

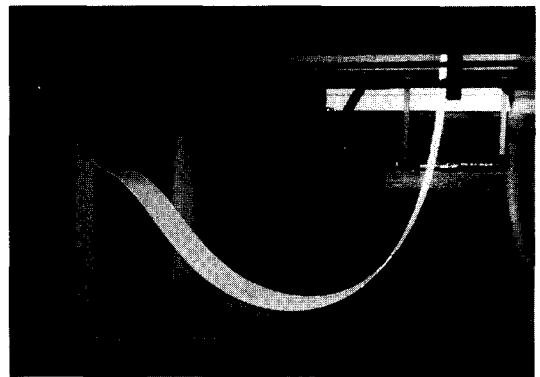
# 스트립 캐스터 모델링 및 시뮬레이션 (The Strip Caster Modeling and Simulation)

李 德 萬, 姜 泰 旭, 李 振 秀  
浦項工大 電子電氣工學科  
産業科學技術研究所

## I. 서 론

최근 새로운 주조 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 현재 사용되고 있는 주조 형태는 1960년대부터 도입되기 시작한 continuous casting이라고 알려진 연속 주조 방식을 사용하고 있다. 이 주조방식은 생산된 용융 쇳물, 즉 용강으로부터 직접 슬라브(slab), 빌렛(billet) 또는 블룸(bloom) 등 최종 제품의 형태에 보다 근접한 형태의 소재를 용강으로부터 직접 주조할 수가 있어 재래식 조괴 및 붕괴(ingot casting-slabbing mill) 공정에 비하여 품질의 향상 뿐만 아니라 원가절감에 크게 기여하였다.<sup>[6]</sup>

그러나 일상생활에 우리가 이용하는 철판들은 대부분이 약 1~2mm 정도에서 응용되고 있으므로 (식기, 주방용품, 자동차용 철판, 건축자재 등) 이러한 얇은 철판을 만들기 위해서는 냉각된 slab를 다시 가열하여, 압연 과정을 통해 그 두께를 감소시킬 필요가 있다. 이러한 압연과정은 여러 단계를 통한 점진적 두께 축소과정이 동반된다. 마지막으로, 두께가 감소된 철판은 냉연이나 기타 후처리 과정을 거친 후에 완제품으로 필요 사용자에게 공급된다. 보통, 이러한 공정을 이루기 위해서는 약 600m 정도의 공간과 막대한 에너지 및 인력이 요구된다고 한다.



〈그림 1〉 Strip loop exiting

이와 같은 막대한 손실을 줄일 수 없을까 하는 연구가 약 150년 전부터 연구되어 왔다. 그 당시, Sellers, Laing, Bessemer 등의 사람들은 쇳물에서 바로 원하는 두께의 철판을 생산할 수 없을까 하는 연구를 수행하였다. 이들은 쌍롤(twin roll) 기법을 사용한 구조를 제시하였다. 그러나 그 당시에는 여러 제반 시설(균일한 용융금속의 주입, 적절한 환원성 분위기 조절, 계측, 제어기술) 중 특히 컴퓨터 제어시스템이 확립되지 않은 시기여서 실용화에는 실패하였다.<sup>[7]</sup> 그러나, 그 후 컴퓨터 기술의 급격한 발달로 Bessemer 등의 아이디어를 실용화하려는 움직임이 많아졌다. 현재 이 분야에서는 우리나라를 비롯하여 일본, 미국, 프랑스, 이태리, 독일, 오스트리아 등의 나라들이 경쟁적으로 상업화를 위해 노력하고 있으나 아직 상용화된 플랜트는 발표되지 않은 상황에 있다.

우리나라에서 개발되고 있는 스트립캐스터 플랜트 모양은 그림 2과 같다. 여기에서는 쌍롤 기법을 사용하였다. 주조방식을 간략히 설명하면 다음과 같다.<sup>[5]</sup> 전기용광로에서 만들어진 쇳물은 Ladle이라고 하는 쇳물보관 통에 옮겨진다. 주조시에는 이 Ladle로부터 일차 완충 보관통인 Tundish에 옮겨지게 된다. Tundish에 있는 쇳물은 모터에 의해 움직이는 연필모양의 스톱퍼(stopper)에 의해 그 양이 조절되면서 롤 사이에 직접 주입된다. 주입된 쇳물은 모터에 의해 회전하는 롤과 유압에 의해 움직이는 Moving Roll에 의해 압연과정을 거치면서 롤 사이를 빠져나와 공기와 냉각수에 의해 급속히 냉각되면서 완제품에 가까운 제품으로 바로 생산

된다. 본 시험 플랜트는 약 60m 정도의 크기로 약 3mm 정도의 철판을 5분 정도에 완제품 수준으로 만들 수 있는 능력을 지니고 있다.

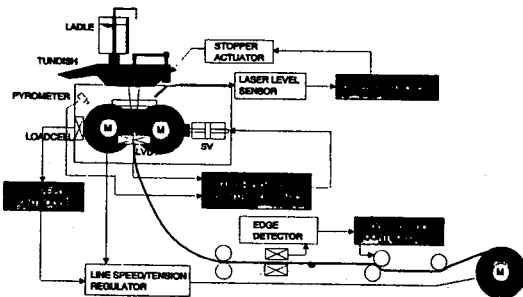
이러한 스트립캐스터 개발로 다음의 장점을 생각할 수 있다. 현재 사용하는 연속주조법에 있어 재가열과 열연과정 등에 필요한 열간 압연공정 거의 전체를 생략할 수 있어 건설과 장비, 운영에 필요한 인력 및 에너지 절감이 연간 수 조원에 이를 것으로 평가되고 있다. 또한 21세기 철강기술중의 하나인 이와 같은 신주조 기술들의 개발이 완료되어 감에 따라 이제까지 일관종합체철에서 거의 독점한 철강박판 시장은 장치시설이 대폭 경량화됨에 따라 최종 수요가와 지리적으로 보다 근접한 지역에서 수요가의 급변하는 요구품질 및 수량에 대해 보다 탄력적으로 대응할 수 있는 소규모 철강사의 신규참여가 예상된다.

## II. 스트립 캐스팅 제어 문제

스트립 캐스팅의 주요 제어 목적은 일정한 두께의 철판을 균일한 재질로 제한된 시간내에 생산하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서 스트립 캐스트 플랜트는 크게 3가지의 제어 loop으로 구성되어 있다.

첫째, 일정 Roll Gap을 유지하기 위한 제어 loop이 있다. 여기에서 Roll Gap은 Gap Sensor로 직접 측정이 가능하고 한쪽 Roll은 유압 시스템에 의해 움직여지는 구조로 되어 있어 Gap 오차를 적절히 보상하는 시스템을 구축할 수 있다. 이 제어 Loop은 일정한 철판두께를 만들기 위해 필수적인 것으로 보통 목표 철판 두께가 2~6mm 정도이므로 오차는 수 마이크로 대로 제한되어야 상품성이 보장된다.

둘째, 양 롤 사이의 쇳물의 높이를 제어하는 제어 Loop이 있다. 주조시에는 쇳물의 높이를 적절한 높이로 유지할 필요가 있다. 왜냐하면, 쇳물이 높을 경우 응고가 빨리 일어나 Roll Force가 증가하여 Roll Gap이 벌어진다거나 반대로 쇳물이 낮



(그림 2) Schematic layout for pilot strip caster

을 경우 응고점(Kiss Point)이 기준선(Nip Point) 이하로 내려가 쇳물이 응고되지 않은 상태로 아래로 흘러내릴 위험이 존재하기 때문이다. 현재 롤 사이의 쇳물의 높이를 측정하는 장비로는 Laser에 기반한 방식과 CCD에 기반을 둔 방식이 적용되고 있으며 앞으로는 와전류나 감마레이에 기초한 센서의 응용도 등장하리라 예상된다.

셋째, Roll Separation Force를 적절히 제어해야 한다. 압연과정은 철판의 성질을 결정짓는 중요한 과정이므로 적절한 압력으로 압연할 필요가 있다. 이러한 Roll Force 제어를 위해 Load Cell을 통해 Force를 측정하고 롤의 속도를 변화시킴으로써 Force를 Regulation 한다.

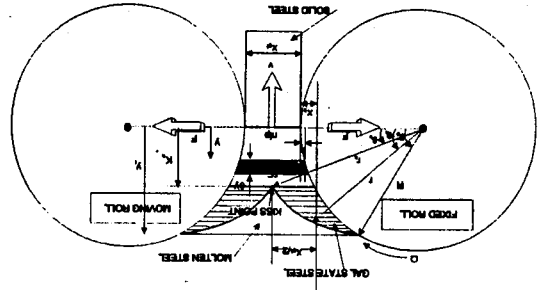
이러한 스트립 캐스트 제어 시스템은 각 제어변수가 서로 Couple된 다변수 제어 시스템으로서 각각의 제어 변수가 서로 영향을 주고 받는 복잡한 구조를 가지고 있어 제어 알고리즘의 설계에 여러 인자를 생각해야 한다.

### III. 스트립 캐스터 제어 모델

앞 장에서도 언급하였듯이 크게 3가지 제어 루프를 가진 시스템의 모델을 수학적으로 구하였다. 수식의 유도에 있어 시스템의 기하학적 모양과 기존에 성립된 동역학 및 유체역학 방정식들을 이용하였다.

#### 1. Shell Growth Model

그림 3에서 보는 바와 같이 Strip을 만들기 위한 두 개의 Roll 과 그 사이에 주입된 Molten Steel의 응고과정에 주목하자. 일반적으로 두 개의 Roll 속에는 Roll을 식히기 위한 냉각수가 흐른다. 그러므로 각 Roll은 Heat Sink의 역할을 하게 되며 두 Roll 사이에 주입된 액체 상태의 철은 Roll이 회전하는 속도와 두 Roll이 벌어진 정도, 응고율에 따라 그림 3과 유사한 모양으로 응고되는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 과정을 수식으로 묘사하면 다음과 같이 된다.



(그림 3) Mathematical model definition

$$\frac{\partial r}{\partial t} = \Omega \frac{\partial r}{\partial \theta} + \frac{b}{1 + a(r-R)}, \theta_0 > \theta > 0 \quad (1)$$

여기서  $\Omega$ 는 Roll의 각속도이고  $\theta$ 는 Roll Center에서 Shell 표면까지 그른 직선 벡터  $r$ 과 수평선이 이루는 각도이다. 모델링을 하기 위하여 Roll은 속이 빈 실린더 타입이고 내부 Cooling Unit과 표면과의 실 두께는  $a$ 라고 가정한다.  $b$ 는 단위 시간당 임의점에서 Shell의 응고율을 나타낸다.<sup>[1,2]</sup>

#### 2. Roll Separation Force Calculation

변수  $F$ 를 RSF(Roll Separation Force)를 나타내는 값으로 정의하면 그 값은 Nip Angle을 0 Radian부터 쇳물이 응고되기 시작하는 Kiss Point 각  $\theta_k$  Radian까지 압축응력을 탄성모델로 근사화하면 다음 식으로 계산하여 구할 수 있다.

$$F = \lambda \int_0^{\theta_k} \frac{2(x_0 x) R \cos \theta}{x_0 + 2x} d\theta \quad (2)$$

여기서 그림 3으로부터  $x$ 와  $x_0$ 는 유도할 수 있다.

윗 식에서 Strip의 Stiffness 인자인  $\lambda$ 는 Roll의 폭 방향길이에 비례한 것을 제외하면 주어진 철의 종류에 종속되는 상수값이다.<sup>[1,2]</sup>

#### 3. Level Calculation

그림 3에서 보아 알 수 있듯이 Molten Metal

Level의 변화량은 쇄물이 Roll Bite에 주입되는 입력 양과 Nip Point를 지나 빠져나가는 출력량을 대수적으로 계산하면 구할 수 있다. 즉 입력 양을  $Q_{in}$ 라하면 출력량은 Roll Gap과 Roll의 회전속도  $v$ , 및 Roll의 폭 방향 길이에 종속된다. 이러한 관계를 이용하여 식을 적으면 다음과 같게 된다.<sup>[2,3]</sup>

$$A_r = \sqrt{R^2 - y_l^2} \tag{3}$$

$$= \frac{1}{A_r L} (Q_{in} - Q_{out})$$

$$\dot{y}_l = \frac{1}{A_r L} (Q_{in} - v_r L x_g) \tag{4}$$

$$y_l = \int_0^t \dot{y}_l dt \tag{5}$$

4. Roll-Gap Dynamics

Roll Gap Dynamics를 모델링하기 위하여 서로 연결된 물리적인 요소들을 고려하여야 한다.

첫째, Hydraulic System이다. 이 시스템은 Hydraulic Supply, Servo Valve, Roll Positioning Ram 등으로 구성되어 있다.

둘째, Piston Assembly와 Roll 등으로 뉴톤 역학의 지배를 받는다.

이러한 것들을 종합한 것들을 식으로 적으면 다음 식으로 정리된다. 그림 4는 제어 밸브와 연관된 Main Flow와 Pressure Variable을 그림으로 표시하고 있다. 공급 압력  $P_s$ 는 Main Pump에서 Main Roll Positioning Cylinder로 공급된다. 이 실린더는 AGC 제어 시스템에서 나오는 제어 명

령에 의해 제어되는 Servo Valve의 Spool 변위  $d$ 에 비례하여 속도가 결정된다. 펌프에서 Servo Valve로 유입되는 유량  $q$ 는 working circuit으로 들어가는 유량  $q_w$ 와 leakage 성분  $q_l$  압축 유량  $q_c$ 로 나누어 진다.

$$p_l = p_a - p_b \tag{6}$$

$$q = q_w + q_l + q_c$$

$$= k_v \cdot d \cdot \sqrt{(p_s - p_l)}, \text{ 단 } p_s > p_l$$

$$q_l = r_l^{-1} \cdot \sqrt{|p_l|} \cdot \text{sign}(p_l) \tag{7}$$

$$q_w = A_{cyl} \cdot \frac{dx_g}{dt} \tag{8}$$

여기서  $k_v$ 는 밸브 상수이고  $r_l$ 은 누출저항(leakage resistance)  $A_{cyl}$ 은 실린더의 피스톤 단면적이다. 그림 4에서 보듯이 main piston에 작용하는 차동 압력은  $P_a - P_b$ 이다. 이 차동 압력에 의해 유량 손실이 발생하며 그 식은 다음과 같이 주어 진다.

$$q_{in} - q_{out} = \frac{dV}{dt} + \frac{V}{B} \frac{dp_l}{dt} \tag{9}$$

$$q - q_w - q_l = q_c = \frac{V}{B} \frac{dp_l}{dt} \tag{10}$$

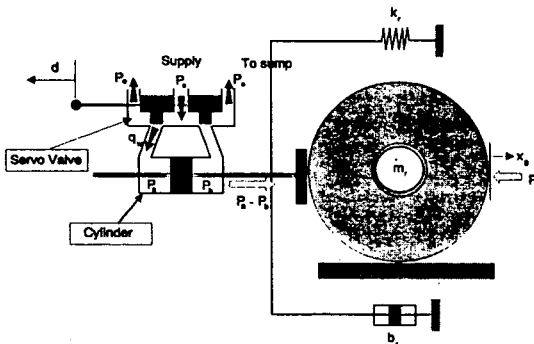
여기서  $V$ 는 실린더 체적이고  $B$ 는 bulk modulus이다.

Roll 부하와 Hydraulic 시스템 및 외력  $F$ 가 연관되는 뉴톤 역학 방정식은 다음과 같다.

$$2A_{cyl} p_l = m_r \cdot \frac{d^2 x_g}{dt^2} + b_r \cdot \frac{dx_g}{dt} + k_r \cdot x_g - F \tag{11}$$

$$A_{cyl} \cdot \frac{dx_g}{dt} = q - q_l - q_c \tag{12}$$

여기서  $m_r$ 은 롤 질량,  $b_r$ 는 viscous friction coefficient  $k_r$ 은 탄성계수를 나타낸다.<sup>[2,3]</sup>

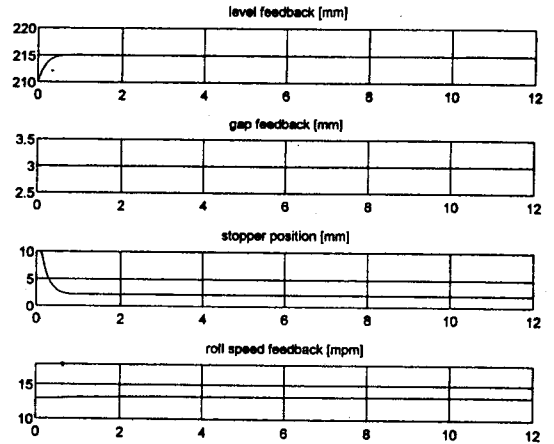


(그림 4) Hydraulic valve model

#### IV. 스트립 캐스터 시뮬레이터

앞 장에서 유도된 수식들을 바탕으로 실 시스템을 모방한 시뮬레이터를 만들었다. 작성된 시뮬레이터는 작업의 성격에 따라 두 가지 형태로 개발되었다. 첫째는 사용자 인터페이스와 수정의 간편성을 위해 Matlab과 Simulink를 조합한 것이 있고, 둘째는 시뮬레이션의 속도를 개선하고 여러 알고리즘을 자유자재로 개선하기 위한 C 프로그램만으로 작성된 것이 있다.

본고에서는 Matlab으로 작성된 시뮬레이터에 대해 간단히 설명하고자 한다. 본 시뮬레이터(Matlab Simulator)는 Matlab에서 제공하는 기본적인 함수를 이용하였고 전체 다이내믹스를 구성하기 위해 Simulink와 S-Function을 이용하여 그래픽화 하였다. 이렇게 함으로써 개발자 및 시스템 운영자는 전체 시스템을 한 눈에 파악할 수 있고 실 시스템의 동역학적인 성격을 잘 이해할 수 있다. 사용자는 여러 시스템 파라미터를 여러 가지로 변화시켜가면서 시스템의 추이를 그래프 툴로 관찰할 수 있으며 필요에 따라 로깅도 선택적으로 할 수 있다. 현재 본 시뮬레이터의 제어부는 독립된 3가지의 PID 알고리즘을 사용을 기본으로 하고 있으며 필요에 따라 사용자가 원하는 제어를 별도로 작성하여 쉽게 대처할 수 있는 구조를 지니고 있다.

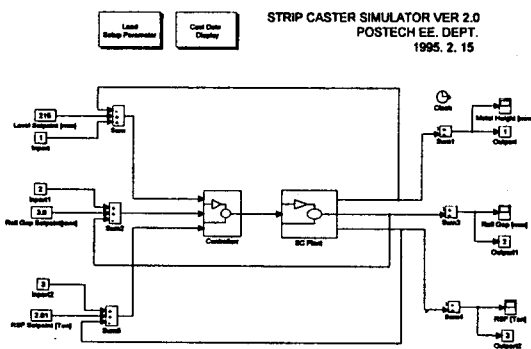


〈그림 6〉 PID 제어를 사용했을때의 결과

그림 5는 Matlab으로 작성된 시뮬레이터를 나타내고 있으며 PC나 Workstation 상에서 Matlab이 지원되면 사용가능하다. 그림 6은 이 시뮬레이터를 사용하고 PID 제어를 사용했을 때의 결과를 보여준다.

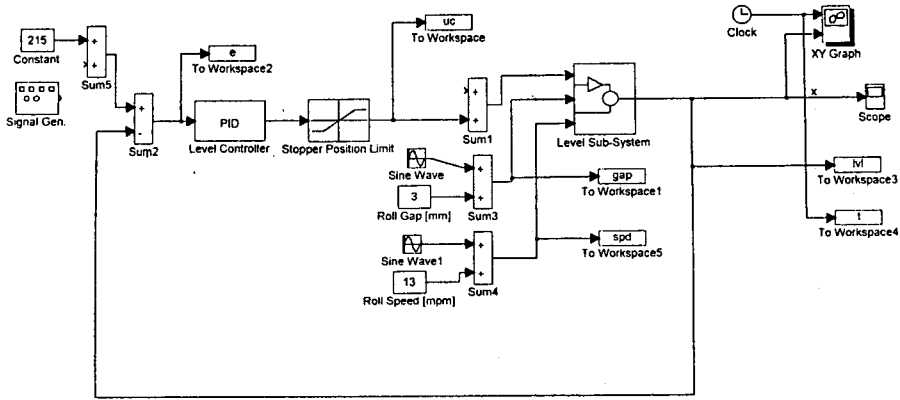
#### V. 시뮬레이션

본 장에서는 개발된 수식 모델을 이용하여 제어 알고리즘의 시뮬레이션을 수행하여 보았다. 앞 장에서는 독립된 PID 제어를 사용했을 때의 결과를 보였으며 이 장에서는 간단히 다른 지능 제어 알고리즘의 응용 예로써 Molten Metal Level 제어에 초점을 맞추어 결과를 보이고자 한다. 본 시뮬레이션은 적응 퍼지제어알고리즘<sup>[9]</sup>과 PID 제어 알고리즘을 사용하여 Metal Level 제어에 있어 시스템의 성능을 작성된 시뮬레이터를 통해 비교분석하였다. 그러나 Gap과 RSF Sub-System은 없지만 실제성을 부가하기 위해 Level 모델에 Gap과 Roll Speed의 변화를 외란으로 사용하여 이러한 외란 상황에서도 시스템이 잘 제어될 수 있는지를 분석하였다(Gap의 변동 외란은 주로 롤의 찌그러



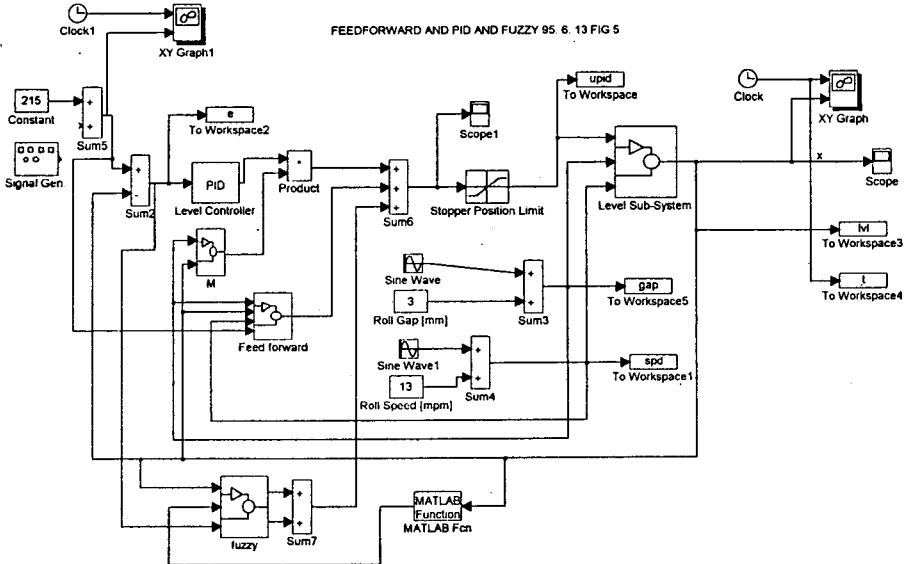
〈그림 5〉 스트립 캐스터 Matlab Simulator

PID LEVEL CONTROL 95. 6. 13 Fig 1



〈그림 7〉 PID control system

FEEDFORWARD AND PID AND FUZZY 95. 6. 13 FIG 5



〈그림 8〉 Adaptive fuzzy control system

짐에 주로 기인하며 주기적인 파형이다. 속도의 변동은 이러한 롤의 찌그러짐이나 기타 요인에 의한 RSF(Roll Separation Force) 변동치를 없애고 기준치로 RSF를 제어하려는 제어 동작에 의해 변화가 된다). 그림 7는 PID 제어기를 사용한 제어 시스템이고 그림 8은 시스템의 모델 정보와 Adaptive Fuzzy 제어기를 사용한 제어시스템을 나타낸다. 다음은 각각의 시뮬레이션과 그 결과에 대한 분류이다. 여기서 Gap의 외란은  $0.5\sin(2\pi \cdot$

$t)$  파형을 이용하였고 Roll Speed 외란은  $\sin(2\pi/3 \cdot t)$  파형을 사용하였다.

### 1. Adaptive Fuzzy 제어기

본 절에서는 Molten Level Sub-System의 제어에 사용된 Adaptive Fuzzy 제어기를 간단히 설명하고자 한다. 3장에서 유도하였듯이 롤 사이의 Metal Level의 다이내믹스는 다음 방정식을 따른다.

$$\dot{y} = \frac{1}{A_s L} (Q_{in} - Q_{out}) \quad (13)$$

여기서  $A_s L$ 을  $M$ 이라고 정의하여 다시쓰면  $\dot{y} = 1/M(Q_{in} - Q_{out})$ 가 된다. 그런데  $A_s$ 과  $Q_{out}$ 는 롤의 기하학적 형태와 Mass Flow 법칙에 의해 아주 근사하게 수학적으로 묘사될 수 있으므로 이 정보를 포함하는 제어 입력을 구상해 볼 수가 있다. 그래서 제어 입력은 다음과 같이 퍼지입력, PD 입력, 모델 정보가 혼합된 입력으로 구성한다.

$$Q_{in} = u_c + u_s + u_{fd} \quad (14)$$

여기서  $u_c$ 는 퍼지제어기의 입력이고  $u_s$ 는 감시 입력으로 시스템의 상태변수(state)가 어떤 제한된 범위를 벗어날 때 동작한다.  $u_c(y | \theta)$ 를

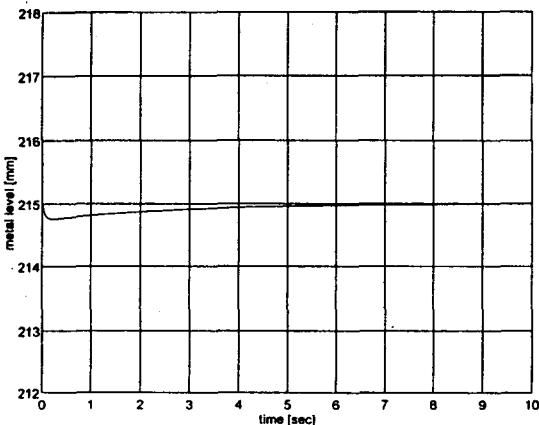
$$f(\underline{x}) = \sum_{i=1}^M \theta_i \xi_i(\underline{x}) = \underline{\theta}^T \underline{\xi}(\underline{x}) \quad (15)$$

의 형태로 퍼지제어기를 구성하였을 경우  $\underline{\theta}$ 를 조절하는 적응제어 법칙은 다음과 같이 된다.

$$\underline{\theta} = re\hat{\xi}(y) \quad (16)$$

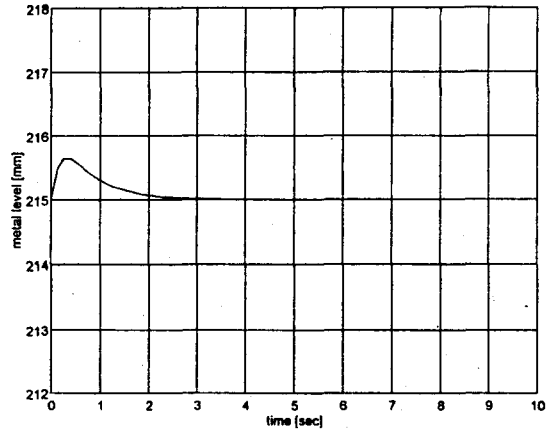
여기서 Adaptive Fuzzy 제어기는 [9]를 참조하였고 모델 정보를 더 추가하여 시뮬레이션 한 것이 본 시뮬레이션의 특징이라 할 수 있다.

[실험 1] PID 제어기를 사용하고 외란이 존재하지 않을 때. (그림 9)



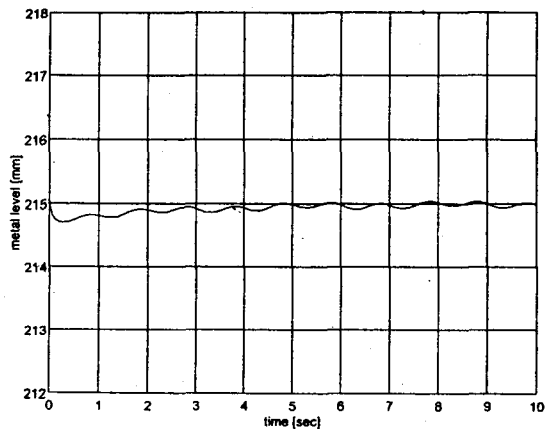
〈그림 9〉 PID controller without disturbance.

[실험 2] Adaptive Fuzzy 제어기와 모델정보를 사용하고 외란이 존재하지 않을 때. (그림 10)



〈그림 10〉 Adaptive fuzzy controller without disturbance.

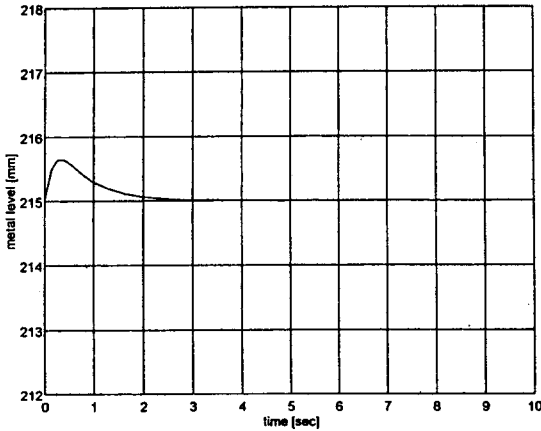
[실험 3] PID 제어기를 사용하고 외란이 존재할 때. (그림 11)



〈그림 11〉 PID controller with disturbance.

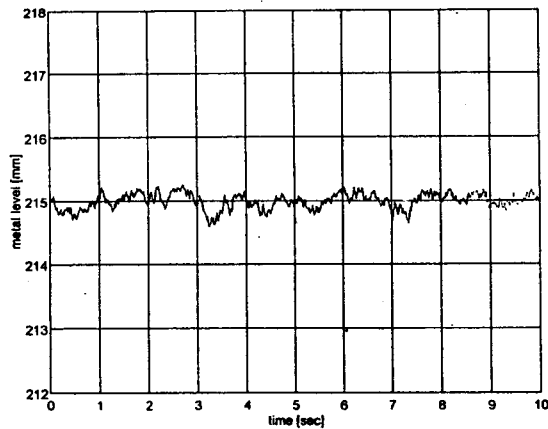
시뮬레이션 결과 단순히 PID 제어기만 사용한 경우는 외란의 크기가 작을 때 또 센서 노이즈가 작을 때 어느 정도의 성능을 내었으나 외란의 크기가 증가하면 제어에 그만큼 문제가 발생하였다. 이와 반면 Adaptive Fuzzy 제어기의 경우는 양쪽 모두 다 양호한 결과를 내었다. 모델에러가 50%

[실험 4] Adaptive Fuzzy 제어기와 모델정보를 사용하고 외란이 존재할 때. (그림 12)



(그림 12) Adaptive fuzzy controller with disturbance.

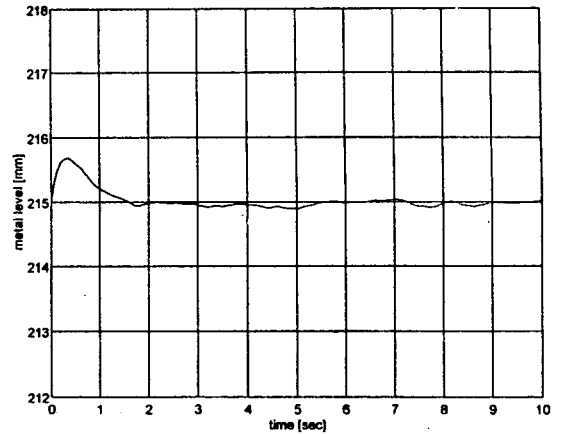
[실험 5] PID 제어를 사용하고 외란 및 센서 노이즈가 존재 할 때.(그림 13)



(그림 13) PID controller with sensor noise.

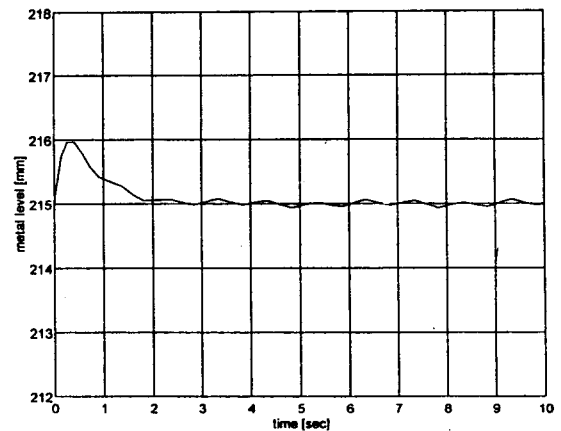
정도 존재할 때는 퍼지제어기의 성능이 다소 감소되는 모습을 볼 수 있지만 실제로 모델에 해당하는 부분은 근사하게 구할 수 있으므로 최종적인 응답 특성은 모델오차가 존재하지 않은 때와 큰 차이가 없다.

[실험 6] Adaptive Fuzzy 제어기와 모델정보를 사용하고 외란 및 센서 노이즈가 존재할 때. (그림 14)



(그림 14) Adaptive fuzzy controller with sensor noise.

[실험 7] Adaptive Fuzzy 제어기와 모델정보를 사용하고 외란이 존재하면서 모델에 50% 정도의 에러가 존재시. (그림 15)



(그림 15) Adaptive fuzzy controller and 50 % model error with disturbance.



## VI. 결론 및 향후과제

이상으로 스트립 캐스터에 대한 간단한 소개와 시스템 모델을 통해 그 특성을 시뮬레이션으로 보였다. 4장에서 제시된 시뮬레이터는 스트립 캐스터 시스템을 운영하고자 하는 사람들에게 시스템의 이해를 돕고 제어 알고리즘 연구자에게는 이론적인 바탕으로 큰 도움을 줄 것으로 기대한다.

한편, 앞장에서 보았듯이 스트립 캐스팅 시스템은 3 입력 3 출력인 다변수 시스템에 해당되는 모델로 여러 제어기법의 연구가 필요하다. 현재 본 연구팀은 개발된 스트립 캐스터 모델을 바탕으로 Multi Input Multi Output의 특성을 고려한 지능제어 알고리즘 제어기를 개발중에 있다. 앞으로는 모델에 실제성을 더 부가하여 좀 더 실 시스템을 잘 나타내도록 노력할 필요가 있다.

**Acknowledgement :** 본고 작성에 도움을 주신 포항공대 공정산업의 지능자동화 연구센터에 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] Prof. J. B. Edwards, I. C. Willis etc, "A Simulator For A Continuous Strip Casting Machine", 1992.
- [2] A. Frank D'SOUZA, "Design of Control System"
- [3] 이 진복 역, "유압 제어 서보의 설계"
- [4] Moog Hydraulic Valve Spec.
- [5] Y.K.Shin, T.Kang, T.Reynolds, and L. Wright, "Development of twin roll strip caster for sheet steels", vol 22, no 1, 1995.
- [6] H.B.Shim, W.S.Kim, T.Kang, Y.K.Shin, "Recent Development of the Technology on the Strip Casting Process", *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, vol 33, no3, 1993.
- [7] Richard K. Pitler, "An Overview of Coil Casting : Production of Flat Coilable Product Directly From Molten Metal", *Casting of Near Net Shape Products*, 1988.
- [8] J.W.Hlinka, J.A.Burgo and T.J.Conarty, "Modeling and Design of Twin-Roll Casters", *Casting of Near Net Shape Products*, 1988.
- [9] Li-Xin Wang, "Adaptive Fuzzy Systems and Control : Design and Stability Analysis", Prentice-Hall, 1994.
- [10] A. Kasama, etal., "Twin Drum Casting Process for Stainless SteelStrip", SRNC-90, 1990.
- [11] E. G. Miraveto, "A Mathematical Model of The Strip Casting Process", *Casting of Near Net Shape Products*, 1988.
- [12] Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller-Part I, II", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 20, NO. 2, 1990.
- [13] G. V. S. Raju, "Adaptive Hierarchical Fuzzy Controller", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 23; NO. 4, 1993.
- [14] Li-Xin Wang, "Stable Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Systems", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*. vol. 1, NO 2, MAY 1993.
- [15] H. Chris Tseng, "Error-feedback servomechanism in non-linear systems", *Int. J. Control*, vol 55, NO. 5, 1093~114, 1992.
- [16] Li-Xin Wang, "Fuzzy Basis Functions, Universal Approximation, and Orthogonal Least-Squares Learning", *IEEE Trans. neural networks*, vol 3, NO. 5 Sept. 1992.

## 저 자 소 개



李 振 秀

1953年 3月 1日生

1975年 2月 서울대학교 공과대학 전자공학과(공학사)

1980年 6月 University of California, Berkeley, 전기공학과(공학석사)

1984年 2月 University of California, L.A., 전기공학과(공학박사)

1981年 6月~1983年 9月 Union Oil Company, R&amp;D Center 연구원

1984年 2月~1985年 5月 AT&amp;T Bell 연구소 연구원

1985年 5月~1989年 8月 GE Aerospace 고등기술연구소 책임연구원

1989年 8月~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 조교수, 부교수

주관심 분야: 컴퓨터 제어, 공장자동화, 적응제어 및 지능제어



李 德 萬

1968年 3月 7日生

1990年 2月 한양대학교 공학대학 전자공학과(공학사)

1992年 2月 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)

1995年~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정

1991年 11月~현재 스트립 캐스팅 과제 참여

1992年 3月~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정 4년차

주관심 분야: 컴퓨터 제어, 공장자동화, 적응제어 및 지능제어



姜 泰 旭

1954年 2月 11日生

1976年 2月 서울대학교 금속공학과(공학사)

1978年 2月 서울대학교 공과대학원(공학석사)

1987年 月 MIT 재료공학과(공학박사)

1988年 8月~1995年 3月 산업과학기술연구소 책임연구원

1995年 4月~현재 산업과학기술연구소 수석연구원(박관주조연구팀장)

주관심 분야: 열유체 및 전자기 야금학