

# 열간압연공정의 스트립 선미단부 루퍼-장력 제어 Looper-Tension Control of Strip Top-Tail Parts for Hot Rolling Mills

황이철\*†  
I-Cheol Hwang\*†

(Received 23 March 2015, Revision received 26 May 2015, Accepted 04 June 2015)

**Abstract:** This paper designs a looper-tension controller for strip top-tail parts in hot strip finishing mills. A three-degree linear model of the looper-tension system is derived by a Taylor's linearization method, where the actuator's dynamics are ignored because of their fast responses. A feedforward shaping controller for the strip top part and a feedforward model reference controller for the strip tail part are respectively designed, they are combined with an ILQ(Inverse Linear Quadratic optimal control) feedback controller for the strip middle part. It is shown from by a computer simulation that the proposed controller is very effective to the strip top-tail parts including the middle part.

**Key Words :** Hot strip finishing mill, Looper-tension system, Shaping filter, Model reference controller, Inverse linear quadratic optimal control.

## — 기 호 설 명 —

- $L$  : 스탠드 간 거리 [m]
- $E$  : 스트립 영률
- $\sigma_f$  : 스트립 단위 장력 [ $\text{kg}/\text{cm}^2$ ]
- $s_f$  : 선진율
- $\theta$  : 루퍼 각도 [rad]
- $\omega$  : 루퍼 각속도 [rad/sec]
- $J$  : 루퍼 2차 관성모멘트
- $V_R$  : 밀 속도 [m/min]
- $T_{LS}$  : 루퍼 ASR 시정수
- $F_2(\theta)$  : 스탠드 간 스트립 신장 길이 [mm]
- $K_{10}$  : 선진율에 대한 장력 영향계수

## 1. 서 론

Fig. 1과 같이 7개의 스탠드와 스탠드 간 6개의 루퍼로 구성된 열간사상압연에서는 루퍼를 이용하여 스트립 통관성 안정화와 장력 제어를 수행하고 있으며, 이것은 루퍼-장력 제어기를 통하여 정밀하게 제어되고 있다. 루퍼-장력 제어기의 제어목적은 스트립 부분별로 즉 선단부, 중앙부, 미단부로 나뉘어져 각각 서로 다른 제어 로직이 적용되고 있다. 여기서 Fig. 2에서와 같이 선단부(top part)란 모재가 제 1 스탠드부터 최종 스탠드까지 치입되는 과정에서 스탠드 사이의 루퍼가 정상적으로 동작하기 전까지의 구간의 스트립을 말하고, 그 후 루퍼가 정상적으로 동작하는 스트립 구간

\*† 황이철(교신저자) : 동의대학교 메카트로닉스공학과  
E-mail : ichwang@deu.ac.kr, Tel : 051-890-2256

\*† I-Cheol Hwang(corresponding author) : Department of Mechatronics Engineering, Dongeui University.  
E-mail : ichwang@deu.ac.kr, Tel : 051-890-2256

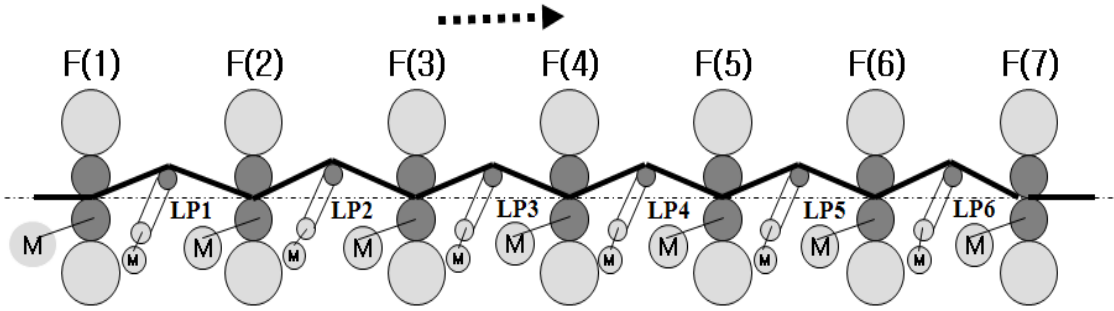


Fig. 1 A schematic diagram of hot rolling mills

을 중앙부(middle part), 스트립이 각 스텐드를 빠져 나오기 시작한 시점부터의 스트립 구간을 미단부(tail part)라고 정의한다.

실제 압연공정에서는 스트립 각 부분별로 상이한 제어로직이 적용되고 있는데, 선단부는 루퍼-기동제어와 TTC(top tension control) 제어로직을, 중앙부는 각종 피드백 제어로직 (주로 PI, CDM, ILQ 등)을, 미단부에서는 루퍼-다운(down)과 노휼(no whip) 제어로직을 사용하고 있다.<sup>1)</sup> 여기서 중앙부에 대해서는 지금까지 많은 피드백 루퍼-장력 제어로직에 대한 연구개발이 이루어져 통관성이 매우 안정화되어 있는 것으로 잘 알려져 있다.

반면에 선단부에서는 과대 장력 또는 과대 루프 현상이 빈번히 발생하고, 미단부에서도 후방 스텐드들의 직간접적인 영향을 충분히 고려하지 못하여 루퍼가 점프-업되면서 스트립 꼬임이 발생하는 등 통관성이 매우 불안정한 상황이 종종 발생되고 있는 실정이다. 따라서 중앙부에서와 같이 선미단부에 적용할 수 있는 엄밀한 피드백 제어로직 개발이 시급하다고 할 수 있다.

이를 위하여 이 논문에서는 선미단부에서도 통관성을 안정화 할 수 있는 새로운 제어로직 개발에 관한 연구를 수행하고자 한다. 먼저 3차 루퍼-장력 선형화 모델을 기초로 설계된 중앙부 역최적제어(ILQ) 피드백 제어기를 간략히 소개하고, 새로운 목표값 정형화 및 모델추종형 피드포워드 제어기를 설계하여 전체적으로 중앙부에 적용되고 있는 ILQ 피드백 제어기와 결합된 2-자유도 루퍼-장력 최적 제어 시스템을 설계하기로

한다. 그리고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 이 논문에서 설계된 제어가 스트립 전 구간에 모두 적용 가능한 통합 제어로직임을 보인다.

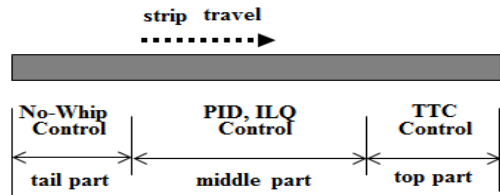


Fig. 2 Control logics as to each strip parts

## 2. 루퍼-장력 모델링

열간 사상압연의 루퍼-장력 시스템의 수학적모델은 장력과 루퍼에 대한 비선형 미분방정식으로 주어진다. 일반적으로 5차 시스템으로 주어지지만, 여기서는 밀 모터와 루퍼의 구동기 응답성이 매우 빠른 것으로 가정하여 그 동특성을 무시하고 아래 식 (1)과 같이 3차 시스템으로 모델링하며, 구체적인 유도 과정은 문헌을 참조하기 바란다.<sup>1)</sup>

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta\sigma_f = & -\frac{E}{L} \frac{\partial s_f}{\partial \sigma_f} \Delta\sigma_f + \frac{E}{L} \frac{\partial F_2(\theta)}{\partial \theta} \frac{d}{dt} \Delta\theta \quad (1) \\ & - \frac{E(1+s_f)}{L} \Delta V_R^{REF} \\ \frac{d}{dt} \Delta\theta = & \Delta\omega \\ \frac{d}{dt} \Delta\omega = & -\frac{1}{T_{LS}} \Delta\omega + \frac{1}{T_{LS}} \Delta\omega_{REF} \end{aligned}$$

위의 식 (1)에서  $V_{REF}^R, \omega_{REF}$ 는 각각 밀 모터의 속도와 루퍼 각속도를 나타내며 시스템의 입력을 나타낸다. 앞에서 언급하였듯이 위의 식 (1)은 루퍼-장력 시스템을 선형화하여 3차 시스템으로 단순화한 모델로서, 각 입력들은 자동 속도제어장치(ASR)로 구현되는데, 이들의 응답성이 매우 빠른 것으로 간주하여 동특성을 무시하였으며, 또한 루퍼 시스템은 구동부와 결합하여 2차 시스템으로 단순화하였다.

이때 상태 변수(x)는 스트립 장력, 루퍼 각도 및 각속도, 출력(y)는 스트립 장력 및 루퍼 각도, 그리고 입력(u)는 양단 스트립의 밀 속도 및 루퍼 각속도의 기준입력으로 하면, 상태(x), 입출력(u, y) 변수들은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= (\Delta\sigma_f, \Delta\omega, \Delta\theta) \\ \mathbf{u} &= (\Delta V_R^{REF}, \Delta\omega_{REF}), \quad \mathbf{y} = (\Delta\sigma_f, \Delta\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 식 (1)에 대한 상태공간방정식은 아래 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{Cx} \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{EK_{10}}{L} & \frac{EF_{2\theta}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{LS}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{E(1+s_f)}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{LS}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 3. 루퍼-장력 제어기 설계

이 장에서는 스트립 중앙부를 포함한 선미단부 루퍼-장력 제어기를 설계한다. 먼저 기존의 중앙부에 적용되고 있는 ILQ 제어로직을 간략히 소개하고, 이 논문에서 새롭게 제시한 선미단부 제어로직을 간략히 기술하기로 한다. 그리고 이 논문

에서의 전체 제어 시스템의 블록선도는 Fig. 3과 같이 주어진다.

#### 3.1 스트립 중앙부 제어기 설계

제 2장 식 (3)에서 주어진 루퍼-장력 시스템에 대하여 스트립 중앙부에 적용하는 제어기는 기존의 역 최적 제어로직(ILQ: Inverse Linear Quadratic optimal control logic)을 사용하기로 한다. 이에 대한 구체적인 설계 절차는 참고문헌을 참조하기 바란다.<sup>1)</sup> 여기서는 각 제어게인에 대한 결과만을 아래 식 (4)~(6)에서와 같이 간략히 기술한다.

■ 게인 조정 파라미터

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{TC} & 0 \\ 0 & \sigma_{HC} \end{bmatrix} \quad (4)$$

■ 기준 적분 제어게인

$$K_I^0 = \begin{bmatrix} K_{I011} & K_{I012} \\ K_{I021} & K_{I022} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{I011} & 0 \\ 0 & K_{I022} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} K_{I011} &= -\frac{L\omega_{TC}}{E(1+s_f)}, \quad K_{I012} = 0, \\ K_{I021} &= 0, \quad K_{I022} = T_{LS}\omega_{HC}^2 \end{aligned}$$

■ 기준 상태 피드백 제어게인

$$K_F^0 = \begin{bmatrix} K_{F011} & K_{F012} & K_{F013} \\ K_{F021} & K_{F022} & K_{F023} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} K_{F011} &= \frac{1}{L(1+s_f)}, \quad K_{F012} = K_{F013} = 0, \\ K_{F021} &= 0, \quad K_{F022} = T_{LS}, \quad K_{F023} = T_{LS}\omega_{HC} \end{aligned}$$

따라서 스트립 중앙부의 ILQ 제어기 적분 제어게인( $K_I$ )와 상태 피드백 제어게인( $K_F$ )는 각각 다음 식 (7)과 같이 주어진다.

$$K_I = \Sigma K_I^0, \quad K_F = \Sigma K_F^0 \quad (7)$$

위의 식 (4)에서  $\sigma_{TC}, \sigma_{HC}$ 는 각각 장력 루퍼 및 루퍼각도 루퍼의 게인 조정 파라미터를 나타내며,  $\omega_{TC}, \omega_{HC}$ 는 각각 장력 및 루퍼 시스템만 충족해야 할 목표 시정수를 나타낸다.

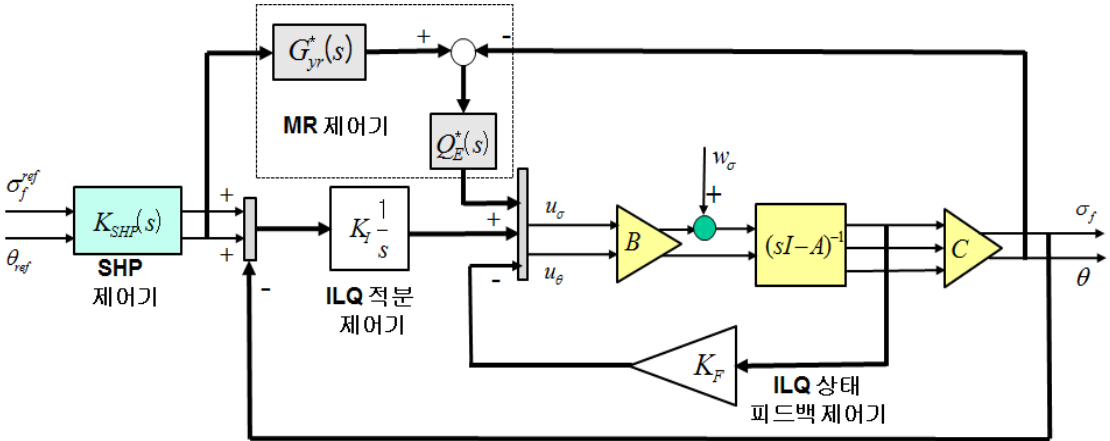


Fig. 3 A structure of the two-degree looper-tension control system

### 3.2 스트립 선미단부 제어기 설계

앞 절에서와 같이 적분 제어기와 상태 피드백 제어기로 결합된 ILQ 서보 제어기는 공칭 안정성과 정상상태에서의 응답이 매우 양호하여 중앙부 제어에는 매우 적합하지만, 스텝형 목표값일 경우 과도한 오버슈트 현상이 발생하고, 램프형과 같이 가변 목표값일 경우에는 적분 제어기만으로는 정상상태오차가 발생하는 등 선미단부에서는 충분한 제어성을 만족할 수 없다는 것이 일반적이다.<sup>2),3)</sup>

따라서 이 절에서는 스트립이 각 스탠드에 치입되는 선단부에서의 과도 응답을 개선하고, 목표값이 가변인 미단부에서의 정상상태 응답을 개선하기 위한 새로운 선미단부 제어로직을 제안한다.

#### 3.2.1 목표치 정형화 제어기 설계(선단부)

선단부와 중앙부에서는 목표값이 스텝형으로 인가된다. 이때 초기 시점에 과도한 오버슈트가 발생하므로 스텝형 장력과 루퍼 각도를 정형화하는 피드포워드 제어기( $K_{SHP}^\sigma$ )를 각각 다음과 같이 설계한다. 이에 대한 구체적인 설계 절차는 생략하기로 하며, 문헌을 참고하기 바란다.<sup>4)</sup>

스텝형 스트립 장력과 루퍼각도의 목표값을 정형화하는 제어기( $K_{SHP}^\sigma$ ,  $K_{SHP}^\theta$ )는 각각 다음 식 (8)과 같이 주어진다.

$$K_{SHP}^\sigma(s) = \frac{\alpha_1 \beta_1 s + 1}{\beta_1 s + 1}, \quad K_{SHP}^\theta(s) = \frac{\alpha_2 \beta_2 s + 1}{\beta_2 s + 1} \quad (8)$$

위의 목표값 정형화 피드포워드 제어기는 목표값에는 영향을 받지만, 안정성과 외란제거 성능을 포함한 피드백 제어성능에는 직접적인 영향을 미치지 않으므로 먼저 이를 만족할 수 있도록 피드백 제어기를 설계한 후, 목표값 추종성능을 만족하도록 피드포워드 제어기를 설계하는 것이 일반적인 설계 절차로 잘 알려져 있다.<sup>4)</sup>

식 (8)에서의 파라미터  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $i=1,2$ 는 일정한 목표값이 주어질 경우,  $\alpha_i$ 는 목표값의 최종값 대비 초기값 비율을 조정하고,  $\beta_i$ 는 초기값에서 최종값에 도달하기까지의 속응성을 조정하는 제어기 설계 파라미터를 나타낸다. 이들은 제어 시스템의 제어 성능을 보면서 시행착오적으로 조정하게 되는데, 일반적으로  $0 \leq \alpha_i \leq 1$ ,  $1 \leq \beta_i \leq 2$ 의 범위로 결정하는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다.<sup>4)</sup>

#### 3.2.2 모델추종형 제어기 설계(미단부)

일정한 목표값이 아니고 램프형 입력과 같은 일반화된 목표값에 대한 정상상태 성능을 개선하기 위해 모델추종형(MR:model reference) 피드포워드 제어기를 제안한다. 단, 구체적인 설계 알고리즘은 문헌을 참조하기 바란다.<sup>5)</sup>

Fig. 3에서와 같이 MR 제어기는 두 개의 제어게인으로 주어지는데, 하나는 제어 시스템의 목표 전달함수  $G_{yr}^*(s)$ 와 이의 출력과 실제 피드백 출력간의 오차를 보상하는 오차 보상기  $Q_E^0(s)$ 로 주어진다. 이들에 대한 구체적인 설계 결과는 각각 다음 식 (9), (10)과 같다.

$$G_{yr}^*(s) = \begin{bmatrix} \frac{\omega_{TC}}{s + \omega_{TC}} & 0 \\ 0 & \frac{\omega_{HC}^2}{(s + \omega_{HC})^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Q_E^0(s) = \begin{bmatrix} -\frac{L}{E(1+s_f)} \frac{q_1 \beta_1^1}{s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{LS}} \frac{q_2 (\beta_2^1 s + \beta_2^0)}{s} \end{bmatrix} \quad (10)$$

위의 식 10)에서의 오차 보상기 제어게인 파라미터들은 각각 다음과 같이 주어지는 것으로 한다.

$$q_1 \geq 0, q_2 \geq 0, p_1 = 1/\omega_{TC}, p_2 = 1/\omega_{HC} \quad (11)$$

$$\beta_1^0 = -p_1/q_1, \beta_2^1 = -2p_2/q_2, \beta_1^0 = -p_2^2/q_2$$

위의 MR 제어기는 제어 시스템의 목표 모델을 활용한 피드포워드 제어기로서 장력부에서는 적분제어(I 제어), 루퍼 각도부에서는 비례-적분 제어(PI 제어)기로 이루어져 있음이 특징적이라 할 수 있다.

#### 4. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 고찰

이 장에서는 제 3장에서 설계된 2-자유도 루퍼-장력 제어 시스템에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 고찰하기로 한다. 단, 기술적인 보안상 시스템의 파라미터 제원은 생략하기로 한다.

먼저 시뮬레이션 시 고려한 불확실성으로서 펄스형의 장력 외란과 이에 대한 외란 관측기로부터의 추정 결과를 Fig. 4와 같이 나타낸다. 여기서는 외란 관측기에 대한 구체적인 설명은 생략

하고 그 알고리즘만을 활용하기로 한다.<sup>1)</sup> 그림에서 외란 관측기는 외란을 양호하게 추정하고 있음을 알 수 있지만 과도상태에서의 추정치에 대한 오차가 다소 크게 발생함을 알 수 있는데, 이는 추정 속도와의 트레이드-오프 문제로서 이에 대한 보완이 필요할 것으로 사료된다.

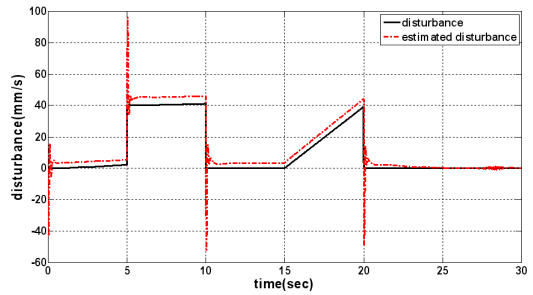
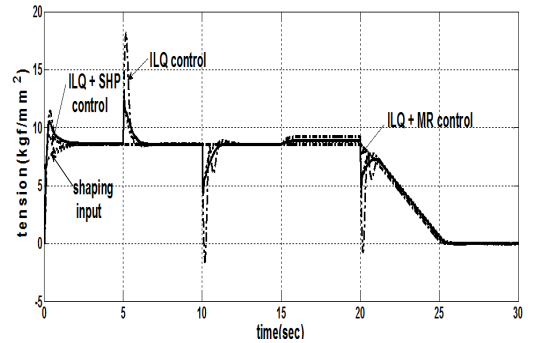
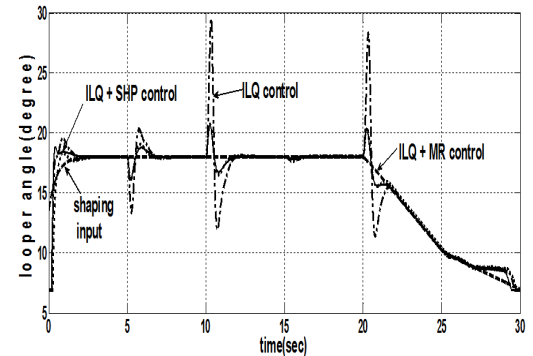


Fig. 4 A pulse-type disturbance and its estimation



(a) strip tension



(b) looper angle

Fig. 5 Time responses of an ILQ control system with SHP and MR control

Fig. 5는 이 논문에서 제안한 2-자유도 루퍼-장력 제어 시스템에 대한 장력 및 루퍼각도에 대한 제어 결과를 나타낸다. 그림 (a)의 스트립장력 결과에서 기존의 스트립 중앙부 제어 알고리즘인 제어보다 과도상태에서의 오버슈트량이 크게 줄어들음을 알 수 있고, 이는 피드포워드 목표값 정형화 제어기(SHP)의 영향인 것으로 판단된다. 그리고 목표값 추종 피드포워드 제어기(MR)는 미단부에서 목표값이 램프형으로 바뀌어도 ILQ 제어보다 목표치에 빠르게 추종하고 있음을 볼 수 있다. 그림 (b)의 루퍼 각도 결과에서도 동일하게 SHP와 MR의 피드포워드 제어기의 효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 즉 목표값 정형화로 인하여 과도상태에서의 오버슈트가 줄어들고, 이로 인해 정상상태에 빨리 도달하는 결과를 볼 수 있다. 따라서 이 논문에서 새롭게 설계된 목표치 정형화 및 기준모델을 활용한 피드포워드 제어기는 스트립 선미단부 제어에 매우 유용함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

이 논문에서는 열간 사상압연에서 선미단부 통관성 안정화를 위한 루퍼-장력 제어로직 개발에 관한 연구를 수행하였다. 스텝형의 목표값에 대한 과도한 오버슈트량을 줄이기 위해 목표치 정형화 제어로직을 설계하였고, 동시에 일반화된 목표값에 대한 정상상태오차를 줄이기 위해 모델추종형 피드포워드 제어로직을 제안하였다. 그리고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 2014학년도 동의대학교 연구년 지원에 의하여 연구되었음.

## References

1. I. C. Hwang, 2009, "Development of a looper-tension control technology for hot strip finishing mills", Research Report of POSCO.
2. Yuki Kuroe, Hiroshi Abe and Takao Fujii, 1996, "ILQ Design Method for Optimal Servo Systems with Generalized Reference Inputs", Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers(SICE), Vol. 32, No. 4, pp. 539-546.
3. H. Imanari, Y. Morimatsu, K. Sekiguchi, H. Ezure, R. Matuoka, A. Tokuda and H. Otobe, 1997, "Looper H-Infinity Control for Hot-Strip Mills", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 3, pp. 790-796.
4. N. Suda, 1994, PID Control, Jochang, pp.74-106.
5. S. Kunimatsu, M. Fujii and T. Fujii, 2004, "Analysis and Synthesis of Model Reference ILQ Servo System with Tracking Robustness", Trans. of the System, Control and Information, Vol. 17, No. 3. pp. 22-27.