

열간압연 코일러 시스템의 코일 장력에 대한 최적 서보 제어 Optimal Servo Control for Coil Tension of the Coiler System in Hot Rolling Mill

황이철*†
I-Cheol Hwang*†

(Received 31 March 2022, Revised 21 April 2022, Accepted 21 April 2022)

Abstract : This paper designs an optimal servo controller for the coiler system in hot rolling mill in order to suppress the tension fluctuation of the tail-end part after a steel plate leaves the final stand of hot rolling mill. The state space model of the coiler system is firstly modeled. Next, the optimal servo controller combined with a disturbance observer is designed using the inverse LQ optimal control method and the full state observer algorithm. Finally, it is shown by a computer simulation that the proposed control system is very effective to control tension fluctuations between the pinch roll and the mandrel under disturbances.

Key Words : Hot rolling mill, Coiler system, Inverse LQ optimal control, Disturbance observer, Tension control

— 기 호 설 명 —

σ_{PM} : 핀치 롤과 맨드렐 간의 장력 [kN/m]
 ω_M : 맨드렐 각속도 [rpm]
 k_p : 열연 코일의 강성계수 [kN/m]
 v_p : F7 스탠드 출측 속도 [m/s]
 F_p : 핀치 롤 부가 장력 [kNm]
 T_M : 맨드렐 회전 토크 [kNm]
 J_M : 맨드렐 회전 관성모멘트 [kNm]
 R_M : 맨드렐 롤 반경 [m]
 D_M : 맨드렐 점성 감쇠계수 [kNs/m]
 M_p : 열연 코일의 상당 질량 [kg]

D_p : 코일 접촉면 점성 감쇠계수 [kNs/m]
 τ_p : 핀치 롤의 ACR 시정수 [sec]

1. 서 론

열간 사상압연의 코일러 권취 장치는 Fig. 1과 같이 7개의 사상압연 스탠드를 통과한 열연 코일을 맨드렐(mandel)에 고속으로 감는 권취 장치이다. 권취된 열연 코일은 직접 판매가 가능하므로 소비자가 요구하는 치수와 형상 품질이 확보되어야 한다. 그래서 최종 스탠드와 맨드렐 사이에 핀치 롤을 설치하여 권취 코일의 판 쓸림이나 장력 제어를 수행함으로써 형상 불량률 최소화하고,

*† 황이철(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8422-5781) : 교수, 동의대학교 로봇,자동화공학과
E-mail : ichwang@deu.ac.kr, Tel : 051-890-2256

*† I-Cheol Hwang(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8422-5781) : Professor, Department of Robot · Automation Engineering, Dongeui University.
E-mail : ichwang@deu.ac.kr, Tel : 051-890-2256

폭 빠짐 등의 치수 불량 문제를 해결하고 있다.

특히 권취 코일의 장력 제어 시 코일이 맨드렐에 처음으로 감기기 시작하는 선단부와 최종 스탠드를 떠난 후의 미단부에서 안정적인 권취가 이루어져야 한다. 이러한 조업의 안정화와 두께, 폭, 형상 등의 치수 불량을 최소화하기 위하여 많은 연구¹⁻³⁾가 많이 수행되고 있다.

그러나 실제 현장에서는 권취 시 맨드렐의 각 속도와 토크 제어를 통해 판 쓸림이나 장력 제어를 대부분 피드백 제어가 아닌 수식모델과 조업자의 경험적인 지식을 기반으로 하는 제어 방식을 취하고 있다. 권취 코일의 피드백 장력 제어에 관한 이론적인 연구 가운데서 Hirata³⁾ 등은 열연 코일이 최종 스탠드를 빠져나오기 전(코일 선단부와 중앙부)과 후(코일 미단부)를 각각 하이브리드 형태의 상태공간모델로 모델링한 후, 이산시간 중단 피드포워드 최적 제어기와 외란 억제 효과를 위한 유한시간 피드백 LQ 최적 제어를 설계하였다. 이 결과는 이론적으로는 양호한 장력 제어 성능을 가지지만, 아직 실제 현장에 충분히 적용되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 권취 코일의 장력 제어 알고리즘에 대한 현장 적용성을 높이기 위하여 새로운 최적 제어기 설계법 개발을 목표로 한다. 단, 여기서는 권취 시 코일 중앙부에서는 기존 제어 방식으로도 비교적 장력 제어가 원활히 수행되고 있으므로, 중앙부와 동특성이 다르고, 비교적 장력 변동을 수반하는 외란 요소가 많은 코일 미단부 즉 압연 코일이 최종 스탠드를 빠져나온 경우에 대한 피드백 제어 알고리즘 연구로 한정한다. 이 경우에 대하여 먼저 상태공간모델을 구한 후, 핀치 롤과 맨드렐 간의 코일 장력을 일정하게 하는 피드백 최적 서보 제어기와 외란 관측기를 활용한 피드포워드 제어기를 설계한다. 제어기 설계법은 역 LQ 최적제어(이하 ILQ 제어라 한다) 설계법⁴⁾과 전 상태 관측기^{5,6)}를 활용한 피드포워드 제어기법이다.

본 논문에서 제안한 2 자유도 최적 서보 제어기는 리카티 방정식의 해나 가중행렬을 사전에 고려할 필요가 없고, 제어기 구조도 입출력 비간

섭화된 PI 제어기 구조와 유사하여 실시간 구현이 용이함은 물론 최적 제어 성능을 가지고 있어 코일 권취 장력을 제어하는데 매우 효과적임을 보인다. 그리고 코일 속도나 길이 변동에 의한 외란 등의 제어에도 매우 효과적임을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 코일러 시스템의 상태공간모델을 도출하고, 이를 기초로 제 3장에서는 ILQ 최적 제어기와 외란 관측기를 설계한다. 제4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 고찰을 통하여 제안한 제어 시스템의 유용성을 보인다. 끝으로 본 논문의 결과를 제5장에서 간략하게 요약한다.

2. 코일러 시스템 모델링

Fig. 1에서 제어대상은 코일의 미단부가 최종 스탠드(F7)를 빠져나와 코일이 맨드렐에 권취되는 코일러 시스템으로 설정한다. 코일러 시스템을 간략히 모델화하면 Fig. 2와 같으며, 여기서 모델링은 열연 코일이 사상 압연기의 최종 스탠드를 빠져나온 후의 미단부만 고려하기로 한다.

코일러 시스템의 제어입력 u 와 관측출력 y 를 각각 $u = [T_M^{ref} F_P^{ref}]^T$, $y = [\omega_M \sigma_{PM}]^T$ 로 설정하며, 단, $[\bullet]^T$ 는 전치행렬을 나타낸다. T_M^{ref} 는 맨드렐의 목표 구동 토크, F_P^{ref} 는 핀치 롤에 의하여 가해지는 목표 코일 장력이며, 나머지 기호들은 기호 설명 부분을 참조하기 바란다. 그리고 맨드렐 구동 토크 T_M 은 T_M^{ref} 에 대해서 지연이 없고, 반면에 핀치 롤에 의해 부가되는 장력 F_P 는 F_P^{ref} 에 대해서 1차 지연 특성을 가진다고 가정한다.

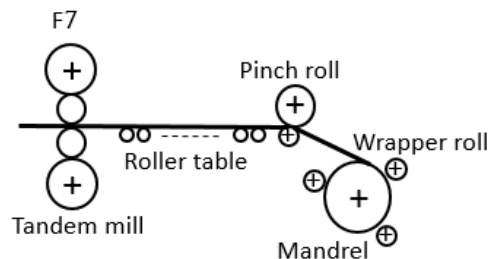


Fig. 1 Coiler system of hot rolling mill

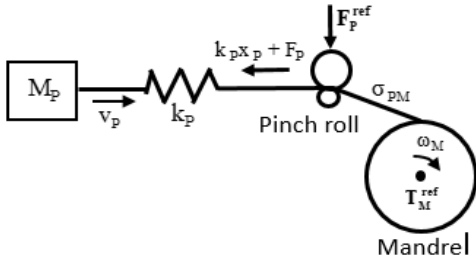


Fig. 2 Coiler model of hot rolling mill

먼저 최종 F7 스탠드 출측의 관속을 v_p 로 하면 핀치 롤을 빠져 나와 맨드릴에 권취되는 코일 선속력은 $R_M\omega_M$ 이 되고, v_p 와 $R_M\omega_M$ 과의 차를 적분하면 F7 스탠드와 핀치 롤 간의 압연 코일 변화량 x_p 는 다음 식 (1)을 만족한다.

$$\frac{d}{dt}x_p(t) = R_M\omega_M(t) - v_p(t) \quad (1)$$

이때 코일 권취 장력 $\sigma_{PM}(t) = k_p x_p(t) + F_p(t)$ 이므로, 맨드릴의 운동 방정식은 식 (2)와 같다.

$$J_M \frac{d}{dt}\omega_M(t) + D_M\omega_M(t) = T_M^{ref}(t) - R_M\sigma_{PM}(t) \quad (2)$$

최종 스탠드에서 핀치 롤까지의 코일 거동에 대한 운동 방정식은 아래 식 (3)과 같다.

$$\frac{d}{dt}v_p(t) = -\frac{D_p}{M_p}v_p(t) + \frac{k_p}{M_p}x_p(t) \quad (3)$$

핀치 롤의 1차 지연 특성을 고려하면, 핀치 롤에 대한 운동 방정식은 다음 식 (4)와 같다.

$$\frac{d}{dt}F_p(t) = -\frac{1}{\tau_p}F_p(t) + \frac{1}{\tau_p}F_p^{ref} \quad (4)$$

따라서 상태변수를 식 (5)와 같이 정의하면,

$$\mathbf{x}(t) = [\omega_M(t) \ v_p(t) \ x_p(t) \ F_p(t)]^T \quad (5)$$

식 (1)~(4)로부터 코일러 시스템에 대한 상태 공간모델은 다음 식 (6), (7)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\mathbf{x}(t) &= A\mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t), \\ \mathbf{y}(t) &= C\mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{D_M}{J_M} & 0 & -\frac{R_M k_p}{J_M} - \frac{R_M}{J_M} \\ 0 & -\frac{D_p}{M_p} & \frac{k_p}{M_p} & 0 \\ R_M & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_p} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_M} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_p} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_p & 1 \end{bmatrix}$$

3. 코일러 시스템 최적 제어기 설계

3.1 ILQ 피드백 최적 제어기

이 절에서는 식 (6), (7)에서 주어진 상태공간모델에 기초하여 ILQ 최적 서보 제어기를 설계한다. 피드백 서보 제어기와 ILQ 제어기의 구체적인 설계 순서는 문헌⁴⁾을 참고 바란다.

[STEP 1] 제어대상이 가제어/가관측임을 확인한다. 가제어/가관측이면 ILQ 서보 제어기의 설계가 가능하다.

[STEP 2] 제어대상의 임출력에 대한 상대차수 d 를 $d = \min\{l|c_k A^{l-1} B \neq 0\}$, $k=1,2$ 로 정의하면, 상대차수는 각각 $d_1=1, d_2=1$ 이 된다.

[STEP 3] 상대차수로부터 제어대상에 대한 비간섭화 행렬 D 와 역행렬 D^{-1} 은 식 (8)과 같다. 비간섭화 행렬의 역행렬이 존재하므로, 제어대상은 비간섭화가 가능함을 확인한다.

$$D = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_M} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_p} \end{bmatrix}, \quad D^{-1} = \begin{bmatrix} J_M & 0 \\ 0 & \tau_p \end{bmatrix} \quad (8)$$

[STEP 4] 비간섭화된 제어대상에 대하여 목표 맨드릴 각속도 제어 시스템과 권취 장력 제어 시

스탬들의 특성 방정식을 각각 $\phi_1(s) = (s + \omega_1)^{d_1}$, $\phi_2(s) = (s + \omega_2)^{d_2}$ 로 설정한다. 여기서 ω_1, ω_2 의 역수는 비간섭화된 각 제어 시스템의 목표 시정수가 된다.

[STEP 5] 기준 적분 제어게인 K_{I0} 와 기준 상태 피드백 제어게인 K_{F0} 를 구하면 각각 다음과 같다.

$$K_{I0} = \begin{bmatrix} J_M \omega_1 & 0 \\ 0 & \tau_p \omega_2 \end{bmatrix}, \quad K_{F0} = \begin{bmatrix} J_M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau_p k_p & \tau_p \end{bmatrix} \quad (9)$$

[STEP 6] 최종적으로 ILQ 서보 제어기의 제어게인과 제어입력 u 는 각각 다음 식 (10), (11)과 같으며, 여기서 K_s 는 제어게인 조정 행렬이고, K_{s1}, K_{s2} 는 제어게인 조정 파라미터들이다.

$$[K_I \ K_F] = K_s [K_{I0} \ K_{F0}],$$

$$K_s = \begin{bmatrix} K_{s1} & 0 \\ 0 & K_{s2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$u = \frac{K_I}{s} (r - y) + K_F x \quad (11)$$

3.2 외란 관측기 및 피드포워드 제어기

권취 코일의 미단부에서 장력 변동을 유발하는 외란 요소로서는 사상 압연의 최종 스탠드를 빠져 나오는 코일 속도 v_p 의 변동과 코일의 길이 x_p 에 대한 변동이 지배적이다. 이들을 각각 외란으로 고려하여 각각 $d_{vp}(t), d_{xp}(t)$ 로 정의한다. 외란 관측기 설계법은 Gopinath의 전 상태 관측기 구성법⁶⁾을 이용한다.

외란 $d = [d_{vp}(t) \ d_{xp}(t)]^T$ 를 각각 다음 식 (12), (13)과 같이 고려한다.

$$\frac{d}{dt} v_p(t) = -\frac{D_p}{M_p} v_p(t) + \frac{k_p}{M_p} x_p(t) + D_{vp} d_{vp}(t) \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} x_p(t) = R_M \omega_M(t) - v_p(t) + D_{xp} d_{xp}(t) \quad (13)$$

여기서 D_{vp}, D_{xp} 는 상수 행렬로 가정하며, 외란의 동특성을 다음 식 (14)와 같이 고려한다.

$$\frac{d}{dt} d_{vp}(t) = 0, \quad \frac{d}{dt} d_{xp}(t) = 0 \quad (14)$$

제2장에서 구한 식 (6)의 상태공간모델에 식 (14)의 동특성을 포함한 확대 제어대상의 상태벡터를 $\tilde{x} = [d_{vp} \ d_{xp} \ \omega_M \ v_p \ x_p \ F_p]^T$ 로 정의한다. 이때 식 (6)에서 주어진 상태변수들은 모두 관측 가능하므로, 외란 관측기는 다음 단계를 통하여 설계된다.

[STEP 1] 식 (6)과 (12)~(14)를 결합한 확대 제어대상을 아래 식 (15)와 같이 구성한다.

$$\frac{d}{dt} \tilde{x} = \tilde{A} \tilde{x} + \tilde{B} u, \quad \tilde{y} = \tilde{C} \tilde{x} \quad (15)$$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}, \quad \tilde{C} = [C_1 \ : \ C_2]$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{12} = O_{(2 \times 4)},$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & D_{vp} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{xp} & 0 \end{bmatrix}^T, \quad A_{22} = A,$$

$$B_{11} = O_{(2 \times 2)}, \quad B_{21} = B, \quad C_1 = O_{(4 \times 2)}, \quad C_2 = I_{(4 \times 4)}$$

여기서 O, I 는 각각 영행렬과 단위행렬이다.

[STEP 2] 확대 제어대상의 가관측 행렬 랭크가 6이므로 식 (15)의 확대 제어대상이 관측 가능함을 확인한다.

[STEP 3] 확대 제어대상에 대하여 최소차원 상태 관측기는 다음 식 (16)과 같이 얻어진다.

$$\frac{dz}{dt} = Wz + E\tilde{y} + Ju, \quad \hat{d} = z + L\tilde{y} \quad (16)$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_{obv}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{obx}} & 0 \end{bmatrix}^T, \quad W = \begin{bmatrix} -\frac{D_{vp}}{T_{obv}} & 0 \\ 0 & -\frac{D_{xp}}{T_{obx}} \end{bmatrix},$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & E_{12} & E_{13} & 0 \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & 0 \end{bmatrix}, \quad J = [0 \ 0],$$

$$E_{12} = -\frac{1}{T_{obv}} \left(\frac{D_p}{M_p} + \frac{D_{vp}}{T_{obv}} \right), \quad E_{13} = \frac{1}{T_{obv}} \frac{k_p}{M_p},$$

$$E_{21} = -\frac{R_M}{T_{obx}}, \quad E_{22} = \frac{1}{T_{obx}}, \quad E_{23} = -\frac{1}{T_{obx}} \frac{D_{xp}}{T_{obx}}$$

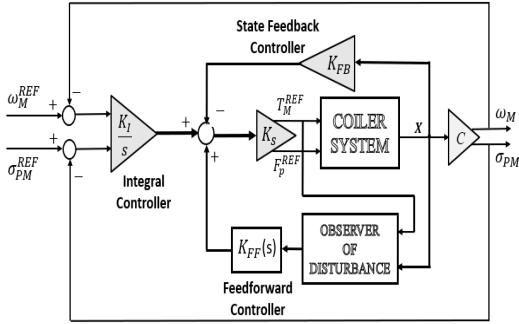


Fig. 3 Optimal control system of the coiler system with a disturbance observer

위에서 L , T_{obv} , T_{obc} 는 각각 관측기 행렬과 외란 관측기의 시정수들을 나타내며, 이들은 빠른 속도로 외란이 추정될 수 있도록 적절히 결정한다. 따라서 추정된 외란 \hat{d} 를 이용하여 피드포워드 제어를 구성하면 제어입력은 $u_{FF} = K_{FF}(s)\hat{d}$ 와 같이 얻어진다. 일반적으로 외란 추정을 활용한 피드포워드 제어기는 제어대상의 역 모델을 이용하지만, 역 모델은 동특성을 포함하고 있어 실제 구현이 어렵다. 그래서 본 논문에서는 실 시스템에로의 적용을 위하여 상수 행렬로 설정한 후, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 외란 억제 성능이 양호한 값으로 결정하였다.

Fig. 3은 코일러 시스템에 대한 2 자유도 최적 서보 제어 시스템의 블록선도를 나타낸다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

이 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제 3장에서 설계한 제어 시스템의 결과를 고찰한다. 시뮬레이션 시 사용한 시스템 파라미터 제원은 J_M : $4.652 \times 10^3 \text{ Nm}$, R_M : 1.3 m, M_p : $2.808 \times 10^3 \text{ kg}$, k_p : $3.248 \times 10^6 \text{ N/m}$, τ_p : 0.02 sec이며, 감쇠계수 D_p , D_M 의 값들은 물리적으로 시스템 동특성에 적합한 값으로 설정하였다. 또한 J_M 과 R_M 등은 코일이 권취됨에 따라 변화하는 시변 파라미터들이지만, 여기서는 상수로 가정하고, 출력의 목표값은 $\omega_M^{ref} = 13.33 \text{ rpm}$, $\sigma_{PM}^{ref} = 23.250 \text{ kPa}$ 로 설정하였다.

Fig. 4는 외란 $d_{vp}(t)$, $d_{xp}(t)$ 의 추정 결과를 나타내며, 그림에서 외란 관측기가 외란을 매우 양호하게 추정하고 있음을 알 수 있다. 참고로 여기서는 외란 관측기의 시정수를 0.2초로 하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 맨드렐 각속도와 코일 권취 장력에 대한 제어 결과를 나타내고 있다. 그림에서 ILQ는 외란을 고려하지 않을 경우의 ILQ 최적 서보 제어기의 결과를, ILQ+without DOB와 ILQ+with DOB는 각각 외란을 고려한 경우에 있어 외란 관측기를 활용하지 않은 결과와 활용한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 5에서 외란이 작용하지 않을 경우, ILQ 서보 제어는 시정수가 약 0.2초이면서 정상상태오차가 0으로 수렴하는 목표 추종 성능을 만족하고 있으며, 외란을 고려할 경우, 외란 관측기를 활용한 피드포워드 제어를 하지 않더라도 각속도에 대한 목표 추종 성능이 매우 양호함을 볼 수 있다. 그 이유로서는 고려한 외란들의 영향이 실제 맨드렐 각속도에 큰 영향을 미치지 않기 때문인 것으로 생각된다. 또한 ILQ 서보 제어 시스템은 각 입출력에 대하여 비간섭화된 형태로 설계되므로, 외란의 영향을 적게 받는 맨드렐 각속도는 ILQ 제어 만으로도 충분히 제어가 가능한 것으로 판단된다.

반면에 Fig. 6의 장력 제어 결과를 보면, 맨드렐 각속도 제어 결과와는 달리 ILQ 피드백 제어만으로는 외란의 효과를 충분히 제어할 수 없음을 알 수 있다. 따라서 외란 관측기를 활용한 피드포워드 제어가 동시에 수행되어야 외란 제어 성능을 가진다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 최적 서보 제어 시스템은 권취 코일 미단부의 장력 제어에 효과적임을 알 수 있다.

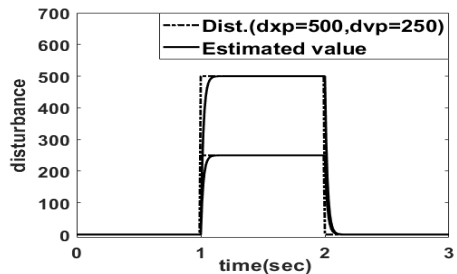


Fig. 4 Estimated values of disturbances(d_{vp} , d_{xp})

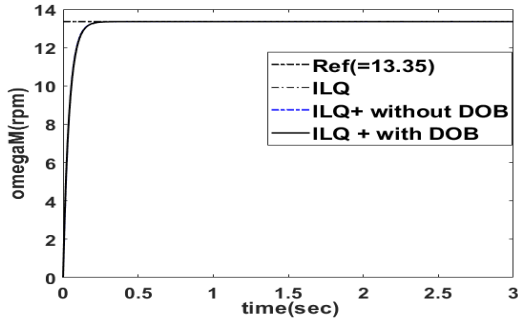


Fig. 5 Angular speed of mandrel

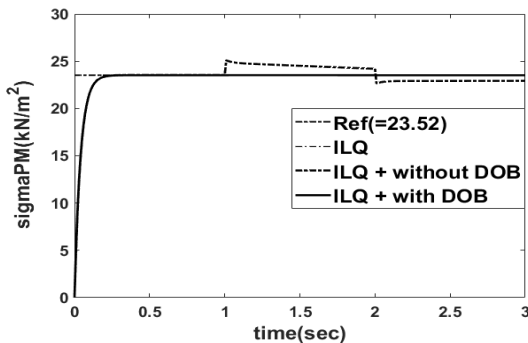


Fig. 6 Tension between pinch roll and mandrel

5. 결 론

본 논문에서는 열연 코일 미단부에 대한 맨드릴 각속도와 권취 장력에 대한 2 자유도 최적 서보 제어 시스템을 설계하였다. 제어 시스템은 피드백 ILQ 최적 서보 제어기와 외란 관측기를 활용한 피드포워드 제어기로 구성하였다. 특히 ILQ 최적 제어기는 가중행렬의 선정과 관계없이 항상 최적성을 보장하고, 외란에 대해서도 효과적인 제어가 가능함을 알 수 있었다. 또한 제어기의 구조 각 입출력 간의 비간섭화로 인하여 각 채널마다 독립된 PI 제어를 수행할 수 있어 제어 알고리즘의 현장 적용성이 매우 클 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2021학년도 동의대학교 연구년 지원에 의하여 연구되었음.

References

1. Y. J. Choi and M. C. Lee, 2006, "Study for the downcoiler's offline simulator", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 65-72.
2. S. H. Lee, H. B. Park and C. J. Park, 2015, "Design of LTBC Controller for Tension Control in Down Coiler Process of Hot Strip Mills", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 21, No. 4, pp. 301-308. (<https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2015.14.8037>)
3. M. Hirata, A. Eda, K. Furuta, A. Kojima, S. Masuda and K. Asano, 2010, "Modeling and Control of Bimodal Coiler System", Testu - Hagane, Vol. 96, No. 7, pp. 27-34.
4. S. B. Kim and I. C. Hwang, 2002, "Design of an ILQ Looper Controller for Hot strip mills", Journ. of the Korean Society of Mechanical Engineers(A), Vol. 26, No. 8. pp. 1680-1689. (<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2002.26.8.1680>)
5. Y. B. Kim, 1999, "A Study on a Two-Degree-of-Freedom Servo System Incorporating an Observer", Journal of The Korean Society of Power System Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 50-54.
6. B. Gopinath, 1971, "On the control of linear multiple input-output systems", The Bell System Technical Journal, Vol. 50, Issue. 3, 1063-1081. (DOI:10.1002/j.1538-7305.1971.tb01896.x)