

장력제어를 위한 게인 스케줄링

Gain Scheduling for Tension Control

이 동 옥*, 박 성 한*, 안 병 준*, , 이 만 형**

(* 부산대학교 지능기계공학과, ** 부산대학교 기계공학부)

Abstract: The looper control of hot strip finishing mill is one of the most important control item in hot strip rolling mill process. Loopers are placed between finishing mill stands and control the mass flow of the two stands. Another important action of the looper is to control the strip tension which influences on the width of the strip. So it is very important to control both the looper angle and the strip tension simultaneously but the looper angle and the strip tension are strongly interacted by each other. The gain scheduling is to break the control design process into two steps. First, one designs local linear controllers based on linearizations of the nonlinear system at several different operating conditions. Second, a global nonlinear controller for the nonlinear system is obtained by interpolating.

Keywords: hot strip finishing mill, looper, tension, gain scheduling

1. 서론

열간압연공정은 가열로에서 슬라브를 가열한 후 조압연기에서의 조압연과정, 사상압연기에서의 보다 정밀한 압연과정, 수냉과정 및 권취과정을 거쳐 최종 제품인 핫코일이 출하된다. 이러한 압연과정 중 품질에 제일 큰 영향을 미치는 사상압연에서는 두께, 스트립의 장력, 폭, 속도, 크라운 등을 적정 기준치를 따라가도록 제어가 수행되고 있으며, 이들 제어 중 속도제어기와 루퍼 제어기의 유기적인 제어를 통하여 사상압연중의 폭 제어를 수행하고 있다. 그러나 선단부에서의 정확한 Massflow 일치의 어려움과 과장력 등으로 인하여 폭이 줄어드는 폭 불량 현상이 종종 발생하고 있다. 사상압연기의 각 스탠드 사이에 위치한 루퍼

는 압연 스탠드간 스트립에 적절한 일정 장력을 유지하여 판 폭과 판 두께의 변동이 없게 하고, 각 스탠드에서 발생하는 압연 현상을 분리시켜 판 두께제어의 효과를 높이는 역할을 한다.

종래의 루퍼제어는 스트립의 장력변동이 루퍼에 가해주는 토크로 인해 루퍼의 위치를 변화시키고 이 변화된 루퍼의 위치를 검출해서 루퍼의 위치와 스트립의 장력을 제어하는 충분치 못한 제어계로 되어있다.

이런 종래 제어계는 특히, 루퍼의 위치 또는 장력의 변화와 같은 동적 요소에 불안정하였다. 그리하여 보다 나은 루퍼 제어를 위해 루퍼의 위치뿐 아니라 스탠드간의 장력 또한 검출하여 루퍼의 위치제어를 통한 루퍼 구동 토크 제어, 장력제어를 통한 스탠드 속도 제어를 실시한다. 본 논문에서는 제어기 설계에 앞서 루퍼시스템의 모델링을 수행하였고, 이 모델을 대상으로 LQG/LTR 제어기 설계 및 적응 제어기법(adaptive control)중의 하나인 게인 스케줄링(Gain-Scheduling) 기법을 적용하였다.

2. 열연 시스템 모델

열간압연의 사상압연공정은 7개의 압연 스탠드와 압연 스탠드사이에 6개의 루퍼로 이루어져 있다. 각 스탠드의 워크 롤(Work Roll)은 속도제어기(ASR)로부터 속도 제어가 이루어지는 메인 모터로 구동되어지고, 루퍼는 2개의 인접한 압연 스탠드 사이에 설치되어 압연기의 속도 및 압하율의 변동에 기인한 압연재의 장력 변동을 완화시키기 위해 설치되어 있다. 즉, 루퍼의 설치요인은 양단 스탠드의 속도 편차에 의해서 발생된 스탠드간의 장력을 일정하게 유지시켜서 안정된 압연작업을 수행할 수 있게 하는 것이다.

2.1 스트립 장력 모델링

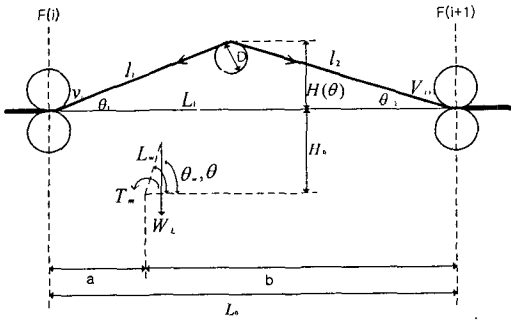


그림.1 Looper geometry

그림. 1 은 7개의 스텐드중 임의의 두 스텐드를 묘사한 것으로 그 사이에는 루퍼가 위치하고 있으며, 스트립의 기하학적인 형태는 직선으로 근사화 되어져있다. 여기서 스트립 장력은 탄성계수와 길이 방향 신장량의 비례 관계로 주어지고, 스트립이 i단을 떠나는 속도(v_i)와 i+1단으로 들어가는 속도(V_{i+1})의 차로 발생하는 양단의 Massflow 변동으로 장력이 발생하게 된다.

따라서, 장력 t_f 는

$$t_f = \frac{E}{L_s} [L(\theta) - L_s] \quad (2.1)$$

여기서,

$$L_s = (L_0 + \int_{t_0}^t (v_i - V_{i+1}) dt) \quad (2.2)$$

$$L(\theta) = l_1 + l_2$$

$$l_1 = [(r - H_0 + L_1 \cdot \sin \theta)^2 + (a + L_1 \cdot \cos \theta)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$l_2 = [(r - H_0 + L_1 \cdot \sin \theta)^2 + (L_0 - a - L_1 \cdot \cos \theta)^2]^{\frac{1}{2}}$$

2.2 루퍼모터 모델링

뉴턴의 제 2 법칙을 적용하기 위해 관성력 J_m 을 가지는 루퍼모터에 대해 루퍼에 걸리는 부하를 고려한다.

$$J_m \ddot{\theta}_m = T_m - \frac{1}{G_r} \cdot T_{load} \quad (2.3)$$

여기서 루퍼모터에 걸리는 부하토크 T_{load} 는

$$T_{load} = T_i + T_s + T_{LW} \quad (2.4)$$

여기서,

$$T_i = t_f \cdot w \cdot h [L_1 \cdot \cos \theta \cdot f_1(\theta) + (L_1 + \sin \theta + r) \cdot f_2(\theta)]$$

$$f_1(\theta) = (r + L_1 \cdot \sin \theta - y) \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right)$$

$$f_2(\theta) = \left(\frac{L_0 - a - L_1 \cdot \cos \theta}{l_2} - \frac{a + L_1 \cdot \cos \theta}{l_2} \right)$$

$$T_s = L_1 \cdot g \cdot \rho \cdot w \cdot h \cdot (l_1 + l_2) \cdot \cos \theta$$

$$T_{LW} = L_1 \cdot g \cdot M_r \cdot \cos \theta + \frac{1}{2} \cdot g \cdot M_r \cdot \cos \theta$$

2.3 선형화

제어기 설계를 위해 유도된 비선형 모델을 장력과 각도의 동작점(8.6N/mm, 15°)에서 테일러 선형화를 수행하였다. 여기서 장력은 i단과 i+1단사이의 상대속도 차이에 의존한다. 그리고 i+1단의 롤 속도는 일정하고, i+1단으로 들어가는 스트립의 속도는 장력에 의해 변하게 된다.

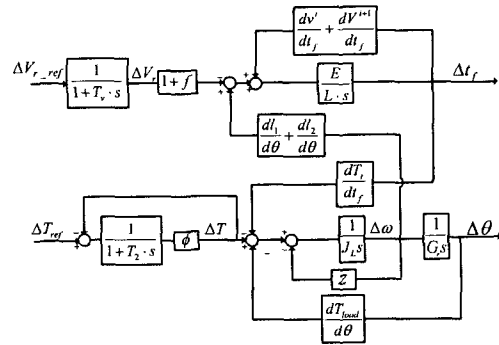


그림.2 Linearized looper system

그림. 3에서 $K_{10} = \frac{dv^i}{dt_f} + \frac{dV^{i+1}}{dt_f}$ 로서 v^i 는 장

력과 롤속도에 의한 변화, V^{i+1} 은 장력에 의한 변화만을 고려한다. 위 루퍼 시스템의 블록에서는 모든 변수들이 동작점 근처에서 작은 변화량을 가짐에 따라 선형화를 수행할 수가 있다.

선형화된 시스템의 상태공간 모델식은 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.5)$$

$$y = Cx$$

여기서,

$$x = [\Delta t_f, \Delta \theta, \Delta \omega, \Delta T_r, \Delta V_r]^T$$

$$y = [\Delta t_f, \Delta \theta]^T$$

$$u = [\Delta V_{r,ref}, \Delta T_{ref}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{EK_{10}}{L} & 0 & -\frac{EF_2}{L} & 0 & -\frac{E(1+\rho)}{L} \\ 0 & 0 & \frac{1}{gL} & 0 & 0 \\ -\frac{F_3}{J} & -\frac{F_1}{J} & -\frac{z}{J} & \frac{1}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{(1+K_3\phi)}{T_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_v} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{(1+K_3\phi)}{T_2} \\ \frac{1}{T_v} & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_1 = \frac{dT_{load}}{d\theta}, F_2 = \frac{dl_1}{d\theta} + \frac{dl_1}{dt}, F_3 = \frac{dT_l}{dt}$$

3. 제어기 설계

3.1 종래 PI 제어

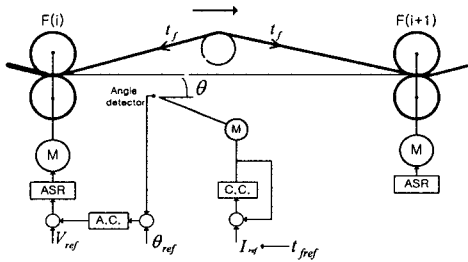


그림.3 Conventional looper control system

종래의 제어 방법은 밀의 속도를 제어하는 PI 제어기로 루퍼각도를 목표각도와 장력을 제어하는 기법으로 설계되어 있다. 즉 장력을 제어하기 위해 필요한 장력의 측정치를 알 수 없기 때문에 각도를 궤환하여 이 각도의 정보로부터 얻은 토크 계산 값을 이용해 루퍼모터의 토크 명령어로 사용한다. 이러한 이유로 인해 제어시스템은 장력과 루퍼 각도 사이의 상호간섭 현상을 일으키고, 이 간섭 현상은 루퍼 제어 시스템에 있어서 나쁜 응답을 가지도록 한다.

3.2 Cross 제어

Cross 제어기법은 종래제어기법의 문제점인 장력과 루퍼 각도의 상호 간섭을 줄이기 위하여 cross 계인을 추가하여 상호 간섭효과를 줄이고, 각도와 계산된 장력값을 피드백하여 루퍼의 각도와 장력을 서로 독립적으로 제어를 수행한다.

이를 위해 그림. 4의 블록 선도에서는 장력기준치와 장력 피드백 값을 사용하여 장력제어(LTC)

를 PI방식으로 설계하고, 각도 보상량은 루퍼의 높이제어기(LHC)에서 PI방식으로 개별적으로 수행되어지고 있다.

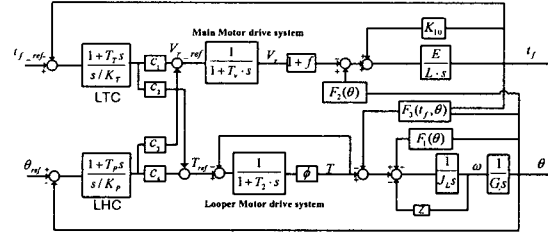


그림.4 Block diagram of cross controller

또 간섭 효과를 줄이기 위하여 cross gain을 추가하여 보상한다. 장력제어는 인접 스탠드의 압연률 속도 기준치(V_r)와 높이 제어에서 루퍼 토오크 기준치(τ_m)가 상호 밀접한 관련이 있지만, 장력 및 높이 제어기만으로는 토크의 변화가 스탠드간 장력으로, 롤 속도 변화가 루퍼 위치로 나타나는 외란을 피할 수 없다.

3.3 LQG/LTR 제어

LQG/LTR 설계방법을 적용하기 위해 적분요소를 첨가한 설계플랜트모델의 상태공간 모델식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Lw(t) \\ y(t) &= Cx(t) + v(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

여기서,

$$x(t) = \begin{bmatrix} \theta \\ I_d \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_p & A_p \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \ C_p]$$

LQG/LTR 설계절차는 다음과 같이 크게 두 단계로 이루어진다.

단계 1 : 요구되어지는 성능과 안정도 강인성을 만족하도록 목표필터루프(Target filter loop:TFL)를 설계한다.

$$G_F(s) = C\Phi(s)B, \quad \Phi(s) = (sI - A)^{-1}$$

$$H = \frac{1}{\mu} PC^T \quad (3.2)$$

행렬 P는 필터대수 Riccati식으로부터 구한다.

$$AP + PA^T + LL^T - \frac{1}{\mu} PC^T CP = 0 \quad (3.3)$$

$$L = \begin{bmatrix} A_p^{-1} B_p^{-1} \\ \rho^T (C_p C_p^T)^{-1} \end{bmatrix}$$

단계 2 : 루프전달회복(LTR) 절차를 통하여 시

시스템을 TFL로 회복시키는 보상기를 설계한다.

가중행렬을 다음과 같이 선정하면,

$$Q = C^T C, R = \rho I \quad (3.4)$$

제어게인행렬 G는 다음과 같이 구해진다.

$$G = \frac{1}{\rho} B^T K \quad (3.5)$$

$$KA + A^T + C^T C - \frac{1}{\rho} KBB^T K = 0 \quad (3.6)$$

본 연구에서는 $\rho = 0.00000001$ 을 사용하였다.

3.4 Gain Scheduling

선형화에 의한 제어기 설계의 주요 단점은 선형시스템에서의 제어기 설계가 동작점을 벗어나면 시스템의 안정성과 성능을 보장할 수 없다는 것이다. 이를 보완하기 위한 한가지 방법으로서 각 동작영역을 제한하지 않도록 궤적을 따라 선형화를 수행하는 것이다. 하지만 이러한 궤적은 제어기설계를 위해 미리 알려져 있어야만 하는데, 종종 그렇지 못한 경우가 많다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 하나의 설계기법으로 게인 스케줄링(Gain Scheduling)기법이 다양한 공학적인 응용 분야에 적용되어지고 있다. 게인 스케줄링 기법의 주요 설계절차는 다음의 두가지로 나눌 수 있다.

첫째는 몇 개의 다른 operating conditions에서 비선형 플랜트의 선형화를 기초로 각각에 대한 선형제어기들을 설계.

둘째는 비선형 플랜트를 위한 비선형 제어기는 각각의 동작점(operating point) 근처에서 설계된 제어기 게인들을 스케줄링(scheduling) 또는 보간(interpolating)을 수행함으로써 얻어진다.

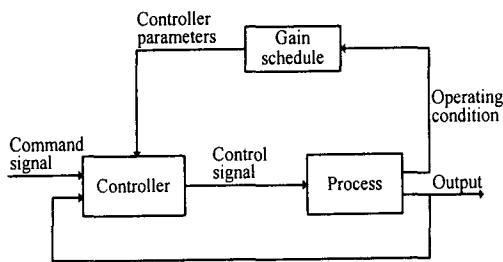


그림5 Block diagram of a system with gain scheduling

루퍼 시스템의 상태방정식은 다음으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\theta(t))x(t) + B(\theta(t))u(t) \\ y(t) &= C(\theta(t))x(t) \end{aligned} \quad (3.7)$$

본 시스템의 측정 가능한 출력인 루퍼각도(θ)

를 스케줄링 변수로 선정하고, 6, 14, 18, 30, 와 52. 에 대한 선형화 과정을 수행하여 각각의 동작점에서 LQG/LTR 제어기 설계기법을 적용하였다. 이렇게 설계된 파라미터 값들을 비선형 제어시스템에 선형적으로 보간(interpolating)을 시켜줌으로써 비선형 루퍼 시스템의 제어를 수행하였다.

4. 시뮬레이션 결과

설계된 제어기의 시간응답을 보기 위해 시뮬레이션 조건으로 대상 스탠드를 5단으로 선정하고, 장력 기준치는 $8.6 N/mm^2$, 루퍼 각도 기준치는 18. ($0.3142rad$)로 matlab을 이용한 시뮬레이션 결과들이 아래에서 보여지고 있다.

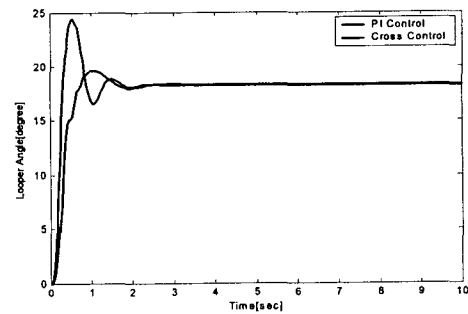
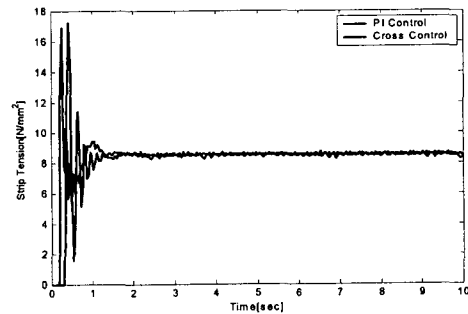
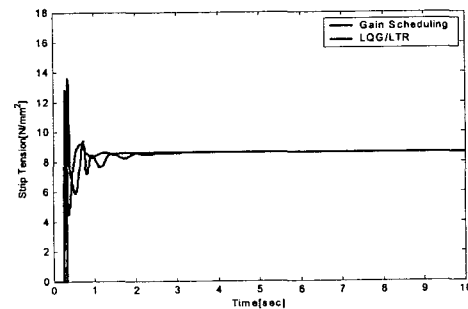


그림.6 Conventional PI and cross control



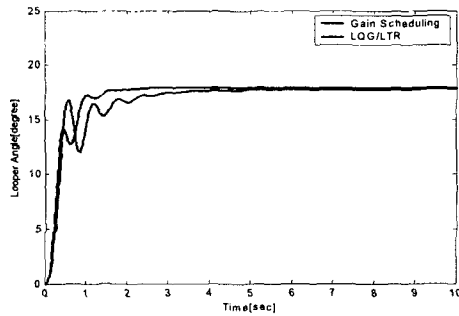


그림.7 LQG/LTR control and Gain-Scheduling

5. 결론

본 연구에서는 열간 사상압연공정에서의 압연 판폭 제어를 수행하기 위하여 압연시 판폭 불량 현상을 최소화하기 위한 모델링을 수행하였으며, 종래 제어기법인 PI제어의 문제점을 개선하기 위해 장력 제어기와 루퍼 높이제어를 설계하였다. 또한 장력의 피드백 값을 이용해 cross 제어와 LQG/LTR 제어기법 및 게인 스케줄링 (Gain-Scheduling)기법을 루퍼 시스템에 적용하였다. 적용된 제어기법의 성능을 분석하기 위해 Matlab을 이용한 시뮬레이션을 통해서 종래 PI 기법보다 cross 제어기법 적용시 장력의 변동을 감소시킨 반면에 각도의 변동은 보다 심하게 나타났다. LQG/LTR 제어에서는 앞의 두 제어기보다 장력의 변동을 현격히 줄여주었고, 게인 스케줄링 기법의 적용시에는 장력과 각도의 변동과 오버슈트가 가장 줄어들음을 알 수가 있었다.

참고문헌

[1]Yoshiharu Anbe, Kunio Seikiguchi and Hiroyuki Imanari, "Tension control of a hot strip mill finisher," *IFAC 13th Triennial World Congress*, pp. 439-444, 1996.
 [2]H.Imanari, Y. Morimatsu, K. Sekiguchi, H. Ezure, R. Matuoka, A. Tokuda, and H. Otobe, "Looper H-infinity control for hot strip mills," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 4, pp. 790-796, May/June, 1997.
 [3]T. Hesketh, Y. A. Jiang, D. J. climents, D. H. Butler, and R.van der Laan, "Controller design for hot strip finishing mills," *IEEE Trans. on Control System Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 208-219, March, 1998.

[4]G. Hearn, M. R. Katebi, and M. J. Grimble, "Robust control of a hot strip mill looper," *IFAC 13th Triennial World Congress*, pp. 445-450, 1996.
 [5]M. Okada, Y. Iwasaki, K. Murayama, A. Urano, A. Kawano, H. Shiomi, "Optimal control of looper in hot strip mill", *Trans. Inst. Elec.Eng.Japan*, 1988
 [6]J. C. Price, "The hot strip mill looper system," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 27, pp.556-562, 1973.
 [7]G. Hearn, M. J. Grimble, "Multivariable Control of a Hot Strip Finishing Mill," *Proceedings of the American Control Conference Albuquerque, New Mexico*, pp. 3775-3779, June 1997.
 [8]Jeff S. Shamma and Michael Athans, "Gain Scheduling: Potential Hazards and Possible Remedies," *IEEE Control Systems*, pp. 101-107, June 1992.
 [9]Karl Johan Astrom and Bjorn Wittenmark, *Adaptive Control, New York, Addison-Wesley Publishing Company*, 1995