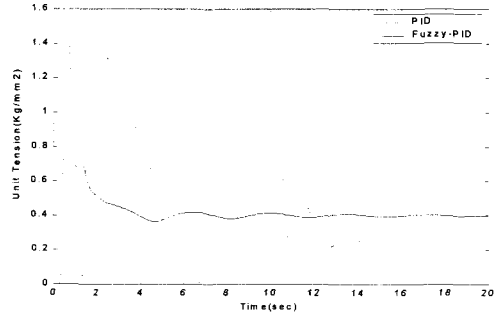


Fig. 6. Time response of unit tension

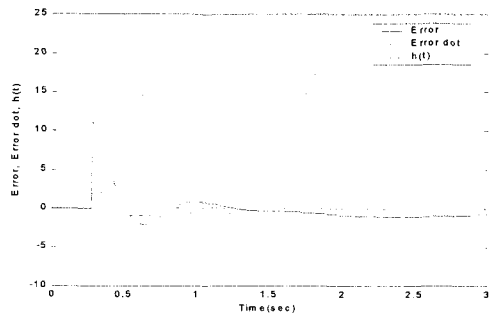


Fig. 7. Time response of $e(t)$, $\dot{e}(t)$ and $h(t)$

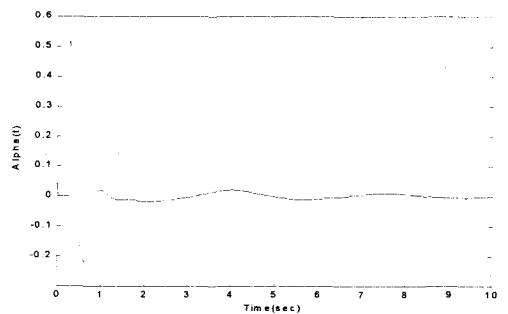


Fig. 8. Time response of $\alpha(t)$

5. 결론

본 연구는 열간 사상압연에서 루퍼의 응답성을 향상시켜 압연 판의 품질, 특히 선단부의 폭 불량 등의 문제를 해결하기 위한 방법에 관한 연구이다. 압연 판이 압연기에 치입하는 순간 양단 스탠드간의 속도 편차에 의해 발생된 장력으로 인해 주로 선단부의 품질 불량이 발생되며 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 퍼지 PID 제어기를 설계하여 선단부 루퍼 성능을 향상시킬 수 있었다. 시뮬레이션 결과 설계된 퍼지

PID 제어기는 기존의 PID 제어기에 비해서 우수한 성능을 나타내었다.

참고문헌

- (1) H. Umeda and S. Murakami, 1993, "Development of Strip Width Control System for No. 2 Hot Strip Mill at NKK Fukuyama Works," *Proceedings of the Autumn Conference of the CAMP-ISIJ*, Vol. 6, p. 1257.
- (2) Fukushima, et al, 1988, "Looper Optimal Multivariable Control for Hot Strip Mill Finishing Mill," *Transactions ISIJ*, Vol. 28, pp. 463~469.
- (3) S. Tanifuji, Y. Morooka, M. Nakajima, I. Imai, A.Oishi, K. Tashiro and S. Konishi, 1981, "Development of a Tension Control System for Hot Finishing Mills," *IFAC Control Science and Technology(8th World Congr.)*, pp. 2501~2506.
- (4) Y. Anbe and N. Ito, 1979, "Interstand-tension control of a continuous wire rod mill," *Trans. IEE of Japan*, Vol. 99-C, No. 12.
- (5) Shi-Zhong He, et al, 1993, "Fuzzy Self-Tuning of PID Controller," *Fuzzy Sets and Systems*, pp. 37~46.