

논문 2017-54-1-15

수정된 PI 제어기를 이용한 수위 제어

(Stabilizing Water Leveling System Using Modified PI Controller)

문성웅*

(Sungwoong Moon[©])

요약

본 논문에서는 출력단에 외란이 존재하는 수위 제어 시스템을 안정화하는 제어기를 제안하였다. 출력단의 외란의 효과를 감소시키기 위하여 여러 기법들이 제안되었지만 시스템에 존재하는 시간지연으로 인해 기대한 만큼 제어성능이 나오지 않고, 시간지연을 해석하기도 쉽지 않다. 이런 문제를 해결해보고자 PI 제어기에 필터를 도입해서 외란의 영향을 감소시키고, 외란관측기(Disturbance Observer)를 추가로 적용하여 출력단 외란의 영향이 감소되는 것을 검증하였다. 제안된 제어기는 MATLAB 시뮬레이션을 이용하여 성능을 검증하였다.

Abstract

In this study, we design a controller that regulates the water leveling system which suffers from the disturbance. A number of control techniques have been reported which can reduce the amplitude of disturbance. But due to input-delay, these methods do not perform as expected. To overcome the problem, this paper introduces a filter and proposes a proportional and integral (PI) controller that combined with the filter (modified PI controller). Moreover, we combine the controller with disturbance observer (DOB) that can estimate and eliminate disturbance. The proposed controller and combined the controller with DOB are tested using MATLAB.

Keywords : PI controller, Input delay, Disturbance observer, Water leveling system

I. 서론

시간지연은 제어 시스템의 안정도에 영향을 미쳐서 제어기를 실제 적용했을 때 원하는 만큼의 제어성능을 내지 못하거나 시스템이 불안정해지는 원인이 된다^[1].

예를 들자면 시스템에 직접적인 영향을 주는 외란이 존재할 때 이를 개선하기 위한 입력이 시간지연 요소에 의해 실제 시스템에 외란을 제거하는 방향이 아닌 더하는 방향으로 작용해 불안정성을 더욱 크게 만들기도 한다.

* 정회원, 국방과학연구소 6기술연구본부
(The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development)

© Corresponding Author(E-mail : sungwoong@add.re.kr)

Received ; August 9, 2016 Revised ; December 22, 2016

Accepted ; December 29, 2016

이런 지연 요소는 제어기에서 신호를 보냈을 때 제어 구동부에서 원하는 동작을 하기 까지 시간 차이, 센서 데이터를 처리하는 시간, 시스템에 자연적으로 존재하는 지연요소 등 여러 부분에서 발생할 수 있다.

이러한 요소가 시스템에 미치는 악영향을 개선하기 위하여, 시간지연 요소를 가진 수위 제어 시스템의 제어기 설계 및 시간지연 시스템의 안정성 분석을 통해 시간지연이 시스템에 미치는 영향을 줄이고 제안한 제어기가 안정함을 보이고자 한다.

시간 지연 요소와 상관없는 수위 제어 시스템의 외란을 보상하는 제어기는 여러 가지가 제안되었는데, 외란 관측기(DOB)를 사용하는 방법^[2], 마스터-슬레이브 PID 제어^[3], 모델 기반 제어^[4], 신경망 제어^[5], 퍼지 논리 제어^[6], 노치 필터(notch filter)^[7], 제어^[8]가 있다.

수위 제어 시스템의 시간지연 요소의 영향을 줄이기 위한 기법들도 제안되었다^[9~10]. 이러한 기법들은 시스템에 가해지는 외란을 예측하여 시간지연을 고려한 입력력을 만들어내는 방법으로 외란의 영향을 줄여보고자 하였다. 하지만 이런 기법들은 여러 추정이 들어가고 외란의 정보가 필요한데, 실제로는 이런 정보들이 하나의 값으로 고정되어 있지 않고 정확하게 알려져 있지도 않는 경우가 많다.

본 논문에서는 PI 제어기에 저역 통과 필터(Low Pass Filter)를 조합하고 외란관측기(Disturbance Observer)를 사용하여 시간 지연이 존재하는 수위 제어 시스템에 대하여 외란의 영향을 줄여보고자 한다.

본 논문에서는 2장에서 대상 시스템을 모델링하고, 제어기 설계 및 제어기의 안정성을 분석하였다. 제어기의 안정성은 Lyapunov 분석을 통해 안정함을 보일 것이다. 3장에서 시험 결과를 보여주고, 4장에서 결론을 맺는다.

II. 본 론

1. 시스템 모델링

수위 제어 시스템의 기본적인 동역학은 다음과 같다. 여기서 없어지는 물의 양은 일정한 것으로 보고, 변동 을 가지는 값을 외란으로 본다.

$$\dot{x}(t) = \frac{1}{A}(Q_{in}(t - \tau) - Q_{out}) + d(t) \quad (1)$$

$$y(t) = x(t) \quad (2)$$

여기서 $Q_{in}(t)$ [m^3/s]은 입력유량, Q_{out} [m^3/s]은 빠져나가는 유량, A [m^2]는 수면의 단면적, $x(t)$ [m]는 수면의 높이, τ 는 시간지연 요소, $d(t)$ [m] 외란을 나타낸다. 여기서 외란은 제한된 크기를 가진다.

가. 입력 유량 모델

입력 유량 $Q_{in}(t)$ 은 아래와 같이 유속 V_{in} 과 입력 개도 $SG(u_s)$ 의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{in}(t) = V_{in} \cdot SG(u_s) \quad (3)$$

여기서 $V_{in} = \sqrt{2gh}$ 이고(g : 중력 가속도, h : 물이 빠져나가는 지점에서부터 수면의 높이), 입력 개도 $SG(u_s)$ 는 그림 1과 같이 Moving part와 Fixed part가 겹치는 부분이라고 가정한다면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$SG(u_s) = 0, \quad u_s = b - 2R$$

$$SG(u_s) = 4 \int_{(u_s+b)/2}^{u_s+R} \sqrt{R^2 - (x - u_s)^2} dx$$

$$= \pi R^2 - 2R^2 \sin^{-1}\left(\frac{b - u_s}{2R}\right) - \left(\frac{b - u_s}{2}\right) \sqrt{4R^2 - (b - u_s)^2},$$

$$b - 2R \leq u_s \leq b \quad (4)$$

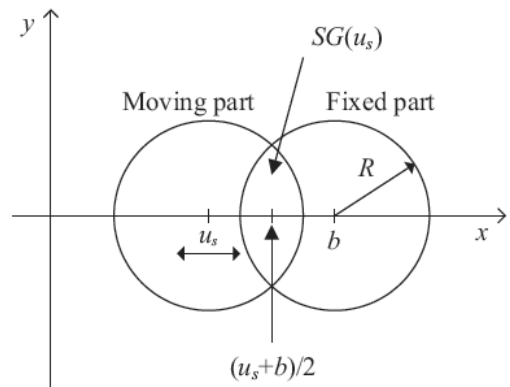


그림 1. 입력 개도 $SG(u_s)$
Fig. 1. Inlet cross sectional area $SG(u_s)$.

실제 $SG(u_s)$ 은 복잡한 비선형 함수이기 때문에 해석이 쉽지 않다. 따라서 그림 2와 같이 선형화하면,

$$SG(u_s) = \frac{\pi R}{2}(u_s - b + 2R) + \Theta(u_s),$$

$$b - 2R \leq u_s \leq b \quad (5)$$

와 같이 쓸 수 있고, 여기서 오차 $\Theta(u_s)$ 는 크기가 제한되어 있는 값이 된다.

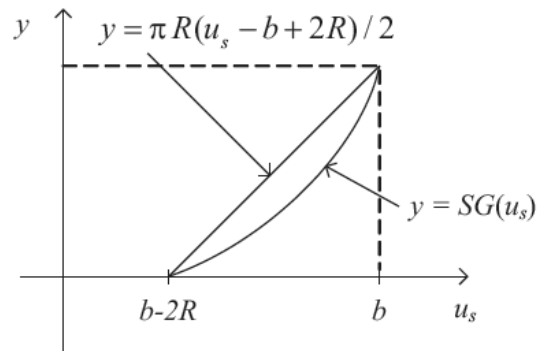


그림 2. $SG(u_s)$ 선형화
Fig. 2. Linearization of $SG(u_s)$.

식 5를 식 3에 대입하여 다시 쓰면,

$$Q_{in}(t) = V_{in} \cdot SG(u_s) = \frac{\pi R V_{in}}{2} u_s - \frac{\pi R V_{in}}{2} (b - 2R) + V_{in} \Theta(u_s), \quad b - 2R \leq u_s \leq b \quad (6)$$

이 된다.

나. 입력 유량 모델 적용 시스템 모델
식 6을 식1에 대입하여 정리하면,

$$\dot{x}(t) = \frac{1}{A} (V_{in} \cdot SG(u_s(t-\tau)) - Q_{out}) + d(t) = \frac{\pi R V_{in}}{2A} u_s(t-\tau) + \Delta(t) = u(t-\tau) + \Delta(t) \quad (7)$$

와 같이 정리할 수 있다.

따라서 이 시스템은 입력개도 u 를 시스템 입력으로 가지는 시간 지연을 가진 적분기에 특정 값 이하의 외란이 존재하는 시스템으로 모델링 할 수 있다. 여기서 $\Delta(t)$ 는 다음과 같고, 특정 값 δ 보다 작은 값이 된다.

$$|\Delta(t)| = \left| \frac{V_{in} \pi R}{2A} (-b + 2R) - \frac{1}{A} (\Theta(u_s(t-\tau)) - Q_{out}) + d(t) \right| \leq \delta \quad (8)$$

다. MATLAB 모델

MATLAB 모델 파라미터는 기준에 존재하는 HW 시뮬레이터의 물리량을 기초로 하여 그림 3과 같이 적용하였다.^[13~14]

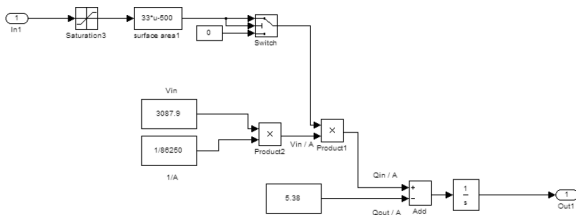


그림 3. MATLAB 모델
Fig. 3. MATLAB model.

2. 제어기 설계

가. Lyapunov 안정성

Lyapunov 분석에서 입력 지연 요소를 없애기 위해 $\bar{e}(t)$ 를 다음과 같이 정의한다. $\bar{e}(t)$ 의 라플라스 변환은 다음과 같다.

$$\bar{E}(s) = E(s) - \frac{1}{s + \lambda} (U(s) - U(s)e^{-\tau s}) \quad (9)$$

여기서 $E(s)$ 는 $e(t) = r - y(t)$ 의 라플라스 변환이고, r 은 기준 값이다. $\bar{e}(t)$ 를 이용하여 새로운 변수 σ 를 정의하고 Lyapunov 함수를 아래와 같이 정의한다.

$$\sigma(t) = \bar{e}(t) + \lambda \int_0^t \bar{e}(\zeta) d\zeta \quad (10)$$

$$V(t) = \frac{1}{2} \sigma^2(t) \quad (11)$$

식 11로부터 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sigma(t) \dot{\sigma}(t) \\ &= \sigma(t) (\dot{\bar{e}}(t) + \lambda \bar{e}(t)) \\ &= \sigma(t) (\dot{e}(t) + \lambda e(t) - u(t) + u(t-\tau)) \\ &= \sigma(t) (-\Delta(t) + \lambda e(t) - u(t)) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $e(t)$ 항에 대하여 식 2, 7을 대입하면,

$$\begin{aligned} e(t) &= r - y(t) \\ \dot{e}(t) &= -\dot{y}(t) = -\dot{x}(t) = -u(t-\tau) - \Delta(t) \end{aligned} \quad (13)$$

이다.

제어 입력을 아래와 같이 설계하고 (그림 4),

$$u(t) = \epsilon e(t) + k \sigma(t) \quad (14)$$

$$= \epsilon e(t) + k (\bar{e}(t) + \lambda \int_0^t \bar{e}(\zeta) d\zeta) \quad (15)$$

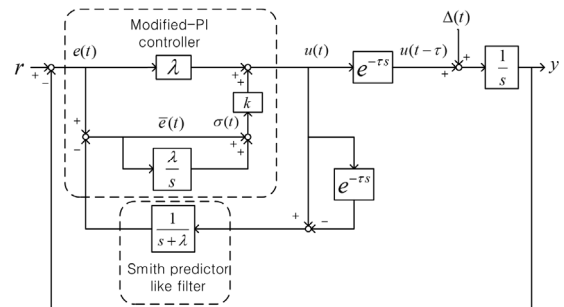


그림 4. 수정된 PI 제어기
Fig. 4. Modified PI controller.

식 12에 식 14을 대입하여 정리하면,

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sigma(t)(-\Delta(t) - k\sigma(t)) \\ &\leq -k\sigma^2(t) + \delta|\sigma(t)| \\ &\leq -(1-\theta)k\sigma^2(t) \\ \text{for } |\sigma(t)| &\geq \frac{\delta}{k\theta} \quad (0 < \theta < 1) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 $\sigma(t)$ 가 gain k 의 크기에 따라 ultimate bound 되고 크기가 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.

나. $\sigma(t)$ 와 $\bar{e}(t)$ 관계
식 10으로부터,

$$\bar{E}(s) = \frac{s}{s + \lambda} \Sigma(s) \quad (16)$$

$\Sigma(s)$ 는 $\sigma(t)$ 의 라플라스 변환이다. 여기서 $s/(s + \lambda)$ 이 점근적으로 안정하므로 bounded-input bounded-output (BIBO) stability theorem에 의하여 $\bar{e}(t)$ 도 역시 ultimately bound 되어 있다.

다. $\bar{e}(t)$ 와 $e(t)$ 관계
식 9와 식 15로부터,

$$\frac{E(s)}{\bar{E}(s)} = \frac{s^2 + (\lambda + k(1 - e^{-\tau s}))s + k\epsilon(1 - e^{-\tau s})}{s(s + \lambda e^{-\tau s})} \quad (17)$$

를 유도할 수 있다.

시간 지연 τ 가 크지 않을 경우 (1,1) Pade approximant를 적용해서 정리하면,

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1 - \tau s/2}{1 + \tau s/2} \quad (18)$$

$$\frac{E(s)}{\bar{E}(s)} \approx \frac{\tau s^2/2 + (1 + k\tau + \lambda\tau/2)s + \lambda(1 + k\tau)}{\tau s^2/2 + (1 - \lambda\tau/2)s + \lambda} \quad (19)$$

로 정리할 수 있다.

이 경우 $2/\tau > \lambda > 0$ 구간에서 BIBO 안정성 조건을 만족한다. 식 19를 통해 $e(t)$ 가 ultimately bound 되어 있다는 것도 확인할 수 있다.

라. 정상상태 오차

제한한 제어기의 step disturbance에 대한 정상상태 오차가 0이 됨을 확인하기 위해 식 9, 식 13, 식 15를 정리하여 외란 $\Delta(t)$ 에 대한 $y(t)$ 의 전달함수를 구하면,

$$T_{\Delta y}(s) = \frac{s^2 + ks - kse^{-\tau s}}{s^3 + ks^2 + \lambda(s^2 + ks)e^{-\tau s}} \quad (20)$$

가 된다.

최종값 정리를 적용하면,

$$\lim_{s \rightarrow 0} s T_{\Delta y}(s) \frac{1}{s} = \frac{s^2 + ks - kse^{-\tau s}}{s^3 + ks^2 + \lambda(s^2 + ks)e^{-\tau s}} = 0 \quad (21)$$

이 되므로 제한된 제어기는 step disturbance에 대한 정상상태 오차가 0이 됨을 확인할 수 있다.

3. 외란 관측기 적용

2 절에서 설계한 제어기가 ultimately bounded 되어 있고 그 크기는 이득 k 에 반비례한다는 것을 보였다. 하지만 시스템에 존재하는 노이즈 등의 이유로 이득을 키워서 적용하는 데 한계가 있다. 따라서 외란 관측기를 적용하여 제어 성능을 더 높여보고자 한다.

외란 관측기는 시스템에 시간지연이 있을 경우 적용할 수 없다. 따라서 식 12에서 시간지연 항이 없는 $\sigma(t)$ 에 대하여 외란관측기를 적용하여 외란을 제거하는 방법을 사용한다.

식 12에서 $\sigma(t)$ 에 대한 상태 방정식을 가져오고,

$$\dot{\sigma}(t) = -\Delta(t) + \lambda e(t) - u(t) \quad (22)$$

$$z(t) = \sigma(t) \quad (23)$$

위 시스템에 대한 외란 관측기를 설계한다.^[11~12]

$\sigma(t)$ 에서 보면 $-\Delta(t) + \lambda e(t)$ 가 외란이 된다. 외란 관측기를 $-\Delta(t) + \lambda e(t)$ 의 효과를 없애도록 그림 5, 그림 6과 같이 설계한다.

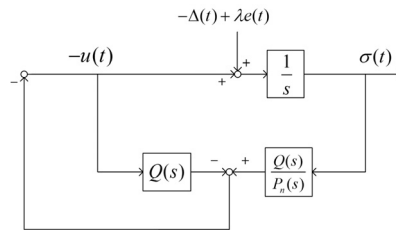


그림 5. $\sigma(t)$ 외란관측기
Fig. 5. DOB for $\sigma(t)$ dynamics.

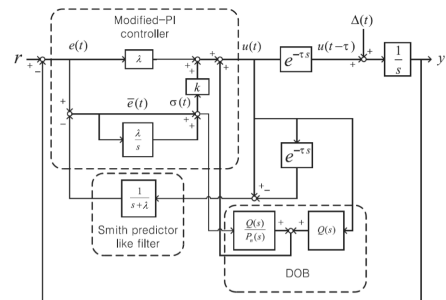


그림 6. 수정된 PI 제어기에 외란관측기 적용
Fig. 6. Modified PI controller combined with DOB.

그림 5에서 $P(s) = 1/s$ 이고, Q필터 $Q(s)$ 와 $P_n(s)$ 는 다음과 같이 선택한다. W_q 는 외란의 주파수이다.

$$Q(s) = K_q \cdot \frac{1}{s + 8W_q} \cdot \frac{s}{s + 0.05W_q}$$

$$P_n(s) = \frac{\alpha}{s} \quad (24)$$

여기서 각 이득은 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$|\Gamma(s)Q(s)| < 1$$

$$\Gamma(s) = (P(s) - P_n(s))/P_n(s) = 1/\alpha - 1 \quad (25)$$

III. 실험

PI 제어기, 수정된 PI 제어기, 외란관측기를 적용한 제어기 각각에 대하여 성능을 MATLAB으로 시뮬레이션 해 보았다. 시뮬레이션 조건은 시간 지연에 따른 영향을 검증하기 위하여 시간지연 0.3초, 0.7초를 조건으로 주고 시뮬레이션을 진행하였다. 기준 값은 80으로 정하였고, 외란은 사인파로 가정하였다.

1. 시간 지연 영향

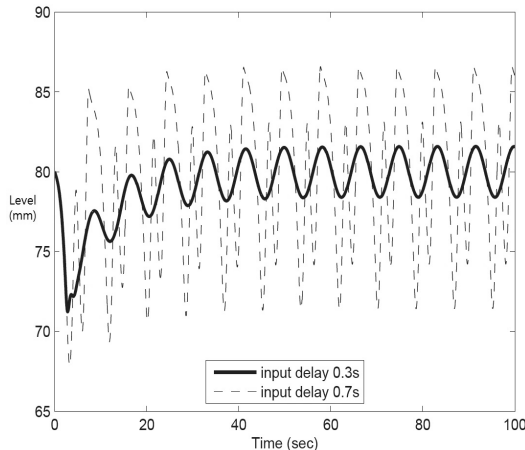


그림 7. PI 제어기 MATLAB 시뮬레이션 결과, 0.3s, 0.7s
Fig. 7. MATLAB simulation result of PI controller; delay 0.3s, 0.7s.

그림 7에서 보면 PI 제어기는 시간 지연에 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있다. 시간지연 0.3초 일 때 기준 값에서 크기 5 미만의 진폭을 가지는 반면 시간지연이 0.7초로 늘어나면 기준 값에서 크기 15의 진폭을 가지게 됨을 확인할 수 있다.

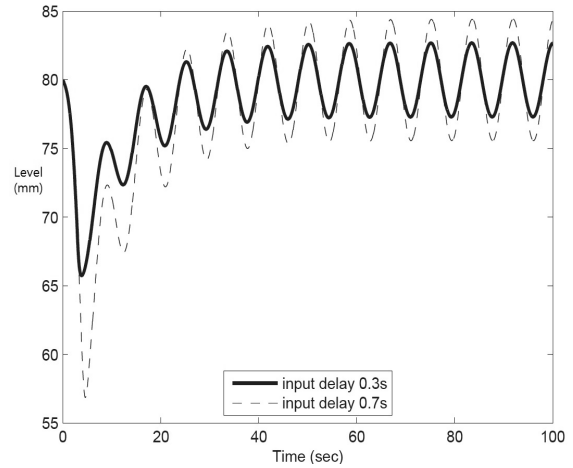


그림 8. 수정된 PI 제어기 MATLAB 시뮬레이션 결과, 0.3s, 0.7s
Fig. 8. MATLAB simulation result of modified PI controller; input delay is 0.3s, 0.7s.

그림 8에서 보면 수정된 PI 제어기는 PI 제어기보다 시간 지연에 둔감하게 반응하는 것을 확인할 수 있다. 시간지연 0.3초일 때 크기 5 미만의 진폭을 가지고, 시간지연이 0.7초로 늘어나도 그림 7의 제어기와 달리 크기 10 미만의 진폭을 가져 줄어든 효과를 확인할 수 있다.

2. 외란 관측기 적용

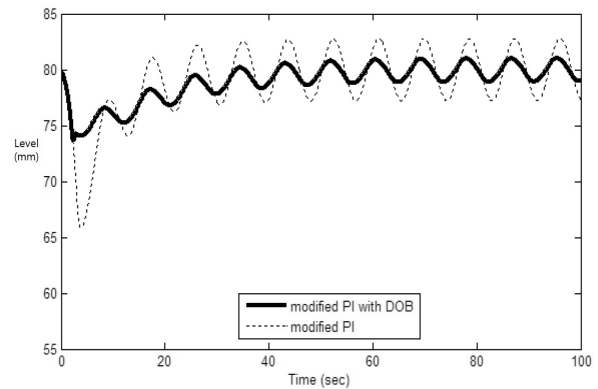


그림 9. 수정된 PI 제어기, 외란관측기 적용 MATLAB 시뮬레이션 결과, 0.3s
Fig. 9. MATLAB simulation result of modified PI controller with/without DOB; input delay is 0.3s.

수정된 PI 제어기에 외란관측기를 적용하여 효과를 검증하였다. 그림9에서, 기존 PI 제어기만 적용했을 때와 비교하여 외란관측기를 적용했을 때 수위 제어가 효과적으로 되어 진폭이 절반정도로 줄어든 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 PI제어기에 필터를 사용하여 외란이 존재하는 수위 시스템을 제어하는 제어기를 제안하고, 시간지연을 반영하여 그 안정성을 분석하였다. 제안한 필터를 사용하여 새로운 오차 신호를 정의하고 Lyapunov 안정성 분석을 통해 시스템에 존재하는 시간 지연 효과에 관계없이 ultimate bound됨을 보였다. 그리고 시스템 오차도 ultimate bound 됨을 보였다. 여기서 bound 크기는 이득 k에 반비례 한다는 것을 보였지만, 통상적으로 제어기를 적용할 때 예상하지 못한 시간지연, 물리적인 제어 입력 한계 등이 존재하기 때문에 큰 제어기 이득은 권장되지 않는다. 따라서 외란관측기를 추가로 제안하여 성능 향상되는 것을 검증하였다. 외란관측기는 시간지연이 있을 때 적용이 힘들지만, 본 논문에서 $\sigma(t)$ 에 대하여 적용이 가능하도록 분석하였다. 마지막으로 MATLAB를 사용하여 제안한 제어기 성능을 검증하였다.

시스템의 시간지연은 제어기를 설계하고 적용하는데 어려운 점이 발생하게 만드는 요인이므로 앞으로도 많은 연구가 필요하다.

REFERENCES

[1] B.C. Kuo and F. Golnaraghi, Automatic control systems, John Wiley & Sons, 2003.
 [2] K. Asano, T. Kaji and S. Ibaraki, Robust Molten Steel Level Control for Continuous Casting, Proceedings of the 35th Conference on Decision and Control, (1996), pp. 1245-1250.
 [3] R. Keyser, Improved mould-level control in a continuous steel casting line, Control Engineering Practice, Vol. 5, (1991), pp. 231-237.
 [4] M.A. Barron, R. Aguilar, J. Gonzalez, E. Melendez: Control Eng. Practice, 6 (1998), 191
 [5] K. Watanabe, K. Omura and S. Konishi, Molten level control in continuous caster by neural network model, ISIJ International, Vol. 39, No.10 (1999), pp. 1053-1060.
 [6] D. Lee, Y.S. Kueon and S.H. Lee, High performance hybrid mold level controller for thin slab caster, Control Engineering Practice, Vol. 12, (2003), pp. 275-281.
 [7] J. Schuurmans, B. Kamperman, B. Middel and P.R.A. Bosch, Robust Mould Level Control, Proceedings of American Control Conference, (2005), pp. 2040-2045.

[8] H. Kitada, O. Kondo, H. Kusachi and K. Sasame, HI Control of Molten Steel Level in Continuous Caster, IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol. 6, (1998), pp. 200-207.
 [9] E. Gruenbacher, C. Furtmueller and L. del Re, Suppression of frequency varying periodic disturbances in continuous casting using an internal model predictor, Proceedings of the 2007 American Control Conference, New York, USA, (2007).
 [10] B.Y. You, T.Y. Sim, M.S. Kim, D. Lee, J.K. Lee and J.S. Lee, Molten Steel Level Control Based on an Adaptive Fuzzy Estimator in a Continuous caster, ISIJ International, Vol. 49, No. 8(2009), pp. 1174-1183.
 [11] K. Ohnishi, A new servo method in mechatronics, Transition of Japanese Society of Electrical Engineering, vol. 107-D, (1987) pp. 83-86.
 [12] T. Umeno and Y. Hori, Robust speed control of DC servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 38, No.5 (1991), pp. 363-368.
 [13] Byungyong You, Minsung Kim, Dukman Lee, Jookang Lee and J. S. Lee, "Iterative learning control of molten steel level in a continuous casting process", Control Engineering Practice, vol.19, no.3, pp. 234-242, Mar. 2011.
 [14] Sungwoong Moon, Kyu-Woong Choi, Min-Sung Kim and Jin-Soo Lee (2010.6), Elimination of Bulging Disturbance in Mold Level System Using Sliding Mode Observer, IEEE conference, 1290-1291.

저 자 소 개



문 성 웅(정회원)

2009년 포항공과대학교 전자전기공학 학사졸업.

2011년 포항공과대학교 전자전기공학 석사졸업.

2016년 ~ 현재 국방과학연구소 연구원

<주관심분야: 제어이론>