

압연공정에서의 피드포워드 제어기 성능 개선에 관한 연구

박상혁, 이해영, 이담해

영남대학교 전기전자공학부 제어 및 시스템 연구실

e-mail : a9514705@mirae.yeungnam.ac.kr

A study on performance enhancement of feedforward controller for rolling process.

Abstract

Automatic gauge control algorithm in rolling process is composed of several functions. Among them feedforward control method is used to compensate irregularity of input strip thickness before rolling process. Since it's very difficult to get an explicit relation between the degree of irregularity of input strip and manipulated variables, approximate linear equation like straight line is used in real system. Furthermore parameters included in such static equation should be changed by characteristics of input strip and modified by roll states. Despite this problem, rolling process use variables in feedforward controller as a constant. Therefore this problem increases the possibilities of irregularity of thickness control. This paper presents an algorithm which can properly infer present states of process and intelligently manipulate the parameter of feedforward controller.

1. 서론

자동 두께 제어(Automatic Gauge Control, A.G.C)은 철판 제품의 목표 두께를 얻기 위한 것으로 여러 가지 제어 방식이 사용되며, 압연공정에서 매우 중요한 제어 문제이다.

압연공정의 자동 두께 제어에는 BISRA A.G.C, Feedforward A.G.C, Feedback A.G.C, 편심 제어기 등이 조합되어 있다. 이중 Feedforward A.G.C에 대해서 보면, 설비의 노후화에 따른 설비 상수 변동이 발생하며, 소재 종류에 따른 소재의 상수 변동이 있는 경우 능동적인 대응이 어려운 문제점이 있으며 이로 인해 불량 제품이 생산될 수 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점의 해결을 위해 여러 보상기 중 Feedforward A.G.C 보상기에 소재·설비 상수들의 변동을 지식 Data-base에 넣어서 두께 제어 성능을 개선하는 방법을 제안하였다.

이 방법은 숙련된 오퍼레이터의 제어 지식을 퍼지 집합에 의해 정량화하고, 제어를 행하는 방법으로, 본 논문에서는 결론부가 선형식인 모델을 사용하였다.

이 모델을 사용하여 Feedforward A.G.C 보상기의 소재 상수가 제대로 맞춰지지 않은 경우, 이를 잘 보상하고 있음을 보인다.

2. 압연공정에서의 두께 제어

2.1 두께 제어 문제의 정의

압연공정에서 두께란 크게 두가지로 나눌 수 있는데, Strip 진행 방향에 수직인 폭방향 두께와 Strip의 진행 방향과 같은 방향의 두께인 길이방향 두께로 나눌 수 있다. 그러므로 압연공정에서의 두께제어 문제란, 폭방향 두께와 길이 방향 두께를 일정하게 유지하는 것이라 할 수 있다.

2.2 두께 제어의 기본 원리.

2.2.1 두께 제어의 기본 조절량

두께 제어문제에서 조절량이란 것은 Strip의 두께를 변경시킬 수 있는 물리량중에서 인위적으로 조절이 가능한 것을 의미하며, 조절량으로는 압연하중, 롤 간격 및 롤 회전속도의 세가지가 있다. 압연하중을 조절하는 방식은, Strip이 압연 롤사이에 들어감으로 인해 롤이 수직방향으로 받는 하중이 항상 목표하는 값이 되도록 롤 간격을 제어하는 방식이며, 이 방식의 단점은 하중이 일정하게 되는 방향으로 롤 간격의 제어가 이루어지므로, 입측 소재의 두께에 불균일이 발생하면 그것이 그대로 출력측에 나타나는 문제점이 있다. 롤 간격을 조절하는 방식은 롤 자체가 완전한 강체라 보

고, 압연 롤사이의 간격이 항상 목표하는 값이 되도록 압하위치를 제어하는 방식이다. 다음에 롤의 회전속도를 조절하는 방식은 롤의 회전속도를 변경하여, 압연기 사이에 물려있는 스트립에 작용하는 장력을 변경시킴으로서 스트립의 두께를 조절하는 방식이다. 이 방식은 스트립의 두께를 크게 변화시키는 것 보다는 작은 량을 조절하는데 사용된다.

2.2.2 두께 제어의 원리

압연후의 판두께는 압연기의 탄성특성과 스트립의 소성특성으로부터 결정되며, 다음 그림과 같이 두 곡선의 교점이 압연 후의 스트립 두께가 된다.

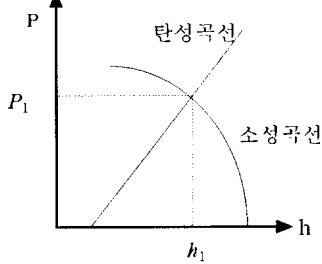


그림 2.1 그래프로 본 압연후의 판두께

따라서 이 그래프로 보면 압연에서의 두께제어라는 것은 압연기 또는 소재에 의한 여러가지 요인에 의해 두께에 변동이 발생하더라도 항상 두 곡선의 교점이 일정한 지점에 있도록 만드는 조절 행위를 의미한다. 즉 롤 간격을 조정하여 압연기의 탄성곡선을 이동시키거나, 롤의 회전속도를 변경하여 스트립의 소성곡선을 이동시킴으로서 두 곡선의 교점을 지정된 위치에서 이동하지 못하도록 제어하는 행위를 두께제어라고 할 수 있다. 이 과정을 다음 그림에 보인다.

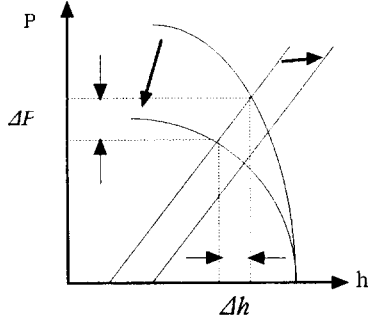


그림 2.2 곡선변경에 의한 두께의 변화과정

3. 퍼지 모델 설계

3.1 Feedforward A.G.C 보상기 설계

아래의 그림 3.1에서 보듯이 압연공정에서 FF 제어기의 전달함수는 입력측의 두께 변동량이 입력이 되고 Roll gap의 변화량(원래 초기의 Roll gap과 조정된 Roll gap의 차이)이 출력이 되고 입력측에서 Sensor (Thickness guage)로 측정된 뒤 압연기의 Roll에 들어가기까지의 시간을 고려하여 시간 지연항을 넣으면,

$$G_{FF}(s) = \frac{\text{Roll gap의 변화량}}{\text{입력측의 두께 변화량}} \times \text{시간지연}$$

$$= k_1 \frac{\Delta s}{\Delta H} e^{-L_1 s}$$

가 되고, F.F 보상기의 전달함수를 구하면 아래와 같다.

$$G_{FF}(s) = k_1 \frac{\Delta s}{\Delta H} e^{-L_1 s} = k_1 \frac{\Delta h}{\Delta H} \cdot \frac{\Delta s}{\Delta h} e^{-L_1 s}$$

$$= k_1 \frac{Q}{M+Q} \cdot \frac{M+Q}{M} e^{-L_1 s} = k_1 \frac{Q}{M} e^{-L_1 s}$$

3.2 개선된 A.G.C 보상기의 구성

3.2.1 개선된 전체 시스템의 구성

아래의 그림 3.1에서 보듯이 F.F제어기에 지식적 Data-base를 첨가하여서 설비와 소재의 상태에 큰 영향을 받지 않고 목표한 철판의 두께가 나오도록 F.F 제어기의 gain을 적당히 조절할 수 있도록 한다. 여기서는 현장 Data를 임의로 가정하여 설계를 하며 실제와 유사하게 쓸 수 있도록 Simulator를 설계하도록 한다. 이 방법은 실제 공정에서 오퍼레이터는 Feedforward A.G.C 보상기에서 설비·소재 상수와, 입력의 변동에 의한 출력의 변동을 보고 어떤 보정을 가하면, 소정의 결과를 얻고, 또 안전하게 조업을 계속할 수 있는가 하는 노하우를 갖고 있다. 그래서 오퍼레이터의 노하우를 퍼지 이론에 의해 정량화하고 Feedforward A.G.C를 설계함으로써 모델의 정확도를 향상시킬 수 있도록 하는 방법이다.

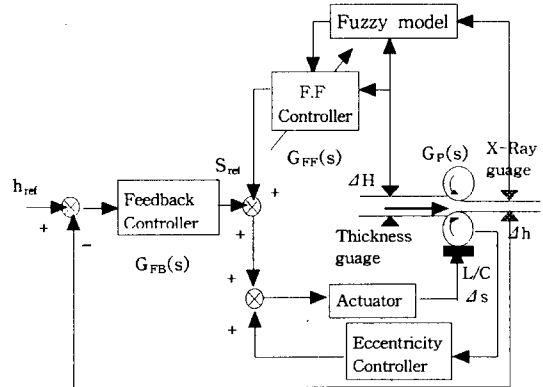


그림 3.1 개선된 A.G.C 보상기의 구성

3.3.2 개선된 Feedforward A.G.C 보상기의 구성

먼저 본 논문에서는 오퍼레이터의 노하우를 퍼지 이론에 의해 정량화하고 이를 포함한 지능적Feedforward A.G.C를 설계하여 모델의 정확도를 향상 시킬수 있도록 하는 방법이므로 두 가지의 기능을 가지고 있도록 퍼지 모델을 설계한다. 두 가지 기능이란, 입력의 data로 부터 각 퍼지 관계식에 의해 기술 되어 있는 보상기의 제어량 예측 기능과 보상기 모델의 계수를 순차적으로 수정을 하는 학습기능을 말한다. 여기서 보상기의 제어량이란 목표 철관의 소재상수를 뜻하며, 이는 퍼지 모델의 추론 결과가 된다. 또한 여기서 학습기능이란 실제의 조업 데이터들을 가지고, 높은 예측 정밀도를 가지기 위하여 각 퍼지 관계식의 계수들을 동정하는 것을 말한다.

소재상수의 추론을 위한 각 규칙은 아래의 식과 같은 형식으로 표현된다.

$$R_1 : \text{If } x_1 = A_1^1, x_2 = A_2^1, x_3 = A_3^1$$

$$\text{Then } y_1 = a_0^1 + a_1^1 x_1 + a_2^1 x_2 + a_3^1 x_3$$

$$R_2 : \text{If } x_1 = A_1^2, x_2 = A_2^2, x_3 = A_3^2$$

$$\text{Then } y_2 = a_0^2 + a_1^2 x_1 + a_2^2 x_2 + a_3^2 x_3$$

⋮

$$R_{2i} : \text{If } x_1 = A_1^{2i}, x_2 = A_2^{2i}, x_3 = A_3^{2i}$$

$$\text{Then } y_{2i} = a_0^{2i} + a_1^{2i} x_1 + a_2^{2i} x_2 + a_3^{2i} x_3$$

여기서 R_i 는 i 번째의 규칙인 것을 의미하고, A_j^i 는 퍼지 집합, x_j 는 입력 변수, y_i 는 i 번째 규칙의 출력, a_j^i 는 i 번째 규칙의 계수를 나타낸다.

어떤 값의 입력 x_1, \dots, x_m 이 주어졌을 때, 출력 y 의 추정치 \hat{y} 는 아래와 같이 주어진다.

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^n g^i y^i}{\sum_{i=1}^n g^i}$$

여기서 n 은 규칙의 수를 나타내고, y^i 는 i 번째물에 의해 계산된 출력이다. 무게치(Weight factor) g^i 는 i 번째물의 진리값을 나타내며 이는 식(3)과 같이 계산된다.

$$g^i = \min\{A_1^i(x_1), \dots, A_j^i(x_j), \dots, A_m^i(x_m)\}$$

$A_j^i(x_j)$ 는 퍼지 집합 A_j^i 의 멤버쉽 함수의 정도(grade)이다. 즉 각 규칙에 의해 결정되는 y^i 의 값을

각 규칙의 진리치 g^i 를 무게치로서 가중평균하여 최종적인 추론결과로 한다.

입력변수 x_1 의 용어집합(term set)은 PB, PM, PS이며, x_2 의 용어집합은 NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB 등이다. 그리고 각 요소의 소속도함수는 모두 삼각형 형태로 설계되었다.

결론부의 선형식 계수는 실적 압연 데이터를 기본으로 하여 조건부의 멤버쉽 정도(grade)를 무게치로서 무게치를 붙인 최소 이승법(Least Square Method)에 의해 구했다. 즉 평가 함수로서 이하에 나타내는 함수를 최소로 하도록 물 마다 계수를 동정(Identification)했다.

$$J = [Y - Da]^t A [Y - Da]$$

$$\text{단, } D = [Z_1, Z_2, \dots, Z_n]^t, Z_i^t = [1 \ x_{1i} \ x_{2i}]$$

$$a = [a_0^k \ a_1^k \ a_2^k], Y = [y_1 \ y_2 \ y_n]$$

$$A = \begin{bmatrix} \eta_1^k & & & \\ & \eta_2^k & & \\ & & \ddots & \\ & & & \eta_n^k \end{bmatrix}$$

여기에서 $\eta_i^k = 10 * r^{n-i}$ 이다.

또, 앞에서 서술했던 것과 같이, 압연기의 특성 변화나, 소재의 변화에 의한 급격한 물 조건 변화 등의 조업 변화에 모델이 추종하기 위해서는, 실적 데이터에 의한 모델의 적용 수정이 불가결하다. 그래서 위에서 서술한 무게치를 붙이는 최소 자승법을 순차형으로 변환하고 후진부의 선형식의 계수를 코일하나마다 아래식에 보여주는 순차 학습에 의해 수정하는 방법으로 학습기능을 실현하였다.

$$a_N = a_{N-1} - \eta_N P_N [Z_N Z_N^t a_{N-1} - Z_N y_N]$$

$$P_N = P_{N-1} - \eta_N P_{N-1} Z_N (1 + \eta_N Z_N^t P_{N-1} Z_N)^{-1} Z_N^t P_{N-1}$$

단, η_N : 전진부의 규격화한 무게치

a_N : 학습한 계수 벡터

Z_N : N번째의 데이터 벡터

P_N : 수정 계인 매트릭스

4. 모의실험 결과

모의실험은 외란의 모양과 크기에 따라 네가지 경우로 나누어 행해졌다. 첫째는 외란이 상당히 큰 경우, 두 번째는 중간정도의 외란, 세 번째는 외란이 작은 경우이며, 마지막으로 네 번째는 임의의 형태의 외란이 들어왔을 경우이다. 다음에 각 경우에 대한 결과를 보인다.

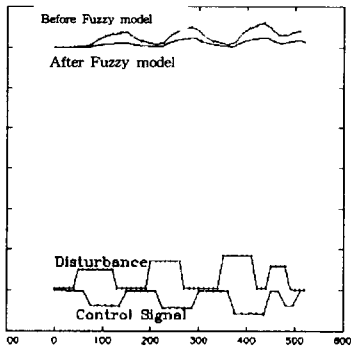


그림 4.1 외란이 PB인 경우

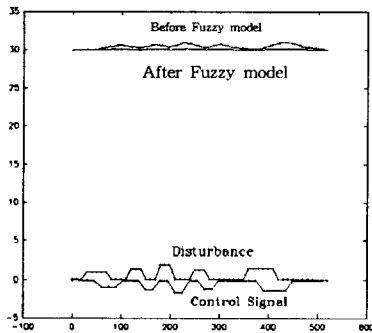


그림 4.2 외란이 PM인 경우

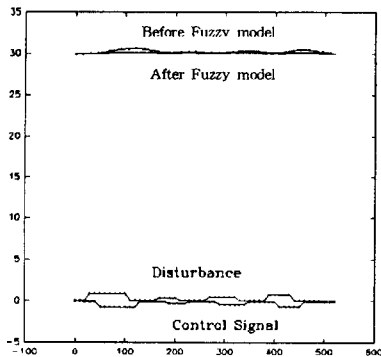


그림 4.3 외란이 PS인 경우

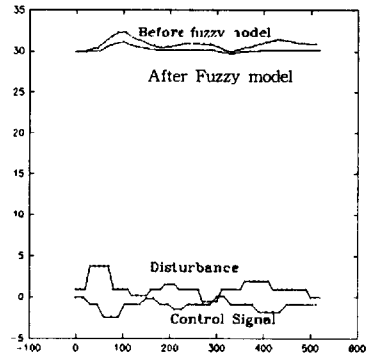


그림 4.4 임의 형태의 외란인 경우

결과를 보면 Feedforward A.G.C 보상기에서 소재 상수가 제대로 설정이 되지 않은 상태에서 입력측의 변동이 있을 경우, 이에 대하여 소재상수를 지능적으로 조정하여 성능이 개선됨을 알 수 있다.

5. 참고문헌

- [1] 이 해영, "입관제철공정의 自動制御", 유림출판사, 1996
- [2] Morio Saigoh & Takamasa Kawasaki, "Dev. of High-Accuracy Control System for Hot Strip Mill", NKK Technical Review, No. 61, pp. 10-17, 1991.
- [3] M. Sugeno & G.T.Kang, "Structure Identification of Fuzzy model", Fuzzy Sets & Sys., Vol. 28, pp. 15-33, 1998
- [4] T. Tagagi & M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its application to Modelling and Control", IEEE Trans. on Sys., Man, Cybernetics, vol.SMC-15, No 1, pp. 116-132, 1984
- [5] 홍 성철, 유 재상, "열연판의 선단부 두께오차 보상을 위한 퍼지제어 시스템", 1994 제어계측 연구회 합동학술연구발표회, pp. 115-119, 1994
- [6] Michio Sugeno & Takahiro Yasukawa, "A Fuzzy-Logic-Based Approach to Qualitative Modeling", IEEE TRANSACTION on Fuzzy Systems, Vol 1, No. 1, pp. 7-31, February 1993.
- [7] Minoru Tanaka & Tsutomu Takada, "Decoupled Automatic Gauge Control for Universal Rolling Mills", Nippon Steel Technical Report, No. 27, pp. 51-62, October 1985.