

TDC기법을 이용한 유압식 열연압연기의 롤갭제어

the Roll Gap Control in Hydraulic Hot Strip Mill using Time Delay Control Method

“홍성철”, “현장환”, “황용태”, “이정오”

*포항제철 기술연구소 계측제어연구팀(Tel: 279-6536; Fax: 279-6509)

**한국과학기술원 기계공학과(Tel: 869-3251)

Abstract Hydraulic Hot Strip Mill(HHSM) rolls materials whose size and stiffness are varieouse. So a roll gap controller for HHSM was designed using TDC(Time Delay Control) method. The performance of the roll gap control was evaluated through computer simulations. the simulation results indicate that TDC method show excellent robustness snd tracking properties against PID control metod in various rolling conditions.

Keywords Roll Gap Control, Hot Strip Mill, TDC

1. 서론

열연공정은 가열된 강재를 조압연기와 사상압연기에 의해 건축이나 자동차용 제품등의 크기나 다음공정에서 요구하는 크기의 열연코일이 되도록 압연을 한다. 최근 열연코일의 두께, 폭 등의 품질에 대해 사용자측의 원가절감을 목적으로 하여 높은 정도를 요구하고 있고 특히 두께의 요구정도는 점점 엄해지고 있다. 이에 따라 국내외적으로 다양한 AGC(Automatic Gauge Control)시스템이 도입되어 열연코일의 두께제어정도 향상에 이용되고 있다. 이러한 AGC 시스템들은 목표두께를 얻기위한 롤갭량을 일정한 주기마다 설정하고 이 설정량을 기준으로 롤갭제어가 이루어진다. 현재 대부분이 롤갭제어를 위해 PID 제어를 사용하고 있다.

대부분의 열연공정은 다품종소량 생산체제로서, 다양한 강종과 크기의 강재를 압연해야 하므로 압연조건이 수시로 변하게 된다. 이러한 상황, 즉 유압롤갭 제어장치에 걸리는 부하압력이 변하고 외란이 존재하는 조건하에 고정된 계인을 갖는 PID 롤갭제어는 응답성이 저하되는 단점을 갖고 있다. 이 문제점을 해결하기 위해 파라메터 변동과 외란을 가지고 있고 비선형성이 큰 시스템에 대해 제어성이 뛰어난 장점을 갖고 있는 TDC(Time Delay Control)기법을 이용하여 유압롤갭제어를 구성하였고 이 제어기의 성능을 검증하기 위해 다양한 압연조건에서의 기준롤갭에 대한 추종성 및 강인성을 PID 제어기와 비교하였다.

2. 유압식 열연 압연기의 모델링

유압식 열연 압연기는 그림 1과 같이 기준롤갭과 실제롤갭의 차에 따라 서보밸브가 실린더내로 들어가고 빠져나오는 유량을 조절하여 롤갭을 제어한다.

서보밸브는 전류에 의해 서보밸브의 스푸올이 이동하여 유량을 조절하게 된다. 여기서 전류는 제어기의 출력에 비례하고 실린더에 비해 서보밸브의 응답성은 굉장히 빠르므로 제어기의

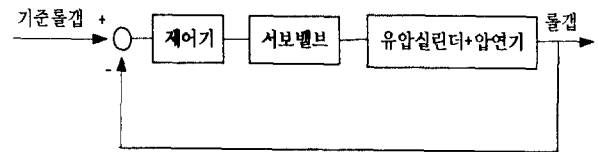


그림 1. 유압식 열연압연기 롤갭제어 블록도

출력(u(t))와 서보밸브의 스푸올변위(x_v(t)) 사이의 관계를 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_v(t) = K_a u(t) \quad (1)$$

서보밸브의 스푸올변위, 부하압력(P_L)과 실린더 부하유량(Q_L)의 관계는 아래와 같이 표현할 수 있고

$$Q_L = K_q x_v - 2K_c P_L \quad (2)$$

여기서, K_q는 밸브의 유량 계인, K_c는 밸브의 유량-압력 계수로서 식(3),식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} K_q &= K_o \sqrt{P_s - \text{sgn}(x_v(t))P_L(t)} \\ &\cong K_o \sqrt{P_s} - \frac{K_o}{2} \sqrt{\frac{\text{sgn}(x_v(t))P_L(t)}{P_s}} \\ &= K_{qf} + K_{qv} \end{aligned} \quad (3)$$

$$K_c = \frac{K_o |x_v(t)|}{2\sqrt{P_s - \text{sgn}(x_v(t))P_L(t)}} \quad (4)$$

$$K_{af} = K_o \sqrt{P_s} \quad (5)$$

$$K_{av} = -\frac{K_o}{2} \sqrt{\frac{\text{sgn}(x_v(t)) P_L(t)}{P_s}}$$

여기서 P_s : 공급압력, K_o : 밸브상수, t : 시간이다.

실린더내 오일의 압축성을 무시하여 압연력, 제어기의 출력과 실린더캡슐 변위의 관계는 식(6)과 같다.

$$\frac{K_{ce} M_s}{A_s K_a K_{af}} \ddot{x}_s(t) + \frac{A_s}{K_a K_{af}} \dot{x}_s(t) + \frac{K_{ce}}{A_s K_a K_{af}} F_L(t) - \frac{K_{av}}{K_{af}} u(t) = u(t) \quad (6)$$

여기서 $K_{ce} = K_c + C_p$: 총 유량-압력 계수, C_p : 유량 누설계수, M_s : 실린더 캡슐의 질량, A_s : 실린더 내부 면적, F_L : 압연력이다.

3. TDC 이론의 적용

TDC 이론은 이산제어의 샘플링 주기를 이용하여 시스템에 포함된 불확실성으로 인하여 나타나는 효과를 총괄적으로 예측하는데 그 기초를 두고 있다. 샘플링 주기를 이용하여 얻은 정보는 예측치 못했던 시스템의 동적거동이나 외란 및 고의적으로 제외한 동적거동에서 나타나는 효과를 상쇄시키는데 사용된다. 즉 TDC는 이전 샘플링때의 제어입력과 시스템응답을 이용해 현재의 제어입력을 계산하므로 제어기가 시스템의 모델링에 영향을 받지 않는다. 따라서 시스템의 변수나 외란의 변화가 큰 경우에 효과적으로 적용될 수 있다.

유압식 롤갭시스템 동특성식(7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(t) \ddot{x}_s(t) + P(t) = u(t) \quad (7)$$

$$F(t) = \frac{K_{ce} M_s}{A_s K_a K_{af}}$$

$$P(t) = \frac{A_s}{K_a K_{af}} \dot{x}_s(t) + \frac{K_{ce}}{A_s K_a K_{af}} \cdot F_L(t) - \frac{K_{av}}{K_{af}} u(t)$$

여기서 $F(t)$ 는 최고차항의 알 수 있는 계수값이고 $P(t)$ 는 최고차항 이외의 시스템의 모든 동적거동의 나타내는 항이라고 볼 수 있다.

식(7)을 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$E \cdot \dot{x}_s(t) + H(t) = u(t) \quad (8)$$

여기서 E : 시스템의 특성에 의해 결정되는 상수,
 $H(t)$: $E, u(t)$ 항에서 제외된 모든항의 합
 $= \{F(t) - E\} \cdot \dot{x}_s(t) + P(t)$

위식에서 $H(t)$ 의 추정값인 $\overline{H}(t)$ 를 대입하고 $u(t)$ 를 다음 식과 같이 가정한다.

$$u(t) = E \cdot G(t) + \overline{H}(t) \quad (9)$$

$$G(t) = \dot{x}_d(t) + K_{ad} \cdot \dot{e}(t) + K_{pd} \cdot e(t) \quad (10)$$

여기서 $x_d(t)$: 기준실린더위치, $e(t) = x_d(t) - x_s(t)$, K_{ad} :비례 게인, K_{pd} :미분게인이다.

만약 $H(t) \cong \overline{H}(t)$ 가 성립한다면 식(8)과 식(9)로부터 결국 $G(t)$ 는 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$G(t) = \dot{x}_s(t) \quad (11)$$

$$\ddot{e}(t) + K_{ad} \cdot \dot{e}(t) + K_{pd} \cdot e(t) = 0 \quad (12)$$

TDC 제어기의 구현에 있어서는 $H(t)$ 의 계산이 필요하다. 여기서 매우 작은 지연시간(L)을 이용하여 식(8)로부터 $H(t)$ 를 추정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H(t) &= u(t) - E \cdot \dot{x}_s(t) \\ \overline{H}(t) &\cong H(t-L) \\ &= u(t-L) - E \cdot x_s(t-L) \end{aligned} \quad (13)$$

결과적으로 TDC 제어기는 다음과 같이 나타내어진다.

$$u(t) = E \cdot \{ \dot{x}_d(t) + K_{ad} \cdot \dot{e}(t) + K_{pd} \cdot e(t) \} + u(t-L) - E \cdot x_s(t-L) \quad (14)$$

4. TDC 이론의 안정성 해석

지연시간 L이 작기는 하지만 영이 아니기 때문에 야기되는 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$\varepsilon(t) = \dot{x}_s(t) - G(t) \quad (15)$$

식(10)과 식(15)로부터,

$$\ddot{e}(t) + K_{ad} \cdot \dot{e}(t) + K_{pd} \cdot e(t) = -\varepsilon(t) \quad (16)$$

위식의 양변에 F(t)를 곱하고 정리하면 결과는 다음과 같다.

$$\varepsilon(t) = M(t) \cdot \varepsilon(t-L) - M(t) \cdot \eta_1(t-L) + \eta_2(t-L) \quad (17)$$

$$M(t) = \{1 - F^{-1}(t) \cdot E\}$$

$$\eta_1(t-L) = \{G(t) - G(t-L)\}$$

$$\eta_2 = F^{-1}(t) \cdot [\{F(t-L) - F(t)\} \cdot \dot{x}_s(t-L) + P(t-L) - P(t)]$$

이상의 제어기를 구현할 때 L을 샘플링 주기와 같게 놓는 경우 위식들을 다음과 같은 차분방정식으로 표현될 수 있다.

$$\varepsilon(k) = M(k) \cdot \varepsilon(k-1) - M(k) \cdot \eta_1(k-1) + \eta_2(k-1) \quad (18)$$

지연시간에 의한 오차를 나타내는 위식에서 $M(k)$ 를 제외 한 값들은 Bound되어 있으므로 $M(k)$ 의 값이 1보다 작으면 전체 값은 Asymptotically Bound된다

즉 $E < \left(\frac{K_{ce} M_s}{A_s K_a K_{af}} \right)_{\min}$ 이면 지연시간에 의한 오차는

Asymptotically Bound된다. 따라서 위의 조건을 만족하는 E를

적당하게 선정하면 $e(t)$ 도 역시 Bound되며 정상상태에서는 $e(t) = 0$ 에 Asymptotically Bound된다.

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

TDC제어기의 성능을 검증하기 위해서, 실제 유압식 밀스텐드의 롤갭제어시스템(서보밸브+실린더)을 대상으로 하여 기준입력에 대한 추종성과 부하의란에 대한 강인성에 대해 시뮬레이션을 통해 비교하였다.

그림2는 재료의 소성계수가 200ton/mm, 기준롤갭이 $5 \pm 0.2\sin(\frac{2\pi}{1.5}t)mm$, $t=0.15$ 초 후에 부하의란이 발생하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이 조건하에서 TDC제어기와 PID 제어기를 설계하였다. 그림3-그림6은 소성계수와 기준롤갭을 각각 다음과 같은 조건하에 시뮬레이션을 실시하였다.

표1. 시뮬레이션 조건

	소성계수(ton/mm)	기준롤갭(mm)
그림 3	200	$5 \pm 0.1\sin(4\pi t)$
그림 4	100	$5 \pm 0.1\sin(4\pi t)$
그림 5	250	$5 \pm 0.1\sin(4\pi t)$
그림 6	250	$5 \pm 0.5\sin(2\pi t/1.5)$

그림3,4,5는 기준롤갭 주파수 및 재료 소성계수의 변화가 발생했을 경우에 대한 것이고 그림 6은 시스템에 새루레이션이 발생하는 영역에서의 응답이다. 이러한 시뮬레이션 결과를 보면 TDC제어기는 PID 제어기에 비해 추종성이 뛰어나며 부하의란과 압연조건의 변화에 강인함을 알 수 있다.

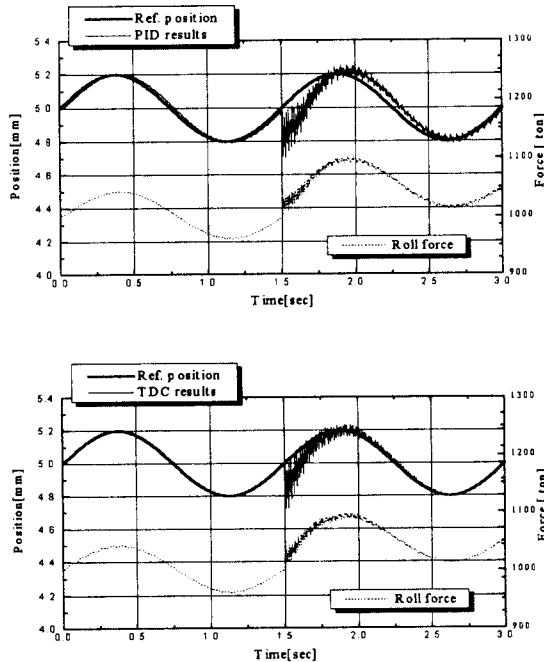


그림 2. 유압식 열연압연기 롤갭제어응답(소성계수:200ton/mm, 기준롤갭: $5 \pm 0.2\sin(2\pi t/1.5)$ mm)

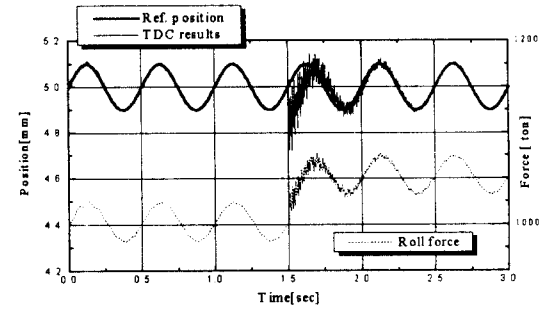
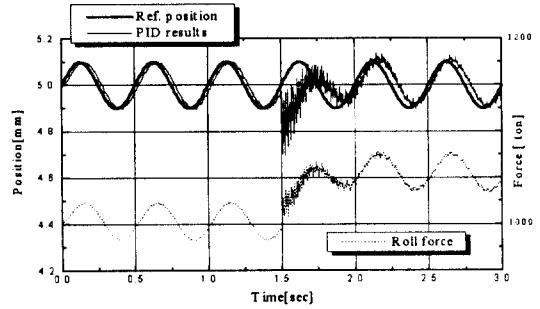


그림 3. 유압식 열연압연기 롤갭제어응답(소성계수:200ton/mm, 기준롤갭: $5 \pm 0.1\sin(4\pi t)$ mm)

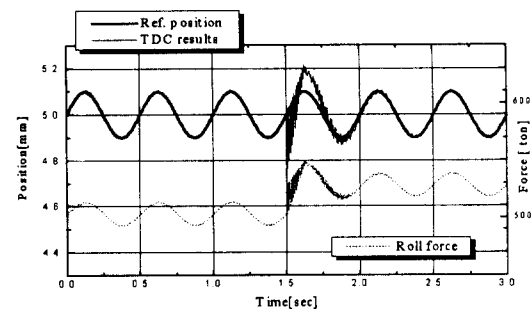
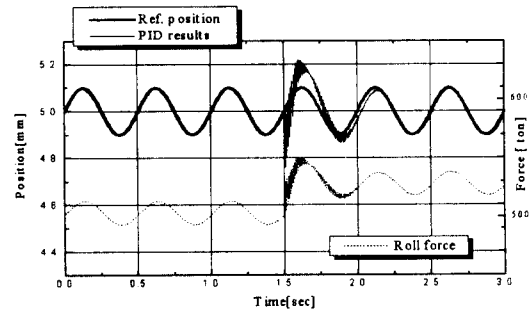


그림 4. 유압식 열연압연기 롤갭제어응답(소성계수:100ton/mm, 기준롤갭: $5 \pm 0.1\sin(4\pi t)$ mm)

6. 결론

다양한 강종과 크기의 강재를 압연해야 함에 따라 압연조건이 수시로 변하는 열연공정의 유압롤갭 제어장치에 적합한 제어기를 구성하기 위해, 파라미터 변동과 외란을 가지고 있고 비선형성이 큰 시스템에 대해 제어성이 뛰어난 장점을 갖고 있는 TDC(Time Delay Control)기법을 이용하여 유압롤갭제어기를 설계하였고 다양한 압연조건 및 부하외란이 있는 조건하에서 시뮬레이션을 하였다. 그 결과로부터 TDC제어기는 PID제어기에 비해 기준롤갭에 대한 추종성이 뛰어나며 압연조건의 변화와 부하외란에 강인함을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] Herbert E. Merrit, "Hydraulic Control Systems", Addison-Wiely, 1973
- [2] Chung O. Lee, Sung M. Chin, " TDC이론을 이용한 유압롤갭제어기의 위치제어 및 유압시스템의 안정성해석 ", Ph. D. Thesis, Dept. of Precision Engineering, KAIST, 1995
- [3] Pyung H. Chang, Suk H. Park, " Development of Anti-Windup Method for TDC ", Trans. of the KSME, vol 18, No. 10, pp. 2616-2628, 1994.
- [4] Kamal Youcef-Toumi, Osamu Ito, "A Time Delay Controller for System with Unknown Dynamics", Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol.112/133, MARCH 1990.

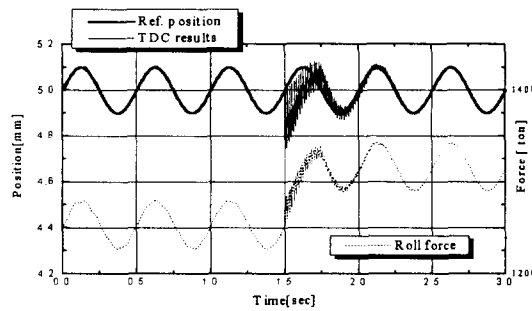
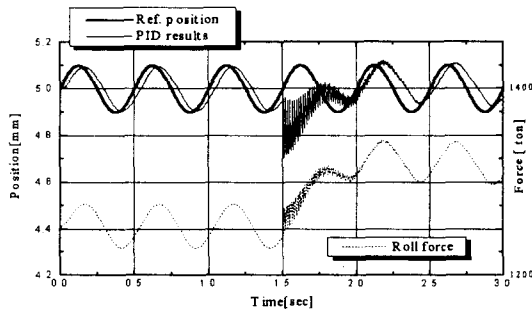


그림 5. 유압식 열연압연기 롤갭제어응답(소성계수:250ton/mm, 기준롤갭: $5 \pm 0.1 \sin(4\pi t)$ mm)

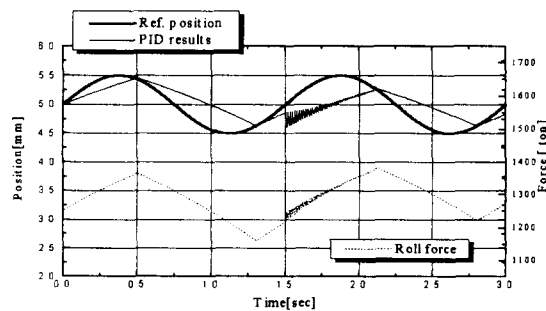
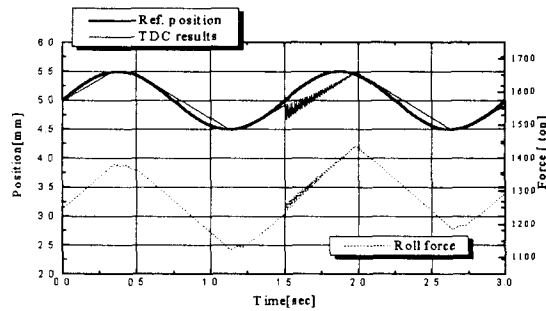


그림 6. 유압식 열연압연기 롤갭제어응답(소성계수:250ton/mm, 기준롤갭: $5 \pm 0.5 \sin(2\pi t/1.5)$ mm)