

연속 냉간 압연시스템의 디지털 예견 및 비간섭 제어

김 종 식,* 김 승 수,** 이 규 택***

Digital Preview and Noninteracting Control of Tandem Cold Mills

Jong Shik Kim* Sung Su Kim** Gyo Taek Lee***

ABSTRACT

A digital preview controller is designed for tandem cold mills to achieve a more improvement of the thickness accuracy. Simultaneously a blocked noninteracting controller is synthesized for rejecting the interactive effects among adjacent stands and for controlling independently each roll stand of tandem cold mills. The performance effects and characteristics of the suggested roll control system are discussed in the practical viewpoint. The simulation results show that the thickness accuracy of tandem cold mills can be largely improved by the blocked noninteracting and digital preview controller.

Key Words : Digital Preview Control(디지털 예견제어), Blocked Noninteracting Control(블록화 비간섭제어), Thickness Control(두께 제어), Tandem Cold Mills(연속 냉간 압연기)

1. 서 론

연속 냉간 압연기는 주로 장력을 통하여 압연스탠드 간에 서로 간섭이 존재하는 다수의 압연스탠드가 연속적으로 배열된 대규모 시스템으로서 연속 냉간 압연기 전체를 통합적으로 제어하는 것은 극히 어렵다. 따라서 압연스탠드 사이의 간섭효과를 배제하고 각 압연스탠드에 대해서 독립적으로 출측 판두께 및 장력을 제어할 수 있는 제어를 설계하여 연속 냉간 압연기에 대한 제어시스템을 구축하는 것이 효과적이다. 그래서 압연스탠드 사이에 존재하는 상호 간섭작용은 블록화 비간

섭제어(blocked noninteracting control)¹⁾를 이용하여 소거하기로 한다.

연속 냉간 압연시스템은 스탠드간의 간섭효과가 소거되었다고 하더라도 각 스탠드의 제어입력인 롤갭과 롤속도 그리고 출력인 판두께와 장력 사이에 연성이 존재하는 전형적인 다변수 시스템이다. 종래의 연속 냉간압연 제어시스템²⁾에서는 단일입출력 제어 이론에 근거하여 판두께와 장력에 대한 제어를 개별적으로 설계하였으므로 큰 제어성능 향상을 기대하기 어려웠다. 그래서 본 논문에서는 디지털 LQ제어기법³⁾을 이용하여 각 압연스탠드에 대한 분산제어기로서 압연공정에서 발생

* 부산대학교 기계설계공학과
 ** 부산대학교 기계기술연구소
 *** 포항제철 기술연구소

하는 판두께와 장력간의 연성효과를 고려할 수 있는 다변수 LQ제어기를 설계하기로 한다.

또한, 간섭항을 포함한 연속 냉간 압연시스템을 각 스탠드의 독립된 최적 LQ제어기로만 설계했을 경우와 간섭항을 소거하기 위해 비간섭 제어를 병행하여 수행했을 경우에 대하여 각각 시스템특성 및 성능효과를 알아 보기로 한다. 여기서 비간섭제어는 기존 두개의 제어 입력(롤갭, 롤속도 명령)으로 수행할 때와 장력의 시간 변화율에 직접 영향을 줄 수 있는 새로운 제어입력을 제안하여 세 개의 입력으로 수행한 경우에 대해 서로 비교해 보기로 한다. 그리고 판두께 정도를 보다 개선시키기 위하여 각 스탠드의 입측 두께변동 외란을 미리 측정하여 이를 피드포워드에서 제어할 수 있는 디지털 예견제어(digital preview control)^(4,5)를 수행하기로 한다.

2. 연속 냉간 압연시스템의 모델링

압연공정은 Fig. 1에 표시된 바와 같이 여러 개의 롤로 구성된 압연 스탠드 사이를 통과하는 판재의 두께를 감소시키는 생산공정이다. 이는 롤갭과 롤속도 등의 제어입력을 적절히 조절하여 여러 형태의 외란이 존재 하더라도 스탠드 출측의 판두께가 일정한 치수 범위내에 유지되도록 한다.

본 논문에서는 이미 연구된 압연 4차 모델^(6,7)을 실시간 제어시 보다 유리한 3차 모델로 축약하여 이를 제어 대상 플랜트로 선정한다. 4차 모델에서 고려된 하우징 동역학의 모드는 일반적으로 압연공정에 관한 다른 동역학의 모드보다 상대적으로 빠르므로 이를 무시함으로써 압연 3차 모델의 유도가 가능하다.

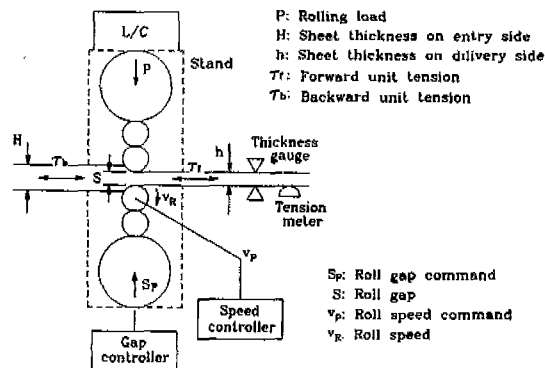


Fig. 1 Schematic diagram of the rolling process of a mill stand

연속 냉간 압연시스템의 모델링을 위해서는, 우선 주어진 압연생산계획, 즉 압연될 모재의 판두께와 판폭, 압연기 출측에서 요구되는 판두께와 판속도에 대해 각 스탠드의 압하율을 결정하고 이에 따라 압연인자들의 작동점이 선정되어야 한다. 이 작동점으로부터 압연공정에 관한 비선형식에 압연하중식⁽⁸⁾과 선진율식⁽⁹⁾의 선형화를 위하여 각 스탠드에서 시스템 파라미터들의 미소변동에 대한 영향계수들의 계산이 요구된다.

그리고 선진율식과 압연하중식을 포함한 압연이론에 관한 기본식⁽¹⁾들을 종합하면 연속 냉간 압연공정을 다음과 같은 상태공간 모델식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_{i,i-1}x_{i-1}(t) + A_i x_i(t) + A_{i,i+1}x_{i+1}(t) + B_i u_i(t) \\ \quad + E_{i,i-1}w_{i-1}(t) + E_i w_i(t) \\ y(t) = C_i x_i(t) + F_i w_i(t) + C_{i,i+1}x_{i+1}(t) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 시스템행렬들은 부록에 표시되어 있으며 아래 첨자 i 는 스탠드의 번호를 의미한다. 그리고 플랜트의 상태벡터 x_i , 제어입력벡터 u_i , 외란입력벡터 w_i , 그리고 출력벡터 y_i 는 각각 다음과 같다.

$$x_i = \begin{bmatrix} \Delta S_i \\ \Delta v_{Ri-1} \\ \Delta \tau_{bi} \end{bmatrix}, u_i = \begin{bmatrix} \Delta S_{pi} \\ \Delta v_{pi-1} \end{bmatrix}, w_i = \begin{bmatrix} \Delta H_i \\ \Delta S_{ri} \end{bmatrix}, y_i = \begin{bmatrix} \Delta h_i \\ \Delta \tau_{bi} \end{bmatrix}$$

Fig. 2는 3차 모델의 타당성을 보이기 위한 3차 및 4차 플랜트모델의 개루프 특이값선도이다. 관심있는 주파수역(외란이 에너지를 갖는 주파수역은 대략 10Hz이내)에서는 두 모델의 특이값선도가 거의 일치하고 있다. 따라서 압연공정과 같이 일정시간에 따라 시스템의 파

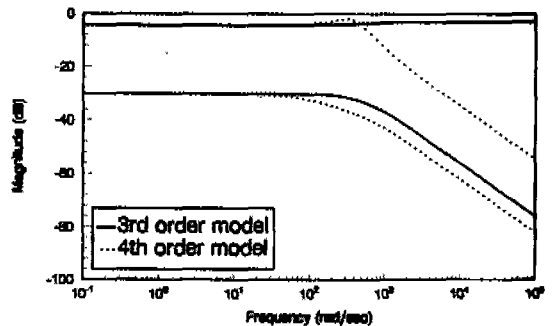


Fig. 2 Singular value plots of the open loop transfer function matrices (No.3 stand)

라미터들을 다시 계산하여 결정하는 시스템에 대하여 디지털 최적 제어시스템을 구축하기 위해서는 관심있는 주파수역에서 크게 모델링 오차가 없는 한 제어계인 계산을 보다 신속하게 수행할 수 있는 3차 모델로 설정하는 것이 바람직하다.

3. 디지털 LQ 및 예견제어기 설계

예견제어(preview control)문제는 제어전략에 있어서 명령신호 및/ 혹은 외란에 대한 미래의 정보를 이용하여 제어를 구축하고자 하는 것이다. 명령신호와 외란의 현재정보 뿐만 아니라 미래의 정보도 알 수 있다면, 그것을 모르는 경우와 비교해 더 좋은 제어시스템을 구축할 수 있는 것으로 기대하는 것은 당연하다. 일반적으로 예견제어기 설계는 적절한 제어기법을 이용한 피드백 제어요소의 설계가 선행된 다음 피드포워드 및 예견제어요소가 결정되는 두 단계의 과정으로 이루어진다. 본 논문에서 고려할 디지털 최적 예견제어기는 최적 LQ제어기법을 이용하여 외란 및 모델링 오차에 대한 강인성을 얻기 위한 피드백 제어요소와 예견할 수 있는 특정 외란 및 모델링 오차에 대한 강인성을 얻기 위한 피드백 제어요소와 예견할 수 있는 특정 외란에 대한 제거성능을 향상시키기 위한 피드포워드 및 예견 제어요소로 구성된다.

압연시스템에 대한 디지털 LQ 및 예견제어기 설계를 위해, 우선 압연스탠드간의 간섭항을 무시한 각각의 단일 스탠드에 대하여 다음과 같은 이산시간 상태공간 모델식을 유도한다.

$$\begin{cases} x(k+1) = A * x(k) + B * u(k) + E * w(k) \\ y(k) = Cx(k) + Fw(k) \end{cases} \quad (2)$$

여기서,

$$A * = e^{AT}, \quad B * = \int_0^T e^{A\eta} d\eta B, \quad E * = \int_0^T e^{A\eta} d\eta E$$

그리고 T 는 샘플링주기이다.

다음 모재 두께변동에 의한 외란이 에너지를 갖는 주파수역에서 외란제거 성능을 향상시키기 위해 오차 채널에 적분기를 추가시켜 설계플랜트 모델을 구축한다. 적분기의 출력 $q(k)$ 는 다음과 같다.

$$q(k) = q(k-1) + e(k) = q(k-1) - y(k) \quad (3)$$

위 식을 한 스텝 추이(shift)하면 다음과 같이 표현

될 수 있다.

$$\begin{aligned} q(k+1) &= q(k) - y(k+1) \\ &= q(k) - Cx(k+1) - Fw(k+1) \\ &= q(k) - CA * X(k) - CB * u(k) - CE * w(k) \\ &\quad + Fw(k+1) \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 적분요소를 상태변수로 첨가했을 때의 설계플랜트 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} \tilde{x}(k+1) = \Phi \tilde{x}(k) + \Gamma u(k) + \Gamma_d w(k) + \Gamma_f w(k+1) \\ y(k) = \tilde{C} \tilde{x}(k) + Fw(k) \end{cases} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \Phi &= \begin{bmatrix} I & -CA * \\ 0 & A * \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} -CB * \\ B * \end{bmatrix}, \quad \Gamma_d = \begin{bmatrix} -CE * \\ E * \end{bmatrix}, \\ \Gamma_f &= \begin{bmatrix} -F \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{C} = [0 \quad C], \quad \tilde{x}(k) = \begin{bmatrix} q(k) \\ x(k) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

이제 설계플랜트 모델식 (5)에 추정가능한 외란의 미래정보에 관한 상태변수 $x_d(k)$ 를 추가하여 확장된 시스템을 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{cases} \tilde{x}(k+1) \\ x_d(k+i) \end{cases} = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_{pd} \\ 0 & \Phi_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}(k) \\ x_d(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma \\ 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} w(k+N_i) \quad (6)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \Phi_d &= \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & I \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}, \\ x_d(k) &= \begin{bmatrix} w(k) \\ w(k+1) \\ \vdots \\ \vdots \\ w(k+N_i-1) \end{bmatrix}, \quad \Gamma_{pd} = [\Gamma_d \quad \Gamma_f \quad 0 \quad \dots \quad 0] \end{aligned}$$

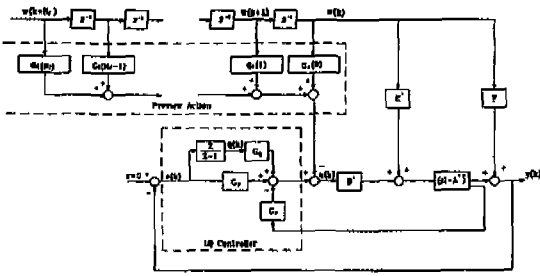


Fig. 3 Block diagram of the digital preview control system

그리고 가격함수 J 를 다음과 같이 정의하기로 한다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=-N_p}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} \tilde{x}^T(k) & x_d^T(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}(k) \\ x_d(k) \end{bmatrix} + u^T(k) R u(k) \right\} \quad (7)$$

여기서, 설계행렬 Q 와 R 은 디지털 LQ제어기를 직접 설계할 때 적절하게 선정되는 Q , R 과 동일하다. 따라서 확장된 시스템(식(6))을 구속조건으로 하고, 위의 가격함수 J 를 최소화하는 제어입력 $u(k)$ 를 선정하면 다음과 같다.

$$u(k) = -G\tilde{x}(k) - \sum_{l=0}^{N_p} G_d(l)w(k+l) \quad (8)$$

여기서,

$$G = [G_q \ G_y \ G_r] = [R + \Gamma^T S \Gamma]^{-1} \Gamma^T S \Phi \quad (9)$$

$$G_d(0) = [R + \Gamma^T S \Gamma]^{-1} \Gamma^T S \Gamma_d \quad (10)$$

$$G_d(l) = [R + \Gamma^T S \Gamma]^{-1} \Gamma^T \left[(\Phi_c^T)^{l-1} S \Gamma_f + (\Phi_c^T)^l S \Gamma_d \right], \quad 1 < l < N_p - 1 \quad (11)$$

$$\Phi_c = \Phi - \Gamma G$$

$$S = Q + \Phi^T S \Phi - \Phi^T S \Gamma [R + \Gamma^T S \Gamma]^{-1} \Gamma^T S \Phi \quad (12)$$

위 식에서 식(9)와 식(12)로 표현되는 피드백게인 G 와 Riccati방정식은 외란에 대한 예견제어를 수행하지 않는 디지털 LQ 최적제어의 경우와 동일함을 알 수 있다. 즉, LQ최적제어의 피드백게인은 최적 예견제어의 첫번째 단계로 분리하여 고려할 수 있음을 의미한다.

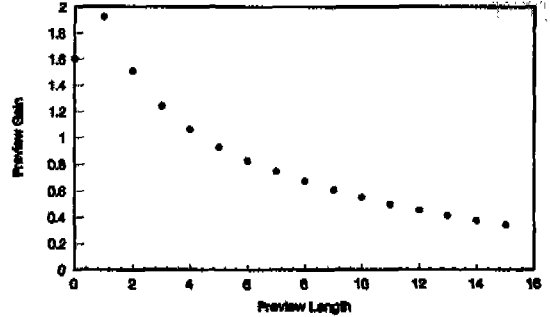


Fig. 4 Norm of the preview control gain for preview length l

Fig. 3은 예견 제어시스템의 구조를 나타내는 블록 선도로서 출력채널에 적분기를 포함시킨 설계플랜트에 디지털 최적 예견제어를 수행하도록 하였다.

그리고 예견길이(preview length) N_p 를 선정해야 한다. 예견길이를 무한대로 하면 이론적으로 이상적이지만, 일반적으로 예견길이는 시스템에 따라 적절하게 선정된다. 그리고 현재시간에서 어느 정도 이상의 먼 미래정보는 제어성능에 큰 도움을 주지 못한다. 그 이유는 예견 제어게인 $G_d(l)$ 이 $(\Phi_c^T)^l$ 에 비례하고, Φ_c (LQ제어에 의해 상태 피드백된 폐루프 시스템행렬)의 고유값이 z -평면의 단위원 안에 존재하여 예견지수(preview index)값이 커짐에 따라 $(\Phi_c^T)^l$ 의 값은 작아지게 된다. Fig. 4에는 본 논문에서 고려한 연속 냉간 압연시스템에서 l 값에 따른 예견 제어게인의 노름값이 표시되어 있다. 이 그림으로부터 적절한 예견길이 N_p 은 10으로 선정하기로 한다.

4. 비간섭 제어기 설계

연속 냉간 압연시스템에서 인접 스텐드간의 간섭을 가져오는 변수로는 출측 판두께 변동, 물속도 변동, 그리고 후방장력 변동 등이 있다. 이 중 출측 판두께와 물속도의 변동에 의한 간섭효과는 극히 미미하고 대부분의 간섭이 장력 변동에 의해 발생한다. 이러한 간섭을 줄이고 압연 제어시스템의 성능을 향상시키기 위해서는 판두께 뿐만 아니라 장력에 대해서도 우수한 제어 특성을 가져야 한다. 그러나 압연시스템의 특성상 판두께와 장력 변동을 동시에 최소화 하기는 어렵다. 따라서 비간섭제어를 통하여 장력 변동으로 인한 인접 스텐드간의 영향을 제거하기로 한다.

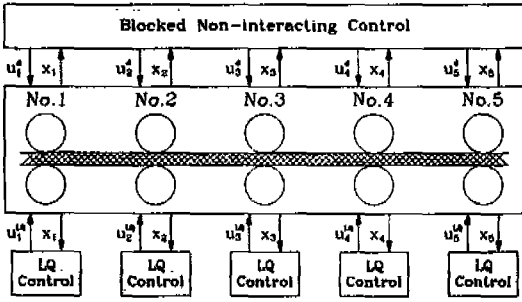


Fig. 5 Structure of the blocked noninteracting LQ control for tandem cold mills

이미 언급한 바와 같이 본 논문에서 고려할 연속 냉간압연 제어시스템은 각 압연 스탠드에 대해 설계된 분산 제어기와 압연 스탠드간의 간섭효과를 제거시키는 역할을 수행하는 비간섭 제어기로 구성된다. Fig. 5는 이상과 같은 스탠드간의 블록화 비간섭을 위한 비간섭 제어기와 각 압연 스탠드에 대한 LQ 분산 제어를 함께 구성한 본 논문의 목표가 되는 5단 연속 냉간압연 제어시스템의 구조를 나타낸다. 그리고 Fig. 6은 i 번째의 스탠드에 대한 블록화 비간섭 및 LQ 분산 제어시스템의 구조를 나타낸다.

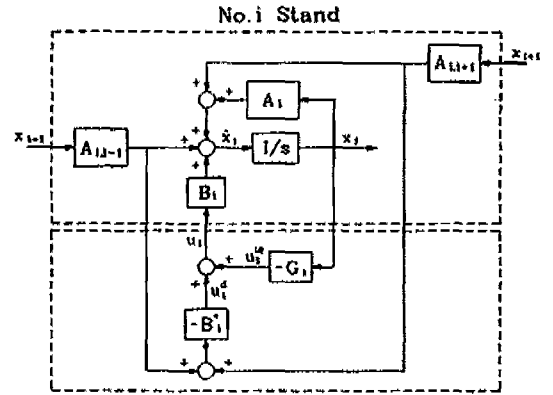
각 압연 스탠드에 대한 플랜트 모델을 조합하여 구성한 5단 연속 냉간 압연시스템 모델에서 압연 스탠드간의 간섭항들을 소거시킬 수 있도록 비간섭 제어입력 u_i^d 를 다음과 같이 선정한다.

$$u_i^d(k) = -B_i^{-1}(A_{i,i-1}x_{i-1}(k) + A_{i,i+1}x_{i+1}(k)) \quad (13)$$

즉,

$$\begin{bmatrix} u_1^d \\ u_2^d \\ u_3^d \\ u_4^d \\ u_5^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -B_1^{-1}A_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ -B_2^{-1}A_{2,1} & 0 & -B_2^{-1}A_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & -B_3^{-1}A_{3,2} & 0 & -B_3^{-1}A_{3,4} & 0 \\ 0 & 0 & -B_4^{-1}A_{4,3} & 0 & -B_4^{-1}A_{4,5} \\ 0 & 0 & 0 & -B_5^{-1}A_{5,4} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} \quad (14)$$

본 논문에서 고려된 설계 대상 플랜트인 연속 냉간 압연시스템은 제어입력행렬 B_i 가 (3×2) 의 비정방 행렬이므로 역행렬 B_i^{-1} 이 존재하지 않는다. 이 경우에는 다음과 같이 B_i^{-1} 대신 행렬 B_i 의 가-역행렬(pseudo-



Blocked Non-Interacting and LQ controller

Fig. 6 Structure of the blocked noninteracting LQ control in the i th stand

inverse matrix) B_i^+ 로 대체하여 사용하기로 한다.

$$B_i^+ = (B_i^T B_i)^{-1} B_i^T \quad (15)$$

우선 제어입력행렬 B_i 의 가-역행렬 B_i^+ 를 이용한 비간섭 제어에 의해 간섭항들이 완전히 소거되는지를 조사하기로 한다.

$$B_i B_i^+ = \begin{bmatrix} b_{1,1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{3,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/b_{1,1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/b_{3,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

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

$$A_{i,i-1}x_{i-1}(t) - B_i B_i^+ A_{i,i-1}x_{i-1}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ a_{2,1} & a_{2,2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_{i-1}(t) \quad (17)$$

$$A_{i,i+1}x_{i+1}(t) - B_i B_i^+ A_{i,i+1} x_{i+1}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{2,2} & a_{2,3} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_{i+1}(t) \quad (18)$$

위와 같이 압연 스탠드 사이의 간섭항들에서 두번째 항의 요소들은 소거되지 않았다. 따라서 연속 냉간압연 제어시스템에 이러한 비간섭 제어를 포함한다고 하더라도 완전히 소거되지 않은 스탠드간의 간섭에 의해 앞서 설계된 분산제어에 의한 연속 냉간압연 제어시스템의 성능이 저하될 뿐 아니라 심한 경우 시스템이 불안정해질 수도 있을 것으로 예상된다.

우수한 비간섭 제어효과를 얻기 위해서는 식 (16)의 $B_i B_i^+$ 가 단위행렬이 되거나 혹은 단위행렬이 될 수 없는 경우라도 최대한 단위행렬에 가까운 행렬로 되어야 한다. 이러한 목적으로 댄싱롤(dancing roll)이나 루퍼(looper) 시스템 등을 이용하여 각 압연 스탠드에 대하여 후방장력 변동 ΔT_{br} 의 시간변화율에 직접 영향을 줄 수 있는 제어입력 u_{3i} 를 추가하기로 한다. 이때 제어입력 행렬 B_i 는 다음과 같이 확장된다.

$$B_i = \begin{bmatrix} b_{1,1} & 0 & 0 \\ 0 & b_{2,2} & 0 \\ 0 & 0 & b_{3,3} \end{bmatrix} \quad (19)$$

이 경우 B_i 의 역행렬 B_i^{-1} 가 존재하므로 비간섭 제어 입력(식(14))를 통하여 인접 스탠드간의 간섭항들을 완전히 소거할 수 있게 된다.

그리고 제어입력이 3개로 확장되었으므로 상태변수중의 틀속도를 추가하여 3개의 출력변수를 적분한 요소를 포함하는 설계플랜트 모델을 설정할 수 있다. 제어입력의 개수가 증가되었기 때문에 하드웨어적인 문제점은 있을 수 있지만 연속 냉간압연 제어시스템의 안정도-강인성이나 각 압연스탠드의 판두께 및 장력 제어에 대한 성능을 크게 향상시킬 수 있다.

5. 시뮬레이션 및 고찰

연속 냉간 압연시스템의 디지털 예견 및 비간섭 제어의 목적이 외란제거 성능의 향상에 있으므로, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 주어진 외란에 대하여 여러 제어방법에 따른 제어성능을 검토하기로 한다. 연속 냉간 압연

시스템에 가해지는 외란은 압연모재의 판두께변동, 롤 갭변동 등이 있으나, 여기서는 지배적인 영향을 주는 외란인 압연모재의 판두께변동만 고려하기로 한다. 압연모재의 판두께변동이 에너지를 갖는 주파수는 주로 1Hz이하이므로 압연모재에는 진폭 10 μ m, 주파수 1Hz인 정현파 두께변동이 존재한다고 가정하였다. 샘플링 주기는 가장 빠른 최종 스탠드의 응답 특성과 실제적인 제어 수행능력 등을 고려하여 1ms로 선정하였다.

우선 비간섭제어를 수행하지 않는 경우, 첫 번째 스탠드를 제외한 나머지 스탠드에는 분산 LQ제어를 결코 수행할 수 없었다. 이는 두께변동을 줄이려다 스탠드간 큰 후방 장력변동을 유발시켜 인접 스탠드에 악영향을 주어 전체 시스템이 발산하게 된다. 하지만 첫 번째 스탠드에서는 큰 제어입력을 가해도 전체 시스템은 발산하지 않았다. 그리고 두 개의 제어입력을 이용하여 비간섭 제어를 함께 수행했을 때는 두 번째 스탠드까지 어느 정도 분산제어를 할 수 있다. 또한 세 개의 제어입력으로 비간섭 제어를 함께 수행했을 경우 앞서 고찰한 바, 간섭항이 완전히 소거되어 모든 스탠드에 대한 분산제어가 가능하리라 기대하였으나, 실제 시뮬레이션에서는 세 번째 스탠드까지만 어느정도 제어가가능하고 그 후방 스탠드의 제어는 시스템 발산으로 제어 불가능하였다. 이는 비간섭 제어 수행시 디지털 제어신호와 아날로그 플랜트신호의 오차, 특히 빠른 응답특성을 갖는 후방 스탠드로 갈수록 그 오차가 크기 때문에 스탠드간 간섭항이 완전히 소거되지 못한 데서 비롯된 것으로 사료된다. Fig. 7에는 위에서 설명한 바와 같이 LQ 제어만 수행한 경우 그리고 2개/3개의 제어입력을 이용한 비간섭 제어를 함께 수행하여 얻은 최종 압연스탠드의 판두께

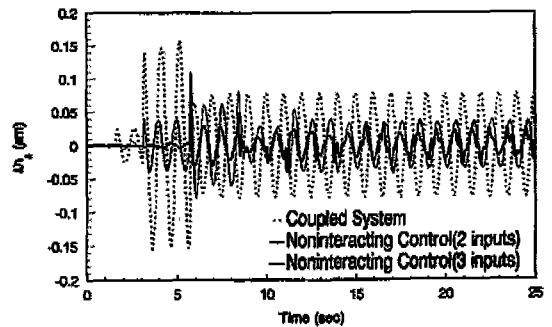


Fig. 7 Delivery strip thickness deviations of the tandem cold mills control system with/without noninteracting control

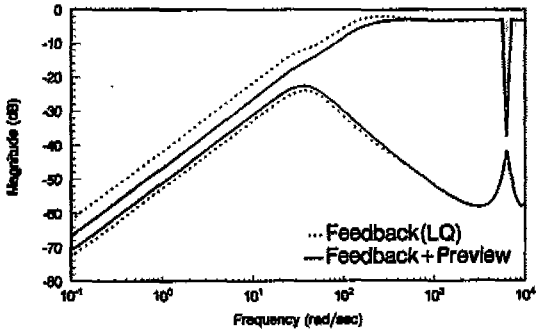


Fig. 8 Singular value plots of the transfer function matrix from disturbances to outputs (No.1 stand)

성능이 비교 표시되어 있다.

연속 냉간 압연시스템은 각 압연기 사이에 두께 측정 센서가 존재하여 각 스탠드의 입측 두께변동은 압연기에 도달하기 전에 측정가능하다. 따라서 외란제거 성능을 더욱 개선시키기 위해 입측 두께 외란에 대한 예견 제어를 수행하였다. Fig. 8은 첫번째 스탠드에 대해 LQ 피드백 제어만 수행한 경우와 예견제어를 병행한 경우의 각각에 대해서 외란에 대한 출력의 특이값선도를 나타낸다. 여기서 예견제어 수행시 최대 특이값이 피드백 제어만 수행한 경우보다 1Hz 이하의 저주파역에서 약 5dB 더 떨어져 외란제거 성능이 크게 개선될 수 있음을 알 수 있다.

그리고 Fig. 9에는 3개의 제어입력을 이용한 비간섭 제어와 함께 LQ 피드백 제어 및 예견제어를 각각 수행했을 경우의 최종 출측 두께변동의 시간응답이 표시되어 있다. 여기서 예견제어를 통해 외란제거 성능을 크

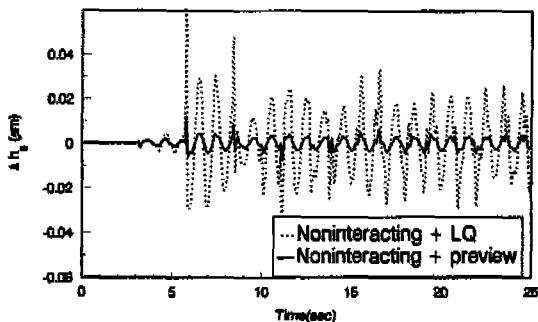


Fig. 9 Time responses of delivery strip thickness deviation of the tandem cold mills with blocked noninteracting and preview controllers

게 향상시킬 수 있음을 볼 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 디지털 예견 제어기법과 블록화 비간섭 제어기법을 이용하여 연속 냉간압연시스템의 판두께와 스탠드간의 장력을 제어할 수 있는 다변수 제어기를 설계하였다. 우선, 각 압연스탠드간의 간섭항을 무시하고 독립된 각 압연 스탠드에 대해 디지털 LQ 제어 및 예견 제어기법을 적용하여 분산 제어기를 설계하였다. 여기서는 압연시스템의 주요 외란인 압연 모재의 판두께변동을 최소화시키는 데 중점을 두었으며, 앞서 측정 가능한 입측 두께변동의 미래정보를 이용한 예견 제어시스템의 구축으로 외란제거 성능을 크게 개선시킬 수 있었다. 압연시스템의 특성상 출측 판두께변동을 감소시킬수록 스탠드간의 장력변동은 크게 나타난다. 이는 인접 스탠드간의 간섭효과를 크게 유발시켜 전체 시스템의 성능을 떨어뜨리는 물론 심한 경우에 시스템을 불안정하게 할 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 분산제어기 설계시 무시된 각 압연스탠드간의 간섭효과를 제거시킬 수 있는 비간섭 제어기를 설계하여 분산 제어기와 함께 제어시스템을 구축하였다. 그리고 물집과 물속도 명령을 이용한 기존의 제어방식인 2개의 제어입력을 사용하는 경우와 장력의 시간변화에 직접 영향을 줄 수 있는 새로운 제어입력을 추가한 경우의 비간섭 제어를 각각 수행하여 그 성능효과를 비교하였다. 그 결과 3개의 제어입력을 사용한 비간섭 제어를 함으로써 연속 냉간 압연시스템의 외란제거 성능을 더욱 크게 향상시킬 수 있었다. 비간섭 제어를 수행하는 경우라도 간섭효과와 완전한 제거가 실제로는 어려우므로, 압연시스템의 안정도를 보장하기 위해서 후방 스탠드에서는 거의 제어를 하지않고 가능한 전방 스탠드 특히 첫번째 스탠드에서 충분한 두께 제어가 되도록 분산제어기를 설계하는 것이 바람직할 것이다.

참고문헌

1. Bryant, G.F., "Automation of Tandem Mills," The Metal Society, Publication No. 160, London, 1973.
2. Edward, W.J., "Design of Entry Strip

Thickness Controls for Tandem Cold Mills," Automatica, Vol.14, pp.429-441, 1978.

3. Franklin, G.F, Powell, J.D. and Workman, M.L., Digital Control of Dynamic Systems, Addison-Wesley, 2nd Ed., 1990.
4. Tomizuka, M. and Whitney, D.E., "Optimal Discrete Finite Problems (Why and How is Future Information Important)," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.97, pp.319-325, 1975.
5. Tomizuka, M. and Rosenthal, D.E., "On the Optimal Digital State Vector Feedback Controller with Integral and Preview Actions," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.101,

pp.172-178, 1979.

6. 김종식, 냉간 압연용 블록화 비간섭 자동제어 제어 시뮬레이션 프로그램 개발, 부산대학교 기계기술연구소, 1993.
7. 김종식, 김철민, "연속 냉간 압연시스템을 위한 비간섭 루프형성 제어기 설계," 대한 기계학회지 제18권 10호, pp.2629-2639, 1994.
8. Bland, D.R. and Ford, H., "The Calculation of Roll Force and Torque in Cold Strip Rolling with Tensions," Proc. Institute of Mech. Eng., Vol.159, pp.144-153, 1948.
9. Ginzburg, V.B., "Basic Principles of Customized Computer Models for Cold and Hot Strip Mills," Iron and Steel Engineer, Sept., pp.21-35, 1985.

연속 냉간 압연시스템의 시스템행렬 (3차모델)

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_{i,j-1}} & 0 \\ a'_{3,1} & a'_{3,2} & a'_{3,3} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_m} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{i,j-1}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ e'_{3,1} & e'_{3,2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{i,j-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ a'_{3,1} & a'_{3,2} & a'_{3,3} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{i,j+1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & a'_{3,2} & a'_{3,3} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_{i,j-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ e'_{3,1} & e'_{3,2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} c'_{1,1} & 0 & c'_{1,3} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} f'_{1,1} & f'_{1,2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_{i,j+1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c'_{1,3} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

여기서,

$$a'_{3,1} = \frac{E_i v_m}{L_i H_i} \frac{K_i}{K_i - \frac{\partial P_i}{\partial h_i}} \left\{ h_i \frac{\partial f_i}{\partial h_i} + 1 + f_i \right\}$$

$$a'_{3,2} = -\frac{E_i}{L_i} (1 + f_{i-1})$$

$$a'_{3,3} = \frac{E_i}{L_i} \frac{v_m}{H_i} \frac{\frac{\partial P_i}{\partial v_m}}{K_i - \frac{\partial P_i}{\partial h_i}} \left\{ h_i \frac{\partial f_i}{\partial h_i} + 1 + f_i \right\} + \frac{h_i v_m}{H_i} \frac{\partial f_i}{\partial v_m} - v_{m-1} \frac{\partial f_i}{\partial v_{m-1}} - v_{m-1} \frac{\frac{\partial P_{i-1}}{\partial v_{m-1}}}{K_{i-1} - \frac{\partial P_{i-1}}{\partial h_{i-1}}} \frac{\partial f_{i-1}}{\partial h_{i-1}}$$

$$e'_{3,1} = \frac{E_i v_m}{L_i H_i} \left[\frac{\frac{\partial P_i}{\partial H_i}}{K_i - \frac{\partial P_i}{\partial h_i}} \left\{ h_i \frac{\partial f_i}{\partial h_i} + 1 + f_i \right\} + h_i \left\{ \frac{\partial f_i}{\partial H_i} - \frac{1 + f_i}{H_i} \right\} \right]$$

$$e_{3,2}^{i,j} = \frac{E_i v_{Ri}}{L_i H_i} \frac{K_i}{K_i - \frac{\partial P_i}{\partial h_i}} \left\{ h_i \frac{\partial f_i}{\partial h_i} + 1 + f_i \right\}$$

$$e_{3,1}^{i,j-1} = -\frac{E_i v_{Ri-1}}{L_i} \left[\frac{\frac{\partial P_{i-1}}{\partial H_{i-1}}}{K_{i-1} - \frac{\partial P_{i-1}}{\partial h_{i-1}}} \frac{\partial f_{i-1}}{\partial h_{i-1}} + \frac{\partial f_{i-1}}{\partial H_{i-1}} \right]$$

$$e_{3,2}^{i,j-1} = -\frac{E_i v_{Ri-1}}{L_i} \frac{K_{i-1}}{K_{i-1} - \frac{\partial P_{i-1}}{\partial h_{i-1}}} \frac{\partial f_{i-1}}{\partial h_{i-1}}$$

$$a_{3,1}^{i,j-1} = -\frac{E_i v_{Ri-1}}{L_i} \frac{K_{i-1}}{K_{i-1} - \frac{\partial P_{i-1}}{\partial h_{i-1}}} \frac{\partial f_{i-1}}{\partial h_{i-1}}$$

$$a_{3,3}^{i,j-1} = -\frac{E_i v_{Ri-1}}{L_i} \left[\frac{\frac{\partial P_{i-1}}{\partial \tau_{Ri-1}}}{K_{i-1} - \frac{\partial P_{i-1}}{\partial h_{i-1}}} \frac{\partial f_{i-1}}{\partial h_{i-1}} + \frac{\partial f_{i-1}}{\partial \tau_{Ri-1}} \right]$$

$$a_{3,2}^{i,j+1} = \frac{E_i h_i}{L_i H_i} (1 + f_i)$$

$$a_{3,3}^{i,j+1} = \frac{E_i v_{Ri-1}}{L_i H_i} \left[\frac{\frac{\partial P_i}{\partial \tau_{Ri}}}{K_i - \frac{\partial P_i}{\partial h_i}} \left\{ h_i \frac{\partial f_i}{\partial h_i} + 1 + f_i \right\} + h_i \frac{\partial f_i}{\partial \tau_{Ri}} \right]$$

$$c'_{1,1} = \frac{K_i}{K_i - \frac{\partial P_i}{\partial h_i}}, \quad c'_{1,3} = \frac{\frac{\partial P_i}{\partial \tau_{Ri}}}{K_i - \frac{\partial P_i}{\partial h_i}}$$

$$f'_{1,1} = \frac{\frac{\partial P_i}{\partial H_i}}{K_i - \frac{\partial P_i}{\partial h_i}}, \quad f'_{1,2} = -\frac{K_i}{K_i - \frac{\partial P_i}{\partial h_i}}, \quad c'_{1,3}{}^{i,j+1} = \frac{\frac{\partial P_i}{\partial \tau_{Ri}}}{K_i - \frac{\partial P_i}{\partial h_i}}$$