

# 박판주조의 적응제어 시스템 설계

## Design of An Adaptive Force Control System for the Strip Caster

윤두형(R | S T), 허건수(한양대 정밀기계공학과), 변철웅(생산기술연구원)

### ABSTRACT

In the strip casting, size of the roll separating force is a index representing the solidifying status of the melt. Rolling forces at the start of the casting process can change abruptly due to the overcooling of the leader strip. This inconsistency leads to machine damage or deficient solidification which results in the failure of the casting. In this study, a mathematical model is derived for the hydraulic servo pressure control system for the twin roll strip caster and its parameters are estimated by the RLS algorithm. Based on the identified model, an one-step ahead predictive control method is applied in order to minimize the transient fluctuation of the rolling force. Its simulation results are compared with those of the conventional PI controllers.

**Key Words:** Adaptive control(적응제어), Strip casting(박판주조), Hydraulic servo system(유압서어보시스템), RLS algorithm(순환알고리즘)

### 1. 서론

쌍롤형 박판주조기(Twin Roll Strip Caster)는 1500 °C 내외의 용강으로부터 두께 2 - 6 mm 의 박판을 직접주조하는 설비로서, 그림 1 과 같이 용강이 주조롤과 접촉하며 냉각되고, 고정롤과 유동롤에서 각각 형성된 응고층은 회전하는 롤과 함께 내려 오다가 롤 중심선 위에서 응고가 완료되며, 롤 중심선까지는 압하가 이루어 지고, 롤 중심선에서 롤과 분리되는 과정을 거친다. 박판의 압하시 주조롤을 밖으로 밀어내려는 롤반발력(Roll Separating Force)의 크기는 주조상태를 나타내는 지표인데, 높은 롤반발력은 과도한 응고상태를 나타내며 주조를 동체부양끝단에서 용강을 담아두는 내화물의 파손을 야기하거나 박판에 균열을 야기하고, 상대적으로 낮은 롤반발력은 불충분한 응고에 의한 용강누출의 위험을 가지고 있다. 따라서 주조초기에 안정적인 주조를 위하여는 일정시간 주조롤간 부하조절이 필요하다.

본 논문의 구성은 제 2 장에서 쌍롤형 박판주조기 부하조절용 유압장치의 연구배경을 설명하였고 제 3 장에서 서어보밸브와 단동실린더로 구성된 유압장치와 롤반발력을 수학적으로 해석하고, 제 4 장에서는 얻어진 시스템구조를 토대로 순환알고리즘(Recursive Least Square Algorithm)을 이용하여 유압시스템의 변수를 결정하였으며, 실제 주조시 측정치로부터 롤반발력 변수를 산출하였다. 제 5 장에서는 얻어진 플

랜트 모델을 이용하여 과도 롤반발력에 대하여 순환알고리즘을 사용한 Weighted 1 Step - Ahead Adaptive Prediction Control 와 비례제어기를 설계하고 모의실험 결과를 비교하였다.

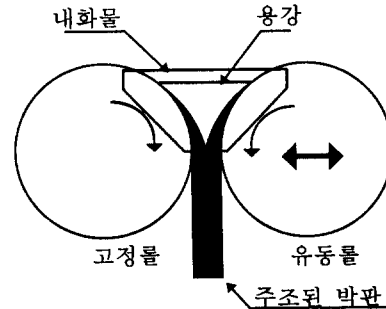


그림 1: 박판의 주조

### 2. 연구배경

1856년 영국의 베세머가 창안한 박판주조기술은 요소기술의 발전에 힘입어 제철분야에서 1970년대 말부터 균일한 내부품질 확보가 용이하고 생산속도가 높은 쌍롤형 박판주조기가 일본, 호주, 미국 등 세계 각국에서 현재 꾸준히 연구가 계속되고 있다. Hlinka 등<sup>[1]</sup>은 주조를 직경 305mm의 실험설비에 대하여 응고두께를 접촉시간의 지수함수로 모델링하고 실험결과를 보고하였으며, Edwards 등<sup>[2]</sup>과 이덕만등<sup>[3]</sup>은 정

상상태에서의 응고층 두께에 대한 편미방 방정식 모델을 유도하여 롤반발력을 모델링하였으며 롤회전속도의 제어에 의한 정상상태에서의 롤반발력 제어를 시도하였다.

그러나 주조초기 용강은 순간적으로 높은 롤반발력을 형성하며 많이 요동하고 때로는 고온의 용강이 미응고상태로 롤중심선을 빠져나가 주조기 밑으로 흐르거나 주조를 표면에 손상을 입히는 등 주조초기에 아직 불안한 모습을 보여주고 있다. 따라서 성능 좋은 부하조절기의 개발은 바로 이러한 주조초기 문제점을 개선하기 위한 시도를 의미하며 특히 유압서어보시스템을 이용한 롤반발력제어장치 등을 포함한다. 현재 박판주조에 있어서 유압제어를 이용한 주로 초기개선에 대한 연구보고자료는 거의 없으며 본 연구에서 그 타당성을 검토하고자 한다.

### 3. 시스템 모델링

#### 3.1 유압 서어보 시스템 개요

전체 유압시스템은 그림 2와 같이 서어보밸브 및 비례압력제어밸브, 각 밸브에 연결되어 주조를 양단의 베어링 하우징에 각각 반대방향으로 설치되어 있는 단동실린더, 유동률 위치 측정기, 각 실린더 풀보어(Full Bore)측에 연결된 압력측정기 등으로 구성되어 있다.

유동률 제어용 유압시스템은 서어보시스템과 비례압력제어시스템으로 구성되어 있다. 서어보시스템은 서어보밸브 출측라인의 유량 및 압력을 조절하여 주조를 부하 및 간격을 제어하기 위하여 사용되며, 비례압력제어시스템은 유동률에 일정한 힘을 가하기 위하여 사용한다.

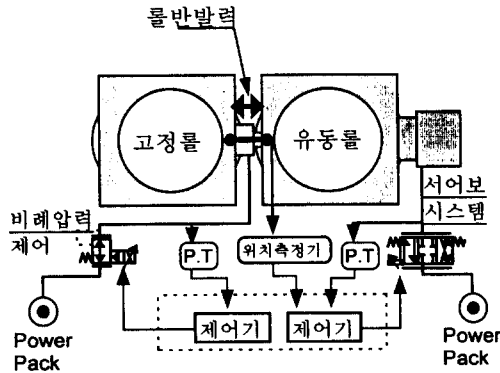


그림 2: 유동률 제어시스템 구조

#### 3.2 롤반발력

롤반발력은 응고층 교차점 이후의 박판두께가 롤간 간격보다 크므로, 응고층이 롤 회전에 따라 내려오면서 압하되는 과정에서 발생되며 정상상태에서의 힘과 과도상태에 의한 힘으로 구분할 수 있다.

$$F_{\text{롤반발력}} = F_{\text{정상}} + F_{\text{과도}}$$

과도상태에서의 롤반발력은 용강높이의 변화나 롤 사이에 이물질이 침투하여 롤반발력이 순간적으로 높아지거나 낮아지는 것을 말하며, 정상상태에서의 롤반발력은 주조롤간격의 함수로 주조롤간 간격은 유동률 이동거리,  $x$  에 의하여 결정된다<sup>[4]</sup>. 또한 박판주조시 주조롤간격의 변화가 작으므로 정상상태의 롤반발력은 선형화하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_{\text{롤반발력}} = k_r \cdot x + F_d \quad (1)$$

여기서  $k_r$ 은 정상상태 롤반발력의 롤간간격에 대한 비례상수이고,  $F_d$ 는 과도상태에서의 롤반발력을 의미한다. 주조롤 반발력 계수  $k_r$ 은 강종 및 주조상황에 따라 많은 변화가 있는데, 본 연구에서는 실제조업시 측정된 롤간격과 롤반발력 변화량으로부터 롤반발력 계수를 산출하여 모의실험시 사용하였다. 그림 3은 강종 Stainless Steel 304, Roll 직경 1250 mm의 박판주조시 유동률 위치측정기에서 측정된 4 mm 기준 롤간격으로 부터의 유동률 변위에 따른 롤반발력 변화량 측정결과이다. 여기서 롤반발력 변화량은 서어보 및 비례제어 압력조절 시스템에 연결된 각 실린더에서 측정된 압력으로부터 계산된 값이다.

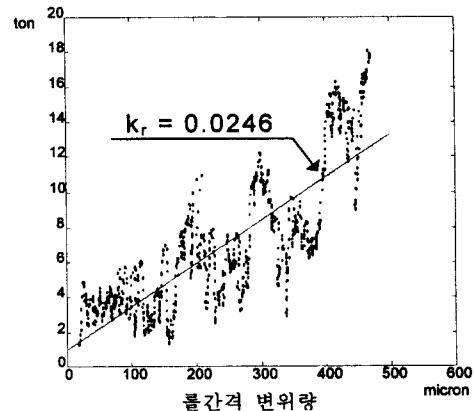


그림 3: 롤간격변위에 따른 롤반발력 실험결과

### 3.3 서어보 시스템

서어보밸브는 입력전류에 비례하여 아마추어에 위상과 토오크를 발생시키는 토오크 모터를 이용한 것으로, 실린더가 연결된 서어보밸브의 스텝입력에 대한 유량 정착시간이 15 ms 이내<sup>[5]</sup>이고 고려되고 있는 장치의 샘플링 시간이 10 ms 이므로 서어보밸브 자체의 동특성은 고려하지 않았다.

서어보밸브에 주어진 입력전류와 메인스플의 변위  $x_s$ 는 다음과 같이 표현되고,

$$x_s = k_i \cdot i \quad (2)$$

실린더 풀보어측에 연결된 서어보 밸브 출측라인에서의 통과유량  $Q$ 와 압력  $P_s$ 와의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$Q = k_x \cdot x_s - k_p \cdot P_s \quad (3)$$

실린더의 압력, 유량 및 유동을 변위, 부하와의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있으며,

$$Q = A \cdot \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

$$A \cdot P_s = M \frac{d^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + F \quad (5)$$

여기서  $M$ 은 서어보시스템 및 비례압력제어시스템용 실린더 2개의 로드 무게  $m_c$ 와 유동률 무게  $m_R$ 의 합이고,  $B$ 는 서어보시스템 및 비례압력제어시스템용 실린더로드 2개에서의 마찰계수  $B_c$ 와 유동률에서의 마찰계수  $B_R$ 의 합이다.

식 (1), (2), (3), (4) 및 (5)를 라플라스 변환하여 서어보밸브 입력전류와 외력  $F$ 에 의한 서어보밸브 토출라인 압력에 대한 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$P_s(s) = \frac{\frac{k_f k_x}{k_p} (s^2 + \frac{B}{M}s + \frac{k_r}{M})}{s^2 + \left( \frac{A^2 + k_p B}{k_p M} \right) s + \frac{k_r}{M}} i(s) + \frac{\left( \frac{A}{k_p M} \right) s}{s^2 + \left( \frac{A^2 + k_p B}{k_p M} \right) s + \frac{k_r}{M}} F_d(s) \quad (6)$$

전달함수의 각 파라메타를 추정하기 위하여 상기 식 (6)을 이산화 하면 아래와 같이 표현된다.

$$P_s(z) = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2} i(z) + \frac{c_0 (z-1)}{z^2 + a_1 z + a_2} F_d(z) \quad \dots\dots\dots (7)$$

### 4. 시스템 변수 결정

유압 서어보시스템은 부하 및 운전조건에 따라 파라메타 값들이 계속 변하므로 제어기에 사용되는 모델을 얻기 위해서는 Recursive Parameter Estimator의 사용이 필요하다. 본 논문에서는 용강이 없는 상태에서 유압서어보 시스템에 가해진 신호와 실린더에 형성된 압력을 측정하고 Recursive Least Square Methods with Forgetting Factor 알고리즘<sup>[6, 7]</sup>을 사용하여 모델의 파라메타를 선정하였다.

#### 4.1 측정실험

측정실험은 서어보 밸브의 토오크모터에 전기입력값(mA)으로 기준값(Reference Signal)에 4개의 다른 주파수를 가진 싸인파 곡선을 더하여 충분한 자극(Persistent Excitation Condition)을 주고, 실린더 풀보어(Full bore)측에 부착된 압력측정계로 부터 압력을 측정하였다. 이때 가해진 외력은 식(1)의  $F_d$ 에 해당하는데 비례압력제어밸브에 연결된 실린더풀보어측에 부착된 압력측정계로 부터 압력을 측정하여 계산하였다.

#### 4.2 변수결정

식(6)의 모델 파라메타 값을 결정하기 위하여 용강이 없는 주조기에서 서어보드라이브의 외력  $F_d$ 가 가해지는 경우를 고려하였다. 즉 용강이 없으므로 롤반발력 비례상수인  $k_r$ 이 0이 되어 식(6)은 다음과 같이 간략화된다.

$$P_s(s) = \frac{\frac{k_f k_x}{k_p} (s + \frac{B}{M})}{s + \frac{A^2 + k_p B}{k_p M}} i(s) + \frac{\frac{A}{k_p M}}{s + \frac{A^2 + k_p B}{k_p M}} F_d(s) \quad (8)$$

윗식 (8)을 이산화하면 다음과 같이 표현되며

$$P_s(z) = \frac{b_0 z + b_1}{z + a_1} i(z) + \frac{c_0}{z + a_1} F_d(z) \quad (9)$$

리그레션 형식(Regression Form)으로 표현하면 다음과 같고,

$$P_s(t) = -a_1 P_s(t-1) + b_0 i(t) + b_1 i(t-1) + c_0' F_d(t-1)$$

$$= \begin{bmatrix} a_1 & b_0 & b_1 & c_0' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -P_s(t-1) \\ i(t) \\ i(t-1) \\ F_d(t-1) \end{bmatrix}$$

$$= \theta^T \varphi(t)$$

이때의 사용된 추정 알고리즘은 다음과 같다.

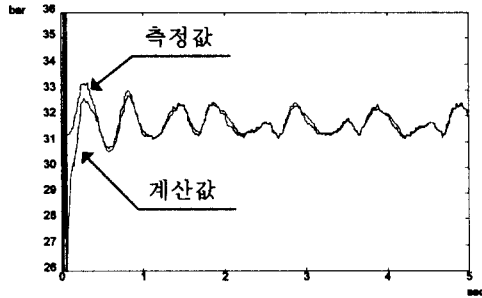
$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + k(t) (P(t) - \varphi^T(t) \hat{\theta}(t-1))$$

$$k(t) = P(t) \varphi(t)$$

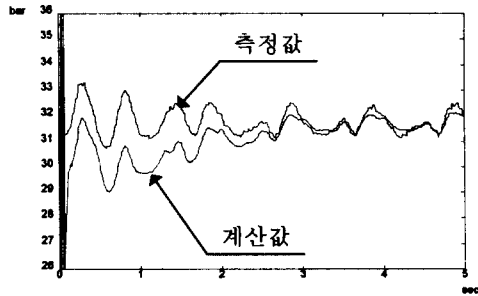
$$= P(t-1) \varphi(t) (\lambda I + \varphi^T(t) P(t-1) \varphi(t))^{-1}$$

$$P(t) = (I - k(t) \varphi^T(t)) P(t-1) / \lambda$$

퍼켓팅 계수에 따른 파라메타 추종성을 알아보기 위하여 그림 4에서 각각 다른 퍼켓팅 계수에 대하여 매 Sampling Time 에 얻어진 파라메타를 이용하여 시스템 압력값을 계산하고 측정된 압력값과 비교하였다.



(a) 퍼켓팅계수 = 0.85



(b) 퍼켓팅계수 = 0.95

그림 4 : 퍼켓팅 계수에 따른 파라메타 추종 성능

퍼켓팅 계수가 0.85 일때 얻어진 모델을 사용한 계산 압력값과 측정 압력값이 잘 일치하였는데 이는 박판주조 서비스시스템의 특성변화가 많기때문인 것으로 생각된다. 주어진 운전조건하에서 파라메타들에 대한 평균값을 취하여 제어기 설계시 사용할 플랜트 모델을 얻기 위하여 사용하였으며 그림 5에 측정 압력값과 용강이 없는 상태의 플랜트 모델에 의한 계산 압력값을 비교하여 나타내었다.

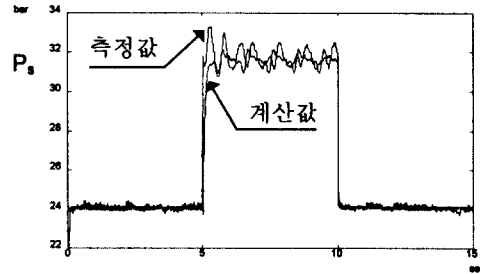


그림 5 : 플랜트 모델에 의한 계산압력값과 측정압력값 비교

## 5. 제어기 설계 및 모의실험

주조 초기의 과도상태에서는 과응고된 박판이 주조를 사이를 빠져 나가며 순간적으로 높은 롤 반발력이 발생되어 유동롤과 함께 서어보 밸브에 연결된 실린더가 뒤로 밀리고, 유동롤을 서어보측으로 밀고 있던 비례압력제어밸브에 연결된 실린더는 팽창되어 정상상태에서의 거동과 상당히 차이가 생기게 된다. 이러한 과도상태에서의 특성변화를 고려하기 위하여 주조를 반발력계수  $kr = 0.0246 \text{ ton/micron}$  을 고려한 모델을 사용하였다. 서어보 시스템에 대하여 비례적분제어기와 1 Step - Ahead 적용예측기를 설계하고 모의실험을 하여 결과를 비교하였으며 모의실험에 사용된 플랜트 모델은 다음과 같다.

--- 서어보 시스템 (정상 상태)

$$P_s(t) = \frac{-0.1779z^2 + 0.3041z - 0.1262}{z^2 - 1.518z + 0.5184} i(t) + \frac{0.1669z - 0.1669}{z^2 - 1.518z + 0.5184} F_d(t)$$

$$= \frac{-0.1779z + 0.1262}{z - 0.5184} i(t) + \frac{0.1669}{z - 0.5184} F_d(t)$$

---서어보 시스템 (과도상태)

$$P_s(t) = \frac{-0.1641z^2 + 0.3208z - 0.1567}{z^2 - 1.878z + 0.8779} i(t) + \frac{0.037z - 0.037}{z^2 - 1.878z + 0.8779} F_d(t)$$

$$= \frac{-0.164z + 0.1567}{z - 0.8779} i(t) + \frac{0.037}{z - 0.8779} F_d(t)$$

### 5.1 비례적분제어기

폐회로 시스템의 제어입력값은 다음의 식으로 부터 결정하였으며, 제어계수는 정상상태의 플랜트 모델에 대하여 Ziegler-Nichols Method<sup>8)</sup>를 사용하여 결정하였다.

$$i(t) = \frac{k_p z + k_i - k_p}{(k_p G_1 + 1)z + G_1 k_i - G_1 k_p - 1} P_{ref}(t) - \frac{G_2(k_p z + k_i - k_p)}{(k_p G_1 + 1)z + G_1 k_i - G_1 k_p - 1} F_d(t)$$

여기서 G1은 개회로 시스템의 입력전류에 대한 압력값의 전달함수이고, G2는 개회로 시스템의 물반발력에 대한 압력값의 전달함수이며 이때의 비례제어기 블록선도는 다음 그림 6과 같다.

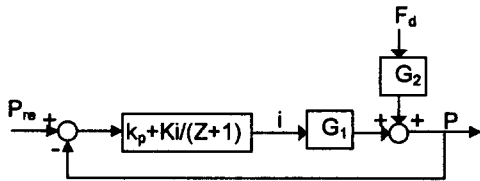


그림 6: 비례제어기 블록다이아그램

그림 8-(a)는 시스템에 가해진 과도상태의 물반발력을 포함하는 외력을 나타내고 있으며, 그림 8-(b)는 주어진 외력에 대하여 개회로 시스템에서 발생하는 압력과 비례적분제어기를 사용한 경우에 대하여 모의실험한 결과를 각각 비교하고 있다.

### 5.2 1 Step - Ahead 적응예측기

각 시스템에 대하여 얻어진 모델 식(9)로부터 1스텝 앞선 출력값을 추정하기 위한 예측모델 형식은 다음과 같이 표현되고,

$$P_s(t+1) = -a \cdot P_s(t) + (b_0 + b_1) \cdot i(t) + c \cdot F_d(t)$$

제어목표값  $P_s^*(t+1)$ , 추정된 파라메타  $a, b_0, b_1, c$ 를 사용하여 다음과 같이 제어입력값을 구하였다.

$$i(t) = \frac{(b_0 + b_1)}{(b_0 + b_1)^2 + \lambda} [P_s^*(t+1) + a \cdot P_s(t) - c \cdot F_d(t)]$$

여기서  $\lambda$ 는 입력에 대한 가중치이고 이상의 적응제어기 블록다이아그램은 다음 그림 7과같이 구성된다.

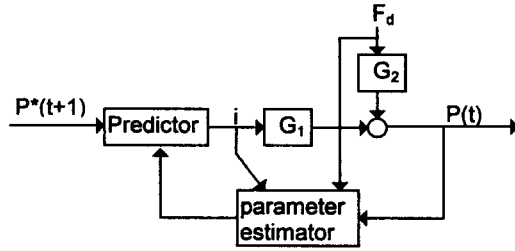


그림 7: 적응 예측기 블록다이아그램

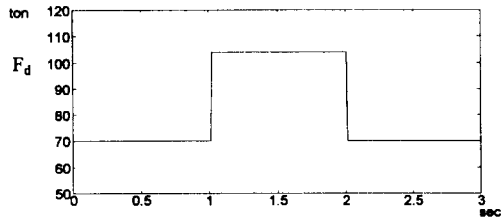
그림 8-(c)는 서어보 시스템에 대하여 적응예측기가 수행된 모의실험 결과로서 과도상태의 물반발력에 대하여 비례적분제어기보다 우수한 강인성을 갖는 것이 잘 나타나 있다.

## 6. 결론

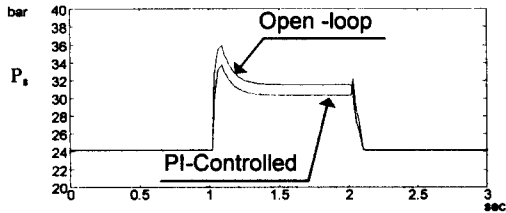
유압 서어보시스템에 의하여 조절되는 박판주조기 부하조절장치의 적응제어기에 대하여 연구하였다. 시스템의 특성을 파악하기 위하여 모델식을 구하고 밸브에 4개의 다른 주파수를 가지고 있는 입력신호를 주고, 각 실린더에서 압력을 측정하여 모델의 파라메타를 결정하였으며 비례적분제어기와 1 Step-Ahead 적응예측기를 설계하고 모의실험을 하여 그 결과를 비교하였다. 연구결과의 요약과 결론은 다음과 같다.

가. 박판의 주조시 발생하는 물반발력은 물간격에 선형적인 부분과 과도상태 반발력의 합수로 나누어 모델링하였다.

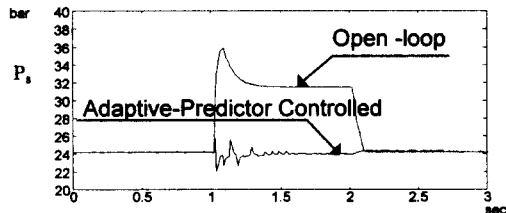
나. 서어보 시스템은 2차식으로 모델링되었으나 Pole-Zero Cancellation이 발생하여 제어기 설계시에는 1차식으로 해석하였다.



(a) 외력



(b) PI - Controller



(c) 1 Step- Ahead Adaptive Predictor

그림 8 : 서어보 시스템에 가해진 외력과 제어기 모의실험 결과

다. 모델 파라메타 추종성능은 퍼켓팅계수에 따라 많이 변화였는데 서어보시스템의 특성반동이 심하였으므로 0.8 ~ 0.85의 퍼켓팅 계수 값일 때 좋은 성능을 나타내었다.

라. 모의실험결과 적응예측기가 비례적분제어기보다 과도를반발력에 상대적으로 강인한 특성을 가지고 있었다

이상의 결론으로부터 박판주조기 부하조절장치에 대한 적응예측기 적용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 실제 시스템에서는 물반발력의 정확한 값을 얻기가 어려우므로 이에대한 감지시스템과 부하제어에 따른 롤간격 변화도 같이 고려되어야 하며 이는 추후연구과제로 수행하고자 한다.

#### 참고문헌

- [1] J.W. Hlinka, J. A. Burgo and T. J. Conarty, 1988, "Modeling and Design of Twin Roll Casters", Proceeding of an International Symposium on Casting of Near Shape Products, pp.115-132.
- [2] J. B. Edwards and I.C. Willis, 1992, "A Simulator For A Continuous Strip Casting Machine", Final Report To Navy Distington On R & D Project.
- [3] 이덕만, 강태욱, 이진수, 1995, "스트립 캐스터 모델링 및 시뮬레이터", 전자공학학회 제 22 권 제 8 호, pp.864-873.
- [4] Hosford Caddell, 1993, "Metal Forming", 2nd Edn.
- [5] John Watton, 1989, "Fluid Power Systems".
- [6] Lennart Ljung, 1987, "System Identification. ( Theory For The User )".
- [7] Karl J. Astrom and Bjorn Wittenmark, 1995, "Adaptive Control", 2nd Edn.
- [8] B. Shahian and M. Hassul, 1993, "Control System Design Using Matlab".