1999년도 대한전기학회 정기총회 및 추계학술대회 논문집 1999. 11. 20

Cross Control 기법을 통한 열연 공정의 성능 개선

정재경*, 박주현*, 심우철*, 권오민*, 원상철
*포항공대 전자전기공학과

Improving the Performance of Hot Rolling Process through Cross Control

Jae-Kyung Jung, Ju-Hyun Park, Woo-Chul Shim, Oh-Min Kwon, Sang-Chul Won
Dep. of Electronic & Electrical Eng. POSTECH

Abstract - The looper of a hot strip finishing mill is installed between each pair of stands and plays a key role to enhance the product quality of strip by controlling the tension and height of strip in each inter-stand.
Though the conventional looper control has achieved the mass products of strip so far, it has difficulties not only tuning gains by means of errors which are caused by coupling effects between strip tension and looper angle both utilizing tension feedback. Therefore, the non-interactive control employing cross controller and tension feedback has been introduced in looper control system in order to overcome the coupling effects existing between tension and looper angle and track the reference tension efficiently.
In this paper, we present the cross controllers which play a role to decouple reciprocal effects between tension and looper angle and show better performance.

1. 서 론

제철소의 열간 압연 공정에서 사상 압연 스탠드 사이에 위치한 루퍼는 Strip에 적당한 일정 장력을 유지시켜 Strip의 두께와 폭의 변동을 줄여주는 한편 스탠드 양쪽의 Mill속도의 불균형과 AGC 압하율의 급격한 변동과 같은 요인에 의해 생기는 스탠드 사이의 Strip 초과분을 처리해주는 역할을 함으로써 Strip의 통판성을 양호하게 한다. 또한 루퍼각을 기준 위치에 유지시킴으로써 안정된 압연 작업을 가능하게 한다. 이러한 루퍼 제어의 가장 큰 어려움은 서로 간섭을 하는 루퍼각과 장력을 동시에 제어하는 것이다.
기존의 루퍼 제어 방식은 루퍼 높이는 스탠드 Mill 속도에 의해서, Strip 장력은 루퍼 모터의 토크에 의해서 제어하는 방식으로 Strip의 장력과 루퍼 각 사이의 간섭현상에서 오는 오차, 스탠드간의 Mill 속도 차에서 오는 오차 등으로 인해 이득 튜닝이 어렵고 우수한 성능을 기대하기가 어려웠다. 즉, 위 4 가지 파라미터는 상호 관련성이 있어 독립적으로 제어해서는 원하는 기대치를 얻을 수가 없다. 이에 반해 Cross Control 제어 방식의 특징은 Strip 장력은 스탠드 Mill속도가, 루퍼 높이는 루퍼 모터 토크가 각각 제어하는 방식이다. 이 방식은 장력과 루퍼 각 사이의 상호 간섭을 Cross Gain 튜닝을 통해 미리 보상함으로써 비간섭 제어를 가능하게 한다. 따라서 루퍼각과 장력을 입력과 출력으로 하는 MIMO(Multi-Input&Ouput)시스템이 SISO(Single-Input &Output) 시스템처럼 바뀌어 제어하기가 한결 수월해져 루퍼 각과 장력의 Performance를 대폭 향상시켰다.

2. 본 론

2.1 기존 루퍼 제어 방식

기존의 루퍼 제어 방식은 스탠드 Mill의 속도를 제어하는 PID제어기를 이용하여 루퍼각을 기준치에 맞춘 후에 루퍼각 오차 변동분을 가지고 루퍼 모터를 움직여 스탠드 내부의 루퍼 롤에 걸린 Strip의 장력을 제어하는 상호 간섭이 있는 제어 방식이다. 단점으로는 루퍼 롤에 걸린 Strip의 장력을 측정하는 Load Cell이 없는 관계로 피드백된 루퍼각을 이용한 기하학적 모델링으로 장력 피드백을 추정하므로 장력 Performance를 향상시키는 데 어려움이 있다.[1]
아래는 기존 루퍼 제어 시스템의 간단한 블록이다.

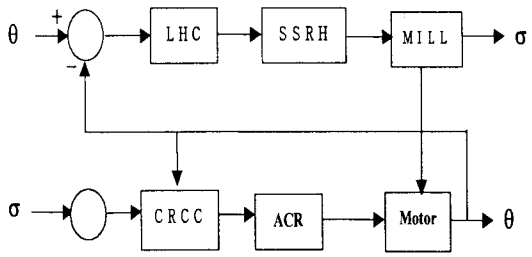

그림 1. 기존 루퍼 제어 블록 다이어그램
Fig 1. Block diagram of conventional looper control

표 1. 각 블록 설명

블 록	설 명
LHC	Looper Height Controller
SSRH	Stand Speed Rheostat
CRCC	Current Reference Calculation Controller
ACR	Automatic Current Regulator

루퍼 제어 시스템에서의 주요 외란은 skid mark라는 Strip의 열 불균형과 권취기에서 생기는 강한 장력 발생

이다. Skid mark로 인해 Strip의 두께가 균일하지 않으면 AGC가 압하력을 자주 변동시켜 Strip의 이동 속도를 바꾸게 해 결국 Strip의 장력은 일정치 못하게 되는 것이다. 또한 권취기에서 Strip의 감을 때 생기는 강한 장력은 앞단의 스탠드까지 영향을 미쳐 안정적인 압연을 방해하게 된다. 위와 같은 여러 요인의 외란 및 상호 간섭 효과를 기존 루퍼 제어 방식은 효과적으로 대처하지 못한다.

2.2 Cross Control 기법의 루퍼 제어 방식

Cross Control 기법의 루퍼 제어 방식은 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 루퍼 롤에 부착된 장력 센서인 Load Cell을 통해 장력의 피드백을 이용하는 한편 Mill 속도가 Strip 장력을, 루퍼 모터가 루퍼 각을 각각 독립적으로 제어하고 간섭 효과를 없애기 위해 설치된 Cross Controller를 통해 비간섭 보상을 해준다. 하지만 이 글에서는 새로운 시스템을 설계하는 방법대신 기존의 시스템에 장력 피드백을 설치하고 Cross Controller를 추가함으로써 기존 시스템을 재 사용할 수 있으면서 Performance를 향상시키는 방법을 찾아 보았다. 아래는 Cross Control기법의 루퍼 제어 시스템이다.

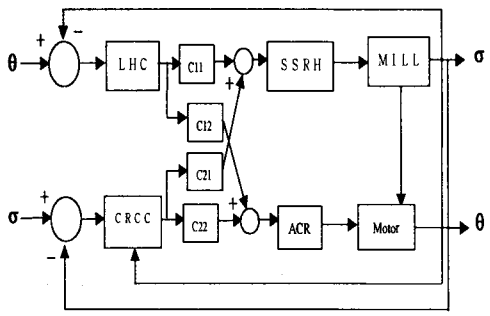

그림 2. 장력 피드백이 있는 Cross Control 기법의 루퍼 제어 다이어그램

Fig 3. Diagram of looper control with cross controller having tension feedback

Cross Control 제어 기법의 원리는 다음과 같다. 우선 아래와 같이 입력과 출력으로 이루어진 Dynamic Equation을 세운다.

$$\begin{bmatrix} \theta \\ \sigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \sigma \end{bmatrix} \quad \theta : \text{루퍼각}, \ \sigma : \text{장력}$$

위의 Cross Matrix의 Off-diagonal Term인 C_{12}와 C_{21}을 Zero로 만듦으로써 입력 θ과 σ이 출력 θ과 σ에만 각각 영향을 미치는 시스템으로 바뀌게 되는 것이다. 즉 장력과 루퍼 각 사이에 존재했던 간섭 효과를 차단하는 역할을 Cross Controller가 담당하는 것이다.

하지만 이러한 방식을 도입하기 전에 반드시 전체 시스템의 모델링이 이루어져야 한다는 것이다. 즉 Dynamic Equation으로 표시된 후에 정확한 튜닝이 가능해진다는 것이다. Mill 모델링이 완벽하지 않은 상태에서는 Trial-Error를 통한 튜닝이 오히려 더 좋은 결과를 얻을 수가 있다.[3] 실제 이 글에서는 Mill 모델링이 Non-Linear한 상태에서 수식적 가이드 라인을 제공하기 보다는 여러 번의 시도로 얻은 결과가 나았음을 알 수가 있었다.

Cross Control 기법의 루퍼 제어는 Conventional 루퍼 제어에 비해 장력의 Transient Response를 크게 향상시킨다. 실제 열간 압연 공정에서 Strip의 판폭이 줄어들어 버리는 대부분은 Strip의 선단부이다. 따라서 Strip이 처음 압연하는 과정에서 생기는 장력의 과도한 변동은 경제적으로 많은 손실을 가져온다.[4]

따라서, 선단부의 Strip의 판폭 불량을 줄여주는 Cross Controller 설치는 전체 루퍼 제어 시스템에서 중요한 구실을 하는 셈이다.

각각의 블록 다이어그램대로 만든 Simulation의 루퍼 각과 장력의 결과치를 아래에 설명하겠다. 각 시뮬레이터에서는 루퍼 각과 장력 기준치를 20도(0.349 rad)와 8.6kg/mm^{2}으로 설정을 했다. 그리고 Performance를 Settling Time과 Percent Overshoot의 두 가지 기준에 따라 개선 여부를 살펴보겠다.

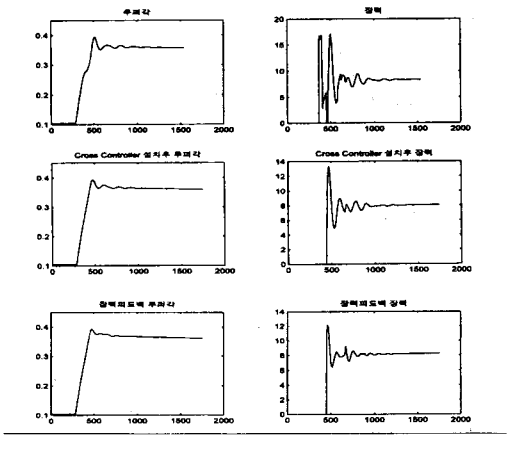

그림 4. (上)기존 루퍼 제어 시스템에서의 루퍼각과 장력
(中) Cross Control 기법의 루퍼 제어의 루퍼각과 장력
(下) 장력 피드백이 있는 Cross Control 기법의 루퍼 제어의 루퍼각과 장력

< Performance 비교 >

	장 력		루퍼 각	
	Settling time	Maximum Overshoot	Settling time	Maximum Overshoot
Top	2.85 sec	104.5 %	2.51 sec	10.55 %
Bottom	2.22 sec	43.86 %	2.41 sec	9.298 %

위의 표에서 보듯이 Cross Control 기법의 루퍼 제어 방식은 기존의 루퍼 제어 방식에 비해 장력의 Maximum Overshoot가 거의 절반 가량 줄어들고 Settling Time도

줄어들어 Transient Response가 나아지는 것을 알 수가 있다. 그리고 장력 피드백의 효과도 Middle과 Bottom의 그림을 비교해 보면 나타나는 것을 알 수가 있다. 하지만 비간섭 제어는 외란에 의한 장력의 변동에 약하다는 결과가 이미 나와있어 어느 정도의 한계를 가지고 있다고 볼 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 Conventional 루퍼 제어 시스템에 루퍼각과 장력 사이의 간섭 현상을 Decouple시키기 위해 Cross Controller를 설치하고 장력의 피드백을 사용한 겨과 루퍼각과 장력의 Performance의 변화를 살펴보았다. 결과는 장력의 Transient Response가 향상돼 선단부의 폭 감소로 인한 Strip의 낭비를 막을 수 있음을 알 수가 있다. 그리고 루퍼 각이 변동도 줄어들어 안정적인 압연 공정이 이루어 질 수 있는 기초가 마련되었다고 볼 수 있다. 하지만 실제 작업 환경의 악조건으로 인해 장력 측정이 안돼 Cross control 제어 방식이 정상적으로 운용되지 못하고 있다. 루퍼 제어 시스템에 Cross control 제어 방식을 적용하기 위해서는 더욱 강인한 장력 센서, Load Cell의 개발이 필요하다. 더욱이 Mill 모델링이 완벽하지 않은 상태에서 튜닝의 일반화가 힘든 상황이다. 따라서 Mill 모델링이 먼저 수반되어야 한다.
또한 Cross control기법의 제어 방식도 기존의 제어 방식과 마찬가지로 PID Controller를 사용하고 있다. 다양한 강종의 압연과 다품종 소량 생산의 추세로 인해 여러 가지 경우에 대응할 수 있는 Fuzzy Controller와 Neural Controller의 설치 필요성이 대두되고 있다. 마찬가지로 Cross control기법의 제어 방식은 Strip을 압연하는 과정에서 생기는 큰 외란의 영향을 제거하는데는 일정한 한계를 보인다. 그래서 Strip을 압연하는 과정에서 생기는 Strip의 온도 차이, 두께 불균일 등을 근본적으로 외란을 다루는 H-infinity제어 기법이 연구되고 있다.

[참 고 문 헌]

[1] J. C. Doyle, K. Glover, P. Khargonekar, and B. A. Francis, "State space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems, "IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 34, no. 8, 1989.

[2] Y. Kotera and F. Watanabe, "Multivariable control of hot strip mill looper, "in Proc. 8th *IFAC* 1981.

[3] Yoshiro Seki, Kunio Sekiguchi, Yoshiharu Anbe, Kenya Fukushima, Yuichi Tsuji, and Shinji Ueno, "Optimal multivariable control for hot strip finishing mill," *IEEE* Trans. Ind. Applicat. vol. 27, no. 1, 1991.

[4] Yoshiharu Anbe, Kunio Sekiguchi, Hiroyuki Imanari, "Tension control of a hot strip Mill Finisher," *IFAC* 1996