

시간 지연 추정 기법을 이용한 권취기의 장력 제어 알고리즘 Tension Control of a Winding Machine using Time-delay Estimation

허정현¹ · 유병용² · 김진욱^{3*}

Jeong-Heon Heo, Byungyong You and Jinwook Kim

Received: 20 Apr. 2018, Revised: 03 Jul. 2018, Accepted: 25 Jul. 2018

Key Words : Winding Machine(권취기), Tension Control(장력 제어), Time-delay Estimation(시간 지연 추정), Time-delay Control(시간 지연 제어), Time-varying System(시변 시스템)

Abstract: We propose a tension controller based on a time-delay estimation (TDE) technique for a winding machine. Firstly, we perform the necessary calculations to derive a mathematical model of the winding machine. In this sense, it is revealed that the roll radius of the winding machine is characteristically seen to be increasing or decreasing during the winding process. That being said, it is noted that the parameters of the winding machine are coupled and constantly changing during this process. Understandably then, it is noted that the model is shown to be nonlinear and time-varying. Secondly, we propose the way to apply the TDE based controller which is the so-called Time-delay Control (TDC). The TDC utilizes the time-delayed information intentionally to compensate the nonlinear and time-varying characteristics. As we have seen, the proposed controller consists of two parts: one is a TDE component, and the other is an error dynamics component which is defined by a user. In a computer simulation based on the Matlab/Simulink program, the proposed controller is compared with a conventional PID controller, which is widely used in the tension control of the winding machine. The proposed controller reduces the incidence of overshoot and steady-state error in the tension control, as compared to the conventional PID controller.

1. 서 론

권취기는 종이, 필름, 직물 등 롤(roll) 형태로 감겨

있는 다양한 소재를 풀어주면서 용도에 따라 절단이나 코팅 등의 재처리 공정을 거친 후, 이를 다시 롤 형태로 감아주는 기계이다. 빠른 공정 속도를 유지하면서 동시에 소재의 품질을 안정적으로 관리하기 위해서는 고도의 제어 기술이 요구된다.^{1,2)}

권취기에서 필요로 하는 제어 기술에는 소재에 작용하는 장력의 제어³⁾, 소재의 절단 부위와 감겨진 롤 단면의 균일화를 위한 소재의 끝단 위치 제어(Edge Position Control)⁴⁾가 대표적이다.

이 중 장력 제어는 권취기에서 소재의 감긴 상태를 결정하는 중요한 요소이다. 소재에 가해지는 장력이 일정하게 유지되지 않으면 소재가 본래의 형상을 잃거나 심한 경우 찢어질 수도 있다. 또한, 권취기는 소재를 감거나 풀어주는 장치이기 때문에 공정이 지속됨에 따라 롤의 반경이 변하게 되고 이와 관련된 다른 변수들도 영향을 받는 비선형 시변(time-varying)

* Corresponding author: tw0822@gmail.com

1 Research Institute of Industrial Science and Technology (RIST), 67, Cheongam-ro, Nam-gu, Pohang-si, Gyeongsangbuk-do 37673, Korea.

2 School of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil University, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do 38428, Korea.

3 Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), 12, Bulmosan-ro, Seongsan-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do 51543, Korea

Copyright © 2018, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

시스템이다.

이를 위해 권취기의 장력 제어에 관한 많은 연구가 진행되어왔다.^{1),5)-15)} 장력 제어 메커니즘을 설명하기 위한 수학적 모델링⁵⁾, 장력 제어를 위한 적응 제어 기법⁶⁾, 장력 제어를 위한 robust 제어기 설계⁷⁾, 관성을 보상하기 위한 외란 관측기 기반의 장력 제어 시스템¹⁾ 등이 제안되었다. 그러나 기존의 많은 연구 결과들은 정확한 수학적 모델 또는 파라미터의 복잡한 반복 계산이 요구된다.

권취기는 비선형 시변 특성을 지닌 제어하기 어려운 시스템이며, 본 논문에서는 수학적 모델링을 통해 이 같은 사실을 명확히 하였다. 이러한 특성을 보상하면서 장력 제어 목표를 달성하기 위해 뛰어난 추종 능력을 갖는 시간 지연 추정(time-delay estimation, TDE) 기반의 제어기를 소개 및 제안한다. TDE를 기반으로 하는 시간 지연 제어(time-delay control, TDC)는 구조가 단순하고 외란에도 견고하여 많은 분야에서 사용되어 왔다.^{16)-23),27)} 해당 제어기는 시스템의 시변 특성, 비선형 특성, 외란 등을 보상하기 위한 시간 지연 추정 부분과 사용자가 원하는 오차 다이내믹스를 부여하는 부분으로 구성되어 있다. 오차 다이내믹스가 우선 정해지게 되면 파라미터가 1개로 줄어들기 때문에 제어기 이득 조정을 위한 노력을 줄일 수 있다.

해당 제어기는 Matlab/Simulink 환경에서 구성된 모델을 이용하여 성능을 확인하였다. 시뮬레이션에서는 장력 제어에 많이 사용되는 PID 제어기와 성능 비교를 하였고, 제안된 제어기의 우수성을 보여준다.

2장에서는 권취 시스템의 수학적 모델을 제시하고, 해당 시스템의 특성을 알아본다. 3장에서는 TDE를 권취기의 장력 제어에 적용하기 위한 방법을 제안한다. 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 제어 알고리즘의 성능을 평가한다. 5장에서는 논문의 내용 및 시뮬레이션 결과를 요약한다.

2. 권취기의 수학적 모델링

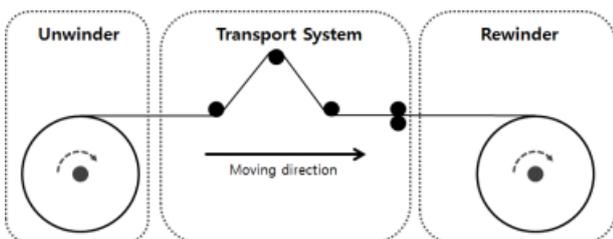


Fig. 1 The configuration of winding system.

이 장에서는 권취기의 수학적 모델을 도출하고, 그로부터 권취기 및 장력 제어의 특성을 살펴본다. 권취기는 그림 1과 같이 소재를 연속적으로 풀어주는 unwinder, 소재를 이송하면서 재처리를 수행하는 이송 시스템(transport system), 재처리된 소재를 다시 롤 형태로 감아 최종 상품으로 만드는 rewinder, 크게 세 부분으로 구성된다. 이 과정 중에 소재가 접히거나 찢기는 등 손상을 입지 않도록 소재에 작용하는 장력과 공정 속도를 일정하게 제어해야 한다.^{1),2)}

본 논문에서는 그림 2와 같이 rewinder에서 수행되는 장력 제어를 고려하였다. 공정이 시작되면 rewinder의 롤 코어의 회전과 함께 소재가 감기면서 전체 롤의 반경이 점점 증가한다. 롤의 회전은 소재에 장력을 가하게 되고, 소재는 일정한 선속도를 유지하며 이동한다. Rewinder의 롤 코어는 모터와 연결되어 있고, 로드 셀을 통해 소재에 작용하는 장력을 계측한다. 장력 제어기는 계측된 장력과 목표 장력의 오차를 이용하여 모터에 작용할 토크를 조절함으로써 장력을 제어한다.

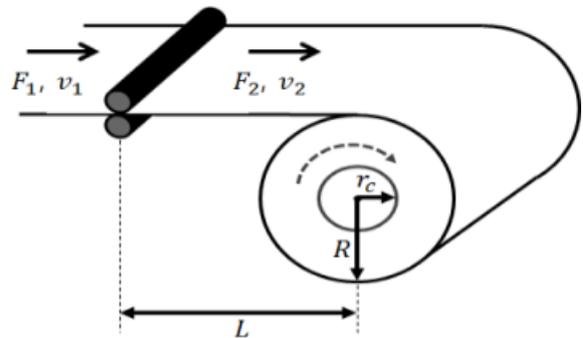


Fig. 2 Physical representation of the rewinder.

본 논문에서 사용하는 권취기 관련 파라미터들은 표 1과 같다. 권취기는 토크의 입출력 관계로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.^{1),2)}

$$\frac{d(J_t \omega)}{dt} + B\omega + T_l = T_c. \quad (1)$$

여기서 $T_l = RF_2$ 이고, J_t 는 J_m 과 J_c 의 합이다. J_m 과 J_c 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$J_m = \frac{1}{2} \pi W \rho_m (R^4 - r_c^4), \quad (2)$$

$$J_c = \frac{1}{2} \pi W \rho_c r_c^4. \quad (3)$$

Table 1 Parameters of Rewinder

항목	내용	단위
F_s	목표 장력	N
F_1	Rewinder 영역 진입 장력	N
F_2	소재에 작용하는 장력	N
L	Rewinder 영역 길이	m
B	Viscous 마찰 계수	$N \cdot m \cdot s$
J_c	롤 코어 관성모멘트	$kg \cdot m^2$
J_m	감긴 소재의 관성모멘트	$kg \cdot m^2$
J_t	전체 롤의 관성 모멘트	$kg \cdot m^2$
MT	소재의 두께	m
W	소재의 폭	m
ρ_m	소재의 밀도	kg/m^3
E	Young Modulus	N/m^2
ρ_c	롤 코어의 밀도	kg/m^3
r_c	롤 코어의 반경	m
R	전체 롤의 반경	m
T_e	모터 토크	$N \cdot m$
T_l	부하 토크	$N \cdot m$
v_s	목표 공정 속도	m/s
v_1	Rewinder 영역 진입 속도	m/s
v_2	Rewinder 선속도	m/s
θ	롤의 회전 각	$radian$
ω	Rewinder 각속도	rad/s

$$R = r_c + \frac{MT}{2\pi} \theta \tag{7}$$

그 변화율

$$\dot{R} = \frac{MT}{2\pi} \omega = \frac{MT}{2\pi R} v_2 \tag{8}$$

을 고려하면 rewriter에서 공정 속도는 다음과 같다.

$$\dot{v}_2 = \frac{MT}{2\pi R^2} v_2^2 - \frac{B}{J_t} v_2 - \frac{\omega R}{J_t} \dot{J}_t + \frac{R}{J_t} T_e - \frac{R}{J_t} T_l \tag{9}$$

질량 보존의 법칙에 따라 장력의 다이내믹스는 다음과 같이 표현된다.⁹⁾

$$L\dot{F}_2 = E \cdot W \cdot MT(v_2 - v_1) + v_1 F_1 - v_2 F_2 \tag{10}$$

(9)와 (10)을 조합하면 장력 F_2 는 다음과 같이 2차 미분방정식으로 표현할 수 있다.

$$L\ddot{F}_2 = E \cdot W \cdot MT(\dot{v}_2 - \dot{v}_1) + \dot{v}_1 F_1 + v_1 \dot{F}_1 - \dot{v}_2 F_2 - v_2 \dot{F}_2 \tag{11}$$

$$L\ddot{F}_2 = -v_2 \dot{F}_2 + v_1 \dot{F}_1 + \dot{v}_1 F_1 + E \cdot W \cdot MT \left(\frac{MT}{2\pi R^2} v_2^2 - \frac{B}{J_t} v_2 - \frac{\omega R}{J_t} \dot{J}_t - \frac{R}{J_t} T_l - \dot{v}_1 \right) - \left(\frac{MT}{2\pi R^2} v_2^2 - \frac{B}{J_t} v_2 - \frac{\omega R}{J_t} \dot{J}_t - \frac{R}{J_t} T_l \right) F_2 + \left(E \cdot W \cdot MT \frac{R}{J_t} - F_2 \frac{R}{J_t} \right) T_e \tag{12}$$

전체 롤의 반경이 시간에 따라 변화하므로 J_t 도 시간에 따라 변하고, ω 역시 시간에 따라 변한다. Rewinder의 선속도와 각속도의 관계 $\omega = v_2/R$ 와

$$\frac{d(J_t \omega)}{dt} = J_t \dot{\omega} + \omega \dot{J}_t \tag{4}$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{R} \dot{v}_2 - \frac{v_2}{R^2} \dot{R} \tag{5}$$

를 이용하면 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$J_t \left(\frac{1}{R} \dot{v}_2 - \frac{v_2}{R^2} \dot{R} \right) + \omega \dot{J}_t + B \frac{v_2}{R} + T_l = T_e \tag{6}$$

공정 진행에 따른 롤 반경과

(12)는 다음과 같이 제어 입력인 모터 토크 T_e 와 rewriter의 다이내믹스를 표현하는 부분으로 구분하여 표현할 수 있다.

$$\ddot{F}_2 = f(v_1, \dot{v}_1, v_2, \dot{v}_2, F_1, \dot{F}_1, F_2, \dot{F}_2) + b T_e \tag{13}$$

여기서

$$f = (-v_2 \dot{F}_2 + v_1 \dot{F}_1 + \dot{v}_1 F_1 + E \cdot W \cdot MT \left(\frac{MT}{2\pi R^2} v_2^2 - \frac{B}{J_t} v_2 - \frac{\omega R}{J_t} \dot{J}_t - \frac{R}{J_t} T_l - \dot{v}_1 \right) - \left(\frac{MT}{2\pi R^2} v_2^2 - \frac{B}{J_t} v_2 - \frac{\omega R}{J_t} \dot{J}_t - \frac{R}{J_t} T_l \right) F_2) / L, \tag{14}$$

$$b = \frac{E \cdot W \cdot MT R}{L} \frac{R}{J_t} - \frac{F_2 R}{L J_t} \tag{15}$$

이며, $f(\cdot)$ 와 b 둘 다 비선형 시변 함수이다. 즉, rewinder의 물리적 변수들은 공정이 진행됨에 따라 변하게 되고 서로 결합되어 있어서 장력 제어 시, 필수적으로 고려가 필요하다.

3. 시간지연 추정 기반의 장력 제어 알고리즘

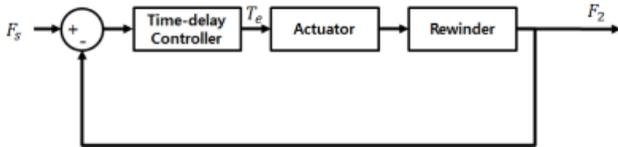


Fig. 3 Block diagram of rewinder tension control system using Time-delay Controller.

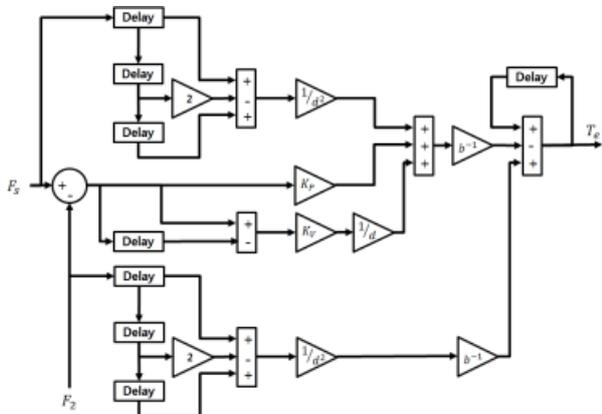


Fig. 4 Block diagram of Time-delay Control algorithm.

장력 제어에 많이 사용되는 PID 제어기는 선형제어기로써 설계 시 반영된 동작점에서는 우수한 성능을 보이나, 이를 벗어나게 되면 안정화 상태를 유지하는 것이 어려울 수도 있다.^{2),3),6),7),11),12),26)}

본 논문에서는 TDC를 이용한 장력 제어 알고리즘을 제안한다. (13)에서 제어의 용이함을 위해 비선형 시변의 특성을 갖는 요소를 다음과 같이 정리한다.

$$\ddot{F}_2 = \bar{f}(v_1, \dot{v}_1, v_2, \dot{v}_2, F_1, \dot{F}_1, F_2, \dot{F}_2) + \bar{b} T_e \quad (16)$$

여기서

$$\bar{f} = f + bT_e - \bar{b} T_e \quad (17)$$

이며, \bar{b} 는 제어 입력 상수이다. Rewinder의 비선형 시변 특성은 \bar{f} 에 반영이 되어있다. 본 논문에서는 (16)을 이용하여 다음과 같이 \bar{f} 를 추정할 수 있다.

$$\bar{f} = \bar{f}_t \approx \bar{f}_{t-d} = \ddot{F}_{2,t-d} - \bar{b} T_{e,t-d} \quad (18)$$

여기서 \cdot_{t-d} 은 \cdot 의 d 시간만큼 지연된 과거 값이다. 이와 같이 현재 값을 지연된 과거 값을 이용하여 추정하기 때문에 ‘시간 지연 추정’이라고 부른다.¹⁶⁾⁻²²⁾ \bar{f} 은 (17)과 같이 많은 요소들이 서로 결합되어 있기 때문에 각 구성요소를 직접적으로 계산하는 것은 매우 복잡하고 어려울 수 있다. (18)과 같이 시간 지연 값을 이용하여 간접적으로 추정하면 계산의 복잡함 및 과정이 단순해질 수 있다. 이후부터는 수식의 간략화를 위해 현재의 값을 나타낼 때는 첨자 t 를 생략한다. 이론적으로 d 가 충분히 작다면 (18)과 같은 근사화가 성립될 수 있고, 일반적으로 디지털 시스템의 제어 주기(Sampling Time)로 d 를 선정한다. 그러나 실제로 매우 작은 d 를 선택하게 되면 센서의 분해능 제약 및 산술적 미분 오차 증가 등으로 ‘시간 지연 추정’오차가 커질 수 있으므로 신중한 고려가 필요하다.²³⁾

또한, 장력 제어기는 목표 장력 F_s 와 소재에 실제 작용하는 장력 F_2 와의 차이를 다음과 같이 정의한다.

$$e = F_s - F_2 \quad (19)$$

(19)에서 정의한 장력 오차를 지수적(exponentially)으로 0으로 수렴시키기 위해 다음과 같이 양수의 설계 파라미터 K_v 와 K_p 를 갖는 오차 다이내믹스를 정의하였다.

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0 \quad (20)$$

(16)~(20)를 이용하면 TDC는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \underbrace{T_{e,t-d} - \bar{b}^{-1} \ddot{F}_{2,t-d}}_{\text{시간지연추정}} + \underbrace{\bar{b}^{-1} (\ddot{F}_s + K_v \dot{e} + K_p e)}_{\text{오차다이내믹스}} \quad (21)$$

(21)은 마이크로프로세스나 컴퓨터와 같은 디지털 장비에 구현이 되어 최종 사용되기 때문에 이산 시간 영역에서 구현이 되어야 하며, 실구현을 위해서 $\ddot{F}_{2,t-d}$ 와 \dot{e} 는 다음과 같이 산술적으로 계산한다.

$$\ddot{F}_{2,t-d} = \frac{F_{2,t-d} - 2F_{2,t-2d} + F_{2,t-3d}}{d^2}, \quad (22)$$

$$\dot{e} = \frac{e - e_{t-d}}{d} \tag{23}$$

TDC는 그림 3과 같이 rewinder와 페루프를 구성하여 장력 제어를 수행하고, (21)~(23)은 그림 4와 같이 구성된다.

(16)~(18)과 (21)로부터 페루프 다이내믹스를 도출하면 다음과 같다.

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = \bar{f}_{t-d} - \bar{f} = \epsilon \tag{24}$$

여기서 ϵ 는 시간 지연 추정 오차이다.

K. Youcef-Toumi¹⁹⁾에 의해 TDC의 안정성 조건은 다음과 같이 도출된다.

$$\| b \cdot \bar{b}^{-1} - 1 \| < 1. \tag{25}$$

또한, (18)에서 시간 지연 추정이 완벽히 이루어진다면($f_{t-d} - f = 0$), (24)은 (20)과 같이 기 설정한 오차 다이내믹스를 만족하게 되어 장력 오차를 0으로 수렴시킬 수 있다.

4. 시뮬레이션

제안된 시간지연 추정 기반의 장력 제어 알고리즘을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션에서 권취기의 최종 목표 장력 및 공정 속도는 그림 5와 같이 0N 및 0m/s에서 시작하여 12초 후에 각각 300N 및 5m/s에 도달하는 것으로 정하였다. 이송 영역에서 rewinder 영역으로 진입하는 장력 F_1 및 속도 v_1 은 목표값 대비 각각 1% 및 10% 이내의 무작위성 노이즈를 추가하였다. 시뮬레이션에서 사용하는 공정 파라미터 등의 조건은 다른 연구 결과¹⁵⁾를 참조하여 정하였다.

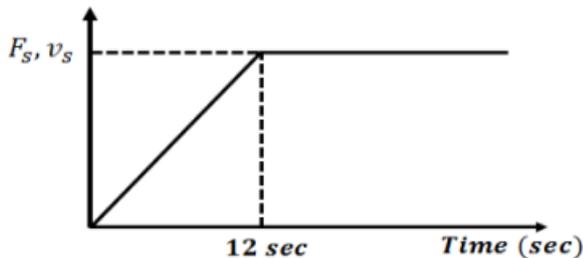


Fig. 5 Target tension and line speed profiles.

Table 2 Parameters in simulation

항목	내용	단위
L	3	m
B	0.2	$N \cdot m \cdot s$
E	2.7	N/m^2
MT	6.0×10^{-4}	m
W	0.5	m
ρ_m	700	kg/m^3
ρ_c	2	kg/m^3
r_c	0.5	m

TDC와 비교하기 위해 다음과 같이 PID 제어기를 사용하였다.

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \tag{26}$$

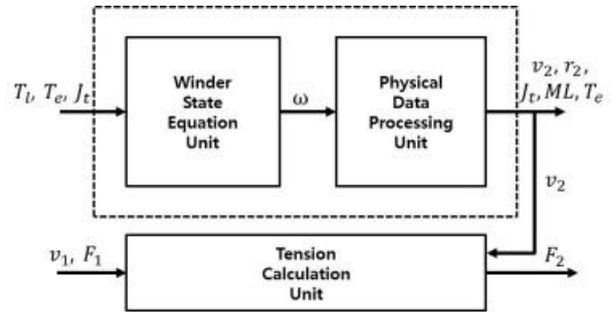


Fig. 6 Schematic diagram of rewinder model. The model is implemented in the matlab/simulink environment.

여기서 K_p 는 비례 이득, T_i 는 적분 시간, T_d 는 미분 시간을 나타낸다.

권취기 모델에 적용할 PID 제어기의 초기 이득은 Ziegler-Nichols 방법을 사용하여 조절하였다.²⁴⁾ Ziegler-Nichols 튜닝 방법은 제어대상 플랜트가 나타내는 과도응답 형태로부터 PID 제어기 파라미터를 결정하는 방법으로 표 3에 기반한다.

Ziegler-Nichols 방법은 먼저 해당 시스템의 출력값이 정상상태에서 발산이나 수렴하지 않고 지속적으로 진동할 때 비례 이득을 구하며 이때의 비례 이득을 K_u 로 정한다.

또한, 출력값이 진동 할 때 그 주기를 구하여 T_u 라고 정한다. K_u 와 T_u 를 구한 후, 원하는 PID 제어기 형태의 이득 값을 표 3을 통해 계산할 수 있다. 본 시뮬레이션에서는 No Overshoot에 해당하는 PID 이득을 사용하였다. 시뮬레이션을 통한 튜닝 결과 그림 7과 같이 K_u 는 300, T_u 는 0.37초로 도출되었다.

표 3으로부터 도출된 (26)의 이득 K_p , T_i , T_d 는 각각 60, 0.185, 0.123은 미세 조정을 통해 최종적으로 60, 1, 0.67로 정하였다.

Table 3 Ziegler-Nichols method²⁵⁾

Rule Name	Tuning Parameters		
	K_p	T_i	T_d
Classic PID	$0.6K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$
Pessen Integral Rule	$0.7K_u$	$T_u/2.5$	$T_u/20$
Some Overshoot	$0.33K_u$	$T_u/2$	$T_u/3$
No Overshoot	$0.2K_u$	$T_u/2$	$T_u/3$

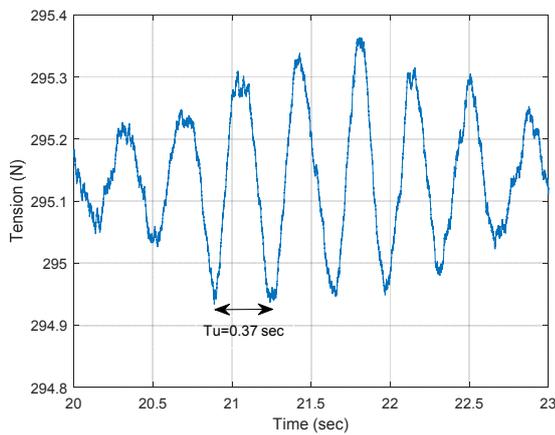


Fig. 7 The oscillation response of PID control system based on Ziegler-Nichols method (No Overshoot) when K_u is 300. T_u is 0.37.

TDC는 3장에서 도출된 (21)을 사용하였고, 오차 다이내믹스 (20)에 대해서 K_V 와 K_P 를 각각 20과 100으로 설정하였으며 \bar{b} 는 미세 조정을 통해 0.002로 조절하였다.

본 시뮬레이션에서 그림 8 및 9와 같이 Ziegler-Nichols 기법 기반의 PID 제어기와 TDC 모두가 설정한 장력 제어 목표에 도달하여 잘 유지되는 것을 볼 수 있었다. 과도 응답에서 TDC는 목표 장력이 300N으로 바뀌는 순간 추종을 하였으나, Ziegler-Nichols 기법 기반의 PID 제어기는 목표 장력을 따라가는데 있어서 TDC보다 더욱 많은 시간을 필요로 했다. 정상 상태에서도 TDC가 Ziegler-Nichols

기법 기반의 PID 제어기보다 상대적으로 적은 오차를 보였다.

이는 TDE가 권취기의 비선형 시변 특성을 잘 추정한다는 것을 의미하며, 조절이 필요한 제어기 이득이 한 개이기 때문에 PID 제어기(Ziegler-Nichols 기법)보다 상대적으로 미세 조정이 잘 된 것으로 판단된다.

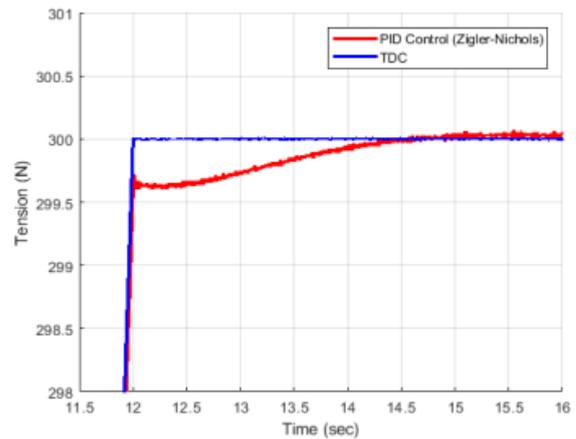


Fig. 8 Transient responses of PID control based on Ziegler-Nichols technique and TDC.

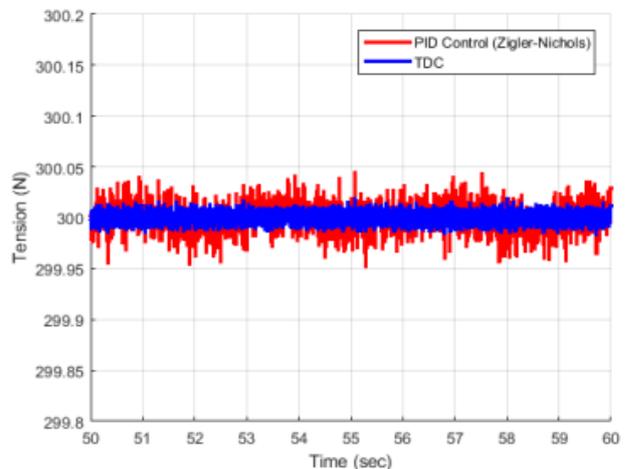


Fig. 9 Steady states of PID control based on Ziegler-Nichols technique and TDC.

5. 결 론

권취기는 산업 현장에서 가장 많이 사용되는 기계 장치이다. 해당 장치를 통해 여러 가지 소재들이 풀리거나 감기면서 최종 상품을 만든다. 권취기의 가장 중요한 기능은 장력 제어이며, 해당 논문에서는 TDC를 권취기의 장력 제어에 적용하기 위한 방법을 제안하였다.

권취기 모델은 비선형 시변의 특성을 가지고 있기 때문에 제어가 어렵다. 일반적으로 PID 제어가 장력 제어에 많이 이용되고 있으나 파라미터가 많기 때문에 제어 성능을 높이기 위한 이득 조절도 쉽지 않다.

본 논문에서는 TDC를 권취기의 장력 제어에 적용하는 방법을 제안하였다. 해당 제어기는 사용자가 원하는 오차 다이내믹스를 지정하게 되면 파라미터가 한 개로 줄어들어 제어기 이득 조절이 간단하다.

시뮬레이션을 통해 제안된 제어기가 Ziegler-Nicols 방법으로 튜닝된 PID 제어기보다 더욱 우수한 장력 제어 성능을 보여주었다.

후 기

본 연구는 2015년도 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20152010103630)

References

- 1) J. W. Kim, O. K. Choi and J. S. Lee, "Adaptive Transition Disturbance Observer for Winding Machine", ICCAS-SICE 2009, Fukuoka, Japan, 2009.
- 2) J. W. Kim, E. S. Seo, O. K. Choi, and J. S. Lee, "Tension control of winder using fuzzy proportional-integral control," Proc. of KIECS Autumn conference, vol.5, no.2, pp. 409-413, 2011.
- 3) D. Knittel, "Tension control for winding systems with two-degrees-of freedom H^∞ controller", IEEE T. Ind. Appl., vol.39, no.1, pp.113-120, 2003.
- 4) K. N. Choi, "Position Sensing Method using Linear Camera Sensor", J. Korean Inst. Commun. Inf. Sci., vol.34, no.12, pp. 363-367, 2009.
- 5) T. Skakamoto, "Analysis and Control of Web Tension Control System", IEEE Trans. Japan, vol.117-D, no.3, pp.274-280, 1997.
- 6) K. Okada and T. Sakamoto, "An Adaptive Fuzzy Control for Web Tension Control System", Proceeding of the 24th Annual Conference of the IEEE, vol.3, pp.1762-1767, 1998.
- 7) B. Wang, J. Zuo, M. Wang and H. Hao, "Model Reference Adaptive Tension Control of Web Packaging Material", 2008 Int'l Conf. on ICICTA,

- vol. 1, pp.395-398, 2008.
- 8) H. Koc, D. Knittel, M. de Mathelin and G. Abba, "Modeling and Robust Control of Winding Systems for Elastic Webs", IEEE T. Contr. Syst. T., vol.10, no.2, pp. 197-208, 2002.
- 9) M. A. Valenzuela, J. M. Bentley and R. D. Lorenz, "Sensorless Tension Control in Paper Machines", Pulp and Paper Industry Technical Conference, pp.44-53, 2002.
- 10) Y. Hou, Z. Gao, F. Jiang and B. T. Boulter, "Active Disturbance Rejection Control for Web Tension Regulation," Proc. of the 40th IEEE Conf. on Decision and Control, pp.4974-4979, 2001.
- 11) J. C. Park, S. W. Jeon, K. S. Nam, and C. H. Kim, "Variable PID gain control of winder tension of roll-to-roll printing system using estimation of winder-roll radius," J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., vol.22, no.4, pp.755-760, 2013.
- 12) C. H. Kim, J. Jo, and S. H. Lee, "Design of roll-to-roll printing equipment with multiple printing methods for multi-layer printing," Rev. Sci. Instrum., vol.83, no.6, 065001, 2012.
- 13) K. H. Shin, and S. O. Kwon, "Longitudinal tension control at start and stop in a multi-span continuous process system," Proc. of KSPE Autumn Conf., pp.584-589, 1994.
- 14) J. H. Sul, J. O. Park, J. S. Jang, and Y. D. Lim, "A research about implementation of fuzzy control algorithm with variable input gain for improving performance of tension control," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, vol.7, no.8, pp.680-688, 2001.
- 15) S. C. Choi, D. B. Lee and H. Y. You, "Tension Control using Adaptive PID Controller in the Two-drum Winder Web Transport System," Journal of Control, Automation and System Engineering, vol.6, no.9, 2000.
- 16) T.C. Hisa, T.A. Lasky, Z. Guo, "Robust Independent Joint Controller Design for Industrial Robot Manipulator", IEEE Trans. Ind. Electron., vol.38, no.1, pp.21-25, 1991.
- 17) T. C. Hisa, "A New Technique for Robust Control of Servo Systems", IEEE Trans. Ind. Electron., vol.36, no.1, pp.1-7, 1989.

- 18) T. Hsia and L. Gao, "Robot manipulator control using decentralized linear time-invariant time-delayed joint controllers," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp.2070-2075, 1990.
- 19) K. Youcef-Toumi and S.-T. Wu, "Input/output linearization using time delay control," Trans. ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control, vol.114, no.1, pp.10-19, 1992.
- 20) G. R. Cho, P. H. Chang, S. H. Park, and M. Jin, "Robust tracking under nonlinear friction using time-delay control with internal model," IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol.17, no.6, pp.1406-1414, 2009.
- 21) M. Jin, Y. Jin, P. H. Chang, and C. Choi, "High-accuracy tracking control of robot manipulators using time delay estimation and terminal sliding mode," Int. J. Adv. Robot. Syst., vol.8, no.4, pp.65-78, 2011.
- 22) J. W. Kim and M. Jin, "Synchronization of chaotic systems using particle swarm optimization and time-delay estimation," Nonlinear Dynam., vol.86, no.3, pp.2203-2015, 2016.
- 23) E. Lee, J. Park, K. A. Loparo, C. B. Schrader, and P. H. Chang, "Bang-Bang Impact Control Using Hybrid Impedance/Time-delay Control," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol.8, no.2, pp.272-277, 2003.
- 24) J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," ASME Transactions, vol.64, pp.759-768, 1942.
- 25) A. S. McCormack and K. R. Godfrey, "Rule-Based Autotuning Based on Frequency Domain Identification," IEEE T. Contr. Syst. T., vol.6, no.1, pp.43-61, 1998.
- 26) J. M. Cheon, J. W. Kim, H. J. Kim, Y. K. Choi and M. Jin, "A Fuzzy PI Controller for Pitch Control of Wind Turbine," J. Drive and Control, vol.15, no.1, pp.28-37, 2018.
- 27) S. H. Park, E. I. Jeong, and D. G. Shin, "Identification of the Relationship Between the Discrete TDCIM and the Discrete PID Controller," J. Drive and Control, vol.14, no.4, pp.23-28, 2017.