

DOB를 이용한 제철설비용 강인 서보 제어시스템 구현

Design of the Robust Servo Control System for Steel Making Plant using Disturbance Observer Algorithm

김 동 삼*, 허 윤 제, 정완균**

* 포항공과대학교 철강대학원 (전화:(054)279-5946, 팩스:(054)279-8459, E-mail : dongsam@postech.ac.kr)

** 포항공과대학교 기계공학과 (전화:(033)279-2172, 팩스:(054)279-8459, E-mail : wkchung@postech.ac.kr)

Abstract : Among many servo control systems in steel making plant, AGC system in hot rolling mill is very important to get a accurate strip thickness for good quality. AGC (Auto Gauge Control) system controls the roll gap to maintain the required thickness by using the variation of roll force and the measure of output thickness. In this paper, a simulator of AGC system which unifies both hydraulic servo control system and AGC algorithm is suggested. After proving the concurrence of algorithms between the simulator and real system, main actuator system is added. Instead of usual PI system used in present system, DOB control scheme is applied and shows the effect of disturbance attenuation well.

Keywords : Automatic Gauge Control, AGC, Disturbance Observer, DOB, Hydraulic servo control.

1. 서론

고전적인 servo 제어 패턴에 기반을 두고 있는 제철 plant 서보 제어시스템은 안정적 시스템을 유지하기 위한 지속적인 개선으로 안정화 추세이나, 시스템이 매우 복잡하고, 다양한 외란의 영향으로 servo 제어시스템의 제품 품질향상 측면으로의 접근이 어려운 실정이다. 따라서 본 연구과제는 최근 발표된 신 제어기술을 바탕으로 제철 plant에 적합한 신 알고리즘을 개발하여 제품의 품질 향상을 그 목적으로 한다.

본 연구를 위한 대상설비는 제철 plant의 서보 제어시스템 중 제품의 품질에 가장 중요하다고 할 수 있는 열간 압연공정의 사상압연설비에 장치된 AGC 시스템을 대상으로 하고자 한다. 지금까지 출측 두께의 정도를 높이기 위한 연구방향이 주로 set-up model 식의 정밀도를 높이는 데 많은 연구가 이루어졌으며, 어느 정도 여러 수식 모델링의 많은 진전이 있었다. 하지만 아무리 정확한 set-up model 식이라도 많은 외란과 비선형이 존재하는 설비특성으로 set-up model 식의 정밀도만으로는 한계가 있으므로 보다 적극적인 대책이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 현행 제어시스템을 기본으로 하고, 저주파 대역의 외란에 강인한 제어시스템을 구현하여 판내 두께 편차를 최소화 하는데 그 목적이 있다.

본 논문에서는 우선 현행 운영되고 있는 고전적인 servo 제어패턴에 기반을 두고 있는 AGC 시스템의 방법과 특징을 분석하고, AGC 제어 plant의 모델을 실시하였다. 또한, 외란 측정기(Disturbance Observer)

제어기술의 이론적인 검토 및 이를 현 시스템에 적용하였고 실제 압연조업 실적 데이터를 적용하여 모의실험을 실시하여 기존시스템 보다 우수한 성능의 제어시스템을 구현 하였다.

II. 설비개요 및 AGC 제어이론

1. 사상압연 공정 layout

사상압연은 두께를 정밀 제어하는 공정으로 보통 6~7개조의 압연기로 구성 되어있다. 각 스탠드 마다 압하력 (roll force)을 측정하기 위한 압력센서(load cell: 하부 back-up roll 아래에 설치)와 상하부의 롤갭을 측정하기 위한 위치측정센서가 설치되어 있으며, 최종 스탠드 후방에는 X-ray 두께계를 설치하여 코일의 최종두께를 측정하도록 되어있다.

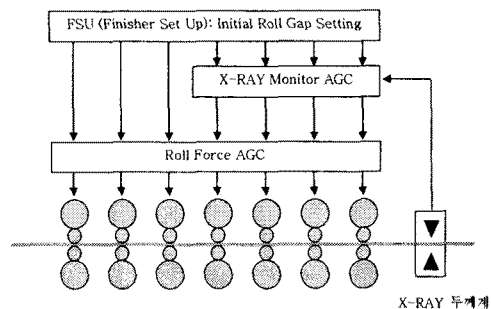
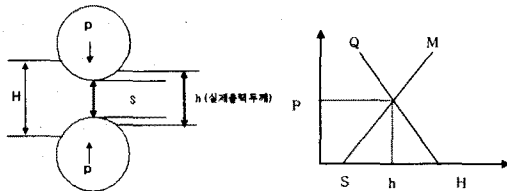


그림.1 사상압연기 layout
사상압연기를 들어오기 전에 압연기는 초기설정모델

(FSU)에 의해 계산된 초기 Roll 간격과 roll 속도를 가지게 된다. 소재가 압연기에 들어간 초기에는 이러한 초기 설정 값에 의해 두께제어가 이루어지며, 소재가 압연 stand에 들어간 후 lock-on 시점의 출측 두께를 기준으로 roll force AGC에 의해 두께 제어가 이루어지고 소재의 선단부가 최종 stand를 빠져 나오면서 X선 두께계에서 판 두께가 측정되면 roll force AGC와 X-ray monitor AGC에 의해 두께의 feedback 제어가 이루어진다.[5]

2. 압연 과정에서의 두께 결정



P: 밀의 압하력, H: 압연하기 전의 입측 판 두께, S: 기준 Roll 갭, M: 밀의 탄성계수, Q: 재료의 소성계수, h: 압연 후의 판두께

그림2. 밀의 탄성곡선과 재료의 소성곡선

$$P = M(h - S) \quad (1)$$

$$P = Q(H - h) \quad (2)$$

식(1)과 식(2)를 그래프로 나타내면 그림2와 같고, 밀 탄성곡선과 재료의 소성곡선의 교점이 압연하중 P에서의 출측 두께 (h)가 된다, 그러나 압연 과정에서의 출측 판 두께는 위와 같이 해석되지만 여러 가지 요인들에 의해 끊임없이 변화되어, 출측 두께(h)가 일정하게 유지 되지 않는다. AGC 제어 시스템이란 여러 가지 두께 변동요인들을 각종 센서로부터 검출하여 압연되는 순간에 압연력이나 장력을 제어함으로써 출측 판 두께에 두께오차가 남지 않도록 제어하는 것이다 [1]

3. AGC 시스템 두께제어 방식

3.1 Roll Force AGC

소재가 압연기에 진입하면 초기 압연하중이 매우 급격하게 변하게 되므로 약 후 0.9~1.5초 정도 지난 후 변화가 안정하게 되는데 이때 압연 하중을 메모리에 저장(lock-on)시킨다. roll force AGC는 lock-on 출측 두께를 기준으로 그 후 압연 하중의 변화로부터 출측의 판 두께를 산출하여 이 편차를 감소시키는 방향으로 롤 간격을 제어한다. 즉, 롤 간격과 압연 하중을 이용하여 예측 되는 값으로, 다음의 수식에 의해 계산된다.

$$h_o = S_o + \frac{F_o}{M}$$

$$h = S + \frac{F}{M}$$

$$\Delta h = h - h_o = \frac{F - F_o}{M} + S - S_o$$

$$\therefore \Delta h = \frac{F - F_o}{M} + \Delta S \quad (3)$$

여기서 h_o , F_o , S_o 는 각각 lock-on 시 기준 두께, 압하력, roll 간격이다. 따라서 Δh 를 0으로 하기위한 Roll 간격 이동량은 식(3)에 식(2)를 대입하여 정리하고, 실제 압하 장치에서는 지연이 있기 때문에 gain 을 부여하여 다음과 같이 사용한다.[1][3]

$$\Delta S = - \frac{M + Q}{M} \cdot G \cdot \Delta h \quad (4)$$

3.2 Monitor AGC

최종 stand 출측의 X-ray 두께계에 의해 판 두께편차의 신호를 받아서 Feedback 제어한다. 출측 판 두께 편차 Δh 를 0으로 하기 위해 필요한 roll 갭 이동량은 식(4)에 판의 주행 손실시간 (T_d) 및 gain (G)를 곱해서 이것을 비례 적분 제어를 사용하여 다음과 같이 나타낸다.[1][3]

$$\Delta S = - \frac{M + Q}{M} \cdot \frac{T_o}{T_d} \cdot G \cdot \Delta h \quad (5)$$

3.3 Roll force AGC & Monitor AGC

실제로 현장에서 적용하는 제어패턴으로는 그림3[2]과 같이 roll force제어가 main으로 동작하고 monitor AGC에 의한 제어가 보조적으로 각각 다른 주기로 제어가 이루어진다. Roll 간격 이동량 ΔS 의 계산은 식 (6)과 같이 Δh_{RF} (roll force AGC)에 Δh_{MON} (monitor AGC)를 더한 새로운 Δh 를 이용하여 계산한다.

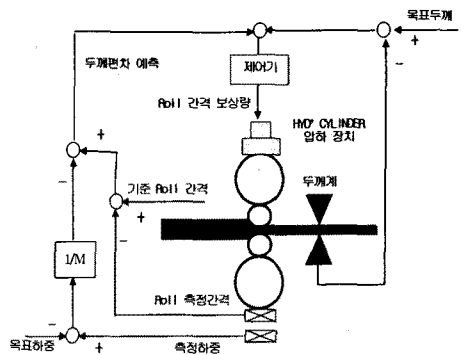


그림3. 실제 사상압연의 두께 제어도

$$\Delta h = \Delta h_{RF}(\text{roll force AGC}) * \Delta h_{MON}(\text{monitor AGC})$$

$$\Delta S = -\frac{M+Q}{M} * (\Delta h_{RF} * G_{RF} + \Delta h_{MON} * G_{MON} * \frac{T_0}{T_d}) * \alpha \quad (6)$$

III. 외란 관측기(Disturbance Observer)

1. Disturbance Observer 의 원리

1987년 Ohnishi 에 의해서 처음으로 제안된 이후 시스템의 identification, 정밀제어, 로봇제어 등 모든 분야에 널리 사용되고 있으며, 원리는 그림4 에서 보는 바와 같이 시스템에 외란d가 들어오면 그 플랜트의 역을 통과한 신호(ε_2)와 외란이 들어오기 전의 신호 (ε_1)의 차로써 외란 d를 추정하게 되는데 이 추정된 값을 피드백 시킴으로써 외란을 제거하고자 하는 목적을 가지고 있다.

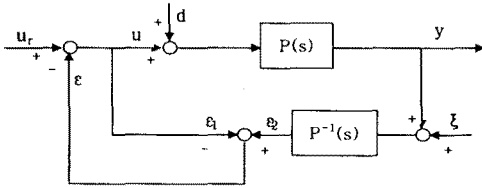


그림4. Disturbance Observer 의 개념적 구조

그러나 그림4는 실제 시스템에 적용이 불가능하다. 그 이유는 실제 플랜트에 대한 완벽한 모델링이 불가능하고 플랜트의 역으로 표현되는 $P^{-1}(s)$ 은 구현이 불가능하다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 사용되는 것이 저역통과 필터이다.

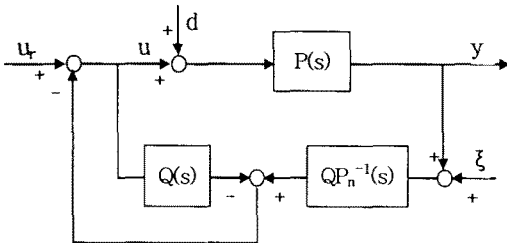


그림 5 구현 가능한 형태의 외란 관측기

그림5는 실제로 구현 가능한 외란 관측기의 형태이다. 그림에서와 같이 ε_1 과 ε_2 의 위치에 저역통과 필터 Q 를 첨가하여 위의 문제를 해결한다. 또한, 그림5의 P^{-1} 대신에 실제 플랜트에 대한 모델링 값인 P_n^{-1} 으로써 구현한 것이다. 이때, 실제 플랜트와 명목 플랜트 사이에는 섭동이 존재하게 되는데 이는 외란 관측기의 안정성 해석에 중요하게 작용한다. 그림5에서의 외란 관측기의 입력과 출력들의 관계인 전달함수는 다

음과 같이 표현된다.

$$v = G_{u \rightarrow v}(s)u_r + G_{d \rightarrow v}(s)d + G_{\xi \rightarrow v}(s)\xi$$

여기서 $G_{u \rightarrow v}(s)$, $G_{d \rightarrow v}(s)$, $G_{\xi \rightarrow v}(s)$ 는 각각 다음과 같은 전달함수를 갖는다.

$$G_{u \rightarrow v}(s) = \frac{PP_n}{P_n + (P - P_n)Q}$$

$$G_{d \rightarrow v}(s) = \frac{PP_n(1-Q)}{P_n + (P - P_n)Q} \quad (7)$$

$$G_{\xi \rightarrow v}(s) = \frac{PQ}{P_n + (P - P_n)Q}$$

식(6)에서 외란 관측기의 성능이 저역 통과 필터(Q/Q Filter) 에 매우 의존한다는 것을 알 수 있다. 따라서 실제로 Q Filter의 roll-off rate와 시상수(time constant)가 외란 억제와 잡음감 사이의 대역을 결정하게 되는데 이에 따라 외란 관측기의 성능이 결정된다. 식 4.1 에서 만약 $Q(s) \approx 1$ 이면 다음과 같은 전달함수가 얻어진다.

$$G_{u \rightarrow v}(s) \approx P_n, \quad G_{d \rightarrow v}(s) \approx 0, \quad G_{\xi \rightarrow v}(s) \approx -1$$

만약 $Q(s)$ 를 1에 근접시키면 외란은 제거되고 실제 플랜트 P가 명목 플랜트 P_n 처럼 거동하는 특성을 보인다. 그렇지만 측정 잡음은 모두 통과시키는 좋지 않은 특성도 있다. 이와는 반대로 만약 $Q(s) \approx 0$ 으로 하면 다음의 결과가 얻어진다. [4]

$$G_{u \rightarrow v}(s) \approx P, \quad G_{d \rightarrow v}(s) \approx p, \quad G_{\xi \rightarrow v}(s) \approx -0$$

이처럼 고주파 영역에서는 외란과 입력에 대해서는 실제 플랜트 P처럼 거동하고 고주파 성분이 주요한 측정 잡음을 제거시켜주는 특성을 보여주고 있다.

IV. 모델링 및 모의실험

1. Simulator 설계

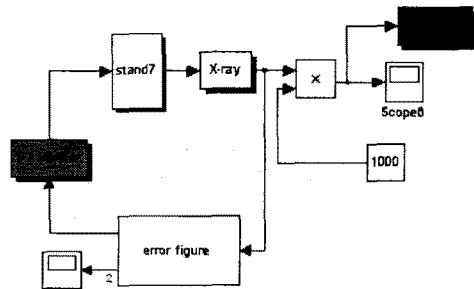


그림.6 AGC simulator 구조

그림3의 실제 제어구조에 의해 사상압연 마지막 stand 7을 선정하여 roll force AGC와 monitor AGC를 포함한 simulator를 MATLAB에서 그림6과 같이 작성하였으며, 실제 현장의 압연 data를 입력하여 모의실험을 실시하였다.

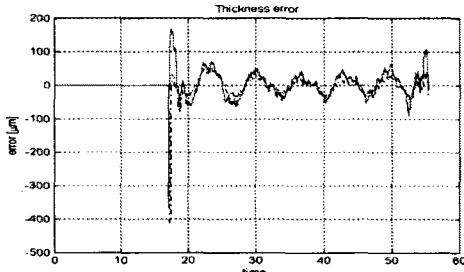


그림7. simulator에 대한 정확도

simulator의 신뢰성을 판단하기 위해 실제 stand 7을 통과한 철판의 두께편차와 simulation data를 비교한 결과 simulator의 정확성이 그림7과 같이 양호한 것으로 나타났다. 그림에서 실선이 실제 출측 두께편차이고, 점선이 simulation 한 편차이다.

2. System Modeling 및 모의실험 결과

본 연구의 관심 대상이 Hydro-servo system의 modeling이므로 이를 설계하여 현장 압연 data를 대체하였다. valve current U 와 strip에 작용하는 F 에 대한 transfer function은 다음과 같이 모델링 된다. [6]

$$\frac{F}{U} = \frac{5.31 \times 10^8 s + 1.05 \times 10^9}{s^4 + 60s^3 + 1,318s^2 + 6,265s}$$

위의 같은 모델을 MATLAB에서 작성된 simulator에 적용한 후 disturbance를 servo valve 입력전류 최대치에 근접하는 10mA의 크기와 0.1 mA/sec의 주파수를 가지는 sine wave로 가정하여 입력하고 현행 PID제어에 대한 응답과 동일 상황에서 DOB를 적용한 응답과의 모의실험을 비교한 결과 그림8과 같은 결과를 보인다.

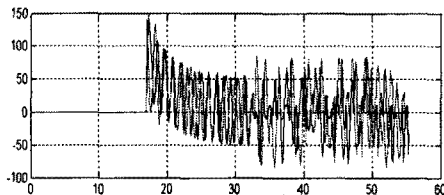


그림 8. DOB 적용 전후의 두께편차

그림8에서 실선은 PID제어에 대한 두께편차이고 점선은 PID제어기에 DOB를 적용한 두께편차를 나타낸다. 여기서 Stand 7의 lock-on 시점인 17.95 sec부터 압연이 끝나는 55.3 sec까지 평균 두께편차는 PID 제어기만 적용 시 5.5262 μm 이고 PID제어기에 DOB를 적용한 평균 두께편차는 5.4730으로 두께편차가 감소함을 알 수 있다.

V. 결론

기존의 연구에서 hydro-servo system 단독에 대한 제어방법 검토가 이루어 졌거나[6], actuator system을 제외하고 AGC 제어 알고리즘상의 AGC gain module만을 조정 하였다[2]. 이에 반해 본 논문에서는 actuator system을 포함한 AGC 제어 알고리즘에 DOB를 적용하여 모의실험을 실시한 결과 기존의 간단한 PI제어기를 가진 알고리즘 보다 낮은 결과를 보였다. 향후 Q filter의 설계부분은 최적화를 통하여 다소 조정 할 필요가 있는 것으로 판단되며, Q filter의 최적화 후 DOB를 적용한 알고리즘을 현장 적용한다면 현재의 모의실험 결과보다 낮은 결과가 나올 것으로 판단되며, 열연 철판제품의 두께품질에 향상에도 기여 할 것으로 생각한다.

참고문헌

- [1] 한국과학기술원 연구보고서 "열연 두께 제어시스템개발(1)" 1996.
- [2] 정영란 "Neuro-Fuzzy Logic을 이용한 열간압연 공정의 AGC gain 자동조절에 관한 연구" 포항공과대학교 전자공학과 석사학위 논문 2001.
- [3] POSCO "열연 AGC 서보제어이론과 실제" 1999.
- [4] 양광진 "개선된 에러에 기초한 외란 관측기의 분석과 설계 및 광 디스크 시스템으로의 적용" 포항공과대학교 기계 및 산업공학과 석사학위 논문 2002.
- [5] 서강렬 "열연 FM진동에 따른 코일 두께 오차 감소를 위한 제어방안 연구" 포항공과대학교 철강학과 석사학위논문 2003.
- [6] Jae-Cheon Lee, Seong-Jin Kim "An investigation into the PID control for the Electro-Hydraulic Servo System of Skin Pass Mill" International Journal of the Korean Society of Precision Engineering November 2001.