

냉간압연 공정에서의 편심제어

(Roll Eccentricity Control for Cold Strip Rolling Processes)

백 기남(산업과학기술연구소 제어연구부)
K.N. Paik(RIST)

류 석환(대구대학교 전자공학과)
S.H. Yoo(Taegu University)

Abstract

A roll eccentricity controller for a tandem cold rolling process is designed to attenuate the outlet thickness deviation due to roll eccentricity. In order to design the controller, the excess stability margin is maximized by solving a standard H_2 optimization problem under the requirement that ensure disturbance rejection for a class of disturbance. Robust performance of the proposed controller is checked by a computer simulation.

1. 서론

연속 냉간압연 공정은 일간 압연제품을 소재로 하여 수요가가 원하는 치수로 최종적으로 압연을 하는 공정으로 4 혹은 5개의 압연 stand가 연속으로 연결된 공정이다. 연속 냉간압연 공정에서의 두께제어에는 냉연제품의 두께치수가 수요가의 허용공차 범위내에 들 수 있도록 하는 중요한 제어 계의 하나로서, 최근 수요가의 두께허용 공차가 점점 엄격해 짐에따라 두께제어계의 제어정도 향상이 필수불가결해 지고 있다. 두께 편차의 원인으로서의 입측 소재 두께의 변동, stand간의 장력변동 등의 여러가지 요인이 있으나 본 연구에서는 압연 roll의 편심성분에 의한 두께변동을 억제하기 위한 제어 algorithm을 제시하고자 한다.

편심이란 압연 roll의 기하학적 중심과 축 중심의 불일 치로 기인하며 특히 상하부의 Back-up roll의 편심이 문제가 되며 압연기 출측 두께에의 편심성분에 의한 영향은 크기가 수 micron 정도이고 주파수가 Back-up roll의 회전주파수 상당의 주파수를 가진 두께편차가 나타난다. 비록 편심영향이 수 micron정도의 크기를 가진 두께편차를 야기시킨다 할지라도 D&I(Drawing and Ironing)재와 같은 극박의 치수엄격제의

경우에는 편심영향의 제거가 제품의 두께 허용공차를 유지 시키는 데에 필수적이며 따라서 최근 편심제어를 위한 많은 연구가 수행되고 있다.[1]-[3]

편심의 크기를 직접 측정하는 것은 매우 어려우며, 풍 상 간접적으로 압연하중이나 두께편차의 power spectrum에서 압연 roll의 회전수에 상당하는 주파수 범위에서의 크기를 분석함으로써 편심의 유무를 판정한다. 편심제어 방식으로는 주로 압연하중의 변동을 측정하여 이로부터 매 순간의 편심 크기를 추정하여 roll 간격을 보상하는 방식이 주류를 이루 고 있으며, 본 연구에서도 압연하중의 변동을 측정하여 편심 에 의한 출측 두께의 변동을 억제 할 수 있는 algorithm을 제 시하고자 한다.

2. BISRA AGC와 편심제어 개요

압연 stand에서의 압연현상은 압연기를 구성하고있는 mill housing의 탄성과 압연재의 소성특성에 의해 지배되며 일반적으로 비선형이며 다음의 비선형 방정식으로 표현한다.

$$F = f_1(H-h, C) \quad (2-1)$$

$$h = f_2(S, F) \quad (2-2)$$

여기에서 F , H , h 및 S 는 압연하중, 입측 소재 두께, 출측 두께 및 back-up roll 축의 임의점에 대한 위치를 나타내며, C 는 압연속도, 압연재의 장력, 압연재의 성분등을 포함한 압연조건의 함수이다.

F , H , h , S , C 의 초기 설정치를 F_0 , H_0 , h_0 , S_0 및 C_0 라 할때, 초기 설정치에 대하여 1차로 선형화하면 (2-1)과 (2-2)는 다음과 같다.

$$\Delta F = Q (\Delta H - \Delta h) \quad (2-3)$$

$$\Delta h = \Delta S + \Delta F / M \quad (2-4)$$

여기에서 $\Delta F = F - F_0$ 이며, ΔH 및 ΔS 등도 유사하게 정의된다. Q 는 초기설정치에서의 압연재 소성계수이고 M 은 mill

housing을 포함한 압연기의 spring 상수이다.

BISRA (British Iron and Steel Research Association) AGC(Automatic Gauge Control)는 전세계적으로 널리 사용되고 있는 두께제어 logic으로서, (2-4)에서 $\Delta h = 0$ 이 되기 위해서는 roll 간격의 보상항 ΔS_r 은

$$\Delta S_r = -G \Delta F / M \quad (2-5)$$

으로 계산되며 G는 제어 이득으로서 전체 mill system의 안정성에 관련되며 [4] 통상 0.6 - 0.9의 값을 갖는다.

다음 편심이 존재할때의 BISRA AGC와 편심의 영향을 조사한다. 편심량을 e 라하면 실제 roll 간격과 초기설정치와의 차이는 $\Delta S + e$ 가되며, 따라서 (2-4)는 다음과 같다.

$$\Delta h = \Delta S + \Delta F / M + e \quad (2-6)$$

또 (2-6)을 (2-3)에 대입하여 정리하면 압연하중식은 다음과 같다.

$$\Delta F = \frac{MQ}{M+Q} (\Delta h - \Delta S - e) \quad (2-7)$$

만약 편심에 의거 실제 roll 간격이 감소할 경우($e < 0$), (2-6)으로부터 출측두께는 감소하게되고 출측두께가 감소한 만큼 압연하중은 (2-7)로부터 증가하게된다. 압연하중이 증가하면 BISRA AGC는 (2-5)에 의하여 roll 간격이 더욱 감소하도록 작동되므로 출측두께는 더욱 더 감소한다. 이와같은 이유로 BISRA AGC는 편심에 의한 두께변동을 증폭시키는 효과를 초래함으로써 편심영향을 줄이기 위한 방법의 개발이 필수적이다.

출측 두께에서의 편심의 영향을 줄이기 위해서 최근 Kitamura는 ΔF 를 측정하여 측차 추정법을 사용하여 on-line 으로 편심의 크기 e를 추정하는 방법을 제시하였다.[1] 그러나 이경우 편심추정치는 (2-7)에서 알수있는 것과같이 M 및 Q의 값에 상당히 의존적이다. 따라서 본연구에서는 M, Q의 불확실성에도 건설한 편심 제어기를 설계한다.

3. 편심제어기 설계

(2-7)을 이산형으로 다시 쓰면

$$\Delta F(k) = \frac{MQ}{M+Q} (\Delta h(k) - \Delta S(k) - e(k)) \quad (3-1)$$

따라서

$$\begin{aligned} \Delta F(k+1) - \Delta F(k) &= -\frac{MQ}{M+Q} (\Delta S(k+1) - \Delta S(k)) \\ &\quad - \frac{MQ}{M+Q} (e(k+1) - e(k)) \quad (3-2) \end{aligned}$$

여기에서 입측소재 두께변동은 천천히 변동한다고 가정한다. 유압계의 전달함수를 $P(z)$ 그리고 기준입력을 BISRA AGC부분과 편심제어량의 합으로 표시하면

$$\Delta S(z) = P(z) (\Delta S_r(z) + \Delta S_{r0c}(z)) \quad (3-3)$$

이되고, 여기에서 $\Delta S_{r0c}(z)$ 는 편심제어를 위한 제어량이다. 편심상, sampling 주기동안의 각 변수들의 변화량을 다음과 같이 정의한다.

$$y(k) = \Delta F(k) - \Delta F(k-1)$$

$$z(k) = \Delta h(k) - \Delta h(k-1)$$

$$u(k) = \Delta S_{r0c}(k) - \Delta S_{r0c}(k-1)$$

$$e'(k) = e(k) - e(k-1)$$

(2-5), (3-2) 그리고 (3-3)을 사용하여 정리하면

$$Y(z) = -\frac{MQ}{M+Q} \frac{1}{1 - \frac{GQ}{M+Q} P(z)} (P(z) U(z) + E'(z)) \quad (3-4)$$

(2-3)으로부터,

$$z(k) = -y(k) / Q \quad (3-5)$$

편심제어의 목적은 출측두께에서의 편심영향을 제거하는 것으로서 출측두께의 편심주파수에 상당하는 성분을 제거하는 것이므로 $z(k)$ 를 0으로 접근시키는 문제로 생각할 수 있다. 물론 $z(k)$ 가 0으로 접근하더라도 $\Delta h(k)$ 의 직류성분은 여전히 존재하지만 이 직류성분의 원인은 주로 초기설정치계산의 오차에 기인하며 BISRA AGC와 편심제어의 수단을 사용해서는 제거가 어렵고 이를 제거하기 위해서는 출력단에서의 두께추정기를 사용한 Monitor AGC 혹은 X-ray AGC라 부르는 feedback 제어계를 구성하여 제거한다.

(3-5)로부터, $z(k)$ 를 0으로 접근시키는 문제는 $y(k)$ 를 0으로 접근시키는 것과 동일하므로 편심제어문제는 다음의 제어문제로 생각할 수 있다.

그림 1에서 $\Delta P(z)$ 는 공칭모델 $P_0(z)$ 에 대한 가산형 불확실성을 나타내는 모델이며 안정하다고 가정한다. $P_0(z)$ 와 $W(z)$ 는 안정한 전달함수이며 각각 다음과 같이 정의된다.

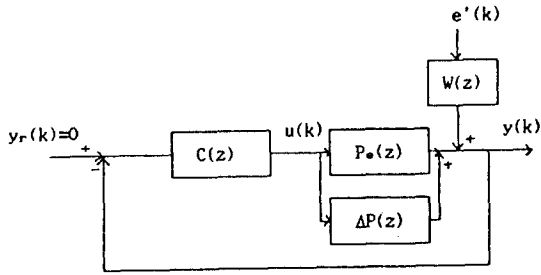


그림1 등가 제어 block diagram

$$P_0(z) = -\frac{MQ}{M+Q} \frac{P(z)}{1 - \frac{GQ}{M+Q} P(z)} \quad (3-6)$$

$$W(z) = -\frac{MQ}{M+Q} \frac{1}{1 - \frac{GQ}{M+Q} P(z)} \quad (3-7)$$

편심량 $e(k)$ 가 주파수 w 인 정현파라면 $e'(k)$ 도 역시 주파수가 w 인 정현파이므로 편심제어문제는 다음과 같다.

편심제어문제 : 편심제어기 $C(z)$ 를 다음의 조건이 충족되도록 설계한다.

i) 크기가 미지이고 주파수가 w 인 모든 종류의 정현파성 외란 $e'(k)$ 에 대해서 $y(k)$ 는 0으로 접근한다.

ii) $\Delta P(z) = v(z)d(z)$ 라 할때, $\sup_{|z|=1} |d(z)| \leq r$ 이면 페루프 시스템이 internally stable한 r 의 크기를 최대화한다. 여기에서 $v(z)$ 는 안정하고 최소위상인 weight 함수이다.

그림 1에서 제약조건 i)만을 충족하는 제어문제는 $P_0(z)$ 의 영점이 $e'(k)$ 의 불안정한 mode를 포함하고 있지 않는다는 조건 아래서 Davison에 의하여 처음으로 상태공간 모델을 사용하여 제시되었다.[5] 이 경우 $C(z)$ 의 구조는 반드시 $C(z)$ 의 극점이 $e'(k)$ 의 불안정한 mode를 포함하고 있어야 함을 보여주고 있다. 이 사실을 이용하여 최근 Xu와 Mansour는 i)과 ii)의 제약조건을 충족하는 제어문제를 최근 연구가 활발한 H_∞ 최적화기법을 사용하는 방법을 제시하였다.[6] 즉 ii)의 조건은 robust stability 정리[7]에 의하면

$$\sup_{|z|=1} |C(z)(1+P_0(z)C(z))^{-1}v(z)d(z)| < 1 \quad (3-8)$$

이 페루프 시스템이 안정할 필요충분조건이므로 다음의 최적화문제와 등가이다.

$$\min_{C(z)} \sup_{|z|=1} |C(z)(1+P_0(z)C(z))^{-1}v(z)| \quad (3-9)$$

(3-9)의 최적화문제를 풀기 위하여 최근 여러가지 방법이 개발되었으나[8] [9], $P_0(z)$ 의 극점이 단위원 상에 존재할때는 ill-conditioning을 초래한다. 그러나, 이 경우 conformal map을 이용하여 ill-conditioning을 제거하는 대신 sub-optimal 해를 얻을 수 있다[6][10]. 본 연구에서도 conformal map을 이용하여 sub-optimal 해를 얻는 방법을 사용하여 설계절차는 다음과 같다.

1) 편심량이 w 의 주파수의 정현파형이라면 다음과 같이 $a(z)$ 를 정의한다.

$$a(z) = \frac{1}{s^2+w^2} \Big|_{s=\frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}}$$

여기서 T 는 sampling 주기이다.

2) 다음의 확장된 plant 및 weighting function을 구성한다.

$$P_a(z) = a(z) P_0(z)$$

$$v_a(z) = a(z) v(z)$$

3) plant 및 weighting function에 conformal mapping을 한다.

$$P_a(s) = P_a(z) \Big|_{z=(1-\frac{T}{2}d + \frac{T}{2}s)/(1+\frac{T}{2}d - \frac{T}{2}s)}$$

$$v_a(s) = v_a(z) \Big|_{z=(1+\frac{T}{2}d + \frac{T}{2}s)/(1-\frac{T}{2}d - \frac{T}{2}s)}$$

여기에서 d 는 임의의 양수이다.

4) 다음의 최적조건을 만족하는 $C_a(s)$ 를 구한다.

$$\min_{C_a(jw)} \sup |C_a(jw)(1+P_a(jw)C_a(jw))^{-1}v_a(jw)| \quad (3-10)$$

5) 편심제어기의 전달함수 $C(z)$ 는

$$C(z) = a(z) C_a(s) \Big|_{s=\frac{z(2/T+d)+(d-2/T)}{z+1}}$$

4. Simulation

이절에서는 3절에서 기술된 설계절차에 의거 편심제어기를 설계하고 제어기의 성능을 computer simulation에 의하여 판정한다. 본 simulation에서 사용된 공칭 plant는 다음의 표1과 같다.

압연기 spring 상수 M :	3.5 MN/mm
압연재 소성계수 Q :	7.0 MN/mm
유압기 band width :	30 rad/sec
BISRA AGC 제어 gain :	0.8
입축소재 두께 :	2.0 mm
출축 두께 :	1.0 mm
sampling 주기 :	0.01 sec
상부 Back-up roll 직경 :	1420 mm
상부 Back-up roll 편심 진폭 :	0.005 mm
하부 Back-up roll 직경 :	1380 mm
하부 Back-up roll 편심 진폭 :	0.003 mm

표1 공칭 plant

유압기 전달함수를 1차계로 근사화하면

$$P(z) = \frac{0.1304(z+1)}{z - 0.7391}$$

가 되고, (3-6)으로부터 $P_o(z)$ 는 출력 $y(k)$ 를 1/M으로 scale 하면

$$P_o(z) = \frac{-0.09343(z+1)}{z - 0.8691}$$

가 된다. $v(z) = 1$ 이라고 가정하였을 경우에 3절에서 기술된 설계절차 1) - 5)까지를 PC-MATLAB을 사용하여 programming하였으며, (3-10)의 최적화는 nehari 문제로 변형하여 Hankel norm을 계산하는 방법을 사용하였다. 이때 H_∞ norm의 값은 0.913 이며 이는 $\sup_{|z|=1} |\Delta P(z)| < 1 / 0.913$ 인 모든 $\Delta P(z)$ 에 대해서 편심제어기는 안정함을 알 수 있다. 이때의 편심제어기의 전달함수 $C(z)$ 는

$$C(z) = \frac{-0.9637 z^2 + 1.823 z - 0.8564}{z^2 - 1.99 z + 1}$$

이다.

실제 plant의 불확실성이 없을 경우 그림 2에 출축두께의 시간적인 변화를 나타낸다. 편심제어기의 성능을 쉽게 판별하기 위해서 압연계시 8초에 편심제어기를 가동하여 15초에 편심제어기의 사용을 중지하는 것으로 하였다. 그림 2에서 관찰할 수 있는 것과 같이 편심제어기가 사용되는 구간

에서는 편심주파수에 상당하는 진동이 제거 되었음을 알 수 있다. 이 때의 상 하부 Back-up roll 전체의 편심크기를 그림 3에 나타낸다.

다음 실제 plant의 압연기 spring 상수 M_c 와 소성계수 Q_c 가 공칭값과 20 %의 차이를 보일때의 제어기 성능을 그림 4에 나타내었으며, 이 경우에도 편심제어기가 가동중인 경우에는 편심영향이 완전히 제거됨을 알 수 있다. 그러나 초기설정치계산에서의 오차로 인한 초기 두께편차는 편심제어기에 의해 제거하는 것이 아니고 시간지연을 갖는 출축 두께측정기를 사용하여 PI방식으로 제거하였으며 plant 불확실성때문에 정착시간이 늦어지고 있다.

마지막으로 M, Q뿐만 아니라 입축소재 두께도 0.01 mm의 진폭을 가지고 주파수 0.2 rad/sec 으로 변화하는 성분이 있다고 가정하고 압연속도가 20% 변화한 경우, 즉 편심주파수가 20% 증가하였을 때의 제어기 성능을 그림 5에 나타낸다. 이 경우에서 편심제어기는 5초에서 10초사이만 작동토록 하였으며 이 구간내에서 제어기가 건실하게 작동하고 있음을 알 수 있다. 입축소재 두께변동은 Kitamura[1]가 가정한 조건과 거의 비슷하지만 Kitamura는 M, Q 및 편심주파수의 변동은 고려하지 않았으므로 훨씬 가혹한 조건하에서도 더 좋은 성능을 얻었다.

5. 결론

본 연구에서는 압연 roll 고유의 기하학적인 편심과 압연도중 국부적 얼팽창에 기인한 편심의 영향을 제거하기 위한 건실한 편심제어기를 제안하였다. 편심제어기는 압연하중의 변동을 측정하여 roll 간격 기준치를 조정하는 방식이며 기존의 BISRA AGC와 Monitor AGC와 함께 사용할 수 있으며 제어기 설계방식은 최근 활발히 연구가 진행되고 있는 H_∞ 최적화기법을 사용하였으며 또한 H_∞ 제어이론의 실제 응용 예를 보여준다.

제시된 제어기는 모델 불확실성에 대해 건실하며 computer simulation의 결과 만족할 만한 제어성능을 주고있으며 냉연 TCM을 기준으로 하여 설계된 하였으나 열간압연 공정에서도 마찬가지로 적용가능할 것으로 생각된다.

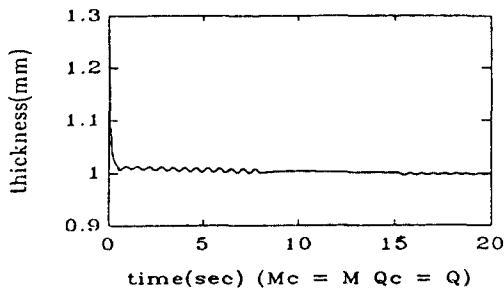


그림 2

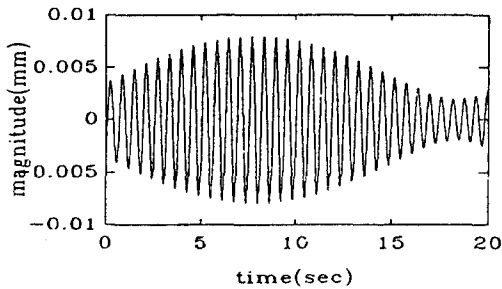


그림 3

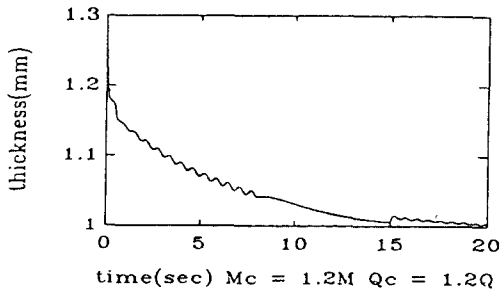


그림 4

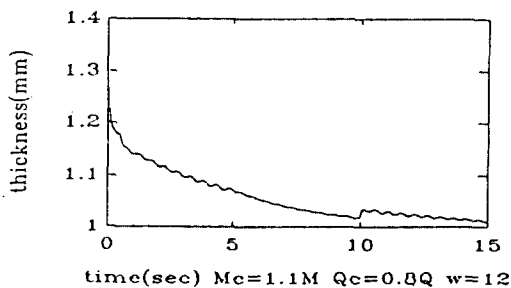


그림 5

- [1] A. Kitamura, T. Takahashi, K. Nose and M. Konishi: "Roll Eccentricity Control Based on Recursive Estimation Technique", system 제어정보학회 논문지, Vol. 2, No. 9, pp. 287 - 300, 1989
- [2] A. Kitamura, T. Takahashi, K. Nose and M. Konishi: "Recursive Identification Technique for Roll Eccentricity Control", 10th World Congress on Automatic Control, Munich, July 27 - 31, pp. 126 - 131, 1987
- [3] W. Edwards, P. Thomas and G. Goodwin: "Roll Eccentricity Control for Strip Rolling Mills", 10th World Congress on Automatic Control, Munich, July 27 - 31, pp. 200 - 211, 1987
- [4] Davy McKee POSCO No.2 HSM AGC and REC Maintenance Manual, section 7
- [5] E. Davison: "The Robust Control of a Servomechanism Problem for Linear Time Invariant Multivariable Systems", IEEE Trans. on Automatic Control, AC - 21, No.1, pp. 25 - 34, 1976
- [6] Q: Wu and M. Mansour: " H_{∞} Optimal Solutions of Robust Regulator Problem for Linear MIMO Systems", Int. Journal of Control, Vol. 52, No. 5, pp. 1241 - 1262, 1990
- [7] Morari and Zafiriou: Robust Process Control, Prentice Hall, 1989
- [8] B. Francis: "A Guide to H_{∞} Control Theory", Modelling, Robustness and Sensitivity Reduction in Control Systems, edited by R. Curtain, pp. 1 - 30, 1987
- [9] B. Francis, J. Helton and G. Zames: " H_{∞} Optimal Feedback Controllers for Linear Multivariable Systems", IEEE Trans. on Automatic Control, AC - 29, pp. 888 - 900, 1984
- [10] M. Safonov: "Imaginary-axis Zeros in Multivariable H_{∞} Optimal Control", Modelling, Robustness and Sensitivity Reduction in Control Systems, edited by R. Curtain, pp. 71 - 82, 1987