

압연 공정에서 속도제어계통의 응답특성에 대한 관리지표값들의 자동산출 알고리즘

(An Automatic Computing Algorithm of Magnitude of Each Maintenance Index Regarding Response Characteristic for Speed Control System in Rolling Process)

이해영* · 양일화 · 최용환

(Hai - Young Lee · Il - Hwa Yang · Yong - Hwan Choi)

요 약

본 논문에서는 압연공정에서 압연용 롤을 구동하는 속도 제어 계통의 계단 응답 특성에 대한 관리지표값들을 자동으로 산출하는 알고리즘을 제안한다. 잡음이 포함된 속도 응답 데이터에서 최대값이 2개 이상 존재할 수 있는 경우들을 세 가지 독립된 유형으로 분류하였다. 각 유형별로 적절한 최대 오버슈트 후보를 선택하는 방법을 제안하였으며, 선택된 최대 오버슈트 후보가 옳은 지를 점검할 수 있는 판정 알고리즘을 개발하였다. 두 가지 유형의 시험을 통해 제안된 알고리즘으로 최대 오버슈트의 크기와 위치를 잘 검출할 수 있음을 보였다.

Abstract

This paper presents an algorithm of automatically finding magnitude of each maintenance index regarding step response characteristic for speed control system of driving roller in rolling process. For speed response data with noise, we distinguished possible cases that the number of maximum values is 2 or more into three separate types. Also, we suggested a way of selecting a candidate for reasonable maximum overshoot in each type and developed a decision algorithm of checking whether a candidate chosen is correct maximum overshoot. In terms of two types of test, we showed that magnitude and position in time axis of maximum overshoot can be found well via such algorithm presented in this paper.

Key Words : Response characteristic, Rolling process, Maintenance index

1. 서 론

철판을 제조하는 압연공정(Rolling process)에는

압연기(Roller)를 구동하기 위해 모터가 사용되는데, 모터의 속도 응답 특성은 압연기를 통해 제조되는 철판의 품질에 큰 영향을 미치며 생산설비의 안전과도 관련이 있다[1]. 더구나 최근에는 두께가 0.15[mm] 정도인 철판까지 생산되고 있으므로, 압연기를 구동하는 모터의 속도 응답 특성은 정기적으로 부하 분리 시험을 통해 엄격히 관리되고 있다[2].

부하 분리 시험이란 모터를 압연공정으로부터 분

* 주저자 : 嶺南大 電子情報工學部 副教授 · 工博
Tel : 053-810-2485 Fax: 053-813-8230
E-mail : hylee@yu.ac.kr
접수일자 : 2003년 6월 23일
1차심사 : 2003년 7월 1일
심사완료 : 2003년 8월 1일

리시킨 후 모터의 속도 제어 계통에 대한 목표값을 계단형태로 변경시켰을 때 기록계(Recorder)의 차트(Chart)에 그려지는 모터 속도의 변화 형태를 보고 응답 특성을 분석하는 것이다[2]. 이 과정은 정비기술자가 차트상의 파형을 보고 목표값에의 첫 번째 도달시간 및 최대 오버슈트(Maximum overshoot)라고 판단되는 파형상의 적절한 위치들을 생각한 후, 이를 이용하여 그 위치들을 통과하는 수평선과 수직선들을 긋고, 직선들이 차트의 종축 및 횡축과 만나는 점들을 찾는 방법으로 수행되며, 정정시간은 몇 가지 이론식들을 이용하여 구한다. 따라서 특성의 분석과정에는 항상 정비기술자의 주관적 판단이 개입하게 되어 있다.

그런데 압연공정에서는 많은 기계장치들이 어울려 작동하기 때문에 기록계의 차트에 인쇄되는 파형에는 항상 잡음이 포함되어 있다. 그러므로 같은 파형에 대해서 동일한 정비기술자가 응답 특성을 판정하는 경우에도 분석 시점에 따라 결과가 달라질 수 있다. 또한 정비기술자가 바뀌는 경우에도 동일한 파형에 대한 분석 결과가 다르게 나올 수 있는 문제점이 있다.

본 논문에서는 모터의 속도 제어 계통에 대한 목표값을 계단 형태로 변경시켰을 때, 매 샘플링 시점마다 모터 속도의 응답 결과를 기록계로부터 소수 두자리 형태의 데이터로 입력받아 정비기술자의 개입 없이 세 가지 관리 지표들의 값을 구하는데 필요한 기본 자료들인 최대 오버슈트의 크기와 최대 오버슈트의 발생 위치를 자동으로 산출할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

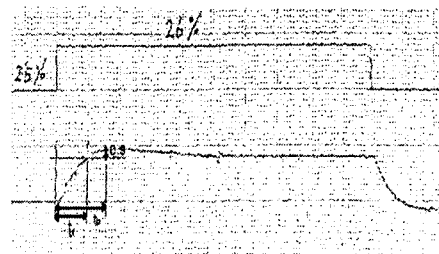
잡음이 추가된 일반적인 2차계 형태의 이론 모델을 이용한 시험과 부하 분리 시험시 기록계에서 얻은 데이터를 이용한 검증을 통해, 제안된 방식으로 최대 오버슈트의 크기와 최대 오버슈트의 발생 위치를 잘 검출할 수 있음을 보였다.

2. 부하분리시험을 통한 모터의 속도 응답 특성 분석

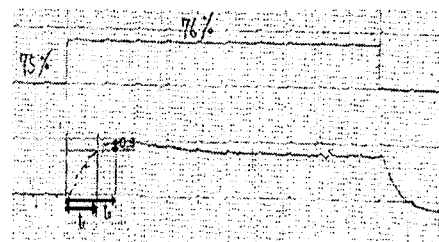
부하 분리 시험을 하기 위해서는 먼저 모터에 연결된 압연기를 모터와 분리시킨다. 다음에 무부하상

태에서 모터의 속도제어계통에 사용 가능한 속도 변동 범위 내에서 계단 형태로 속도 명령을 변경시킨다. 본 논문의 연구대상 공정에서는 부하 분리 시험시 최대 속도의 25%에서 26% 또는 75%에서 76%로 변경시키는데, 이는 속도 제어 계통 설비의 공급사에서 제공한 시험 관리 기준에 따른 것이다. 그림 1에 부하 분리 시험시 얻은 속도 응답 파형들의 예를 두 가지 보인다.

그림 1에서 볼 수 있듯이 기록계를 통해 얻은 속도 응답 데이터에는 여러 곳에 잡음이 포함되어 있다.



(a) 25%에서 26%로 계단형 변경
(a) Step change from 25% to 26%



(b) 75%에서 76%로 계단형 변경
(b) Step change from 75% to 76%

그림 1. 시험을 통해 얻은 응답 파형들

Fig. 1. Response waveforms obtained from tests

속도 응답 특성에 관한 관리 지표들은 최대 오버슈트(Maximum Overshoot), 목표값에의 첫 번째 도달 시간 및 정정시간(Settling time)인데 이를 각각 $O.S$, t_r 및 t_s 로 약속한다. 정비기술자는 응답 파형상에서 관리 지표들을 구하기에 적절한 위치들을 관찰한 다음에 이를 이용하여 그림 1에 보여진 것처럼 해당 위치들을 통과하는 직선들을 긋는다. 다음에 곡선과 직선들의 교점들로부터 $O.S$ 와 t_r 을 구한 후, 2차계에 대한 보편적인 관계식들을 이용하

여 t_s 를 계산한다. 즉 감쇠 계수(Damping factor), 자연 각주파수 및 진동 각주파수를 각각 ζ , w_n 및 w_c 로 약속하면 $\pm 2\%$ 기준일 경우의 t_s 를 계산하는 관계식들을 순서대로 쓰면 다음과 같다[3][4].

$$O.S = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (1)$$

$$w_c = \frac{\pi - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}}{t_r} \quad (2)$$

$$w_n = \frac{w_c}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (3)$$

$$t_s = -\frac{1}{\zeta w_n} \ln(0.02\sqrt{1-\zeta^2}) \quad (4)$$

이미 앞에서 언급되었듯이 응답 특성에 대한 관리 지표의 값들을 이와 같이 정비기술자의 주관적인 판단과 기능에 의존하여 산출하고 있다.

그런데 매 샘플링 시점마다의 디지털 데이터를 이용하여 $O.S$ 를 찾으면, 샘플링 시점이 시간에 관한 정보를 가지고 있으므로 $O.S$ 이 발생하는 위치는 $O.S$ 를 찾으면 동시에 알 수 있는 장점이 있다. $O.S$ 이 발생한 위치를 t_b 라고 약속하면,

$$w_c = \frac{\pi}{t_b} \quad (5)$$

의 관계가 성립하므로[5], t_r 은 식(1)과 식(2)를, t_s 는 식(3) 및 식(4)를 이용하여 계산하면 된다. 따라서 실제로는 주어진 디지털 형태의 데이터로부터 $O.S$ 와 t_b 를 구하는 알고리즘만 설계하면 되므로, 본 논문에서는 매 샘플링 시점마다 모터의 응답 결과를 기록계로부터 디지털 형태의 데이터로 입력받아 $O.S$ 와 t_b 의 값들을 자동으로 산출할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

3. $O.S$ 와 t_b 를 구하는 알고리즘

매 샘플링 시점 k , $k = 1, 2, \dots, N$, 마다 취득

된 속도 응답의 디지털 데이터를 $v_o(k)$ 라고 약속할 때, $O.S$ 와 t_b 를 구하는 문제는 간단하게 생각하면 N 개의 데이터 중에서 최대값을 찾는 것이다. 그러면 최대값이 발생하는 시간축 상의 위치가 t_b 이며, 최대값과 목표값의 차이가 $O.S$ 이 된다. 그러나 이 문제는 그와 같은 간단한 방법으로 해결되지 않는 어려운 점들이 있다.

$O.S$ 이 발생하는 위치 부근에서는 $v_o(k+1) - v_o(k)$, $k = 1, 2, \dots, N-1$ 의 절대값이 응답의 초기에 비해 매우 작은 값이 된다. 이런 특성은 연속 신호의 경우에 $O.S$ 의 위치에서 속도 응답 신호의 미분이 0이 됨을 생각하면 쉽게 알 수 있다. 따라서 찾으려고 하는 $O.S$ 위치 부근에서는 잡음의 영향이 응답 파형상의 다른 부분에 비해 훨씬 심각하게 되는 문제가 있다. 또한 $v_o(k)$ 를 디지털 형태의 데이터로 받기 때문에 양자화 효과(Quantization effect)[6][7]로 인해 $O.S$ 위치 부근에서 동일한 값을 갖는 여러 개의 $v_o(k)$ 가 존재할 수 있는 문제점도 있다.

본 논문에서는 시험시 얻은 속도 응답 자료를 분석하여 최대값이 2개 이상 존재할 수 있는 경우들을 세 가지 유형으로 분류하여 각각 처리 기법을 제안하였고, $O.S$ 위치 부근에 잡음이 유입되었다고 $O.S$ 위치가 맞는 지를 안정되게 찾을 수 있는 판정 방법을 설계하였다. 다음에 $O.S$ 와 t_b 를 구하는 기법을 단계별로 나누어 설명한다.

Step 1. 잡음 저감용 필터링

기록계에서 얻은 속도 응답의 데이터 $v_o(k)$, $k = 1, 2, 3, \dots, N$ 에 포함된 잡음의 영향을 줄이기 위해서 다음과 같이 인접한 두 개의 데이터에 대해 산술 평균을 구한다[8].

$$v(k) \triangleq \frac{v_o(k-1) + v_o(k)}{2}, \quad \text{단 } v(1) = v_o(1) \quad (6)$$

Step 2. 최대값을 구함

$v(k)$, $k = 1, 2, \dots, N$ 에서 최대값을 찾는다.

Step 3. 최대값이 2개 이상인 유형별 O.S 후보의 선택

시험시 얻은 속도 응답의 디지털 데이터를 분석해 보면 최대값뿐만 아니라 최대값이외의 값들도 연달아 또는 샘플링 주기이상의 간격을 두고 동일한 값들이 다수 있다. 따라서 $v(k)$, $k = 1, 2, \dots, N$ 에서 최대값이 2개 이상일 때는 어떤 값을 O.S의 후보로 선정할 것인지를 먼저 결정한 다음에, 그 후보가 O.S이 되는지를 판정해야 한다. 본 논문에서는 최대값이 발생할 수 있는 유형을 세 가지로 분류하였으며 다음과 같다.

① 유형 A

최대값이 한 개인 경우이다. 이때는 이 최대값의 위치를 O.S의 후보로 선정한다.

② 유형 B

최대값이 두 개 이상이면서 연달아 m ($m \geq 2$) 개가 발생하고, 이 m 개 이외에는 최대값이 없는 경우이다. 최대값이 처음 발생한 시점을 $k \triangleq k_p$ 라 하면 식으로는 다음과 같다.

$$v(k_p) = v(k_p + 1) = \dots = v(k_p + m - 1) \quad (7)$$

$$v(k) < v(k_p), \quad k = 1, 2, \dots, k_p - 1, k_p + m, k_p + m + 1, \dots, N \quad (8)$$

이때는 m 개중에 중간 정도의 위치를 O.S의 후보로 선정하는 것이 합리적이다. 다만 m 이 홀수일 때는 정확히 중간 위치가 존재하지만, 짝수일 때는 응답 성능중 t_r 및 t_s 의 값들을 엄격히 관리한다는 관점에서 중간의 바로 다음 위치로 정한다. 즉 다음과 같이 결정한다.

m 이 홀수일 때 O.S의 후보 위치

$$= k_p + \frac{m}{2} - \frac{1}{2} \quad (9)$$

m 이 짝수일 때 O.S의 후보 위치

$$= k_p + \frac{m}{2} \quad (10)$$

③ 유형 C

최대값이 샘플링 주기 이상의 간격을 두고 여러 곳에 그룹 형태로 존재하는 경우이다. 이때 각 그룹에

는 최대값이 한 개이거나 또는 두 개 이상이 연달아 존재할 수 있다. 그룹의 개수를 n 이라 하고, j , $j = 1, 2, \dots, n$, 번째 그룹 내에 있는 최대값의 개수를 n_j 및 j 번째 그룹 내에서 첫 번째 최대값의 위치를 $k_{p,j}$ 로 약속하면, 이 유형은 식으로는 다음과 같이 표현된다.

$$v(k_{p,1}) = v(k_{p,1} + 1) = \dots = v(k_{p,1} + n_1 - 1) \quad (11)$$

$$v(k_{p,2}) = v(k_{p,2} + 1) = \dots = v(k_{p,2} + n_2 - 1) \quad (12)$$

...

$$v(k_{p,j}) = v(k_{p,j} + 1) = \dots = v(k_{p,j} + n_j - 1) \quad (13)$$

...

$$v(k_{p,n}) = v(k_{p,n} + 1) = \dots = v(k_{p,n} + n_n - 1) \quad (14)$$

$$v(k_{p,1}) = v(k_{p,2}) = \dots = v(k_{p,n}) \quad (15)$$

$$v(k) < v(k_{p,1}), \quad k = k_{p,j}, k_{p,j} + 1, \dots, k_{p,j} + n_j - 1 \text{ 이외, 단 } j = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

이 경우에는 n 개 그룹 중에서 그룹 내에 있는 최대값의 개수(n_j)가 가장 큰 그룹에 O.S이 있다고 보는 것이 합리적이다. 다음에 해당 그룹에서 최대값의 개수가 홀수이면 식 (9)로, 짝수이면 식 (10)로 O.S의 후보 위치를 선정한다.

Step 4. O.S의 판정 기법

선택된 O.S의 후보 위치를 $v(k_{OS})$ 라고 할 때, $k = k_{OS}$ 가 O.S 위치인지를 판정한다. 제어 이론적 면과 시험 운전 자료를 분석한 관점들을 종합해 볼 때 $k = k_{OS}$ 가 O.S 위치가 되려면 두 가지 조건이 만족되어야 한다.

첫 번째 조건은 제어 이론적인 관점에서 볼 때 $k = k_{OS}$ 에서 적어도 3개 이전 및 이후까지의 시점들에 존재하는 $v(k)$ 들의 크기를 매 시점에 따라 $v(k_{OS})$ 와 함께 평면상에 그리면 $v(k_{OS})$ 를 정점으로 하는 산 모양이 되는 것이다. 그러나 $v(k)$ 가 $k = 1$ 부터 O.S 위치로 가는 도중에 있는 특정

위치의 $v(k)$ 가 $O.S$ 위치보다 크게 되도록 만드는 잡음이 들어오고, 그 다음에 일부 위치들에 음의 크기를 갖는 잡음이 들어오면 큰 잡음의 위치에서 첫 번째 조건이 만족되는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 $O.S$ 위치를 제대로 판정하려면 추가적인 조건이 필요하다.

즉 두 번째 조건은 $k = k_{OS}$ 에서 적어도 3개 이전 및 이후까지의 시점들에 존재하는 $v(k)$ 들과 $v(k_{OS})$ 와의 각각의 차이는 $k = 1$ 부터 $k_{OS} - 1$ 까지 존재하는 $v(k)$ 들에 포함된 잡음의 대표값보다는 작아야 되는 것이다. 제어이론적인 면에서 볼 때도 이 두 번째 조건은 타당성이 있다. 왜냐하면 $O.S$ 위치에서는 응답 신호의 미분값이 0이고, $O.S$ 위치 부근에서의 변동 크기가 매우 작기 때문이다.

잡음의 대표값을 구하기 위해서는 $v(1)$ 부터 $v(k_{OS})$ 사이에 있는 잡음의 변동 범위를 파악하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 $k = 1$ 부터 $k_{OS} - 1$ 까지 $k_{OS} - 1$ 개의 $v(k)$ 를 위쪽 포락선(Upper envelope)[3]을 구성하는 $v_u(k)$ 와 아래쪽 포락선(Lower envelope)을 구성하는 $v_l(k)$ 로 각각 분리한 후, 각 k 에서 $v_u(k)$ 와 $v_l(k)$ 의 차이로부터 잡음의 변동 범위를 구하는 방법을 제안한다.

$$v_u(k), k = 1, 2, \dots, k_{OS} - 1, \text{는}$$

$v_u(1) = v(1)$ 로 정한 후, $v_u(2)$ 부터는 $k = 2$ 부터 $k_{OS} - 1$ 까지 k 를 1씩 증가시켜 가면서 $v(k)$ 과 $v(k-1)$ 의 크기를 비교하여 식(17)와 식(18)과 같이 구한다.

$$v(k) > v(k-1) \text{이면 } v_u(k) = v(k) \quad (17)$$

$$v(k) \leq v(k-1) \text{이면 } v_u(k) = v_u(k-1) \quad (18)$$

$v_l(k), k = 1, 2, \dots, k_{OS} - 1$ 는 $v_l(k_{OS} - 1) = v(k_{OS} - 1)$ 로 설정한 다음에, $v_l(k_{OS} - 2)$ 부터는 $v_l(1)$ 까지 거꾸로 찾아가는데, 식(19)과 식(20)에서 k 를 1부터 $k_{OS} - 2$ 까지

차례로 증가시켜 가면서 $v(k)$ 과 $v(k-1)$ 의 크기를 비교하여 구한다.

$$v(k_{OS} - 1 - k) < v(k_{OS} - k) \text{이면} \\ v_l(k_{OS} - 1 - k) = v(k_{OS} - 1 - k) \quad (19)$$

$$v(k_{OS} - 1 - k) \geq v(k_{OS} - k) \text{이면} \\ v_l(k_{OS} - 1 - k) = v_l(k_{OS} - k) \quad (20)$$

식(19)과 식(20)에서 k 를 1부터 $k_{OS} - 2$ 까지 차례로 증가시켜 가면서 진행해 가는 것은 $v_l(k)$ 를 $v_l(k_{OS} - 2)$ 부터 $v_l(1)$ 까지 거꾸로 구해 가는 결과가 된다.

이제 $k = 1$ 부터 $k_{OS} - 1$ 까지 매 k 에서 잡음의 변동 크기를 $v_{noise}(k)$ 라고 약속하면, $v_{noise}(k)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$v_{noise}(k) = |v_u(k) - v_l(k)| \quad (21)$$

다음에 $v_{noise}(k), k = 1, 2, \dots, k_{OS} - 1$ 를 크기가 큰 순서대로 배열하여 상위 25%에 들어가는 $v_{noise}(k)$ 들의 산술평균값을 잡음의 대표값으로 선정하고, 이를 $v_{noise,ave}$ 로 약속한다.

그러면 선택된 $O.S$ 의 후보 위치인 $k = k_{OS}$ 가 $O.S$ 위치인 지를 판정하는 방법은 식(22)로 표현된다.

$$\{v(k) - v(k \pm \alpha)\} \leq v_{noise,ave}, \\ \text{단 } \alpha = 1, 2, 3 \quad (22)$$

즉 이 조건식이 만족되면 선택된 $O.S$ 의 후보 위치를 $O.S$ 위치로 확정하며, 이때 $t_p = k_{OS}$ 이고, $O.S$ 은 다음과 같다.

$$O.S = v(k_{OS}) \text{-목표값} \quad (23)$$

그러나 만약 조건식이 만족되지 않으면 $v(k_{OS})$ 는 잡음으로 간주하여 $v(k_{OS})$ 를

$$v(k_{OS}) = \frac{v(k_{OS} - 1) + v(k_{OS} + 1)}{2} \quad (24)$$

로 대체한 다음에 Step 2로 되돌아가서 O.S의 후보 위치를 다시 찾게 된다.

4. 성능 시험 및 결과

본 논문에서 제안된 O.S와 t_p 를 구하는 기법의 성능을 확인하여 보기 위해 두 가지 종류의 시험을 하였다. 첫 번째는 이론 모델을 이용한 시험이며, 두 번째는 부하 분리 시험시 기록계에서 취득한 데이터를 이용한 검증이다.

첫 번째 종류의 시험에 사용된 이론 모델은 보편적인 2차 모델인데, 입력 및 출력의 라플라스 변환을 각각 $U(s)$ 및 $Y(s)$ 라고 하면,

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (25)$$

와 같이 표현되며, 여기서 입력 신호가 단위 계단 입력일 때 얻어지는 출력 신호, $y(t)$,는 다음과 같다[9].

$$y(t) = 1 + \frac{e^{-\zeta w_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(w_n \sqrt{1-\zeta^2} t - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{-\zeta}), t \geq 0 \quad (26)$$

기록계를 통해 취득되는 모터의 속도 신호는 매 샘플링 주기 단위로 구성되어 있으므로, 같은 조건에서 시험하기 위해 $y(t)$ 를 1[ms] 주기로 샘플링하고, 속도 신호가 잡음의 영향을 받을 때 제안된 알고리즘이 잘 작동할 수 있는지를 확인하기 위해 $y(t)$ 에 백색잡음을 더하였다. 샘플링 주기를 T 라 하고, 백색잡음을 $w(kT)$ 로 약속하면, $y(t)$ 를 샘플링한 신호 $y(kT)$ 는 다음과 같다.

$$y(kT) = 1 + \frac{e^{-\zeta w_n kT}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(w_n \sqrt{1-\zeta^2} kT - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{-\zeta}) + w(kT), k \geq 0 \quad (27)$$

여기서 $w(kT)$ 는 크기의 변동범위에 따라 세 가지 유형으로 분류하였다. 즉 $w(kT)$ 는 크기의 변동

범위가 신호 목표값의 $\pm 2\%$, $\pm 4\%$ 및 $\pm 6\%$ 인 세 가지 경우에 대해 각각 샘플된 데이터로부터 O.S와 t_p 를 구해 보았다. $\pm 6\%$ 이상인 경우는 이론 모델을 이용한 시험에서 다루지 않는다. 이유는 $\pm 6\%$ 이상인 경우는 측정 신호를 전처리하는 전자회로에서 다루어야 할 영역이며, 현실적으로도 속도 제어 시스템을 구성하는 제품에 심각한 결함이 있는 경우가 아니면 그런 정도의 변동 범위를 갖는 잡음은 없기 때문이다.

세 가지 경우에 대한 시험 결과를 그림 2, 그림 3 및 그림 4에 각각 보인다. 이미 O.S의 판정 기법에 서 언급하였듯이, 세 가지 그림에서 $y_u(kT)$ 는 $y(kT)$ 의 위쪽 포락선을 구성하는 것이며, $y_l(kT)$ 는 $y(kT)$ 의 아래쪽 포락선을 구성하는 것이다. 그리고 $y(kT)$ 로부터 제안된 알고리즘에 의해 구해진 $y_u(kT)$ 와 $y_l(kT)$ 는 각각 X 및 O로 표기하였다. 또한 검출된 O.S부근의 데이터들을 오른쪽 하단부에 확대하여 보임으로써, O.S위치의 판정 결과를 이해하는데 도움이 되도록 하였다.

확대도내에서 X와 O가 겹쳐져 있는 점중에 가장 우측에 위치한 점이 제안된 알고리즘을 통해 검출된 O.S의 위치이다. 그런데 그림 2, 그림 3 및 그림 4의 확대도내를 보면 쉽게 알 수 있듯이, 검출된 O.S의 위치들은 제어 이론적인 관점에서 볼 때 모두 O.S으로 판정하여도 전혀 문제가 없다. 즉 잡음의 영향을 받는 상태에서도 제안된 알고리즘에 의해 O.S와 t_p 가 자동으로 적정하게 판정될 수 있음을 알 수 있다. 각 그림별로 검출된 O.S와 t_p 를 표 1에 보인다.

표 1. 각 경우별 검출된 O.S와 t_p

Table 1. O.S and t_p detected for each case

| 대상 그림 | Step2의 반복 계산 횟수 | O.S의 발생위치 | | O.S [%] |
|----------|--------------------------|--------------|---------------------|------------|
| | | 샘플링 시점(k) | $t_p = kT$ [sec] | |
| 그림 2 | 3 | 159 | 0.159 | 16.94 |
| 그림 3 | 4 | 160 | 0.160 | 17.24 |
| 그림 4 | 5 | 158 | 0.158 | 17.95 |

두 번째는 부하 분리 시험시 기록계에서 취득한 데이터를 이용한 시험인데, 그 결과를 그림 5에 보인다. 기록계에서는 $T = 500[\mu s]$ 의 샘플링 주기마다 회전속도를 전압으로 환산한 데이터가 소수 두자리 수의 정밀도로 출력된다. 이 신호를 $z(kT)$ 라고 하면, 여기서도 $z_u(kT)$ 는 $z(kT)$ 의 위쪽 포락선을 구성하는 것이며, $z_l(kT)$ 는 $z(kT)$ 의 아래쪽 포락선을 구성하는 것이다. 또한 $z_u(kT)$ 와 $z_l(kT)$ 는 각각 X 및 O로 표기하였다.

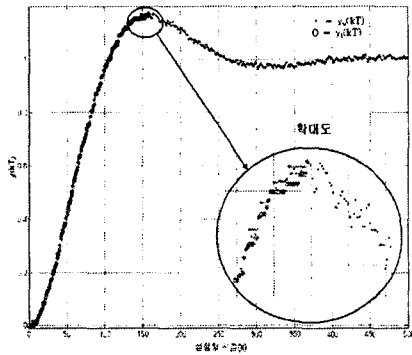


그림 2. 잡음 크기의 변동범위가 $\pm 2\%$ 인 경우의 시험 결과
 Fig. 2. Test result when fluctuation range of noise's magnitude is $\pm 2\%$

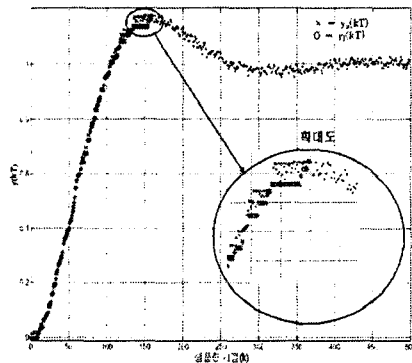


그림 3. 잡음 크기의 변동범위가 $\pm 4\%$ 인 경우의 시험 결과
 Fig. 3. Test result when fluctuation range of noise's magnitude is $\pm 4\%$

그림 5를 보면 $z(kT)$ 가 여러 위치에서 동일한

값이 연속적으로 존재하는 경우가 발생함을 알 수 있다. 이는 데이터를 표현하는 자리수의 제한 때문인데, 데이터를 표현하는 정밀도를 향상시켜도 제거될 수는 없으므로, 정밀도를 더욱 높이기 위해 비용을 증가시키는 것보다는 본 논문에서 제안된 것처럼 유형에 따른 O.S의 후보 선택 방법으로 해결하는 것이 바람직하다. 이 경우에도 그림 5내의 확대도를 보면 O.S이 제어 이론적인 상식에 부합되게 검출되고 있음을 쉽게 알 수 있다.

이 경우에는 Step 2를 2회 반복했으며, 검출된 O.S와 t_b 는 각각 19.66% 및 0.0925[sec]이다. 샘플링 주기가 500[μs]이므로 t_b 는 그림 4에 표기된 샘플링 시점(k)으로 나타내면 185이다.

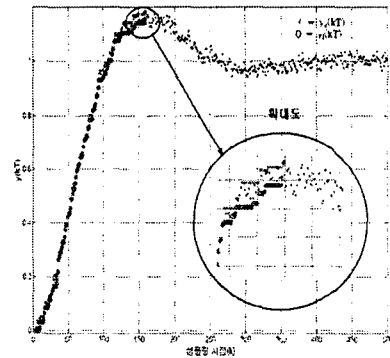


그림 4. 잡음 크기의 변동범위가 $\pm 6\%$ 인 경우의 시험 결과
 Fig. 4. Test result when fluctuation range of noise's magnitude is $\pm 6\%$

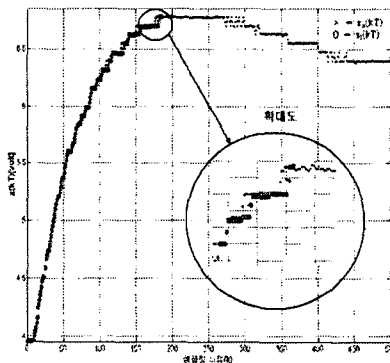


그림 5. 부하 분리 시험시 얻은 데이터에 대한 시험 결과
 Fig. 5. Test result for experimental data gathered at no load condition

5. 결 론

본 논문에서는 압연공정에서 압연기를 구동하는 모터의 속도제어계통에 대한 목표값을 계단형태로 변경시켰을 때, 매 샘플링 시점마다 모터 속도의 응답 결과를 기록계로부터 디지털 형태의 데이터로 입력받아 정비기술자의 개입 없이 최대 오버슈트의 크기와 최대 오버슈트의 발생 위치를 자동으로 구할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

먼저 잡음이 포함된 분석 대상 데이터에서 최대값이 2개 이상 존재할 수 있는 경우들을 세 가지 유형으로 분류하고, 각 유형에 따라 적절한 *O.S* 후보를 선택하는 방법을 제안하였다.

또한 속도 응답 신호의 위쪽 포락선과 아래쪽 포락선을 찾는 방법으로 잡음의 대표값을 구함으로써 선택된 *O.S*의 후보 위치가 적합한 지를 점검할 수 있는 *O.S*의 판정 기법을 설계하였다.

본 논문에서 제안된 *O.S*와 t_b 를 구하는 기법의 적용 가능성을 확인하여 보기 위해 두 가지 종류의 시험을 하였다. 첫 번째는 보편적인 2차계 형태의 이론 모델을 이용한 시험이며, 두 번째는 부하 분리 시험시 기록계에서 소수 두자리 형태로 취득한 데이터를 이용한 검증이다. 제어 이론적인 관점에서 볼 때 각각의 시험을 통해 검출된 *O.S*의 위치들은 모두 *O.S*으로 판정하여도 전혀 문제가 없었다. 즉 잡음의 영향을 받는 상태에서도 제안된 알고리즘에 의해 *O.S*와 t_b 가 자동으로 적정하게 판정될 수 있음을 알 수 있었다.

제안된 알고리즘은 속도제어시스템에 어떠한 종류의 하드웨어적인 개량도 하지 않고 현재 사용중인 기록계만을 이용하여 정비기술자의 개입 없이 자동으로 속도제어계통의 성능을 관리하는데 필요한 지표의 값들을 산출할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 압연공정 뿐만 아니라 계단응답에 대한 특성을 자동으로 찾고 관리하는 모든 분야에 활용될 수 있다.

이 논문은 2003학년도 영남대학교 학술연구조성비지원에 의한 것임.

References

- [1] V.B.Ginzburg, "High-Quality Steel Rolling Theory and Practice", Marcel Dekker, Inc, 1993.
- [2] 小原幸雄, '알기 쉬운 현장 설비 진단', 성안당, pp.120~121, 1997.
- [3] Benjamin C. Kuo, "Automatic control systems(sixth edition)", Prentice Hall, pp.327~338, 1991.
- [4] Norman S. Nise, "Control systems engineering (Third edition)", John Wiley&Sons, Inc, pp.191~196, 2000.
- [5] Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering", pp.266~269, 1990.
- [6] Gene F. Franklin, J.David Powell and Michael L.Workman, "Digital Control of Dynamic Systems", Addison-Wesley Publishing, pp.322~345, 1990.
- [7] Charles L. Phillips and H. Troy Nagle, "Digital Control System Analysis and Design", Prentice Hall, pp.525~593, 1995.
- [8] 鳥居孝夫, "계측과 신호처리", 내광서림, pp.145~152, 1998.
- [9] Stanley M. Shinnars, "Modern control system theory and application(second edition)", Addison-Wesley Publishing, pp.146~154, 1978.

◇ 저자소개 ◇

이해영 (李海榮)

1963년 7월 5일생. 1984년 부산대학교 전기기계공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기전자과 석사과정 졸업. 1990년 동 대학원 박사과정 졸업. 1990년~1993년 8월 포항종합제철(주) 기술연구소 연구원. 1993년 9월~현재 영남대학교 전자정보공학부 부교수.

양일화 (梁壹華)

1974년 8월 2일생. 2000년 영남대학교 전기공학과 졸업. 2003년 영남대학교 전기공학과 대학원 석사과정 졸업. 현재 와이테크 사원.

최용환 (崔用煥)

1969년 9월 20일생. 1995년 중앙대학교 졸업. 현재 POSCO 광양제철소 전기정비기술팀.