

< 논 문 >

## 롤편심을 포함한 냉간압연 시스템의 다변수 제어

김종식\* · 김승수\*\*

(1996년 9월 14일 접수)

### Multivariable Control of Cold-Rolling Mills with Roll Eccentricity

Jong Shik Kim and Sung Su Kim

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

#### Abstract

A disturbance rejection controller using eccentricity filtering and LQ control techniques is proposed to alleviate the effect of major roll eccentricity in multivariable cold-rolling processes. Fundamental problems in multivariable cold-rolling processes 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 measurements, and a feedforward compensator is augmented as a reference for a gagemeter thickness estimator. 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 the roll eccentricity disturbance is significantly eliminated and other disturbances also are attenuated.

#### 1. 서 론

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

근래 금속 압연공정 현장에서는 10 mm 에서 0.03

mm 수준의 박편이 생산되고 있으며, 판재 정밀도는 더욱 엄격해지는 추세로 1% 이내의 오차를 요구하기도 한다. 이와 더불어 판두께 제어에 있어서 종래에는 그다지 중요하게 여기지 않았던 롤의 편심에 의한 판두께 변동이 중요 문제로 부각되었으며, 이미 오래전부터 Walts,<sup>(1)</sup> Edwards,<sup>(2,3)</sup> Mike<sup>(4)</sup> 등이 주로 현장과 연계한 연구를 진행하였지만, 이들은 주로 단일 입출력 압연현상에 근거하여 롤 편심 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 중반이후 현재에 이르기까지 Longmuir,<sup>(5)</sup>

\*회원, 부산대학교 기계설계공학과

\*\*부산대학교 기계기술연구소

Tanuma,<sup>(6)</sup> Hoshino<sup>(7)</sup> 등의 제어 이론가들에 의해 다변수 압연 모델에 대하여 주로 LQ 최적제어기법, 비간섭 제어 등의 연구가 발표되었으나, 이 연구들에 의하면 압연기의 일반적인 외란들과 동시에, 독특한 특성을 갖는 롤편심의 근본적인 제거까지는 모델링 단계부터 고려하기 어려웠다.

연속 냉간압연기의 압연공정에서 물에 들어가는 소재특성의 변동, 특히 경도변화 또는 입측두께변동은 소재를 변형하기 위한 롤 압하력의 변동을 가져다 준다. 그리고 압연 스탠드들은 탄성적이고, 물 또한 하중에 의해 변형되기 때문에 압연 하중변동은 작업롤(work roll) 간의 실제적인 롤갭의 변화를 유발시켜서 이는 결국 압연재의 두께변동을 일으키게 된다. 물의 판두께 제어시 흔히 이용되는 게이지미터(gaugemeter) 두께추정기법은 측정된 롤하중 및 롤갭의 신호를 이용하여 이 측정된 신호들과 같은 시간에서의 출측두께신호를 추정하는 것으로서, 이는 내부 피드백 구성시 출측두께신호의 본질적인 측정 시간지연을 피할 수 있다.

게이지미터 두께추정을 이용한 제어기법에서 경도변화나 입측판두께 변동과 같은 외란신호는 롤하중 변동량으로 나타나게 되고, 이 신호가 피드백되어 적절한 롤갭의 변위를 지시하게 되어 판두께 변동량을 줄이는 방향으로 작용하게 된다. 이때 이 제어루프의 성능은 롤하중 감도계수의 정확도와 제어기의 게인은 물론 스크류 액추에이터의 응답시간 등에 좌우된다. 한편 압연공정에서 롤편심에 의한 외란은 직접적인 롤하중 변동뿐만 아니라 작업롤간의 실질적인 롤갭변동과 동시에 이로 인한 롤하중 변동이 더해져 앞서 언급한 외란요인과는 다른 복잡한 특성을 가진다.

연속 냉간압연기에서 롤하중에서의 편심 성분들의 주요원인은 롤가공공정에서 비롯된 백업롤(back-up roll)의 편심이다. 이는 롤 자체의 비원통 형상(non-cylindrical shape) 또는 스탠드에 장착되었을 때 롤과 베어링간의 중심 불일치로 비롯된다. 한편 작업롤은 통상 백업롤 반경의 1/3 수준으로서 수직 방향으로 베어링에 구속되지 않기 때문에 작업롤의 편심은 롤하중의 편심성분에는 크게 영향을 주지 않는다. 그러나 백업롤의 편심은 실제적인 롤갭에 영향을 주게 되어 주기적으로 롤하중 변동을 일으키게 된다. 이 효과는 앞서 언급한 외란요인과는 달리, 어느 순간의 백업롤 편심이 실질적인 작업롤간의 갭의 감소와 동시에 롤하중을 증가시키는 경

우, 롤편심을 무시한 게이지미터 제어에서는 롤하중의 증가만을 인식하여 롤갭을 더욱 감소시키는 방향으로 작용하게 된다. 따라서 물에 중요한 편심이 존재하는 경우 판두께 추정치의 오차는 일반적인 상태 피드백제어시 오히려 출측판두께에 롤편심에 의한 악영향을 증폭시키게 된다.

본 논문에서는 우선 롤편심 제어와 아울러 모든 외란요소를 고려할 수 있는 압연 다변수 모델을 구성하고, 롤편심 및 판두께를 추정할 수 있는 필터를 설계함으로써 출측두께의 측정 시간지연 문제를 자연스럽게 해결한다. 그리고 이 추정된 신호를 이용한 롤편심의 피드포워드제어와 입측두께변동 외란제거를 위한 LQ 피드백제어로 구성된 다변수 압연 제어시스템을 설계한다. 마지막으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 다변수 압연 제어시스템의 성능을 분석하고, 시뮬레이션 결과와 제어시스템 해석을 통하여 다변수 압연 제어시스템의 성능 개선을 위한 설계방향 및 문제점 등을 제시한다.

## 2. 연속 냉간압연모델

압연판두께 제어공정은 Fig. 1에 표시된 바와 같이 여러 개의 롤로 구성된 압연스탠드 사이를 통과하는 판재의 두께를 감소시키는 생산공정으로서, 이는 출측판두께가 정한 기준값에 대해 가능한 한 오차가 작도록 롤갭과 롤속도 등의 제어입력을 적절히 조절하는 것이다.

연속 냉간압연 시스템의 모델링을 위해서는, 우선 정해진 압연생산계획, 즉 압연될 모재의 판두께와 판폭, 최종 스탠드에서 요구되는 출측판두께와 판속도에 대해 각 스탠드의 압하율을 결정하고, 이에 따라 각 압연스탠드의 압연인자들에 대한 작동점(롤속도, 롤갭, 스탠드간 장력 등의 set-up 초기

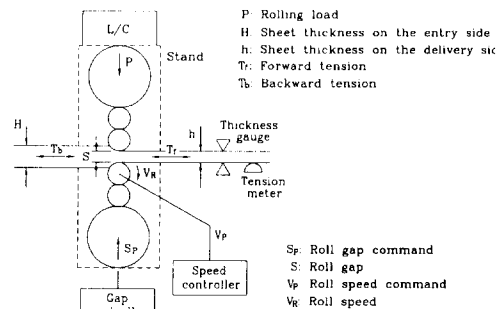


Fig. 1 Rolling process of a mill stand

조건)이 선정되어야 한다. 이를 위해서는 각 압연 스탠드에 대해 압하배분율, 압연하중 및 선진율, 압연토크, 소재 및 압연 스탠드들의 변형률 등 소성 이론과 관계된 많은 경험식 및 실험데이터들을 필요로 하며, 이는 포항제철 및 Hitachi 사의 현장 자료를 근거로 하였다.

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

(1) 압연하중식 및 선진율식

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

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

압연하중의 예측과 선진율 계산은 각각 Hill의 압연하중 이론식<sup>(8)</sup>과 Bland와 Ford의 선진율식<sup>(9)</sup>을 이용하였다. 이 경우에는 각 스탠드의 압연하중  $P_{Ai}$ 와 선진율  $f_i$ 가 모두 출측판두께  $h_i$ , 입측 판두께  $H_i$ , 후방장력  $T_{bi}$  그리고 전방장력  $T_{fi}$ 의 비선형 함수로 표시된다.

(2) 하우징(housing) 식

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

여기서,  $T_{pi}$ 는 하우징의 시정수이고,  $P_i$ 는 하우징에 의한 지연을 고려한 압연하중이다.

(3) 압하계 식

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

여기서,  $T_{si}$ 는 압하계의 시정수,  $S_i$ 는 갭이고,  $S_{pi}$ 는 롤갭 명령치이다.

(4) 판속도계 식

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

여기서,  $T_{vi}$ 는 속도계의 시정수,  $V_{Ri}$ 는 롤속도, 그리고  $V_{pi}$ 는 롤속도 명령치이다.

(5) 판속도 식

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

여기서,  $V_{oi}$ 는 출측판속도이고,  $f_i$ 는 선진율이다.

(6) 체적속도 일정 식

연속 압연공정이 정상상태에서 수행되고 있는 경우 압연재의 체적속도는 전 스탠드를 통해 일정하다. 한편 전 스탠드를 통해 판폭의 변동량은 매우

작기 때문에 판폭은 일정하다고 가정한다.

$$H_i V_{ei} = h_i V_{oi} \quad (7)$$

여기서,  $V_{ei}$ 와  $V_{oi}$ 는 각각 입측 및 출측 판속도이다.

(7) 출측판두께 식

출측에서의 판두께  $h_i$ 는 무부하시의 롤갭  $S_i$ , 압연하중에 의한 압연기의 탄성변형량  $P_i/M_i$  그리고 롤편심  $e_i$ 의 합으로 표시된다.

$$h_i = \frac{P_i}{M_i} + S_i + e_i \quad (8)$$

여기서,  $M_i$ 는 Mill 변형상수이다.

(8) 장력 식

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

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

여기서,  $M_i$ 는 Young 률,  $b$ 는 판폭,  $L$ 은 스탠드간 거리이다.

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

위의 모든 식들에 대해 각각 미소변동식 (식 (1), (2)에 대해서는 편미분방정식)을 먼저 구하고, 미분방정식 (3), (4), (5), (9)에 대해 나머지 식들을 종합하면 연속 냉간압연공정을 다음과 같은 상태공간 모델식으로 표현할 수 있다. 여기서는 본 논문의 목적상 인접 스탠드간의 간섭항은 비간섭 제어<sup>(10)</sup>에 의해 소거되었다고 가정하고, 독립된 압연 스탠드에 대한 모델식으로 간략화하였다.

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

$$y_i(t) = C_i x_i(t) + F_i w_i(t) \quad (11)$$

여기서,  $i$ 는 스탠드의 번호를 의미하며, 시스템 행렬  $A_i, B_i, C_i, E_i, F_i$ 의 각 요소들을 계산하

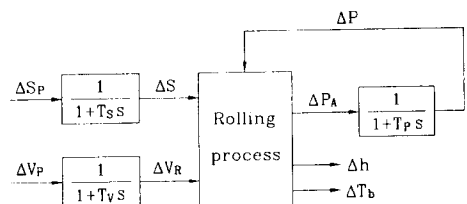


Fig. 2 Input-output relations in a rolling process

는 식들은 부록에 표시되어 있다. 그리고 압연 플랜트의 상태  $x_i$ , 제어입력  $u_i$  및 출력  $y_i$  그리고 외란  $w_i$ 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_i &= [S\Delta_i \ \Delta P_i \ \Delta V_{\kappa i} \ \Delta T_{bi}]^T \\ u_i &= [\Delta S_{pi} \ \Delta V_{pi}]^T \\ y_i &= [\Delta h_i \ \Delta T_{bi}]^T \\ w_i &= [\Delta H_i \ e_i]^T \end{aligned}$$

이미 발표된 논문<sup>(11)</sup>에서는 제어하고자 하는 출측두께의 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 출측두께를 추정하는 것으로서, 우선 측정 불가능한 롤편심을 무시하면 식 (8)로부터 다음과 같은 출측두께변동의 추정치  $\Delta \hat{h}_g$ 를 얻을 수 있다.

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

여기서,  $\Delta P$ 는 전체 롤하중 변동량으로서 백업롤의 아래에 위치한 load-cell에서 측정되고,  $\Delta S$ 는 백업롤 베어링에 작용하는 유압실린더의 모터구동 스크류의 변동량이다. 위 식에 표시된 바와 같이 출측두께 변동량이  $\Delta P$ 와  $\Delta S$ 의 측정가능한 값으로 표현되므로 직접 출측두께의 측정시 롤과 두께 센서간의 위치차에 의한 전달 시간지연을 피할 수 있으며, 특히 이 기법은 전달 지연시간보다 상대적으로 롤갭 입력신호에 대한 응답시간이 빠른 유압 구동기의 경우에는 더욱 중요하다.

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, 하

우정의 동역학(식 (3))은 무시하고, 압연하중식 (1)에서  $P=P_A$ 로 가정)을 식 (13)과 같이 단순한 형태로 가정하고 식 (8)의 미소변동식과 조합하여 표현한 것이다.

$$\Delta P = -K\Delta h + P_A \quad (13)$$

여기서,  $K = -\frac{\partial P}{\partial h}$ 이고,  $P_A$ 는 식 (1)에 대한 편미분 방정식에서 출측두께변동 이외의 압연인자에 의한 롤하중의 변동량을 의미한다.

위의 문제를 해결하는 방법으로서, 롤하중과 출측두께신호는 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.

롤편심 신호의 특성은 백업롤의 회전에서 비롯되기 때문에 주기적이다. 하지만 베어링 특성, 열팽창 등 여러가지 요인들로 비정상적 (non-stationary)이다. 더구나 본 논문에서 제시된 다변수 압연 제어모델에서는 제어입력으로 롤속도 명령변동 ( $\Delta V_p$ )이 포함되므로 롤의 주기 역시 정상작동시의 주기를 그대로 유지하지 않는다. 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.

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

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

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

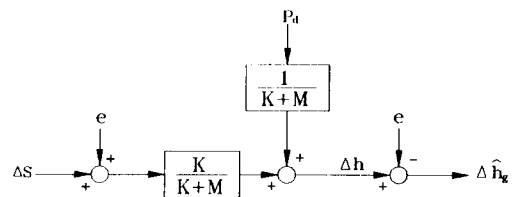


Fig. 3 Gaugemeter thickness estimator

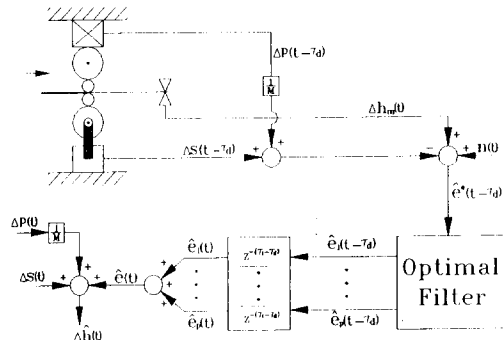


Fig. 4 Eccentric estimator and exit thickness predictor

여기서,  $\Delta P$  와  $\Delta S$  의 과거 신호들은 저장되어 있다고 가정한다. 이때 롤편심의 주기  $\tau$  를 알고, 또한 일반적으로  $\tau > \tau_a$  이면, 다음 식을 이용하여 현재 시간의 롤편심량을 추정할 수 있다.

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

한편 롤편심의 주 원인이 되는 백업롤은 일반적으로 여러개의 롤로 구성되는 바, 식 (14)에서 얻어지는 실제의 전체 롤편심 신호는 식 (17)과 같은 여러 개의 서로 다른 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.

$$\hat{e}^* = \sum_{j=0}^p e_j + n \tag{17}$$

여기서,  $p$  는 서로 다른 주기의 개수이다.

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

#### 4. 주기적 신호 추정을 위한 최적필터 설계

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

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

위의 조화성분에서 주파수  $\omega_j$  를 제외한 크기  $G_j$ ,

위상  $\phi_j$  는 알지 못하며, 비정상적이다. 우선 위 식에서 어떤 주어진 주기  $\tau_0 (= 2\pi/\omega_0)$  인 하나의 조화성분을 가정하여, 이를 이산시간 상태공간 모델 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$s(k+1) = \begin{bmatrix} C_0 & S_0 \\ -S_0 & C_0 \end{bmatrix} (k) \tag{19}$$

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

여기서,  $C_0 = \cos \omega_0 T$ ,  $S_0 = \sin \omega_0 T$ ,  $H = [1 \ 0]$ , 그리고 롤편심 모델의 상태벡터  $s(k) = [s_1(k) \ s_2(k)]^T$  이며,  $T$  는 샘플링 주기이다.

이때 상태  $s(k)$  를 추정하기 위한 최적 필터방정식은 다음과 같이 알려져 있다.<sup>(12)</sup>

$$\hat{s}(k+1) = \begin{bmatrix} C_0 & S_0 \\ -S_0 & C_0 \end{bmatrix} \hat{s}(k) + K(k) [\hat{e}^*(k) - H\hat{s}(k)] \tag{21}$$

여기서,  $K(k)$  는 Riccati 방정식에서 얻어지는 최적계인이다. 참고문헌<sup>(12)</sup>에 의하면 필터계인  $K(k)$  는  $1/k$ 에 비례하여 0으로 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<sup>(13)</sup>이 제안한 Riccati 방정식의 해에 의존하지 않고 선정할 수 있는 시변 필터계인  $\bar{K}(k)$  를 사용하기로 한다.

$$\bar{K}(k) = \epsilon \begin{bmatrix} C_0 \\ -S_0 \end{bmatrix} \tag{22}$$

여기서,  $\epsilon$  는 설계파라미터 ( $0 < \epsilon < 1$ )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.

$$\hat{s}(k+1) = \begin{bmatrix} (1-\epsilon)C_0 & S_0 \\ (1-\epsilon)S_0 & C_0 \end{bmatrix} \hat{s}(k) + \epsilon \begin{bmatrix} C_0 \\ -S_0 \end{bmatrix} \hat{e}^*(k) \tag{23}$$

따라서 롤편심 추정을 위한 필터의 펄스 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \bar{e}(z) &= \bar{s}_1(z) \\ &= \frac{\epsilon C_0 z - \epsilon}{z^2 - (2-\epsilon)C_0 z + (1-\epsilon)} \bar{e}^*(z) \end{aligned} \quad (24)$$

Fig. 5는 이 필터의 설계파라미터  $\epsilon$  값에 따른 롤편심 추정을 위한 필터의 주파수 응답특성을 보여주고 있다.

이 필터의 특성을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지수적으로 안정하다.
- (2) 작은  $\epsilon$ 에 대해 필터의 극점은 거의  $(1-\epsilon/2)C_0 \pm j(1-\epsilon/2)S_0$ 으로 표준 최적필터에 비해 강인성을 가진다.
- (3) 주파수  $\omega_0$ 에서 필터의 주파수 응답은 정확하게 크기 1이고, 위상차 0이나  $\omega_0$ 에서 벗어난 주파수역에서는 저-게인(low-gain)을 갖는다.
- (4) 주파수  $\omega_0$  근처의 3dB 대역폭은 약  $\epsilon/4$ 이다.
- (5) 초기조건에의 오차로 인한 효과가 소멸되기까지의 과도 응답시간은 약  $5T/\epsilon$ 이다.

전체 롤편심의 서로 다른 주기적 성분들에 대한 각각의 필터방정식을 구성하고, 롤편심의 각 주기에 대응한 필터의 출력신호들에 대해 식 (16)을 이용하면, 다음과 같이 전체 롤편심  $e(t)$  및 롤편심이 보상된 출력두께  $\Delta h(t)$ 를 추정할 수 있다.

$$\bar{e}(t) = \sum_{j=1}^p \bar{e}_j(t - \tau_j) \quad (25)$$

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

### 5. 제어기 설계

롤편심은 측정할 수는 없지만 롤편심의 주기적

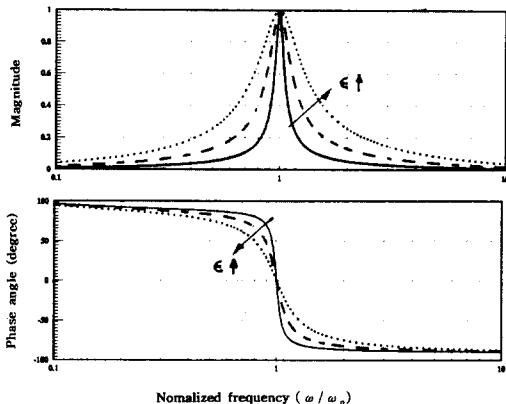


Fig. 5 Filter frequency responses according to  $\epsilon$

성질을 이용하면 롤편심 외란은 물론 출력두께의 현재 신호를 추정할 수 있다. 추정된 롤편심 신호는 피드백과 피드포워드 제어에 의해 편심외란의 효과를 보상하는 데 이용할 수 있을 뿐만 아니라 시간지연과 롤편심이 보상된 출력두께신호를 피드백 제어에 이용함으로써 고정도의 두께제어를 달성할 수 있다.

식 (8)의 미소 변형식과 식 (13)에서  $\Delta P$ 를 소거하면 특정한 관두께의 보정 또는 알고 있는 롤하중 외란을 보상하기 위해 요구되는 롤갭의 제어변동량을 나타내는 식을 얻을 수 있다.

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

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

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

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

여기서, 제어게인  $k_1, k_2$ 는 LQ 피드백제어 효과와 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  $w_1$ 의 영향이 더해진 출력변수  $\Delta h$ 가 상태변수에 포함되지 않기 때문에 피드백 루프 밖에서 발생된 오차를 전혀 제어할 수 없다. 이와 함께 입측두께변동이 에너지를 갖는 저주파역에서 외란제거 성능을 향상시키기 위하여 Fig. 6과 같이 오차(출력) 채널에 적분기를 추가시켜서 설계플랜트 모델을 구축한다. 그리고 피드백을 위한 출력변수  $\Delta h$ 는 시간지연 및 롤편심이 보상된 추정신호  $\Delta \bar{h}$ 를 이용하기로 한다. 이때 이산시간 상태공간 모델은 다음과 같이 표현된다.<sup>(11)</sup>

$$\begin{aligned} \bar{x}(k+1) &= \Phi \bar{x}(k) + \Gamma u(k) \\ &\quad + \Gamma_a w(k) + \Gamma_f w(k+1) \end{aligned} \quad (29)$$

$$y(k) = \tilde{C} \bar{x}(k) + F w(k) \quad (30)$$

여기서, 확장된 상태변  $\bar{x}(k) = [q(k)^T \ x(k)^T]^T$ 이

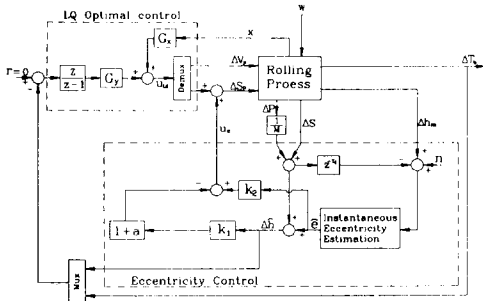


Fig. 6 LQ control system with an eccentricity filter for multivariable rolling processes

고,  $q(k)$ 는 적분기의 출력이다. 그리고 최적 LQ 레귤레이터 문제를 위한 성능지수  $J$ 는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서,  $Q, R$ 은 각각 양의 반한정 대칭행렬과 양의 대칭행렬인 최적제어 설계파라미터이며, 제어입력  $u_{LQ}(k)$ 는 다음과 같이 선정된다.

$$u_{LQ}(k) = -G \bar{x}(k) \quad (32)$$

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

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

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

Fig. 6은 롤편심 추정 및 LQ 제어가 통합된 다변수 압연 제어시스템의 구조를 나타낸다.

### 6. 컴퓨터 시뮬레이션 및 성능분석

Fig. 6에서 제안한 냉간압연 제어시스템의 시뮬레이션을 위해 사용된 주된 파라미터의 값들은 다음과 같다. Mill 탄성계수  $M : 0.39 \text{ MN/mm}$ , 소재 소성상수  $a : 1.21$ , 출측두께의 측정 시간지연  $\tau_a : 0.15 \text{ sec}$ , 정상 백업롤 주기  $0.25 \text{ sec}$ , 샘플링 주기  $T = 0.001 \text{ sec}$ 이다. 그리고 필터게인의 설계 파라미터  $\epsilon$ 는 백업롤 주기의 미소변동에 의한 위상차를 고려하여  $0.005$ 로 정했고, 제어기 설계파라미터  $Q = I_6, R = 0.03 I_2, k_1 = 1, k_2 = 0.8$ 로 선정했다. 여기서,  $I_2, I_6$ 는 각각  $2 \times 2, 6 \times 6$ 의 단위행렬을 의미한다. 외란 입력신호는 Fig. 7에 표

시된 바와 같이 입측 두께변동( $w_1$ )은 용접이음부 및 압연 모재(또는 전방 스탠드에서의 출측두께)의 불균일성 등을 고려하여 각각 스텝 및 1 Hz의 정현파신호, 그리고 롤편심( $w_2$ )은 본 압연 모델의 백업롤 정상 회전주기에 대응한 4 Hz와 이의 3차 조화성분으로 가정하였다.

우선 롤편심 제어만을 수행한 경우, 출측두께변동( $y_1$ )에서 롤편심 외란성분( $w_2$ )은 거의 제거할 수 있는 반면, 입측두께변동( $w_1$ )의 제거에는 효과가 거의 없음을 알 수 있다. 그리고 장력변동( $y_2$ )에서는  $w_2$ 으로 인한 영향은 역시 감소하지만,  $w_1$ 의 영향은 (제어를 하지 않은 경우 또는 LQ 피드백 제어시는 거의 무시할 정도) 장력변동에 다소 반영되어 나타남을 알 수 있다. (Fig. 8) 이는 롤편심 제어입력으로는 롤갭명령치( $u_1$ )만이 이용되었으며,

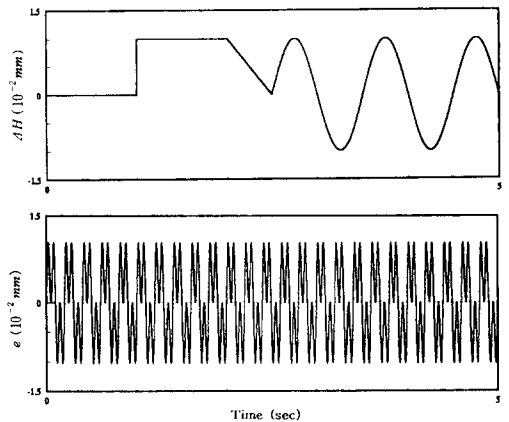


Fig. 7 Entry thickness variation and roll eccentricity (disturbances signals)

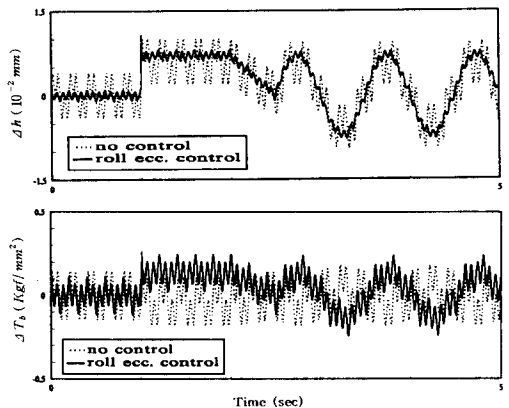


Fig. 8 Time responses of the outputs for a mill control system (roll eccentricity control only)

특히 롤편심 제어의 피드포워드신호에 기인됨을 참고문헌<sup>(11)</sup>의 예견제어시 특이값분해 개념을 통한 입출력방향 해석을 통해 짐작할 수 있다.

한편 LQ 피드백제어만(이때 출측 판두께 신호가 추정을 통해 피드백신호로 이용 가능하다고 가정)을 수행한 경우, 출측두께변동( $y_1$ )에서 입측 두께변동( $w_1$ )의 영향은 크게 줄일 수 있는 반면 롤편심( $w_2$ )으로 인한 판두께변동은  $w_1$ 의 영향을 감소시킬수록 오히려 증폭되며, 이는 제어를 수행하지 않은 경우보다 오히려 나쁜 결과를 초래한다. 그리고 장력변동( $y_2$ )에서 외란  $w_1$ 의 영향은 거의 없으나, 피드백제어시 외란  $w_2$ 에 의한 영향은 역시 제어를 수행하지 않은 경우에 비해 다소 커짐을 알 수 있다. (Fig. 9) 후자의 결과도 역시 참고문헌<sup>(11)</sup>

에 제시된 입출력방향 해석에서 언급한 것과 일치한다.

마지막으로 LQ 피드백제어와 롤편심제어를 동시에 수행한 결과는 Fig. 10과 같다. 이때 출측두께변동에서의 외란  $w_1$ 과  $w_2$ 의 동시 제거에 큰 효과를 보여주고 있다. 이 결과는 LQ 피드백 제어시의  $w_1$  제거효과와 롤편심제어시의  $w_2$  제거효과를 각각 합성한 경우의 응답과 비교하면,  $w_1$ 과  $w_2$  성분 모두 제거효과가 다소 약해지나, 본 논문의 대상이 다변수 시스템임을 고려하면 당연하다. 한편 장력변동에서는 롤편심제어의 피드포워드 성분의 영향은 거의 유지되는 반면 피드백 성분은 LQ 피드백 제어 신호와 합쳐져 입측두께변동 외란의 정현파 성분이 다시 증폭되어 나타남을 알 수 있다.

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

### 7. 결 론

본 논문에서는 다변수 압연 시스템을 고려하여, 롤편심과 함께 다른 입측 외란들 모두를 제어할 수 있는 새로운 압연 모델식을 구축하였다. 추정 불가능한 롤편심신호의 온-라인 추정은 편심 외란에 대한 피드포워드제어는 물론, 출력변수의 시간지연을 해결함으로써 다변수 LQ 피드백제어기 설계에도 유용함을 확인하였다. 그리고 롤편심 제어 및 LQ 최적제어 그리고 통합된 제어시스템의 종합적인 해석을 통하여 두 제어기간의 상호 보완적 특성 등 다변수 압연 두께제어기의 성능개선을 위한 설계방향을 제시하였다. 그러나 여러 가지 불확실성에 따른 롤속도 변동이 클 경우, 본 논문에서 이용한 롤편심 필터의 추정신호는 물론 출력신호에 큰 오차를 야기하여 기대한 제어성능을 얻기 어렵다. 따라서 연속 냉간압연 시스템에 대한 여러 가지 불확실성을 고려한 강인한 필터 또는/그리고  $H_\infty$  제어기 설계 등의 연구도 계속 수행되어야 할 것이다. 한편 실제의 현장적용을 위해서는 대규모의 복잡한 연속 냉간압연 시스템의 특성상, 시스템 동정(identification)을 통해 보다 정확한 동특성을 규명할 필요가 있으며, 이걸 연구된 각 압연스탠드의 분산제어를 위한 비간섭제어에 대한 실증 및 모

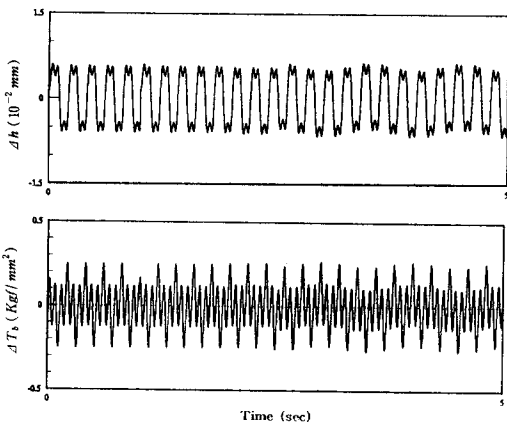


Fig. 9 Time responses of the outputs for a mill control system (LQ control only)

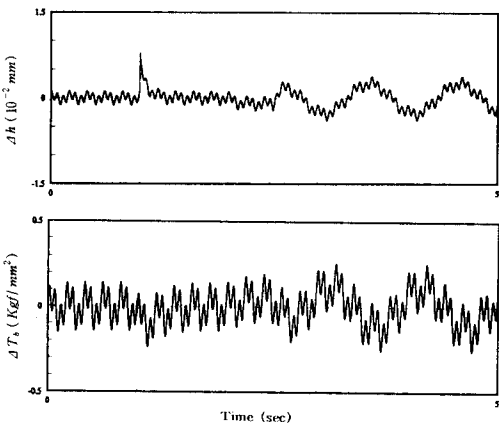


Fig. 10 Time responses of the outputs for a mill control system (LQ and roll eccentricity control)



완도 선행되어야 할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- (1) Waltz, M. D. and Reed, L. E., 1971, "Eccentricity Filter for Rolling Mills," *Instrumentation Metals Industry*, Vol. 21, pp. 1~9.
- (2) Edwards, W. J., 1978, "Design of Strip Thickness Controls for Tandem Cold Mills," *Automatica*, Vol. 14, pp. 429~441.
- (3) Edwards, W. J., Thomas, P. J. and Goodwin, G. C., 1987, "Roll Eccentricity Control for Strip Rolling Mills," *10th IFAC World Congress*, Munich, Vol. 2, pp. 200-211.
- (4) Mike, T., Takai, S. and Yanaguchi, T., 1984, "A New Roll Eccentricity Compensation System," *Nisshin Steel Technical Report No. 51*, p. 77.
- (5) Longmuir, A. G., 1974, "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.
- (6) Tanuma, M., 1974, "Multivariable Control of a five stand Cold Mill," *Proc. 4th IFAC/IFIP International Conf. On Digital Computer Applications to Process Control*, Part II, pp. 75~86.
- (7) Hoshino, I., Maekwa, Y., Fujimoto, T. and Kimura, H., 1988, "Observer-based Multivariable Control of the Alumium Cold Tandem Mill," *Automatica*, Vol.24, No. 6, pp. 751~745.
- (8) 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.
- (9) Ginzburg, V. B., 1985, "Basic Principles of Customized Computer Models for Cold and Hot Strip Mills," *Iron and Steel Engineer*, pp. 21~35.
- (10) 김종식, 1994, "연속 냉간압연 다변수 AGC 시스템 설계," 포항제철(주) 기술연구소 위탁과제 연구보고서.
- (11) 김종식, 김승수, 이규택, 1995, "연속 냉간 압연시스템의 디지털 최적 예견제어," 대한기계학회논문집, 제19권, 제9호, pp. 2142~2153.
- (12) Goodwin, G. C. and K. S. Sin, 1984, *Adaptive Filtering Prediction and Control*, Prentice Hall.
- (13) Goodwin, G. C., Evans, R. J. Leal, R. L. and Feik, R. A., 1986, "Sinusoidal Disturbance Rejection with Application to Helicopter Flight data Estimation," *IEEE ASSP*, Vol. 34, No.3, pp. 479~485.

### 부 록

$$a^{i_{2,1}} = \frac{1}{T_{pi}} \left( \frac{\partial \Delta P_{Ai}}{\partial \Delta H_i} \right)$$

$$a^{i_{2,2}} = \frac{1}{T_{pi}} \left\{ \frac{1}{M_i} \left( \frac{\partial \Delta P_{Ai}}{\partial \Delta H_i} \right) - 1 \right\}$$

$$a^{i_{2,4}} = \frac{1}{T_{pi}} \left( \frac{\partial \Delta P_{Ai}}{\partial \Delta T_{oi}} \right)$$

$$a^{i_{4,1}} = \frac{E_i b}{L_i} \left\{ \left( \frac{\partial \Delta f_i}{\partial \Delta h_i} \right) h_i V_{Ri} + V_{oi} \right\}$$

$$a^{i_{4,2}} = \frac{E_i b}{L_i M_i} \left\{ \left( \frac{\partial \Delta f_i}{\partial \Delta h_i} \right) h_i V_{Ri} + V_{oi} \right\}$$

$$a^{i_{4,3}} = -\frac{E_i H_i b}{L_i} (1 + f_{i-1})$$

$$a^{i_{4,4}} = \frac{E_i b}{L_i} \left\{ \left( \frac{\partial \Delta f_i}{\partial \Delta T_{bi}} \right) h_i V_{Ri} - \left( \frac{\partial \Delta f_{i-1}}{\partial \Delta T_{fi-1}} \right) H_i V_{Ri-1} \right\}$$

$$e^{i_{2,1}} = \frac{1}{T_{pi}} \left( \frac{\partial \Delta P_{Ai}}{\partial \Delta H_i} \right)$$

$$e^{i_{2,2}} = \frac{1}{T_{pi}} \left( \frac{\partial \Delta P_{Ai}}{\partial \Delta T_{fi}} \right)$$

$$e^{i_{4,1}} = \frac{E_i b}{L_i} \left\{ \left( \frac{\partial \Delta f_i}{\partial \Delta H_i} \right) h_i V_{Ri} - V_{oi-1} \right\}$$

$$e^{i_{4,2}} = \frac{E_i b}{L_i} \left\{ \left( \frac{\partial \Delta f_i}{\partial \Delta h_i} \right) h_i V_{Ri} + V_{oi} \right\}$$