

측정지연이 있는 ROT 공정의 외란제거를 위한 SPDR 제어기 설계

SPDR Scheme for Disturbance Reduction in ROT Process with Measurement Delay

박 철 재*
(Cheol Jae Park^{1,*})

¹School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu University

Abstract: In this paper, we propose an SPDR (Smith Predictor for Disturbance Reduction) scheme to improve the temperature control by reduction of the disturbance in ROT process with measurement delay. The proposed controller is a combination of Astrom's modified Smith predictor with a disturbance reduction controller and a grey predictor. The grey prediction is used to calculate the inverse of the measurement delay and to predict future variations and tendencies of system output. The simulation results demonstrate the successful performance of the proposed disturbance reduction controller and enhance the robustness of the proposed control scheme.

Keywords: ROT process, measurement delay, disturbance reduction, Smith predictor, grey predictor, temperature control, high strength steel, bank modeling

I. 서론

열간압연 ROT (run-out table) 공정에서 압연 강판의 길이 및 폭 방향으로 온도균일 제어는 강판의 재질을 제어하는데 필수적이고 중요한 기술이다[1,2].

ROT 공정에서 온도제어는 크게 다음과 같이 네 가지 제어모드가 있다. 첫째, 압연 판이 마무리 압연기(finishing mill) 3번에 도달할 때, 온도설정 정보와 압연정보로부터 주수(注水) बैं크(bank)와 헤더(header)를 결정하는 설정제어 모드가 있다. 둘째, 온도 피드포워드(feedforward) 제어로서 펄스별(pulse)로 마무리 압연기 출측의 온도(FDT: finishing delivery temperature), 압연속도 실적, 목표 CT (Coiling Temperature)로부터 बैं크별로 온도 강하량을 예측하여 사용 बैं크와 헤더의 개수를 제어한다. 셋째, 피드백(feedback) 제어 모드로써 실적 CT와 목표 CT 간의 온도편차를 제어하기 위하여 펄스별로 피드백 बैं크의 헤더 수를 제어한다. 넷째, 강판의 길이방향에 대해서 마무리 압연과 ROT 공정의 실적 데이터를 수집하여 목표 CT를 추종하기 위하여 온도모델의 보정량을 계산하는 학습제어 모드가 있다[3,4].

일반적으로 장주기성 온도편차는 피드포워드 बैं크, 단주기성 온도편차는 피드백 बैं크를 이용한 제어가 효과적이다. 그러나 CT 온도계는 마지막 बैं크인 피드백 बैं크로부터 10m 정도 떨어져 있어서 측정지연에 따른 온도편차가 발생

하고 다양한 외란에 의해 온도제어의 정도가 떨어지게 된다. 이와 같은 이유로 ROT 공정에서 온도를 제어하는데 다음과 같은 문제점들이 있다. 첫째, CT 온도의 측정지연은 온도가 측정되는 지점과 실제 बैं크에 의해서 주수되는 지점 간의 차이로 인하여 안정된 온도제어를 어렵게 할 뿐만 아니라 제어의 방향성에 심각한 문제를 발생시켜서 압연 강판의 길이방향에 따른 재질편차를 유발할 수 있다. 둘째, 자동차용 DP (Dual Phase) 강과 같은 고강도 강 경우에는 बैं크의 헤더 1개에 따른 열유속 변화가 커서 온도편차와 과도하게 발생시킬 수 있다. 셋째, ROT 공정은 많은 롤러 테이블에 의해 압연강판을 이송하며 주수뱅크의 막힘과 같은 다양한 외란이 존재한다. 이는 정밀한 온도제어에 의한 재질제어를 방해하는 요소로 작용하기 때문에 외란제거를 위한 제어기술의 개발이 필요하다.

ROT 공정에서 고강도 강 온도 및 재질을 제어하기 위한 기존의 연구는 주로 설비, 냉각모델, 제어분야로 나눌 수 있다. 이 중에서 제어분야의 연구를 고찰하면 다음과 같다. FDT와 압연속도를 이용하여 온도를 제어할 때 공정의 특성을 모델링하고 MPC (Model Predictive Control) 제어와 DP (dynamic programming) 같은 최적제어 기법을 이용하는 연구가 진행되고 있다[5-7]. 기존 ROT 공정의 럼프 모델(lumped model)이 강판의 두께방향의 온도를 예측하기 어렵고 변태제어가 불가능하기 때문에 열역학 이론을 이용한 에너지 방정식으로부터 유도한 비선형 온도제어 모델을 개발하여 복열과 강판 두께방향으로의 온도 예측이 가능하게 하였다[8,9]. 또한 다변수 제어기법을 이용하여 적응제어기를 개발하는 연구도 진행되었다[10-12]. FDT와 CT 간의 2점 온도제어 문제를 극복하기 위하여 온도 이력제어(history

* Corresponding Author

Manuscript received July 7, 2014 / revised September 10, 2014 / accepted September 15, 2014

박철재: 대구대학교 기계자동차공학부(cjpark@daegu.ac.kr)

※ 이 논문은 2012학년도 대구대학교 학술연구비지원에 의한 논문임.

※ 이 논문은 2014 제29회 ICROS 학술대회에 초안이 발표되었음.

control) 기법을 개발하고 냉각정지 온도제어 기술을 개발하여 고강도 강에서 상변태를 제어하였다[13].

스미스 예측기(Smith predictor)는 ROT 공정과 같이 시간지연이 있는 공정에서 제어를 설계할 때 시간지연을 무시하고 설계할 수 있는 보상방법이다[14,15]. 그러나 종래의 예측기는 외란제거 성능이 열악하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 측정지연이 있는 ROT 공정에서 CT 편차와 강관의 재질을 균일하게 제어하고 다양한 외란을 제거하기 위한 SPDR (Smith Predictor for Disturbance Reduction) 제어를 개발한다. 이를 위하여 열연공장의 온라인 데이터를 이용하여 측정지연과 외란이 고강도 강의 온도 및 재질에 미치는 영향을 분석한다. 측정지연을 제어하기 위한 बैं크의 응답성이 중요하므로 냉각 बैं크를 모델링하고, 외란제거 성능을 향상시킨 Astrom의 스미스 예측기를 개발한다. 또한 스미스 예측기의 시간지연 항을 보상하기 위하여 그레이 예측기법(Grey prediction)을 사용한다. SPDR 제어모형을 바탕으로 하는 컴퓨터 시뮬레이터를 개발하고, 그 결과로부터 알고리즘의 정당성을 분석한다.

II. ROT 프로세스와 온도제어 문제

1. ROT 프로세스

그림 1은 열간 압연에서의 마무리 압연(F7) 및 ROT 냉각 시스템의 개략도를 나타낸다. ROT공정은 보통 17개의 주수뱅크가 설치되어 있고, 피드포워드 बैं크는 모두 14개(#1~#14), 피드백 बैं크는 3개(#15~#17)가 있다. 각 बैं크는 주수 헤더가 설치되어 있으며, 피드포워드, 피드백 बैं크는 상하 각각 6개, 12개의 헤더가 설치되어 있다. 피드백 बैं크는 상하 12개의 헤더로 정밀한 주수제어에 의하여 온도를 제어한다.

ROT 공정에는 길이방향의 온도계로 보통 2개 이상의 파이로미터(FDT, CT)가 설치되어 온도를 계속하고 있다. 피드포워드 बैं크는 FDT 온도편차와 압연 강관의 속도로부터 목표하는 CT 온도를 확보하기 위하여 유량을 온도 예측모델에서 계산한다. 온도제어 모델은 위의 두 변수와 수온, 강관의 열물성치 및 변태정도 등을 입력변수로 이용하여 각 बैं크의 주수량을 계산한다[13].

2. 온도제어의 문제점

그림 1의 ROT 공정에서 CT 온도계는 일반적으로 주수 बैं크에서 주수하는 냉각수와 이로 인하여 발생하는 수증기로 인하여 온도를 측정하는데 방해받지 않을 목적으로 마지막 बैं크에서 약 10m 전후로 떨어지게 설치한다. 온도계를 마지막 बैं크에서 떨어진 위치에 설치하면 ROT 공정의 열악한 환경으로부터 정확한 온도를 측정하는데 도움이 될 뿐 아니라, 제어에 사용하는 온도도 안정된 온도를 사용하게 되므로 안정된 제어를 하는데 장점이 된다.

그러나 이와 같은 측정에서의 지연은 실제 온도를 제어하는데 있어서는 방향성이 다른 제어를 할 수가 있고, 최악의 경우에는 온도 편차를 가중시킬 수 있는 방향으로 제어가 될 수도 있다.

그림 2는 온도계의 측정지연으로 인한 피드백(FB) 제어의 문제점들을 나타내었다. 그림의 (a)는 온도가 상승하는

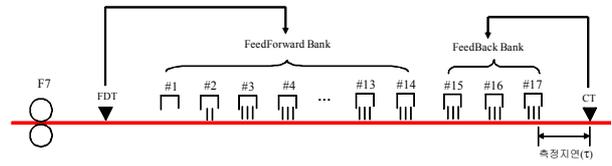
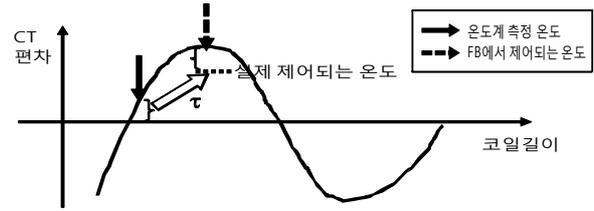
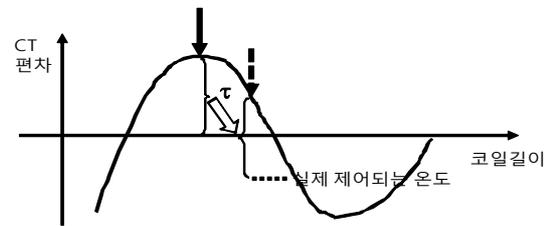


그림 1. ROT 프로세스 및 측정지연 시스템.

Fig. 1. ROT process and measurement delay system.



(a) Control problem in rising temperature range.



(b) Control problem in falling temperature range.

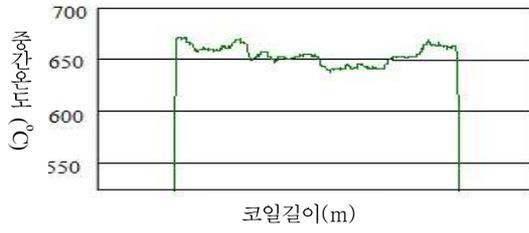
그림 2. 온도계의 측정지연에 따른 제어문제.

Fig. 2. Control problem of measurement delay by CT.

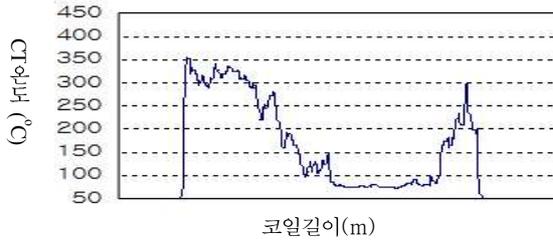
구간에서의 문제, (b)는 온도가 하강하는 구간에서의 문제들을 각각 도시하였다.

먼저 그림 (a)에서 온도계에서 측정되는 온도 편차는 실선 부분으로 나타내었다. 온도계는 피드백 बैं크보다 약 10m 거리에 떨어져 있고 온도 편차가 상승하는 구간이므로 실제로 피드백 बैं크 위치에서는 온도계가 측정된 온도보다는 훨씬 더 큰 온도 편차가 생기는 것을 알 수 있다. 최악의 경우에는 그림 (a)와 같이 온도 편차가 최대인 지점이 피드백 बैं크 상에 위치하게 될 수도 있다. 그렇지만, 온도계에서 측정된 온도 편차는 실선과 같이 점선의 위치보다는 작은 온도 편차를 측정하므로, 실제 피드백 बैं크는 작은 온도 편차를 제어하기 위하여 적은 량의 냉각수를 주수하게 된다. 최종적으로는 온도 편차의 많은 부분이 그대로 존재하게 되고 이로 인하여 온도 편차는 완전히 줄어들지 않고 편차가 계속 유지되는 현상이 발생하게 된다.

그림 (b)에서 온도가 감소하는 구간에서는 실선의 위치에서 온도계가 온도편차를 측정한다면 온도 편차는 크게 측정된다. 하지만 온도가 감소하는 구간이므로, 실제 피드백 बैं크에서는 점선의 위치에서 보는 것과 같이 적은 량의 온도 편차가 존재한다는 것을 알 수 있다. 피드백 बैं크의 제어는 온도계가 측정된 온도 편차만큼 제어하게 되므로 피드백 बैं크가 위치하는 구간에서는 실제보다는 훨씬 큰 온도 편차를 제어하기 위하여 냉각수를 과다하게 주수함으로 인하여 오히려 온도 편차가 (-) 방향으로 더 증가하는 결과를 가져오게 된다.



(a) Actual data of middle temperature.



(b) Actual data of CT temperature.

그림 3. 고강도 강외란에 따른 온도제어 문제점.
Fig. 3. Control problem for disturbance of high strength steel.

그림 3은 고강도 DP강의 외란에 따른 온도제어 문제점을 나타내었다. 그림 (a)는 7-8번 बैं크 간에 설치된 중간온도계의 실적이고 (b)는 CT 온도실적이다. DP강은 특성상 1~3번 बैं크까지 수냉(水冷)하고 4~11번 बैं크는 공냉(空冷), 12~13번 बैं크는 수냉하여 생산한다. 중간온도 실적은 약 650°C로 정확히 제어되고 있다. CT 온도는 강판의 선단부는 약 300°C로 제어되고 있으나 중간부 이후에는 100°C 이하로 온도제어 실적이 악화되는 것을 볼 수 있다. 이 강판의 우수실적을 보면 선단부와 중간부의 헤더 개수는 1~2개 정도밖에 차이가 없으나 온도는 약 200°C 이상 차이가 발생한다. 이는 ROT 공정에서 이송물의 진동과 체류수, 수증기 등의 열악한 환경 등과 같은 불확실한 외란의 영향이 크다. 또한 DP강과 같은 고강도 강을 생산하는데 있어서 헤더 1개의 차이가 온도 편차를 제어하는데 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

따라서 CT 온도계에서 측정된 온도를 제어하기 위해서는 온도계의 측정지연 요소와 외란의 특성을 반영한 제어가 필요하다는 것을 알 수 있다.

III. 외란제거 및 SPDR 제어기 설계

1. Astrom의 수정된 스미스 예측기[14]

스미스 예측기는 그림 4와 같이 시간지연 항이 있는 시스템을 제어하기 위하여 흔히 사용된다. 시간지연 항이 존재하는 시스템의 입력 r 과 출력 y 의 전달함수는 다음과 같다. 여기서 L 은 시간지연 항이다.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P(s)e^{-Ls}}{1 + C(s)P(s)} \quad (1)$$

외란 d 와 출력 간의 전달함수는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 스미스 예측기는 식 (2)에서 보는 것과 같이 외란에 취약한 구조를 가지므로 Astrom은 스미스 예측기를 보완하여 그림 5와 같은 구조를 제안하였다[16].

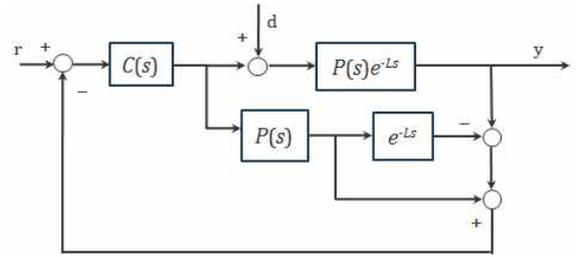


그림 4. 시간지연 항이 있는 스미스 예측기의 구조.
Fig. 4. Block diagram of Smith predictor with time delay.

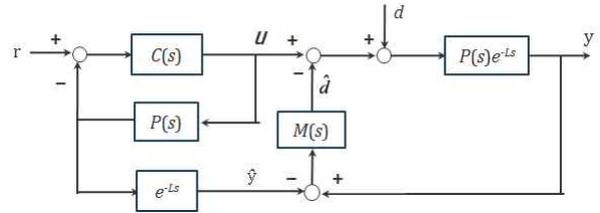


그림 5. Astrom의 수정된 스미스 예측기.
Fig. 5. Block diagram of Astrom's modified Smith predictor.

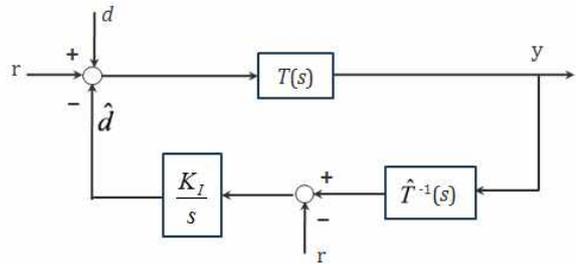


그림 6. 제안된 외란제거 제어기의 블록선도.
Fig. 6. Block diagram of disturbance reduction controller.

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{P(s)e^{-Ls}}{1 + C(s)P(s)} + \frac{C(s)P(s)e^{-Ls}}{1 + C(s)P(s)} [P(s) - P(s)e^{-Ls}] \quad (2)$$

그림 5에서 외란에 대한 응답은 다음과 같다.

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{P(s)e^{-Ls}}{1 + M(s)P(s)e^{-Ls}} \quad (3)$$

2. 외란제거 제어기 개발

그림 6은 제안된 외란제거 제어기의 블록선도를 나타낸다. 여기서 $T^{-1}(s)$ 는 공칭 전달함수의 역함수를 나타낸다. 그림에서 보상 외란 $\hat{D}(s)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{D}(s) &= \frac{k_I}{s} [Y(s)\hat{T}^{-1}(s) - R(s)] \\ &= \frac{k_I}{s} \left\{ [R(s) + \Delta D(s)] \left[1 + \frac{\Delta T(s)}{\hat{T}(s)} \right] - R(s) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 k_I 는 적분 게인이고

$$\begin{aligned} \Delta D(s) &= D(s) - \hat{D}(s) \\ \Delta T(s) &= T(s) - \hat{T}(s) \end{aligned} \quad (5)$$

오차함수 $\rho(s)$ 를 식 (6)과 같이 정의하면 식 (4)는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho(s) = \frac{\Delta T(s)}{\hat{T}(s)} [R(s) + D(s) - \hat{D}(s)] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \hat{D}(s) &= \frac{k_I}{s} [D(s) - \hat{D}(s) + \rho(s)] \\ &= \frac{k_I}{s+k_I} [D(s) + \rho(s)] \end{aligned} \quad (7)$$

식 (3)의 전달함수 $M(s)$ 를 식 (8)과 같이 정의하면 외란에 대한 응답은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M(s) = \frac{k_I}{sP(s)e^{-Ls}} \quad (8)$$

$$Y(s) = \frac{sP(s)e^{-Ls}}{s+k_I} D(s) \approx \delta(s)P(s)e^{-Ls} \quad (9)$$

3. 그레이 예측기(Grey Predictor) 개발

식 (8)의 시간지연 항 e^{-Ls} 의 역수는 그레이 예측기법으로 구할 수 있다[17]. 그레이 예측기법은 과거와 현재의 정보로부터 미래의 정보를 예측하며 커브 피팅(curve fitting) 방법을 사용한다. 따라서 기본적으로 4개 이상의 데이터가 필요하다.

식 (10)과 같은 랜덤 시퀀스 $x^{(0)}$ 를 고려하면, 1차 AGO (Accumulated Generating Operation) 시퀀스 $x^{(1)}$ 은 점진적으로 증가한다.

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(k); k = 1, 2, \dots, n), \quad \forall n \geq 4 \quad (10)$$

1차 AGO 시퀀스를 이용하면 다음과 같이 그레이 예측 모델로 나타낼 수 있다.

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b, \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

여기서 $z^{(1)}(k)$ 는 $x^{(1)}(k)$ 와 $x^{(1)}(k-1)$ 의 평균을 나타내며, 파라미터 a, b 는 최소자승법을 사용하여 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{X} \quad (12)$$

여기서

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (11)로부터 $x^{(1)}$ 의 해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x^{(1)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (14)$$

식 (12)를 식 (14)에 대입하면 예측된 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{x}^{(0)}(k+1) &= \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \\ &= (1 - e^{\hat{a}}) \left[x^{(0)}(1) - \frac{\hat{b}}{\hat{a}} \right] e^{-\hat{a}k} \end{aligned} \quad (15)$$

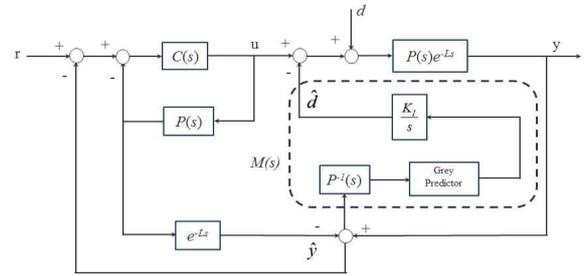


그림 7. 외란제거와 그레이 예측기를 포함하는 SPDR 제어기.

Fig. 7. Block diagram of SPDR controller with disturbance reduction and grey predictor.

표 1. SPDR 제어기의 시뮬레이션 조건.

Table 1. Simulation conditions for SPDR algorithm.

Parameter	Value	Parameter	Value
두께(mm)	2.0	CT(°C)	640
폭(mm)	1000	압연속도(mpm)	680
FDT(°C)	870	열유속계수(W/m ² °C)	1.0

그림 7은 본 논문에서 제안된 외란제거 제어기와 그레이 예측기를 포함하는 SPDR 제어기의 블록선도를 나타낸다. 식 (8)의 시간지연 항 e^{-Ls} 의 역수를 구하기 위하여 최근 5개의 출력 시퀀스, $\hat{d}(k-4L)$, $\hat{d}(k-3L)$, $\hat{d}(k-2L)$, $\hat{d}(k-L)$, $\hat{d}(k)$ 가 축적된다. 따라서 그레이 예측기는 다음 단계의 출력($\hat{d}(k+L)$)을 예측할 수 있다.

IV. 시뮬레이션을 통한 알고리즘 검증

1. 주수뱅크의 응답성을 고려한 뱅크 모델링

ROT 공정에서 강판의 온도를 제어하는데 있어서 측정지연 외에도 냉각뱅크 자체의 응답지연이 있다. 냉각뱅크의 응답성은 주수명령으로부터 정상적으로 주수가 되는 시간까지를 측정하여 모델에 반영하였다.

열연공장에 설치된 주수뱅크에 스텝(step)으로 주수명령을 인가하여 정상 응답까지의 시간을 측정한 결과 약 1.2초의 응답지연을 나타내었다. 본 논문에서는 주수뱅크를 1차 지연계로 다음과 같이 모델링하였다.

$$G(s) = \frac{K}{1 + Ts} \quad (16)$$

여기서 T 는 시정수, K 는 감도계수를 각각 나타낸다.

정상상태 값의 90%에 도달하는 응답시간을 측정하면 열연공장의 주수뱅크는 약 1초의 응답시간을 나타낸다. 따라서 식 (16)의 시정수 T 는 0.45, K 는 1로 설정할 수 있다.

2. 시뮬레이션 및 결과분석

제안된 SPDR 제어 알고리즘의 효과를 검증하기 위하여 시뮬레이터를 개발하여 결과를 분석하였다. 시뮬레이션에 사용된 압연 및 냉각조건은 표 1과 같다.

시뮬레이션을 위하여 오픈 루프의 안정적인 1차 지연 시스템은 식 (16)으로부터 식 (17)과 같이 설정하였다. 여기서 측정지연에 의한 시간지연 항은 압연속도를 고려하여 1.5로 두었다.

$$P(s) = \frac{2.2}{s+2.2} e^{-1.5s} \quad (17)$$

시뮬레이션에 사용된 제어기 $C(s)$ 는 PI 제어기의 형태로 식 (18), ROT 공정에 인가된 외란은 식 (19)와 같이 각각 설정하였다.

$$C(s) = 2.5 + \frac{1}{s} \quad (18)$$

$$d(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } 0 \leq t < 0.5 \\ 0.1, & \text{if } t \geq 0.5 \end{cases} \quad (19)$$

식 (9)에서 게인 k_f 는 근궤적(root locus) 안정도 방법으로 0.15를 선정하면 식 (8)의 전달함수 $M(s)$ 는 식 (20)과 같이 나타낼 수 있고 e^{-Ls} 의 역수는 그레이 예측방법으로 구할 수 있다.

$$M(s) = \frac{0.15(s+2.2)}{2.2s e^{-Ls}} \quad (20)$$

그림 8은 SPDR 제어기의 외란(dist.)과 식 (4)의 보상된 외란(d-hat)을 각각 나타낸다. 인가한 외란은 식 (19)와 같

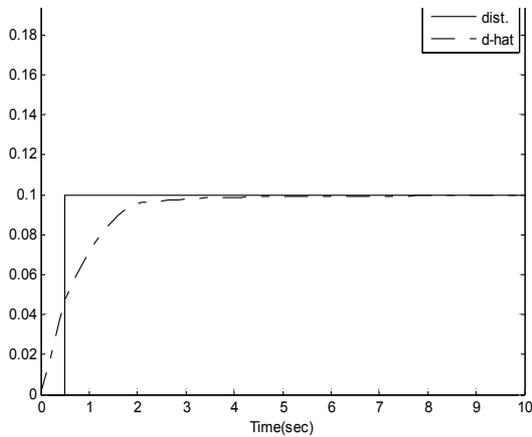


그림 8. SPDR 제어기의 외란과 보상 외란.
Fig. 8. Disturbance and compensative disturbance of SPDR.

다. 그레이 예측기는 최근의 5개 데이터를 이용하여 보상된 외란을 계산하고 그 값이 다음 단계에 적용된다. 그림에서 보상된 외란은 약 3초 이후에 인가한 외란을 정확히 예측하고 있음을 알 수 있다.

그림 9는 개발된 제어기의 출력(y-SPDR)과 출력의 예측값(y-hat)을 각각 나타낸다. 외란이 0.5초부터 0.1의 크기로 인가되어 SPDR의 출력은 1.5초의 측정지연 후인 2초부터 외란의 영향이 나타난다. 그러나 그림 8의 보상된 외란이 최근 5개의 데이터를 수집하는 동안에도 출력되기 때문에 약 1.5초부터 제어기의 출력이 나타나는 것을 볼 수 있다. 출력의 예측값은 측정지연 후 약 3초부터 제어기의 출력을 추종하며, 외란의 영향은 외란 발생 후 약 5초 후에 거의 제거되는 것을 볼 수 있다.

그림 10은 외란에 따른 SPDR 제어기(y-SPDR)와 PID 제어기(y-PID)를 적용했을 때의 출력을 비교한 것이다. PID 제어기는 식 (18)과 같이 인가하였다. 그림과 같이 PID 제어기는 시간지연에 대한 응답성이 떨어지며, 외란을 효과적으로 제거하지 못하여 인가된 외란이 출력에 그대로 반영되어 약 0.1의 크기를 갖는 것을 알 수 있다. 이는 그림 11의 제어입력에도 각각 나타난다.

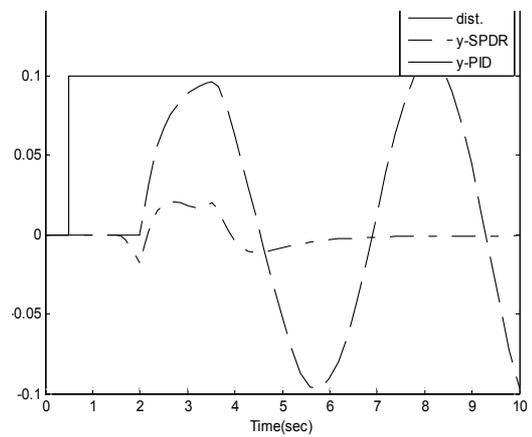


그림 10. 외란에 따른 SPDR 제어기와 PID 제어기의 출력.
Fig. 10. Output of SPDR and PID with disturbance.

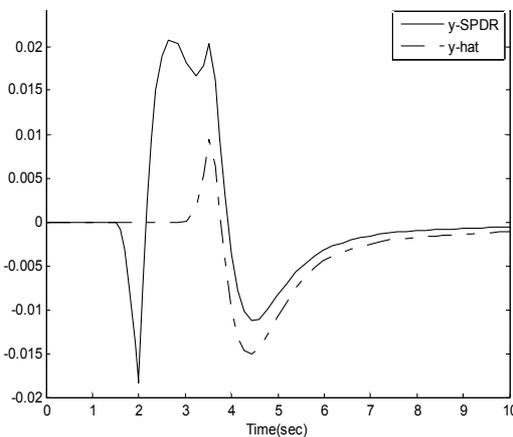


그림 9. SPDR 제어기의 출력과 출력의 예측값.
Fig. 9. Output and estimated output of SPDR.

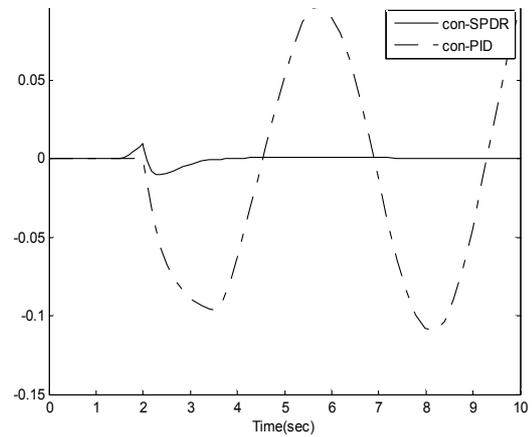


그림 11. SPDR 제어기와 PID 제어기의 제어입력.
Fig. 11. Control input of SPDR and PID with disturbance.

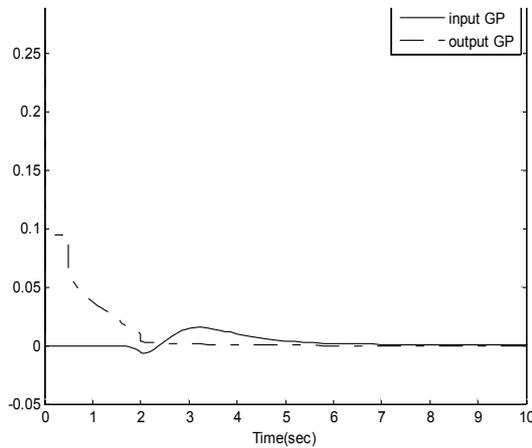


그림 12. 그레이 예측기의 입출력.

Fig. 12. Input and output of Grey predictor.

그림 12는 그레이 예측기의 입출력을 나타낸다. 그림 7에서 그레이 예측기의 입력은 $P^{-1}(s)$ 의 출력이며 그림 9의 SPDR 제어기 출력의 편차로 계산된다. 전술한대로 그레이 예측기는 시간지연 항의 역수를 계산하여, 인가된 외란을 제거하기 위한 전달함수 $M(s)$ 를 식 (8)과 같이 계산하는데 사용한다.

V. 결론

본 논문에서는 측정지연이 있는 ROT 공정에서 외란을 제거하고 온도제어의 정도를 향상시키기 위하여 외란제거 제어기와 그레이 예측기를 이용한 SPDR 제어기를 개발하였고 시뮬레이션을 통하여 알고리즘을 검증하였다.

측정지연을 제어하기 위하여 기존의 스미스 예측기에 외란제거 성능이 향상된 Astrom의 수정된 스미스 예측기를 개발하였다. 그리고 시간지연 항을 효율적으로 계산하기 위하여 과거와 현재의 정보를 이용하여 미래의 정보를 예측하는 그레이 예측기법을 사용하였다.

개발된 제어 알고리즘을 시뮬레이션하기 위하여 먼저 벅크의 응답성을 고려하여 냉각벅크를 1차 지연계로 모델링하였다. SPDR 제어기는 인가된 외란을 약 2.5초 후에 정확히 예측하였으며, 외란발생 후 약 5초 이후에 외란을 제거할 수 있었다. 또한 기존의 PID 제어기와 응답을 비교하였으며 PID 제어기에 비하여 외란제거 및 시간지연에 대한 보상이 효과적임을 알 수 있었다.

REFERENCES

[1] T. Oda, Y. Kondo, S. Konishi, H. Murakami, M. Suehiro, and T. Yabuta, "Development of accurate control in hot strip mill," *The Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 81, no. 3, pp. 35-40, 1995.

[2] G. V. Ditzhuijzen, "The controlled cooling of hot rolled strip: a combination of physical modeling, control problems and practical adaptation," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 38, no. 7, pp. 1060-1065, 1993.

[3] S. K. Biswas, S. Chen, and A. Satyanarayana, "Optimal

temperature tracking for accelerated cooling processes in hot rolling of steel," *Dynamics and Control*, vol. 7, pp. 327-340, 1997.

[4] M. Suehiro, T. Oda, T. Senuma, and S. Konishi, "Development of mathematical model for predicting transformation of high-carbon steel during cooling on runout table and its application to on-line temperature control of hot strip mill," *Nippon Steel Technical Report*, no. 67, pp. 49-56, 1995.

[5] N. S. Samaras and M. A. Simaan, "Water-cooled end-point boundary temperature control of hot strip via dynamic programming," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 6, pp. 1335-1341, 1998.

[6] N. S. Samaras and M. A. Simaan, "Optimized trajectory tracking control of multistage dynamic metal-cooling processes," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 3, pp. 920-927, 2001.

[7] M. D. Letholf and J. R. Dahm, "Model reference control of runout table cooling at LTV," *Iron and Steel Engineer*, vol. 66, no. 8, pp. 31-35, 1989.

[8] N. Hatta and H. Osakabe, "Numerical modeling for cooling process of a moving hot plate by a laminar water curtain," *The Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 29, no. 11, pp. 919-925, 1989.

[9] H. B. Xie, Z. Y. Jiang, X. H. Liu, G. D. Wang, and A. K. Tieu, "Prediction of coiling temperature on run-out table of hot strip mill using data mining," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, no. 1-3, pp. 121-125, 2006.

[10] S. Guan, H. X. Li, and S. K. Tso, "Multivariable fuzzy supervisory control for the laminar cooling process of hot rolled slab," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 348-356, 2001.

[11] R. K. Kumar, S. K. Sinha, and A. K. Lahiri, "An on-line parallel controller for the runout table of hot strip mills," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 821-830, 2001.

[12] A. G. Groch, R. Gubernat, and E. R. Birstein, "Automatic control of laminar flow cooling in continuous and reversing hot strip mills," *Iron and Steel Engineer*, vol. 67, no. 9, pp. 16-20, 1990.

[13] C. J. Park, "Dynamic temperature control with variable heat flux for high strength steel," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 659-665, 2012.

[14] Y. D. Chen, P. C. Tung, and C. C. Fuh, "Modified smith predictor scheme for periodic disturbance reduction in linear delay systems," *Journal of Process Control*, vol. 17, pp. 799-804, 2007.

[15] C. J. Park, P. J. Lee, and J. H. Kang, "Compensation algorithm for the measurement delay of ROT process in

hot strip mills,” *Proc. of 2014 29th ICROS Annual Conference (ICROS 2014) (in Korean)*, Daegu, Korea, pp. 362-363, 2014.

- [16] K. J. Astrom, C. C. Hang, and B. C. Lim, “A new smith predictor for controlling a process with and integrator and long dead-time,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 39, pp. 343-345, 1994.
- [17] J. L. Deng, “Control problem of grey system,” *System Control Lett.*, vol. 1, pp. 288-294, 1982.



박철재

1992년 부산대학교 정밀기계공학과 졸업(공학사). 1994년 동 대학원 졸업(공학석사). 2007년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 1994년~2008년 포스코 기술연구소 근무. 2008년 9월~현재 대구대학교 기계자동차공학부

교수. 관심분야는 모델예측제어, 건설제어, 프로세스 규명 및 제어, 메카트로닉스 등.