

목표치 정형화 및 외란 관측기를 활용한 연속 냉간압연 시스템의 2-자유도 스트립 두께 및 장력 최적 제어기 설계

홍완기* · 강현석* · 황이철**†

* (주)POSCO 기술연구원 STS 공정연구그룹, ** 동의대학교 메카트로닉스공학과

Design of Two-DOF Optimal Controller for Strip Gage and Tension Control of Cold Tandem Mills Using Reference Shaping Filter and Disturbance Observer

Wan Kee Hong*, Hyun Seok Kang* and I Cheol Hwang**†

* STS Process Research Group, Technical Researcher Laboratories, POSCO,
** Dept. of Mechatronics Engineering, Dongeui Univ.

(Received October 12, 2011; Revised November 21, 2011; Accepted November 21, 2011)

Key Words: Reference Shaping Filter(목표치 정형화 필터), Strip Gauge and Tension Control(스트립 두께 및 장력제어), Cold Tandem Mill(연속 냉간압연 시스템), 2-DOF ILQ Optimal Control(2-자유도 역최적제어), Disturbance Observer(외란 관측기)

초록: 이 논문은 목표치 정형화 필터와 외란관측기를 활용하여 연속 냉간압연 시스템의 스트립 두께 및 장력에 대한 2-자유도 최적 제어기 설계에 관한 연구를 수행한다. 먼저 게이지 미터식과 후크 법칙을 이용하여 스트립 두께 및 장력에 관한 동적모델을 각각 구축한다. 다음에는 동적모델을 기반으로 2-자유도 제어기를 설계한다. 여기서 피드포워드 제어기는 목표치 정형화 필터와 외란 관측기를 활용한 제어기로 구성되며, 피드백 제어기는 역 최적 제어기로 설계된다. 끝으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 이 논문에서 제안한 2-자유도 최적 제어기가 연속 냉간압연 시스템의 기존 제어기보다 스트립 두께 및 장력에 대한 목표치 추종성능과 외란 제거성능이 매우 우수함을 보인다.

Abstract: This paper studies the design of a two-DOF optimal controller for the strip gauge-tension of cold tandem mill processes, that uses a reference shaping filter and a disturbance observer. First, a mathematical model of the strip gauge and tension system is constructed using the gauge meter equation and Hooke's law, respectively. Next, a two-DOF controller considering of a feedforward controller and a feedback controller is designed. The former is based on the reference shaping filter and the disturbance observer, and the latter is based on the ILQ optimal control algorithm. Finally, it is shown through a computer simulation that the proposed optimal controller is able to improve the strip gauge accuracy and the tension variation more than the conventional MV-AGC controller.

- 기호설명 -

$\tau_{f,i-1}, \tau_{f,i-1}^{ref}$: (i)-스탠드의 후방장력 및 목표값
[N/mm²]
 h_i, h_i^{ref} : (i)-스탠드 스트립 두께 및 목표값 [mm]
 $V_{R,i-1}, V_{R,i-1}^{ref}$: (i-1)-스탠드 밀 모터 속도 및 목표값 [mm/s]

v_i : (i)-스탠드의 스트립 속도(mm)
 S_i, S_i^{ref} : (i)-스탠드의 롤 갭 및 목표값 [mm]
 $s_{f,i}, s_{b,i}$: (i)-스탠드의 선진율 및 후진율
 P_i : (i)-스탠드의 압연하중[N]
 M : 스탠드 밀 탄성계수
 Q : 스탠드 밀 소성계수

1. 서론

† Corresponding Author, ichwang@deu.ac.kr
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

서 스트립 두께 및 장력 제어를 위한 2-자유도 최적 제어 알고리즘 개발에 관한 연구를 수행한다. 이를 통해 냉연 제품의 스트립 두께 품질 사양을 만족시키고 동시에 스탠드 간 스트립 장력 제어를 통하여 스트립 통관성을 안정화하는데 그 목적을 둔다.

연속 냉간압연 시스템은 5개의 연속 스탠드로 이루어지며, 여기서는 5개의 스탠드 가운데 인접하는 두 개의 스탠드만을 고려한다. 인접한 두 개의 스탠드를 통과하는 스트립의 두께 및 장력 제어 시스템을 AGC(Automatic Gage Control) 시스템이라고 하는데, 이는 2-입력/2-출력을 가지는 다변수 제어 시스템으로서, 각 입력은 후방 스탠드 메인 밀 모터의 속도와 전방 스탠드의 롤 갭, 그리고 각 출력은 스탠드 간 스트립 장력과 전방 스탠드의 출측 두께로 정의된다.

이러한 연속 냉간압연 AGC 시스템은 스트립 두께 변동이 장력에 그리고 장력 변동이 두께에 영향을 주는 상호 간섭 현상이 매우 강한 특성을 가진다. 그래서 기존 AGC 시스템은 입출력 간의 상호 간섭 현상을 고려하여 설계된 교차 제어기(cross controller)를 기본으로 하여 PI 제어기가 결합된 구조를 가지고 있다(이하 Conventional MV-AGC controller라고 한다).⁽¹⁾

기존 MV-AGC 제어기에서 교차 제어기는 제어 대상의 전달함수에 대한 역함수로부터 얻어짐으로 인해 각 제어기 요소들은 상수가 아닌 동특성을 가지고 있어 실제 구현하기가 다소 어려운 단점을 가지고 있다.⁽²⁾ 그래서 실제 현장의 냉간압연 제어 설비에서는 각 제어 요소들을 주파수역에서의 DC 게인으로 즉 상수값으로 근사화하여 사용하고 있다. 결과적으로 기존 교차 제어기는 정상상태에서의 응답은 양호하지만, 스트립의 가감속 등을 수반하는 비정상구간 또는 과도 상태에서는 제어 성능이 그다지 양호하지 않는 문제점을 가지고 있다.^(1~4)

그래서 PI 제어기나 상태 피드백 제어기를 결합하여 교차 제어기의 성능을 보완하고 있지만, 이 또한 제어 게인의 설정법이 명확하지 않고, 두께-장력 제어 성능이 최적이라고 할 수 없는 실정이다. 특히 제어대상의 시스템 파라미터 변동이나 외란 등의 불확실성을 극복할 수 있는 견실 제어 성능이 약해 스트립 강종이나 조업 조건이 변화할 때마다 각 제어 게인들을 재 설정해야

하는 등 조업 상 많은 문제점이 발생하게 된다.

따라서 이 논문에서는 위에서 언급한 기존 MV-AGC 제어기의 문제점을 극복하기 위하여 최적화된 새로운 AGC 제어 알고리즘 개발에 관한 연구를 수행하고자 한다. 이를 위하여 적분기와 상태 피드백 제어기를 포함한 역 최적 제어기(Inverse Linear Quadratic(ILQ) optimal controller)와 목표치 정형화 필터와 외란 관측기를 활용한 피드포워드 제어기가 결합된 형태의 2-자유도 최적 제어기를 제안한다.

결과적으로 본 논문에서 제안한 2-자유도 최적 제어기는 구조 및 제어 게인의 설정법이 매우 명확하고, 특히 목표치 정형화 필터를 이용한 피드포워드 제어기는 과도상태에서의 오버슈트량을 줄이는데 매우 효과적이며, 외란 관측기를 활용한 피드포워드 제어기는 스키드 마크(skid mark)나 모재 판두께 변동, 파라미터 변동 등으로 인한 장력 외란 제어에 매우 효과적임을 보인다.

이 논문의 연구내용을 간략히 요약하면 다음과 같다. 제 2장에서는 냉간압연 시스템의 동특성 수학모델 도출하고, 제 3, 4장에서는 각각 ILQ 최적 피드백 제어기와 피드포워드 제어기를 설계한 후, 컴퓨터 시뮬레이션 용 MatLab 기반 제어 시뮬레이터를 통하여 제어 성능을 고찰하고, 제 5장에서는 논문의 결론을 간략히 요약한다.

2. 시스템 동적 수학모델

2.1 AGC 시스템 개요

Fig. 1은 냉간압연 두께 및 장력 제어 시스템의 개략도를 나타낸다. 그림에서 (i)번째 전방 스탠드($F(i)$)와 (i-1)번째 후방 스탠드($F(i-1)$) 사이의 스트립 장력과 (i)번째 스탠드의 스트립 두께는 제어대상의 출력이며, 이들은 입력변수인 전후방 스탠드의 입출측 스트립 속도 차와 전방 스탠드 롤 갭에 의해서 제어된다. 여기서 스트립 속도와 롤 갭은 각각 밀 모터의 자동 속도조절장치(ASR:Auto Speed Regulator)과 유압 구동 위치 제어장치(HPC: Hydraulic Position Control system)에 의해 구동된다. 이때 스트립 장력은 텐션미터(TM:Tension Meter), 스트립 속도는 속도센서(SM: Speed Meter) 그리고 롤 갭은 두께센서(TG: Thickness Gauge meter)로 측정된다.

그리고 제어기는 현재 대부분 교차 제어기와 PI

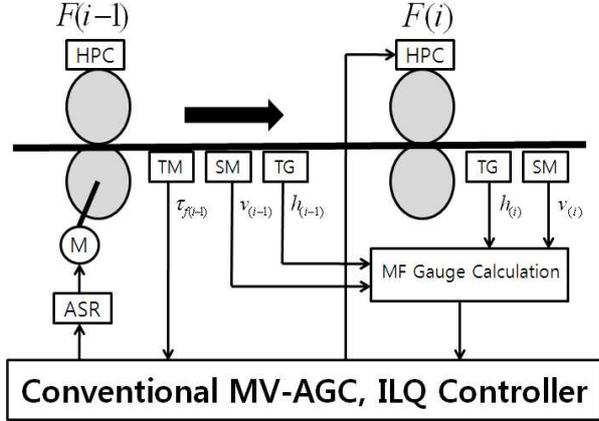


Fig. 1 A configuration of the control system for cold tandem mills

제어기가 결합된 제어기가 적용되고 있으며, 최근에는 최적화 이론에 기초한 다변수 최적 제어기 또는 모델링 오차나 외란 등의 불확실성을 고려한 견실 제어기가 상용화되고 있다.^(3,4)

2.2 시스템 선형화 동적모델

이 절에서는 문헌⁽²⁾에서의 비선형 두께-장력 동특성 모델을 임의의 동작점에서 테일러 급수로 근사화한 선형 동적모델을 간략히 기술한다. 먼저 동작점에서의 상태변수, 입출력 변수들을 각각 x^o , u^o , y^o 라고 하면, 이때 상태 및 입출력 변수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} V_{R,i-1} - V_{R,i-1}^o \\ \tau_{f,i-1} - \tau_{f,i-1}^o \\ S_i - S_i^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_{R,i-1} \\ \Delta \tau_{f,i-1} \\ \Delta S_i \end{bmatrix} \\ \mathbf{u} &= \begin{bmatrix} V_{R,i-1}^{ref} - V_{R,i-1}^o \\ S_i^{ref} - S_i^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_{R,i-1}^{ref} \\ \Delta S_i^{ref} \end{bmatrix} \\ \mathbf{y} &= \begin{bmatrix} \tau_{f,i-1} - \tau_{f,i-1}^o \\ h_i - h_i^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \tau_{f,i-1} \\ \Delta S_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

2.2.1 스트립 두께 및 HPC 모델

실제 압연하중은 모재 관두께, 입출측 두께, 전후방 장력, 변형저항, 마찰계수 등과 같이 다수의 압연 파라미터들에 의해 영향을 받지만, 여기서는 단순화하여 후방 장력과 출측 두께에만 영향을 받는다고 가정한다. 이때 동작점에서 압연하중에 대한 미소 변동량은 다음 식과 같이 선형화된다.

$$\Delta P_i \approx \frac{\partial P_i}{\partial h_i} \Delta h_i + \frac{\partial P_i}{\partial \tau_{bi}} \Delta \tau_{bi} \quad (2)$$

위의 식에서 편미분항들은 영향인자를 나타내며, $\frac{\partial P_i}{\partial h_i} = -Q$, $\tau_{b,i} = \tau_{f,i-1}$ 인 것으로 가정하면, 게이지 미터식으로부터 스트립 두께의 선형 동적 모델식은 아래 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\Delta h_i = \left(\frac{M}{M+Q} \right) \Delta S_i + \left(\frac{1}{M+Q} \right) \left(\frac{\partial P_i}{\partial \tau_{f,i-1}} \right) \Delta \tau_{f,i-1} \quad (3)$$

그리고 롤 갭 구동부(HPC)에 대한 동특성을 다음과 같이 1차 지연 시스템으로 간략화하여 나타내기로 한다.

$$\frac{d}{dt}(\Delta S_i) = \frac{1}{T_S} (-\Delta S_i + \Delta S_i^{ref}) \quad (4)$$

여기서 T_S 는 HPC의 시정수를 나타낸다.

2.2.2 스트립 장력 및 ASR 모델

스트립 슬립율(선진율, 후진율)이 후방장력에만 영향을 받는 것으로 가정하면, 후방장력에 대한 선형화 모델은 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta \tau_{f,i-1} &= \frac{E}{L} \left\{ \frac{1+s_{f,i-1}^o}{h_i^o} + \left(\frac{\partial s_{f,i}}{\partial h_i} \right) \right\} V_{R,i-1}^o \Delta h_i \\ &\quad - \frac{E}{L} \left(\frac{\partial s_{f,i-1}}{\partial \tau_{f,i-1}} \right) V_{R,i-1}^o \Delta \tau_{f,i-1} \\ &\quad - \frac{E}{L} (1+s_{f,i-1}^o) \Delta V_{R,i-1} \end{aligned} \quad (5)$$

그리고 밀 모터 구동부 ASR은 다음과 같이 1차지연 시스템으로 나타낸다.

$$\frac{d}{dt}(\Delta V_{R,i-1}) = \frac{1}{T_V} (-\Delta V_{R,i-1} + \Delta V_{R,i-1}^{ref}) \quad (6)$$

여기서 T_V 는 ASR의 시정수를 나타낸다.

2.2.3 시스템 상태공간 방정식

식 (2)-(6)으로부터 냉간압연 두께-장력 시스템의 상태공간 방정식은 다음 식과 같이 주어진다.

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{Cx} \quad (7)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{32} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & c_{22} & c_{23} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= -\frac{1}{T_V}, \quad a_{21} = \frac{E(1+s_{f,i-1}^o)}{L}, \\
 a_{22} &= \frac{E}{L} \left(\frac{1}{M+Q} \right) \left\{ \frac{(1+s_{f,i-1}^o)}{h_i^o} + \frac{\partial s_{f,i}}{\partial h_i} \right\} V_{R,i-1}^o \\
 &\quad - \frac{E}{L} \frac{\partial s_{f,i-1}}{\partial \tau_{f,i-1}} V_{R,i-1}^o, \\
 a_{23} &= \frac{E}{L} \left(\frac{M}{M+Q} \right) \left\{ \frac{(1+s_{f,i-1}^o)}{h_i^o} + \frac{\partial s_{f,i}}{\partial h_i} \right\} V_{R,i-1}^o, \\
 a_{33} &= -\frac{1}{T_S}, \\
 b_{11} &= \frac{1}{T_V}, \quad b_{32} = \frac{1}{T_S}, \\
 c_{22} &= \frac{1}{M+Q} \left(\frac{\partial P_i}{\partial \tau_{f,i-1}} \right), \quad c_{23} = \frac{M}{M+Q}
 \end{aligned}$$

다음 Fig. 2는 식 (7)에서 주어진 냉간압연 시스템의 선형화 모델에 대한 블록선도를 나타낸다.

3. 2-자유도 최적 AGC 제어기 설계

이 장에서는 연속 냉간압연 시스템의 기존 MV-AGC 제어 시스템을 간략히 소개하고, 이 논문에서 제안하는 2-자유도 최적 제어기를 설계하기로 한다. 여기서는 각 제어기 설계법에 대한 구체적인 알고리즘은 생략한다. 이에 대한 자세한 내용은 문헌(5~7)를 참고 바란다.

3.1 기존 MV-AGC 제어기

기존 MV-AGC 제어 시스템은 Fig. 3과 같다. 그림에서 교차 제어기(K_{I11} , K_{I12} , K_{I21} , K_{I22})와 출력 선행 비례 제어기(K_{P1} , K_{P2})가 결합된 형태의 제어기로 구성됨을 알 수 있다. 여기서 제어

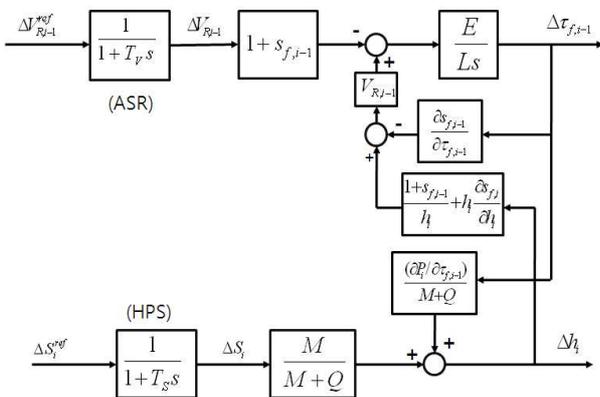


Fig. 2 Block diagram of the thickness and tension model

시스템의 제어성능은 게인조정 파라미터 G_{t1} , G_{t2} 에 의해 조정되며, 특히 기존 MV-AGC는 적분 제어기와 상태 피드백 제어기가 결합된 형태와 매우 유사함을 알 수 있다. 이때 교차 제어기의 제어게인들은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 K_{I11} &= \left\{ \left(\frac{\partial s_{f,i}}{\partial \tau_{f,i-1}} \right) - \left(\frac{\partial s_{f,i-1}}{\partial \tau_{f,i-1}} \right) \right\} V_{R,i-1}^o \omega_{\tau,i-1} \\
 &\quad + \frac{1}{h_i^o} \left(\frac{1}{M+Q} \right) \left(\frac{\partial P_i}{\partial \tau_{f,i-1}} \right) V_{R,i-1}^o \omega_{\tau,i-1}, \\
 K_{I12} &= \frac{1}{h_i^o} V_{R,i-1}^o \omega_{h,i}, \quad K_{I21} = -\frac{1}{M} \frac{\partial P_i}{\partial \tau_{f,i-1}} \omega_{\tau,i-1}, \\
 K_{I22} &= \frac{M}{M+Q} \omega_{h,i}
 \end{aligned} \tag{8}$$

위의 식에서 $\omega_{\tau,i-1}$, $\omega_{h,i}$ 는 각각 장력 제어와 두께 제어 시스템의 목표 응답 성능지수를 나타낸다. 반면에 출력 선행 비례 제어게인들의 설정법에 대해서는 명확히 주어지지 않고, 경험적으로 주어지는 것으로 간주한다.

3.2 2-자유도 최적 제어기

이 논문에서 제안한 연속 냉간압연 시스템의 2-자유도 최적 제어 시스템은 Fig. 4와 같다. 그림에서 K_{FF} , K_{DOB} 는 목표치 정형화 필터와 외란 관측기를 활용한 피드포워드 제어기를 나타내며, K_{FBI} , K_{FBX} 는 각각 ILQ 최적 서보 제어기의 적분 및 상태 피드백 제어기를 나타낸다. 이 절에서는 이들 각각의 제어기를 정의하고, 이들에 대한 구체적인 설계 알고리즘은 문헌(5~7)을 참고 바란다.

3.2.1 목표치 정형화 피드포워드 제어기

목표치 정형화를 위한 피드포워드 제어기는 다음과 같이 주어진다.

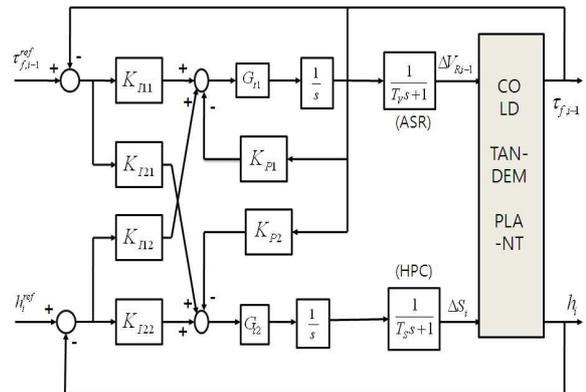


Fig. 3 A conventional MV-AGC control system

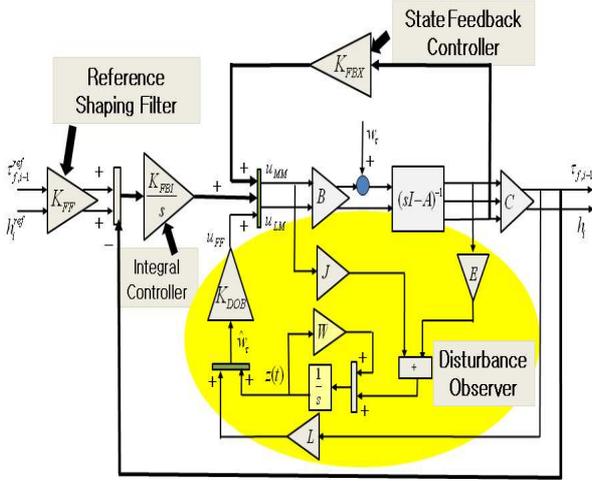


Fig. 4 2-DOF optimal AGC control system

$$K_{FF}(s) = \begin{bmatrix} K_{FF}^1 & 0 \\ 0 & K_{FF}^2 \end{bmatrix}, K_{FF}^i = \frac{\alpha_i \beta_i s + 1}{\beta_i s + 1} \quad (9)$$

위의 목표치 정형화 필터에서 $\alpha_i, \beta_i, i = 1, 2$ 는 각각 스트립 장력과 두께의 목표값을 정형화하는 설계 파라미터로서, 만약 목표값이 일정하다고 하면, 다음과 같은 역할을 수행한다.

- α : 최종 목표값 대비 초기 설정값의 비율을 결정하는 파라미터이고,
- β : 초기 설정값에서 최종 목표값까지 도달할 때까지의 속응성을 나타내는 파라미터이다.

이들 값은 과도상태 응답에서 오버슈트량이나 응답 속도를 보면서 임의로 결정할 수 있지만, 일반적으로 $0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 2$ 사이의 값을 취하는 것이 적절한 것으로 잘 알려져 있다.⁽⁵⁾

3.2.2 ILQ 최적 서보 피드백 제어기

이 절에서는 2-자유도 제어 시스템에서 ILQ 최적 피드백 서보 제어기를 설계한다. 여기서 ILQ 최적 제어는 LQ 최적 제어를 역으로 설계하는 제어기법으로서 자세한 내용은 참고문헌⁽⁶⁾을 참고하기 바란다. Fig. 5는 ILQ 피드백 서보 제어 시스템의 블록선도를 나타내며, 이는 적분 제어기($K_{I11}, K_{I12}, K_{I21}, K_{I22}$)와 상태 피드백 제어기($K_{F11}, K_{F12}, K_{F22}, K_{F23}$)로 구성된다. 그리고 제어 시스템 성능은 게인 조정 파라미터(σ_{tf}, σ_h)로 조정된다. 이때 각 제어 게인들은 다음과 같이 주어진다.

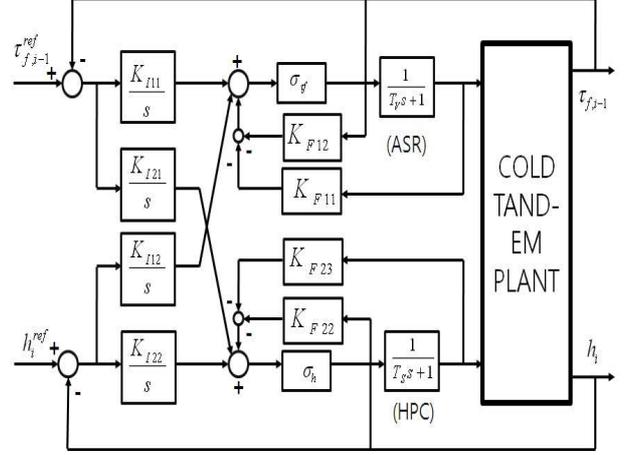


Fig. 5 ILQ optimal control system

■ 적분 제어게인(K_{FBI})

$$K_{I11} = \sigma_{tf} \left(T_V \frac{L}{E(1+s_f)} \right) g_T, \quad (10)$$

$$K_{I12} = \sigma_{tf} \left(T_V \frac{M+Q}{M} \frac{1}{h_{i-1}} V_{R,i-1} \right) g_H,$$

$$K_{I21} = 0, \quad K_{I22} = \sigma_h \left(T_S \frac{M+Q}{M} \right) g_H$$

■ 상태 피드백 제어게인(K_{FBX})

$$K_{F11} = \sigma_{tf},$$

$$K_{F12} = \sigma_{tf} T_V \left\{ \frac{1}{(1+s_{f,i-1})} \frac{\partial s_{f,i-1}}{\partial \tau_{f,i-1}} \right\} V_{R,i-1}$$

$$+ \sigma_{tf} T_V \left\{ \frac{1}{M} \frac{\partial P_i}{\partial \tau_{f,i-1}} \right\} g_X,$$

$$K_{F13} = 0, \quad K_{F21} = 0,$$

$$K_{F22} = \sigma_h T_S \frac{1}{M} \frac{\partial P_i}{\partial \tau_{f,i-1}} \quad (11)$$

위의 식에서 g_T, g_X, g_H 는 다음과 같으며,

$$g_T = \omega_{t1} \omega_{t2}, \quad g_X = \omega_{t1} + \omega_{t2}, \quad g_H = g_h$$

여기서 $\omega_{t1}, \omega_{t2}, \omega_h$ 는 각각 제어 시스템의 목표 특성을 나타내는 파라미터들이다.

3.2.3 외란관측기 활용 피드포워드 제어기

이 절에서는 스트립 장력에 직접적으로 영향을 미치는 외란에 대한 외란제거성능을 향상시키기 위하여 Fig. 4와 같이 외란 관측기를 이용한 피드

포워드 제어기를 설계한다. 여기서 외란은 조업자의 수동개입이나 모재 판두께 변동 등과 같이 스트립 장력에 직접적으로 영향을 미치는 불확실성 요소 w_τ 라고 정의한다.

즉, 식 (7)로부터 외란을 고려한 장력식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d}{dt}\Delta\tau_{f,i-1} = a_{21}\Delta V_{R,i-1} + a_{22}\Delta\tau_{f,i-1} + a_{23}\Delta S_i + Dw_\tau \quad (12)$$

여기서 외란 관측기 설계법은 Gopinath⁽⁷⁾의 전 상태 관측기 구성법을 이용한다. 이를 위하여 외란은 다음 조건을 만족하는 것으로 가정한다.

$$\frac{dw_\tau}{dt} = 0 \quad (13)$$

또한 식 (1)의 제어대상 상태변수들은 모두 관측 가능한 것으로 가정한다. 이러한 가정 하에서 외란 관측기는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{dz(t)}{dt} &= Wz(t) + Hy(t) + Ju(t) \\ \hat{w}(t) &= z(t) + Gy(t) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 외란 관측기 계인 W, H, J, G 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} W &= -\frac{D}{T_{OB}}, \quad J = [0 \ 0], \quad G = [0 \ \frac{1}{T_{OB}} \ 0], \\ H &= [a_{21} \frac{1}{T_{OB}} \ \frac{1}{T_{OB}}(a_{22} + \frac{D}{T_{OB}}) \ a_{23} \frac{D}{T_{OB}}] \end{aligned} \quad (15)$$

위에서 T_{OB} 는 외란 관측기의 시정수를 나타낸다. 따라서 추정된 외란 \hat{w}_τ 를 이용하여 피드포워드 제어기를 구성하면 다음과 같다.

$$u_{FF} = K_{DOB}\hat{w}_\tau \quad (16)$$

여기서 K_{DOB} 는 피드포워드 제어기로서, 장력 외란 변동과 밀 스탠드 속도와의 상관 관계에 따라 결정되는 상수의 값을 가진다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 고찰

이 장에서는 제 3장에서 설계된 2-자유도 제어 시스템에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 기술하

고, 그 결과를 고찰한다. 컴퓨터 시뮬레이션 시 이용한 시스템 파라미터 제원은 생략하고, 단지 그 결과만을 고찰한다. 이 때의 응용 S/W는 MatLab Ver.7.5(R2007b)를 이용하였다.

4.1 1-자유도 피드백 제어 시스템

이 절에서는 외란을 고려하지 않고, 동시에 피드포워드 제어를 하지 않은 경우 즉 피드백 제어기만의 제어 성능을 고찰한다. 단, 장력과 두께의 목표값은 각각 $18.1[N/mm^2]$, $1.72[mm]$ 이다.

Fig. 6에서와 같이 ILQ 제어는 기존 MV-AGC와는 달리 과도상태에서 오버슈트 없이 목표치에 수렴하고, 정상상태에 도달하는 정착시간이 매우 짧음을 알 수 있다. 그러나 두 제어 시스템 모두 적분기를 포함하고 있어 정상상태오차는 모두 거의 0으로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 이 논문에서 제안한 ILQ 제어가 냉간압연 시스템의 두께 및 장력 제어에 매우 유용함을 보이고 있다.

4.2 2-자유도 피드백 제어 시스템

이 절에서는 논문에서 제안한 피드포워드 제어기 즉 목표치 정형화 필터 및 외란관측기의 제어 성능을 고찰하기로 한다.

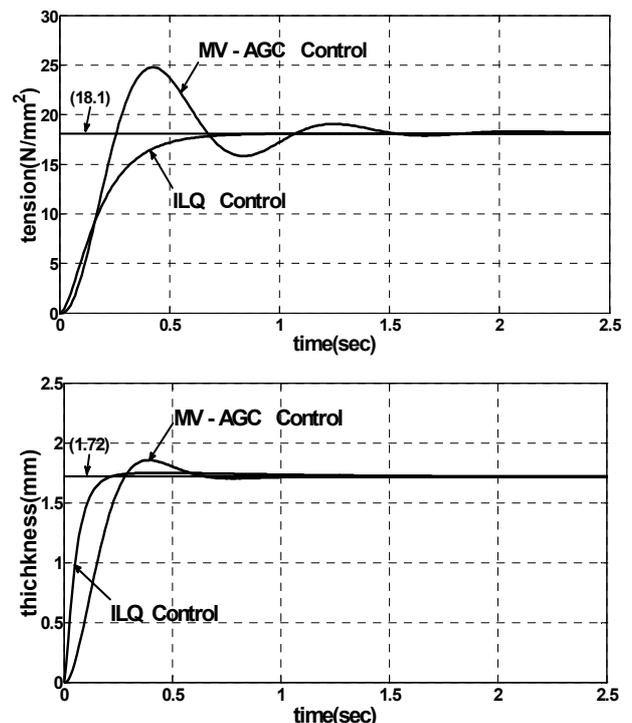


Fig. 6 Strip thickness and tension of the conventional MV-AGC and the ILQ AGC control system

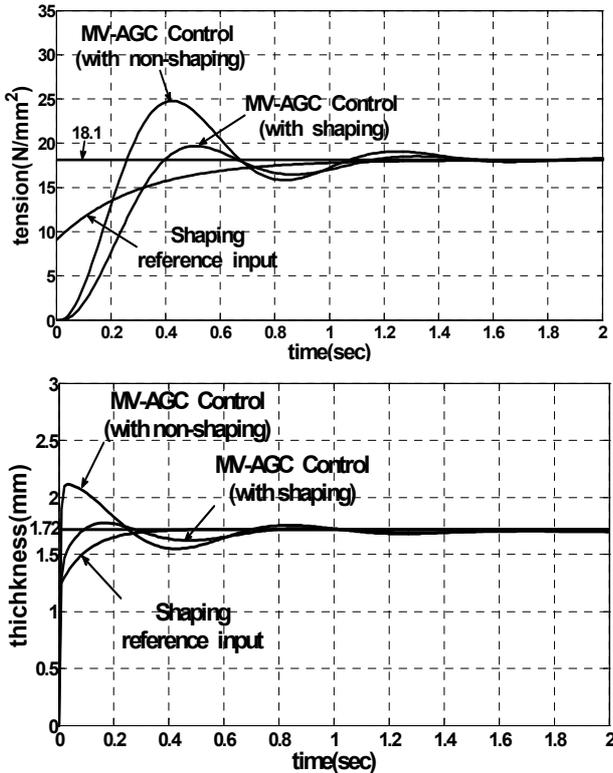


Fig. 7 Strip thickness and tension of the conventional MV-AGC with a reference shaping filter

먼저 외란을 고려하지 않고, 단지 목표값을 정형화한 경우에 대한 제어 성능을 고찰한다. 단, ILQ 제어 시스템은 Fig. 6에서 알 수 있듯이 과도상태 응답이 매우 양호하므로, 기존 MV-AGC 제어 시스템에만 적용하여 그 성능을 고찰한다.

Fig. 7은 기존 MV-AGC에 스트립 장력과 두께 모두 목표값을 정형화한 경우에 대한 결과를 나타낸다. 이때 식 (9)의 목표치 정형화 필터 계인들은 다음과 같이 설정한다.

- 장력: $\alpha_1 = 0.5$ (목표치 50%), $\beta_1 = 0.3$
- 두께: $\alpha_2 = 0.7$ (목표치 70%), $\beta_2 = 0.1$

Fig. 7에서 스트립 장력과 두께가 과도상태에서 오버슈트가 크게 감소하지만, 목표치에 도달하는 응답시간이 다소 늦어짐을 알 수 있다.

다음은 외란이 존재할 경우, 외란관측기를 활용한 피드포워드 제어 성능을 고찰하기로 한다. 단 여기서는 목표치 정형화 필터는 적용하지 않음에 주의하자.

외란관측기를 통한 외란 추정 결과는 Fig. 8과 같다. 그림에서 추정하는데 있어 시간지연이 있

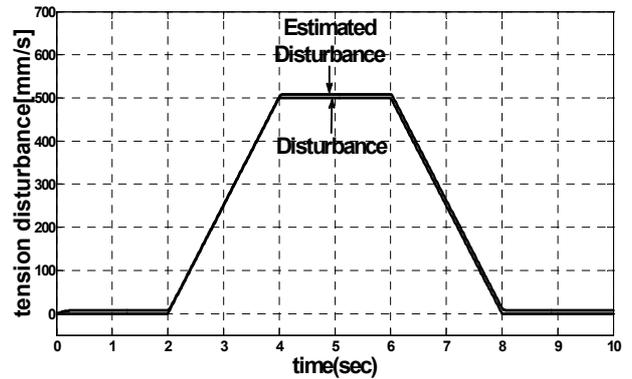


Fig. 8 A result of disturbance estimation

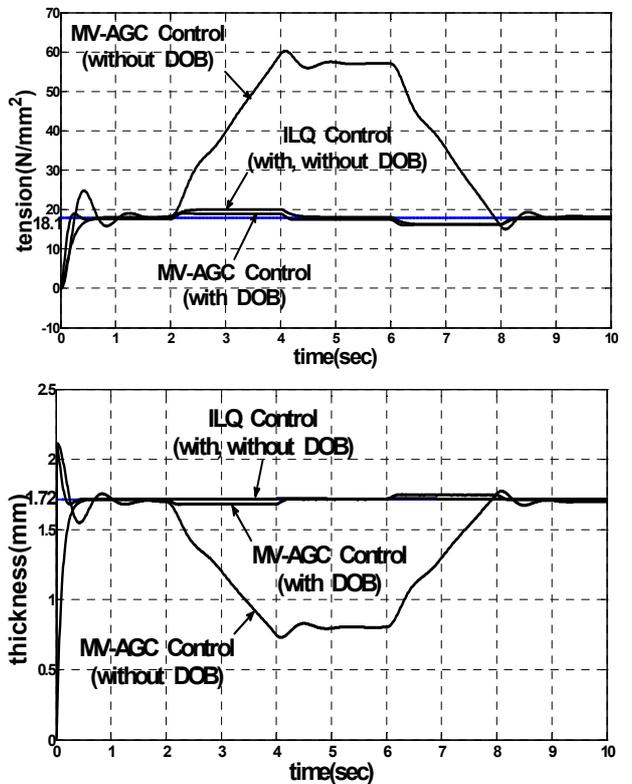


Fig. 9 Strip thickness and tension of 2-DOF control system with a disturbance observer

지만, 추정 정도는 매우 양호함을 알 수 있다. 일반적으로 외란 추정 속도는 시스템의 특성과 관련이 있지만, 이를 줄이기 위해서는 외란 추정기의 시정수 T_{OB} 를 제어기 하드웨어가 허용하는 범위 내에서 최대한 작게 설정하는 것이 바람직한 것으로 잘 알려져 있다.⁽⁷⁾ 여기서는 약 0.02초로 설정하였다.

Fig. 9는 외란 관측기 활용 피드포워드 제어가 결합된 2-자유도 제어 시스템에 대한 외란 제거 성능을 나타낸다. 그림에서 기존 MV-AGC는

외란 제어 효과가 전혀 나타나지 않지만, 외란관측기를 활용하여 피드포워드 제어를 수행하였을 경우에 기존 MV-AGC 제어 시스템도 외란의 영향이 크게 감소함을 알 수 있다. 반면에 ILQ 제어에서는 외란관측기를 활용하지 않아도 외란 제어 효과가 매우 양호함을 볼 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 연속 냉간압연 시스템의 스트립 장력과 두께 제어 정도를 향상시키기 위하여 목표치 정형화 필터와 외란 관측기를 활용하여 2-자유도 제어 시스템을 제안하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 기존 MV-AGC 제어 시스템보다 과도상태에서 오버슈트량이 크게 감소하였고, 장력 외란에 대해서 외란 제거 성능이 매우 양호함을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2011년도 동의대학교 교내 연구비에 의해 연구되었음(과제번호: 2011AA163).

참고문헌

(1) Kondo et al., 1989, "Analysis of Dynamic

Characteristics and Application of Non-interactive Control of Gauge Control of Reversing Cold Mills," *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 28, No. 5, pp. 445~452.

(2) Kodaya, Y., Ooi, T., Washikita, Y. and Seki, Y., 1999, "Strip Gauge and Tension Control at Cold Tandem Mill Based on ILQ Design Theory," *Proc. of the 1999 IEEE Int. Conf. on Control Application*, Hawaii, USA, August 22-27, pp. 23~28.

(3) Kim, J. S., Kim, S. S. and Lee, K. T., 1997, "Digital Predictive Control of Tandem Cold Mills," *Trans. of the KSME*, Vol. 19, No. 9, pp. 2142~2153.

(4) Kim, J. S. and Kim, S. S., 1997, "Multivariable Control Including a Roll Eccentricity of Tandem Cold Mills," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 21, No. 3, pp. 520~510.

(5) Tsuda, 1992, "PID Control," Jochang Press, pp. 69-106, Japan.

(6) Kimura, H. et. al., 1994, "Robust Control," Corona Publishing Co. Ltd., pp. 109-156, Japan.

(7) Iwai, S. D. et.al., 1994, "OBSERVER," Corona Publishing Co. Ltd., pp. 36-43, Japan.