韓國精密工學會 '96年度 秋季學術大會論文集 pp.248~254

롤편심을 포함한 냉간 압연시스템의 두께제어

Thickness Control of Cold-Rolling Mills with Roll Eccentricity

김승수*, 김종식 , 황이철(부산대 기계공학부)

Sung Su Kim*, Jong Shik Kim , I Cheol Hwang(School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.)

ABSTRACT

A disturbance rejection controller using eccentricity filtering and LQ control techniques is proposed to alleviate significantly the effect of roll eccentricity in multivariable cold-rolling processes. Fundamental problems such as process time delay inherent in exit thickness measurement and non-stationary characteristics of roll eccentricity signals can be overcome by the proposed control method. The filtered instantaneous estimate of roll eccentricity may be exploited to improve instantaneous estimate of the exit thickness variation based on roll force and roll gap mearsurements, and a feedforward compensator is augmented as a reference for a gaugemeter thickness estimator. And, LQ feedback controller is combined with eccentricity filter for the attenuation of the exit thickness variation due to the entry thickness variation. The simulation results show that eccentricity components have been significantly eliminated and simultaneously other distrubances also have been attenuated.

Key Words: Roll Eccentricity(롤편심), Thickness Control(두께제어), Gaugemeter Thickness Estimator (게이지미터 두께 추정기), LQ Feedback Controller (LQ 피드백 제어기), Multivariable Rolling Mills(다변수 압연기)

1. 서 론

연속 냉간압연 제어시스템은 압연스탠드간의 판장력을 일정 범위내에 유지하면서 여러가지 외란에 대해서 출측 판두께 변동을 가능한 한 작게 하여 고정도의 압연재를 생산하고자 하는 것이다. 이때 판두께 및 장력을 교란시키는 주된 외란요소로는 판재의 경도변화와 용접 이음부를 포함한 입측 판두께 변동과 열팽창, 롤갭의 set-up 오차 그리고 롤의 편심 등이 있다.

근래 금속 압연공정 현장에서는 10㎜에서 0.03㎜ 수준의 박판이 생산되고 있으며, 판재 정밀도는 더욱 엄격해지고 있다. 이와 더불어 판두께 제어에 있어서 종래에는 그다지 중요하게 여기지 않았던 롤의 편심에 의한 판두께 변동이 중요 문제로 부각되었으며, 이미 오래전부터 Edwards[1,2], Mike[3] 등이 주로 현장과 연계한 연구를 진행하였지만, 이들은 주로 단일 입출력 압연 현상에 근거하여 롤편심 추정 또는/그리고 롤편심 제어만을 고려하였다. 그러나 연속 압연시스템은 전형적인 다변수 시스템이며 따라서 판장력은 물론 롤편심과는 다른 입측 외란의 영향을 동시에 고려한 다변수 압연 제어시스템의 특성을 이해하는 것이 필요하다. 1970년대 중반 이후 현재에 이르기까지 Longmuir[4], Hoshino[5] 등의 제어 이론가들에 의해 다변수 압연 모델에 대하여 주로 LQ 최적 제어기법, 비간섭 제어 등의 연구가 발표되었으나, 이 연구들에 의하면 압연기의 일반적인 외란들과 동시에, 독특한 특성을 갖는 롤편심의 근본적인 제거까지는 모델링 단계부터 고려하기 어려웠다.

본 논문에서는 우선 롤편심 제어와 아울러 모든 외란요소를 고려할 수 있는 압연 다변수 모델을 구성하고, 롤편심 및 판두께를 추정할 수 있는 필터를 설계함으로써 출력변수의 측정 시간지연 문제를 자연스럽게 해결한다. 그리고 이 추정된 신호를 이용한 롤편심의 피드포워드 제어와 입측 두께변동 외란제거를 위한 LQ 피드백 제어로 구성된 다변수 압연 제어시스템을 설계한다. 마지막으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 다변수 압연 제어시스템의 분석 및 성능개선을 위한 설계방향 및 문제점 등을 제시한다.

2. 연속 냉간 압연모델

압연 판두께 제어공정은 Fig. 1에 표시된 바와 같이 압연스탠드 사이를 통과하는 판재의 두께를 감소시키는 생산공정으로서, 이는 출측 판두께가 정한 기준값에 대해 가능한 한 오차가 작도록 롤갭과 롤속도 등의 제어입력을 적절히 조절하는 것이다.

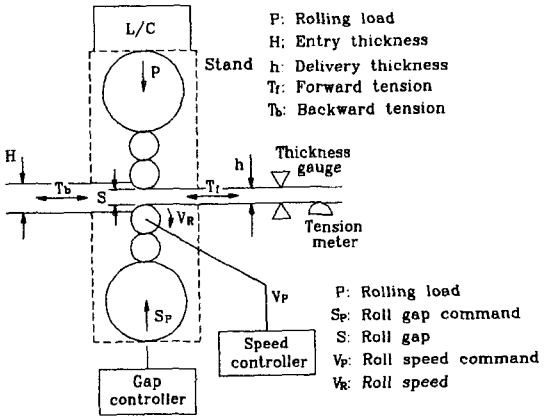


Fig. 1 Rolling process of a mill stand

연속 냉간 압연시스템의 모델링을 위해서는, 우선 정해진 압연생산계획, 즉 압연될 모재의 판두께와 판폭, 최종 스탠드에서 요구되는 출측 판두께와 판속도에 대해 각 스탠드의 압하율을 결정하고, 이에 따라 각 압연스탠드의 압연인자들에 대한 작동점(롤속도, 롤갭, 스탠드간 장력 등의 셋업 초기조건)이 선정되어야 한다.

그리고 압연기에 대한 선형모델을 얻기 위해서 압연공정에 관한 비선형식들(압연하중 및 선진율식)에서 관련인자들의 미소변동에 대한 영향계수 연산이 요구되며, 이와 함께 다음과 같은 압연 공정에 관한 기본 방정식들이 이용된다.

1) 압연하중식 및 선진율식

$$P_{Ai} = P_A(h_i, H_i, T_{bi}, T_{fi}) \tag{1}$$

$$f_i = f(h_i, H_i, T_{bi}, T_{fi}) \tag{2}$$

압연하중의 예측과 선진율 계산은 각각 Hill의 압연하중 이론식과 Bland와 Ford의 선진율식을 이용하였다.

2) 하우징(housing) 식

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{1}{T_{pi}}(-P_i + P_{Ai}) \tag{3}$$

3) 압하계 식

$$\frac{dS_i}{dt} = \frac{1}{T_{si}}(-S_i + S_{pi}) \tag{4}$$

4) 판속도계 식

$$\frac{dV_{Ri}}{dt} = \frac{1}{T_{vi}}(-V_{Ri} + V_{pi}) \tag{5}$$

5) 판속도 식

$$V_{oi} = (1 + f_i)\, V_{Ri} \tag{6}$$

여기서 V_{oi}는 출측 판속도이고, f_i는 선진율이다.

6) 체적속도 일정 식

$$H_i V_{ei} = h_i V_{oi} \tag{7}$$

여기서 V_{ei}와 V_{oi}는 각각 입측 및 출측 판속도이다.

7) 출측 판두께 식

$$h_i = \frac{P_i}{M_i} + S_i + e_i \tag{8}$$

여기서 M_i 는 Mill 변형상수이다.

8) 장력 식

$$\frac{dT_{bi}}{dt} = \frac{EbH_i}{L}(V_{ei} - V_{oi-1}) \tag{9}$$

여기서 E는 Young 률, b는 판폭, L은 스탠드간 거리이다.

Fig. 2는 압연공정의 입-출력 관계를 나타내며, $\Delta(\bullet)$는 변수 $(\bullet)$의 압연계획에 따른 공칭값에 대한 섭동량(perturbation)을 의미한다.

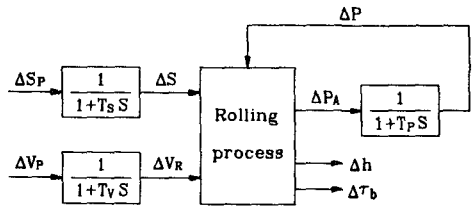


Fig. 2 Input-output relations in a rolling process

위의 모든 식들에 대해 각각 미소변동식을 먼저 구하고, 미분방정식 (3), (4), (5), (9)에 대해 나머지 식들을 종합하면 연속 냉간 압연공정을 다음과 같은 상태공간 모델식으로 표현할 수 있다. 여기서는 본 논문의 목적상 인접 스탠드간의 간섭항은 비간섭 제어[6]에 의해 소거되었다고 가정하고, 독립된 압연 스탠드에 대한 모델식으로 간략화하였다.

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + E_i w_i(t) \tag{10}$$

$$y_i(t) = C_i x_i(t) + F_i w_i(t) \tag{11}$$

여기서, i 는 스탠드의 번호를 의미하며, 시스템행렬 A_i, B_i, C_i, E_i, F_i의 각 요소들을 계산하는 식들은 지

면관계상 생략하였다. 그리고 압연 플랜트의 상태 x_i, 제어입력 u_i 및 출력 y_i 그리고 외란 w_i는 각각 다음과 같다.

$$x_i = [\Delta S_i \;\; \Delta P_i \;\; \Delta V_{Ri} \;\; \Delta T_{bi}]^T,$$

$$u_i = [\Delta S_{pi} \;\; \Delta V_{pi}]^T,$$

$$y_i = [\Delta h_i \;\; \Delta T_{bi}]^T \;, w_i = [\Delta H_i \;\; e_i]^T$$

이미 발표된 논문[7]에서는 제어하고자 하는 출측 판두께의 측정 시간지연을 무시했을 뿐만 아니라 롤편심의 효과를 모델식에 제대로 반영할 수 없었으나, 본 논문에서는 이들 모두를 효과적으로 고려하기 위해 출측두께를 대신하여 롤갭과 롤하중을 동시에 상태변수로 포함하여 새로운 다변수 압연 모델식을 구축하였다.

3. 롤편심 추정

게이지미터(gaugemeter) 두께오차 추정기법을 이용하여 롤의 두께제어를 개선하고자 한다. 게이지미터 두께오차 추정은 롤하중과 롤갭의 측정량으로부터 출측판두께를 추정하는 것으로서, 우선 측정 불가능한 롤편심을 무시하면 식 (8)로부터 다음과 같은 출측 두께변동의 추정치 $\Delta \hat{h}_g$ 를 얻을 수 있다.

$$\Delta \hat{h}_g = \frac{1}{M} \Delta P + \Delta S \qquad (12)$$

만일 $\Delta \hat{h}_g$ 를 이용한 고-게인(high-gain) 피드백 제어시스템을 구성하면 롤편심 이외의 외란은 제거시킬 수 있겠지만, 롤편심은 잡음으로 출력에 더해지기 때문에 피드백에 의해 편심의 악영향을 제거하기는 어렵다. Fig. 3은 이를 설명해 주고 있으며, 이는 식 (1)의 선형화된 미소변동식(여기서는 롤편심의 제어 특성만을 설명하기 위한 목적상, 하우징의 동역학(식 (3))은 무시하고 압연하중식 (1)에서 $P = P_A$로 가정)을 식 (13)과 같이 단순한 형태로 가정하고 식 (8)의 미소 변동식과 조합하여 표현한 것이다.

$$\Delta P = -K \Delta h + P_d \qquad (13)$$

여기서 $K = -\frac{\partial P}{\partial h}$ 이고, P_d 는 롤편심 이외의 압연인자들에 의한 롤하중의 변동량을 의미한다.

위의 문제를 해결하는 방법으로서, 롤하중과 출측두께 신호는 모두 롤편심 효과에 대한 정보를 포함하지만 앞서 언급한 바와 같이 백업롤 편심의 특성상 어느 하나만으로는 불완전하며, 또한 제어시에는 롤갭 입력이 이들 신호에 영향을 주므로 이들 세 가지 신호를 조합함으로써 전체 롤편심 외란을 보다 정확하게 추정할 수 있다.

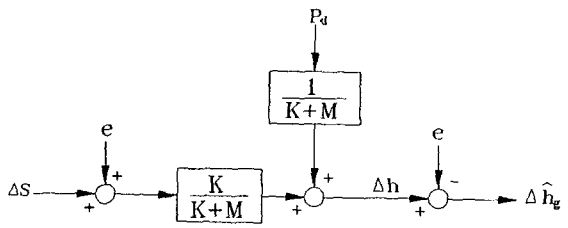


Fig. 3 Gaugemeter thickness estimator

롤편심 신호의 특성은 백업롤의 회전에서 비롯되기 때문에 주기적이다. 하지만 베어링 특성, 열팽창 등 여러가지 요인들로 비정상적(non-stationary)이다. 그러므로 공회전시의 롤편심의 정보를 이용하는 것보다 온-라인(on-line)에서 편심의 정보를 추정하는 것이 바람직하다. 롤편심 추정을 위한 신호 $\hat{e}^*$ 는 식 (8)로부터 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\hat{e}^* = \Delta h - \frac{1}{M} \Delta P - \Delta S \qquad (14)$$

실제 측정되는 출측두께 변동량 $\Delta h_m(t)$의 측정 시간지연 τ_d를 고려하면, 시간 $(t - \tau_d)$에서의 롤편심 추정신호 $\hat{e}^*(t - \tau_d)$는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{e}^*(t-\tau_d) = \Delta h_m(t) - \frac{1}{M} \Delta P(t-\tau_d) - \Delta S(t-\tau_d) \qquad (15)$$

여기서, ΔF와 ΔS의 과거 신호들은 저장되어 있다고 가정한다. 이때 롤편심의 주기 τ 를 알고, 또한 일반적으로 $\tau > \tau_d$ 이면 다음 식을 이용하여 현재시간의 롤편심량을 추정할 수 있다.

$$\hat{e}(t) = \hat{e}(t-\tau) \qquad (16)$$

그러나 식 (14)에서 얻어지는 실제의 전체 롤편심 신호는 일반적으로 식 (17)과 같은 여러 개의 주기를 가지는 조화성분들과 측정잡음 $n(t)$의 합으로 표현되므로, 식 (16)을 이용하기 위해서는 $\hat{e}^*$에서 서로 다른 주기를 가지는 롤편심 성분들 e_j 를 각각 추정해야 할 필요가 있다.

$$\hat{e}^* = \sum_{j=0}^{4} e_j + n \qquad (17)$$

Fig. 4는 롤편심 및 출측두께의 실시간 신호를 온-라인에서 추정하는 방법을 간략화하여 나타낸 블록선도이다.

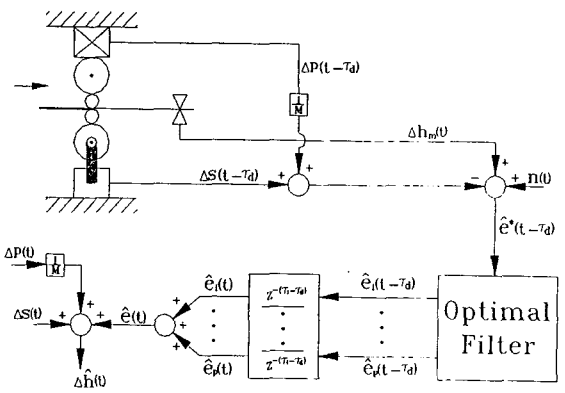


Fig. 4 Eccentricity estimator and exit thickness predictor

4. 주기적 신호 추정을 위한 최적 필터설계

이 절에서는 식 (14), (17)에서 각각의 주기적 롤편심 성분 e_j를 필터링하기 위한 최적필터를 설계하고자 한다. 필터의 입력신호 $\hat{e}^*$는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{e}^*(t) = \sum_{j=1}^{\mu} G_j \sin(\omega_j t + \phi_j) + n(t) \qquad (18)$$

여기의 조화성분에서 주파수 ω_j를 제외한 크기 G_j, 위상 ϕ_j는 알지 못하며, 비정상적이다. 우선 위 식에서 어떤 주어진 주기 $\tau_o (= 2\pi/\omega_o)$인 하나의 조화성분을 가정하여, 이를 이산시간 상태공간 모델식으로 표현하면 다음과 같다.

$$s(k+1) = \begin{bmatrix} C_o & S_o \\ -S_o & C_o \end{bmatrix} s(k) \qquad (19)$$

$$\hat{e}^*(k) = Hs(k) + n(k) \qquad (20)$$

여기서, $C_o = \cos\omega_o T$, $S_o = \sin\omega_o T$, $H = [1\ 0]$, 그리고 롤편심 모델의 상태벡터 $s(k) = [s_1(k)\ \ s_2(k)]^T$ 이며, T는 샘플링 주기이다.

이때 상태 $s(k)$를 추정하기 위한 최적 필터방정식은 다음과 같이 알려져 있다[8].

$$\hat{s}(k+1) = \begin{bmatrix} C_o & S_o \\ -S_o & C_o \end{bmatrix} \hat{s}(k) + K(k)[\hat{e}^*(k) - H\hat{s}(k)] \qquad (21)$$

여기서, $K(k)$는 Riccati 방정식에서 얻어지는 최적게인이다. 참고문헌[8]에 의하면 필터게인 $K(k)$는 $1/k$에 비례하여 0 으로 수렴한다. 그리고 식 (19)의 특성근이 단위원 상에 있기 때문에 이 필터는 점근적으로 안정하지만 지수적 안정은 아니다. 따라서 필터의 출력은 현재의 입력신호에 둔감하거나 거의 영향을 받지 않게 된다. 이는 실제의 롤편심 신호가 완전히 정상적(stationary)이지 않을 경우 바람직하지 못하다.

이와 같이 비정상적이며 주기적인 신호의 추정을 위한 최적필터로서, Goodwin[9]이 제안한 Riccati 방정식의 해에 의존하지 않고 선정할 수 있는 시불변 필터게인 $\overline{K}(k)$를 사용하기로 한다.

$$\overline{K}(k) = \varepsilon \begin{bmatrix} C_o \\ -S_o \end{bmatrix} \qquad (22)$$

여기서 ε는 설계파라미터($0 < \varepsilon < 1$) 이며, 추정하고자 하는 주기적 신호의 변화에 대한 추정속도는 물론 편심주기 변화에 대한 정현파 추정신호의 크기 및 위상차의 감도를 결정한다.

이때 식 (22)를 식 (21)에 대입하면 다음과 같다.

$$\hat{s}(k+1) = \begin{bmatrix} (1-\varepsilon)C_o & S_o \\ (1-\varepsilon)S_o & C_o \end{bmatrix} \hat{s}(k) + \varepsilon \begin{bmatrix} C_o \\ -S_o \end{bmatrix} \hat{e}^*(k) \qquad (23)$$

따라서 롤편심 추정을 위한 필터의 펄스 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{e}(z) = \frac{\varepsilon C_o z - \varepsilon}{z^2 - (2-\varepsilon)C_o z + (1-\varepsilon)} \hat{e}^*(z) \qquad (24)$$

이 필터의 특성을 요약하면 다음과 같다.

1) 지수적으로 안정하다.
2) 작은 ε에 대해 필터의 극점은 거의 $(1-\varepsilon/2)C_o \pm j(1-\varepsilon/2)S_o$으로 표준 최적 필터에 비해 강인성을 가진다.
3) 주파수 ω_o에서 필터의 주파수 응답은 정확하게 크기 1 이고, 위상차 0 이나 ω_o에서 벗어난 주파수역에서는 저-게인(low-gain)을 갖는다.

전체 롤편심 성분에 대한 필터방정식을 구성하고, 롤편심의 각 주기에 대응한 필터의 출력신호들에 대해 식 (16)을 이용하면, 다음과 같이 전체 롤편심 $e(t)$ 및 롤편심이 보상된 출측 두께 $\Delta h(t)$를 추정할 수 있다.

$$\hat{e}(t) = \sum_{j=1}^{\mu} \hat{e}_j(t - \tau_j) \qquad (25)$$

$$\Delta\hat{h}(t) = \frac{1}{M}\Delta P(t) + \Delta S(t) + \hat{e}(t) \qquad (26)$$

5. 제어기 설계

롤편심은 측정할 수는 없지만 롤편심의 주기적 성질을 이용하면 롤편심 외란은 물론 출측 두께의 현재 신호를 추정할 수 있다. 추정된 롤편심 신호는 피드백과 피드포워드 제어에 의해 편심외란의 효과를 보상하는데 이용할 수 있을 뿐만 아니라 시간지연과 롤편심이 보상된 출측 두께 신호를 피드백 제어에 이용함으로써 고정도의 두께제어를 달성할 수 있다.

식 (8)의 미소 변형식과 식 (13)에서 ΔF를 소거하면 특정한 판두께의 보정 또는 알고 있는 롤하중 외란을 보상하기 위해 요구되는 롤갭의 제어변동량을 나타내는 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta S = (1+a)\Delta h - P_d/M - e \qquad (27)$$

여기서, 소성상수 $a = \frac{\partial P}{\partial h} / M$ 이다.

우선, 롤편심 외란제어를 위해 바람직한 출측두께 변동량은 추정신호 $(-\Delta \hat{h})$가 이용되며, 식 (27)에서 유도된 파라미터 $(1+a)$를 곱함으로써 롤갭 변동량으로 전환된다. 그리고 작업롤간의 실질적 갭에 대한 롤편심의 영향을 고려하기 위해 롤편심 추정신호 $(-\hat{e})$를 더하면, 롤갭 변동량에 대한 제어법칙 $u_e (= \Delta S_{pe})$는 다음과 같이 선정될 수 있다.

$$\Delta S_{pe} = -k_1 (1+a)\Delta \hat{h} + k_2 \hat{e} \qquad (28)$$

여기서 제어게인 k_1, k_2는 LQ 피드백 제어효과와 절충을 위한 설계파라미터로 이용된다.

한편 입측 두께변동의 외란제거 뿐만 아니라 다변수 압연 제어시스템의 일반적 성능들을 고려하기 위해 다변수 피드백 제어기법인 디지털 LQ 제어를 이용하기로 한다. 이때 압연 모델식 (10), (11)은 롤편심 외란 w_1의 영향이 더해진 출력변수 Δh가 상태변수에 포함되지 않기 때문에 피드백 루프 밖에서 발생된 오차를 전혀 제어할 수 없다. 이와 함께 입측 두께변동이 에너지를 갖는 저주파역에서 외란제거 성능을 향상시키기 위하여 Fig. 6 과 같이 오차(출력) 채널에 적분기를 추가시켜서 설계플랜트 모델을 구축한다. 그리고 피드백을 위한 출력변수 Δh는 시간지연 및 롤편심이 보상된 추정신호 $\Delta \hat{h}$를 이용하기로 한다. 이때 이산시간 상태공간 모델은 다음과 같이 표현된다.[7]

$$\tilde{x}(k+1) = \Phi \tilde{x}(k+1) + \Gamma u(k) + \Gamma_d w(k) + \Gamma_f w(k+1) \qquad (29)$$

$$y(k) = \tilde{C}\tilde{x}(k) + Fw(k) \qquad (30)$$

여기서 확장된 상태변수 $\tilde{x}(k) = [\, q(k) \quad x(k)\,]^T$ 이고, $q(k)$는 적분기의 출력이다. 그리고 최적 LQ 레귤레이터 문제의 성능지수 J는 다음과 같이 정의된다.

$$J = \frac{1}{2}\sum_{k=0}^{\infty} [\, \tilde{x}(k)^T Q \tilde{x}(k) + u^T(k) R u(k)\,] \qquad (31)$$

여기서 Q, R은 최적제어 설계파라미터들이며, 제어입력 $u_{LQ}(k)$는 다음과 같이 선정된다.

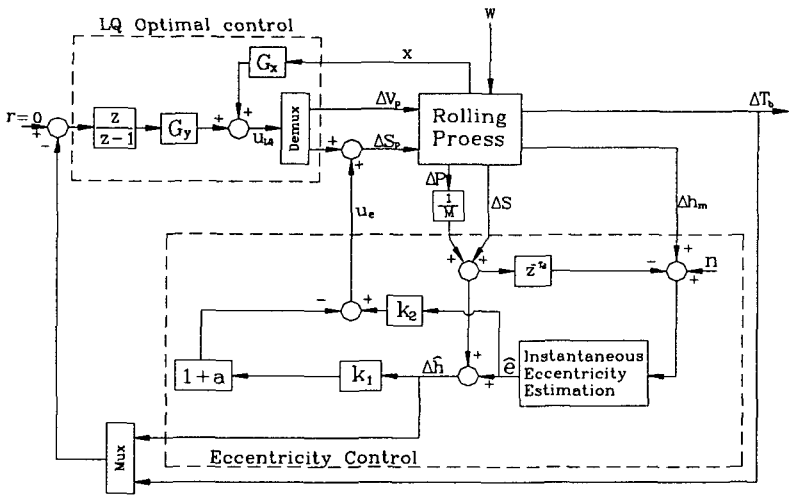
$$u_{LQ}(k) = -G\tilde{x}(k) \qquad (32)$$

여기서, 피드백 제어게인 G 및 관련된 Riccati 방정식은 각각 다음과 같다.

$$G = [R + \Gamma^T S \Gamma]^{-1} \Gamma^T S \Phi \qquad (33)$$

$$S = Q + \Phi^T S \Phi - \Phi^T S \Gamma [R + \Gamma^T S \Gamma]^{-1} \Gamma^T S \Phi \qquad (34)$$

Fig. 5는 롤편심 추정 및 LQ 제어기가 통합된 다변수 압연 제어시스템의 구조를 나타낸다.



6. 컴퓨터 시뮬레이션 및 성능분석

Fig. 5에서 제안한 냉간 압연 제어시스템의 시뮬레이션을 위해 사용된 주된 파라미터의 값들은 다음과 같다. Mill 탄성계수 M: 0.39 MN/mm, 소재 소성상수 a: 1.21, 출측두께의 측정 시간지연 τ_d: 0.15 sec, 정상 백업롤 주기 0.25 sec, 샘플링 주기 $T = 0.001$ sec이다. 그리고 외란신호는 Fig. 6과 같이 가정하였다.

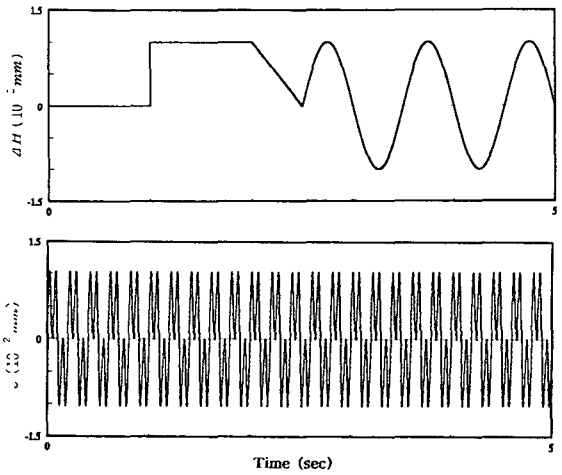


Fig. 6 Entry thickness variation and roll eccentricity (disturbance signals)

우선 롤편심 제어만을 수행한 경우, 출측 두께변동(y_1)에서 롤편심 외란성분(w_2)은 거의 제거할 수 있는 반면, 입측 두께변동(w_1)의 제거에는 효과가 거의 없음을 알 수 있다. 그리고 장력변동(y_2)에서는 w_2으로 인한 영향은 역시 감소하지만, w_1의 영향은 (제어를 하지 않은 경우 또는 LQ 피드백 제어시는 거의 무시할 정도) 장력변동에 다소 반영되어 나타남을 알 수 있다 (Fig. 7).

한편 LQ 피드백 제어만(이때 출측 판두께 신호가 추정을 통해 피드백 신호로 이용 가능하다고 가정)을 수행한 경우, 출측 두께변동(y_1)에서 입측 두께변동(w_1)의 영향은 크게 줄일 수 있는 반면 롤편심(w_2)으로 인한 판두께변동은 w_1의 영향을 감소시킬수록 오히려 증폭되며, 이는 제어를 수행하지 않은 경우보다 오히려 나쁜 결과를 초래한다. 그리고 장력변동(y_2)에서 외란 w_1의 영향은 거의 없으나, 피드백 제어시 외란 w_2에 의한 영향은 역시 제어를 수행하지 않은 경우에 비해 다소 커짐을 알 수 있다 (Fig. 8).

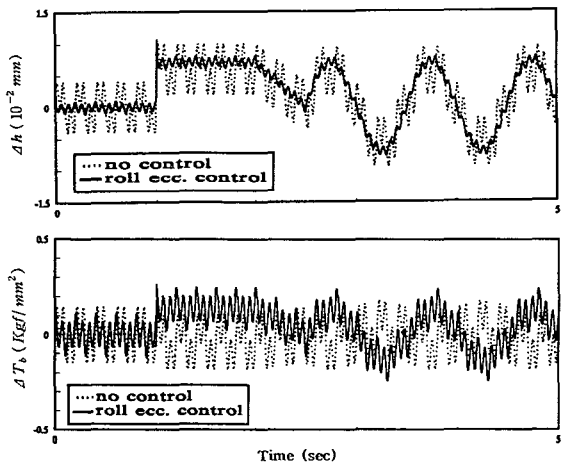


Fig. 7 Time responses of the outputs for a mill control system (roll eccentricity control only)

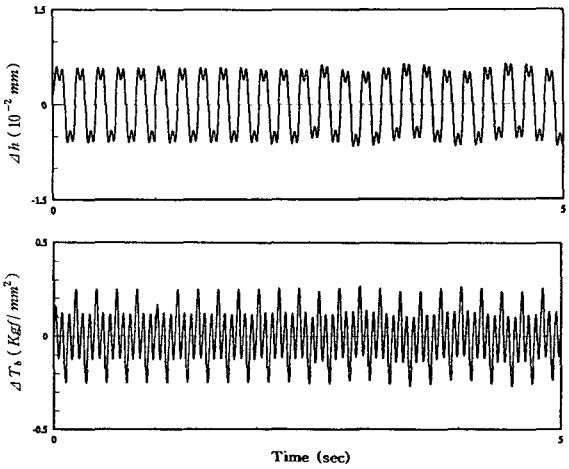


Fig. 8 Time responses of the outputs for a mill control system (LQ control only)

마지막으로 LQ 피드백 제어와 롤편심 제어를 동시에 수행한 결과는 Fig. 9와 같다. 이때 출측 두께변동에서의 외란 w_1 과 w_2 의 동시 제거에 큰 효과를 보여

주고 있다. 이 결과는 LQ 피드백 제어시의 w_1 제거효과와 롤편심 제어시의 w_2 제거효과를 각각 합성한 경우의 응답과 비교하면, w_1과 w_2 성분 모두 제거효과가 다소 약해지나, 본 논문의 대상이 다변수 시스템임을 고려하면 당연하다. 한편 장력변동에서는 롤편심 제어의 피드포워드 성분의 영향은 거의 유지되는 반면 피드백 성분은 LQ 피드백 제어신호와 합해져 입측 두께변동 외란의 정현파 성분이 다시 증폭되어 나타남을 알 수 있다.

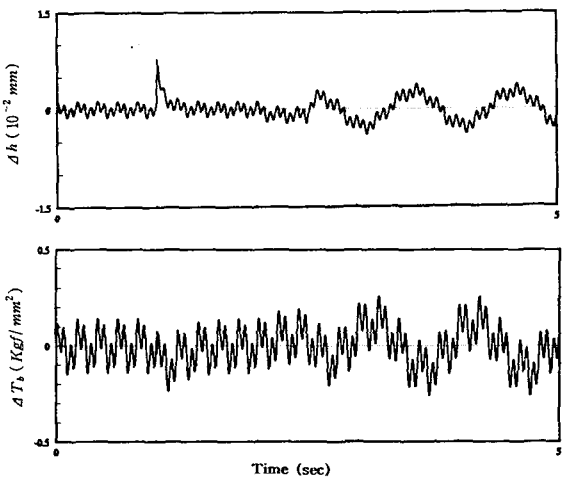


Fig. 9 Time responses of the outputs for a mill control system (LQ and roll eccentricity control)

이와 같은 결과들을 통해서 일반적인 압연 다변수 시스템에 대한 외란 입력들의 상대적 특성에 따라 LQ 제어 설계파라미터 Q, R 또는/그리고 롤편심 제어 설계파라미터 k_1, k_2 등을 비교적 쉽게 절충할 수 있을 것으로 사료된다.

7. 결론

본 논문에서는 다변수 압연시스템을 고려하여, 롤편심과 함께 다른 입측 외란들 모두를 제어할 수 있는 새로운 압연 모델식을 구축하였다. 측정 불가능한 롤편심 신호의 온-라인 추정은 편심 외란에 대한 피드포워드 제어는 물론, 출력변수의 시간지연을 해결함으로써 다변수 LQ 피드백 제어기 설계에도 유용함을 확인하였다. 그리고 롤편심 제어 및 LQ 최적제어 그리고 통합된 제어시스템의 종합적인 해석을 통하여 두 제어기간의 상호 보완적 특성 등 다변수 압연 두께 제어기의 성능 개선을 위한 설계방향을 제시하였다. 그러나 다변수 압연 제어현상의 특성상 여러 가지 불확실성에 따른 롤속도 변동이 클 경우, 본 논문에서 이용한 롤편심 필터의 추정신호는 물론 출력신호에 큰 오차를 야기하여 기대한 성능을 얻기 어렵다. 따라서 연속 냉간 압연시스템에 불확실성을 고려한 강인한 필터 또는/그리고 H_∞ 제어기 설계 등의 연구도 계속 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Edwards, W. J., " Design of Strip Thickness Controls for Tandem Cold Mills", Automatica, Vol. 14, pp. 429-441, 1978.
2. Edwards, W. J. and Thomas, P. J. and Goodwin, G. C., "Roll Eccentricity Control for Strip Rolling Mills", 10th IFAC World Congress, Munich, Vol. 2, pp. 200-211, 1987.
3. Mike, T., S. Takai, and T. Yanaguchi, "A New Roll Eccentricity Compensation System", Nisshin Steel Technical Report No. 51, p. 77, 1984.
4. Longmuir, A. G., "Dynamic Control of Multi-stand Aluminum Cold Rolling Mills", Proc. 4th IFAC/IFIP International Conf. On Digital Computer Applications to Process Control, Part II, pp. 25-38, 1974.
5. Hoshino, I., Maekwa, Y., Fujimoto, T. and Kimura, H., "Observer-based Multivariable Control of the Alumium Cold Tandem Mill", Automatica, Vol.24, No. 6, pp. 751-745, 1988.
6. 김종식, 연속 냉간 압연용 다변수 AGC 시스템 설계, 포항제철 기술연구소 위탁과제 연구 보고서, 1994.
7. 김종식, 김승수, 이규택, "연속 냉간 압연시스템의 디지털 최 적 예견제어", 대한기계학회 논문집, 제 19권 9호, pp. 2142-2153, 1995.
8. Goodwin, G. C. and K. S. Sin, Adaptive Filtering Prediction and Control, Prentice Hall, 1984.
9. Goodwin, G. C., R. J. Evans, R. L. Leal and R. A. Feik, "Sinusoidal Disturbance Rejection with Application to Helicopter Flight data Estimation", IEEE ASSP, Vol. 34, No.3, pp. 479-485, 1986.