

〈論 文〉

# 연속 냉간압연 시스템을 위한 비간섭 루프형성 LQ제어기 설계

김증식\* · 김철민\*\*

(1994년 5월 7일 접수)

## Noninteracting and Loop-Shaping LQ Controller Design for Tandem Cold Mills

Jong Shik Kim and Cheol Min Kim

**Key Words :** Blocked-Noninteracting Control(블록화 비간섭제어), Loop-Shaping LQ Control(루프형성 LQ제어), Thickness Control(두께제어), Tandem Cold Mills(연속 냉간 압연기)

### Abstract

A robust multivariable controller is synthesized for tandem cold mills. A blocked-noninteracting control method is applied for simplifying the structure of rolling control systems. And, a loop-shaping LQ control method is applied for maintaining the variation of the thickness and tension of each rolling stand as small as possible. In this paper, the effects of the design parameter on loop-shaping and the number of control inputs are evaluated. The simulation results show that the thickness and tension control accuracy of tandem cold mills can be improved by the blocked-noninteracting and compensated loop-shaping LQ controller.

### 1. 서 론

연속압연기는 압연스탠드가 연속적으로 배열된 대규모의 시스템이며 또한 각 압연스탠드 사이에서 압연재의 흐름에 기인하는 시간지연으로 인해 비선형 특성을 가지고 있다. 이러한 이유로 연속압연기 전체를 통합적으로 제어하는 것은 극히 어렵다. 따라서 압연스탠드 사이의 간섭효과를 무시하고 각 압연스탠드에서 독립적으로 출측 판두께 및 장력에 대한 제어기를 설계하여 연속압연기에 대한 압연 제어시스템을 구축하는 것이 효과적이다. 압연스탠드 사이에 존재하는 간섭효과는 블록화 비간섭제어(blocked-noninteracting control)<sup>(1)</sup>를 이용하여 소소거시킬 수 있다.

종래의 압연제어 시스템에서는 각 압연스탠드에

대한 제어기를 설계할 때, 압연현상의 고유한 특성에 기인하는 판두께와 장력간의 강한 연성효과를 고려하지 않고 단일 입출력 제어이론에 근거하여, 판두께와 장력에 대한 제어기를 개별적으로 설계하므로 큰 성능향상을 기대하기 어렵다. 그리고 압연시스템의 비선형성, 압연이론의 불확실성, set-up 오차 그리고 영향계수 오차 등으로 인한 수학적 모델의 불확실성에 대한 안정도-강인성(stability-robustness)<sup>(2)</sup>를 충분히 고려할 수 없다는 문제점도 가지고 있다. 또한 비간섭제어에 있어서도 압연스탠드 간의 간섭효과를 충분히 소거시키지 못하는 경우가 많았다.

본 논문에서는 연속 압연시스템의 다변수 특성과 안정도-강인성 문제를 고려하여 각 압연스탠드에 대해 루프형성(loop-shaping)기법<sup>(3)</sup>에 의한 LQ제어기와 압연스탠드 사이의 간섭을 소거시킬 수 있는 비간섭 제어기를 각각 설계하기로 한다. 루프형성 LQ제어기 설계시 판두께와 장력에 대한 제어

\*정회원, 부산대학교 기계설계공학과

\*\*부산대학교 기계기술연구소

성능을 극대화하기 위해 루프형성을 위한 설계 파라미터에 보정항의 추가를 제안한다. 또한 비간섭 제어기의 성능향상을 위해 장력의 시간변화율에 직접 영향을 줄 수 있는 새로운 제어입력을 추가한 압연 제어시스템의 성능을 평가한다. 그리고 압연 시스템의 외란으로 압연모재의 판두께와 롤갭의 변동을 고려하고 이에 대한 압연기 출측 판두께 변동을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 조사하여 새로운 압연제어 시스템의 외란제거 성능을 평가하기로 한다.

## 2. 연속 냉간압연 시스템의 모델링

압연공정은 Fig. 1에 표시된 바와 같이 다수의 롤로 구성된 압연스탠드 사이를 통과하는 재료의 두께를 감소시키는 생산공정이다. 롤갭과 롤속도를 적절히 조절하여 외란이 존재하더라도 스탠드 출측의 판두께가 일정하게 유지되도록 한다. 본 논문에서는, 이와 같은 압연스탠드가 연속적으로 배열되어 압연모재의 판두께를 순차적으로 감소시키는 연속 냉간 압연기에 대해 관심을 갖기로 한다.

### 2.1 Set-up 연산

Set-up 연산은 주어진 압연생산계획, 즉 압연될 모재의 판두께와 판폭, 압연기 출측에서 요구되는 판두께와 판속도에 대해 각 스탠드의 압하율을 결

정하고 주어진 압하율에 의해 압연인자들의 작동점을 계산하는 과정이다. 주요한 압연인자인 선진율은 Bland와 Ford의 선진율 식<sup>(4)</sup>을 그리고 압연하중의 예측은 Hill의 압연하중이론 식<sup>(5)</sup>을 각각 이용하였다.

### 2.2 영향계수 연산

각 스탠드의 압연하중과 선진율은 입출측 판두께, 전후방 장력, 재료변형저항, 마찰계수 등의 함수이다. 각 스탠드의 압연하중  $P_{Ai}$ 와 선진율  $f_i$ 를 각각 출측 판두께  $h_i$ , 입측 판두께  $H_i$ , 후방장력  $T_{bi}$  그리고 전방장력  $T_{fi}$ 의 함수로 가정하였다.

$$\text{압연하중 식 : } P_{Ai} = P_A(h_i, H_i, T_{bi}, T_{fi}) \quad (1)$$

$$\text{선진율 식 : } f_i = f(h_i, H_i, T_{bi}, T_{fi}) \quad (2)$$

Set-up 연산에서 결정된 작동점으로부터 비선형식인 압연하중 식과 선진율 식의 선형화를 위하여 각 스탠드에서 입측두께, 출측두께, 전방장력, 후방장력들의 미소변동에 대한 영향계수들의 계산이 요구된다. 여기서 미소변동량은 각 독립변수들의 작동점 값이 0.1%로 선정하였다.

### 2.3 상태공간 모델 식 설정

연속 냉간압연 시스템의 상태공간 모델식 설정을 위해서는 선진율 식과 압연하중 식을 포함한 다음과 같은 압연이론에 관한 기본식<sup>(1)</sup>들이 필요하다.

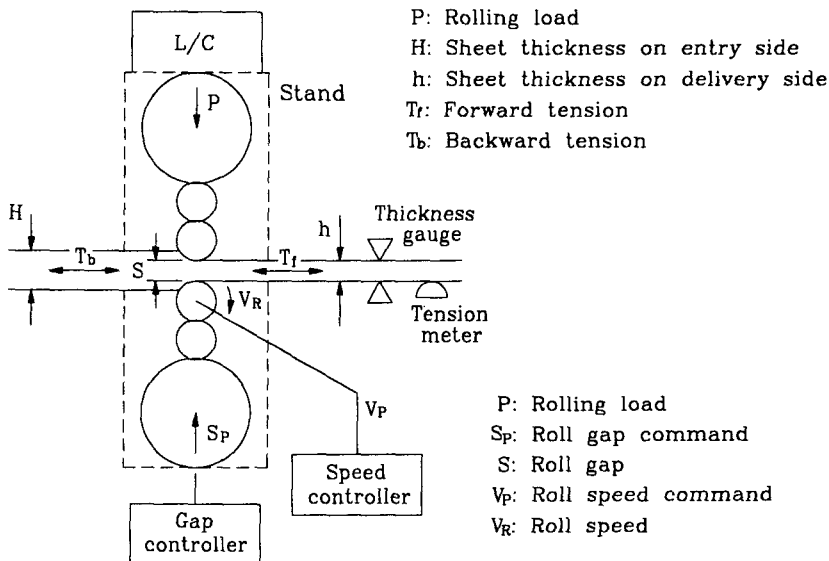


Fig. 1 Schematic diagram of the rolling process of a rolling stand

2.3.1 체적속도 일정 식

연속 압연공정이 정상상태에서 수행되고 있는 경우 압연재의 체적속도는 전 스탠드를 통해 일정하다고 생각할 수 있다. 한편 전 스탠드에 걸쳐 판폭의 변동량이 매우 작기 때문에 판폭은 일정하다고 가정한다.

$$H_i V_{ei} = h_i V_{oi} \quad (3)$$

여기서, 첨자  $i$ 는 각 스탠드를 나타낸다.

2.3.2 판속도 식

각 스탠드는 선진율  $f_i$ 는 물속도  $V_{Ri}$  및 출측 판속도  $V_{oi}$ 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$V_{oi} = (1 + f_i) V_{Ri} \quad (4)$$

2.3.3 스탠드 출측 판두께 식

각 스탠드 출측에서의 판두께  $h_i$ 는 무부하시 롤갭  $S_i$ , 압연하중에 의한 압연기의 탄성변형량  $P_i/K_i$  그리고 롤갭 변동  $S_{ri}$ 의 합으로 표시된다.

$$h_i = \frac{P_i}{K_i} + S_i + S_{ri} \quad (5)$$

여기서,  $K_i$ 는 Mill 상수이다.

2.3.4 장력 식

각 스탠드 사이에서 압연중인 판재에 작용하는 장력은 판속도의 차에 의해 결정된다.

$$\frac{dT_{bi+1}}{dt} = \frac{Ebh_i}{L} (V_{ei+1} - V_{oi}) \quad (6)$$

여기서,  $E$ 는 Young률이고  $b$ 와  $L$ 는 각각 판폭과 스탠드간의 거리이다.

2.3.5 압하계, 판속계 및 하우징 식

$$\frac{dS_i}{dt} = \frac{1}{T_{si}} (-S_i + S_{pi}) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_{i,1}}{dt} &= \left[ \frac{\partial \Delta P_{Ai}}{\partial \Delta h_i} \frac{1}{T_{pi} K_i} - \frac{1}{T_{si}}, -\frac{1}{T_{pi} K_i} + \frac{1}{T_{si} K_i}, 0, \frac{\partial \Delta P_{Ai}}{\partial \Delta T_{bi}} \frac{1}{T_{pi} K_i} \right] x_i + \left[ 0, 0, 0, \frac{\partial \Delta P_{Ai}}{\partial \Delta T_{fi}} \frac{1}{T_{pi} K_i} \right] x_{i+1} \\ &\quad + \left[ \frac{1}{T_{si}}, 0 \right] u + \left[ \frac{\partial \Delta P_{Ai}}{\partial \Delta H_i} \frac{1}{T_{pi} K_i}, \frac{1}{T_{si}} \right] w_i + [0, 1] \frac{dw_i}{dt} \\ \frac{dx_{i,2}}{dt} &= \left[ \frac{\partial \Delta P_{Ai}}{\partial \Delta H_i} \frac{1}{T_{pi}}, -\frac{1}{T_{pi}}, 0, \frac{\partial \Delta P_{Ai}}{\partial \Delta T_{bi}} \frac{1}{T_{pi}} \right] x_i + \left[ 0, 0, 0, \frac{\partial \Delta P_{Ai}}{\partial \Delta T_{fi}} \frac{1}{T_{pi}} \right] x_{i+1} + \left[ \frac{\partial \Delta P_{Ai}}{\partial \Delta H_i} \frac{1}{T_{pi}}, 0 \right] w_i \\ \frac{dx_{i,3}}{dt} &= \left[ 0, 0, -\frac{1}{T_{vi}}, 0 \right] x_i + \left[ 0, \frac{1}{T_{vi}} \right] u_i \\ \frac{dx_{i,4}}{dt} &= -\frac{Eb_i}{L_i} \left[ \frac{\partial \Delta f_{i-1}}{\partial \Delta h_{i-1}} h_{i-1} V_{Ri-1} - V_{oi-1}, 0, 0, \frac{\partial \Delta f_{i-1}}{\partial \Delta T_{bi-1}} h_{i-1} V_{Ri-1} \right] x_{i-1} \end{aligned}$$

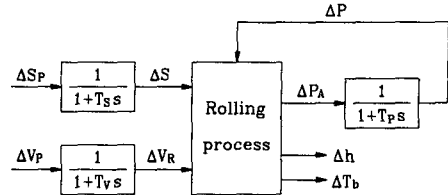


Fig. 2 Block diagram of the rolling process of a rolling stand

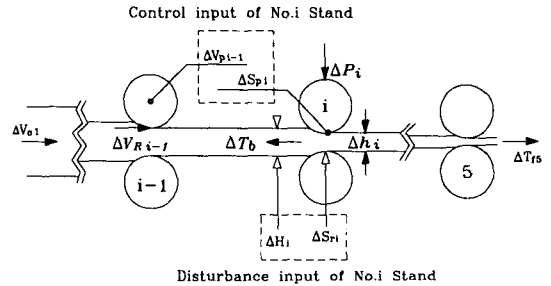


Fig. 3 State variables, control inputs and disturbance inputs of the system

$$\frac{dV_{Ri}}{dt} = \frac{1}{T_{vi}} (-V_{Ri} + V_{pi}) \quad (8)$$

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{1}{T_{pi}} (-P_i + P_{Ai}) \quad (9)$$

여기서,  $T_{si}$ ,  $T_{vi}$ ,  $T_{pi}$ 는 각각 압하계, 속도계, 하우징의 시정수이고  $S_{pi}$ 와  $V_{pi}$ 는 각각 롤갭과 롤속도 명령치이다. 그리고  $P_i$ 는 하우징에 의한 지연을 고려한 압연하중이다.

Fig. 2에는 이와 같은 압연현상의 입출력 관계, (6) 그리고 Fig. 3에는 각 압연스탠드에 대한 상태변수, 제어입력변수 및 외란변수들이 표시되어 있다. 위에 설명된 연속 압연이론에 관한 기본식들과 영향계수로부터 각 압연스탠드에 대한 상태방정식을 유도하면 다음과 같다. ( $i=1\sim5$ )

$$\begin{aligned}
 & + \frac{Eb_i}{L_i} \left[ \frac{\partial \Delta f_i}{\partial \Delta h_i} h_i V_{Ri} + V_{Ri} + V_{oi}, 0, -(1+f_{i-1}) h_{i-1}, \frac{\partial \Delta f_i}{\partial \Delta T_{bi}} h_i V_{Ri} - \frac{\partial \Delta f_i}{\partial \Delta T_{fi-1}} h_{i-1} V_{Ri-1} \right] x_i \\
 & + \frac{Eb_i}{L_i} \left[ 0, 0, (1+f_i) h_i, \frac{\partial \Delta f_i}{\partial \Delta T_{fi}} h_i V_{Ri} \right] x_{i+1} \\
 & + \frac{Eb_i}{L_i} \left[ \frac{\partial \Delta f_i}{\partial \Delta H_i} h_i V_{Ri}, 0 \right] w_i - \frac{Eb_i}{L_i} \left[ \frac{\partial \Delta f_{i-1}}{\partial \Delta H_{i-1}} h_{i-1} V_{Ri-1}, 0 \right] w_{i-1}
 \end{aligned} \tag{10}$$

또한, 연속 압연공정을 다음과 같은 상태공간 모델식으로 간략히 표현하기로 한다.

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_{i-1}x_{i-1}(t) + A_i x_i(t) + A_{i+1}x_{i+1}(t) + B_i u_i(t) + E_{i,i-1}w_{i-1}(t) + E_i w_i(t) + E_i^d \dot{w}_i(t) \\ y_i(t) = C_i x_i(t) \end{cases} \tag{11}$$

여기서, 시스템행렬  $A_{i,i-1}$  과  $A_{i,i+1}$ 은 각각 후방 스탠드와 전방 스탠드로부터 받는 영향을 나타내는 항이다. 그리고 상태벡터  $x_i$ , 제어입력벡터  $u_i$ , 외란벡터  $w_i$  그리고 출력벡터  $y_i$ 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 x_i &= \begin{bmatrix} \Delta h_i \\ \Delta P_i \\ \Delta V_{Ri-1} \\ \Delta T_{bi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{출측 판두께 변동 (mm)} \\ \text{압연하중 변동 (kgf)} \\ \text{롤속도 변동 (mm/s)} \\ \text{후방장력 변동 (kgf)} \end{bmatrix} \\
 u_i &= \begin{bmatrix} \Delta S_{pi} \\ \Delta V_{pi-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{롤갭 명령 변동 (mm)} \\ \text{롤속도 명령 변동 (mm/s)} \end{bmatrix} \\
 w_i &= \begin{bmatrix} \Delta H_i \\ \Delta S_{ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{입측 판두께 변동 (mm)} \\ \text{롤갭 변동 (mm)} \end{bmatrix} \\
 w_6 &= [\Delta T_{r5}] = \text{최종 스탠드 전방장력 변동 (kgf)} \\
 y_i &= \begin{bmatrix} \Delta h_i \\ \Delta T_{bi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{출측 판두께 변동 (mm)} \\ \text{후방장력 변동 (kgf)} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

### 3. 루프형성 LQ제어기 설계

#### 3.1 설계 사양

LQ제어 시스템의 안정도-강인성 시험<sup>(7)</sup>을 위해서는 플랜트 입력측으로 반영된 모델링 오차를 고려해야 하고 플랜트 입력측에서 절단한 페루프 전달함수행렬(TFM)  $C_i(s)$ 에 대하여 안정도-강인성 시험을 적용한다. 플랜트 입력측에서 절단한 페루프의 대역폭은 모델링 오차에 의해 제한을 받는다. 본 논문에서는 안정도-강인성을 유지하기 위하여 플랜트의 입력측에서 절단한 페루프 TFM  $C_i(s)$ 의 대역폭  $\omega_b$ 가 20 Hz ( $\cong 126$  rad/sec) 이하가 되도록 설계하기로 한다.

연속 냉간압연제어 시스템 설계의 주 목적인 외란제거 성능을 좋게 하기 위해서는 플랜트 출력측으로 반영된 외란이 에너지를 갖는 주파수역에서 플랜트 출력측에서 절단한 루프 TFM  $T(j\omega)$ 의 최소 특이값이 요구하는 외란제거 성능을 만족시킬

수 있는 값 이상으로 커야 한다.<sup>(8)</sup>

연속 압연시스템의 외란 중 입측에서의 모재 두께 변동이 가장 지배적이므로 연속 냉간압연제어 시스템 설계시 입측의 두께 변동으로 인한 출력측의 두께 변동을 최소화하는 데 중점을 두기로 한다. 연속 냉간압연에서 모재의 두께 변동은 일반적으로 1 Hz ( $\cong 6.3$  rad/sec) 이하에서 에너지를 가지므로 플랜트 출력측에서 절단한 루프 TFM  $T(j\omega)$ 의 최소 특이값이 6.3 rad/sec 이하의 저주파역에서 충분한 외란제거 성능을 갖도록 한다.

또한 제어 시스템이 센서잡음에 민감하지 않게 하기 위해서는 센서잡음이 에너지를 갖는 주파수역에서 플랜트 출력측에서 절단한 루프 TFM  $T(j\omega)$ 의 최대 특이값이 작게 되도록 하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 센서잡음에 대한 저감도 성능을 만족시키기 위해 60 Hz ( $\cong 377$  rad/sec) 보다 큰 고주파역에서 충분히 작은 값을 갖도록 한다.

#### 3.2 적분기의 추가

LQ레귤레이터 설계시 임의의 외란이 존재하더라도 적절한 허용범위 내에서 만족스러운 외란제거 성능을 갖기를 원하므로, 일반적으로 일정한 외란이 가해졌을 때 정상상태 오차가 발생하지 않도록 각 오차채널의 피드포워드(feed-forward) 루프에 적분기를 포함시킨다. 또한 적분기의 추가는 LQ 제어시스템의 설계 파라미터들을 선정할 때 여유자유도를 갖게 하여 좀더 만족스러운 루프형성을 할 수 있도록 한다. 적분기를 포함한 LQ제어 시스템을 설계하기 위해서는 우선 적분요소를 포함한 설계플랜트 모델을 설정해야 한다. 설계플랜트 모델은 2개 부분(플랜트와 적분기)의 동역학으로 구분된다.

플랜트 동역학 :

$$\begin{cases} \dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u(t) + E_p w(t) \\ y(t) = C_p x_p(t) \end{cases} \tag{13}$$

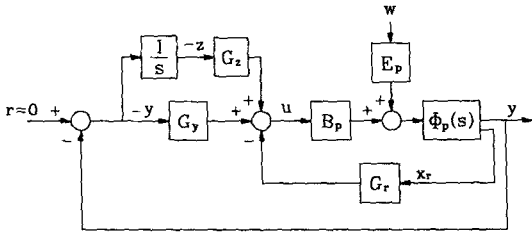


Fig. 4 Block diagram of the LQ regulator with integrator

여기서,

$$x_p(t) = [y(t) \ x_r(t)]^T$$

$$= [\text{출력변수} \ \text{나머지 상태변수}]^T \quad (14)$$

적분기의 동역학:

$$\dot{z}(t) = y(t) \quad (15)$$

여기서,  $z(t) \in R^p$ 는 플랜트 출력  $y(t)$ 의 적분값이다.

이제 증가된 상태벡터  $x(t) \in R^{n+p}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$x(t) = [z(t) \ y(t) \ x_r(t)]^T \quad (16)$$

이 때 설계플랜트 모델의 상태방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ew(t) \quad (17)$$

여기서,

$$x = \begin{Bmatrix} z \\ x_p \end{Bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & C_p \\ 0 & A_p \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_p \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ E_p \end{bmatrix} \quad (18)$$

그리고 설계플랜트 모델에 대한 LQ제어법칙  $u(t)$ 는 다음과 같다.

$$u(t) = -Gx(t) \quad (19)$$

여기서,

$$G = [G_z \ G_y \ G_r]$$

Fig. 4는 적분기를 포함한 LQ레귤레이터의 구조를 나타낸다.

### 3.3 루프형성기법에 의한 설계 파라미터 선정

루프형성기법을 LQ제어기 설계에 도입하면 명령 추종, 외란제거 등의 시스템 성능과 모델링 오차에 대한 안정도-강인성 문제를 설계시에 직접 고려할

수 있고, 또한 루프형성문제로서 설계 파라미터 선정에 융통성을 부여할 수 있게 된다. 한편 루프형성시 융통성을 갖기 위하여 일반적으로 플랜트 모델의 출력변수를 적분하는 제어요소를 추가하여 설계플랜트 모델을 설정한다. 이 때 설계플랜트 모델의 전달함수행렬(TFM)  $G(j\omega)$ 의 특이값을 저주파 및 고주파역에서 모든 방향에서 일치시킬 수 있게 되어 바람직한 성능 및 안정도-강인성을 갖는 LQ 제어 시스템을 보다 조적적이며 쉽게 설계할 수 있게 된다.

표준 LQ 및 루프형성 LQ레귤레이터의 가격함수  $J$ 는 각각 다음과 같다.

$$J = \int_0^\infty [x(t)^T Qx(t) + u(t)^T Ru(t)] dt \quad (20)$$

$$J = \int_0^\infty [x(t)^T N^T N x(t) + \rho u(t)^T u(t)] dt \quad (21)$$

루프형성 LQ 레귤레이터의 가격함수에 포함되어 있는 설계파라미터  $N (= [N_L \ N_H])$ 과  $\rho$ 는 표준 LQ 최적 제어문제의 가격함수와 비교해 보면  $Q = N^T N$ 이고  $R = \rho I$ 임을 알 수 있다.

이제 설계 파라미터  $N$ 을 선정하기 위해 다음과 같은 주파수역 등가식<sup>(9)</sup>을 이용하기로 한다.

$$\sigma_i [I + G_{LQ}(s)] = \sqrt{1 + \frac{1}{\rho} \sigma_i^2 [N(sI - A)^{-1} B]} \quad (22)$$

여기서,  $\sigma_i[\cdot]$ 는 행렬  $[\cdot]$ 의 특이값을 의미하며,  $G_{LQ}(s)$ 는 LQ루프 TFM으로서  $G_{LQ}(s) = C(sI - A)^{-1} B$ 이다. 그리고  $N(sI - A)^{-1} B$ 항은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} N(sI - A)^{-1} B &= N \left\{ \begin{bmatrix} sI & 0 \\ 0 & sI \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & C_p \\ 0 & A_p \end{bmatrix} \right\}^{-1} B \\ &= [N_L \ N_H] \begin{bmatrix} \frac{1}{s} I & \frac{1}{s} C_p (sI - A)^{-1} \\ 0 & (sI - A)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ B_p \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{s} N_L C_p (sI - A_p)^{-1} B_p + N_H (sI - A_p)^{-1} B_p \end{aligned} \quad (23)$$

위의 식으로부터 저주파 및 고주파에서  $N(sI - A)^{-1} B$ 의 극한값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{cases} s \rightarrow \infty : N(sI - A)^{-1} B \rightarrow \frac{1}{\rho} N_L C_p (-A_p)^{-1} B_p \\ s \rightarrow 0 : N(sI - A)^{-1} B \rightarrow \frac{1}{\rho} N_H B_p \end{cases} \quad (24)$$

이제 위의 결과로부터 저주파 및 고주파에서 모든 방향의 특이값을 일치시킬 수 있는 설계 파라미터  $N$ 을 다음과 같이 선정할 수 있다.

$$N = [N_L \ N_H] = [(C_p(-A_p)^{-1}B_p)^{-1}(B_p^T B_p)^T B_p^T] \quad (25)$$

이때  $\sigma_i[G_{LQ}(j\omega)]$ 는 다음과 같은 극한값을 갖는다.

$$\begin{cases} \omega \rightarrow 0 : \sigma_i[G_{LQ}(j\omega)] \rightarrow \frac{1}{\omega\sqrt{\rho}} \\ \omega \rightarrow \infty : \sigma_i[G_{LQ}(j\omega)] \rightarrow \frac{1}{\omega\sqrt{\rho}} \end{cases} \quad (26)$$

다음, 나머지 설계 파라미터  $\rho$ 를 적절히 선정하여 루프형상을 위아래로 움직여 요구되는 교차주파수 혹은 대역폭을 만족시킬 수 있다. 이와 같이 선정된 설계 파라미터  $N$ 과  $\rho$ 를 이용하여 가중행렬  $Q = N^T N$ 와  $R = \rho I$ 를 계산하고, 이를 이용하여 제어대수 Riccati식의 해를 구하여 제어게인행렬  $G$ 를 선정할 수 있다.

이제 각 압연스탠드에서 설계사양이 만족되도록 설계 파라미터  $Q_i$ 와  $R_i$ 를 다음과 같이 선정하기로 한다.

$$Q_i = N_i^T N_i, \quad R_i = \rho_i I \quad (27)$$

여기서,

$$N_i = [(C_{pi}(-A_{pi})^{-1}B_{pi})^{-1}(B_{pi}^T B_{pi})^T B_{pi}^T], \quad i=1 \sim 5 \quad (28)$$

### 3.4 설계 파라미터의 보정

식(28)에 주어진  $N_i$ 로 설계하면 플랜트 입력측에서 절단한 TFM  $T_i(j\omega)$ 의 특이값은 저주파 및 고주파역에서 모든 방향에서 일치될 수 있지만, 제어시스템 성능을 평가하기 위한 플랜트 출력측에서 절단한 루프 TFM  $T(j\omega)$ 에서는 특이값의 루프형상이 바뀌게 되어 일반적으로 만족스럽지 않게 되는 경우가 많다. 이러한 현상은 연속 냉간압연시스템에서도 볼 수 있다. 연속 냉간압연시스템은 특성상 관두께와 장력이 강한 연성을 가지므로 특히 교차주파수 근방에서 출력측에서 절단한 루프 TFM  $T(j\omega)$ 의 특이값이 잘 일치되지 않는다. 따라서 관두께와 장력을 동시에 비슷한 동특성을 갖도록 할 수 없게 되어 제어시스템의 목적을 달성하기 힘들다.

이와 같은 연속 냉간압연시스템 특유의 문제점을 극복하기 위해 식(28)로 표현되는 저주파 및 고주

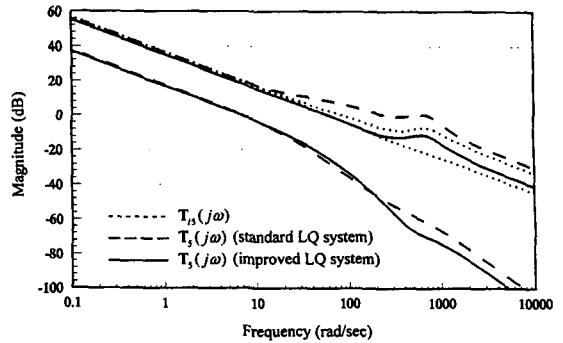


Fig. 5 Singular value plots for the loop TFM  $T_s(j\omega)$

파에서 모든 입력방향에 대해 특이값을 일치시킴으로써 바람직한 루프형상을 얻을 수 있는 설계행렬  $N_i$ 에 설계 파라미터  $n_i$ 를 포함한 행렬을 곱하여 보정하였다. 보정된 새로운 설계 파라미터  $N_i$ 는 다음과 같다.

$$N_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_i \end{bmatrix} [C_{pi}(-A_{pi})^{-1}B_{pi})^{-1}(B_{pi}^T B_{pi})^T B_{pi}^T] \quad (29)$$

여기서, 보정항  $n_i$ 는 반복 설계를 통하여 플랜트 출력측에서 절단한 루프 TFM  $T(j\omega)$ 가 바람직한 루프형상이 되도록 적절히 선정한다.

Fig. 5는 최종 압연스탠드인 No. 5 압연스탠드에서 설계 파라미터  $N_i$ 를 보정하지 않은 경우와 보정한 경우에 대한 플랜트 출력측에서 절단한 루프 TFM  $T_s(j\omega)$ 의 특이값 선도를 나타낸다. 보정항  $n_i$ 를 추가하여 설계된 루프형성 LQ제어 시스템이 특히 과도응답 성능에 크게 영향을 주고 있는 교차주파수 근처에서 표준 루프형성 LQ제어 시스템에 비해 바람직한 루프형상을 하고 있음을 알 수 있다.

## 4. 비간섭 제어기 설계

연속 냉간압연 시스템에서 압연스탠드간의 간섭과 관련된 변수로서 출력 관두께 변동, 물속도 변동, 그리고 후방장력 변동을 들 수 있다. 이 중 출력 관두께와 물속도의 변동에 의한 간섭효과는 극히 미미하고 대부분의 간섭이 장력 변동에 의해 발생한다. 이러한 간섭을 줄이고 압연제어 시스템의 성능을 향상시키기 위해서 다음과 같은 두가지 측면을 고려할 수 있다. 첫째 각 압연스탠드에 대해

개별적으로 설계된 압연제어기는 판두께 뿐만 아니라 장력에 대해서도 우수한 제어특성을 가져야 한다. 장력변동을 최소화함으로써 압연스탠드간의 간섭효과를 최소화할 수 있기 때문이다. 둘째 간섭을 소거시킬 수 있도록 비간섭 제어기의 성능을 극대화하여야 한다. 압연시스템의 특성상 판두께와 장력변동을 동시에 최소화하기는 어렵기 때문이다.

이미 언급한 바와 같이 연속 냉간압연기의 압연 제어 시스템은 각 압연스탠드에 대해 설계된 분산 제어기와 압연스탠드간의 간섭효과를 제거시키는 역할을 수행하는 비간섭 제어기로 구성된다. Fig. 6은 이상과 같은 스탠드간의 블록화 비간섭을 위한 비간섭 제어기와 각 압연스탠드에 대한 루프형성 LQ분산 제어기를 함께 구성한 본 논문의 목표가 되는 5단 연속 냉간압연제어 시스템의 구조를 나타낸다. 그리고 Fig. 7은 *i*번째의 스탠드에 대한 블록화 비간섭 및 LQ분산제어 시스템의 구조를 나타낸다.

각 압연스탠드에 대한 플랜트 모델을 조합하여 구성한 5단 연속 냉간압연시스템 모델에서 압연 스탠드간의 간섭항들을 소거시킬 수 있도록 비간섭 제어입력  $u_i^d$ 를 다음과 같이 선정한다.

$$\begin{bmatrix} u_1^d \\ u_2^d \\ u_3^d \\ u_4^d \\ u_5^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -B_1^{-1}A_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ -B_2^{-1}A_{2,1} & 0 & -B_2^{-1}A_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & -B_3^{-1}A_{3,2} & 0 & -B_3^{-1}A_{3,4} & 0 \\ 0 & 0 & -B_4^{-1}A_{4,3} & 0 & -B_4^{-1}A_{4,5} \\ 0 & 0 & 0 & -B_5^{-1}A_{5,4} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} \quad (30)$$

여기서,  $B_i^{-1}$ 가 존재하지 않는 경우가 대부분이다. 왜냐하면 일반적으로 시스템의 차수 *n*이 입력의 갯수 *m*보다 큰 값을 갖기 때문에 제어 입력행렬  $B_i[n \times m]$ 는 정방행렬(square matrix)이 아니므로 제어입력행렬  $B_i$ 의 역행렬  $B_i^{-1}$ 가 존재하지 않는다. 이 경우에는  $B_i^{-1}$  대신 행렬  $B_i$ 의 가-역행렬(pseudo-inverse matrix)  $B_i^+$ 로 대체하여 사용하기

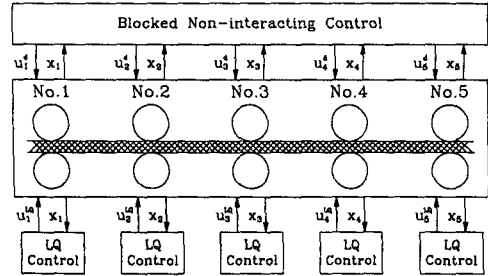
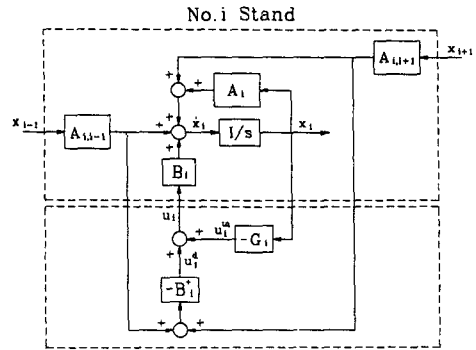


Fig. 6 Structure of the blocked non-interacting LQ control for tandem cold mills



Blocked Non-Interacting and LQ controller  
Fig. 7 Structure of the blocked non-interacting LQ control in the *i*th stand

로 한다.

$$B_i^+ = (B_i^T B_i)^{-1} B_i^T \quad (31)$$

위와 같은 비간섭제어 입력  $u_i^d$ 를 이미 설계된 LQ분산제어 입력  $u_i^{lq}$ 와 결합하면 전체 연속 냉간 압연 시스템의 상태방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_2 & A_{23} & 0 & 0 \\ 0 & A_{32} & A_3 & A_{34} & 0 \\ 0 & 0 & A_{43} & A_4 & A_{45} \\ 0 & 0 & 0 & A_{54} & A_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^{lq} + u_1^d \\ u_2^{lq} + u_2^d \\ u_3^{lq} + u_3^d \\ u_4^{lq} + u_4^d \\ u_5^{lq} + u_5^d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_1 & E_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & E_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_3 & E_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_4 & E_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_5 & E_{56} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^d \\ u_2^d \\ u_3^d \\ u_4^d \\ u_5^d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_1^d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_2^d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_3^d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_4^d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_5^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^d \\ u_2^d \\ u_3^d \\ u_4^d \\ u_5^d \end{bmatrix} \quad (32)$$

그리고 완전한 비간섭제어가 이루어졌다고 가정하면, 위의 상태방정식은 다음과 같이 시스템 행렬에

서 간섭항  $A_{i,i-1}, A_{i,i+1}$ 들이 소거된 상태방정식으로 간략히 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^{i0} \\ u_2^{i0} \\ u_3^{i0} \\ u_4^{i0} \\ u_5^{i0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_1 & E_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & E_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_3 & E_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_4 & E_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_5 & E_{56} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \\ w_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_1^d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_2^d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_3^d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_4^d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_5^d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w}_1 \\ \dot{w}_2 \\ \dot{w}_3 \\ \dot{w}_4 \\ \dot{w}_5 \end{bmatrix} \quad (33)$$

한편, 본 논문에서 고려된 설계 대상 플랜트인 연속 냉간압연 시스템의 제어입력행렬  $B_i$ 가  $[4 \times 2]$ 의 비정방행렬이므로 역행렬  $B_i^{-1}$ 이 존재하지 않는다. 그러므로 우선 제어 입력행렬  $B_i$ 의 가-역행렬  $B_i^+$ 를 이용한 비간섭 제어에 의해 간섭항들이 잘 소거되는지를 조사하기로 한다. 본 논문에서 고려된 연속 냉간압연 시스템의 시스템행렬  $A_{i,i-1}$ ,  $A_{i,i+1}$  그리고 제어 입력행렬  $B_i$ 는 각각 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$A_{i,i-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{4,1} & 0 & 0 & a_{4,4} \end{bmatrix}_{i,i-1}$$

$$A_{i,i+1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & a_{1,4} \\ 0 & 0 & 0 & a_{2,4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{4,3} & a_{4,4} \end{bmatrix}_{i,i+1}, \quad B_i = \begin{bmatrix} b_{1,1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{3,2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

따라서  $B_i B_i^+$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$B_i B_i^+ = \begin{bmatrix} b_{1,1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{3,2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{b_{1,1}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{b_{3,2}} & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

위의  $B_i B_i^+$ 항이 단위행렬과 차이가 많으므로 이와 같은 비간섭 제어기를 구축하면, 간섭효과를 나타내는 시스템행렬  $A_{i,i-1}$ ,  $A_{i,i+1}$ 에 의한 신호가 다음과 같이 완전히 소거될 수 없음을 알 수 있다.

$$A_{i,i-1}x_{i-1}(t) - B_i B_i^+ A_{i,i-1}x_{i-1}(t)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{4,1} & 0 & 0 & a_{4,4} \end{bmatrix} x_{i-1}(t)$$

$$A_{i,i+1}x_{i+1}(t) - B_i B_i^+ A_{i,i+1}x_{i+1}(t)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{2,4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{4,3} & a_{4,4} \end{bmatrix} x_{i+1}(t) \quad (36)$$

위와 같이 압연스탠드 사이의 간섭항 중에서 오직 하나의 요소  $A_{i,i-1}(1,4)$ 만이 소거되고 나머지 항들은 소거되지 않았다. 따라서 연속 냉간압연 제어시스템에 이러한 비간섭 제어기를 포함한다고 하더라도 소거시킬 수 없는 대부분의 인접 스탠드간의 간섭에 의해서 앞에서 설계된 분산제어에 의한 연속 냉간압연 제어시스템의 성능이 저하될 뿐 아니라 심하면 시스템이 불안정해질 수도 있을 것으로 예상된다. 그래서 비간섭 제어기의 효과를 증대시킬 수 있는 방법을 다음과 같이 제안하기로 한다.

4.1 제어입력을 추가한 비간섭 제어

우수한 비간섭 제어 효과를 얻기 위해서 식(35)의  $B_i B_i^+$ 가 단위행렬이 되거나 혹은 단위행렬이 될 수 없는 경우라도 최대한 단위행렬에 가까운 행렬로 되어야 한다. 만약 댄싱롤(dancing roll)이나 루퍼(looper) 시스템 등을 이용하여 각 압연스탠드에 대하여 후방장력 변동  $\Delta T_{bi}$ 의 시간변화율에 직접 영향을 줄 수 있는 제어입력  $u_{3i}$ 를 추가한다면, 제어 입력행렬  $B_i$ 는 다음과 같이 확장되고 압연스탠드간의 간섭항들은 거의 모두 소거될 수 있다.

$$B_i = \begin{bmatrix} b_{1,1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{3,2} & 0 \\ 0 & 0 & b_{4,3} \end{bmatrix} \quad (37)$$

이 경우  $B_i B_i^+$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$B_i B_i^+ = \begin{bmatrix} b_{1,1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{3,2} & 0 \\ 0 & 0 & b_{4,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{b_{1,1}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{b_{3,2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{b_{4,3}} \end{bmatrix}$$



$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (38)$$

따라서 이와 같은 비간섭 제어기를 구축하면, 간섭 효과를 나타내는 시스템행렬  $A_{i,i-1}$ ,  $A_{i,i+1}$ 에 의한 신호가 다음과 같이  $A_{i,i+1}(2,4)$  항만을 제외하고 모든 항들이 소거됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} & A_{i,i-1}x_{i-1}(t) - B_i B_i^+ A_{i,i-1}x_{i-1}(t) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_{i-1}(t) \\ & A_{i,i+1}x_{i+1}(t) - B_i B_i^+ A_{i,i+1}x_{i+1}(t) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{2,4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_{i+1}(t) \end{aligned} \quad (39)$$

또한 제어입력이 3개로 확장되었으므로 롤속도를 추가하여 3개의 출력변수를 적분한 요소를 포함하는 설계플랜트 모델을 설정하기로 한다. 이 경우에는 압연스탠드 사이의 간섭에 의한 영향을 상당히 제거시킬 수 있다. 또한 제어입력의 개수가 증가되었기 때문에 설계사양을 만족시키는데 더 큰 여유를 갖게되어 안정도-강인성이나 각 압연스탠드의 판두께 및 장력 제어에 대한 성능을 크게 향상시킬 수 있다.

### 5. 연속 냉간압연제어 시스템의 성능분석 및 시뮬레이션

우선 연속 냉간압연제어 시스템의 외란제거 성능을 검토하기 위하여 가장 지배적인 외란인 압연모재의 판두께 변동이 존재하는 경우에 대해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하기로 한다. 압연시스템은 저주파 통과필터의 특성을 나타내고 압연 모재에 존재하는 판두께 변동이 에너지를 갖는 주파수는 주로 1 Hz 이하이므로 압연 모재에는 진폭 30  $\mu\text{m}$ , 주파수 1 Hz인 1주기의 정현파 두께 변동이 존재한다고 가정하였다. 압연제어 시스템의 외란제거 성능 분석시, 기본 목표가 되는 압연 모재의 판두께 변동을 최소화시키는데 중점을 두기로 한다. 또한 최종 스탠드의 전방장력 변동은 여기서 고려하지 않

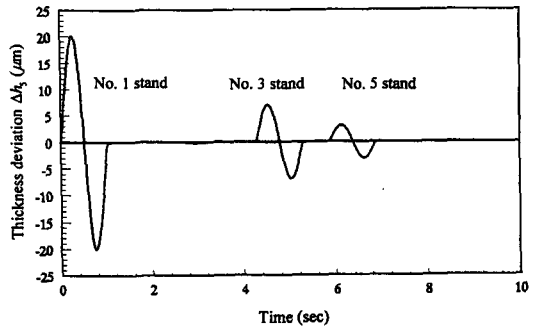


Fig. 8 Time response of the open-loop system

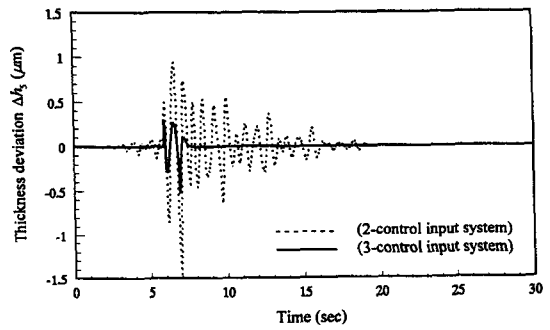


Fig. 9 Delivery strip thickness deviations of the 2-input and 3-input LQ control systems

기로 한다. 비간섭 제어기에 대해서는 2개의 제어입력을 사용했을 경우와 비간섭 제어 성능을 향상시키기 위해 제어입력을 하나 더 추가하여 3개로 선정된 경우를 비교하기로 한다.

개루프 시스템에서 압연 모재에 판두께 변동이 존재할 때의 압연기 출측의 두께 변동이 Fig. 8에 나타나 있다. 모재에 존재하는 판두께 변동은 압연기 출측에서 약 1/10로 감소되고 있음을 볼 수 있다.

그리고 Fig. 9에는 각 압연스탠드에서 2개의 제어입력과 3개의 제어입력을 사용하는 압연제어 시스템의 출측 판두께 변동이 나타나 있다. Fig. 9로부터 2개의 제어입력을 사용하는 경우에는 비간섭 제어기의 성능을 거의 기대할 수 없음을 알 수 있다. 장력의 시간 변화율에 직접 영향을 줄 수 있도록 제어입력이 추가된 압연 제어시스템은 압연 스탠드간의 간섭항들이 제대로 소거될 수 있으므로 만족스러운 비간섭제어 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그리고 각 압연스탠드의 출측 판두께와 장력을 일정하게 유지시키는데 있어서도 큰 향상을

얻을 수 있고 결과적으로 스탠드간 간섭효과의 크기 자체를 현저히 줄일 수 있다는 부수적인 장점이 있다. 제어입력의 개수가 증가되었기에 안정도-강인성 측면에서도 더 유리하게 될 수 있다.

이제 좀더 실제적인 압연현상에 유사한 경우로서 Fig. 10과 같은 모재 판두께 변동과 롤갭 변동이

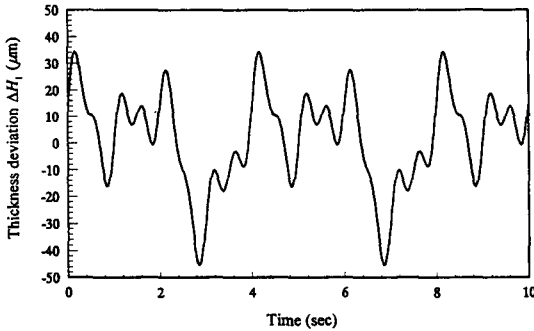


Fig. 10 Entry strip thickness deviation of the tandem cold mills  $H_1(t) = 15 \sin 0.5\pi t + 15 \cos \pi t + 12 \sin 2\pi t + 8 \sin \pi t$

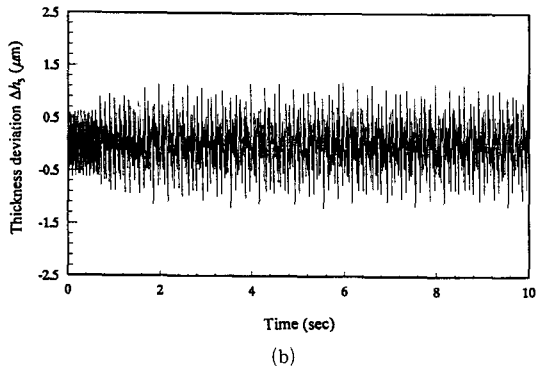
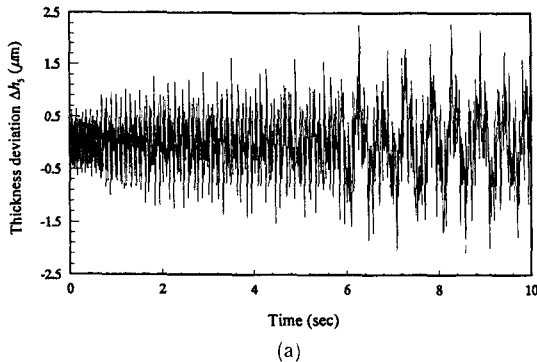


Fig. 11 (a) Delivery strip thickness deviation of a tandem cold mill (2-control input)  
(b) Delivery strip thickness deviation of a tandem cold mill (3-control input)

동시에 존재하는 경우에 대해 생각하기로 한다. 각 압연 스탠드의 롤에 10 μm의 편심을 가정하였고, 이때 판속도에 의존하는 롤갭 변동의 주파수는 각 압연 스탠드에서 1.52, 2.49, 4.14, 6.14, 9.26 Hz으로 된다. Fig. 11은 모재 판두께 변동과 롤갭 변동이 동시에 존재할 경우에 대한 압연 제어시스템의 출측 판두께 변동을 나타낸다. Fig. 11로부터 제어입력이 추가된 압연 제어시스템은 만족스러운 분산 제어가 설계뿐만 아니라 우수한 비간섭제어에 의해 출측 판두께 변동을 만족스럽게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 그렇지만 고주파에서 에너지를 갖는 롤갭 변동에 의한 외란은 우수하게 제거되지 못함을 알 수 있다. 이것은 제어기 설계시 안정도-강인성 문제와 센서잡음에 대한 저감도 성능 그리고 하드웨어적인 특성때문에 시스템의 대역폭을 크게 하는데 한계가 있기 때문이다. 따라서 롤 갭 변동을 가능한 한 하드웨어적으로 작게 유지하는 것이 바람직하다고 사료된다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 루프형성 LQ제어기법과 블록화 비간섭 제어기법을 도입하여 연속 냉간압연시스템의 각 압연스탠드에서 판두께와 장력을 동시에 제어할 수 있는 강인한 다변수 제어기를 설계하였다. 우선 각 압연스탠드간의 간섭을 무시하고 롤갭과 롤속도 명령을 사용하여 각 압연스탠드의 출측 판두께와 후방장력을 제어하기 위하여 루프형성 LQ 제어기법을 적용하여 분산제어기를 설계하였다. 여기서, 압연시스템의 주요한 외란인 압연 모재의 판두께 변동으로 인한 출측 판두께 변동을 최소화시키는데 중점을 두었다. 압연시스템의 특성상 각 압연스탠드 입측의 판두께 변동이 존재할 경우에 출측의 판두께 변동은 항상 감소되어 나타나지만 출측 판두께 변동을 크게 감소시키면 후방 장력의 변동이 증폭될 수도 있다. 따라서 판두께와 장력을 동시에 동특성을 비슷하게 유지시키는 것은 어려운 일이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 루프형성 LQ제어 시스템 설계시 요구되는 설계 파라미터에 보정항을 추가하였다. 위와 같은 방법으로 분산제어기의 성능을 만족할 만한 수준으로 개선시킬 수 있었다.

또한, 분산제어기 설계시 무시된 각 압연스탠드간의 간섭효과를 고려하기 위하여 압연스탠드 간의

간섭을 소거시킬 수 있는 비간섭제어기를 설계하였다. 불궐과 불속도 명령을 이용한 기존의 제어방식인 2개의 제어입력을 사용하는 경우에는 비간섭 제어기의 성능은 거의 기대할 수 없음을 알 수 있었다. 그래서 장력의 시간변화율에 직접 영향을 줄 수 있는 새로운 제어입력을 추가하여 우수한 비간섭제어 시스템을 구축하였다. 이 경우 제어입력의 개수가 증가되었기 때문에 하드웨어적인 복잡성은 다르지만 매우 만족스러운 비간섭제어 효과 뿐만 아니라 2개의 제어입력을 사용하는 경우에 비해 안정도-강인성 및 외란제거 성능 또한 크게 향상시킬 수 있었다.

### 참고문헌

- (1) Bryant, G. F., 1973, *Automation of Trandem Mills*, The Metal Society, Publication No. 160, London.
- (2) Safonov, M. G., 1979, "Robustness and Stability Aspects of Stochastic Multivariabhle Feedback System Design," Ph. D. Thesis, Dept. of EECS, M. I. T.
- (3) Athans, M., 1986, "A Tutorial on the LQG/LTR Method," *Proc. ACC*, pp. 1289~1296.
- (4) Bland, D. R. and Ford, H., 1948, "The Calculation of Roll Force and Torque in Cold strip Rolling with Tensions," *Proc. Institute of Mech. Eng.*, Vol. 159, pp. 144~153.
- (5) Ginzburg, V. B., 1985, "Basic Principles of Customized Computer Models for Cold and Hot Strip Mills," *Iron and Steel Engineer, Sept.*, pp. 21~35.
- (6) Hoshino, I., Maekawa, Y., Fujimoto T., Kimura, H. and Kimura, H., 1988, "Observer-Based Multivariable Control of the Aluminum Cold Tandem Mill," *Automatica*, Vol. 24, No. 6, pp. 741~745.
- (7) Lehtomaki, N. A., 1981, "Practical Robustness Measures in Multivariable Control System Analysis," Ph. D. Thesis, Dept. of EECS, M. I. T.
- (8) 김종식, 1988, 선형 제어시스템 공학, 청문각.
- (9) Athans, M., 1986, "Lecture Notes on Multivariable Control Systems," M. I. T.