

## 열간 압연기의 롤 편심 제어기에 관한 연구

### A Study On Roll Eccentricity Controller of Hot Rolling Mill

지창운\*

\*포항산업과학연구원(Tel:279-6529; FAX:279-6509; E-mail:cwjee@risnet.rist.re.kr)

**Abstracts** A set of approaches suggested to control the eccentricity is discussed in this paper. Among these, filter-integrator method is used to design the controller, which also includes the input signal synchronization, stabilizing filter and eccentricity source discrimination. Using the S/W that is coded for real time application of that controller, we simulated the operations of that one. The simulation results show the characteristics of eccentricity compensation and eccentricity discrimination. However, from these results, we can see that only proper stabilization strategy certifies the safe eccentricity control.

**Keywords** eccentricity control, hot rolling

## 1 서론

열간 압연기는 강괴(slab)를 가열한 상태에서 기계적인 힘을 가하여 우리가 원하는 두께로 강판을 압연하는 장치로서 그 주요 구성 요소는 압연기 하우징, 압연 롤(작업 롤, 백업 롤), 구동기(유압계, 모터 구동계)로 되어 있다. 이 장치에서는 강판을 평평하게 만들어 내기 위해 회전 롤을 사용하는 까닭에, 이 회전체가 회전하면서 생기는 편심현상(회전체가 기하학적인 중심을 중심으로 회전하지 않음) 때문에 나타나는 영향이 압연재와 접촉하는 롤 간격의 열린정도(개도)로 나타난다. 이 편심의 영향은 결국은 우리가 원하지 않는 압연판의 두께 변동으로 나타나 두께제어에 있어서 하나의 외란으로 작용한다. 열간 압연기의 대부분은 4개의 롤(상,하 작업롤, 상,하 백업 롤)을 사용하여 압연을 한다. 이러한 4중식 압연기의 경우에는 4개의 롤에서 나타나는 각각의 편심성분이 롤 간격의 프로파일에 복합적으로 나타나게 된다.

압연기의 두께제어는 주로 압연력을 측정하여 이것으로부터 압연기 출력의 판두께를 추정하고 목표 판두께와 비교 후 오차를 줄여 나가는 Gagemeter식 AGC(automatic gage control)에 의존하고 있다. Gagemeter식 AGC는 외란(입측 압연재의 두께 변동, 재질 변동 등)에 의해서 압연력이 증가했다면 판 두께가 증가했다고 보고 판두께를 줄이기 위해 롤 간격이 줄어드는 방향으로 롤 간격 제어기에 대한 제어입력을 만들어 낸다. 그러나, 편심에 의한 외란이 두께 제어시스템에 존재하는 경우 압연력이 증가했다면 편심 성분의 영향으로 롤 간격이 줄어들고 압연재와의 접촉압력이 커져서 그럴수도 있으므로 이런 상황에서 Gagemeter식 AGC가 롤 겹의 간격을 더 줄이는 방향으로 제어입력을 롤 간격 제어장치에 준다면 오히려 외란에 의한 오차가 증폭 될 뿐이다(그림 1. 참조).

압연기 편심을 줄이기 위한 대부분의 방법은 편심 성분을 간접적인 방법으로 추정하거나 직접적인 방법으로 측정하고

이 편심 성분과 위상이 반대가 되도록 롤 간격을 제어해 주는 것이다. 압연기의 압하장치가 응답특성이 충분히 빠르지 않는 경우에는 AGC의 롤 간격 제어 신호 중에서 롤 편심에 의한 성분을 필터링해서 잘못된 제어에 의해서 생기는 오차가 증폭되지 않게 하는 방법도 있다([1],[2], [3]).

본 논문에서는 신규로 열간 압연기에 적용하기 위해 설계된 편심제어기의 신호 전처리, 열간 압연기의 백업 롤 편심을 압연력으로 부터 추정하는 연산, 추출된 편심 신호를 근거로 편심신호를 발생시키는 로직, 편심제어기의 H/W에 대하여 논하고 편심제어기의 시뮬레이션 결과에 대하여 논한다.

## 2 편심 추정 알고리즘

편심 제어기에 이용된 추정 알고리즘은 1)주기적 평균연산 필터(periodic averaging filter), 2)적분연산, 3)Fourier 해석에 의한 편심 추정 등 3가지로 이것들을 압연기의 상황에 따라 각각의 기능을 발휘하도록 하는 것이 편심 제어기 설계의 하나의 요체이다.

### 2.1 주기적 평균 연산 필터

회전체가 회전하면서 발생시키는 편심 신호의 특성상 압연력 중에 포함된 편심 성분은 일정한 주기를 가지고 반복되는 정현파의 중합체라고 볼 수 있다. 물론 압연기의 특성에 따라 정현파 신호의 왜곡도 볼 수 있지만 반복되는 신호가 그림 2와 같은 형상으로 전파된다고 볼 수 있다. DC 성분이 제거된 압연기의 압연력 신호를  $e^*(t)$ 로 표시하면 이것은 한 주기 안에 존재하는 여러개의 harmonic을 포함하므로 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$e^*(t) = \sum_{i=1}^m e_i(t) + n(t) \quad (1)$$

여기서  $n(t)$ 는 잡음이고  $i$ 는 harmonic의 번호이다. 어떤 편심 성분  $e_i$ 를 시간 영역에서 효과적으로 추출 할 수 있는 방법은 주기적인 연산식을 이용하는 것이다(이하에서는 편의상  $i = 1$ 인 경우를 예로 들고 첨자 생략).

$$\hat{e}(t) = \alpha \hat{e}(1 - \tau) + (1 - \alpha)e^*(t), \quad 0 \leq \alpha < 1 \quad (2)$$

여기서  $\hat{e}$ 는  $e$ 의 추정값이고  $\tau$ 는 편심성분의 주기이다. 식(2)를 살펴보면 연산이 진전됨에 따라서  $\hat{e}(t)$ 의 값이 감쇠함을 알 수 있다. 또한  $\alpha$ 가 크면 그 이전 주기의 데이터의 영향을 많이 받고, 입력 데이터에 느리게 적응 할 것이며 잡음에는 강한 특성을 가질 것이다.

이 필터는 백업 롤을 교체한 지 얼마 지나지 않고, 롤 들이 잘 맞물려 있고, 롤 간에 미끄러짐이 없이 회전 할 때 효과를 발휘한다.

## 2.2 적분연산

식(2)와 유사한 형태의 다음 식을 이용하는데

$$\hat{e}(t) = \hat{e}(t - \tau) + \beta e^*(t), \quad \beta < 1 \quad (3)$$

이 적분연산은 상,하 백업 롤의 편심 프로파일을 유지하는 것이 주역할이다. 전 절에서 설명한 필터는 여러개의 롤에서 나오는 복합된 편심성분을 롤간의 미끄러짐이 크지 않을때 추정연산을 하여 편심을 보상하는 것이며, 열간 압연기와 같이 1매의 코일을 압연하고 난 후에는 그때 까지 형성 되었던 편심 프로파일은 없어지고 새로운 코일을 압연 할 때 다시 편심 프로파일을 형성해야 한다. 하지만 2개의 백업 롤의 회전과 동기하여 적분 연산을 수행하는 적분기를 이용하면 백업 롤을 교환하기 전까지 각 백업 롤에 대한 편심 프로파일을 유지하게 된다. 적분계수  $\beta$ 를 크게하면 편심 프로파일을 빨리 형성 할 수 있는 반면 시스템이 불안정해 지기 쉬우므로  $\beta$ 를 낮게 유지 하고, 그 대신 이 프로파일을 더 빨리 형성하기 위해 식(4)와 같이 필터 연산에서 형성된 프로파일을 적분연산에 더하는 경우도 있다.

$$\hat{e}(t) = \hat{e}(t - \tau) + \beta e^*(t) + \gamma \hat{e}_f(t - \tau) \quad (4)$$

여기서  $\gamma$ 는 조정계수이고  $\hat{e}_f(t - \tau)$ 는 필터 연산에서 이미 형성된 편심 프로파일 이다.

## 2.3 Fourier 해석에 의한 편심 추정

압연기 롤의 편심을 추정하는 또 하나의 방법은 Fourier 변환 이론에 의한 것이다. 이것이 가능한 것은 축차적으로 Fourier

변환이 식(5)에 의해 계산 될 수 있기 때문이다([4],[5]).

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} C & S \\ -S & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + 2(1-\alpha) \begin{bmatrix} C \\ -S \end{bmatrix} e^*(k) \quad (5)$$

여기서  $C = \cos(\omega_o)$ ,  $S = \sin(\omega_o)$ 이고  $\omega_o$ 는 해당 harmonic의 주파수이다. 식(5)을 초기값  $x(0) = 0$ 으로 하고  $x_1, x_2$ 에 대하여 풀면

$$\begin{aligned} x_1(k) &= 2(1-\alpha) \sum_{j=1}^k \cos(\omega_o j) \alpha^{j-1} e^*(k-j) \\ x_2(k) &= 2(1-\alpha) \sum_{j=1}^k \sin(\omega_o j) \alpha^{j-1} e^*(k-j) \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)은 Fourier 급수를 전개하고 있으며 이 결과를 이용하여 Fourier 계수를 계산하고 이 계수로 우리가 원하는 편심성분을 시간영역으로 복원 할 수도 있다.

이 필터링 방법을 이용하게 되면 입력 신호의 동기화가 적절히 이루어지지 않아 이전에 설명한 두 방법을 쓰기가 부적절 할때도 백업 롤의 회전 주파수 대역 근방의 필터 열을 구성하여 편심성분을 추출하는 문제를 해결 할 수 있다.

## 3 편심 제어기의 구성

### 3.1 입력신호 동기화

편심성분을 추출 하기위한 연산주기가 각 백업 롤의 회전 주기와 일치하게 하기 위해서는 입력신호의 샘플링 주기를 필요에 따라 변화 시켜 줄 필요가 있다. 백업 롤의 원주를  $t(0 \leq t < \tau)$  등분하여 백업 롤이  $1/t$  회전 할 때마다 압연력 신호를 샘플링 하여 위에서 설명한 추출 알고리즘을 계산 한다면 모든 롤이 미끄럼 없이 회전하지 않는다 하더라도 각 롤이 가지고 있는 편심 프로파일을 유지 할 수 있을 것이다. 이 기능을 구현하기 위해 백업 롤의 회전 주기를 측정하고 적절한 샘플링 주기를 결정한다.

### 3.2 시스템 불안정화 대책

편심제어를 매우 민감하게 만드는 요소 중의 하나가 제어기 출력의 타이밍 오차에 의해 나타나는 시스템의 불안정화 이다. 처음에는 심각하지 않아 보이지만 시간이 지나면서 급격히 진전되는 양상을 보인다(그림 3.(a) 참조). 이러한 결과가 나타나는 데는 고주파 영역에서의 위상이동이 큰 몫을 차지하므로 시스템 불안정화를 막기 위해서는 제어기 입력측에 저주파 통과 필터를 설치하여 고주파 신호의 영향을 줄임으로써 소기의 목적을 이룰 수 있다(그림 3.(b) 참조). 또한 적분기를

쓰는 연산에서는 위상 이동이 소량으로 억제 되도록 대역폭을 제한 해야한다.

### 3.3 S/W 및 H/W 구성

편심 추출 알고리즘을 연산하기 위한 보드 컴퓨터(MC68040), 백업 롤의 회전주기를 측정하기 위한 근접 스위치, 이 근접 스위치의 펄스 신호와 작업 롤의 펄스열 신호를 취급하기 위한 카운터가 H/W의 대부분을 차지한다. S/W의 대부분은 카운터의 interrupt 신호를 받아서 동작하는 함수로 되어 있고 그 외에 fault를 check 하기 위해 일정 주기마다 수행되는 함수가 있다. 최종적으로 컴퓨터에서 연산된 제어 출력은 AGC의 롤 간격 제어신호에 더해진다.

## 4 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 백업 롤의 회전 특성을 고려 할 때 이상에서 기술한 편심추출 방법들이 요구되는 기능을 발휘하고 제어기의 편심보상 신호가 롤 간격제어에 적절히 작용했는지를 확인하기 위해 실제 연산용 컴퓨터에서 실행하기 위해 작성된 언어 코드로 실시하였다. 이를 위해 회전주기  $\tau = 0.32s$ 인 백업 롤의 1회전에 1회 나타나는 편심성분(진폭은  $\pm 0.01mm$ )을 기준으로 편심, 회전조건을 변경 시키면서 그 결과를 고찰해 보았다. 시뮬레이션에 이용된 제어기는 주기적 평균연산 필터와 적분연산기를 조합한 것으로서 위에서 언급한 식(4)의 기능을 추가 하였다. 그 중에서 적분연산기 2개는 상,하 백업 롤과 각각 동기하여 연산하였다. 결국은 필터의 출력신호와 2개의 적분기 출력을 더한 값이 롤 간격을 제어하기 위한 편심제어 신호가 된다. 그림 3.~5.에 편심제어기의 주요 특성을 요약해 볼 수 있는 시뮬레이션 결과를 보았다.

그림 3.은 제어신호의 위상이동에 의한 시스템 불안정화 양상을 보여주는 결과로서 위상이동에 취약한 고주파수 대역의 제어신호가 초래하는 결과(그림 3.(a))와 동일한 시스템의 입력측에 필터를 설치하여 얻은 결과(그림 3.(b))를 볼 수 있다.

압연기를 구성하고 있는 모든 롤의 원주가 완전한 원이고 밀착되어 있는 경우 상,하 양 백업 롤의 회전 속도는 동일 할 것이다. 이 경우에 편심성분의 근원은 알 수 없으며 2개의 적분기에 나타나는 편심 프로파일은 동일 할 것이다. 그림 4.에 나타난 결과가 이 경우에 대한 것이다. 백업 롤 하나에는 1회전에 1회 나타나는 편심성분, 또 다른 백업 롤에는 1회전에 2회 나타나는 편심성분이 있는 경우, 복합된 편심성분을 보상하기 위한 제어신호(EC, eccentricity compention)가 그림 4.(b)~(d) 이다. 각각 필터의 출력과 2개의 적분기 출력이다

. 필터의 출력은 초기 보상값은 크지만 시간이 지남에 따라 0으로 접근하고 복합적인 편심 보상값을 적분기가 유지하게 된다. 이와 같은 보상 신호에 의해 제어된 롤 간격의 프로파일은 그림 4.(a)이다.

상,하 양 백업 롤이 각기 다른 속도로 회전하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과가 그림 5.이다. 역시 필터의 출력값은 초기에만 나타나고 시간이 지남에 따라 0으로 접근하고 2개의 적분기는 각 백업 롤이 갖는 편심 프로파일을 식별하여 유지함을 확인 할 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 압연 중에 압연력이 걸리지 않는 구간이 존재 하더라도 이미 유지하고 있는 적분기의 편심 프로파일을 이용하면 백업 롤의 편심보상이 계속적으로 이루어 질 수 있다.

## 5 결론

주기적으로 반복되는 열간 압연기 백업 롤의 편심을 제어하기 위해 필터와 적분기를 반복 계산하는 편심제어기에 대하여 고찰해 보았다. 또한 축차적으로 Fourier 변환을 계산 함으로써 편심성분을 추출하고 이것을 압연기 편심제어에 유용하게 이용할 수 있을 것으로 생각된다. 필터와 적분기를 이용한 편심제어기를 S/W화 하여 시뮬레이션한 결과를 볼때 이 제어기를 실제 적용하기 위해서는 위상이동에 의한 시스템 불안정화에 대한 대책이 필요함을 알 수 있었다. 또한 여기서 적절한 입력신호 동기화로 편심원을 구별해 내고, 편심성분을 저장하고 있다가 편심제어에 이용할 수 있음을 보았다.

향후에는 시뮬레이션에 이용한 함수를 실시간으로 작동 하도록 하는 실제적용 작업을 수행할 계획이며 Fourier 변환을 이용한 편심 추출용 필터를 설계할 계획이다. 이 필터열을 이용하면 백업 롤 회전감지 장치가 fault가 나더라도 효과적인 편심제어의 수행이 가능한 제어장치를 얻을 수 있다고 본다.

## References

- [1] I. Imai et al, "FARE Detector and Control System for Elimination of Roll Eccentricity", *Isikawagima-Harima Engineering Review*, vol.13, No.2, pp.189-198, 1973.
- [2] A. Kitamura et al, "Recursive Identification Technique for Roll Eccentricity Control", *IFAC 10th Triennial World Congress, Munich, FRG*, pp.113-118, 1987.
- [3] W. J. Edwards et al, "Roll Eccentricity Control for Strip Rolling Mills", *Proc. 12th IFAC World Congress*, vol.2-14 pp.200-211, 1987.
- [4] G. C. Goodwin et al, "Sinusoidal Disturbance Rejection with Application to Helicopter Flight Data Estimation", *IEEE Trans. on ASSP*, vol.34, No.3 pp.479-484, 1986.
- [5] G. C. Goodwin et al, "Adaptive Filtering, Prediction and Control", *Prentice-Hall*, 1984.

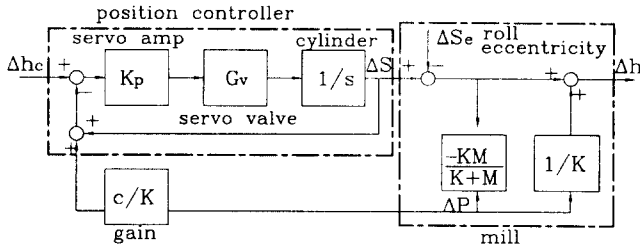


그림 1. Gagemeter AGC의 블록선도  
 Fig. 1. Block diagram of Gagemeter AGC

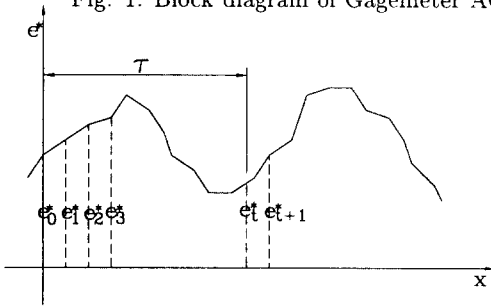


그림 2. 압연력의 변동형태  
 Fig. 2. Typical curve of roll force variation

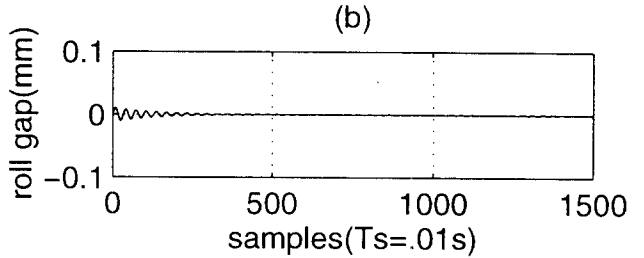
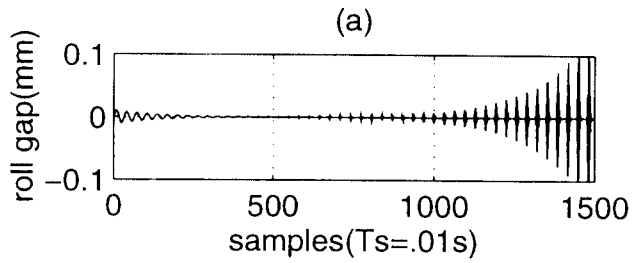


그림 3. 시스템 불안정화에 대한 시뮬레이션  
 Fig. 3. Simulation example to show unstabilization

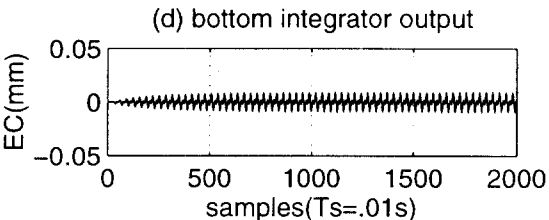
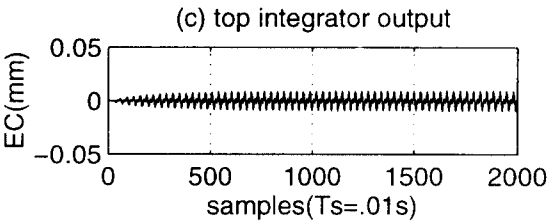
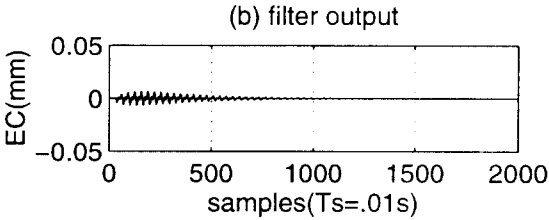
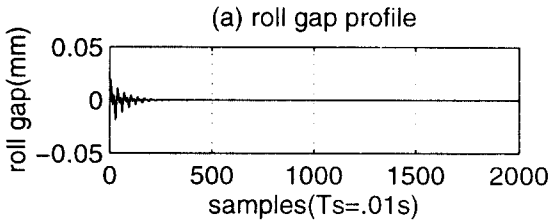


그림 4. 진원인 상태로 회전하는 롤에 대한 시뮬레이션  
 Fig. 4. Simulation example for the case of tightly matched rolls

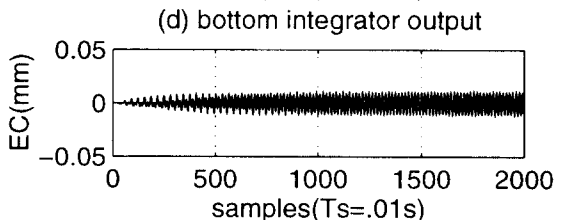
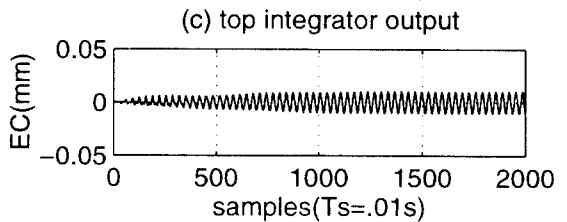
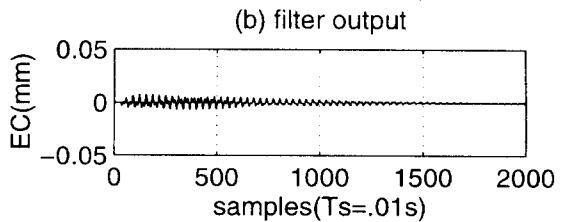
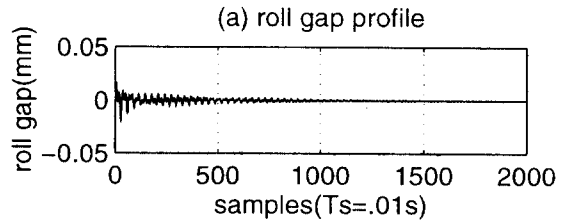


그림 5. 서로 다른 속도로 회전하는 롤에 대한 시뮬레이션  
 Fig. 5. Simulation example for the case of rolls rotating with different speed