

적응기법을 이용한 Feed-forward AGC 기술 개발

홍성철* · 이영교**

Development of Feed-forward AGC using Adaptive Control Algorithm

S.C. Hong and Y.K. Lee

Abstract

Generally RF AGC (Roll Force Automatic Gauge Control) controls the roll gap using the variation of rolling force caused by the roll eccentricity and the entry thickness of material, but RF AGC takes the bad effect of the roll eccentricity. The Feed-forward (FF) AGC method, which controls the next stand roll gap by the estimation of the thickness variation due to skid mark is needed to supplement the shortage of RF AGC. In this paper, an adaptive filtering method which takes account of the kind of material, the final objective thickness and the rolling speed is proposed to predict skid mark thickness variation. In addition, an improved estimation method of control point using a speedometer and looper angle is suggested. Via on line test, the performance improvement of the suggested FF AGC method is verified.

Key Words : FF AGC, Skid Mark, Roll Gap, Roll Speed, Hot Rolling Mill.

1. 서론

열연 공정은 연주공장에서 제조한 강재를 가열하고 조압연기와 사상압연기의 열간 압연을 통하여 다음공정에 필요한 열연코일을 제조하는 과정이다. 열간 압연에서 열연 코일의 목표두께를 얻고 두께편차를 줄이기 위해 다양한 AGC (Auto gauge control) 기법들이 적용되고 있다(1). 일반적인 RF AGC는 압연기로 들어오는 소재의 두께 변화에 의한 빠져나가는 소재의 두께 변화를 제어하기 위해 압연하중의 변동량을 이용하여 롤갭을 제어하는데, 압연하중은 소재의 특성변화와 롤편심 등에 의해 변동하여 롤편심이 있으면 편심에 의한 두께변화를 더욱 악화시키는 단점을 갖

고 있다. 이러한 RF AGC의 단점을 보완하기 위해서 전단의 출측 두께 변화로부터 스킨드 마크에 의한 두께 변화성분을 추정하여, 다음 단의 롤갭 제어 지시치를 만드는데 고려하는 FF AGC (Feed forward AGC) 기법이 필요하다(4). 스킨드 마크는 가열로내 강재를 지지하는 부분에 생기는 마크로서 다른 부분에 비해 온도가 낮다. 스킨드 마크에 의한 두께 변화량은 현장의 여건에 의해 직접 측정이 불가능하여 게이지미터식에 의해 구한다. 이러한 수식의 오차가 첨가된 두께 변화량으로부터 DC(Direct Current)에 가까운 주파수 성분으로 구성되어 있으며, 롤속도 변화에 따라 주파수성분이 변화하는 스킨드 마크 변화량을 정확히 추정하는 것은 매우 어렵다. 또한 스킨드 마

* POSCO 기술연구소 계측제어연구그룹
** 포항공과대학교 전자 컴퓨터 공학부

크에 의한 두께 변화량을 추출해도 다음 단의 제어시점까지의 소요시간을 정확히 추종, 제어하기도 어렵다.

본 논문에서는 FF AGC의 원리를 이해하고 FF AGC의 제어성능 향상을 위해 스탠드간의 소요시간, 판중, 판속도, 최종목표두께의 변화를 고려한 두께 변동량 추출 방법과 속도계, 루퍼각을 고려한 정밀한 도달 시간 추종 방법을 제안하고 적용실험을 통해 결과를 확인하였다.

2. Feed-forward AGC

RF AGC는 압연하중의 편차를 이용하여 롤갭 지시치를 구하는 방식이다.

$$\Delta S = -\frac{\Delta P}{M} \times \alpha \quad \text{식(1)}$$

s : 롤갭, P : 압연 하중, M : 밀 강성 계수

위의 식(1)에서 α 는 조정계수로서 운전자의 경험에 의해서 설정된다. 두께 편차는 스킵 마크의 장주기 형태 두께 편차와 롤편심에 의해 생기는 단주기 형태의 두께 편차가 혼합되어 나타난다. RF AGC에서는 압연하중의 편차를 이용하여 제어함으로써 온도차에 의한 두께변동에 따른 압연하중 변화와 롤편심에 의한 압연하중 변화를 구분하지 못하므로 주된 두께변동의 원인에 맞추어 조정계수를 조정하게 된다. 조정계수를 크게 조정할 경우 스킵 마크에 의한 두께편차는 제거되지만 롤편심에 의한 두께편차는 증가함으로써 통상 0.6~0.8정도의 값을 사용한다. 이 경우 20%~40%정도의 스킵 마크에 의한 두께 편차 성분이 출력 두께에 계속 존재한다. 모니터링 AGC는 제한 형태의 제어방식으로 열연판이 최종 스탠드를 지나 두께 측정이 이루어지기 때문에 제어지연이 생기게 된다. 이에 비해 FF AGC는 전단 스탠드의 두께계 실측치 혹은 수식으로 두께 계산치를 구하여 남겨진 스킵 마크에 의한 판 두께편차를 제거함으로써 RF AGC를 보완한다.

압연하중과 롤갭의 선형화된 관계식에서 입측 두께가 미소변동하는 경우 롤갭과 출력두께와의 관계식은 다음과 같다.

$$\Delta h = \frac{Q}{M+Q} \cdot \Delta H + \frac{M}{M+Q} \cdot \Delta S \quad \text{식(2)}$$

H : 입측 두께, Q : 소재 소성 계수

출력 두께의 변동을 제거하기 위한 롤갭의 지

시치는 다음과 같다. ($\Delta h = 0$)

$$\Delta S = -\frac{Q}{M} \cdot \Delta H \quad \text{식(3)}$$

FF AGC는 그림1과 같이, 전단의 출력 두께 변화중 스킵 마크에 의한 두께변화를 추정하여 식(3)에 의해 롤갭 보정치를 구하고 판속도와 유압계의 응답성, 제어지연, 루퍼각 변화에 따른 길이변화, 필터의 지연시간등을 고려하여 구한 정확한 제어시점에서 적용한다.

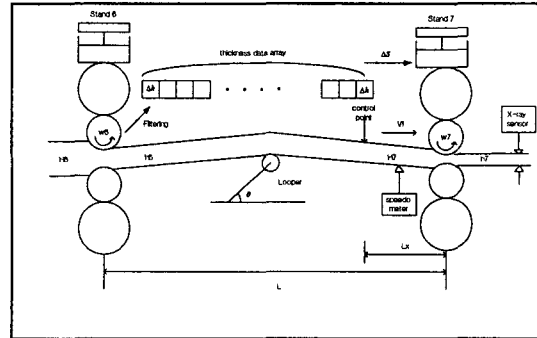


그림 1. FF AGC 개략도

3. 스킵 마크 두께변화 특성

스킵 마크 두께변화는 강제(슬라브)가 가열로에서 가열될 때 발생한 국부적인 온도차에 의해 압연 시 생기는 그림 2에 나타난 것과 같은 장주기 형태의 두께변화를 말한다.

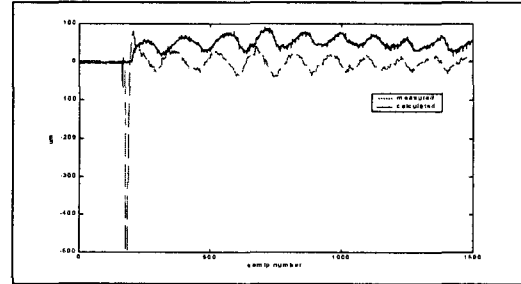


그림 2. 사상압연 출력 실측 및 예측 두께

현장에서는 여건상 스탠드와 스탠드사이에 두께계를 설치할 수 없으므로 전단의 출력 두께 변화를 직접측정 하는 것은 불가능하다. 그러므로 게이지 미터식을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$h = \text{실린더 제로위치} - \text{현실린더위치} - \text{제로하중 밀연신량} + \text{현밀연신량} \quad \text{식(4)}$$

위의 그림2과 같이 게이지 미터식에 의해 구해진 Δh 는 DC 오프셋을 가지게 된다. 그러므로 DC 오프셋과 롤 편심에 의한 주파수 성분 (1~4Hz)을 제거하기 위해 밴드 통과 필터의 설계가 필요하다. 필터를 설계하기 위해서 포항 2열 연공장의 열연 데이터의 분석을 통해 얻은 스킨드 마크 성질에 대한 결론은 다음과 같다.

- 첫째, 0.1~0.4Hz의 주파수 성분을 갖는다.
- 둘째, 목표두께가 두꺼울수록 주파수가 높다.
- 셋째, 롤 속도 증가에 따라 주파수가 높아진다.
- 넷째, 목표두께가 3~5mm인 판에 스킨드 마크 특성이 크게 나타난다.
- 다섯째, 스테인레스강이 일반강에 비해 동일한 목표 두께시 주파수가 높다.

위와 같은 스킨드 마크의 특성에 의해 그림 3에서처럼 단일 IIR (Infinite Impulse Response) 필터로서는 상수 그룹 지연이 보장되지 않음으로써 파형의 왜곡이 생기게 되며 에러가 크게 발생하게 된다. 즉 압연조건 변화에 따라 스킨드 마크 특성이 변하면 단일 IIR필터는 스킨드 마크 두께 변화를 예측하지 못한다.

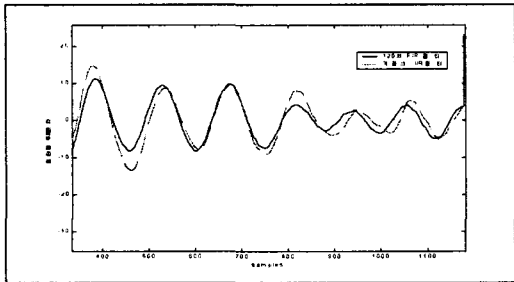


그림 3. 단일 IIR 필터의 두께변화 예측

4. 적응필터 설계

열연 공정의 특성을 고려한 Non-causal FIR (Finite Impulse Response) 필터와 스킨드 마크 특성을 고려한 적응 IIR 필터를 함께 사용한 필터 구성을 제안하였다. 그림 4는 제안된 필터의 구성을 나타내고 그림 5와 6은 FIR필터와 IIR필터의 특성을 나타낸다.

두께편차가 계산된 후 제어시점에 도달하기까지의 데이터들은 제어시점에서 미래의 입력 값이 되므로 차수만 높다면 파형을 왜곡시키지않고, 지연시간이

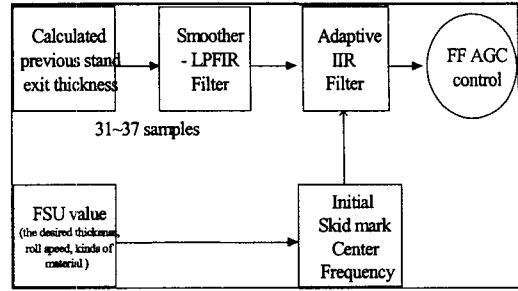


그림 3. 제안된 적응필터 블록선도

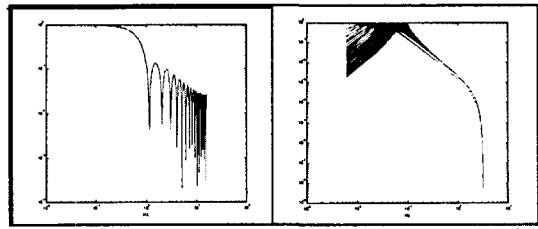


그림 5. FIR 필터특성 그림 6. IIR 필터 특성

없는 이상적인 Non-causal FIR필터가 설계 가능하다. 그러나, 전단에서 제어시점까지 걸리는 시간은 0.6초 이내이고 33ms의 샘플링 데이터를 사용할 경우 최대 34차 FIR 필터가 설계 가능하다. 스킨드 마크의 주파수는 저주파영역에 존재하므로 FIR 필터로 밴드 통과 필터를 설계할 수는 없고 저역 통과 필터 설계는 가능하다. 이 저역 통과 필터는 파형의 왜곡과 위상 지연 없이 잡음을 제거한다. 또한 IIR 필터의 차수를 줄일 수 있어서 전체 구조에서 선형 위상 특성을 증가시킨다(2).

다음 단의 밴드 통과 IIR필터는 스킨드 마크에 해당하는 대역폭을 가지며 중심주파수의 변화에 따라 미리 최소 위상 지연 되도록 각각 설계되어 저장된 후, FSU (Finisher Set-up)의 강종, 최종 출측 목표 두께에 의해 초기화되며, 롤속도가 증가함에 따라 필터의 계수를 변화하여 적용하였다.

5. 제어 동작시점 추정

제어 동작 시점을 정확하게 추정하기 위해서는 유압계 응답지연, 제어주기의 지연등에 의한 판 길이보상과 판 속도 변화에 의한 판 길이 증감을 고려해야 한다. 기존의 추정방식은 판 속도를 직접 측정하는 방식이 아니라 선진롤과 롤속도를 이용하여 계산된 판 속도를 이용함에 따라 부정

확한 추정이 이루어졌었다. 현재는 레이저 광을 이용한 직접 판 속도 측정이 가능하여 추정이 더욱 정확하게 된다. 보다 더 정확한 판길이 변화 보상을 위해, Looper각의 변화에 대한 판길이 변화의 계산을 제안하게 되었다(3)(5). 그림 7은 루퍼의 각과 판 길이의 관계를 보여준다. 이 관계로부터 판의 길이를 식(4)과 식(5)으로 표현할 수 있다.

$$L_{Left} = \sqrt{(L_A \sin \theta + R_R + H_I)^2 + (W_d + L_A \cos \theta)^2} \quad \text{식 (4)}$$

$$L_{Right} = \sqrt{(L_A \sin \theta + R_R + H_I)^2 + (Std_L - W_d - L_A \cos \theta)^2} \quad \text{식 (5)}$$

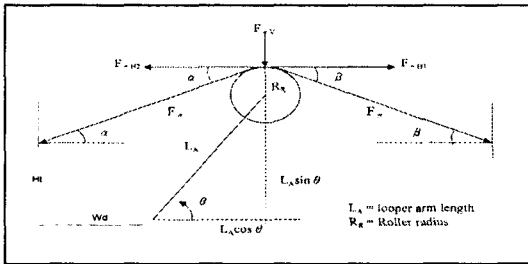


그림 7. 루퍼 동작과 판길이 변화

Std_L : 스탠드간의 길이

판의 길이는 식(4),식(5)에 의해 L_{Left} 과 L_{Right} 의 합으로 구해진다.

6. 적용실험결과

기존 AGC와 타 제어기능과의 간섭을 피하고 성능을 최적화하고 실 적용을 위해 제안된 FF AGC에 대한 적용실험을 실시하였다. 적용 전과 후의 두께제어정도를 비교하기 위해, 강종, 가열로와 목표두께에 따라 두께제어 특성이 크게 변하므로 조업조건으로 강종과 가열로 변화는 동일하고 목표두께가 비슷한 판에 대한 FF AGC 적용 전과 후의 두께제어성능을 살펴보았다. 그림 8과 그림 9는 각각 스테인레스강, 목표두께가 3.57mm, 3.55mm인 압연조건 하에서의 FF AGC 적용 전과 후의 실측 두께를 보여준다. 이 결과로부터 본 논문에서 제안된 FF AGC에 의해 Skid Mark에 의한 두께편차를 제어할 수 있음을 확인하였다.

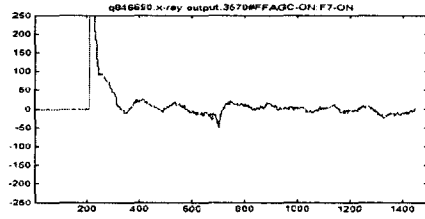


그림 8. FF AGC 적용 전 실측 두께

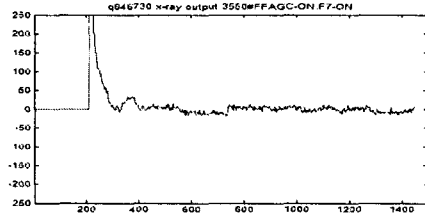


그림 9. FF AGC 적용 후 실측 두께

7. 결론

본 논문에서는 RF AGC와 모니터링 AGC의 단점을 보완하기 위한 FF AGC의 기본원리와 제어 성능 향상을 위한 필터 구성과 판 길이 추정방법을 제안하였다. 또한 적용실험을 통하여 제안된 방법에 의해 스킨 마크에 기인된 두께편차를 제어할 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- (1) Vladimir B. Ginzburg, "High-Quality Steel Rolling, Theory and Practice", Marcel Dekker, 1993.
- (2) C. Britton Rorabaugh, "Digital Filter Designer's Handbook," McGraw-Hill inc, New York, 1993.
- (3) 홍성철, 최승갑: "Speed Meter계를 이용한 열연판 Top부 통관성 개선을 위한 기술개발", 포스코 기술연구소, 연구결과 보고서, 2001
- (4) 조재수, 홍성철, 박동조, "열간압연의 정밀제어를 위한 새로운 AGC 시스템," Proc. Of the 99 KACC, pp. 119-122, 1999.
- (5) 홍성철, 최승갑, "열연 사상압연공정 스탠드간 열연판속도 측정시스템," ICASE 대구, 경북지부 학술발표회, pp. 83-87 대구. 2000..