

댄서롤이 장착된 웹 장력 제어시스템의 모델링 및 규명

Modeling and Identification of Web Tension Control System with Dancer Roll

이상화¹, 이재원^{2,✉}, 이혁진²
Sang Hwa Lee¹, Jeh Won Lee^{2,✉} and Hyuk Jin Lee²

¹ 대구전략사업단 (Daegu Technopark)
² 영남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)
✉ Corresponding author: jwlee@yu.ac.kr, Tel: 053-810-3568

Manuscript received: 2009.3.30 / Revised: 2009.8.12 / Accepted: 2009.9.7

Web tension control system recently have been applied to OLED(Organic Light-Emitting Diode), RFID of flexible material, e-Paper and PLED(Polymeric LED) and various web control algorithms have being developed for higher productivity and product quality. These system need an accuracy model to design and implement controller. In this paper, the web tension control system with dancer roll is mathematically modeled. Mathematical model consists of 8 subsystems and each subsystems can be described as impedance structure which connected by velocity and tension. Mathematical model is different from the estimated model at high frequency range because of structure dynamics which is ignored on mathematical model. The estimated model is derived using ARMAX model. The controller is designed using the estimated model. The step response of the estimated model are compared with that of physical model for a validation of estimated model. The experimental results show a good match between them.

Key Words: System Identification (시스템 규명), Dancer Roll (댄서 롤), Estimation (규명), Web Tension Control (웹 장력 제어)

기호설명

A = Cross-sectional area of web
E = Modulus of elastic
 T_i = Web tension of i th span
 L_i = Length of i th span
 R_i = Radius of i th roll
 V_i = Linear velocity of i th roll
 J_i = Moment of inertia of i th roll
X = Linear displacement of the dancer roll
 V_d = Dancer translation velocity
M = Mass of the dancer roll
 T_r, V_r = reference tension and velocity of web

1. 서론

웹(web)이란 연속된 유연한 끈과 같은 형태로 제작 및 가공되는 재료로 정의된다. 웹의 범위는 매우 가는 플라스틱에서부터 종이, 호일, 섬유, 금속 및 합성수지에까지 이른다. 그리고 웹 핸들링(web handling)이란 이러한 웹을 제품으로 생산하기 위해서 제어하는 물리적 시스템이라고 할 수 있다. 웹 핸들링의 목적은 생산성 및 제품의 품질에 치명적인 영향을 미치는 주름, 끊어짐 또는 잘못된 표시 및 알람 등을 방지하는 데에 목적이 있다.

이러한 웹 핸들링 기술의 개발은 지난 10 년 동안 빠른 속도로 발전해 왔고, 현재는 제철, 인쇄, 필름, 제지, 섬유 등 주요 핵심 산업에 광범위하게

적용되고 있다. 또한 웹의 다양화로 OLED(Organic Light-Emitting Diode), 유연한 소재의 RFID, e-Paper 그리고 PLED(Polymeric LED)등의 첨단산업으로의 발전 가능성도 증대되고 있는 추세이다.

이러한 웹 핸들링 시스템에서 웹은 연속적으로 연결되어 있으므로 이웃하는 웹 스펠(web span)은 서로 영향을 주게 된다. 또한 웹의 물리적 특성의 변화와 온도 및 습도의 변화 등은 웹의 이송에 있어서 장력제어를 매우 어렵게 만들고 있다. 특히 고속, 고정도 연속공정시스템에서는 웹의 장력제어가 매우 중요하다. 웹의 최종 생산을 위하여 연속적으로 여러 공정을 거치는 경우가 있는데 이 경우 각 공정마다 요구되는 장력이 다를 수 있다. 이때 적절한 장력제어가 이루어지지 않는다면 공정 중 웹이 찢어지거나 제품의 질을 저하시킬 수 있고 심할 경우 기계장치에 손상을 입히게 되어 생산성 저하 및 경제적 손실을 발생시키게 된다. 이와 같은 손실을 최소화하기 위하여, 공정 중에 있는 웹의 장력이 일정한 범위 내에서 유지되도록 제어하는 것은 매우 중요하다.

장력 제어를 위해 장력 제어 장치 구조적인 측면에서 일반적으로 롤투롤(Roll-to-Roll) 구조를 사용하고 있다. 하지만 급작스런 장력외란에 대해서 장력 변동을 최소화시키기 위해 트랙션 롤,¹ 댄서롤,² 루퍼⁴ 시스템을 사용하고 있다. 한편 제어기 측면에서는 고가의 장력 센서를 사용하지 않고 추정기 기반의 제어기⁵를 사용한다. 그리고 장력 시스템의 변화에 대해 강인성을 보장하기 위해 적응 제어, H_∞ 제어기¹등을 사용한다. 또한 장력 제어 시스템의 내부 상호 작용을 약화시키기 위해 분산 제어기(decoupling controller)³를 사용한다.

이러한 제어기들은 시스템 모델을 기반으로 설계되고 구현된다. 따라서 제어기들은 모델에 매우 의존적이어서 모델의 오차가 크다면 설계된 제어기에 대해 좋은 성능을 기대하기 어렵다. 수학적 모델의 경우 실제 모델과 달리 고주파수 영역의 공진 주파수와 우반 평면의 영점 등이 나타나지 않는 등의 차이를 보일 수 있다.

따라서 본 논문에서는 실제 장력 시스템에 가까운 모델을 제공하여 설계된 제어기가 원하는 성능을 보장하도록 전체 장력시스템에 대해 시스템 규명을 하였다. 그리고 시스템 규명을 통해 얻은 추정 모델과 수학적 모델을 비교 분석하였다.

2. 웹 장력 시스템의 모델링

본 논문 전체에서 사용되는 실험장치는 Fig. 1에, 그리고 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

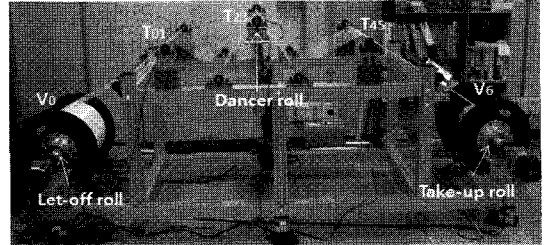


Fig. 1 Experimental setup of web tension control system

이 장치는 구동기로 감김롤(take-up roll), 풀림롤(let-off roll), 댄서롤(dancer roll)을 가지고 있고, 로드셀을 사용하여 웹 장력 T_{01}, T_{23}, T_{45} 를 측정한다.

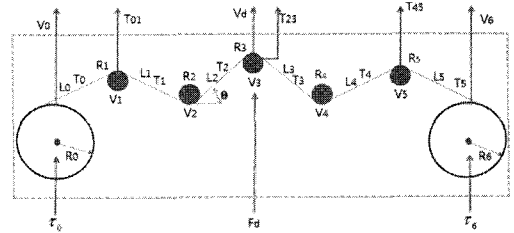


Fig. 2 Web handling system with active dancer roll

Fig. 2에서 댄서롤을 적용한 웹 핸들링시스템에 대한 운동방정식은 연속 스펠에 대한 장력 방정식^{1,2,7}과 롤러의 운동 방정식을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{V}_i = \frac{R_i^2}{J_i} T_i + \frac{R_i^2}{J_i} c_i, \quad i = 0, 6 \quad (1)$$

$$\dot{V}_i = \frac{R_i^2}{J_i} (T_i - T_{i-1}), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (2)$$

$$\dot{T}_i = \frac{(EA + T_i)}{L_i} (V_{i+1} - V_i) + \frac{V_i}{L_i} (T_{i-1} - T_i), \quad (3)$$

$$i = 0, 1, 4, 5, \text{ if } (i-1) < 0, T_{i-1} = 0$$

$$\dot{T}_2 = \frac{EA}{L_2} (V_3 - V_2) + \frac{V_2}{L_2} (T_1 - T_2) + \frac{EA}{L_2 \sin \theta_0} \frac{V_r}{L_2} X + \frac{EA}{L_2 \sin \theta_0} V_d \quad (4)$$

$$\dot{T}_3 = \frac{EA}{L_3}(V_4 - V_3) + \frac{V_r}{L_3}(T_2 - T_3) + \frac{EA}{L_3 \sin \theta_0} \left(\frac{V_r}{L_3} - \frac{V_r}{L_2} \right) X + \frac{EA}{L_3 \sin \theta_0} V_d \quad (5)$$

$$\dot{V}_d = \frac{1}{M} F_d + \frac{\sin \theta_0}{M} T_2 - \frac{\sin \theta_0}{M} T_3 \quad (6)$$

본 논문에서의 장력제어시스템은 Fig. 3 에서와 같이 8 개의 부시스템(sub system)에 대해서 속도와 장력이 서로 연결되어 있는 임피던스 구조 (impedance structure)로 표현할 수 있다.

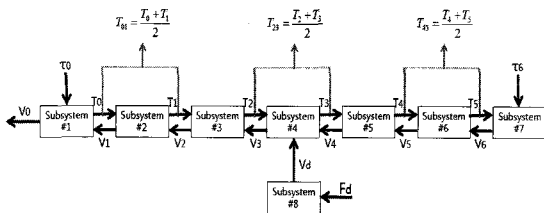


Fig. 3 Dynamic structure of web handling system

3. 장력 시스템의 구조물 진동 해석

Fig. 4(a)는 무장력 상태에서 폴림 롤을 가진시켰을 때 로드셀 출력 신호의 FFT 선도를 나타낸다. 또한 Fig. 4(b)은 무장력 상태에서 댄서롤을 가진시켰을 때 로드셀 출력 신호의 FFT 선도를 나타낸다.

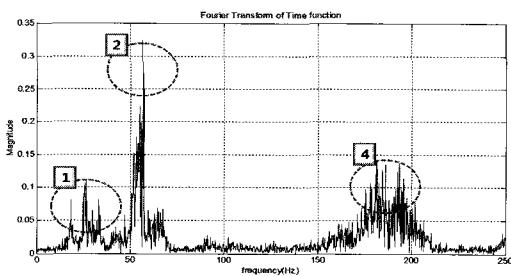


Fig. 4(a) FFT of let-off roll

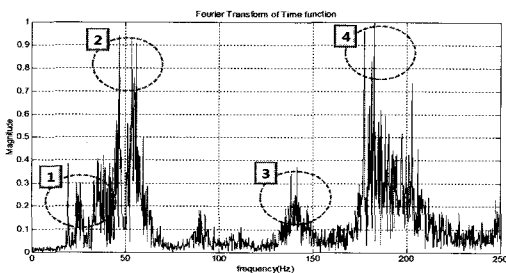


Fig. 4(b) FFT of dancer roll

무장력 상태에서 폴림롤과 댄서롤을 가진시켰을 때 로드셀 신호가 출력되지 않을 것으로 기대한다. 하지만 구조물 진동으로 인해 Fig. 4 에서 4 가지(1,2,3,4 번)의 주파수를 가지는 구조물 진동이 로드셀 출력에 영향을 주는 것으로 나타난다.

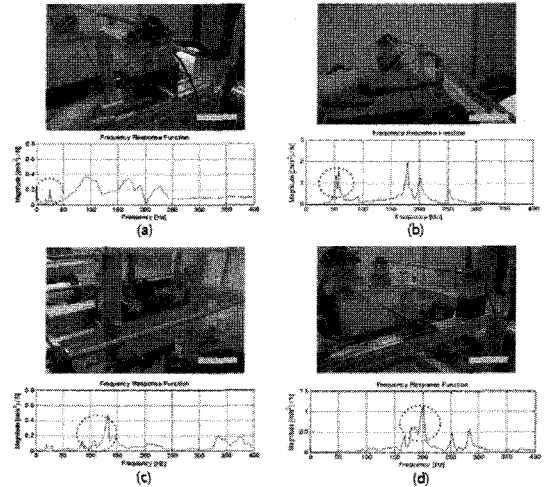


Fig. 5 Impact test and FRF

이러한 4 가지의 구조물 진동을 알아보기 위해 Fig. 5 와 같이 구조물에 대해 주파수 응답 특성을 분석하였다. 17Hz-25Hz 의 구조물 진동(1 번)은 Fig. 5(a)에서 보듯이 나일론 블록의 수평방향 고유 진동 때문인 것으로 확인되었다. 50Hz-60Hz 의 구조물 진동(2 번)은 Fig. 5(b)에서와 같이 아이들 롤러의 1 차 고유 진동 때문인 것으로 확인되었다. 80Hz-130Hz 의 구조물 진동(3 번)은 Fig. 5(c)에서와 같이 댄서롤의 고유 진동, 180Hz-190Hz(4 번)은 Fig. 5(d)에서와 같이 구조물 수평프레임의 수직방향 고유 진동 때문인 것으로 확인되었다. Fig. 5 에서 FFT 분석을 통해서 확인했듯이 4 가지 주파수 영역의 구조물 진동이 시스템 규명에 영향을 미쳐서 제어기 설계에도 영향을 준다. 따라서 이러한 구조물 진동을 모두 포함하는 시스템 규명이 가장 적합하다. 하지만 시스템 규명시 모든 고주파수 특성을 포함시키면 시스템 전달함수의 차수가 과도하게 높아지고 고주파수 영역의 잡음이 포함되는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 추정모델의 높은 차수를 피하고 고주파수 영역의 잡음을 차단하기 위해 100Hz 의 차단 주파수를 가지는 저역 통과 필터를 사용하여 로드셀 데이터를 필터링한 후 시스템 규명을 하였다.

4. 장력 제어장치의 시스템 규명

4.1 감김/풀림롤 시스템의 시스템 규명

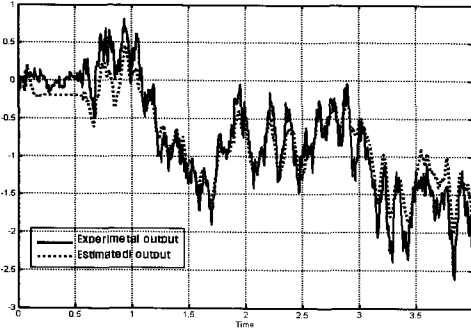


Fig. 6 Time response of experimental and estimated model of two roll system

각 구동기에 이산 백색잡음인 GBN(Generalized Binary Noise)신호⁶를 입력하고 출력을 측정하였다. 그리고 이 5000 개의 입/출력 데이터를 이용하여 시스템 규명을 하였다.

여기서 시스템 규명 시 적용한 모델구조는 ARMAX 모델을 사용하였고 이 모델의 차수 결정은 MATLAB 의 System Identification Toolbox 를 이용하였다. 전체 시스템 규명 중 감김/풀림롤에 입력한 GBN 신호 대해 측정된 출력신호 T_{45} 와 규명된 출력 신호 T_{45} 를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 시스템 규명 모델과 실험 모델과는 64.69%의 정밀도(Fit)를 나타내고 있다. 여기서 정밀도(Fit)는 식(7)에 의해 계산된다.

$$Fit(\%) = \left(1 - \frac{\|\hat{y} - y\|}{\|\hat{y} - y_{mean}\|}\right) \times 100 \quad (7)$$

여기서 \hat{y} 은 추정된 출력, y 는 측정된 출력, y_{mean} 은 측정된 출력의 평균이다.

Fig. 7은 추정 모델의 유효성을 검사하기 위한 잔차 해석(Residual analysis)를 나타낸다.

여기서 잔차(residual)는 측정된 출력과 추정된 모델의 출력과의 차이를 나타낸다. Fig. 7에서 잔차 출력의 자기 상관함수와 입력과 잔차 출력의 교차 상관 함수가 점선으로 표시된 신뢰 구간에 존재한다. 이는 추정된 모델이 유효하다는 것을 의미한다.

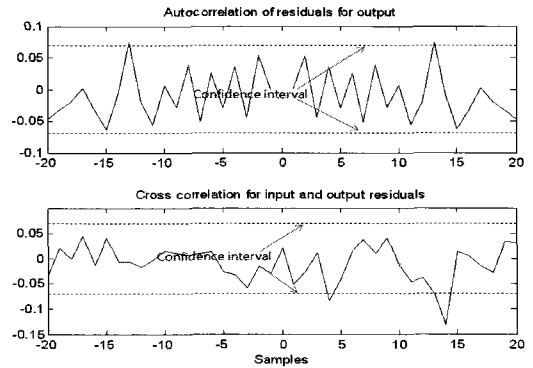


Fig. 7 Residual analysis

Fig. 8에서는 풀림/감김롤 시스템에 대한 수학적 인 모델(mathematical model)과 시스템 규명을 통해 얻은 전차수(full order)의 추정모델(estimated model) 그리고 이 추정모델을 12 차로 축소한 모델의 보데선도를 나타내었다. Fig. 8에서와 같이 수학적 모델과 추정모델은 저주파수 영역에서는 거의 일치하나 고주파수 영역에서는 차이를 나타낸다.

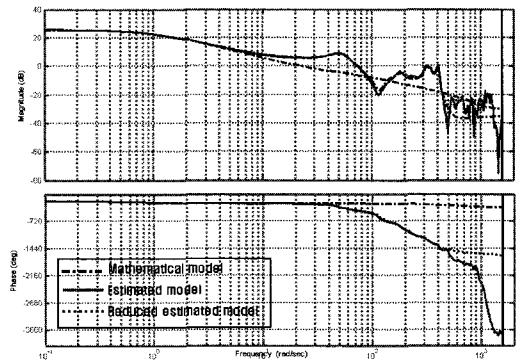


Fig. 8(a) Bode plot of let-off to tension

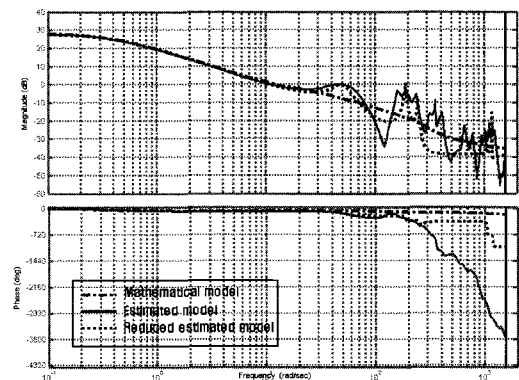


Fig. 8(b) Bode plot of take-up to tension

고주파수 영역에서 차이를 보이는 것은 수학적 모델에서는 구동기, 센서 그리고 장력 시스템 진동해석에서 언급한 구조물 동적 특성 등이 고려되지 않았기 때문이다.

4.2 댄서를 시스템 규명

댄서를 입력에 GBN 입력신호 사용하고 이에 대한 출력신호 및 규명된 출력 신호를 Matlab System Identification toolbox 를 이용하여 구한 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 이때 시스템 규명 모델과 실험 모델과는 60.09%의 정밀도(Fit)를 나타내고 있다.

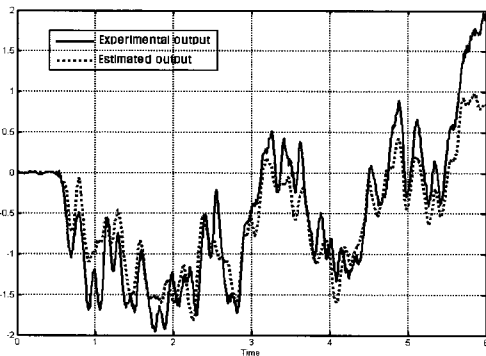


Fig. 9 Time response of experimental and estimated model of dancer system

Fig. 10 에서는 댄서를 시스템에 대한 수학적인 모델과 시스템 규명을 통해 얻은 전차수(full order)의 추정모델(estimated model) 그리고 이 추정모델을 12 차로 축소한 모델의 보데선도를 나타내었다. Fig. 10 의 댄서를에 대한 보데선도의 경우, 수학적 모델과 추정 모델의 고주파수 영역의 차이는 풀림/감김 롤과 동일한 이유에서 차이를 나타낸다.

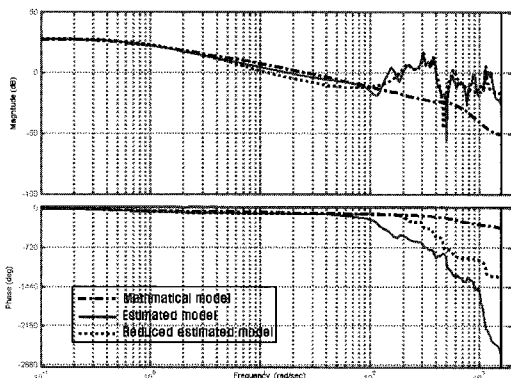


Fig. 10 Bode plot of dancer to tension

4.3 계단 응답 실험

본 절에서는 4.1 과 4.2 절에서 얻은 규명 모델에 대한 유효성 및 정확성을 확인하기 위해 실험 모델과 추정 모델의 페루프 계단응답을 비교하여 보았다. Fig. 11 은 루프 전달함수의 이득 선도를 성형하여 감김롤의 PI 제어기를 설계한 보데 선도를 나타낸다. PI 제어기 설계 결과 감김롤 루프전달함수의 이득 여유는 13.3dB, 위상여유는 66.3deg 를 나타낸다.

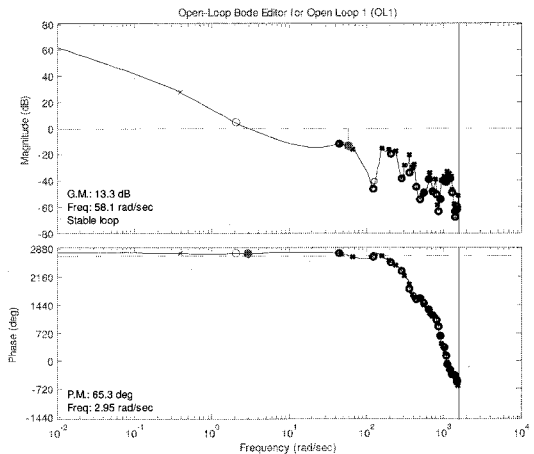


Fig. 11 bode plot of take-up loop TF with PI controller

위와 같은 방법으로 설계한 감김롤, 풀림롤, 댄서를 제어기 $C(z)_{takeup}$, $C(z)_{letoff}$, $C(z)_{dancer}$ 는 식 (8),(9),(10)과 같다. 이 이산 PI 제어기는 500Hz 의 샘플링 주파수에서 구현되었다.

$$C(z)_{takeup} = 0.24416 \frac{z - 0.9959}{z - 1} \tag{8}$$

$$C(z)_{letoff} = 0.096867 \frac{z - 0.9954}{z - 1} \tag{9}$$

$$C(z)_{dancer} = 0.17001 \frac{z - 0.9969}{z - 1} \tag{10}$$

Fig. 12 은 기준 장력 8kgf 일 때 감김롤, 풀림롤, 댄서롤의 페루프 시스템에 대한 계단 응답 곡선을 나타낸다. Fig. 12(c)에서 실험치와 추정치는 거의 일치하나 Fig. 12(a),(b)에서는 오버슈트에서 차이를 보인다. 이는 고주파수 영역에서 모델링 오차로 인해 발생된 것으로 판단된다. 이러한 차이를 제외하고는 추정치와 실험치 장력 출력이 거의 유사

한 것으로 나타난다. 따라서 추정모델을 기반으로 설계된 다양한 제어기는 원하는 성능을 만족시킬 것으로 기대할 수 있다.

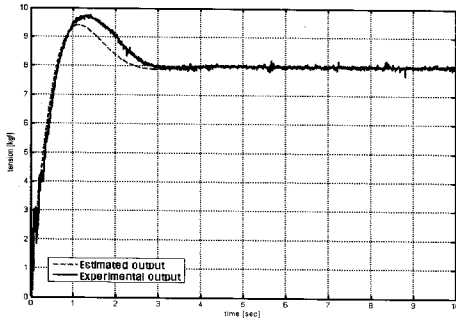


Fig. 12(a) output from take-up to T45

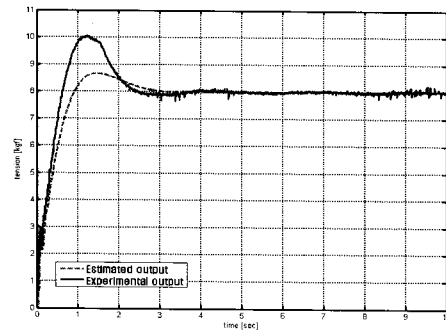


Fig. 12(b) output from let-off to T45

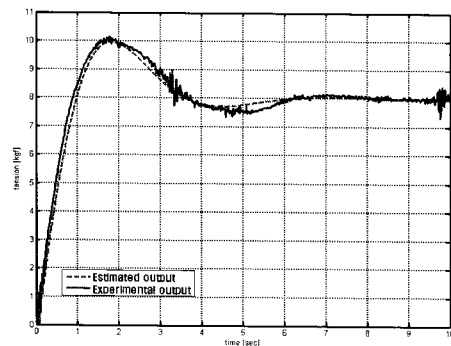


Fig. 12(c) output from dancer to T45

5. 결론

감김롤, 풀림롤과 댄서롤이 있는 웹 핸들링 시스템에 대한 수학적 모델링을 유도하였다. 장력 모델의 물리적 의미는 롤러 간 선속도차에 의해 장력 변화가 발생한다는 것을 나타낸다. 감김/풀림롤과 댄서롤을 동시에 고려한 동역학적 식은 15

개의 운동방정식으로 표현되고, 이는 8 개의 부시스템(sub system)으로 구성되며, 각각의 부시스템은 속도와 장력으로 연결되어 있는 임피던스 구조(impedance structure)로 표현할 수 있다. 그리고 시스템 규명 시 구조물의 진동 주파수를 파악하여 고주파수 영역을 필터링하여 규명모델의 차수가 과도하게 높아지는 것을 막을 수 있었다. 이렇게 얻은 규명 모델은 수학적으로 얻은 전달함수와 비교해 보면 고주파수 영역에서 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 수학적 모델을 이용하여 제어기를 설계할 경우 기대하는 성능을 얻지 못할 수 있다는 것을 의미한다. 그래서 규명 모델을 이용하여 제어기를 설계한 결과 기대하는 성능을 얻을 수 있었다. 또한 시스템 규명을 통해 얻은 전달함수를 이용하여 설계한 제어기의 이득을 실제 실험에 적용하여 기존의 시행착오법에 의해 이득을 구하는 방법을 대체함으로써 시간과 노력을 줄일 수 있었다.

참고문헌

1. Koç, H., Knittel, D., de Mathelin, M. and Abba, G., "Modeling and Robust Control of Winding Systems for Elastic Webs," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 10, No. 2, pp. 197-208, 2002.
2. Pagilla, P. R., Dwivedula, R. V., Zhu, Y. and Perera, L. P., "Periodic Tension Disturbance Attenuation in Web Process Lines Using Active Dancers," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 125, No. 3, pp. 361-371, 2003.
3. Sakamoto, T. and Izumihara, Y., "Decentralized Control Strategies for Web Tension Control System," Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 3, pp. 1086-1089, 1997.
4. Choi, I. S., Rossiter, A. and Fleming, P., "Effectiveness of MPC algorithms for hot rolling mills in the presence of disturbances," Proc. of the 2007 American Control Conference, pp. 4118-4123, 2007.
5. Lynch, A. F., Bortoff, S. A. and Robenack, K., "Nonlinear tension observers for web machines," Automatica, Vol. 40, No. 9, pp. 1517-1524, 2004.
6. Zhu, Y., "Multivariable system identification for process control," Elsevier Science, 2001.

7. Lee, S.-H., "Experimental study on tension control of web handling system with dancer roll," Mechanical Engineering, Ph. D. Thesis, Yeungnam University, 2009.

$$G_{takeup}(z) = N_{takeup}(z) / D_{takeup}(z) \quad (A7)$$

$$N_{takeup}(z) = 0.010707(z-0.9252)(z-0.9938) \\ (z^2 - 2.562z + 1.742)(z^2 - 1.512z + 0.684) \\ (z^2 - 1.615z + 0.8747)(z^2 + 1.49z + 1.07) \quad (A8) \\ (z^2 + 1.011z + 1.031)$$

부 록

A1. 축소차수 추정 모델 전달함수

다음은 규명을 통해 얻은 전달함수를 42 차에서 12 차로 축소한 전달함수를 나타낸다.

$$D_{takeup}(z) = (z-0.9941)(z-0.9991)(z^2 - 1.955z + 0.9652) \\ (z^2 - 1.85z + 0.9895)(z^2 - 1.749z + 0.9898) \quad (A9) \\ (z^2 + 1.405z + 0.9947)(z^2 + 0.9859z + 0.9894)$$

A1.1 풀림롤 대 T45 전달함수

$$G_{letoff}(z) = N_{letoff}(z) / D_{letoff}(z) \quad (A1)$$

$$N_{letoff}(z) = 0.013492(z-1.102)(z-0.7755) \\ (z^2 - 2.054z + 1.089)(z^2 - 2.19z + 1.443) \\ (z^2 - 0.7776z + 0.4057)(z^2 + 1.659z + 0.9526) \quad (A2) \\ (z^2 - 1.49z + 0.9261)$$

$$D_{letoff}(z) = (z-0.9988)(z-0.9754)(z^2 - 1.94z + 0.9891) \\ (z^2 - 1.831z + 0.9715)(z^2 + 1.692z + 0.9971) \quad (A3) \\ (z^2 - 1.592z + 0.9797)(z^2 - 1.502z + 0.9912)$$

A1.2 댄서롤 대 T45 전달함수

$$G_{dancer}(z) = N_{dancer}(z) / D_{dancer}(z) \quad (A4)$$

$$N_{dancer}(z) = -0.085681(z^2 - 2.084z + 1.087) \\ (z^2 - 2.628z + 1.886)(z^2 - 1.508z + 0.9188) \\ (z^2 + 1.789z + 1.387)(z^2 - 1.066z + 1.022) \quad (A5) \\ (z^2 - 0.2349z + 2.574)$$

$$D_{dancer}(z) = (z-0.9522)(z-0.9986) \\ (z^2 - 1.618z + 0.8847)(z^2 - 1.52z + 0.973) \\ (z^2 - 1.393z + 0.9236)(z^2 + 1.144z + 0.9203) \quad (A6) \\ (z^2 + 0.107z + 0.7321)$$

A1.3 감김롤 대 T45 전달함수