열간압연 마무리 공정에서의 비간섭 루퍼제어 방법

허 윤기*
포항제철 기술연구소

A Non-Interactive Looper Control for Hot Strip Mill

YoneGi Hur
POSCO

Abstract - The Hot Strip Mill (HSM) process consists of reheating furnace, roughing mill, finishing mill and coiler. Reheating furnace heats slab and roughing mill, finishing mill produces strip from this slab. The quality of this production mainly depends on finishing mill, which consists of 6 or 7 stands. Between stands a looper is installed for the better material flow. Automatic gage control (AGC), speed control system and looper system, which are connected with each other, are the main control systems for HSM. The low strip tension can make a loop between stands, which can be caused cobble. On the other hand, high strip tension causes thickness and width reduction, which affects the product quality, and can lead to tear the strip, if it is too high. Because of it, a proper strip tension is needed for better material flow; e.g. A good looper control system is substantial for the better production quality. What is handled in this paper is, the looper controller, which is developed to minimize the fluctuation of width of strip by maintaining an appropriate strip tension between stands and to achieve the stability of the looper control system. And its performance compared with a conventional PID controller is also discussed. The difficulties associated with the maintenance of the constant tension are described.

1. 서 론

열간 압연공정은 가열로, 조압연, 사상압연(FM: Finishing Mill) 그리고 권취기로 구성되어 있다. 생산 제품의 품질은 마무리 압연기인 사상압연에서 결정된다. 사상압연은 6개 혹은 7개의 스탠드로 구성되어 있고 스탠드 사이에는 루퍼 (Looper)가 설치되어 강판에 적절한 장력을 작용하여 강판의 통판성을 향상시킨다. 강판의 장력이 너무 작으면 강판 꼬임을 야기하고 반대의 경우 장력이 지나치게 크면 강판의 폭 불량으로 나타나거나 심할 경우 판 파단을 일으킨다. 따라서 강판의 안정된 흐름을 위하여 적합한 장력이 강판에 작용하여야 한다. 루퍼 제어의 성능 향상은 강판 품질의 향상으로 나타난다. 본 논문에서는 강판의 장력제어와 루퍼의 각도제어를 동시에 구현한다. 루퍼 제어시스템에 있어서 장력제어와 각도제어는 상호 결합되어 작용한다. 만일, 루퍼 각도가 설정치 보다 높으면 장력이 크게 작용하고 이에 각도제어기는 루퍼 위치를 감소시키며 이는 너무 작은 장력을 발생시킨다. 따라서 장력제어기는 강판의 장력을 보상하기 위하여 제어 량을 출력한다. 이처럼 루퍼 각도와 장력제어기는 상호 결합되어 작용한다. 기존 프로세스에 구동되는 제어시스템은 아직까지 만족스러운 성능을 못 내고 있으므로 MIMO 루퍼 제어 시스템은 이와 같이 상호 연동 하여 작용하는 어려운 문제점을 해결하기 위하여 개발되었다.

본 논문에서는 루퍼 시뮬레이터를 제작하여 개발된 제어기와 PID 제어기간의 성능을 비교한다. 성능 비교 요소는 루퍼 각도 편차와 장력 편차와 안정된 수렴성으로 판단한다.

2. 루퍼 제어 시스템

2.1 루퍼제어 시스템

전형적인 열간 압연에서 루퍼제어 시스템이 (그림 1)에 있다. 강판이 N번째 스탠드에서 (N+1)번째 스탠드로 진행되면, 인코더로부터 루퍼 각도(α)를 측정하고 로드 셀로부터 장력을 직접 측정하거나 각도로부터 수식모델을 통하여 강판의 장력(σ)을 측정한다. 측정된 장력 값은 루퍼 모터에 의하여 제어되고 동시에 주 모터(Main Rolling Motor)의 속도에 의하여 스탠드간의 루퍼 각도를 제어한다.

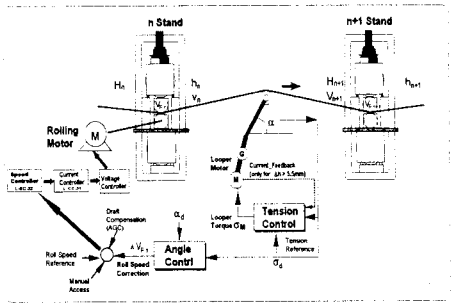

그림 1 전형적인 루퍼 제어 시스템

본 연구의 어려운 점은 장력과 각도제어 시스템간에 상호 간섭에 있다. 예를 들어, 장력이 목표치 대비 너무 높으면 장력제어기는 루퍼 각도를 감소시킴으로써 장력을 낮춘다. 이때 루퍼 각도가 목표치 대비 감소하므로 각도 제어기는 N번째 주 모터 속도를 높임으로써 루퍼 각도를 보상한다.(각도 증가) 증가된 루퍼 각도와 주 모터 속도를 높이면 양단 스탠드의 속도 편차에 의하여 장력이 다시 증가하는 효과가 발생한다. 따라서 상호 결합된 두 제어시스템은 영원히 수렴하기 어려운 상태가 된다. 장력과 루퍼 각도를 상호 결합한 수학적 모델/해석이 없으므로 현재까지 적절한 제어 방법이 없다. 현재 Cross 제어 방법과 H_∞이론의 새로운 제어 방법[1] 그리고 최적 제어방법[2][3]이 있으나 실제 설비에 On Line으로 적용된 사례는 없다.

2.2 루퍼 시뮬레이터

개발된 제어기의 성능을 검증하기 위하여 루퍼 시뮬레이터를 제작하였다. (그림 2)에 개발된 루퍼 시뮬레이터가 있다. 루퍼의 각도를 직접 측정하기 위하여 루퍼 암(arm)

의 축에 인코더를 부착하였고, 강판의 장력을 직접 측정하기 위하여 루퍼 암의 축 1/2 위치에 2개의 로드 셀을 각각 설치하였다. 루퍼 암을 구동하기 위하여 AC 모터를 부착하였고, 실 공정의 2개의 주 모터를 모사하기 위하여 시뮬레이터 프레임에 스테핑 모터를 부착하여 강판에 작용하는 장력 변화 및 루프 현상을 구현되도록 하였다.

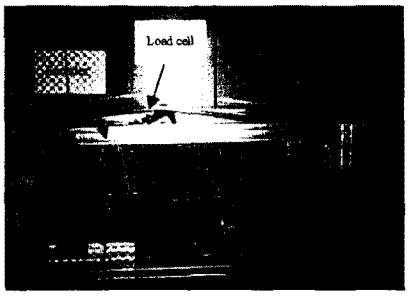

그림 2 루퍼 시뮬레이터

루퍼 시뮬레이터 제어기의 하드웨어는 산업용 PC, 신호처리 보드, 제어 패널로 구성되어 있다. 제어기는 Fuzzy 및 PID의 두 제어 알고리즘이 구현되어 있다. 신호처리 보드는 A/D 및 D/A 변환 기능과 신호 컨디셔닝 기능이 있다. 제어기의 입력은 루퍼 각도와 강판의 장력이고 출력은 루퍼 모터의 속도와 방향성, 스테핑 모터의 회전수와 방향성이다. 전원 공급과 신호 레벨링은 제어 패널내부에 구성되어 있다. 제어기의 모듈은 퍼지 제어 모듈, PID 제어 모듈 그리고 MMI(Man-Machine Interface) 모듈로 구성되어 있다. PID 이득은 MMI 화면에서 On-Line으로 쉽게 변경 가능하다. MMI 화면에서 장력과 루퍼 각도의 목표치를 설정할 수 있고, Fuzzy와 PID 제어 모듈을 선택할 수 있다. 루퍼 모터의 속도와 구동 전류값, 스테핑 모터의 속도, 강판의 장력 및 루퍼 각도가 문자 및 그래픽으로 표시된다. 루퍼 제어시스템은 4 입력과 2 출력의 MIMO 시스템으로 개발되었다. 입력은 루퍼 각도와 장력 및 그 이전 값과의 편차, 출력은 루퍼 모터 및 스테핑 모터의 속도이다. 루퍼 모터는 아날로그 0 ~ 5 Volt로 속도 제어가 되고, CW(Clock Wise)와 CCW(Counter Clock Wise) 2 비트 디지털로 방향성을 제어한다. 스테핑 모터의 속도는 카운터 펄스로서 제어되고 분해능은 0.0072 degree/pulse 이며 1 비트 디지털로서 방향성을 제어한다.

2.2.1 루퍼 제어기와 장치간의 인터페이스

컴퓨터 내에 신호처리 보드(AD Board)를 장착한 후 루퍼 장치와 연결하여 기본적인 제어 환경을 구성하였다. (그림 3)에서, 로드 셀과 전류센서(CT)의 신호를 아나로그로 입력받고 인코더의 신호를 디지털 입력으로 받으며, 루퍼 AC 모터에 아나로그 출력과 디지털 출력을 보내고 스텝핑 모터에 카운터 출력과 디지털 출력을 보낸다.

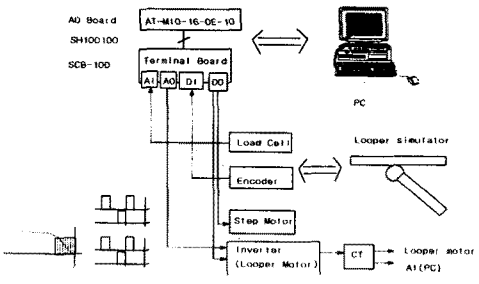

그림 3 신호처리 보드와 장치간의 인터페이스

2.2.2 루퍼 제어기의 루퍼모터 제어

루퍼 모터는 AC 모터로서 이를 제어하기 위해서는 3개의 채널이 필요하다. 루퍼 모터의 속도를 제어하기 위한 아나로그 출력 (AO) 1 채널과 루퍼 모터의 회전 방향을 정하기 위한 디지털 출력 (DO) 2 채널이 갖추어야 한다. (그림 4)는 컴퓨터 내의 보드와 퍼지 텍 보드를 동시에 사용하여 루퍼 모터를 제어하는 경우의 블럭도이다. 인코더를 통하여 루퍼 암의 각도가 신호처리 보드와 퍼지 텍 보드에 동시에 입력된다. 이들은 자체로서 하나의 제어기의 역할을 수행하여 각각의 제어 알고리즘에 의하여 루퍼 모터의 속도를 계산한 후 인버터로 출력을 내보낸다. 이 경우 전기 판넬 내부에 릴레이를 설치하여 두 제어기에서 출력되는 값을 절환할 수 있게 되어 있다. 루퍼 모터의 속도는 궤환 (Feedback) 받지 못하며 루퍼 암의 각도를 궤환 받아서 루퍼 각도제어를 하게 된다. 정리하면, 루퍼 각도 제어는 루퍼 암의 각도 오차를 입력 받아서 퍼지제어기 (혹은 PID 제어기)를 통하여 루퍼 모터의 속도를 계산한 후 각도 오차를 줄이는 방향으로 제어가 이루어 진다.

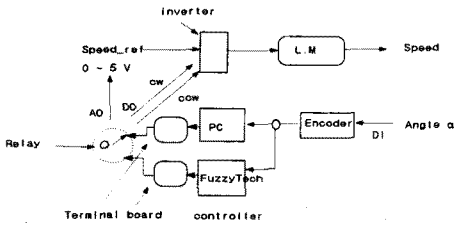

그림 4 루퍼 모터 제어 구성도

2.2.3 루퍼 제어기의 루퍼모터 및 스텝핑모터 제어

(그림 5)는 컴퓨터 내의 보드와 퍼지 텍 보드를 동시에 사용하여 루퍼 모터 및 스텝핑 모터를 제어하는 경우의 블럭도이다. 속도 제어에 의한 루퍼 각도 (위치)제어와 스텝핑 모터에 의한 외부 장력 제어를 나타낸다. 외부 장력 제어는 로드 셀에 의하여 스트립의 장력을 입력받아서 컴퓨터와 퍼지 텍 보드에서 제어 모듈을 실행한 후 각각의 터미널 블럭을 통하여 스텝핑 모터 드라이브로 입력된다. 루퍼 모터 제어와 같이 입력은 공통으로 받지만 출력은 릴레이에 의하여 절환된다. 스테핑 모터 제어를 위한 출력은 모터 속도를 정하는 펄스의 출력이 1 채널이고 모터의 방향성을 정하는 디지털 신호가 1 채널이다.

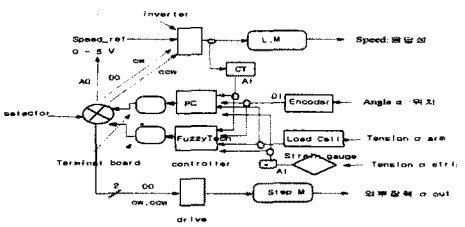

그림 5 루퍼 모터 및 스텝핑 모터 제어 구성도
(*AMP: input μV → output 1 ~ 5 V, Strain gauge의 출력을 증폭위해 AMP필요)

2.3 루퍼 제어기

루퍼 제어기는 퍼지 장력 제어기(FLC_ten)와 퍼지 각도 제어기(FLC_ang)의 두 제어 블록으로 구성되어 있다. 퍼지 장력 제어기는 퍼지화된 장력 오차와 오차 변화량(TE 와 TDE)을 2 입력으로 하고, 루퍼 모터 속도와 스테핑 모터의 속도(Δu_t_lm 과 Δu_t_sm)를 2 출력으로 한다. 퍼지 각도 제어기는 퍼지화된 각도 오차와 오차 변화량(AE 와 ADE)을 2 입력으로 하고, 루퍼 모터 속도와

스테핑 모터의 속도(Δu_t_lm 과 Δu_t_sm)를 2 출력으로 한다.

퍼지 제어기의 추론은 min-MAX 방법을 사용하였고, 비퍼지화는 무게중심법(COA)이 사용되었다. 장력과 각도의 두 제어기는 병렬로 동시에 구동된다. 루퍼 제어기의 구조를 (그림 6)에 나타내었다.

(그림 6)에서, 두 제어기는 파라메터(C1,C2,C3,C4)에 의하여 쉽게 선택되어 진다. 만일 파라메터를 C1 = C4 = 1.0으로 설정하고 C2 = C3 = 0.0으로 설정하면, (그림 1)의 전형적인 루퍼 제어 시스템으로 동작하게 된다. 반면에, 파라메터 C1 = C4 = 0.0으로 설정하고 C2 = C3 = 1.0으로 설정하면, 제안된 새로운 루퍼 제어 방식이 동작하게 된다. 두 제어기의 성능은 장력과 각도의 편차를 측정하고 비교함으로써 평가된다.

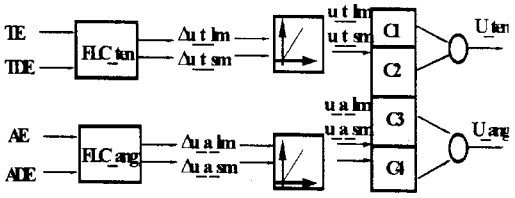

그림 6 루퍼 제어기 구조

3. 실험 결과

루퍼 제어기의 성능을 아래의 실험으로 검증하였다.

(1) 루퍼 장력과 각도 동시 제어 (제안된 방법 적용)

제안된 방법에 의하여 루퍼 각도 제어와 강판의 장력 제어를 동시에 두 제어기에 대하여 수행한 경우이다. 퍼지 제어기가 PID 제어기 보다 정상상태 오차, 과도 응답 그리고 수렴시간에서 성능이 우수함을 알 수 있다.

(그림 7-1: 각도 응답성, 그림 7-2: 장력 응답성)

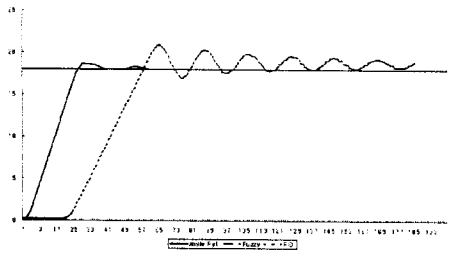

그림 7-1 신방법에 의한 장력과 각도 동시제어: 각도

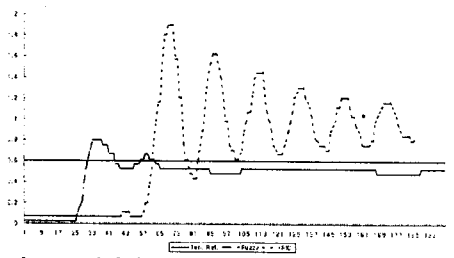

그림 7-2 신방법에 의한 장력과 각도 동시제어: 장력

(2) 루퍼 장력과 각도 동시 제어(기존 방법과 비교)

제안된 방법에 의하여 루퍼 각도 제어와 강판의 장력 제어를 동시에 퍼지 제어기로 수행하고, PID 제어기는 기존 방법에 의하여 수행한 경우이다. 퍼지 제어기가 PID 제어기 보다 정상상태 오차, 과도 응답 그리고 수렴시간에서 성능이 우수함을 알 수 있다.

(그림 8-1: 각도 응답성, 그림 8-2: 장력 응답성)

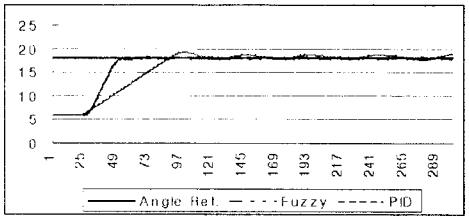

그림 8-1 신방법과 기존방법의 비교 실험: 각도

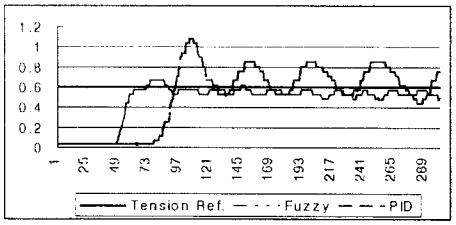

그림 8-2 신방법과 기존방법의 비교 실험: 장력

4. 결 론

열간 압연 중 사상 압연(Finishing Mill)에 대한 루퍼 제어 시스템을 개발하였고 루퍼 시뮬레이터를 통하여 실험하였다. 개선된 루퍼 제어 방식과 프로세스 모델이 없이 제어기를 구현 가능한 퍼지제어기에 대하여 PID 제어기와 비교하였다. 제안된 루퍼 제어방식과 퍼지 제어기는 전형적인 루퍼 제어방식과 PID 제어기에 비하여 설정치 수렴 속도 및 과도 응답 성능이 우수함을 보여주며, 퍼지 집합의 최적화에 따라 제어성능이 더 향상될 수 있다. 본 논문의 실험 결과는 실제 루퍼 시스템에 적용하면 기존 방식보다 더 향상된 성능이 있음을 보여주고 있다. 기존 제어기 설계방식이 수학적 방법에 근거한 수식모델 접근 방식인데 반하여, 퍼지 제어기 설계 방식은 프로세스 모델이 없이도 (현실적으로 공정을 모사 할 수 있는 모델은 거의 없고, 개발이 난이 함) 제어 성능을 보장할 수 있는 제어기 설계가 가능한 이점이 있다.

[참 고 문 헌]

[1] Hiroyuki Imanari etc., "Looper H-infinity control for hot-strip mills," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 33, No. 3, pp. 790-796, May/June, 1997.

[2]Kenya Fukushima etc., "Looper Optimal Multi-variable Control for Hot Strip Finishing Mill", Transactions ISIJ, Vol.28, pp.463-469, 1988

[3]M.Okada etc.,"OPTIMAL CONTROL SYSTEM FOR HOT STRIP FINISHING MILL", The Proc. of ASI'97, pp.221-226, July, 1997

[4]Yone-Gi Hur and Young-Hyun Lee, "Fuzzy Looper Control in Hot Strip Mill," *Proc. of the 6th EUFIT*, vol. 3, pp. 1645-1648, Sep., 1998.