

열연 루퍼시스템의 퍼지 장력제어

A Fuzzy Tension Control Method for the Coupled Looper System at the Hot Rolling Process

허윤기*
(Yone-Gi Hur¹)
¹POSCO

Abstract: The hot rolling process ranks the highest position for production in steel making process. The hot strip manufacturing processes consist of the reheating furnace, roughing and finishing mill and coiler. The reheating furnace heats the slab. The roughing and finishing mill produce the hot strip from slab. The hot strip quality mainly depends on finishing mill, which consists of 4-high 7 stands. The looper is installed between stands and is used for controlling the strip tension by the looper angle for better material flow. It is difficult to control the strip tension with the coupled looper system from interaction between the looper angle and strip tension. Too much deviation of strip tension severely affects the poor width quality of the hot strip. It is important to control simultaneously both the looper angle and strip tension with each of their target values. This paper proposes the fuzzy tension control, which is developed to minimize the width deviation of the hot strip by maintaining the proper strip tension between stands and to achieve the stable operation of the coupled looper system. The fuzzy tension control performance is compared with the conventional PID control by experimental results.

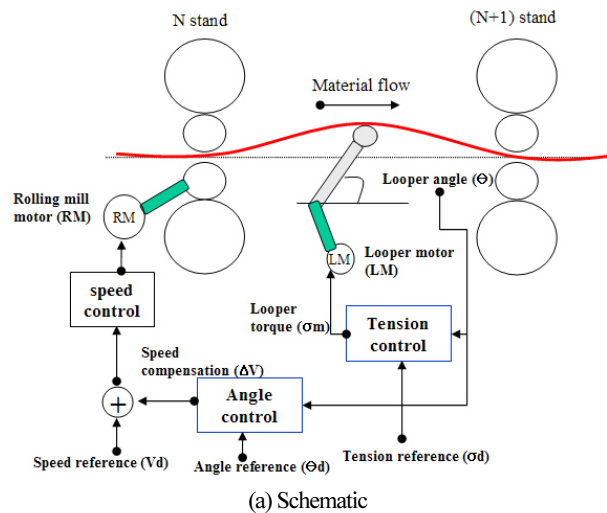
Keywords: fuzzy control, coupled looper system, tension control, hot rolling process

1. 서론

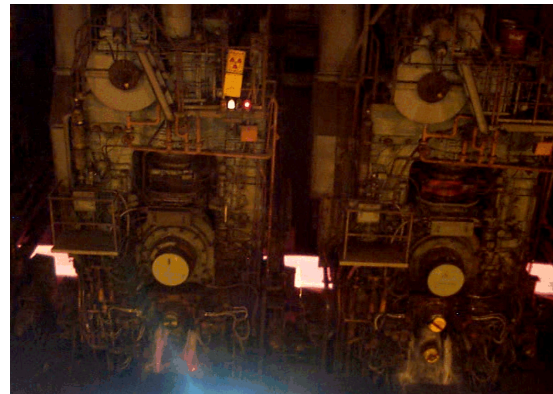
열간 압연 공정은 철강 공정의 생산량에 있어서 중요한 위치를 차지한다. 열간 압연 공정은 가열로, 조압연, 사상압연 그리고 권취기로 구성되어 있다. 가열로에서 슬라브를 가열한 후, 압연기를 통하여 열연 강판을 생산한다. 열연 강판의 품질은 4단 7개 스탠드로 구성된 사상압연기를 통하여 결정된다. 압연기의 스탠드간에 강판의 장력을 제어하고 강판의 원활한 흐름을 위하여 루퍼가 설치되어 있다.

그림 1에 전형적인 열간 압연 공정에서 루퍼 제어 시스템이 소개되어 있다. 강판이 N번째 스탠드에서 (N+1)번째 스탠드로 진행되면, 인코더로부터 루퍼 각도(θ)를 측정하고 로드 셀로부터 장력을 직접 측정하거나 각도로부터 모델에 의하여 강판의 장력(σ)을 추정한다. 강판의 장력은 루퍼 모터(LM: Looper Motor)에 의하여 제어되고 동시에 압연 모터(RM: Rolling mill Motor)의 속도에 의하여 스탠드간의 루퍼 각도가 제어된다. 루퍼 제어 시스템의 특징은 장력과 루퍼 각도 제어 시스템간에 상호 간섭이 있다. 예를 들어, 장력이 목표값 대비 너무 높으면 장력 제어기는 루퍼 각도를 감소시킴으로써 장력을 낮춘다. 이때 루퍼 각도가 목표값 대비 감소하므로 루퍼 각도 제어기는 N번째 압연 모터 속도를 높임으로써 루퍼 각도를 보상(각도 증가)한다. 증가된 루퍼 각도와 높아진 압연 모터의 속도는 양단 스탠드의 속도 편차에 의하여 장력이 다시 증가하는 효과가 발생한다. 따라서 상호 결합된 두 제어시스템은 영원히 수렴하기 어려운 상태가 된다.

루퍼 장력 제어는 강판의 장력을 일정하게 유지하여 강판



(a) Schematic



(b) Photograph

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 3. 12., 수정: 2010. 5. 28., 채택확정: 2010. 7. 20.

허윤기:(주)POSCO 기술연구원(tomashur@posco.com)

그림 1. 전형적인 루퍼 제어 시스템.

Fig. 1. Conventional looper control system.

의 폭을 균일하게 하는 것이 목적이다. 루퍼 시스템에서 루퍼 각도와 강판의 장력을 각각의 목표값을 추종하면서 동시에 제어하는 것이 중요하다. 루퍼 시스템은 루퍼 각도와 강판의 장력간에 상호작용으로 인하여 강판의 장력을 제어하기가 어렵다. 강판의 장력편차가 커지면 강판의 폭 품질에 심각하게 나쁜 영향을 미친다. 예를 들어, 강판이 압연기를 경유할 때, 루퍼가 강판에 도달하기 직전 상태 혹은 장력이 아주 작은 상태에서는 강판의 선단부 폭 빠짐(목표값에 미달함)이 발생한다. 반대로 과도한 장력이 작용하면(목표값을 초과함) 판 파단을 야기한다. 따라서 적절한 루퍼 각도를 제어함으로써 장력의 변동을 최소화하여 안정된 조업 및 품질의 향상을 기대할 수 있다

기존의 연구사례로서는 루퍼의 각도 혹은 강판의 장력을 측정하여 루퍼 모터를 움직임으로써 장력을 제어하고 루퍼 각도의 오차를 가지고 앞 스탠드의 속도 보상량을 가해주는 상호 간섭하는 제어계로 되어있다[1-3]. 또한 루퍼 시스템을 모델화하여 선형모델에 의한 비간섭 제어계를 구성하여 시물레이션을 보인 사례가 있다[3,4]. 수식 모델에 의한 기존 제어방법은 모델이 갖는 오차와 장력 센서가 없는 관계로 장력을 추정하여 PID 제어가 수행되므로 장력 제어 정도를 향상시키는 데 한계가 있다.

루퍼 제어를 뉴로 퍼지를 사용하여 제어기를 구성하고 진화연산(GA: Genetic Algorithm)으로 최적화시켜 시물레이션을 보인 사례[5]가 있으나, 루퍼 시스템의 각도와 장력의 간섭현상에 대한 대처방법이 미흡하고 루퍼 각도 변화에 대한 강판의 장력 응답성이 제시되지 않았다. 또한 두께제어와 판 크라운 설정 제어계를 비간섭 제어계를 구성하여 시물레이션을 보인 사례[6]가 있으나 기존 교차 이득 제어 방식[2,3]과 큰 차이를 보이지 않는다.

본 논문에서는 아직까지 현업에서 만족스러운 성능을 못하고 있는 기존 루퍼 제어방법의 개선을 위하여, 상호 간섭이 발생하는 루퍼 시스템을 대상으로 루퍼 각도와 강판의 장력을 동시에 제어할 수 있는 퍼지 장력 제어방법을 제안한다. 본 논문에서는 루퍼 장력제어 방법으로서 종래 장력제어 방법이 아닌 퍼지 장력제어 방법을 제안하고 루퍼 모사장치를 사용하여 제어 성능을 검증한다. 종래의 제어방법으로 PID 장력제어와 제안된 퍼지 장력제어의 성능을 비교하고, 외부로부터 강판의 장력 변화를 지속적으로 야기하는 외란이 작용할 경우에 두 제어기의 성능을 비교한다. 또한 제안된 루퍼 제어방법으로 퍼지 제어의 성능을 실험장치를 통하여 검증한다.

II. 퍼지 루퍼 제어방법

1. 기존 루퍼 제어

그림 2와 그림 3에 기존 루퍼 제어방법의 전형적인 사례가 나타나 있다. 종래의 루퍼 제어의 문제점은 첫째, 간섭현상에서 발생하는 제어 오차의 필연성이다. 그림 2의 전형적인 루퍼 제어 방법을 보면, 장력 오차로부터 루퍼 모터(LM)를 제어한다. 이때 장력의 목표값에 수렴하였다고 가정하면, 각도 오차 성분이 압연 모터(RM)의 속도 보상량을 출력하여 압연 모터의 속도가 변화되고 이는 스탠드간의 속도 차이를 야기하여 장력의 변화로 나타난다. 따라서 장력 오차가 재 발생

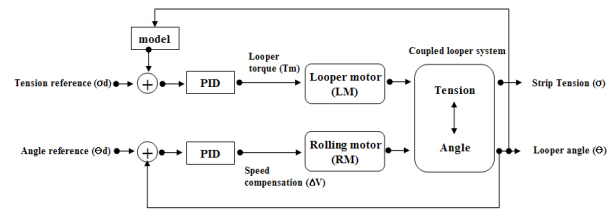


그림 2. 전형적인 루퍼 제어방법.

Fig. 2. Conventional looper control method.

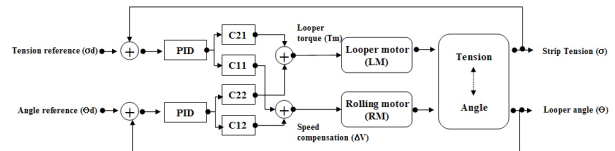


그림 3. 교차 이득 루퍼 제어방법.

Fig. 3. Cross gain control looper control.

하게 되고 루퍼 모터로 다시 제어를 해야 한다. 영원히 수렴하지 않고 오차를 항상 가지고 있는 제어시스템이 될 가능성이 있다. 둘째, 이득 조정의 난이 점이다. 그림 3의 교차 이득 루퍼 제어방법을 보면, 루퍼 각도와 장력을 모델에 의하여 분리하여 간섭현상을 배제하였다고 하지만, 루퍼 시스템의 상호 연관된 복잡한 현상을 기본적인 4개의 이득으로 완벽히 분할하였다고 보기 어렵다. 4개의 이득으로 간섭현상을 배제 가능하더라도 제어환경에 따른 적합한 이득을 구하기 어렵고 조업 상황에 따라 지속적인 이득 조정작업이 동반되어야 한다. 셋째, 제어방법에서 오는 제어의 난이 점이다.

기존 제어방법의 경우 장력 오차로부터 루퍼 모터를 제어하는 경우를 살펴보면, 강판에 장력이 기준값보다 더 작용하였을 때 루퍼 각도를 조금만 상승시켜도 강판의 장력은 크게 발생한다. 루퍼로써 적합한 장력을 유지하도록 제어하는 것은 쉬운 작업이 아니다. 루퍼 모터의 응답성이 압연 모터보다 빠르기 때문에 강판에 장력이 순간적으로 과도하게 작용하였을 경우 신속히 장력을 내려주기 위하여 응답성이 빠른 루퍼를 구동하는 방법을 택하는 것은 쉽게 생각할 수 있다. 그러나 순간적인 과도한 장력에는 대처할 수 있으나 오랜 시간을 보면 오히려 제어하기가 더 어려워짐을 알 수 있다. 또한 각도 오차로 속도 보상량을 출력하는 경우를 살펴보면, 여기서 고려되어야 할 사항은 통판성(mass flow, 스탠드간 강판의 원활한 흐름)에 영향을 작용하는 것은 강판의 장력이 루퍼 각도가 아니다. 각도 오차가 발생하더라도 강판의 장력이 적절히 유지가 되면 통판성이 양호하다 할 수 있다. 기존 제어방법은 각도 오차가 마치 통판성에 영향이 크게 작용하는 것처럼 제어가 되고 있다.

2. 퍼지 루퍼 제어

본 논문은 기존 루퍼 제어방법의 문제점을 개선하기 위하여 강판의 장력 불균형으로 인하여 통판성이 저해되는 것을 방지하고 루퍼 헌팅을 최소화함으로써 안정된 루퍼 제어를 하기 위한 새로운 방법을 제안한다. 퍼지 루퍼 제어방법은 기존 제어가 PID 제어인데 반하여 퍼지제어를 사용하는 것이 다르지만, 그 이전에 루퍼 제어시스템의 구성에서 차이가 있다. 그림 3에서 살펴보면, $C11 = C22 = 0$ 이고 $C12 = C21 = 1$

표 1. 루퍼 제어 방법 비교.

Table 1. Comparison of looper control method.

	종래의 루퍼 제어	퍼지 루퍼 제어
장력 제어	루퍼 모터의 권류 및 각도를 모델에 의하여 장력을 계산함. 루퍼 모터로 장력 제어	로드 셀에 의한 장력을 측정함 (루퍼 Arm 중간에 설치). 압연 모터로 장력 제어
각도 제어	각도 편차를 이용하여 속도 보상량 계산함.	장력 편차를 이용하여 속도 보상량 계산함. 루퍼 모터로 각도 제어
제어 방법	Conventional PID, Cross gain control	Fuzzy control

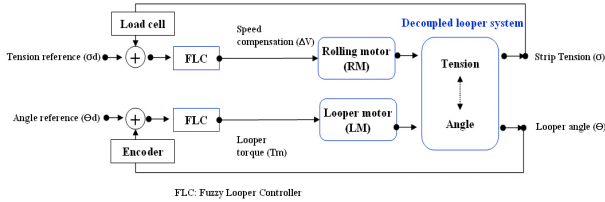


그림 4. 퍼지 루퍼 제어방법.

Fig. 4. Fuzzy looper control method.

이때 그림 2의 전형적인 루퍼 제어가 수행된다. 그렇지 않으면 교차 이득 제어방법이 수행된다. 기존 루퍼 제어시스템은 기본적으로 루퍼 각도 오차로부터 압연 모터의 속도 변화량을 제어하고, 장력 오차로부터 루퍼 각도를 제어한다. 그러나 퍼지 루퍼 제어방법은 표 1에서 정리된 바와 같이, 루퍼 각도 오차로부터 루퍼 모터를 제어하고 장력 오차로부터 압연 모터의 속도 보상량을 제어한다.

그림 4에 퍼지 루퍼 제어방법의 개요가 나타나 있다. 장력 측정 센서로부터 장력을 측정하고 장력 기준치와의 차이인 장력 오차(TE: Tension Error)를 퍼지 루퍼 제어기(FLC: Fuzzy Looper Controller)에 입력한 후 전단 스탠드의 속도 보상량(ΔV)을 계산하여 압연 모터로 보내진다. 동시에 루퍼 각도를 측정하여 각도 기준치와의 차이인 각도 오차(AE: Angle Error)를 퍼지 루퍼 제어기에 입력한 후 토크(T_m)를 계산하여 루퍼 모터로 보내진다. 본 방법에 의하면 장력과 각도의 간섭현상을 배제할 수 있다. 그림 5의 루퍼 제어방법의 흐름도를 통하여 자세히 설명한다. 장력과 루퍼 각도의 기준치와 측정치를 입력 받고 이로부터 장력 오차와 각도 오차를 계산한다. 퍼지 루퍼 제어기에서 각도 오차로부터 루퍼 모터의 토크를 계산하고 루퍼 모터를 제어하여 각도를 기준치에 수렴시킨다. 루퍼 모터가 압연 모터보다 응답성이 빠른 관계로 루퍼 각도를 기준치에 5도 이내로 수렴 시킨 후, 장력 제어기(FLC(tension))에서 장력 오차로부터 압연 모터의 속도 보상량을 계산하여 루퍼 시스템에 전달한다. 루퍼 각도 제어와 장력 제어간의 간섭현상을 갖는 루퍼 시스템의 간섭 효과를 억제하기 위하여 압연 모터보다 응답성이 빠른 루퍼 모터를 먼저 구동함으로써 루퍼 각도를 기준치의 5도 이내로 수렴시키고 나면 장력 오차가 급격하게 줄어드는 효과가 있어서 장력을 기준치에 신속히 수렴시킬 수 있는 효과가 있다. 또한 장력 오차로부터 루퍼 모터를 제어하는 간섭적인 방법에서 벗어나 각도 오차로부터 루퍼 모터를 제어함으로써 루퍼 제어성능이 획기적으로 향상되는 효과가 있다. 이는 III 장의 실험결과를 통하여 검증한다.

퍼지 루퍼 제어기는 2개의 제어 블록으로 구성되어 있다.

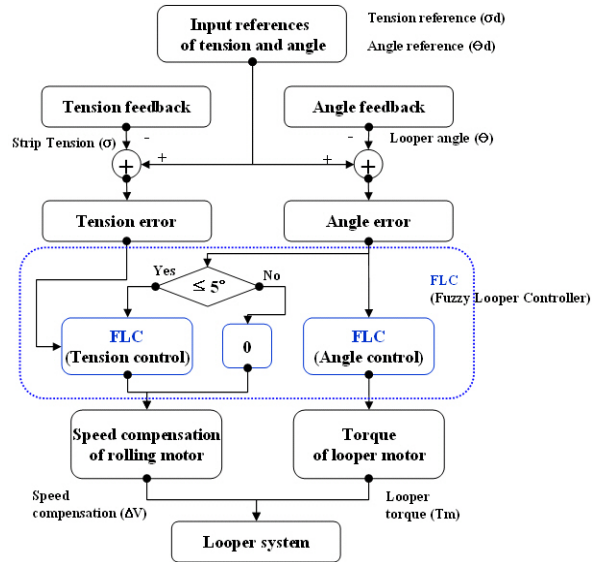


그림 5. 루퍼 제어방법의 흐름도.

Fig. 5. Flow chart of looper control method.

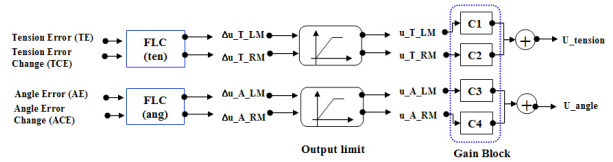


그림 6. 퍼지 루퍼 제어기의 구조.

Fig. 6. Structure of fuzzy looper controller.

그림 6에 퍼지 루퍼 제어기의 구조가 나타나 있다. 제어 블록은 퍼지 장력 제어기(FLC(ten))와 퍼지 각도 제어기(FLC(ang))로 구성된다. 퍼지 장력 제어기는 퍼지화된 장력 오차(TE)와 오차 변화량(TCE: tension error change)을 입력 받고 루퍼 모터의 속도값(u_{T_LM})과 압연 모터의 속도값(u_{T_RM})을 출력으로 한다. 퍼지 각도 제어기는 퍼지화된 루퍼 각도(AE)와 오차 변화량(ACE: angle error change)을 입력 받고 루퍼 모터의 속도값(u_{A_LM})과 압연 모터의 속도값(u_{A_RM})을 출력한다.

그림 6에서 $\Delta u[k]$ 와 $u[k]$ 의 관계는 아래와 같다.

$$u_{A_LM}[k] = u_{A_LM}[k-1] + \Delta u_{A_LM}[k],$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, n. \quad n: \text{정수.}$$

상기의 과정을 통하여 모터의 속도 변화량($\Delta u[k]$)이 퍼지 제어기로부터 계산되고, 제어기의 출력($u[k]$)은 위의 식으로부터 얻어진다[7]. 그리고 계인 블록에서는 퍼지 제어기 출력값을 선택하여 최종적인 제어신호($U_{tension}$, U_{angle})로 루퍼 시스템으로 전달된다. 계인 블록 $C1 = C4 = 1.0$ 이고 $C2 = C3 = 0.0$ 으로 설정하면 그림 2의 전형적인 루퍼 제어방법이 되고, 계인 블록 $C2 = C3 = 1.0$ 이고 $C1 = C4 = 0.0$ 으로 설정하면 제안된 퍼지 루퍼 제어방법이 선택된다.

퍼지 루퍼 제어기의 구현에 있어서 소속함수의 예가 그림 7에 나타나 있다. 사용된 규칙(rule)은 4개의 제어 규칙 블록에서 각각 25개의 규칙 중에서 9개의 규칙을 사용하였다. 4개의 제어 규칙 블록은 다음과 같다. 퍼지 루퍼 제어기의

1. 입력이 장력 오차(TE)와 그의 변화량(TCE), 출력이 루퍼 모터의 속도값(u_{T_LM})
2. 입력이 장력 오차와 그의 변화량, 출력이 압연 모터의 속도값(u_{T_RM})
3. 입력이 각도 오차(AE)와 그의 변화량(ACE), 출력이 루퍼 모터의 속도값(u_{A_LM})
4. 입력이 각도 오차와 그의 변화량, 출력이 루퍼 모터의 속도값(u_{A_RM})

인 경우, 각각에 해당하는 규칙 블록이 있으며 하나의 규칙 블록에는 최대 25개의 규칙으로 구성되고 그 중 9개의 규칙을 사용하였다.

예를 들어, 규칙 블록 3의 루퍼 각도 오차와 그 변화량을 입력 받아서 루퍼 모터를 제어하는 경우에 해당하는 규칙은 다음과 같다.

Rules:

- If AE=NB and ACE=ZO, Then Δu_{A_LM} =NB.
- If AE=NS and ACE=ZO, Then Δu_{A_LM} =NS.
- If AE=ZO and ACE=NB, Then Δu_{A_LM} =NB.
- If AE=ZO and ACE=NS, Then Δu_{A_LM} =NS.
- If AE=ZO and ACE=ZO, Then Δu_{A_LM} =ZO.
- If AE=ZO and ACE=PS, Then Δu_{A_LM} =PS.
- If AE=ZO and ACE=PB, Then Δu_{A_LM} =PB.
- If AE=PS and ACE=ZO, Then Δu_{A_LM} =PS.
- If AE=PB and ACE=ZO, Then Δu_{A_LM} =PB.

여기서 NB는 Negative Big, NS는 Negative Small, ZO는 Zero, PS는 Positive Small 그리고 PB는 Positive Big을 나타내는 퍼지

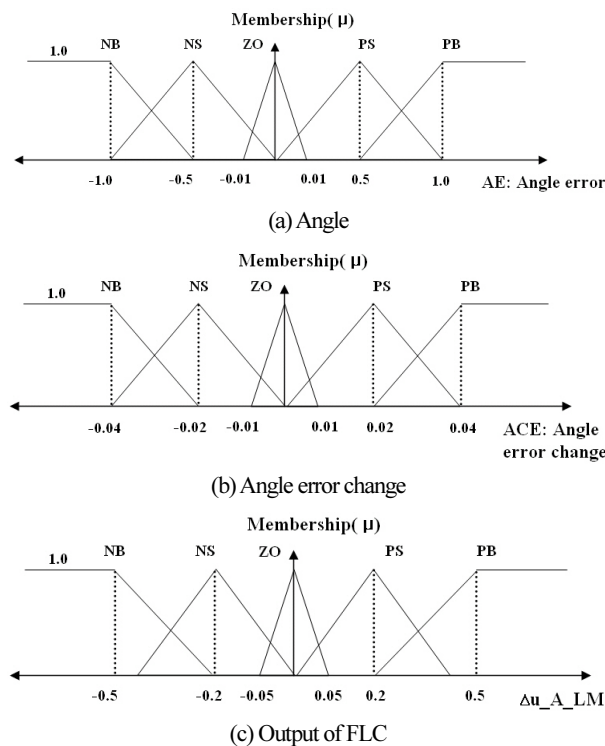


그림 7. 루퍼 모터 제어를 위한 소속함수.

Fig. 7. Membership functions of looper motor control.

값이다. 퍼지 추론은 Mamdani의 max-min방법을 사용하였고 비퍼지화는 COG (Center of Gravity)를 사용하였다. UOD (Universe of Discourse)는 루퍼가 초기 구동 시에는 빠른 응답성을 위하여 가속 구간의 특성을 고려하여 $-5 < UOD < 5$ 이고, 각도 오차가 5도 이내로 접근하면 빠른 수렴성과 감속하는 제어를 위하여 $-0.5 < UOD < 0.5$ 로 사용하였다. 그림 7의 부호는 방향성을 나타낸다.

III 장에서는 새로운 루퍼 제어방법의 성능을 장력과 루퍼 각도 오차의 안정된 수렴성을 통하여 비교하여 검증한다.

III. 실험 방법 및 결과

개발된 퍼지 루퍼 제어방법의 성능을 검증하기 위하여 그림 8의 루퍼 시스템 모사장치를 제작하였다. 루퍼 각도를 직접 측정하기 위하여 루퍼 암(arm)의 축에 인코더를 부착하였고 강관의 장력을 직접 측정하기 위하여 루퍼 암의 축 50% 위치에 로드 셀을 설치하였다. 로드 셀은 루퍼 롤의 양측에 연결된 루퍼 암 2개에 각각 설치하였다. 루퍼 암을 구동하기 위하여 AC 모터를 부착하였고 실 공정의 압연 모터를 모사하기 위하여 스텝핑 모터(steping motor)를 설치하여 강관에 작용하는 장력 변화 및 루프(loop) 현상을 구현되도록 설계하였다. 루퍼 모사장치의 제어시스템은 산업용 PC, 신호처리 보드, 제어 패넬로 구성되어 있다. 제어기는 퍼지 제어 및 PID 제어가 구현되고, 신호처리 보드는 A/D 및 D/A 변환기능과 신호 조절 기능이 있다. 제어기의 입력은 루퍼 각도와 강관의 장력이고, 출력은 루퍼 모터의 속도와 방향성, 스텝핑 모터의 회전수와 방향성이다. PID 이득은 HMI (Human Machine Interface) 화면에서 온라인으로 변경이 가능하다. HMI 화면에서 장력과 루퍼 각도의 목표값을 설정할 수 있고, 퍼지 제어 및 PID 제어 모드를 선택할 수 있다. 루퍼 모터의 속도와 구동 전류값, 스텝핑 모터의 속도, 강관의 장력, 루퍼 각도가 문자 및 그래픽으로 표시된다. 루퍼 제어시스템은 4 입력과 2출력의 MIMO 시스템으로 개발되었으며 입력은 루퍼 각도와 장력 및 그의 변화량, 출력은 루퍼 모터와 스텝핑 모터의 속도이다. 루퍼 모터는 아날로그 0~5 volt로 속도 제어가 되고, CW (Clock Wise)와 CCW (Counter Clock Wise) 2 비트 디지털로 방향성을 제어한다. 스텝핑 모터의 속도는 카운터 펄스로서 제어되고 분해능은 0.0072degree/pulse이며 1비트

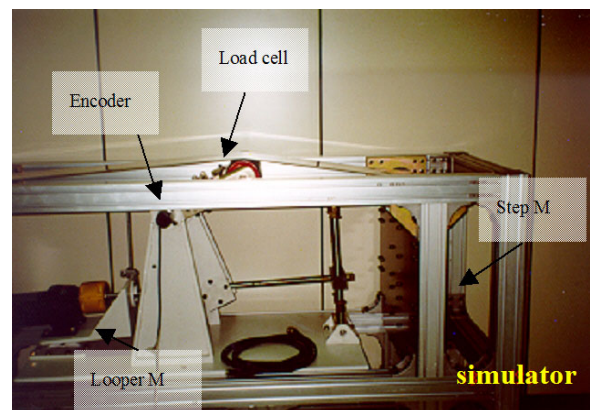


그림 8. 루퍼시스템 모사 장치.

Fig. 8. Simulator of looper system.

디지털로써 방향성을 제어한다.

제안된 퍼지 루퍼 제어의 성능을 검증하기 위하여 루퍼 모사장치를 사용하여 아래의 절차로 실험을 수행하였다.

1. 루퍼 각도 제어

강관의 장력은 제어하지 않고 루퍼 각도만을 제어하였다. 루퍼 각도 오차를 입력 받아서 루퍼 모터를 제어하여 각도 기준치를 추종하는 제어 실험이다. 그림 9는 PID 제어를 수행한 경우와 퍼지 제어를 수행한 경우의 루퍼 각도 제어 성능을 나타낸다. 루퍼 각도의 초기치는 0도이고 기준치는 현업에서 실제 사용하는 루퍼 각도인 18도로 설정하였다. 퍼지 루퍼 각도 제어가 PID 제어에 비하여 오버슈트가 작고 상승 시간이 짧으며 정상상태 오차가 적음을 알 수 있다. 이는 강관의 선단부에 과도한 장력이 작용하지 않고 폭 불량이 발생하지 않음을 유추할 수 있다.

2. 루퍼 장력 제어

루퍼의 각도는 고려하지 않고 강관의 장력만을 제어하는 실험을 하였다. 장력 오차를 입력 받아서 루퍼 모터를 제어하여 장력 기준치를 추종하는 제어 실험이다. 그림 10은 PID 제어를 수행한 경우와 퍼지 제어를 수행한 경우의 장력 제어 성능을 나타낸다. 루퍼 장력의 초기치는 0.1이고 기준치는 0.6kgf로 설정하였다. 퍼지 장력 제어가 PID 장력 제어에 비하여 정상상태 오차가 적음을 알 수 있다.

3. 외란 작용시, 루퍼 장력 제어

루퍼 모사장치의 스테핑 모터에 랜덤 신호를 입력하여 모터의 회전 속도와 회전 방향을 제어하여 강관에 지속적인 외란이 작용하도록 실험하였다. 본 실험은 루퍼 모터로써 강관

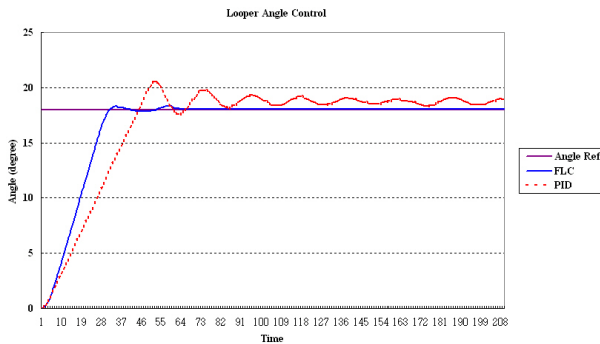


그림 9. 루퍼 각도 제어 성능 비교.
Fig. 9. Angle control performance of FLC and PID.

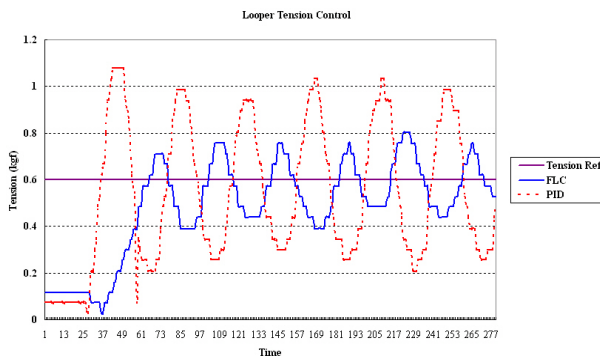
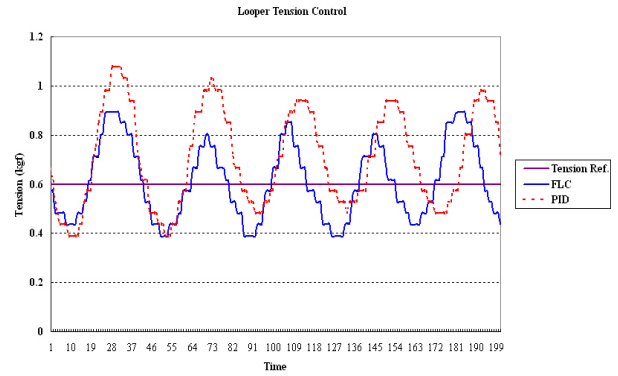
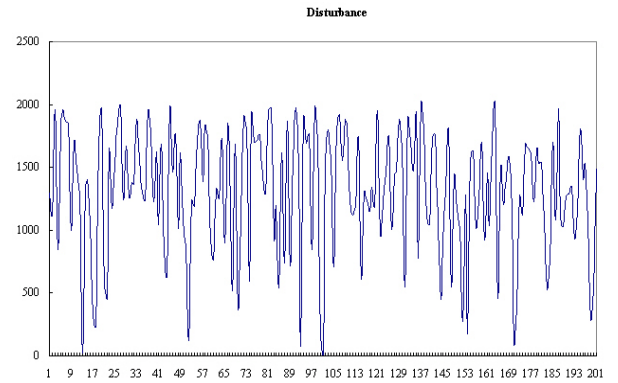


그림 10. 루퍼 장력 제어 성능 비교.
Fig. 10. Tension control performance of FLC and PID.



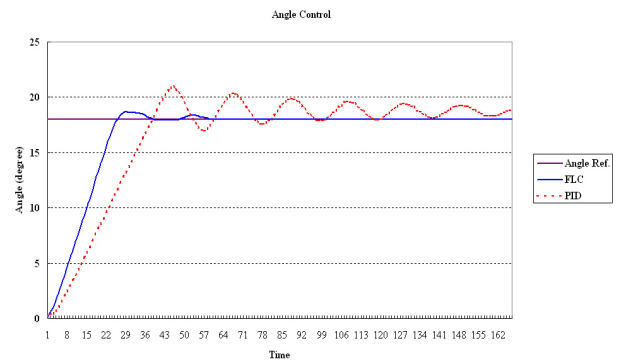
(a) Tension control performance



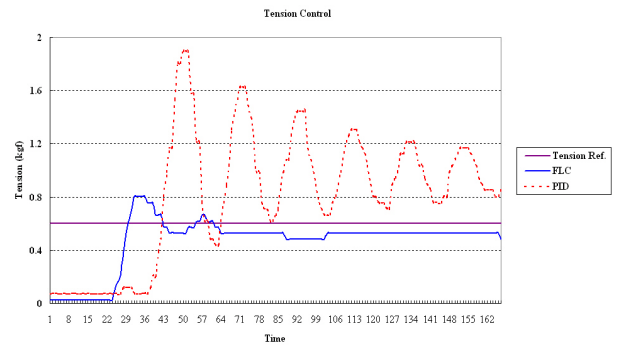
(b) Disturbance

그림 11. 외란 작용 시, 루퍼 장력 제어 성능 비교.

Fig. 11. Tension control performance of FLC and PID with disturbance.



(a) Angle control performance



(b) Tension control performance

그림 12. 루퍼 각도와 장력 제어 성능.

Fig. 12. Angle and tension control performance of FLC and PID.

의 장력만을 제어하였다. 앞의 실험의 경우는 외란이 작용하지 않는 경우이고, 본 실험은 외란이 작용하는 경우 장력 오차를 입력 받아서 루퍼 모터를 제어하여 장력 기준치를 추종하는 실험이다. 그림 11(a)는 외란이 작용 시에 PID 제어를 수행한 경우와 퍼지 장력 제어를 수행한 경우의 장력 제어 성능을 나타낸다. 그림 11(b)는 본 실험에 사용된 외란 신호이다. 퍼지 장력 제어가 PID 제어보다 정상상태 오차가 작음을 알 수 있다.

4. 루퍼 각도와 장력의 동시 제어(제안된 방법 적용)

그림 4의 제안된 퍼지 루퍼 제어방법에 의하여 루퍼 각도와 강판의 장력을 동시에 제어하는 실험을 수행하였다. 본 실험은 각도 오차로 루퍼 모터를 제어하고 장력 오차로 속도 보상치를 출력하는 실험이다. 장력 오차는 모사장치의 스테핑 모터를 사용하여 실험하였다. 앞의 실험 1~3의 경우는 루퍼 각도와 장력을 개별적으로 제어하였지만 본 실험은 루퍼 각도와 장력의 기준치를 동시에 입력하여 제어하는 실험이다. 루퍼 각도의 기준치는 18도 이고 장력의 기준치는 0.6kgf로 설정하였다. 그림 12(a)에서 루퍼 각도의 경우에는 퍼지 루퍼 제어가 PID 제어보다 정상상태 오차, 오버슈트, 상승시간, 수렴성 등이 우수함을 알 수 있다. 그림 12(b)에서 장력의 경우에는 퍼지 루퍼 제어가 PID 제어에 비하여 앞의 실험인 개별적으로 제어를 수행한 경우보다 더욱 오차를 줄이면서 기준치에 수렴함을 알 수 있다.

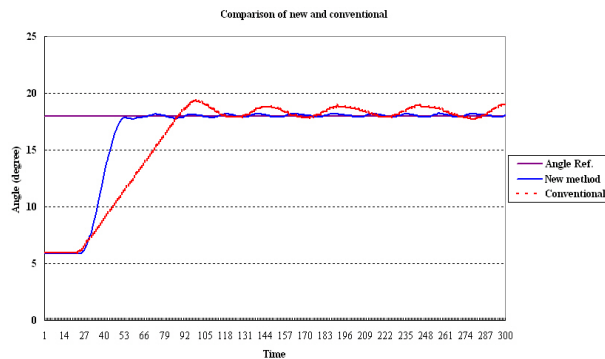
5. 루퍼 각도와 장력의 동시 제어(기존 방법과 비교)

본 실험은 그림 4의 제안된 루퍼 제어방법에 의하여 루퍼 각도와 장력을 동시에 퍼지 제어로 수행하고, PID 제어는 그

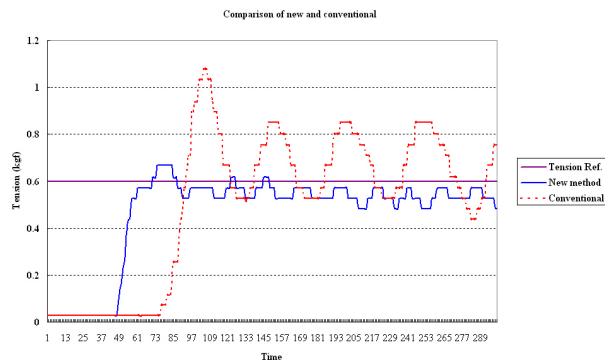
림 2의 기존 루퍼 제어방법에 의하여 수행하였다. 앞의 실험 4의 경우는 루퍼 각도와 장력을 제안된 방법에 의하여 제어하였고, 본 실험은 제안된 방법과 기존 루퍼 제어방법과의 비교하는 실험이다. 각도의 기준치는 18도 이고 장력의 기준치는 0.6kgf로 설정하였다.

그림 13(a)와 (b)에서 루퍼 각도와 강판의 장력 모두가 제안된 방법이 기존 루퍼 제어방법에 비하여 정상상태 오차, 오버슈트, 상승시간, 수렴성 등이 우수하여 제어성능이 향상됨을 알 수 있다.

강판에 작용하는 장력을 종래의 모터 전류값을 사용하여 수식모델에 의한 장력을 계산하면, 초기 구동 전류에 의하여 실제 장력보다 큰 값으로 계산되어 루퍼의 헌팅이 발생하고 이는 강판의 선단부 불량으로 작용한다. 이를 보완하기 위하여 루퍼 압에 로드 셀을 설치하여 강판에 작용하는 장력을 측정하였다. 장력의 측정에 의한 효과는 그림 12와 13에서 장력의 초기 오버슈트가 퍼지 제어의 경우 0.8kgf 이내로 제어되고 있고, 이후 정상상태에서 안정되게 목표 장력에 수렴하고 있다. 장력의 측정은 초기 과도한 장력의 작용을 최소화하는 효과가 있고, 퍼지 루퍼 제어는 정상상태의 안정된 장력제어에 개선효과가 있다. 본 논문에서는 장력 측정에 의한 제어성능 개선의 효과보다 루퍼 제어방법에 중점을 두고 있다. 그림 2의 종래의 루퍼 제어방법을 살펴보면, 상호 간섭이 작용하는 다중 루프를 갖는 PID 제어기의 튜닝의 문제이다. PID 튜닝 문제 중에서도 어려운 문제인데, A 제어기의 튜닝이 완료되면 B 제어기의 재 튜닝이 필요하고, 다시 B 제어기를 튜닝을 하면 A 제어기의 재 튜닝이 필요하므로 두 PID 제어기가 최적화되는 이득을 구하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이를 보완한 것이 그림 3의 교차 이득 제어방법이다. 교차 이득 제어방법이 두 제어기간의 간섭현상을 배제하였다고 하지만 완벽히 분리할 수 없고 루퍼 각도와 강판의 장력이 상호 효과가 있는 범위에서 적당히 조정된 이득이다. 따라서 강판의 강종(소재의 재질), 치수(두께, 폭), 압하력, 압연 속도 등이 변화하는 조업의 상황에 따라서 지속적으로 조정을 하여야 하는 데, 교차 이득과 두 PID 제어기를 동시에 최적화하는 것은 현업의 조업상황을 고려할 때 쉬운 일이 아니다. 따라서 종래의 제어방법에서 벗어나서 제안된 방법을 사용하면 간섭현상을 고려하지 않아도 제어기 튜닝이 가능하여 조정 작업을 최소화할 수 있는 장점이 있다.



(a) Angle control performance



(b) Tension control performance

그림 13. 루퍼 제어방법 비교.

Fig. 13. Comparison of conventional and proposed method.

IV. 결론

본 논문은 열간 압연 공정의 루퍼 시스템을 대상으로 새로운 루퍼 제어방법에 의한 퍼지 루퍼 제어방법을 개발하였고 루퍼 모사장치를 통하여 기존 제어방법과 비교 실험을 통하여 제어 성능을 검증하였다. 제안된 루퍼 제어방법과 퍼지 루퍼 제어는 전형적인 루퍼 제어방법과 PID 제어에 비하여 과도 응답 성능 및 기준치 수렴 속도가 우수함을 보여주며 퍼지 규칙의 최적화에 따라 제어성능이 더욱 향상될 수 있다. 제안된 퍼지 루퍼 제어방법은 기존 루퍼 제어방법에 비하여 보다 나은 제어 성능을 보였고 열간 압연 공정의 루퍼 시스템의 안정화 및 제어 정도 향상에 따른 강판의 폭 불량 감소와 조업 안정화 등의 효과가 예상된다.

참고문헌

- [1] H. Imanari, Y. Morimatsu, K. Sekiguchi, H. Ezure, R. Matuoka, A. Tokuda, and H. Otake, "Looper H-infinity control for hot-strip mills," *Journal of IEEE transactions on industry applications*, vol. 33, no. 3, pp. 790-796, 1997.
- [2] K. Fukushima, Y. Tsuji, S. Ueno, Y. Anbe, K. Sekiguchi, and Y. Seki, "Looper optimal multivariable control for hot strip finishing mill," *Journal of Iron and Steel Institute of Japan International*, vol. 28, pp. 463-469, 1988.
- [3] T. Hesketh, Y. A. Jiang, D. J. Clements, D. H. Butler, and R.v.d. Laan, "Controller design for hot strip finishing mills," *Journal of IEEE transactions on control systems technology*, vol. 6, no. 2, pp. 208-219, March 1998.
- [4] K. Asano, K. Yamamoto, T. Kawase, and N. Nomura, "Hot strip mill tension-looper control based on decentralization and coordination," *Journal of Control Engineering Practice*, vol. 8, pp. 337-344, 2000.
- [5] S. Thangavel, V. Palanisamy, and K. Duraiswamy, "Genetic based sensorless hybrid intelligent controller for strip loop formation between inter-stands in hot steel rolling mills," *Journal of ISA Transactions*, vol. 47, pp. 179-188, 2008.
- [6] K. Linghu, A. He, Q. Yang, L. Zhao, and X. Guo, "Dynamic decoupling for combined shape and gauge control system in wide strip rolling process," *Journal of Iron and Steel Research, International*, vol. 15, no. 2, pp. 28-31, 2008.
- [7] Y. G. Hur and Y. K. Choi, "A shape decision and control scheme for the stainless steel at the skin pass mill," *Journal of Iron and Steel Institute of Japan International*, vol. 49, no. 6, pp. 859-867, 2009.



허윤기

1992년 부산대학교 전기공학과 학사.
 1994년 KAIST 전기전자공학과 석사.
 2007년~2009년 부산대학교 전자전기공학과 박사. 1992년~현재 POSCO 기술연구원 책임연구원, MBB. 관심분야는 지능제어(Fuzzy, 신경회로망) 및 응용, 실시간 제어, PLC 기반 공정제어, 6 Sigma, 창의공학, 문제해결 방법론, TRIZ, 통계, 실험계획법(DOE, RSM, 다꾸찌), Data mining, 철강 계측 및 제어, 형상과 두께제어, Laser와 Plasma 표면처리 등.