

열간압연 Monitor AGC에의 H_∞ 최적화 기법의 적용

(Application of H_∞ optimization to design of the monitor AGC for a hot strip mill plant)

백 기남(산업과학기술연구소 제어연구부), 류 석환(대구대학교 전자공학과)

abstract

A robust monitor AGC(Automatic Gauge Control) system for a hot strip mill plant of POSCO is designed by minimizing the H_∞ norm of a so called mixed sensitivity function. In order to solve the minimization problem, a polynomial approach proposed by Kwakernaak[5] is used. The controller performance is tested by a computer simulation under various circumstances.

1. 서론

열간압연공정 마무리단계에서의 두께제어는 후속공정인 냉간압연제품의 두께제어 정도에 큰 영향을 미치고있어 열간 압연 제품에 대한 두께제어정도 향상을 위한 끈임없는 노력이 행하여지고있다. 대부분의 열간 두께제어방식은 feedforward부분과 feedback부분으로 구성되어있으며 feedforward부분에서는 압연 roll의 열팽창이나 oil film두께 등을 예측하여 사용하며 feedback부분에서는 압연하중을 측정하여 roll간격을 보상하는 소위 BISRA(British Iron and Steel Research Association) AGC(Automatic Gauge Control)와 맨 마지막 stand에 설치된 X-ray두께측정기로 부터의 출력두께 편차를 측정하여 PI방식에 의거 보상하는 monitor AGC로 구성되어있다.[1]

BISRA AGC는 압연도중 압연재의 온도변동, 변형저항의 변동 등에 따른 출력두께 변동 줄이는데 아주 효과적이며 계산 logic이 아주 간단하므로 전 세계적으로 널리 사용하고 있으나 초기 압연 설정치 계산에서의 오차에 기인한 출력두께 오차를 제거할 수가 없다. 이러한 정상상태의 오차를 제거하기 위하여 출력두께 편차를 이용하여 PI방식으로 보상하는 monitor AGC가 사용된다.

본 연구에서는 기존의 PI방식을 사용한 monitor AGC를 측정시간지연을 고려하여 초기압연 설정치계산 오차에서 기인한 출력 두께 편차를 조속히 제거하고, 압연재 온도 변화와 같은 주기성 외란에 기인한 출력두께의 주기적 진동을 구소화 하기 위해 최근에 많은 연구가 진행되고 있는 H_∞ 최적화 기법[2-6]에 의한 monitor AGC를 설계하고자 한다.

2. 제어문제 설정

roll 출력의 초기설정치와의 실제 두께편차는 다음과 같이 표시 할수있다.

$$\Delta h = \Delta S + \frac{\Delta P}{M} + \alpha' \\ = H(s) (\Delta S_b + \Delta S_r + \Delta S_m) + \frac{\Delta P}{M} + \alpha' \quad (2.1)$$

여기에서 ΔS , ΔP , Δh 는 초기설정치와의 roll gap 편차, 압연 하중 편차, roll출속 두께편차이며, M은 실제의 mill상수이다. 또한 α' 은 외란항으로서 초기설정 계산 오차, roll 열 팽창, oil film 영향, BUR 편심등을 포함한다.

유압계통의 전달함수를 H(s)라 하면 ΔS 는 다음과 같다.

$$\Delta S = H(s) (\Delta S_b + \Delta S_r + \Delta S_m) \quad (2.2)$$

$$\Delta S_b = -G \Delta P/M_c \quad (2.3)$$

여기에서 ΔS_b 는 BISRA AGC의 출력이고 G는 BISRA AGC의 gain이며, M_c 는 제어기설계를 위한 공칭 mill 상수이다. ΔS_r 는 feedforward 보상항이며 ΔS_m 는 결정하고자 하는 monitor AGC의 출력이다.

두께측정기의 측정시간지연을 d라 하고 측정된 두께편차를 Δh_x 라 하면

$$\Delta h_x = H(s)e^{-ds} \Delta S_m + \alpha \quad (2.4)$$

여기에서 α 는 등가의 외란항으로서 다음과 같이 표시된다.

$$\alpha = (H(s) \Delta S_r + \alpha' + \frac{\Delta P}{M} (1 - H(s) \frac{M}{M_c} G)) e^{-ds} \quad (2.5)$$

윗식의 등가 외란항에서 H(s)는 저주파 영역에서는 거의 1이므로(실제 유압계의 band width는 30 rad/sec 정도의 응답성이 매우 빠르다) 다음의 사항이 만족되면 외란항의 크기를 줄일 수있다.

1) $M_c = M$ 이 되도록 mill 상수를 정확히 측정하고 BISRA AGC의 gain을 1에 근접시킨다.

2) α' 에 포함된 roll 열팽창, oil film 영향등을 정확히 예측하여 feedforward 보상항 ΔS_r 를 사용하여 상쇄시킨다.

3) 초기 설정치 계산의 예측정도를 향상시킨다. 그러나 mill 상수 M이 경시적으로 변화하므로 M_c 를 꾸준히 up-date하는 것도 현실적이지 못하고 BISRA AGC계의 안정성 문제로 BISRA AGC gain을 1에 가깝게 사용할 수 없으므로 이러한 등가 외란항의 영향을 최소화하는 monitor AGC의 개선이 필수적이며, 2)항과 3)항에서 언급된 방안은 꾸준히 연구되어야 할 과제이다.

제어공학적인 문제설정을 위해 식(2.1)-(2.5)을 근간으로 하는 block diagram을 그리면 그림 2-1과 같이 나타내어진다.

그림 2-1에서 Δh_r 는 두께편차의 요구치로서 이 경우 $\Delta h_r = 0$ 이며 ξ 는 두께측정기의 noise를 나타내며, C(s)는 결정하고자 하는 monitor AGC의 전달함수이다. 그림 2-1로부터

$$\Delta h_x = \frac{1}{1 + H_o(s) C(s)} \alpha - \frac{C(s)}{1 + H_o(s) C(s)} \xi \quad (2.6)$$

3 Monitor AGC의 설계

이 절에서는 H_{∞} optimization 기법을 사용하여 직류성분의 외란항에 의한 출력두께의 영향을 완전히 제거하고 (disturbance rejection) 저주파 성분의 외란항에 의한 영향을 최소한 감쇄시키고(disturbance attenuation) 제어 모델의 불확실성에 견디는 monitor AGC를 제안 하고자하며 이를 위해 Kwakernaak이 제안한 방법으로 weighted sensitivity function과 weighted complementary sensitivity function의 결합된 형태를 최소화하는 monitor AGC를 설계 하고자한다.[5] 즉 그림 2-1에서 sensitivity function S와 complementary sensitivity function T는 다음과 같으며,

$$S = (1 + H_o(s) C(s))^{-1}$$

$$T = 1 - S$$

최소화하고자 하는 양 Z는 다음과 같다.

$$Z = \sup_{\omega} [|W_1(j\omega)S(j\omega)|^2 + |W_2(j\omega)T(j\omega)|^2] \quad (3.1)$$

여기에서 $W_1(s)$ 와 $W_2(s)$ 는 적절히 선정될 weighting function이다.

Monitor AGC를 H_{∞} optimization 기법으로 쉽게 설계하기 위하여 간략한 $H_o(s)$ 를 결정한다. $H_o(s) = H(s) e^{-d}$ 로 정의 되었으며 유압계의 전달함수 $H(s)$ 를 band width 30 rad/sec 의 1차계로 선형화하면

$$H_o(s) = \frac{30}{s + 30} e^{-d}$$

시간지연항 e^{-d} 를 유리함수로 근사화하기 위해 Pade 근사법을 사용한다. 실제 2열연 공장의 두께측정기 시간지연은 0.4 - 0.6초 정도이며 따라서 d를 0.5라 두고 2차계로 Pade 근사화하면

$$e^{-0.5s} = \frac{(s - 8)^2}{(s + 8)^2}$$

이 되므로 $H_o(s)$ 는

$$H_o(s) = \frac{30}{s + 30} \frac{(s - 8)^2}{(s + 8)^2} \quad (3.2)$$

Weighting 함수 $W_1(s)$ 는 직류성분의 외란항에 대한 두께 편차의 영향을 완전히 제거하고 저주파 성분에 의한 영향을 줄이기 위하여

$$W_1(s) = \frac{s + 4}{s} \quad (3.3)$$

로 둔다. $W_2(s)$ 는 complementary sensitivity function이 저주파영역에서는 1 고주파영역에서는 0에 가깝도록 하기위해 저주파에서는 weight를 적게 그리고 고주파에서는 weight를 크게한다. 또한 plant의 전달함수 (3.2)에서 분모의 차수가 분자의 차수보다 1크므로 제어기 C(s)의 전달함수가 proper 하기 위해 $W_2(s)$ 에서 분자의 차수를 분모의 차수보다 1크게 정한다. 이러한 조건을 충족하도록

$$W_2(s) = 0.4 (s + 0.001) \quad (3.4)$$

라 둔다.

weighting function (3.3), (3.4) 및 plant model(3.2)을 사용하여 (3.1)을 최소화하는 제어기는 Kwakernaak이 제시한 방법으로 PC-MATLAB 언어를 사용하여 구하였으며 그 결과로 얻어진 제어기 C(s)의 전달함수는 다음과 같다.

$$C(s) = \frac{5s^3 + 242s^2 + 2863s + 10105}{30s^3 + 431s^2 + 7112s} \quad (3.5)$$

(3.5)의 제어기를 사용했을 때의 closed loop pole은 -3.5, -8.1 ± j 5.6 이며 이때의 unweighted sensitivity function 을 실선으로 그리고 complementary sensitivity function을 점선으로 그림 2-2에 나타낸다. 그림 2-3에서는 (3.1)의 Z(jω)의 크기를 도시하였다.

4. Simulation

본 연구에서 제시한 제어 logic의 성능을 simulation하는데 있어서 실제의 열간압연 공정은 7개의 압연 stand가 tandem 방식으로 연결되어 있으나 #6, #7 stand와 #6, #7 stand 사이의 looper 기계계통만을 수학적으로 modelling한 간략화된 computer simulation을 수행한다. computer simulation의 개략은 다음과 같다.

4.1 Simulation 수식 모델

Simulation program에서 사용된 수식모델에 대해서 간략히 기술한다.

4.1.1 Roll Force Model

압연 roll의 roll gap, roll force 및 압연재의 출력 두께와의 상관관계는 여러가지가 있으나, 본 연구에서는 일반적으로 열연의 경우에 가장 많이 사용되고 있는 Sims의 모델을 이용한다. Sims식에 의하면

$$F = K W L_d Q_p \quad (4.1)$$

$$h = S + F / M \quad (4.2)$$

여기에서 F : 압연하중(ton)

K : 변형저항(ton/mm²)

W : 철판의 폭(mm)

L_d : 압연 roll과 철판의 접촉길이(mm)

Q_p : 압하력의 함수로 표시되는 량

h : 압연재 출력두께(mm)

S : roll gap(mm)

M : mill 상수(ton/mm)

특히 Q_p는 철판의 절대온도, 탄소량, 입측두께, 선속도 등의 비선형 함수이며 S가 주어지면 (4.1)과 (4.2)의 비선형식을 연립하여 풀면 h와 F를 구할수있으며 본 simulation program에서는 binary search방법에 의거 비선형식을 풀었으며 L_d와 Q_p를 구하기 위한 상세 식은 Finishing set up 계산을 위한 식을 사용하였다.

4.1.2 유압계 동특성 모델

AGC의 출력인 roll gap의 기준치가 주어졌을 때, 실제 roll gap의 시간적 변화를 나타내는 유압계의 동특성은 선형 2차식으로 modelling을 하며 전달함수는 다음과 같다.

$$H_1(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$$

여기에서 #6, #7 stand 공통으로 damping ratio $\zeta = 0.5$, natural frequency $\omega = 50$ 으로 설정하였다.

4.1.3 Work Roll Drive 모델

Looper 제어기의 출력인 speed 기준치를 입력으로 하고 work roll의 실제 speed를 출력으로하는 work roll speed 제어기는 thyristor를 사용한 motor 속도 제어계통으로서 여기에서는 시정수가 1/15인 1차 선형제어계로 근사화하면 전달함수는 다음과 같다.

$$H_2(s) = \frac{15}{s + 15}$$

4.2 Simulation 결과

본 연구에서 제시된 X-ray monitor AGC를 BISRA AGC와 함께 사용하고 X-ray 측정기의 시간지연이 0.5 초라 가정하였을 경우 두께 변화 추이는 그림 4-2에 도시되어 있다. 그림 4.2에서 실선은 PI제어기의 응답이고 점선은 본 연구에서 제시된 제어기를 사용하였을 때의 응답이며, 초기 top부의 출력두께 편차가 조속히 제거되는 것을 알수있다. 이 경우 압연재의 온도변화는 고려하지 않았지만 유압계 동특성, mill 상수의 uncertainty 등의 오차는 고려되었다. 따라서, top부의 두께편차가 클 경우 이를 빠른시간 내에 두께허용 오차 이내로 제어하기 위해서는 X-ray AGC의 제어성능이 관건이 됨을 알 수있다.

압연재 온도변화 및 측정시간 지연에 대한 모델오차에 기인한 제어계의 성능을 조사한다. 압연재의 온도변화는 주로 가열로에서 skid부와 non-skid부에서의 온도편차에 기인하며 이를 모의하기 위해 입측 stand에서의 압연재 온도가 30°C의 진폭을 가지고 주기적으로 진동한다고 가정하였으며 시간변화에 따른 압연재의 온도변화를 그림 4-3에 도시한다. 측정시간지연에 대한 모델오차의 주요원인은 압연중 압연속도의 변화에 기인한다.

그림 4-4에 압연재의 온도변화와 0.2초의 측정시간지연 오차가 있을 경우의 제어기의 성능을 나타내었다. 이 경우 종래의 PI방식(실선)의 monitor AGC를 사용시에는 제어계가 불안정하여지는 반면에 본 연구에서 설계한 제어기(점선)의 경우 비록 진동은 하지만 안정함을 알 수있다.

5. 결 론

본 연구에서 포항제철 2열연 공장 사상압연 공정에서의 두께제어 정도의 향상을 위한 노력의 일환으로 Navy의 두께 제어 logic중 두께제어계의 안정성에 관련된 feedback part인 BISRA AGC와 monitor AGC 중 monitor AGC의 개선을 위한

방안을 제시하였다. 본 연구에서 제안한 monitor AGC를 사용했을 때의 출력두께 편차의 경향은 computer simulation을 통한 여러차례의 검증결과 Finishing set-up 오차에 기인한 초기 출력 두께편차의 조속한 제거에 기존의 PI방식보다 효과가 있으며, 측정기 시간지연의 오차에도 아주 강한 제어 특성을 보여 주었다.

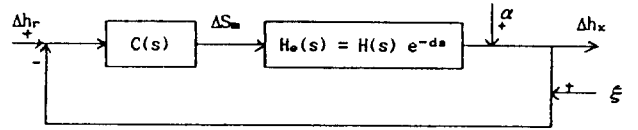


그림 2-1 블록 선도

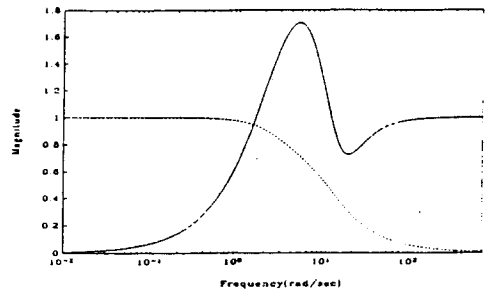


그림 2.2

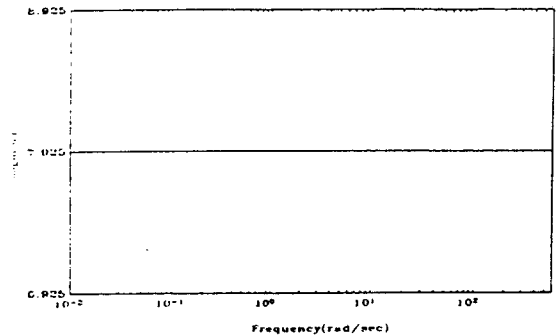


그림 2.3

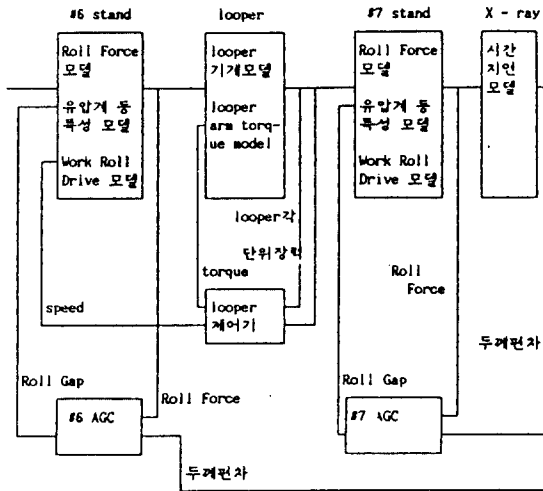


그림 4-1 Simulation 개략

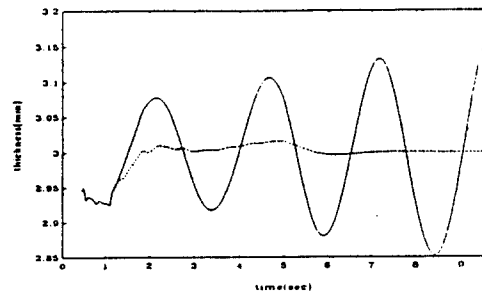


그림 4.4

참고 문헌

- [1] Davy McKee POSCO No.2 HSM AGC and REC Maintenance Manual, section 7
- [2] G. Zames and B. Francis: "Feedback, Minimax Sensitivity and Optimal Robustness", IEEE Trans. on Automatic Control, AC-28, No.5 May 1983
- [3] J. Freudenberg and D. Looze: "Right Half Plane Poles and Zeros and Design Tradeoffs in Feedback Systems", IEEE Trans. on Automatic Control, AC-30, No.6, June 1985
- [4] G. Zames: "Feedback and Optimal Sensitivity: Model Reference Transformations, Multiplicative Seminorms, and Approximate Inverse", IEEE Trans. on Automatic Control, AC-26, No.2, April 1981
- [5] H. Kwakernaak: "Minimax Frequency Domain Performance and Robustness Optimization of Linear Feedback Systems", IEEE Trans. on Automatic Control, AC-30, No.10, October 1985
- [6] M. J. Grimble: "Extensions to H_{∞} Multivariable Robust Controllers and the Relationship to LQG Design Problems", Int. J. of Control, Vol. 50, No.1, 1989
- [7] AGC 제어 LOOPER SYSTEM 기술 사양서, 포항 포항종합제철주식회사, 1983.

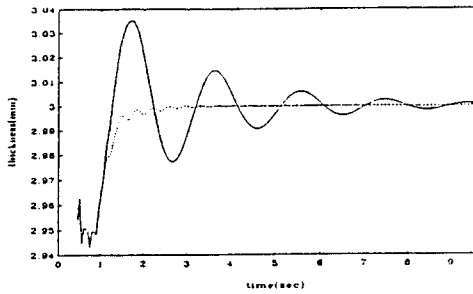


그림 4.2

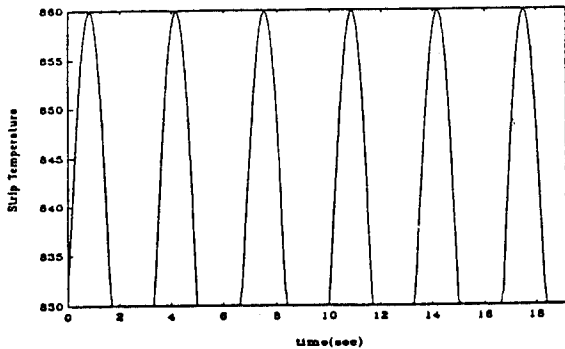


그림4.3