

롤투롤 시스템의 와인더 반경 추정을 이용한 와인더 장력의 가변 PID이득 제어

박종찬^a, 전성웅^b, 남기상^a, 김충환^{b*}

Variable PID Gain Control of Winder Tension of Roll-to-Roll Printing System using Estimation of Winder-Roll Radius

Jong-Chan Park^a, Sung Woong Jeon^b, Ki Sang Nam^a, Chung Hwan Kim^{b*}^a Dept. Mechanical Eng., Chungnam National Univ., Daejeon, Republic of Korea^b Dept. Mechanical & Metallurgical Eng. Education, Chungnam National Univ., Daejeon, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	7	July	2013
Revised	29	July	2013
Accepted	5	August	2013

Keywords:

Winder roll
Variable PID gain
Roll-to-roll
Tension control

ABSTRACT

The dynamics of the winder roller of a roll-to-roll printing system for printed electronics is a time-varying system because of the variation of the winder roller radius owing to rewinding or unwinding of the web. Therefore, an adaptive control method considering the time-variant characteristics is required for precise tension control. In this study, the variable PID gain method is applied to the actual roll-to-roll system and verified by experiments for unwinder tension control. The required value of the winder roller radius for the application of the variable PID gain is estimated from the measurement of the winder tension and winder motor torque. The simulation results as well as experimental results show that the fixed PID gain control cannot stabilize the tension of the winder roller with varying winder roller radius. On the other hand, the variable PID gain method can control the tension of the winder roller regardless of the winder roller radius.

1. 서론

최근 주목받고 있는 인쇄 전자(Printed Electronics) 기술은 인쇄 방식을 이용하여 RFID Tag, 태양전지(Solar cell), 전자 종이(E-paper), 터치 스크린(Touch screen), 유연 디스플레이(Flexible display) 등을 생산할 수 있는 기술로서, 기존의 반도체 생산보다 저가의 생산 비용과 대면적인 공정 과정, 대량 생산이 가능하다는 장점을 갖고 있어 기존의 반도체 생산 기술을 대체 가능할 것으로 기대되고 있다^[1].

현재 인쇄 전자 생산 기술로, 대면적 생산이 가능하고, 낮은 생산

비용, 고속의 생산 공정을 이용하여 대량생산이 가능한 롤투롤 프린팅 시스템(Roll-to-roll printing system)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^[2]. 롤투롤 프린팅 시스템은 다중 스펠 연속 공정 시스템(Multi-span continuous process system)으로서 각각의 스펠 내에서 소재의 진행 방향에 대한 장력 유지와 스펠 전체에서의 안정화가 중요하다^[3]. 각 스펠에서의 장력은 각각의 모터에서의 속도 차이로 인해 발생하고 스펠 내의 장력 제어는 모터에 의해서 이루어진다.

연속 공정 시스템에서는 소재를 배출하는 와인더 롤러로 구성된 풀림부(Unwinder)와 소재를 권취하는 와인더 롤러로 구성된 감김

* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-8584

Fax: +82-42-821-8732

E-mail address: mech@cnu.ac.kr (Chung Hwan Kim).

부(Rewinder)로 이루어져 있으며, 소재의 출발과 종료에 관여한다. 와인더 롤의 속도와 스펀의 장력을 유지하는 상호작용 이외에 각각의 풀림부와 감김부에서는 소재의 배출과 권취에 의해서 와인더 롤의 반경과 그에 따른 관성 모멘트가 변화한다. 이러한 롤 반경과 관성 모멘트 변화는 시스템의 동역학적 모델에 영향을 주게 되면서 시간에 따라 변하는 시변 시스템(Time-varying System)이 되어 와인더 반경이 달라질 경우 장력을 유지하는 것이 더욱 어려워진다^{3,4)}.

롤의 반경과 이에 따른 관성 모멘트에 대한 정밀한 장력 제어를 위해서는 시변하는 반경과 관성 모멘트를 고려하여 동역학적인 모델링을 설계해야 한다. 만약 이를 고려하지 않고 동역학적인 모델링을 설계할 경우, 초기 반경에 대한 일정 구간 내에서의 안정적인 장력 제어는 가능하지만 이를 벗어나게 되면 안정화 상태를 유지하는 것이 불가능하게 된다⁵⁾. 따라서, 이러한 시변 시스템인 와인더 장력 제어를 위해 반경 값을 이용하여 수학적으로 얻어진 PID 계인을 제안하거나, 퍼지 PID 계인을 이용하는 것이 제안되었다. 그러나, 이론적으로만 제안되었을 뿐 실제 실험적으로 구현된 예는 없다.

본 연구에서는 와인더 롤의 반경에 따라 실험적으로 PID 계인을 추출하고, 이를 반경의 함수로 얻는다. 이 때, 반경은 별도의 측정을 위한 센서 없이 와인더의 장력, 와인더 모터의 토크 값으로부터 추정한다.

2. 풀림 롤 장력 제어

2.1 시스템 모델링

본 연구 시스템에 대한 연속 공정 모델은 Fig. 1과 같이 간략하게 표현 가능하다.

마스터 속도 드라이브(MSD, Master speed drive)가 전체 시스템의 이송 속도를 결정하고, 풀림 롤의 경우 풀림롤의 속도 V_u 로 풀림 롤의 장력 T_1 을 제어한다. 풀림 롤에 대한 동역학적인 모델링과 소재에 대한 장력 T_1 에 대한 동역학적인 모델링은 식 (1)~(2)과 같다³⁾.

$$\frac{d}{dt} V_u = -\frac{B_u}{J_u} V_u + \frac{R_u^2}{J_u} (T_1 - T_u) - \frac{R_u}{J_u} K_u U_1 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} T_1 = -\frac{v_m}{L_1} T_1 + \frac{v_{u0}}{L_1} T_u + \frac{AE}{L_1} (V_M - V_u) \quad (2)$$

여기서 B_u 는 감쇠, R_u 는 풀림롤의 반경, K_u 는 모터 상수, U_1 은 제어 입력, J_u 는 풀림롤의 질량관성모멘트, v_{u0} 는 풀림롤 기준 속

도, v_m 은 MSD 이송 속도, V 는 정상 상태로부터의 속도 변화 T 는 정상 상태로부터의 장력 변화, A 는 소재의 단면적, E 는 소재의 영계수, L_1 은 롤과 롤사이의 소재의 길이이다.

풀림 롤에서 배출되고 있는 소재의 반경 변화와 감김 롤에서 권취하는 소재의 반경 변화는 질량 보존의 법칙을 이용하여 간단하게 나타낼 수 있으며³⁾, 시간이 흐름에 따라서 풀림 롤에서의 반경 변화는 관성 모멘트에 영향을 주는 것을 확인할 수 있고, 이로 인하여 관성 모멘트도 시변 시스템의 특성을 갖는다⁶⁾. 소재의 장력을 제어하기 위해서는 풀림 롤의 소재 배출에 따른 반경 변화의 영향이 장력 제어에 주는 영향을 확인하고 제어해야 한다.

2.2 제어기 설계

시변하는 시스템에 대한 제어를 위해서 PID 제어기를 사용할 경우 단순히 고정된 PID 계인으로 이루어진 제어기가 아닌 시변하는 반경에 대한 데이터를 이용하여 PID 계인을 적용시켜줌으로써 가변하는 PID 제어기를 사용한다. 제어 루프는 Fig. 2에 나타내어져 있다.

이에 따른 PID 계인을 얻기 위해서 극점 배치 기법을 이용하였다⁵⁾. 마스터 속도 드라이브의 속도는 일정하고, 풀림 장력 T_u 와 마스터 속도 드라이브 이후의 장력 T_2 는 일정하다고 가정하여 풀림 롤에서 배출되는 소재의 장력에 대한 전달 함수는 식 (1), (2)에 대하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_1(s) = \frac{G_2(s)}{G_1(s)} U_1(s) \quad (3)$$

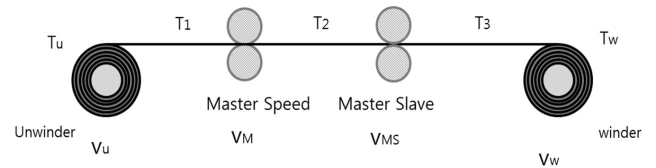


Fig. 1 System modeling of roll-to-roll continuous process system

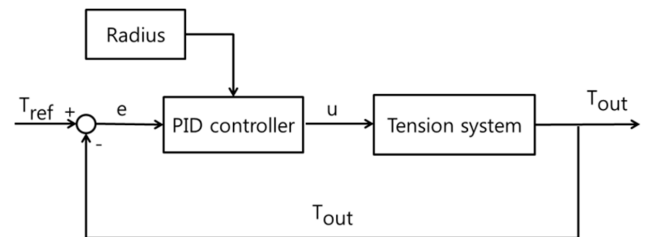


Fig. 2 Block diagram of winder tension control system using variable PID gain

$$\text{단, } G_1(s) = s^2 + \left(\frac{B_u L_1 + v_M J_u}{J_u L_1} \right) s + \frac{AER_u^2}{J_u L_1}$$

$$G_2(s) = \frac{AER_u}{J_u L_1} K_u$$

폴림 롤에서 배출하는 소재의 장력 T_1 의 전달 함수와 이에 사용될 PID 제어기를 포함한 전체적인 폐루프 시스템에 대한 전달 함수는 식 (4)과 같다.

$$\frac{T_1(s)}{T_{ref1}(s)} = \frac{G_2(s)C(s)}{G_1(s) + G_2(s)C(s)} \quad (4)$$

$$\text{단, } C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

임의의 특성을 갖는 기준 모델을 선정하여 PID 제어기의 각각의 게인을 선정할 수 있다. 폐루프 시스템에 대한 전달 함수는 3차 시스템이므로 기준 모델에 대한 특성 방정식은 식을 이용하여^[3] 폴림부에서 배출되는 소재의 장력 T_1 을 임의의 특성을 갖게 하기 위한 PID 제어기의 각각의 게인 값은 식 (5)~(7)과 같다.

$$K_p = \frac{J_u L_1 (2K_r \zeta^2 \omega_n^2 + \omega_n^2)}{AER_u K_u} - \frac{R_u}{K_u} \quad (5)$$

$$K_I = \frac{J_u L_1 K_r \zeta \omega_n^3}{AER_u K_u} \quad (6)$$

$$K_D = \frac{J_u L_1 (2\zeta \omega_n + K_r \zeta \omega_n) - B_u L_1 - v_M J_u}{AER_u K_u} \quad (7)$$

본 실험에서는 J_u 는 반경이 변화하는 속도가 작기 때문에 일정하다고 가정하고 실험에 기반하여 R_u 에 대한 게인 변화를 구하여 반경이 변화함에 따라 PID 제어기를 설계하는 것을 목표로 한다.

2.3 폴림 롤 반경 추정

폴림 롤의 반경은 초기에 측정된 반경과 소재의 두께, 소재 이송 속도 등을 이용한 반경 추정을 하고 있지만, 이러한 경우에 시간이 지남에 따라서 추정된 반경의 오차가 누적되어 제어 성능에 영향을 줄 수 있다^[7]. 이를 보완하기 위해서 소재를 배출하는 폴림 롤에 대해서 모터의 반력 토크를 이용하여 Fig. 3와 같이 롤을 감고 있는 소재의 반경에 대하여 추정할 수 있다. 모터의 반력 토크는 구동 롤을 감싸고 있는 소재의 반경과 장력에 대해서 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다^[7].

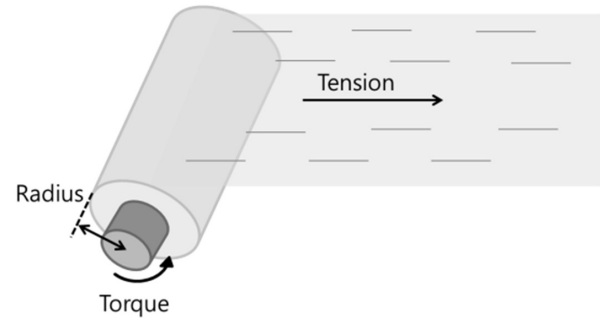


Fig. 3 Winder roller model for estimation of roller radius

$$T_{Torque} = RT + C \quad (8)$$

T_{Torque} 는 모터의 반력 토크, R 은 구동 롤을 감싸고 있는 소재의 반경, C 는 모터의 마찰 토크이다. 실제로 모터 토크 피드백에 관하여 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다^[7].

$$\tau = K T_{Torque} = KRT + KC$$

$$= KRT + C_0 \quad (9)$$

K, C_0 는 상수이다. 이와 같이 소재의 장력과 모터의 토크 피드백 값에 대한 식을 이용하여 소재의 반경에 대하여 식 (10)과 같이 추정할 수 있다^[7].

$$R = \frac{\tau - C_0}{KT} \quad (10)$$

Table 1 Target response

Conditions	Target
Reference Tension	3→8 kgf
P.O (Percent overshoot)	< 30%
T_s (Settling Time)	< 15s

Table 2 Variation of winder roller radius

Winder roller radius	Values
Radius 1	132 mm
Radius 2	95 mm
Radius 3	58 mm

Table 3 PID gain for radius 1 (simulation)

Radius1	K_p	K_I	K_D
132 mm	0.0044	0.0034	0.0046

2.4 폴림롤 장력 제어 - 시뮬레이션

폴림부에서의 장력 제어에 대한 식을 이용하여 고정된 PID 제어기를 사용하여 장력 T_1 을 제어한 경우와, 반경 변화에 대한 데이터를 이용하여 가변 PID 제어기를 사용하여 제어할 경우에 대해서 시변 시스템의 장력 제어 성능을 비교할 수 있다. 고정된 PID 계인에 대한 계단 입력 응답을 보기 위하여 초기 반경에 대한 고정된 PID 제어기를 반경이 달라지는 경우에 대해 시뮬레이션 하였다.

초기 반경에 대해 응답의 목표는 Table 1과 같으며, 반경은 Table 2와 같이 초기 반경을 포함하여 세 가지의 경우에 대해 살펴 보았다. 여기에 사용된 반경 값은 2.5절에서 다룰 실험에 사용된 실제 값을 기준으로 하고, 초기반경에 대하여 극점배치 기법을 사용하여 구한 PID 계인은 Table 3과 같다. 기준 입력 속도는 20 mm/s로 한 경우에 대해 3 kgf에서 8 kgf로 변하는 장력의 계단 입력에 대한 응답 시뮬레이션 결과는 Fig. 4와 같다. Table 2의 각각의 반경 조건에 대하여 시뮬레이션 결과 반경이 작아짐에 따라 오버슈트(overshoot)가 증가하고, 정착시간(Settling Time) 또한 지연되는 것을 확인할 수 있다.

특히, Radius 3의 경우, 안정화를 유지하지 못하고 진동이 발생

하는 것을 확인할 수 있다. 안정성 확인을 위한 Fig. 5의 극영점선도 (Pole-Zero Map)에서 보듯이, 반경이 변해도 영점의 위치는 일정하지만 반경이 작아질수록 극점의 위치는 허수 축에 접근하게 된다. Radius3의 경우 허수 축에 근접하여 위치하게 되어 불안정하게 된다.

반경이 변할 때 가변 PID 계인을 적용한 제어 성능을 확인하기 위하여, 반경 변화에 대한 데이터를 이용하여 식 (5)~(7)의 극점 배치기법을 이용해 구해진 PID 계인을 이용한 시뮬레이션을 하였다.

응답의 목표는 Table 1과 같고 반경은 Table 2와 같이 초기 반경을 포함하여 세 가지의 경우에 대해 살펴 보았다. 각각의 반경에 대하여 극점배치기법을 사용하여 구한 PID 계인은 Table 4와 같다. 기준 입력 속도는 20 mm/s로 한 경우에 대해 3 kgf에서 8 kgf로 변하는 장력의 계단 입력에 대한 응답 시뮬레이션 결과는 Fig. 6와 같다. Table 2의 각각의 반경 조건에 대하여 시뮬레이션 결과 반경이 작아짐에 따라 반경 변화에 대한 데이터를 이용하여 실시간으로 PID 계인을 획득하여 안정적인 결과를 얻을 수 있다.

반경이 변화함에 따른 반경 변화에 대한 데이터를 이용하여 PID 제어기를 사용할 경우에 대해 안정성 확인을 위한 극영점선도는

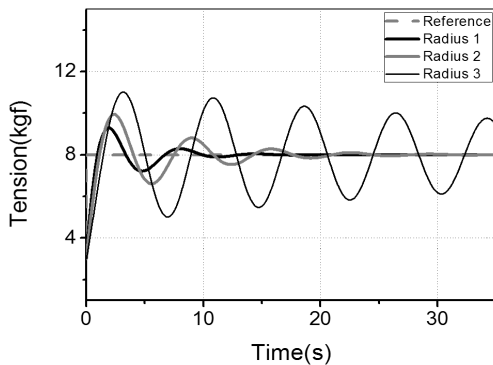


Fig. 4 Step response of winder tension control with fixed PID gain for different winder roller radius (simulation)

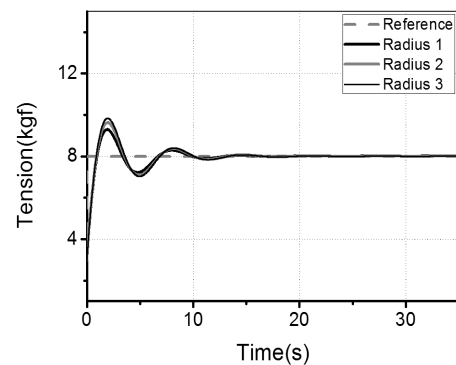


Fig. 6 Step response of winder tension control with variable PID gain for different winder roller radius (simulation)

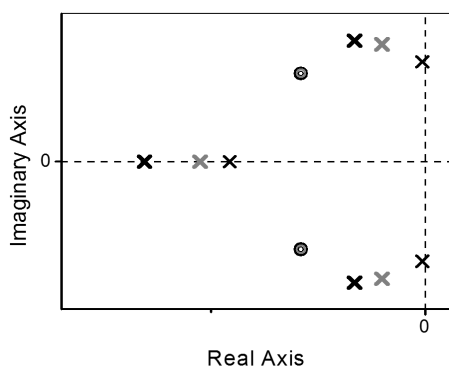


Fig. 5 Pole-Zero map of winder tension control with fixed PID gain for different winder roller radius (● X-Radius1, ● X-Radius2, ○ X-Radius3)

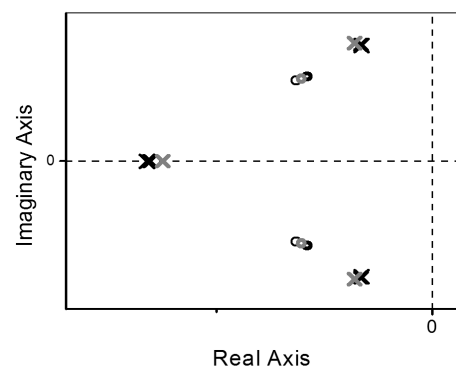


Fig. 7 Pole-Zero map of winder tension control with variable PID gain for different winder roller radius (● X-Radius1, ● X-Radius2, ○ X-Radius3)

Table 4 Variation of PID gain for different winder roller radius (simulation)

Winder roller radius	Values	K_P	K_I	K_D
Radius 1	132 mm	0.0044	0.0034	0.0046
Radius 2	95 mm	0.0064	0.0047	0.0064
Radius 3	58 mm	0.0105	0.0077	0.0105

Table 5 PID Gain for Radius 1 (experiment)

Radius1	K_P	K_I	K_D
132 mm	0.0045	0.0032	0.0022

Fig. 7와 같은 결과를 갖는다. 초기 극점의 위치를 정하여 반경이 변화하여도 PID 계인을 이용해 초기 극점에 근접한 위치로 이동시켜 안정한 제어가 가능하다.

2.5 폴림롤 장력 제어 - 실험

고정 PID 계인을 이용한 경우에 대해 반경의 변화에 따른 실험을 수행하였다. 실험 목표는 시뮬레이션과 마찬가지로 Table 1의 조건을 사용하였다. 반경이 변화하는 경우에 대해, 초기 반경의 장력 제어를 위해 구한 PID 계인을 사용한 고정 PID 제어 실험 결과는 Fig. 8와 같다. 초기 반경 조건에 대한 PID 계인은 Table 5과 같다. 이때 사용한 PID 계인은 시뮬레이션 결과에 기초하였지만 실제 실험에 시뮬레이션으로 구한 PID 계인을 적용할 경우 Table 1의 목표 응답의 목표와 다소 차이가 있어 PID 계인을 조정하여 Table 5와 같은 PID 계인을 얻었고, K_D 에서 차이를 보인다. 이는 실제 실험 시 예측하지 못한 외란 등의 영향에 기인하는 것으로 판단된다. 초기 반경 조건에 대해서 고정 PID 제어 결과 반경 변화가 커짐에 따라서 Radius2의 경우 오버슈트가 커지고 정착시간 또한 지연되는 것을 확인할 수 있으며, Radius3의 경우 안정화를 유지하지 못하고 진동을 일으키는 것을 확인할 수 있다. 반경 변화에

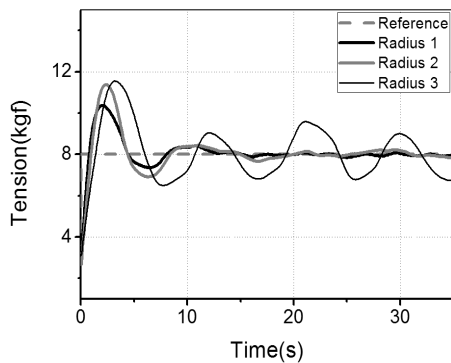


Fig. 8 Step response of winder tension control with fixed PID gain for different winder roller radius (experiment)

따른 시변 시스템에 대하여 초기 반경에 대한 고정된 PID 제어기는 안정한 제어가 불가능한 것을 확인하였다.

폴림부에서 변화한 반경에 따라서 각각의 반경에 대해서 PID 계인을 적용한 장력 제어 결과는 Fig. 9와 같다. 이때, 제어 목표는 Table 1을 사용하였다. 반경에 따른 PID 계인은 Table 6으로 나타낼 수 있다.

각각의 구해진 PID 계인 값을 이용한 곡선 맞춤(curve fitting) 결과는 Fig. 10과 같다. 2차 곡선 맞춤을 이용하여 시변하는 반경과 PID 계인에 대한 관계식 식 (11)~(13)을 얻을 수 있다.

$$K_p = 8.4 \times 10^{-7} R(t)^2 - 2.2 \times 10^{-4} R(t) + 0.019 \quad (11)$$

Table 6 Variation of PID gain for different winder roller radius

Winder roller radius	Values	K_P	K_I	K_D
Radius 1	132 mm	0.0045	0.0032	0.0022
Radius 2	95 mm	0.0056	0.0047	0.0034
Radius 3	58 mm	0.009	0.0073	0.0055

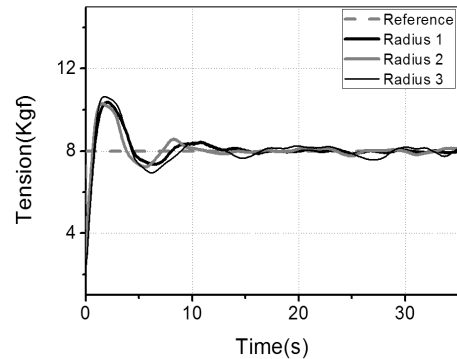


Fig. 9 Step response of winder tension control with variable PID gain for different winder roller radius (experiment)

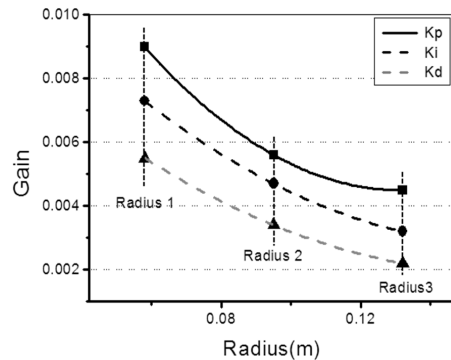


Fig. 10 Variation of PID gain with varying winder roller radius

$$K_I = 4.02 \times 10^{-7} R(t)^2 - 1.32 \times 10^{-4} R(t) + 0.014 \quad (12)$$

$$K_D = 3.29 \times 10^{-7} R(t)^2 - 1.07 \times 10^{-4} R(t) + 0.011 \quad (13)$$

위의 식 (11)~(13)을 기반으로 폴림 롤에서의 변화하는 반경에 대한 가변하는 PID 제어를 설계하여 실시간 제어가 가능하다.

실제 시스템에서는 식 (11)~(13)으로 표현된 PID 게인이 프로 그래프 되어 적용되며, 이 때 반경은 2.3절에서 설명된 방법에 의해 얻어진 값이 적용된다. 이러한 가변 PID 게인이 적용될 경우, Fig. 5와 Fig. 7에서 보듯이, 시스템을 안정 영역으로 유지함으로써 안정된 제어를 가능하게 한다.

3. 결론

본 연구에서는 시스템 전체의 안정화를 위해 폴림 부에서 반경이 변화함에 따른 고정된 PID 제어기의 문제점을 확인하였고, 폴림부에서의 장력은 시변 시스템으로 인하여 더욱 정밀한 장력 제어가 필요한 것을 확인하였다.

이를 개선하기 위해 폴림 롤에서의 시변하는 소재 반경의 데이터를 이용하여 실시간으로 PID 게인을 갱신하여 시변 시스템에 적합한 제어를 설계하여 고정된 PID 제어기에서 나타나는 문제점을 개선하였다.

References

- [1] Choi, B. O., Kim, C. H., Kim, D.S., 2010, Manufacturing Ultra-high-frequency Radio Frequency Identification Tag Antennas by Multilayer Printings, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C, Mechanical Engineering Science, 224:1 149-156.
- [2] Kim, C. H., Jo, J., Lee, S. H., 2012, Design of Roll-to-roll Printing Equipment with Multiple Printing Methods for Multi-layer Printing, Review of Scientific Instruments, 83:6 065001-.
- [3] Shin, K. H., Kwon S. O., 1994, Longitudinal Tension Control at Start and Stop in a Multi-span Continuous Process System, Proceedings of KSPE Autumn Conference, 584-589.
- [4] Sul, J. H., Park, J. O., Jang, J. S., Lim, Y. D., 2001, 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, 7:8 680-688.
- [5] Park, J. C., Liu, L., Jeon, S. W., Kim, C. H., 2013, Tension Control of Roll-to-roll Printing System for Printed Electronics, Proceedings of KSMTE Spring Conference, 4-4.
- [6] Kim, J. W., Seo, E. S., Choi, O. K., Lee, J. S., 2011, Tension Control of Winder Using Fuzzy Proportional-integral Control, Proceedings of KIECS Autumn Conference, 5:2 409-413.
- [7] Park, J. C., Kim, C. H., Jeon, S. W., Nam, K. S., 2013, Estimation of Radius of Winder Roll using Torque Feedback of Motor and Tension Measurement, Proceedings of KSPE Spring Conference, 515-516.