

연속공정시스템의 텐서 모델링 및 장력제어기 설계에 대한 연구 A Study on the Tension Control by Dancer System in High-speed Continuous Process Systems

*강현규¹, 성창엽², #신기현³, 권순오⁴

*H. K. Kang¹, C. Y. Seong², #K. H. Shin(khshin@konkuk.ac.kr)³, S. O. Kwon⁴,
^{1,2} 건국대학교 기계설계학과, ³ 건국대학교 기계공학부, ⁴(주)성안기계

Key words : Tension control, Dancer, Infeed section, Root locus, Printing machine, Converting

1. Introduction

웹이란 필름, 제지, 철강, 섬유 등과 같이 유연하고 길이 방향으로 연속적인 소재를 의미하며, 많은 산업 현장에서 웹의 형태로서 압연 코일 혹은 필름, 제지등과 같은 중간 혹은 최종 단계의 생산품을 저장하고 있다. 이러한 웹 소재를 이송, 가공 및 저장하기 위한 연속공정시스템은 와인더(winder), 언와인더(unwinder), 여러 개의 드리븐 롤러(driven roller) 및 아이들롤(idle roll)로 구성된다.

종이 혹은 OPP, LDPE, PET 같은 필름에 다중 컬러 인쇄를 하는 인쇄시스템의 국내 기술력은 미국이나 독일 같은 유럽지역에 비해 많이 뒤져있다. 미국 및 유럽 지역의 인쇄산업은 500mpm(m/min)이상의 고속 인쇄 기술을 보유하고 있으나, 국내의 인쇄산업은 300mpm 이하의 운전 속도 구현만을 하고 있는 실정이다.

국내 인쇄산업에서는 생산성 제고를 위한 공정 속도 향상이 대두되고 있으며, 최근에는 알에프아이디 태그(RFID tag), 사이니지(signage), 플렉서블 디스플레이(flexible display) 등을 롤투롤(Roll-to-Roll) 인쇄 방식으로 생산하기 위한 전자인쇄(printed electronics) 기술이 주목 받고 있다. 이러한 인쇄기술의 개발을 위해서 연속공정 기초연구를 통한 각 부분별 수학적 모델의 개발 및 제어이론에 대한 연구가 필요하다.

인쇄시스템은 언와인더, 와인더, 인피더(infeeder), 아웃피더(outfeeder) 등으로 구성되며 인피더와 아웃피더 사이에 프린팅(printing), 드라이잉(drying)과 같은 공정이 존재한다. 이때, 일정한 수준 이상의 프린팅 품질을 유지하기 위해서 프린팅 공정으로 유입되는 웹 소재를 균일한 장력으로 유지하는 것이 필수 조건이다. 현장에서는 운전장력 기준으로 정속운전시 ±2%, 감가속시 ±5%의 장력제어 성능을 요구한다.

본 논문에서는 상업적 인쇄기를 대상으로 고속운전을 위한 인피드 구간의 텐서를 사용한 장력제어기 설계 기법을 제안하였다.

2. System Modeling and Control Scheme

언와인더부터 프린트 구간까지의 인쇄기 시스템은 다음의 Fig. 1 과 같이 구성되며, 제어기 블록선도는 Fig. 2 와 같다.

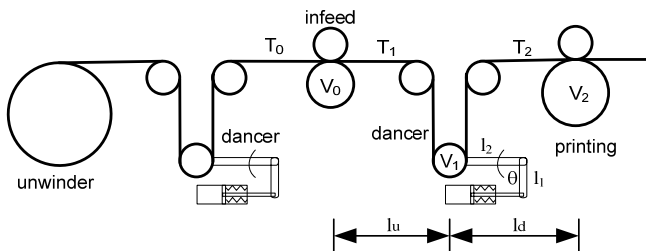


Fig. 1 Schematic of Printing Systems (unwinder to printing)

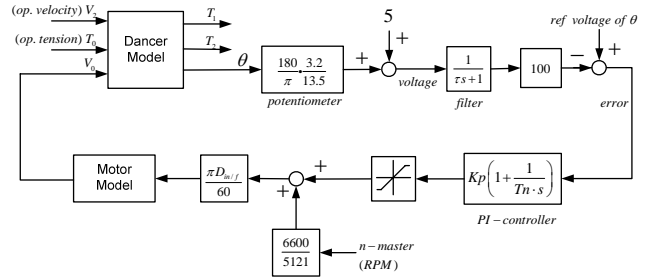


Fig. 2 Block Diagram of Infeed Dancer Control Loop

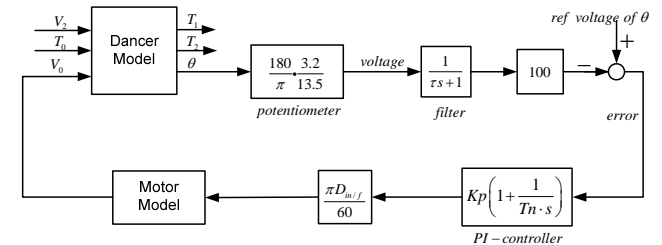


Fig. 3 Linearized Block Diagram of Infeed Dancer Systems

전체 인쇄기는 언와인더, 인피더, 프린팅, 아웃피더, 리와인더의 5 구간으로 구성된다. 인피더 구간에서는 프린팅롤의 속도가 마스터속도(master speed)로서 고정되고, 텐서롤의 위치를 중앙으로 보정하기 위한 인피더롤의 속도제어를 통해 장력을 제어한다. Fig. 2 의 블록선도는 PI(proportional-integral) 제어기를 사용하여 인피드 구간의 텐서장력제어를 구현한 상업적 인쇄시스템의 제어기구성을 나타낸다. 여기에 인피더 모터 모델을 추가하여 선형화하면 Fig. 3 의 선형화된 인피더 텐서시스템의 블록선도를 얻을 수 있다. 이때 식(1)은 텐서롤 상류스팬의 장력 모델, 식(2)는 텐서롤 하류 스패의 장력 모델, 식(3)은 텐서압의 각도변화모델, 식(4)는 텐서롤의 회전속도 모델, 식(5)는 인피드 모터모델이다. 인피드 모터는 속도제어모드로 운전되며, 2 차시스템으로 가정하여 라이징타임(rising time) 10ms, 오버슈트 7%를 갖는다고 가정하였다.

$$l_u \ddot{T}_1(t) = AE \{V_1(t) - V_0(t)\} + v_{10} T_0(t) - v_{10} T_1(t) + AE l_2 \dot{\theta}(t) \quad (1)$$

$$l_d \ddot{T}_2 = AE \{V_2(t) - V_1(t)\} + v_{10} T_1(t) - v_{20} T_2(t) + AE l_2 \dot{\theta}(t) \quad (2)$$

$$J_{eq} \ddot{\theta}(t) = -l_2 \{T_1(t) + T_2(t)\} - \frac{24}{0.078} l_1^2 \theta(t) - b \dot{\theta}(t) \quad (3)$$

$$J_1 \dot{V}_1(t) = \{T_2(t) - T_1(t)\} r_1^2 - b_1 V_1(t) \quad (4)$$

$$G_{infeedMotor}(s) = \frac{32400}{s^2 + 230s + 32400} \quad (5)$$

3. Design of Infeed Tension Controller by Dancer

인피드 구간의 장력제어기 설계를 위하여 근궤적 선도(Root Locus)기법을 이용하여 제어기 이득을 결정한다. 상업적 인쇄시스템의 제어기 구현은 설치된 모터드라이버의 제

작사에 따라서 결정지어진다. 본 논문에서 사용한 시스템은 PI 제어기를 갖는 페루프 시스템으로서 그 제어로직은 Fig. 3 에 나타난 바와 같다. 이에 대한 전달함수를 유도하면, 인피더 텐서암의 각도 기준값 대비 실제 텐서암의 각도값에 대한 전달함수는 식(6)과 같이 정리된다.

$$\frac{\theta_{\text{actual voltage}}}{\theta_{\text{ref voltage}}} = \frac{\left[\begin{array}{l} K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_n s}\right) \frac{\pi \cdot D_{\text{mf}} \cdot 180 \cdot 3.2}{(60 \cdot \pi \cdot 13.5)} \\ \cdot \frac{100}{(\tau s + 1)} \cdot \text{tf_Dancer} \cdot \text{tf_moter} \end{array} \right]}{\left[\begin{array}{l} 1 + K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_n s}\right) \frac{\pi \cdot D_{\text{mf}} \cdot 180 \cdot 3.2}{(60 \cdot \pi \cdot 13.5)} \\ \cdot \frac{100}{(\tau s + 1)} \cdot \text{tf_Dancer} \cdot \text{tf_moter} \end{array} \right]} \quad (6)$$

위의 식 (6)의 전달함수를 통하여 PI 제어기를 갖는 인피더 시스템의 근궤적 선도를 T_n 의 변화에 따라 도시하여 극점이 가장 작은 경우의 이득을 정리하면 다음의 Table 1 을 얻는다. Fig. 4 는 $T_n=1000$ 일 경우의 근궤적 선도를 나타낸다. Table 1. 과 같이 T_n 이득을 변경시킬 때의 근궤적 선도를 통하여 가장 큰 극점의 위치가 가장 좌측에 위치하는 제어기 이득을 찾게 되면, 최적의 제어기 이득을 결정할 수 있으며 본 시스템의 경우에는 $T_n=1000, K_p=0.04$ 을 결정할 수 있었다.

Table 1 Dominant Pole of K_p & T_n Gain

T_n	1	10	100	1000
K_p	0.012	0.034	0.04	0.04
Dominant Pole	-0.169	-0.169	-0.875+/-16j	-0.898+/-16j

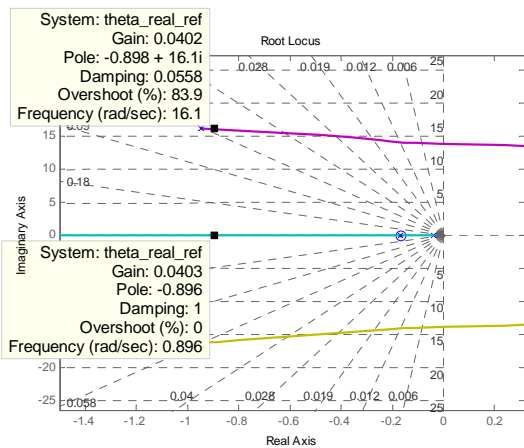


Fig. 4 Root Locus of Infeed Systems ($T_n=1000$)

4. Simulation Study

인피더 텐서시스템의 검증을 위하여 언와인더와 인피더의 장력외란을 가정하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 조건은 다음의 Table 2 와 같으며, 시뮬레이션 결과를 Fig. 5, 6 에 도시하였다.

Table 2 Simulation Conditions

Operating Velocity(mpm)	500
Operating Tension(N)	100
Unwinder Tension Disturbance(N)	40
Gain(K_p, T_n)	0.04, 1000

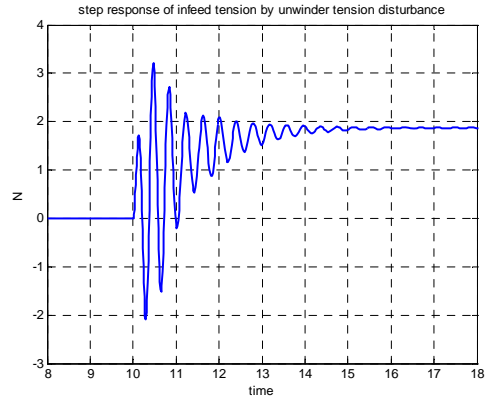


Fig. 5 Step Response of infeed tension (unwinder tension disturbance at 10sec, 40N step input)

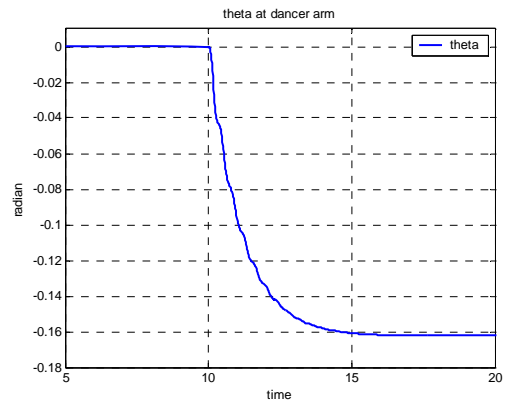


Fig. 6 Angle of Infeed Dancer System

Fig.5 에서 알 수 있듯이 언와인더에서 40N 의 장력 외란이 발생했을 때, 인피더 구간의 장력은 과도구간에서 3N, 정상상태에서 2N 이내로 제어되고 있으며, 그때의 텐서각도는 Fig. 6 에 도시하였다. 일반적으로 인피더 구간의 장력외란은 터렛팅, 스플라이싱 등의 롤교체공정시에 가장 빈번히 발생하며 그 최대 크기는, 공정속도, 소재 종류에 따라 다르므로 실험을 통한 튜닝과정이 필요하다.

5. 결론

본 논문에서는 상업적 인쇄기의 고속운전(500mpm)을 위한 인피더 구간의 텐서를 이용한 장력제어기 설계 기법에 대하여 제안하였다. 텐서 시스템에 대한 수학적 모델 및 제어기 구현 방법을 파악하여 시스템 모델을 정리하였고, 근궤적 선도 기법을 통하여 고속운전 조건을 만족하는 제어기 이득을 설정하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 고속운전 조건에서 장력제어 요구성능을 만족함을 검증하였다.

후기

본 논문은 서울시 산학연 협력산업인 “e-Printing 부품산업 클러스터 구축사업”과 (주)성안기계의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kee-Hyun Shin, "Tension Control," Tappi Press, Atlanta, 2000.
2. Brandenburg, G, "New mathematical models for web tension and register error," In proceedings of third international IFAC conference on instrumentation and automation in the paper, rubber and plastics industry, Vol.1, pp.411-438, 1977.
3. Gregory P. Crawford, "Flexible Flat Panel Displays," John Wiley & Sons, Ltd, 2005.