

연속 주조의 용강 높이 제어를 위한 퍼지-Pi 제어기

Fuzzy-Pi controller for molten steel level of continuous casting process

주문갑* · 김도응** · 김호경** · 김종민**

Moon G. Joo, Do E. Kim, Ho K. Kim, and Jong M. Kim

* 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부

** 포스코특수강(주)

요 약

본 논문은 연속 주조 공정에서의 용강 높이에 대한 수학적인 비선형모델을 유도하는데, 여기에는 용강 높이, 몰드내의 입출력 유량, 스토퍼의 위치와 입력유량의 관계 등이 고려되었다. 비선형 모델은 MATLAB을 사용하여 구현되었으며 실제 데이터와 비교하여 수학적 모델이 유효함을 확인하였다.

구현된 비선형 모델을 사용하여, 퍼지 시스템에 의하여 변화하는 K_p 값을 가지는 퍼지 PI 제어기를 사용하여, 기존에 사용되던 PI 제어기보다 나은 제어 성능 및 외란에의 강인성을 가짐을 시뮬레이션으로 보였다.

키워드 : 연속 주조 모델링, 용강 높이 제어, 퍼지-Pi 제어기

Abstract

A mathematical model of molten steel level for continuous casting process is presented, where the molten steel level, input and output flow in the mold, the relation between stopper position and input flow etc. are considered. The mathematical model is implemented and simulated by using MATLAB. Comparing the result of molten steel level from the simulator with that of real plant, the performance of the model is shown to be reasonable.

By using this simulator, it is shown that PI controller with variable P gain, adjusted by fuzzy logic system, has better control result than conventional PI controller.

Key Words : Continuous casting modeling, Molten steel level control, Fuzzy-Pi controller

1. 서 론

현재의 제철 공정은, 연속 주조 공정을 통하여 용강을 몰드에 부어 냉각시키는 동시에 일정한 형태로 뽑아내고, 곧바로 이어지는 압연 과정을 통하여 철관 및 철강 제품을 연속적으로 생산하고 있다. 최근에는 압연 과정을 생략하여 롤 사이에서 용강을 냉각시키면서 바로 2-3mm의 철관을 생산해내는 박판 주조 공정으로까지 변화되고 있다.

연속 주조 공정 및 박판 주조 공정에서, 몰드 내에서의 용강의 높이는 제품의 품질에 중요한 영향을 미치는데, 몰드 내 용강의 높이가 일정한 높이로 유지되어야 균일한 성질의 철관을 생산해낼 수 있다.

연속 주조를 위한 몰드 내 용강 높이 제어와 관련하여, 기존의 PID 제어 외에도, 연속 주조 공정에서 몰드 내 용강 높이를 제어하기 위한 PID 예측 제어 [1], PID 및 퍼지 제어기의 혼합 제어 [2][3][4], 퍼지 제어기[5]가 보고되었고, 박판 주조 공정에서도 몰드 내 용강 높이를 제어하기 위한 적응 퍼지 제어기[6][7] 등이 보고되어 그 중요성을 잘 알

수 있다.

한편, 철강 공정의 특성상 제어기의 변경이나 파라미터의 조정을 위하여는 안전 확보와 막대한 실험 비용이 필요하기 때문에, 이를 위하여 수학적 시뮬레이터를 유도하는 것이 필요한데 몰드 내 용강 높이 제어의 경우도 그러하다.

현재 널리 사용되는 PID 제어기의 경우, 주조 초기에는 용강이 빨리 차오르도록 하고, 안정기에는 외란의 영향을 줄이기 위한 방법으로, 단일 계인을 사용하기 보다는 용강 높이 및 주조 시간, 그 외의 요인에 따라 계인을 변화시키는 방법을 쓴다.

본 논문에서는 PI 제어기의 계인을 변화시키기 위하여 퍼지 시스템을 사용하였다. 먼저 연속 주조 공정에서의 몰드 내 용강 높이 모델링 과정을 상세히 설명하고, 실제 데이터와 비교하여 모델의 유효성을 확인한 후, 이를 바탕으로 기존의 PI 제어기와 제안된 가변 P 계인의 PI 제어기의 제어 결과를 시뮬레이션을 통하여 보인다.

2. 연속 주조의 용강 높이의 모델링

2.1 용강 높이의 동특성 방정식

연속 주조 공정에서 용강은 그림 1에서 보여지는 바와 같이, 몰드에 전달되는 용강의 유량은 스토퍼의 개공 높이

접수일자 : 2007년 11월 7일

완료일자 : 2008년 5월 19일

이 논문은 2006학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음 (PK_2006-055)

에 의해 정해지고, 용강은 침지 노즐(Submerged Entry Nozzle, SEN)을 거쳐 몰드에 유입된다.

용강은 몰드에서 냉각되어, 굳으면서 하부에 위치한 롤러에 의하여 뽑아내어지는데, 몰드 내 용강의 유입 유량과 유출 유량은, 그림 2와 같이 몰드를 간단히 직사각형으로 모델링하여 계산할 수 있다.

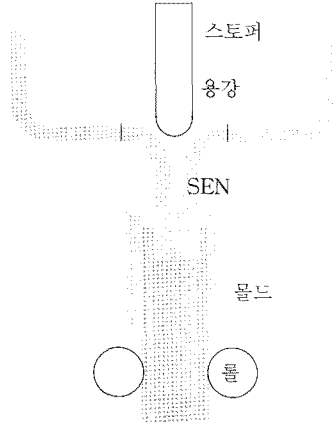


그림 1. 연속 주조 공정.
Fig. 1. Continuous casting.

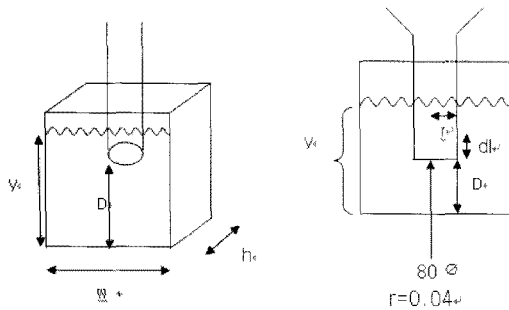


그림 2. 몰드내 용강 높이의 간략한 모델.
Fig. 2. Simplified model of molten steel in mold.

여기에서 w 는 몰드의 가로 길이, h 는 몰드의 세로 길이, y 는 용강의 몰드내 높이, D 는 침지 노즐의 몰드 바닥으로부터의 거리, r 은 용강 투입 노즐의 반지름을 의미한다.

연속 주조 공정에서는 투입된 용강이 압연 과정없이 냉각된 후 롤에 의하여 빠져나오게 되므로, 용강 높이의 변화는 단순히 입력 유량과 출력 유량에 의하여 결정될 수 있으며, 다음식과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= Q_{IN} - Q_{OUT} \\ Q_{IN} &= f(h_s) \\ Q_{OUT} &= (wh - s)v \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 Q_{IN} 은 용강의 입력 유량, Q_{OUT} 은 용강의 출력 유량, h_s 는 스토퍼의 개공 길이, s 는 몰드 형태가 직사각형이 아니라 둥근 모서리 형태로 되어있음을 감안한 면적 보정분, v 는 주조 속도를 나타낸다. 용강 입력 유량 Q_{IN} 은 스토퍼를 사용하여 조정되는데 $f(h_s)$ 는 스토퍼 개공 길이에 따른 용강의 입력 유량을 나타내는 식으로서 추후 설명된다.

$y \geq D$ 인 경우에 몰드 내에서의 용강의 부피는

$$\begin{aligned} V(y) &= (wh - s)D + \int_D^y (wh - s - r^2\pi) dl \\ &= (wh - s)D + (wh - s - r^2\pi)(y - D) \\ &= (wh - s)y - r^2\pi(y - D) \end{aligned}$$

이므로, 용강 부피의 시간에 따른 변화는

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dy} \frac{dy}{dt} = (wh - s - r^2\pi) \frac{dy}{dt}$$

로써 (1)을 사용하면 아래의 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{wh - s - r^2\pi} (f(h_s) - (wh - s)v) \quad (2)$$

그리고, $y < D$ 인 경우,

$$\begin{aligned} V(y) &= (wh - s)y \\ \frac{dV}{dt} &= \frac{dV}{dy} \frac{dy}{dt} = (wh - s) \frac{dy}{dt} \end{aligned}$$

이므로 같은 방법으로 아래와 같은 식 (3)을 얻는다.

$$\dot{y} = \frac{1}{wh - s} (f(h_s) - (wh - s)v) \quad (3)$$

2.2 용강 입력 유량 Q_{IN} 의 계산

스토퍼 개공 길이에 따른 몰드내로의 용강 유입량 $f(h_s)$ 을 계산하기 위하여, 용강에 침지된 용강 입력 노즐 및 스토퍼의 형태를 알아야하는데, 그림 3은 그림 1에서 보인 전형적인 SEN의 상부 단면도를 나타낸다.

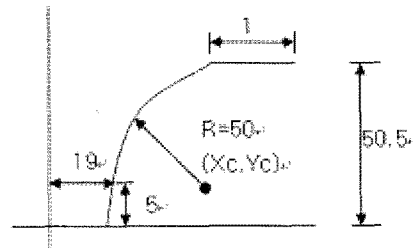


그림 3. SEN(침지 노즐) 상부.
Fig. 3. Shape of top of SEN.

노즐의 둥근 부분의 식은 $y = \sqrt{r^2 - (x - x_c)^2} + y_c$ 이고, $x_c = 69, y_c = 5, r = 50$ 을 사용하였다.

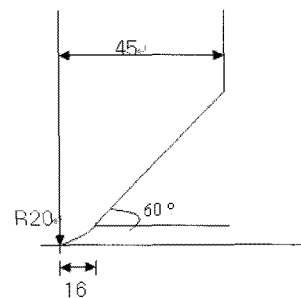


그림 4. 스토퍼 하부.
Fig. 4. Shape of stopper bottom.

그림 4는 그림 1의 스톱퍼 하부의 단면도로서 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \begin{cases} -\sqrt{r^2 - x^2} + y_c, & 0 \leq x < 16 \\ \tan 60^\circ x - 19.7128, & 16 \leq x \leq 45 \end{cases}$$

여기에서 $y_c = 20, r = 20$ 을 사용하였다.

스톱퍼가 SEN과 완전히 맞닿아 용강의 입력 유량이 0이 되는 위치를 계산해보면 그림 5에서와 같이 스톱퍼의 위치가 원점으로부터 5.2mm 정도 들어 올려진 상태가 된다.

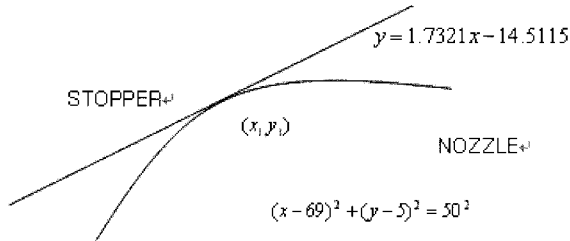


그림 5. 스톱퍼와 SEN이 접촉할 때의 계산.
Fig. 5. Contact point between stopper and SEN.

이제 SEN으로의 용강의 유입량을 계산하기 위하여 그림 6과 같이 SEN과 스톱퍼 사이의 단면적을 구한다.

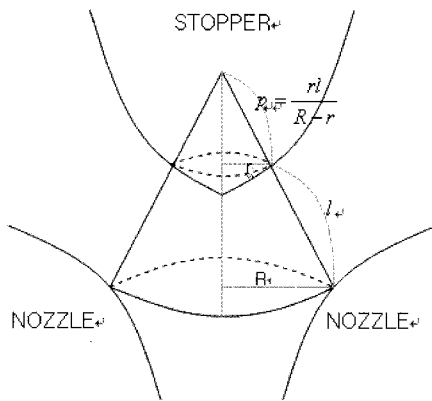


그림 6. 스톱퍼와 SEN 사이의 단면적.
Fig. 6. Surface area between stopper and SEN.

스톱퍼와 SEN 사이의 최단거리를 l 이라고 하면, r 과 R 을 알고 있을 때, 유입 면적 M 의 계산은

$$M = S_R - S_r = \frac{1}{2}\theta(l^2 + 2lp) = \frac{\pi R}{p+l}l(l + 2p)$$

$$S_R = \frac{1}{2}\theta(p+l)^2$$

$$S_r = \frac{1}{2}\theta p^2$$

$$\theta = \frac{2\pi R}{p+l}$$

이 되고, 여기에서 M, S_R, S_r, θ 는 각각 유입 면적, 반지름이 각각 R, r 인 원뿔의 바닥 부분을 제외한 표면적, 펼친 원뿔의 각도가 되며, 그림 7에서 보여진다.

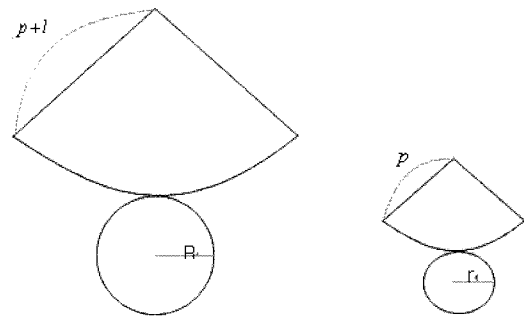


그림 7. 표면적 S_R, S_r 의 계산
Fig. 7. Surface calculation of S_R, S_r

여기에서 l, r, R 을 찾기 위하여, MATLAB을 사용하여 스톱퍼의 들어 올려진 높이인 h_s 를 1mm 간격으로 변화시키면서 스톱퍼와 SEN 사이의 최소 간격을 가지는 r, R 을 찾아 l 을 계산하였으며, 그림 8과 같다.

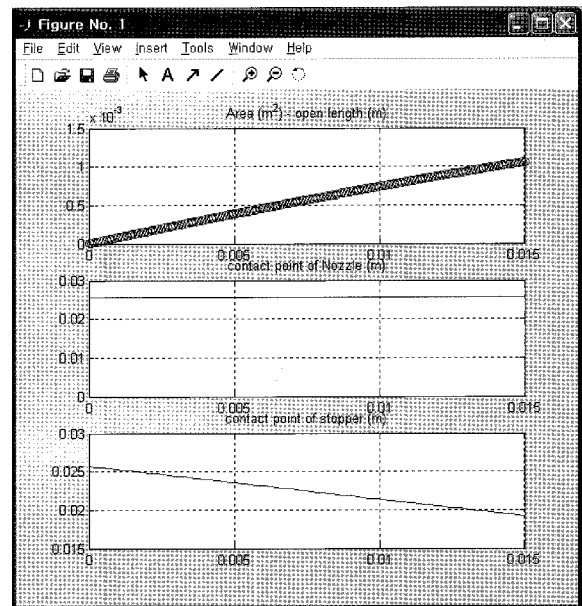


그림 8. 유입 면적의 계산.
Fig. 8. Surface area.

스톱퍼 높이 h_s 에 따른 유입 면적 M 은 아래식 (4)와 같은 2차식으로 근사하였다.

$$M(h_s) = -0.6749h_s^2 + 0.0806h_s \quad (4)$$

용강의 유입부로부터 SEN의 출구까지의 길이를 h_{SEN} 이라 하면, 용강의 유출 속도는

$$v_{SEN} = \sqrt{2gh_{SEN}}$$

이므로, 몰드로 유입되는 용강량은 아래식 (5)와 같이

$$Q_{IN} = \alpha M(h_s)v_{SEN} = \alpha(-0.6749h_s^2 + 0.0806h_s)\sqrt{2gh_{SEN}} \quad (5)$$

으로 계산되는데, 여기에서 α 는 용강의 점성 등을 고려한 인수로 사용되었다.

3. 비선형 모델의 시뮬레이션

용강 높이 수식 모델을 검증하기 위하여, MATLAB을 이용하여 PI 제어기와 용강 높이 모델을 그림 9와 같이 구현하였다. 이때 사용된 파라미터들은 다음과 같다.

- initial level in mold: 10 %
- reference level in mold: 80 %
- r of SEN: 35 mm
- submerged depth of SEN: 120 mm
- length of SEN: 835 mm
- h_{SEN} : 500 mm
- initial casting speed: 0 mpm
- casting speed: 20 mpm
- width of mold: 160 mm
- height of mold: 160 mm
- initial position of stopper: 33 %
- bottom position of stopper: 30 %
- α : 0.23
- noise : 1.5% white gaussian

사용된 PI 제어기의 형태는 산업체에서 널리 쓰이는 다음의 형태를 가졌으며, T , T_i 는 각각 sampling time과 I gain을 위한 시간 상수이다.

$$U(z) = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} \frac{1}{z-1} \right) E(z) \quad (6)$$

- sampling time (T): 20 msec
- p gain for level control (K_p): 27 %
- integral time for level control (T_i): 50 sec

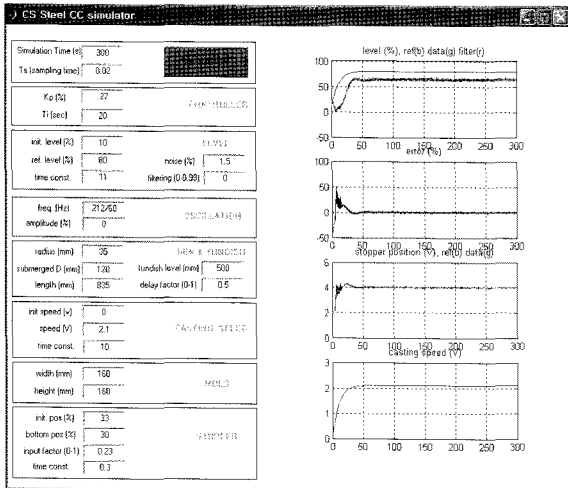


그림 9. 용강 높이 제어 시뮬레이션 결과.
Fig. 9, Simulation of molten steel level control.

그림 10은 PLC로 구현된 식 (6) 형태의 PI 제어기에 의하여 실제로 용강 높이를 제어한 초기 300초의 데이터와 MATLAB 시뮬레이션을 통한 PI 제어 결과의 데이터를 나타낸 그림이다. 실제의 용강 높이 제어 데이터는 몰드에 용강을 쏟아 부을 때에 생기는 초기 상태의 잡음과 센서에서의 많은 잡음을 포함하고 있는데, 전체적으로는 시뮬레이

션 데이터가 실제 데이터를 잘 따라가고 있음을 확인할 수 있다. 이로써, 개발된 비선형 모델이 잘 동작하고 있음을 확인하였다.

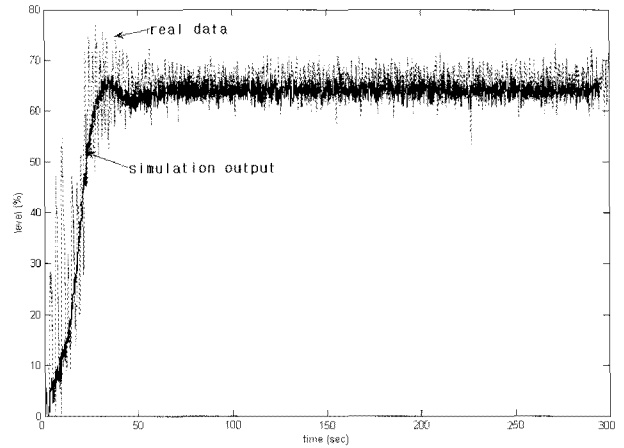


그림 10. 시뮬레이션 결과 비교.
Fig. 10. Comparison of simulation result.

4. 퍼지-PI 제어기

기존의 PI 제어기의 성능을 개선하기 위하여 퍼지 시스템을 사용하여 K_p 의 값을 변화시키는 퍼지-PI 제어기를 제안한다. 기존 시스템에의 변화를 최소화하기 위하여 식 (6)에서 T , T_i 를 고정시키되, 기존 PI 제어기에 사용된 $K_p = 0.27$ 인 경우와, 제어기 성능을 개선하기 위하여 약간의 오버슈트를 가진 $K_p = 0.15$ 인 경우에 대하여 각각 시뮬레이션을 실행하였다.

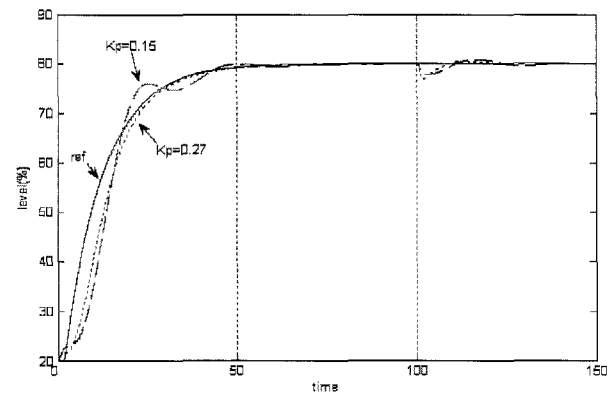


그림 11. PI 제어기 응답 비교.
Fig. 11. Responses with PI controller

그림 11은 K_p 값에 따른 시뮬레이션 결과를 보여주는데, 점선으로 표시된 기존 $K_p = 0.27$ 의 경우 오버슈트없이 실선으로 표시된 목표치를 잘 따라가고 있고, 넓은 점선으로 표시된 $K_p = 0.15$ 의 경우는 초기에는 더 늦지만 오버슈트의 영향으로 70%선에는 더 빨리 도착함을 알 수 있다. $t=100$ 에서 10%의 외란을 가한 경우, $K_p = 0.15$ 인 경우가

$K_p = 0.27$ 인 경우보다 용강 레벨의 변화는 작았지만 오버슈트 때문에 안정되기까지는 더 많은 시간을 필요로 한다. 목표치는 $\frac{1}{11s+1}$ 의 동특성을 가진 부드러운 곡선으로 설정되었다.

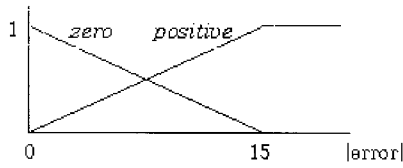


그림 12. 오차 절대값에 대한 멤버십 함수.

Fig. 12. Membership functions for absolute value of error.

위 결과로부터 다음과 같은 간단한 퍼지 규칙을 설정하였다.

IF |error| is positive THEN $K_f = 0.15$
 IF |error| is zero THEN $K_f = 0.27$

퍼지 시스템은 오차의 절대값을 입력으로 하고, 식 (6)의 K_p 값을 대체하기 위한 K_f 를 출력으로 가진다. 여기에서, 오차 절대값에 대하여 그림 12와 같은 삼각형 멤버십 함수를 사용하여 퍼지화하고, 출력값 K_f 는 싱글톤 퍼지화기를 사용하였으며, 비퍼지화기로서는 center average 방법을 사용하였다. 그러므로 출력값 K_f 는 다음식 (7)과 같이 계산된다.

$$K_f = \mu_{ZERO(|e|)}0.27 + \mu_{POSITIVE(|e|)}0.15 \quad (7)$$

그림 13은 퍼지 시스템을 사용하여 매 샘플링 타임마다 오차에 따라 K_f 를 결정하고, 이것을 사용하는 용강 높이 제어 시스템의 블록도를 나타낸다.

위의 제어 시스템을 사용하여 K_p 값을 가변시킨 퍼지-PI 제어기의 응답은 그림 14와 같으며, K_f 와 실선으로 표시되었다. 의도한 바대로 용강 높이 70%에의 도달 시간이 빨라졌고, 안정 상태에서는 기존의 응답 상태와 유사하며, $t=100$ 에 가해진 10%의 임펄스 외란에 대하여도 보다 강인해진 결과를 보임을 알 수 있다.

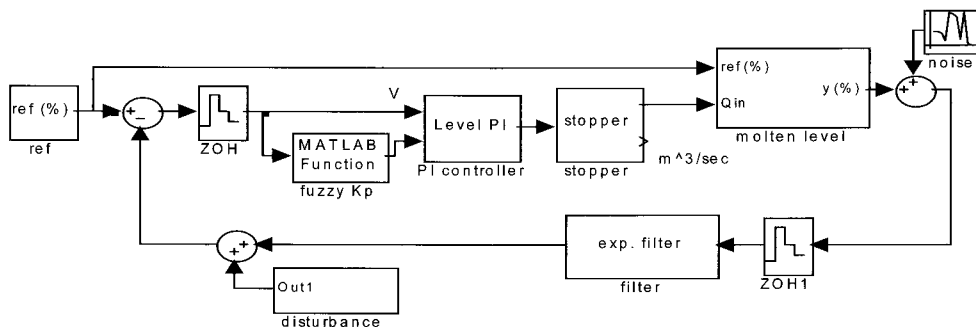


그림 13. 제어 시스템 블록도.

Fig. 13. Block diagram of control system.

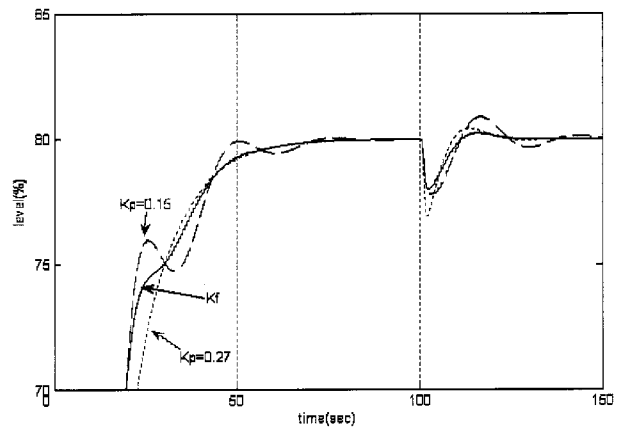


그림 14. Fuzzy-PI 제어기의 응답.

Fig. 14. Response with fuzzy-PI controller.

이때 오차와 K_f 값의 변화는 그림 15에서 보여진다. 즉, 초기 상태나 외란 존재시에는 오차 절대값에 따라 K_f 가 0.15 쪽으로 이동하고, 안정시에는 0.27쪽으로 이동함을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 연속 주조 공정에서 제품의 품질에 큰 영향을 미치는 몰드내 용강 높이의 제어기를 구성하기 위하여 수학적 비선형모델을 유도하는 데에 있어, 몰드내의 입력력 유량, 스토퍼의 위치와 입력유량의 관계 등을 고려하여 자세하게 설명하였다. 유도된 비선형모델은 MATLAB을 사용하여 구현되었으며 실제 데이터와 비교하여 모델의 데이터가 유효함을 확인하였다.

이 모델을 사용하여 기존의 PI 제어기의 제어 품질을 향상시키기 위하여, 퍼지 시스템에 의하여 변동되는 K_p 값을 가지는 퍼지-PI 제어기를 제안하였다. 퍼지-PI 제어기는 용강 레벨의 안정기에는 기존에 사용되던 PI 제어기의 성질과 유사하고, 초기 및 외란시에는 더 나은 제어 성능을 가짐을 시뮬레이션으로 보였다.

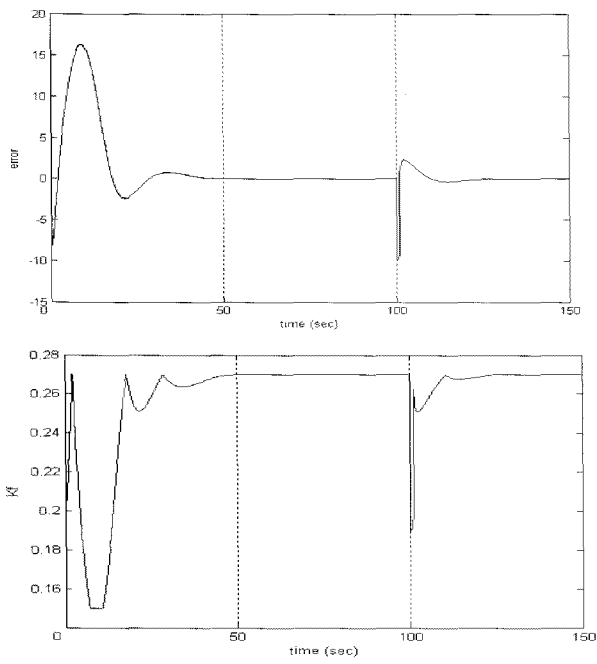


그림 15. 오차와 K_f 값의 변화.
Fig. 15 Variation of error and K_f .

참고 문헌

[1] R. M. C. De Keyser, "Improved mould-level control in a continuous steel casting line", *Control Engineering Practice*, Vol. 5, No. 2, pp. 231-237, 1997.

[2] Michel Dussud, Sylvie Galichet, and Laurent P. Foulloy, "Application of fuzzy logic control for continuous casting mold level control", *IEEE trans. Control systems Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 246-256, 1998.

[3] M. A. Barron, R. Aguilar, J. Gonzalez, E. Melendez, "Model based control of mold level in a continuous steel caster under model uncertainties", *Control Eng. Practice*, Vol. 6, pp. 191-196, 1998.

[4] Miguel A. Barron, Ricardo Aguilar, and Jesus Gonzalez, "Stabilization of the molten steel level in the mold of a continuous casting machine by means of vacuum", *IEEE trans. Industry Applications*, Vol. 36, No. 3, pp. 861-864, 2000.

[5] Yeongseob Kueon and Wendong Xiao, "Improved mold level control for continuous steel casting by fuzzy logic control", *Trans. Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-7, 1999.

[6] D. M. Lee, J. S. Lee, and T. Kang, "Adaptive fuzzy control of molten steel level in strip-casting process", *Control Eng. Practice*, Vol. 4, No. 11, pp. 357-364, 1996.

[7] M. G. Joo, Y. H. Kim, and T. Kang, "Stable

adaptive fuzzy control of molten steel level in the strip casting process", *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, Vol. 149, No. 5, pp. 357-364, 2002.

저자 소개



주문갑(Moon G. Joo)
1992년: 포항공대 전자전기공학과(공학사)
1994년: 포항공대 정보통신학과(공학석사)
2001년: 포항공대 전자컴퓨터공학부
(공학박사)
1997년~2003년: 포항산업과학연구원
선임연구원
2003년~현재: 부경대학교 전자컴퓨터정
보통신공학부 조교수.

관심분야: 지능 제어, 공장 자동화 등
E-mail: gabi@pknu.ac.kr



김도응(Do E. Kim)
2001년: 한국해양대학교 제어계측공학과
(공학사)
2003년: 한국해양대학교 제어계측공학과
(공학석사)
2003년~현재: 포스코특수강 전기정비팀
전기기술직

관심분야: 지능 제어, 계측 공학
E-mail: porshedo@poscoss.com



김호경(Ho K. Kim)
1995년: 창원대학교 재료공학과(공학사)
1996년~1997년: 삼미특수강 제강부 금속
기술직
1997년~현재: 포스코특수강 제강부 금속
기술직

관심분야: 금속 구조, 용고 공학
E-mail: hokk@poscoss.com



김종민(Jong M. Kim)
1986년: 부산대학교 전기공학과(공학사)
1987년~1997년: 삼미특수강 전기정비부
전기기술직
1997년~2003년: 창원특수강 전기정비부
전기기술직
2003년~현재: 포스코특수강 전기정비부
팀장

관심분야: 컴퓨터 제어, 공장 자동화