

# 냉간압연 공정에서의 출측 판두께제어

류 석환

대구대학교 전자공학과

Exit Strip Gauge Control for a Cold Rolling Process

S. H. Yoo

Dept. of Electronic Eng'g, Taegu Univ.

## Abstract

This paper deals with an exit strip gauge controller design for a cold rolling mill process with one input and two outputs. In order to attenuate the exit strip gauge variation caused by the Back-up roll eccentricity and the entry gauge variation, an  $H^\infty$  controller design methodology is used to keep the frequency weighted mixed sensitivity function small. Effectiveness of the proposed controller is demonstrated by a computer simulation.

## 1. 서론

제철산업에서 최종단계로 볼수있는 냉간압연 공정은 열간 압연제품을 소재로하여 상온에서 수요가가 요구하는 치수로 최종적으로 마무리하는 마지막의 압연단계이다. 따라서, 점점 엄격해지는 수요가의 두께허용범위를 충족시키기 위해서는 냉간압연공정에서의 두께제어계의 제어성능 향상이 필수적이며, 이를 위하여 우수한 선진제철소에서는 많은 연구가 계속 수행되고있다.

냉연 두께제어계의 성능을 열화시키는 요인으로는 여러가지가 있으나, 그중에서도 i) 입축소재(열연제품)의 두께변동 및 경도변동, ii) 압연 롤의 편심(roll eccentricity), iii) 측정기의 시간지연, iv) 누유동에 의한 유압계의 경시적인 특성변화, v) 압연 스탠드간의 압연재 장력변동 등을 들 수 있다. 이러한 성능열화의 요인을 보상하기 위하여 많은 제어 알고리즘이 현재의 냉연 두께제어계에 사용되고있다. 통상 널리 사용되는 연속냉연제어계에서는 압연기 입측에 설치된 두께측정기를 사용하여 피드포워드(feed forward)로 유압계의 불간격을 조정하는 피드포워드제어, 압연하중을 측정하여 사용하는 압연하중(Roll Force) AGC(Automatic Gauge Control), 정상상태 오차 제거를 위하여 압연기 출측의 두께 측정기를 사용하는 모니터(monitor) AGC등을 결합하여 사용하고있다. 압연하중 AGC로는 입축소재의 두께변동이나 경도변동과 같은 외란의 존재에도 우수한 제어성능을 갖고있으며 또한 제어 알고리즘이 아주 간단한 영국 철강 연구 협의회에

서 개발한 BISRA( British Iron and Steel Research Association) AGC를 대다수의 두께제어계에 사용되고 있지만 편심성분에 의한 출측두께변동을 증폭시키는 단점이 있다. 편심이란 압연 롤의 기하학적 중심과 축 중심의 불일치로 기인하며 특히 상하부의 백업(Back-up) 롤의 편심이 문제가 되며 출측 두께에서의 편심의 영향은 크기가 수 마이크론(micron)정도이고 주파수가 백업 롤의 회전주파수에 상당하는 정현파형의 두께편차를 야기시킨다. 비록 편심의 영향이 단지 수 마이크론정도의 두께편차를 발생시킨다 할지라도 두께 치수가 극히 얇은 극박제품의 경우에는 편심영향의 제거가 제품이 두께 허용공차 범위내에 들기위한 필수요건이며, 따라서 최근 편심영향을 제거하기 위한 많은 연구가 수행되고 있다. [1][2][3]

모니터 AGC는 압연기 출측의 두께측정기로 부터의 두께편차를 측정하여 초기설정치 계산오차가 존재할 경우 BISRA AGC만으로는 제거가 불가능한 정상상태 오차를 제거함이 목적이다. 통상 PI(Proportional and Integral) 제어기로 구성되어 있으나, 최근에는 현대제어이론을 사용한 모니터 AGC를 많이 연구하고있다. [4]

그러나 실제 제어모델은 압연롤의 간격설정치를 입력으로 하고, 압연하중과 출측 두께를 출력으로하는 SIMO(Single Input Multi Output)계통인데 반하여 대부분의 압연하중 AGC와 모니터 AGC는 SISO(Single Input Single Output)계통에 대한 제어기 설계기법을 사용하여 별개로 설계되었으므로 실제 압연하중 AGC와 모니터 AGC가 동시에 사용되었을시의 총체적인 페루프 시스템의 성능평가는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 SIMO 제어모델을 사용하여, 압연 롤의 편심성분으로 기인하는 출측 두께변동을 제거하고 입축소재의 두께변동으로 인한 출측두께의 변동을 가급적 억제하는 두께 제어기를 설계하고자 한다. 본 논문의 구성은 2절에서 냉간 압연계의 두께제어기 설계를 위한 간단한 제어모델을 결정하고 제어문제를 정식화하고, 3절에서는 제어기 설계방법이 기술되고 4절에서는 제안된 제어기의 효용성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 입증하고 5절에 결론을 맺는다.

## 2. 제어 모델 및 제어문제 설정

압연 스탠드에서의 압연현상은 압연기를 구성하고있는 밀 (mill)의 탄성과 압연재의 특성특성에 의해 주로 지배되며, 다음의 비선형 방정식으로 표시할 수있다. [5]

$$F(t) = f_1(H(t)-h(t)) \quad (2-1)$$

$$h(t) = f_2(S(t), F(t)) \quad (2-2)$$

여기에서  $F(t)$ ,  $H(t)$ ,  $h(t)$  및  $S(t)$ 는 압연하중, 압축소재 두께, 출측두께 및 압연 롤의 간격을 의미한다.

$F(t)$ ,  $H(t)$ ,  $h(t)$ ,  $S(t)$ 의 초기설정치를  $F_0$ ,  $H_0$ ,  $h_0$ ,  $S_0$ 라 할때, 초기설정치에 대하여 선형화하면 (2-1)과 (2-2)는 다음과 같다.

$$\Delta F(t) = Q (\Delta H(t) - \Delta h(t)) \quad (2-3)$$

$$\Delta h(t) = \Delta S(t) + \Delta F(t) / M \quad (2-4)$$

여기에서  $\Delta F(t) = F(t) - F_0$ 이며,  $\Delta H(t)$  및  $\Delta S(t)$ 도 유사하게 정의한다.  $Q$ 는 초기설정치에서의 압연재 소성계수이고,  $M$ 은 밀 하우스징(mill housing)을 포함한 압연기의 스프링 상수이다.

기호의 간략화를 위해  $\Delta F(t)$ ,  $\Delta S(t)$ ,  $\Delta h(t)$ 를  $F(t)$ ,  $S(t)$ ,  $h(t)$ 로 표기하기로하고,  $\cdot(t)$ 는 시간영역에서의 변수를  $\cdot(s)$ 는 라플라스 변환 영역에서의 변수로 정의한다.

압연 롤의 편심이 압연 롤간격에 미치는 영향을  $e(t)$ 라 할때, (2-4)를 (2-3)에 대입하여  $h(t)$ 를 소거하면

$$F(t) = \frac{MQ}{M+Q} (H(t) - S(t) - e(t)) \quad (2-5)$$

$$h(t) = S(t) + F(t) / M + e(t) \quad (2-6)$$

이 된다.

유압계의 전달함수를  $G(s)$ 라 하고, 압연기 출측 두께측 정기의 측정치를  $h_x(s)$ , 측정시간 지연을  $d$  초라 하면 (2-5)와 (2-6) 및  $h_x(s) = \exp(-ds) h(s)$ 로부터

$$F(s) = - \frac{MQ}{M+Q} G(s) u(s) + \frac{MQ}{M+Q} (H(s) - e(s)) \quad (2-7)$$

$$h_x(s) = - \frac{M}{M+Q} G(s) \exp(-ds) u(s) + \frac{\exp(-ds)}{M+Q} (Q H(s) + M e(s)) \quad (2-8)$$

이 된다.

(2-7)과 (2-8)에서  $H(s)$ 는 압축소재의 두께변동을,  $e(s)$ 는 편심성분을 나타내고 두께제어기의 설계는 i) 측정신호  $F(s)$ 의  $h_x(s)$ 로부터 출측두께에 대한  $e(s)$ 의 영향을 제거하고, ii)  $H(s)$ 의 영향을 가능한 억제하고, iii) 유압계 모델  $G(s)$  및  $M, Q$ 의 불확실성에 견실한 제어입력  $u(s)$ 를 결정하는 문제가된다. 이 제어문제의 접근방법중 하나로서 외란  $w(s) = [H(s) e(s)]^T$ 에 대한 가중 혼합 민감도함수(weighted

mixed sensitivity function)의  $H_\infty$  norm을 적정치 이하로 제한함으로써 해결 가능하다. 이를 위하여 다음의 블록선도를 생각한다.

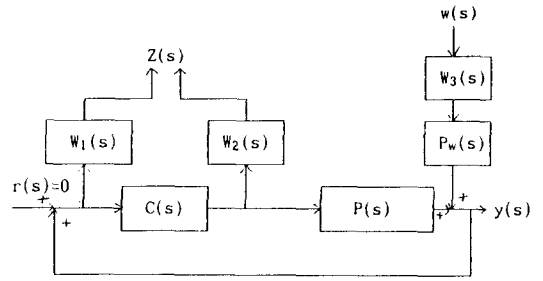


그림 1 냉연 제어계 블록선도

여기에서

$$y(s) = [F(s)/M \ h_x(s)]^T$$

$$P(s) = \begin{bmatrix} -\frac{Q}{M+Q} G(s) \\ -\frac{M}{M+Q} G(s) \exp(-ds) \end{bmatrix}$$

$$P_w(s) = \begin{bmatrix} \frac{Q}{M+Q} & -\frac{Q}{M+Q} \\ \frac{Q}{M+Q} \exp(-ds) & \frac{M}{M+Q} \exp(-ds) \end{bmatrix}$$

이고  $W_1(s)$ ,  $W_2(s)$ ,  $W_3(s)$ 는 적절히 선정될 가중함수이며 가중 혼합 민감도함수  $Z(s)$ 는  $C(s)$ 를 두께제어기의 전달함수라 할때

$$Z(s) = \begin{bmatrix} W_1(s)(I-P(s)C(s))^{-1}P_w(s)W_3(s) \\ W_2(s)C(s)(I-P(s)C(s))^{-1}P_w(s)W_3(s) \end{bmatrix}$$

이된다.

### 3. 제어기 설계

가중 혼합 민감도함수의  $H_\infty$  norm 최적화를 위해서는 주파수영역에서는 2-block 문제로 변환후 반복계산을 통하여 최적화할 수 있으나 [6][7][8], 계산시간이 많이 걸리고 계산과 정중에 전달함수 행렬의 극점과 영점의 상쇄(pole-zero cancellation)에 각별한 주의를 기울이지 않으면 제어기의 차수가 커져 많은 계산상의 오차를 수반한다. 따라서 본 연구에서는 Glover와 Doyle의 상태공간에서의 설계방법을 이용하여 가중 혼합 민감도함수의  $H_\infty$  norm이 적정값 이하가 되도록 하는 준최적해를 구하고자한다.

### 3.1 유압계 공칭 전달함수 설정

유압계의 전달함수는 유압 펌프의 사용 갯수, 누유정도에 따라 경시적으로 변화하며 공칭 전달함수를 결정하기 위하여 그림 2에 도시된 포항종합제철소 제1냉연 공장의 유압기 주파수 특성실험으로부터 2차 모델로 근사화한다.

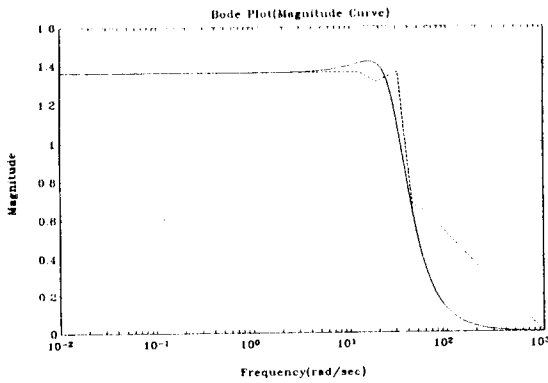


그림 2 유압계 주파수 응답

속정기 시간지연  $d$ 는 압연 롤 출측으로부터 속정기 사이의 이격거리와 압연속도에 의하여 결정되며 이격거리는 고정되어 있으나 압연속도는 압연재의 종류 및 치수에 따라 변화하므로 백업 롤의 회전 각속도  $\omega$ 를 매개변수로 하여 2차 Pade 근사하여 유리화한다.

### 3.2 가중함수의 선정

#### 1) $W_1(s)$

압연 롤에 편심이 존재할 경우 출측 두께뿐만 아니라 압연하중에도 각속도  $\omega$ 의 정현파형 진동성분이 포함된다. 따라서 출측두께에 대한 편심성분의 영향을 억제하기 위해 압연하중의 외란에 대한 민감도가 각속도  $\omega$ 에서 아주 작도록 하고, 정상상태 편차를 제거하기 위하여 출측두께의 외란에 대한 민감도가 각속도 0에서 아주 작도록  $W_1(s)$ 를 다음과 같이 결정한다.

$$W_1(s) = \begin{bmatrix} \frac{k_1 s}{(s+0.01)^2 + \omega^2} & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{s+0.00001} \end{bmatrix}$$

여기에서  $k_1, k_2$ 는 적절히 선정될 상수이다.

#### 2) $W_2(s)$

유압기 전달함수의 불확실성과 시간지연함수의 유리함수 근사에서의 고주파 영역에서의 오차에 대해서도 설계된 제어기의 견실성을 확보하기 위하여 고주파 영역에 더 큰가중치를 주도록 다음과 같이 선정한다.

$$W_2(s) = s + 1$$

#### 3) $W_3(s)$

외란에 대한 가중함수는 압축소재의 두께변동에 대해서는 저주파 통과 필터로 편심성분에 대해서는 고주파 통과 필터의 형태로서 백업 롤의 회전각속도  $\omega$ 를 매개변수로 하여 다음과 같이 선정한다.

$$W_3(s) = \begin{bmatrix} 0.01 \frac{(s+2\omega)^2}{(s+0.2\omega)^2} & 0 \\ 0 & 0.05 \frac{(s+0.2\omega)^2}{(s+\omega)^2} \end{bmatrix}$$

### 3.3 제어문제의 등가변형

제어기를 Glover-Doyle의 상태공간에서의 해법을 적용하기 위해서는 그림 1의 블록선도를 등가의 상태방정식으로 표현하여야 한다. 그러나, 가중함수  $W_2(s)$ 가 proper하지 않으므로 상태방정식에서의 표현이 불가능하다. 따라서 그림 1의 블록선도를 상태방정식의 표현이 가능한 등가의 블록선도로 재구성한다.

$$W_{2a}(s) = W_2(s) R(s)$$

라 정의한다. 여기에서  $R(s)$ 는  $W_{2a}(s)$ 가 proper 하도록 하는 임의의 strictly proper한 전달함수이다. 그림 3의 블록선도를 생각하면

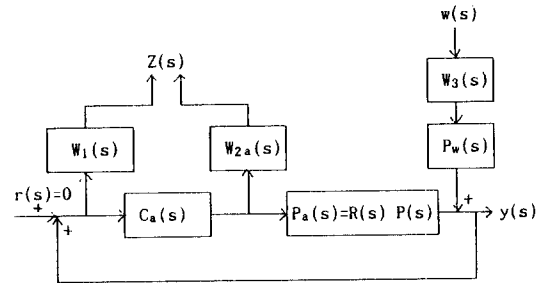


그림 3 등가 블록선도

$P_a(s)$ 와  $W_{2a}(s)$ 가 proper하므로 그림 3의 블록선도는 상태변수로 표현가능하고 그림 1의 최적 제어기  $C(s)$ 는 그림 3으로부터 구한 최적제어기  $C_a(s)$ 와  $R(s)$ 로부터 다음과 같이 구한다. [9]

$$C(s) = R(s) C_a(s) \quad (3-1)$$

### 3.4 $H_\infty$ 제어기

그림 3으로부터 얻어진 표준형의 상태공간 모델을 생각한다.

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \quad (3-2)$$

$$z(t) = C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t) \quad (3-3)$$

$$y(t) = C_2 x(t) + D_{21} w(t) + D_{22} u(t) \quad (3-4)$$

여기에서  $x(t) \in R^n$ ,  $w(t) \in R^{m_1}$ ,  $u(t) \in R^{m_2}$ ,  $z(t) \in R^{p_1}$ ,  $y(t) \in R^{p_2}$ 이다.

가정 1)  $(A, B_2, C_2)$ 는 stabilizable하고 detectable하다.

$$2) \text{rank}(D_{12}) = m_2, \text{rank}(D_{21}) = p_2$$

$$3) D_{12} = [0 \ I_{m_2}]^T, D_{21} = [0 \ I_{p_2}]$$

4) 모든  $\omega \in R$  에 대해서,

$$\text{rank} \begin{bmatrix} A - j\omega I & B_2 \\ C_1 & D_{12} \end{bmatrix} = n + m_2$$

$$\text{rank} \begin{bmatrix} A - j\omega I & B_1 \\ C_2 & D_{21} \end{bmatrix} = n + p_2$$

$$5) D_{11} = 0, D_{22} = 0$$

$$\text{정의 1) } R_1 = D_{11}^T D_{11} - \begin{bmatrix} \gamma^2 I_{m_1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, D_{11} = [D_{11} \ D_{12}]$$

$$R_2 = D_{11} D_{11}^T - \begin{bmatrix} \gamma^2 I_{p_1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, D_{11} = [D_{11}^T \ D_{21}^T]^T$$

2) 다음의 대수 Riccati 방정식의 해를  $X_\infty, Y_\infty$  라한다.

$$\begin{aligned} & X_\infty(A - BR_1^{-1}D_{11}^T C_1) + (A - BR_1^{-1}D_{11}^T C_1)^T X_\infty \\ & - X_\infty B R_1^{-1} B^T X_\infty + C_1^T (I - D_{11} R_1^{-1} D_{11}^T) C_1 = 0 \\ & Y_\infty(A - B_1 D_{11}^T R_2^{-1} C) + (A - B_1 D_{11}^T R_2^{-1} C)^T Y_\infty \\ & - Y_\infty C^T R_2^{-1} C Y_\infty + B_1 (I - D_{11}^T R_2^{-1} D_{11}) B_1^T = 0 \end{aligned}$$

$$3) F_1 = [F_{11}^T \ F_{12}^T \ F_2^T]^T = -R_1^{-1}(D_{11}^T C_1 + B^T X_\infty)$$

$$H_1 = [H_{11} \ H_{12} \ H_2] = -(B_1 D_{11}^T + Y_\infty C^T) R_2^{-1}$$

여기에서  $F_{11}, F_{12}, F_2$ 는  $(m_1 - p_2) \times n, p_2 \times n, m_2 \times n$  행렬이고  $H_{11}, H_{12}, H_2$ 는  $n \times (p_1 - m_2), n \times m_2, n \times p_2$  행렬이다.

정리: [10]

가정 1) - 5)를 만족하는 시스템 (3-2) - (3-4)에 대해

1)  $\|Z(j\omega)\|_\infty < \gamma$  를 만족하는 내부적으로 안정화(internally stabilizable)하는 제어기  $C_a(s)$ 가 존재할 필요충분 조건은,

$X_\infty \geq 0, Y_\infty \geq 0, \rho(X_\infty Y_\infty) < \gamma^2$ 를 만족하는 정의 2)의 대수 Riccati 방정식의 해가 존재한다.

여기에서  $\rho(\cdot)$ 는 스펙트럼 반경이다.

2) 상기 1)의 조건을 만족할때,  $\|Z(j\omega)\|_\infty < \gamma$  를 만족하는 내부적으로 안정화하는 제어기  $C_a(s)$ 중 하나는 다음의 상태공간 모델로 표시된다.

$$C_a(s) : (A_c, B_c, C_c)$$

$$A_c = A + H_1 C + (B_2 + H_{12}) F_2 (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1}$$

$$B_c = -H_2$$

$$C_c = F_2 (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1}$$

### 3.5 제어기 차수 축소화

그림 3의 블록선도에 대한 등가 상태공간 모델로부터 설계된 제어기로부터 (3-1)을 이용하여 구한 제어기  $C(s)$ 를

$$C(s) = [C_1(s) \ C_2(s)]$$

라 할때  $C_1(s)$ 는 압연하중 AGC,  $C_2(s)$ 는 모니터 AGC가 된다.

그러나 상기 방식에 의해 구한  $C_1(s)$ 와  $C_2(s)$ 는 실시간으로 사용하기 위해 제어기의 차수(order)를 가급적 적게 축소시킬 필요가 있다. 제어기의 차수를 축소시키는 방법으로는 여러가지가 있으나[11][12], 본 연구에서는 저주파 영역에서의 페루프 시스템의 특성을 거의 변화시키지 않도록 다음과 같이 제어기의 차수를 축소한다. 예를 들어 차수가  $n$ 인 제어기  $C_1(s)$ 를 차수가  $k < n$ 인 제어기로 축소하고자 할때  $C_1(s)$ 의 균형화(balanced)된 상태공간 모델을

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{c1}(t) \\ \dot{x}_{c2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{c11} & A_{c12} \\ A_{c21} & A_{c22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{c1}(t) \\ x_{c2}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{c1} \\ B_{c2} \end{bmatrix} u_c(t)$$

$$y_c(t) = [C_{c1} \ C_{c2}] \begin{bmatrix} x_{c1}(t) \\ x_{c2}(t) \end{bmatrix} + D_c u_c(t)$$

라 할때, 다음과 같이 차수가  $k$ 인 제어기  $C_{r1}(s)$ 를 얻는다.

$$x_{c1}(t) = (A_{c11} - A_{c12} A_{c22}^{-1} A_{c21}) x_{c1}(t)$$

$$+ (B_{c1} - A_{c12} A_{c22}^{-1} B_{c2}) u_c(t)$$

$$y_c(t) = (C_{c1} - C_{c2} A_{c22}^{-1} A_{c21}) x_{c1}(t)$$

$$+ (D_c - C_{c2} A_{c22}^{-1} B_{c2}) u_c(t)$$

여기에서  $x_{c1}(t) \in R^k, x_{c2}(t) \in R^{n-k}$  이다.

### 4. 시뮬레이션

이절에서는 3절에서 기술된 설계절차에 의한 두께제어기의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 판정한다. 본 시뮬레이션에서 사용된 공칭 플랜트는 다음의 표1과 같다.

압연기 스프링 상수 M :	534 ton/mm
압연재 소성계수 Q :	178 ton/mm
입측소재 두께 :	2.0 mm
압연 물 출측에서 두께측정기	
까지의 거리 :	1.2 m
상부 백업 롤 직경 :	1420 mm
상부 백업 롤 편심 진폭 :	0.005 mm
하부 백업 롤 직경 :	1380 mm
하부 백업 롤 편심 진폭 :	0.005 mm

표1 공칭 플랜트

백업 물의 회전수가 120rpm,  $W_1(s)$ 의 조정 상수를  $k_1=50, k_2=10, \gamma=0.68$  으로 정하고, 3.4절의 가정 3)을 충족하도록 입력과 출력에 적절한 변환을 수행한 후 2개의 대수 Riccati 방정식의 해를 구하여 제어기를 먼저 구한다. 3.5절의 방법에 의거 압연하중 AGC를 4차로 모니터 AGC의 차수를 3차로 근사화하면 두께제어기의 전달함수 행렬  $C(s)$ 는

$$C(s) = \begin{bmatrix} 0.027s^4 - 1.46s^3 - 15.9s^2 - 863s - 4498 \\ s^4 + 9.2s^3 + 199s^2 + 1446s + 6528 \\ -0.00667s^3 + 0.384s^2 + 4.128s - 14.26 \\ s^3 + 6.341s^2 + 28.7s + 0.0003 \end{bmatrix}^T \quad (4-1)$$

이다.

차수 축소된 제어기의 페루프 시스템 특성을 비교하기 위하여 입축소재 두께변동에 대한 출축두께의 민감도를 그림 4에 나타내었으며 여기에서 실선은 차수 축소 전의 점선은 차수 축소 후의 민감도를 표시한다. 백업 롤 편심성분에 대한 출축두께의 민감도는 그림 5에 나타내었으며, 이 경우 제어기의 차수를 축소하더라도 민감도에는 거의 영향이 없음을 보여주며, 특히 주파수가 편심 주파수 12.5 rad/sec 근처에서 민감도가 아주 적으며, 이는 편심성분에 의한 출축두께 변동을 억제할 수 있음을 의미한다.

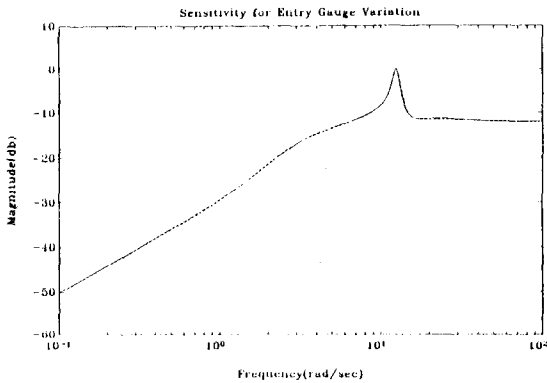


그림 4 입축소재 두께변동에 대한 출축두께 민감도

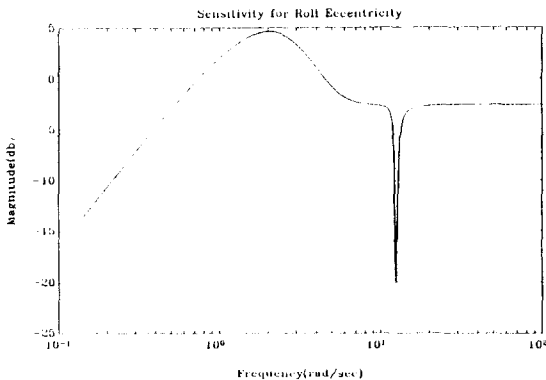


그림 5 편심성분에 대한 출축두께 민감도

입축 소재두께 변동분의 power spectrum  $S_{HH}(\omega)$ 를 다음과 같이 가정하고,

$$S_{HH}(\omega) = \frac{6.25 \times 10^{-4}}{\omega^2 + 6.25}$$

시간 영역에서 출축두께의 변동을 조사하기 위하여, 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구에서 제시한 두께제어기를 사용했을 때의 출축두께 변동을 그림 6에 표시하였으며, 기존 제어방식과의 성능차이를 쉽게 비교하기 위해 20초 - 60초 동안만 (4-1)의 제어기를 사용하였다. 예상된 바와 같이 편심성분, 입축소재 두께변동에 의한 출축두께의 변동이 본 연구에서 제시한 두께제어기를 사용한 구간 동안에는 현격히 감소하였음을 관찰 할 수 있다.

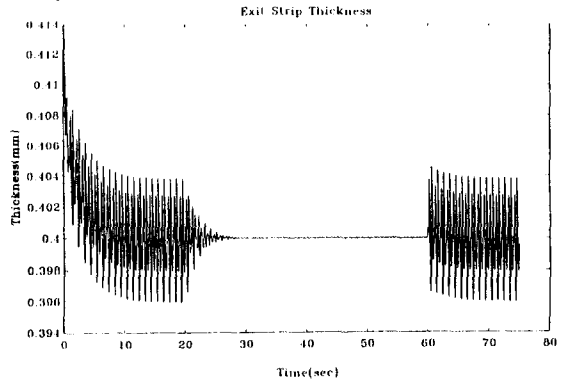


그림 6 시간영역 출축두께 변동

## 5. 결론

냉간 압연 계통의 제어모델을 SIMO계통으로 모델하여 최근 활발히 연구가 진행되고 있는  $H_\infty$  제어 이론을 사용하여 제어기를 설계하였으며 이를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 제어기의 효용성을 입증하였다. 제어기 설계 단계에서 주파수 가중함수는 측정 가능한 백업롤 회전주파수  $\omega$ 를 매개변수로 하여 선정하였으며, 실제 냉간압연 시스템에 적용 시에는 (4-1)의 전달함수 행렬을 매개변수  $\omega$ 에 대해서 이득 조정 (gain scheduling)하여 사용할 경우 압연속도의 변화에 따라 대처할 수 있을 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- [1] A. Kitamura, T. Takahashi, K. Nose and M. Konishi: "Roll Eccentricity Control Based on Recursive Estimation Technique", system 제어정보학회 논문지, Vol. 2, No. 9, pp. 287 - 300, 1989
- [2] A. Kitamura, T. Takahashi, K. Nose and M. Konishi: "Recursive Identification Technique for Roll Eccentricity Control", 10th World Congress on Automatic Control, Munich, July 27 - 31, pp. 126 - 131, 1987

- [3] W. Edwards, P. Thomas and G. Goodwin: "Roll Eccentricity Control for Strip Rolling Mills", 10th World Congress on Automatic Control, Munich, July 27 - 31, pp. 200 - 211, 1987
- [4] K. Takizawa, I. Takahashi, T. Nakada: "Development of an Optimum Gain Control System for AGC", R&D Kobe Steel Eng. Reports, Vol.33, No.4, 1983
- [5] 포항종합제철주식회사, AGC 제어 System, 1982
- [6] M. Vidyasagar: "Control System Synthesis: A Coprime Factorization Approach", The MIT Press, 1985
- [7] B. Francis: "A Guide to  $H_\infty$  Control Theory", Modelling, Robustness and Sensitivity Reduction in Control Systems, edited by R. Curtain, pp. 1 - 30, 1987
- [8] B. Francis, J. Helton and G. Zames: " $H_\infty$  Optimal Feedback Controllers for Linear Multivariable Systems", IEEE Trans. on Automatic Control, AC - 29, pp. 888 - 900, 1984
- [9] J.M Krause: "Comments on Grimble's Comments on Stein's Comments on Rolloff of  $H_\infty$  Optimal Controllers", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.37, No.5, pp. 702, May 1992
- [10] K. Glover and J.C. Doyle: "State-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an  $H_\infty$  norm bound and relations to risk sensitivity", Syst. and Control Letters, Vol.11, pp. 167 - 172, 1988
- [11] K. Glover: "All Optimal Hankel Norm Approximations of linear multivariable systems and their  $L_\infty$  error bounds", Int. J. Control, Vol.39, pp. 1115-1193, 1984
- [12] U. Al-Saggaf and G. Franklin: "Model reduction via balanced realizations: an extension and frequency weighting techniques", IEEE Trans. on Automatic control, Vol.33, pp. 687 - 691, 1988