

안정 적응 퍼지 제어를 이용한 박판 주조 공정에서의 용강 높이 제어

주문갑, 이대성, 김윤하
포항산업과학연구원 S/C 프로젝트팀

Molten steel level control of strip casting process using stable adaptive fuzzy control scheme

Moon G. Joo, D. S. Lee, and Y. H. Kim
RIST, S/C project team

Abstract - An adaptive fuzzy logic controller to regulate molten steel level in the strip casting process is presented, where parameters of fuzzy controllers are adapted stably by using Lyapunov-stability theory and a switching controller is used together to deal with the approximation error of fuzzy logic system. The level error is proven to converge to zero asymptotically.

In the simulation, the clogging/unclogging of a stopper nozzle is considered and overcome by the proposed controller. Robustness to uncertainty is shown to be superior to conventional PI controller.

1. 서 론

박판 주조 공정(Strip casting)은 용강을 회전하는 두 롤(roll) 사이에 주입하고, 그 사이에서 용강의 응고 및 압착 과정을 거쳐 두께 2~4mm의 박판을 생산해내는 기술이다. 원래는 19세기 Henry Bessemer에 의하여 제안되었고 당시에는 구현되지 못하였으나, 10여년 전부터 한국, 일본, 유럽 및 호주의 철강 선두 기업들에서 활발하게 연구되고 있다. 이 공정은 기존의 열연 과정을 거치지 않고 박판을 생산해낼 수 있기 때문에 많은 경제적인 이점을 가진다.

박판 주조 공정[1]에서 롤 사이의 용강 높이를 일정하게 유지하는 것은 매우 중요한데, 만약 용강이 넘치게 되면 설비를 쓸 수 없게 되고, 용강 높이가 너무 낮으면 주조 공정이 중지되며, 일정 범위 이상의 흔들림(fluctuation)은 생산된 박판에 흠(crack, skull)과 같은 품질의 저하를 가져오기 때문이다. 본 논문에서는 용강의 높이를 제어하기 위하여 적응 퍼지 제어 기법을 사용하며, 공정 중 발생하는 외란을 효과적으로 상쇄하고 오버슈트없이 제어하는 것을 목표로 한다.[2]

2. 본 론

2.1 용강 높이 시스템의 수식 모델

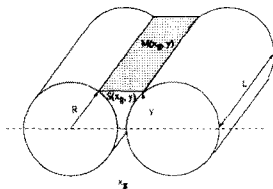


그림 1 용강 높이 시스템

그림 1과 같은 박판 주조 공정의 용강 높이 시스템은 다음의 식으로 표현된다.[3]

$$\dot{y} = \frac{1}{M(x_g, y)} (Q_{in} - Q_{out}),$$

$$M(x_g, y) = L(x_g + 2R - 2\sqrt{R^2 - y^2}),$$

여기에서 Q_{in} 은 롤 사이에 주입되는 유량, Q_{out} 은 롤에서 빠져나오는 유량, x_g 는 롤 갭(roll gap), y 는 용강 높이, L 은 롤 실린더의 길이, R 은 롤의 반지름이다.

Q_{in} 은 스톱퍼(stopper) 시스템으로 제어되는데, 동작점 부근에서 대략적으로 $Q_{in} = a(t)h$ 으로 가정할 수 있다. 여기서 h 는 스톱퍼의 개공 위치, $a(t)$ 는 스톱퍼 노즐, 턴디쉬(tundish) 내의 용강 높이, 용강의 점성, 막힘 현상(clogging/unclogging) 등에 따라 달라지는 스톱퍼의 유량비(m^2/s)를 나타낸다. Q_{out} 은 $Lx_g v_r$ 로 나타낼 수 있다.

2.2 안정 적응 퍼지 제어

용강 높이 시스템을 다음과 같이 정리하자.

$$\dot{y} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{M} = \frac{a}{M} h - \frac{Lx_g v_r}{M}$$

$$= fLx_g v_r + gh \tag{1}$$

$$f(x_g, y) = \frac{-1}{M(x_g, y)} < 0,$$

$$g(x_g, y) = \frac{a}{M(x_g, y)} > 0.$$

시스템에 대한 모델링 및 실험을 통한 사전 지식으로 $M(x_g, y)$, $a(t)$ 에 대하여 대략의 $M_m(x_g, y)$ 과 a_m 을 알고 있다고 가정하면 위 식으로부터 f_m, g_m 을 구현할 수 있으며, 제어기는 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$h = u_c + u_s \tag{2}$$

여기에서 u_c 는 certainty equivalent 제어기로서 다음의 식과 같이 나타낸다.

$$u_c = \frac{-f_m Lx_g v_r - \widehat{\Delta f} Lx_g v_r + \dot{y}_d + Ke}{g_m + \widehat{\Delta g}}$$

$$f_m = \frac{-1}{M_m},$$

$$g_m = \frac{a_m}{M_m},$$

$$\Delta f = f - f_m,$$

$$\Delta g = g - g_m.$$

만약 f_m, g_m 이 정확하게 f, g 와 같다면 이 제어기만으로도 용강 높이 오차를 0으로 수렴시킬 수 있는 제어기인데, 그 오차를 두 개의 퍼지 시스템이 상쇄하도록 적응 퍼지 제어기를 구성하게 된다. u_s 는 퍼지 로직 시스템을 사용할 때 수반되는 근사 오차를 처리하기 위한 스위칭 제어기인데, 추후 표시한다.

적응 퍼지 제어기 (2)를 (1)에 대입하면 시스템의 전체식은 다음과 같이 쓸 수 있고

$$\dot{y} = f Lx_g v_r + g u_s + \frac{g}{g_m + \widehat{\Delta g}} (-f_m Lx_g v_r - \widehat{\Delta f} Lx_g v_r + \dot{y}_d + Ke)$$

$$= -\widehat{\Delta f} Lx_g v_r + \dot{y}_d + Ke - \widehat{\Delta g} u_c + g u_s,$$

위 식에서 오차식은 다음과 같이 구해진다.

$$\dot{e} = -Ke + \widehat{\Delta f} Lx_g v_r + \widehat{\Delta g} u_c - g u_s, \quad (3)$$

$$\widehat{\Delta f} = \frac{\Delta f}{\Delta g} - \Delta f,$$

$$\widehat{\Delta g} = \frac{\Delta g}{\Delta g} - \Delta g.$$

$\Delta f, \Delta g$ 를 찾아내기 위하여 퍼지 시스템을 사용하는데, singleton fuzzifier, center average defuzzifier, product inference를 이용한 퍼지 시스템의 출력은 후건부 출력의 벡터 $\theta_{\Delta f}, \theta_{\Delta g}$ 와 기저 함수(basis function) ξ, ζ 를 이용하여 다음과 같은 형식으로 쓸 수 있다[4].

$$\widehat{\Delta f} = \frac{\theta_{\Delta f}^T \xi(x_g, y)}{\theta_{\Delta g}^T \zeta(x_g, y)},$$

$$\widehat{\Delta g} = \frac{\theta_{\Delta g}^T \zeta(x_g, y)}{\theta_{\Delta g}^T \zeta(x_g, y)},$$

$$\widehat{\Delta f}^* = \frac{\theta_{\Delta f}^{*T} \xi(x_g, y)}{\theta_{\Delta g}^{*T} \zeta(x_g, y)},$$

$$\widehat{\Delta g}^* = \frac{\theta_{\Delta g}^{*T} \zeta(x_g, y)}{\theta_{\Delta g}^{*T} \zeta(x_g, y)}.$$

여기서 $\widehat{\Delta f}^*, \widehat{\Delta g}^*$ 는 아래의 값을 최소화하는 최적의 퍼지 시스템을 나타낸다.

$$\sup_{(x_g, y)} |(\widehat{\Delta f}^* - \Delta f) Lx_g v_r + (\widehat{\Delta g}^* - \Delta g) u_c|$$

위 식을 이용하여 시스템의 오차식 (3)을 다시 쓰면 다음과 같고,

$$\dot{e} = -Ke + (\widehat{\Delta f} - \widehat{\Delta f}^* + \widehat{\Delta f}^* - \Delta f) Lx_g v_r + (\widehat{\Delta g} - \widehat{\Delta g}^* + \widehat{\Delta g}^* - \Delta g) u_c - g u_s$$

$$= -Ke + \theta_{\Delta f}^T \xi Lx_g v_r + \theta_{\Delta g}^T \zeta u_c - g u_s + \omega \quad (4)$$

여기에서

$$\theta_{\Delta f} = \theta_{\Delta f} - \theta_{\Delta f}^*,$$

$$\theta_{\Delta g} = \theta_{\Delta g} - \theta_{\Delta g}^*,$$

$$\omega = (\widehat{\Delta f}^* - \Delta f) Lx_g v_r + (\widehat{\Delta g}^* - \Delta g) u_c,$$

이다.

이 때 $\Delta f, \Delta g$ 의 후건부 벡터인 $\theta_{\Delta f}, \theta_{\Delta g}$ 를 시스템이 안정되는 방향으로 변화시키기 위하여 리아푸노프 함수

를 다음과 같이 놓고

$$V = \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2\gamma_{\Delta f}} \phi_{\Delta f}^T \phi_{\Delta f} + \frac{1}{2\gamma_{\Delta g}} \phi_{\Delta g}^T \phi_{\Delta g}$$

오차식 (4)을 이용하여 전개하면 다음과 같다.

$$\dot{V} = e(-Ke + \theta_{\Delta f}^T \xi Lx_g v_r + \theta_{\Delta g}^T \zeta u_c - g u_s + \omega) + \frac{1}{\gamma_{\Delta f}} \phi_{\Delta f}^T \dot{\phi}_{\Delta f} + \frac{1}{\gamma_{\Delta g}} \phi_{\Delta g}^T \dot{\phi}_{\Delta g}$$

$$= -Ke^2 + \frac{1}{\gamma_{\Delta f}} \phi_{\Delta f}^T (\gamma_{\Delta f} e Lx_g v_r \xi + \dot{\phi}_{\Delta f}) + \frac{1}{\gamma_{\Delta g}} \phi_{\Delta g}^T (\gamma_{\Delta g} e u_c \zeta + \dot{\phi}_{\Delta g}) - eg(u_s - \frac{\omega}{g}).$$

그러므로 퍼지 시스템의 후건부 수정량을 다음과 같이 설정하고

$$\dot{\theta}_{\Delta f} = \dot{\phi}_{\Delta f} = -\gamma_{\Delta f} e Lx_g v_r \xi,$$

$$\dot{\theta}_{\Delta g} = \dot{\phi}_{\Delta g} = -\gamma_{\Delta g} e u_c \zeta,$$

$g > 0$ 라는 사실을 이용하여 스위칭 제어기를 다음과 같이 정하면

$$u_s = \text{sgn}(eg) \frac{|u|U}{g_L} = \text{sgn}(eg)x = \text{sgn}(e)x,$$

$$x = \frac{|u|U}{g_L},$$

$\dot{V} \leq -Ke^2$ 의 결과를 얻는다.

여기서 $V(t) \leq V(0)$ 이므로 $e, \phi_{\Delta f}, \phi_{\Delta g} \in L_\infty$ 이다. 또한

$$-\int_{t_0}^{\infty} \dot{V} dt = V(t_0) - V(\infty) < \infty \text{이므로, } \int_{t_0}^{\infty} Ke^2 < \infty$$

이고, 이것은 $e \in L_2$ 를 의미한다. 오차식 (4)로부터 $e \in L_\infty$ 임을 알 수 있고, 결국 Barbalat의 정리에 의하여 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $e \rightarrow 0$ 임이 증명된다.

1996년 발표된 논문[3]에서는 박판 주조 공정의 용강 높이를 제어하기 위하여 적응 퍼지 제어 기법이 사용되었는데, 본 논문에서는 퍼지 시스템의 수정량이 [3]에서처럼 e^2 에 비례하는 것이 아니라 e 에 비례하며, 주조 초기에 용강의 목표 궤적 y 를 포함시켜 오버슈트를 없앤 것으로 개선되었다. 또한 시뮬레이션에서 보듯이 스톱퍼 유량비의 변화가 고려되었다.

2.3 시뮬레이션

포항제철의 박판 주조기의 물 반지름과 길이는 0.65m와 1.35m이다. 용강의 적정 높이는 0.45m인데, 용강의 높이는 0에서 0.040m의 개공 위치와 최고 0.02m/s의 속도를 가진 스톱퍼 시스템으로 제어된다. 시뮬레이션에서는 용강 높이의 목표 궤적은 $M_f(s) = \frac{0.2}{s+0.2}$ 을 사용하여

여 설정하였고, 스톱퍼의 전달함수는 $M_s(s) = \frac{10}{s+10}$ 으로 가정하였다. 물의 선속도와 물 잼의 데이터는 다음 그림 2, 3과 같은 실제 주조 데이터를 사용하였고, 실제 측정 불가능한 스톱퍼 유량비의 변화 $a(t)$ 는 다음 그림 4와 같이 가정하였다.

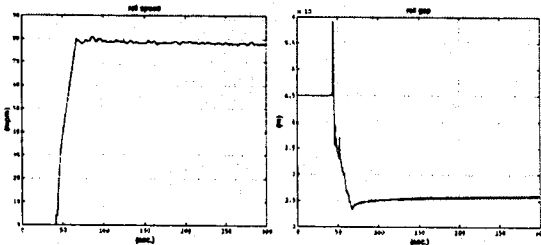


그림 2 롤 선속도.

그림 3 롤 갭.

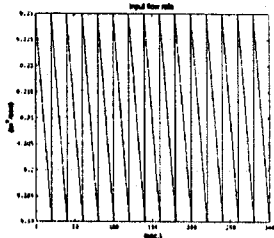


그림 4 $a(t)$ 의 변화.

비례 상수와 적분 상수를 각각 0.19, 0.004로 설정한 PI 제어기를 이용한 시뮬레이션 결과는 다음 그림 5, 6과 같다. 공정의 특성상, 용강이 0.39m에 도달하기까지는 스톱퍼의 개공 위치를 최대로 유지하여 빠른 시간 내에 용강이 유입될 수 있게 하고, 그 이후에 제어가 동작한다. PI 제어기에서는 용강의 유입량과 출도량이 같아질 때의 개공 위치로 추정되는 0.021m의 값이 제어기의 출력에 합산되었다. 그림 5, 6에서 보듯이 적분기에 의하여 정상 상태 오차는 극복되지만 $a(t)$ 의 변화에 의하여 여전히 용강 높이가 흔들리고 있음을 알 수 있다.

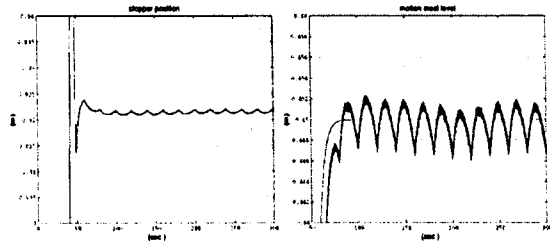


그림 5 스톱퍼 개공 위치 (PI 제어기)

그림 6 용강 높이 (PI 제어기)

적응 퍼지 제어기를 구성하기 위하여 먼저 모델링이나 실험을 통하여 $M_m(x_g, y) = 0.7M(x_g, y)$, $a_m = 0.2$ 정도라고 알고있다고 가정하자. 롤 갭과 용강 높이에 따른 소속 함수는 다음 그림과 같이 설정한다. 적응 퍼지 제어기 내의 두 개의 퍼지 제어기 Δf 과 Δg 는 각각 $(-1/M + 1/M_m)$ 와 $(a/M - a_m/M_m)$ 를 모사하게 될 것이다.

그림 7, 8은 롤 갭과 용강 높이에 대한 퍼지 시스템의 소속 함수를 나타낸다. 각각의 퍼지 시스템에서 퍼지 규칙의 수는 25개씩이고, 제어기 수식의 K는 1로 설정하였다. 적응 계수 $\gamma_{\Delta f}$ 와 $\gamma_{\Delta g}$ 는 각각 0.1로 설정하였다. 스위칭 제어기의 x 는 Δf , Δg 와 연관되어 퍼지 시스템의 모델링 오차의 최대값 ω^U 을 예측하기 어려우므로 시행 착오를 거쳐 0.005로 설정되었다.

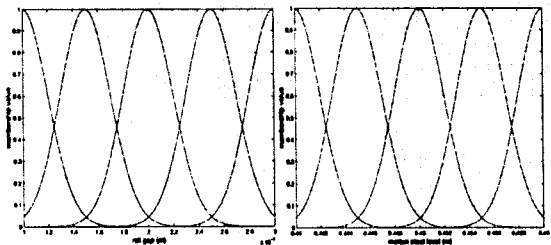


그림 7 roll gap 소속함수 그림 8 용강높이 소속함수

적응 퍼지 제어기를 이용하여 용강 높이를 제어한 결과는 다음 그림 9, 10과 같다. 초기 상태에서 용강의 오버슈트를 억제하고, 정상 상태 오차가 0으로 수렴할 뿐만 아니라 $a(t)$ 의 변화도 효과적으로 극복함을 확인할 수 있다.

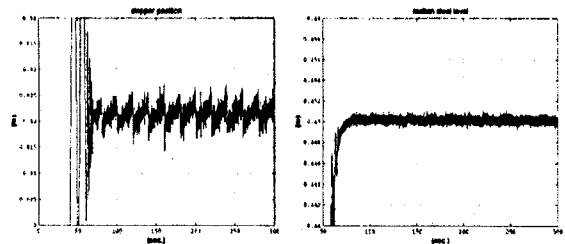


그림 9 스톱퍼 개공 위치 (적응퍼지제어기)

그림 10 용강 높이 (적응퍼지 제어기)

3. 결 론

박관 주조 공정에서 용강 높이를 제어하기 위하여 적응 퍼지 기법을 사용하였다. 적응 퍼지 제어기는 리야푸노프 이론에 의하여 전체 시스템이 안정된 방향으로 후건부 변수를 변화시키는 퍼지 시스템과 퍼지 시스템의 이론적 근사 오차를 상쇄시키는 스위칭 제어기로 구성되었다. 시뮬레이션에서는 스톱퍼 노출의 막힘 현상을 포함시키고, 초기 상태의 목표 계적을 설정함으로써 오버슈트없이 목표 높이에 도달함을 보였으며, 기존의 PI 제어기보다 그 성능이 우수함을 보였다.

[참 고 문 헌]

[1] Y. H. Kim, D. S. Lee, M. G. Joo, and K. N. Paek, "POSCO's twin-roll strip caster and its control," IASTED int. conf. ASC2000, Jul. 2000, Canada.

[2] Moon G. Joo, Yoon H. Kim, and T. Kang, "Molten steel level control of strip casting process using stable adaptive fuzzy control scheme," Proc. of the IASTED int. conf. on modeling, identification, and control, pp. 263-267, Feb. 2001, Innsbruck, Austria.

[3] Duk Man Lee, Jin S. Lee, and Taewook Kang, "Adaptive fuzzy control of molten steel level in strip-casting process," Control engineering practice, IFAC, Control Eng. Practice, vol. 4, No. 11, 1996, pp. 1511-1520.

[4] Li-Xin Wang, "Adaptive Fuzzy Systems and Control," Englewood Cliffs, New Jersey:Prentice-Hall, 1994.