

연주 몰드레벨제어에 있어서 PID제어와 지능제어기법의 비교

A Comparison of PID Control with Intelligent Control for Continuous casting

김 주 만^{*}, 이 진 수^{**}, 이 덕 만^{***}

^{*} 포항제철소 설비기술부(Tel:220-5611, Fax:220-6838)

^{**} 포항공과대학교 전자전기공학과(Tel:279-2230, Fax:279-2903)

^{***} 포항공과대학교 대학원 전자전기공학과(Tel:279-5571, Fax:279-6599)

Abstracts This paper describes the design and implementation of an intelligent controller for continuous casting process. The proposed controller adopted a fuzzy control with feedback linearization. The simulation result shows that proposed intelligent controller is superior to the conventional PID controller.

Keywords Mold-level, PID control, Fuzzy control, Feedback linearization, Intelligent controller

1. 서론

제철소에서 연주(연속주조)공정은 용강이 몰드(Mold)를 통해 냉각·응고되면서 주편(Slab)이 만들어지는 프로세스인데, 이 과정에서 가장 중요한 제어요소는 몰드내에 있는 용강의 탕면높이를 관리하는 것이다.

일반적으로 주편품질은 몰드레벨의 제어성과 관계가 있는 것으로 알려져 있는데, 이것은 몰드레벨이 진동하면 투입된 파우더의 불안정한 혼입이나 슬래그의 침투, 그리고 용강의 유량변동에 따른 주편응고가 불균일하게 되어 주편결함의 원인이 되기 때문이다.

따라서, 몰드레벨을 정확한 설정레벨로 일정하게 유지해 주는 것이 무엇보다도 중요한데 현실적으로 매우 어려운 실정이다. 왜냐하면 프로세스의 파라미터가 자주 변하고 외란이 존재하며, 시스템이 비선형성을 가지고 있기 때문이다.

외란의 주요인은 슬라이딩게이트의 단면적변화에 의한 유량상수의 변동, 주조속도(주편의 인발속도)의 변화, 파우더나 슬래그 층에 의한 레벨센서의 측정오차 등이며, 또 용강이 텀디쉬에서 노즐을 통하여 몰드내로 매분당 3 톤정도 쏟아져 들어옴에 따른 용강의 유동도 이에 속한다. 이중 유량상수의 변화는 용강의 고착이나 마모등과 같은 하드웨어적인 원인에 기인하며, 주조속도의 변화는 생산성이나 주편품질 등에 관계가 있다.

이처럼 시스템이 비선형성이나 외란을 가지고 있는 프로세스의 경우, 일반적인 PID제어기로는 계인변경 등 적절히 대응하기가 어려워 제어정도가 나빠지게 된다.

본 논문은 이러한 환경의 변화속에서도 성능이 우수한 새로운 제어기를 구현하기 위한 퍼지제어와 피드백선형화기법의 결합형 지능제어기설계, 그리고 이 제어기와 종래 PID제어기와의 비교 연구에 관한 것이다.

2. 시스템모델링

연주공정을 간략히 도시하면 그림[1]과 같은데, 몰드내에 들어 있는 용강의 레벨변화속도 V_L 은 몰드안으로 들어오는 용강의 유입량에서 유출량을 뺀 것을 몰드의 단면적으로 나눈 것이므로

$$V_L = (Q_i - Q_o) / A \text{ ----- (1)}$$

와 같이 되는데, V_L 은 몰드레벨의 변화속도(mm/s), Q_i 는 용강의 몰드유입량(mm³), Q_o 는 용강의 유출량(mm³), A 는 몰드의 단면적(mm²)이다.

또, 어떤 점에서의 유량은 그점을 통과하는 유체의 속도와 단면적을 곱한 값이므로, V_L 를 용강의 유출속도(주조속도)라면 용강의 유출량은

$$Q_o = V_L A \text{ ----- (2)}$$

와 같이 된다.

한편, 텀디쉬에서 몰드로 유입되는 용강의 양은 슬라이딩게이트에 의해 조정되는데, 이것의 기계적인 구조를 살펴보면 원형으로 구멍이 뚫린 두개의 판으로 이루어져 있고, 한쪽은 구동이 불가능한 고정부이나 다른 한쪽은 유압실린더에 연결되어 구동

할 수 있는 가동부이다.

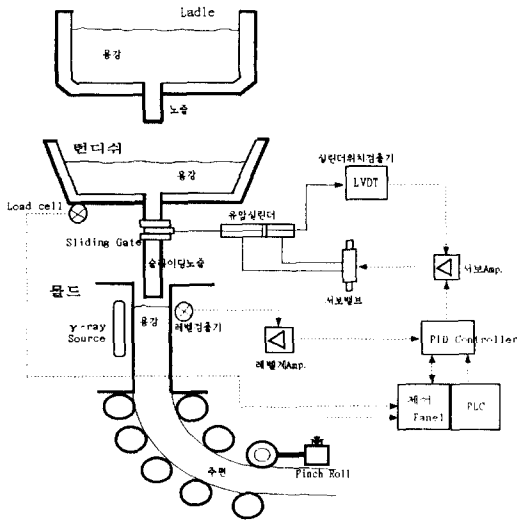


그림 [1] 연주공정 구성
Fig. [1] Flow of continuous casting

슬라이딩게이트의 구동은 그림[2]로 설명할 수 있는데 슬라이딩게이트의 가동부위치가 0~40 mm인 범위에서는 게이트가 열리지 않아 용강이 턴디쉬로부터 나오지 않는 데드존(Dead zone)에 해당한다. 따라서 슬라이딩게이트의 이동거리가 40 mm를 넘어야만 용강이 몰드안으로 유입될 수 있으며, 120mm일 때 용강의 유입량이 최대가 된다. 그러므로, 몰드안으로 유입되는 용강의 양 Q_1 는 슬라이딩게이트가 교차하는 단면적 S_u 에 비례함을 알 수 있다. 즉 슬라이딩게이트의 개도가 크면 유효면적이 커져 턴디쉬로부터 많은 양의 용강이 몰드안으로 유입되게 되는 것이다.

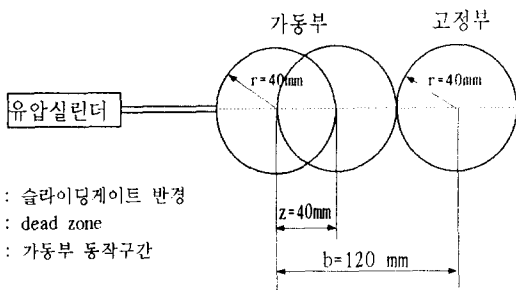


그림 [2] 슬라이딩게이트의 구동개념
Fig. [2] Operating of sliding gate

따라서, 턴디쉬에서 슬라이딩게이트를 통하여 몰드로 유입되는 용강의 양은

$$Q_1 = v_1 S_u \text{ ----- (3)}$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서, v_1 는 턴디쉬에서 몰드로 유입되는 용강의 유입속도(mm/s)로 턴디쉬내 용강의 높이변화와 슬라이딩노즐내벽의 용강마찰에 의한 영향은 매우 작으므로 무시한

다면 자유낙하로 가정해도 무방하다. 따라서 베르누이정리와 연속방정식으로부터 다음식이 유도된다.

$$v_1 = \sqrt{2gh} \text{ ----- (4)}$$

g 는 중력가속도이며, h 는 턴디쉬상면에서 슬라이딩노즐의 하단까지의 거리, 즉 용강이 낙하하는 높이를 표시한다.

또, S_u 는 두 슬라이딩게이트가 만나 생기는 유효단면적(mm²)이므로, 그림[3]의 빗금친 부분을 적분하면 아래와 같이 구해진다. 여기서, u 는 가동부의 위치(제어기출력)를 의미한다.

$$S_u = 0, \quad u \leq z$$

$$S_u = 4 \int_{\frac{u-z}{2}}^{\frac{u+z}{2}} \sqrt{r^2 - (x-u)^2} dx, \quad u > z$$

$$= \pi r^2 - 2r^2 \arcsin\left(\frac{b-u}{2r}\right) - \left(\frac{b-u}{2}\right) \sqrt{4r^2 - (b-u)^2} \text{ ---- (5)}$$

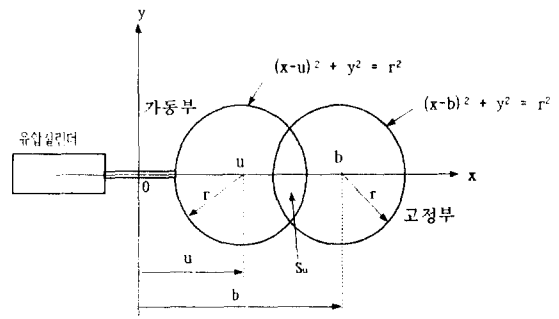


그림 [3] 슬라이딩게이트의 유효단면적
Fig. [3] Cross sectional area of sliding gate

몰드레벨을 L 이라고 하면 $V_1 = dL/dt$ 이므로

$$dL/dt = \frac{1}{A} (Q_1 - Q_0) \text{ ----- (6)}$$

이 된다. 결국 몰드레벨은 몰드내 용강의 변동량을 몰드면적으로 나눈값임을 알 수 있다.

3. 제어기설계

식(6)에서 Q_0 를 정확히 알고 있는 경우, 제어기설계시 용강의 유입량 Q_1 를 $Q_1 = K_p e + K_i \int e dt + Q_0$ 이 되도록 하여, Q_1 대신에 식(6)에 대입하면

$$dL/dt = K_p e + K_i \int e dt \text{ ----- (7)}$$

가 된다. 여기서, $e = L_d - L$ 인데 L_d 는 설정레벨 L 은 측정레벨을 의미 한다.

또한, $de/dt = -dL/dt$ 이므로

$$\ddot{e} + K_p \dot{e} + K_i e = 0 \text{ ----- (8)}$$

이 얻어진다.

식(8)에서 K_p 와 K_i 를 적절히 설정하면, $t \rightarrow \infty$ 일 때 $e \rightarrow 0$ 가 된다. 이때, K_p 와 K_i 는 제어기의 PI게인으로 오차 e 가 지수함수적으로 수렴하는 정도를 나타낸다.

이러한 제어기법을 피드백선형화(Feedback Linearization)라 부른다. 그러나 실제로는 여러가지 외란이나 불확실한 정보때문에 Q_c 를 정확히 알 수가 없다. 따라서 Q_c 대신에 추정치 Q_c' 를 사용하기로 하는데, 이것은 몰드폭의 설정치와 주조속도의 측정치으로부터 계산해 낼 수 있다.

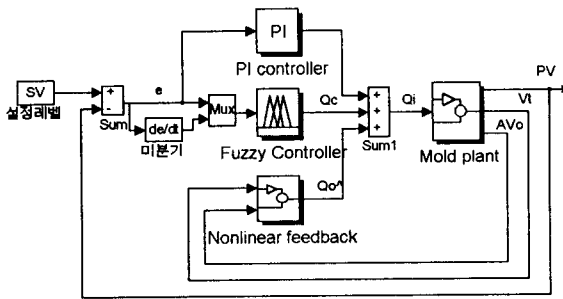
그러므로, $Q_c' = AK_p e + AK_i \int e dt + Q_c'$ 가 되도록 제어기를 설계하면 우수한 성능을 얻을 수가 있는데, 여기서는 Q_c 의 추정에 따른 추정오차 및 시스템에 필연적으로 존재하는 비선형성과 다양한 외란을 보상하기 위하여 Q_c 에 퍼지제어기의 출력 Q_c 를 추가하였다.

결국, 제어기의 출력은 다음식과 같이 표현할 수가 있다.

$$Q_c = Q_c + AK_p e + AK_i \int e dt + Q_c' \text{ ----- (9)}$$

위식에서 Q_c 는 퍼지제어기의 출력으로 퍼지화(Fuzzifier)는 싱글톤(Singleton), 비퍼지화(Defuzzifier)로는 무게중심(Center of Area)법, 추론은 Mamdani법을 사용하였다.

그림[4]는 식(9)로 표현되는 제어시스템의 구성도를 나타내며 이 제어기를 편의상 지능제어기라 부르기로 한다.



그림[4] 지능제어시스템의 블럭다이어그램

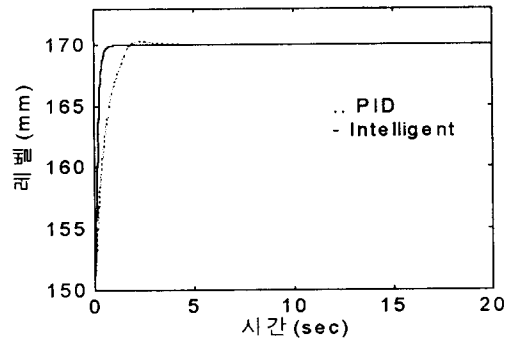
Fig.[4] Block diagram of intelligent control system

4. 모의실험

모의실험에 적용한 모델링플랜트는 포항제철소 2연주공장이며 실험은 일반적인 PID제어기와 지능제어기로 제어시스템을 별도로 구성하고, 조업조건의 변화나 외란이 발생한 경우 등에 대해 각각의 제어성능을 비교하는 것으로 하였다.

그림[5]는 레벨설정치가 스텝상(150mm→170mm)으로 변할 때의 제어결과를 나타낸 것으로, 실선으로 표시된 지능제어기의 응답

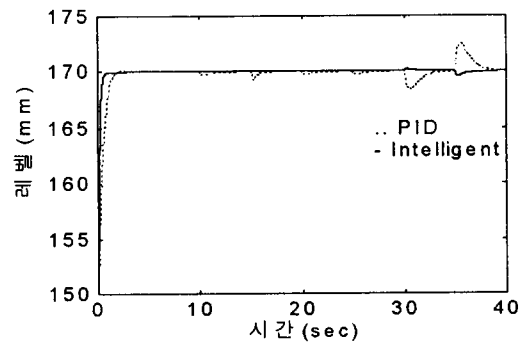
속도가 점선으로 표시된 PID제어기보다 매우 빠르며 오버슈트(over-shoot)도 전혀 발생하지 않는 이상적인 제어특성을 얻을 수 있었다.



그림[5] PID 및 지능제어기의 비교1

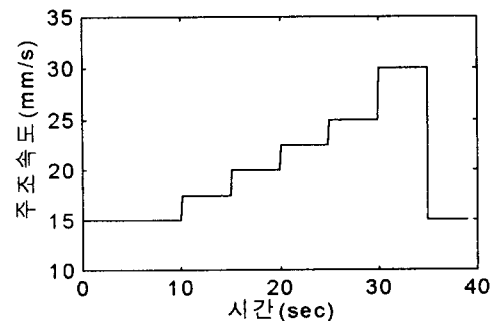
Fig.[5] Comparison of PID with Intelligent controller:case1

그림[6]은 운전중 주조속도가 변할 때의 제어결과로 PID제어기는 레벨변동이 심한 반면,지능제어기는 안정된 출력특성을 보여 주고 있다. 주조속도의 변화패턴은 그림[7]과 같은데, 실제 조업패턴과 달리 변동효과를 크게 하기 위해 스텝상으로 가정하였다.



그림[6] PID 및 지능제어기의 비교2

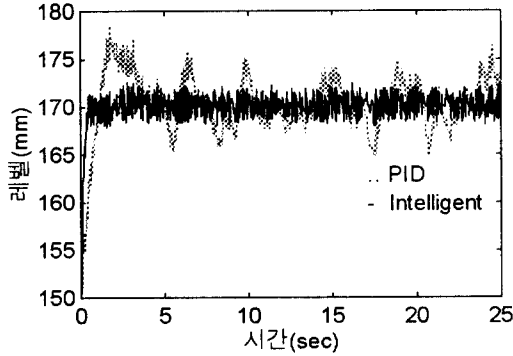
Fig.[6] Comparison of PID with Intelligent controller:case2



그림[7] 주조속도 변경패턴

Fig.[7] Pattern of casting speed

그림[8]은 레벨측정시 시스템에 노이즈가 가해진 경우의 제어 결과를 나타낸 것으로, PID제어기의 출력 진동폭은 $\pm 10\text{mm}$ 정도 인데 반해 지능제어기의 진동폭은 $\pm 3\text{mm}$ 정도로 제어능력이 개선된 것을 알 수 있다. 이 때의 노이즈는 최대진폭이 4mm이고 주기가 120 Hz인 것을 사용하였다.



그림[8] PID 및 지능제어기의 비교3

Fig.[8] Comparison of PID and Intelligent controller:case3

5. 결론

모의실험결과에서 나타난 것처럼 퍼지제어와 피드백선형화 성분을 결합시킨 지능제어기의 성능이 PID제어기보다 매우 우수한 것을 알 수가 있다. 즉 초기응답속도가 빠르고 조업조건변화에 적응성이 뛰어나며 외란이나 지연(delay)성분에 대해서도 강한 제어특성을 보여 주었다.

따라서, 연주공정의 물드레벨제어뿐만 아니라 시스템이 비선형성이나 외란을 가지고 있는 유사한 프로세스에 대해서도 기존의 PID 제어보다 본 논문에서 제시한 지능제어기법이 좋은 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] A.De Carli, P.Liguori, A.Marroni, "A Fuzzy-PI Control Strategy." Control Engineering Practice, Vol.2, No.1, pp.147-153, 1994
 [2] T.Hesketh, D.J.Clements, R.Williams, "Adaptive Mold Level Control for Continuous Steel Slab Casting." Automatica, Vol.29, No.4, pp.851-864, 1994
 [3] T.Kuribayashi, K.Fukuda, A.koyama, T.takawa, H.kato,

"Process Control Technology of Continuous Caster." 住友金屬, Vol.38, No.4, pp.31-38, 1986

[4] T.Kurokawa, t.Kondo, T.Mita, K.Liu, M.Sampe, "Development of Mold Level Control in Continuous Casting by H^∞ Control Theory." IEEE Conference on Control Applications, 1993
 [5] T.J.Manayathara, T.C.Tsao, J.Bentsman, D.Ross, "Rejection of Unknown Periodic Load Disturbances in Continuous Steel Casting Processing Using learning Repetitive Control Approach." IEEE Transactions on Control Systems Tech., Vol.4, No.3, pp.259-265, 1996
 [6] T.Tomono, T.Tsuruta, H.kagari, "Development of Technology for Mold Bath Level Control System of Continuous Caster." 鐵と鋼, 제73년, 제2호, pp.327-332, 1987
 [7] J.E.Slotine, W.Li, Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall, Newjersey, 1991
 [8] L.X.Wang, Adaptive Fuzzy Systems and Control; Design and Stability Analysis" Prentice-Hall, Newjersey, 1994
 [9] Z.Y.Zhao, M.Tomizuka, S.Isaka, "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers." IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.23, No.5, pp.1392-1398, 1993
 [10] 박민용譯, 퍼지제어시스템, 대영사, 1990
 [11] 이광형, 오길록, 퍼지이론 및 응용, 홍릉과학출판사, 1991
 [12] 이해영, 백기남, 임동진, "연속주조시스템에서의 주형레벨의 퍼지제어." RIST연구기보, 제5권, 제2호, 1991
 [13] 허윤기, "연주공정에서의 주형레벨과 주조속도의 퍼지제어방법에 관한 연구." KACC논문집, pp.663-666, 1995