

Dancer-roll을 활용한 웹 장력 제어 시스템에서의 외란 제거 성능 해석에 관한 연구 Performance of Tension Disturbance Attenuation in Web Process System Using Dancer-roll

*이상화, #이재원, 이혁진, 이재용

*S. H. Lee, #J. W. Lee(jwlee@yu.ackr), H. J. Lee, J. Y. Lee

영남대학교 기계공학부

Key words : Web, Tension, Dancer-roll, Disturbance, Attenuation

1. 서론

미국의 오클라호마 주립대학에 있는 웹 핸들링 연구센터(Web Handling Research Center-WHRC)는 웹(Web)이라는 용어를 연속된 유연한 형태의 끈과 같은 형태로 제작 및 프로세스되는 재료라고 정의하고 있다. 이러한 웹의 범위는 극히 가는 플라스틱에서 종이, 호일, 섬유, 금속 및 합성수지에 이를 정도로 많은 예를 들 수 있다.

이러한 웹 소재를 이용한 프로세스는 오늘날 산업현장에서 넓게 활용되고 있다. 웹 제조 산업에서 성능과 생산성 향상을 필요로 하기 때문에 정밀한 모델링과 효율적인 제어기 설계가 절실히 필요로 하다. 웹 소재의 물성, 속도의 변화, 롤 사이즈의 변화 등과 따른 광범위한 동역학적 조건하에서의 목표하는 범위에서의 웹 장력을 유지하는 것은 매우 중요한 일이다. 장력의 변화는 웹 소재의 파손이나 주름 등의 발생에 영향을 미친다.

특히 대표적인 웹 소재라고 할 수 있는 섬유제조분야에서 생산성과 품질에 영향을 미치는 장력제어는 대단히 중요한 부분이 되고 있다. 이렇게 생산성과 품질에 큰 영향을 미치는 웹에 대한 장력제어의 방식에는 다양한 기구적 형태 및 제어기법개발의 연구가 활발히 진행되고 있다.

댄서롤(Dancer-roll)에 대한 연구는 과거의 스프링과 댐퍼를 이용한 수동 댐서롤(Passive dancer roll)에서 능동 댐서롤(Active dancer roll)로 연구영역이 확대되고 있는 실정이다.

댄서롤의 연구에 대해서 살펴보면 Shin[1]은 장력모델을 바탕으로 스프링과 댐퍼, 아이들롤로 구성된 수동 댐서롤의 모델링을 제안하였다. Pagilla[2,3]는 넓은 주파수 범위의 장력외란 제어를 위한 능동 댐서롤을 제안하였다.

본 연구는 능동 댐서롤에 대한 장력모델을 이용하여 댐서롤시스템의 수학적 모델을 유도하고, 댐서롤시스템이 가지는 구조에 따른 외란제거효과에 대해서 시뮬레이션을 통하여 평가한다.

2. 수학적 모델링

다음의 Fig. 1과 같은 일반적인 웹 스패에 대한 수학적모델식은 Hooke's law, Coulomb's law 그리고 질량보존의 법칙에 의해서 식(1)과 같은 일반적인 식을 구할 수 있다.

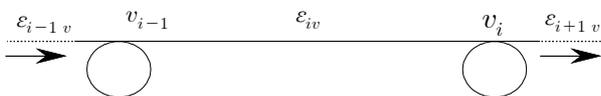


Fig. 1 General web span

$$L \frac{d}{dt} \epsilon_{iv} = v_i - v_i \epsilon_{iv} - v_{i-1} + v_{i-1} - v_{i-1} \epsilon_{(i-1)v} \quad (1)$$

여기서 ϵ_{iv} 는 속도변화로 인한 i 번째 웹 스패의 변형율을 나타내고 i 번째 스패는 i 번째 롤러 앞에 있다고 가정한다. 식(1)로부터 식(2)와 (3)의 선형화된 운동방정식을 구할 수 있다.

$$L_1 \dot{t}_1 = EA(v_1 - v_0) + (v_0 t_0 - v_1 t_1) + EA v_1 \frac{x}{L_1 \sin \theta_1} + EA \frac{\dot{x}}{\sin \theta_1} \quad (2)$$

$$L_2 \dot{t}_2 = EA(v_2 - v_1) + (v_1 t_1 - v_2 t_2) + \left(\frac{v_2}{L_2 \sin \theta_2} - \frac{v_1}{L_1 \sin \theta_1} \right) EA x + EA \frac{\dot{x}}{\sin \theta_2} \quad (3)$$

또한 Fig. 2와 같은 능동 댐서롤에 대한 모델링은 식(4)와 같이

구할 수 있다.

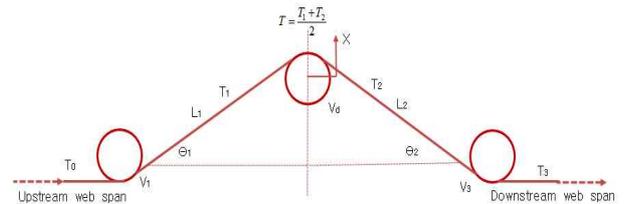


Fig. 2 Active dancer roll system

$$J_i \dot{V}_i = -B_{f_i} V_i + R_i^2 (T_{i+1} - T_i) \quad (4)$$

따라서 능동 댐서롤시스템에 대한 전체 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{T}_0 = \frac{(EA + T_r)}{L_0} (V_1 - V_0) - \frac{V_r}{L_0} T_0 \quad (5)$$

$$\dot{V}_1 = \frac{R}{J} (T_1 - T_0) \quad (6)$$

$$\dot{T}_1 = \frac{EA}{L_1} (V_2 - V_1) + \frac{V_r}{L_1} (T_0 - T_1) + \frac{EA}{L_1^2 \sin \theta} V_r X + \frac{EA}{L_1 \sin \theta} V_d \quad (7)$$

$$\dot{V}_2 = \frac{R}{J} (T_2 - T_1) \quad (8)$$

$$\dot{T}_2 = \frac{EA}{L_2} (V_3 - V_2) + \frac{V_r}{L_2} (T_1 - T_2) + \frac{EA}{L_2 \sin \theta} \left(\frac{V_r}{L_2} - \frac{V_r}{L_1} \right) X + \frac{EA}{L_2 \sin \theta} V_d \quad (9)$$

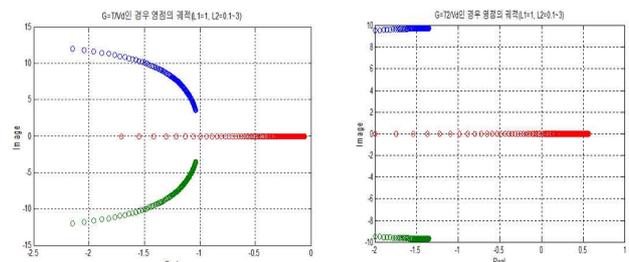
$$\dot{V}_3 = \frac{R}{J} (T_3 - T_2) \quad (10)$$

$$\dot{T}_3 = \frac{(EA + T_r)}{L_3} (V_4 - V_3) - \frac{V_r}{L_3} (T_2 - T_3) \quad (11)$$

$$\dot{X} = V_d \quad (12)$$

3. 댐서롤 스패거리에 따른 안정성 고찰

Fig. 2에서의 댐서롤시스템에서 출력함수를 $T = (T_1 + T_2)/2$ 로 할 경우와 T_2 로 할 경우에 대해서 시스템의 안정도를 평가하면 Fig. 3과 같다. Fig. 3은 $L_1 = 1$ 이고 $L_2 = 0.3 \sim 3$ 으로 변경하는 경우의 영점(zeros)의 변화를 본 것이다. 여기서 알 수 있듯이 출력함수가 T 의 경우는 항상 좌반면에서 영점이 위치하므로 안정하지만, T_2 의 경우는 이득에 따라서는 우반면으로 영점의 위치가 갈 수 있으므로 불안정 시스템이 되지 않도록 적절한 이득설정이 필요하다.



(a) $G = T/V_d$

(b) $G = T_2/V_d$

Fig. 3 Root locus of T/V_d vs T_2/V_d

4. 댄서롤시스템 구조에 따른 외란제거효과

다음의 Fig. 4는 댄서롤이 가질 수 있는 구조를 나열하였다. 여기서 보여주는 4가지 형태에 대해서 댄서롤의 구조가 외란제거에 미치는 영향을 분석한다.

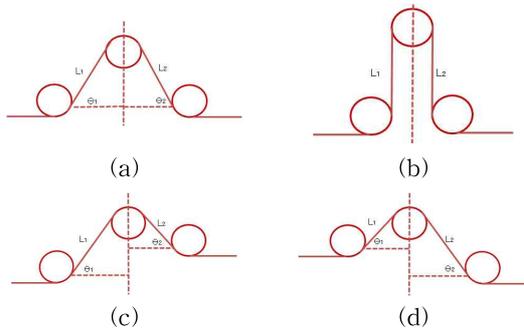


Fig. 4 Types of active dancer roll system

(1) L_1, L_2 가 일정하고 θ 가 변하는 경우 [Case a, b]
 (a)와 (b)의 경우는 많은 연구가 진행되고 있는 가장 일반적인 경우라고 할 수 있다. 시뮬레이션의 조건은 기준장력 15N, 외란의 크기 1N 그리고 외란주파수는 24Hz로 하였다.
 Fig. 5와 Fig. 6은 댄서롤의 각도 $\theta=15^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 의 경우에 대한 보데선도와 외란제거효과를 보여주는데 15° 에서 효과가 좋은 것을 알 수 있다.

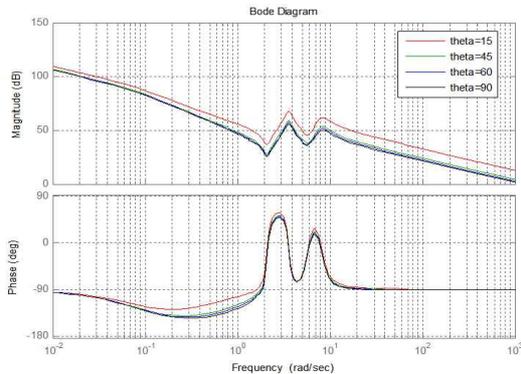


Fig. 5 Bode diagram[Case a, b]

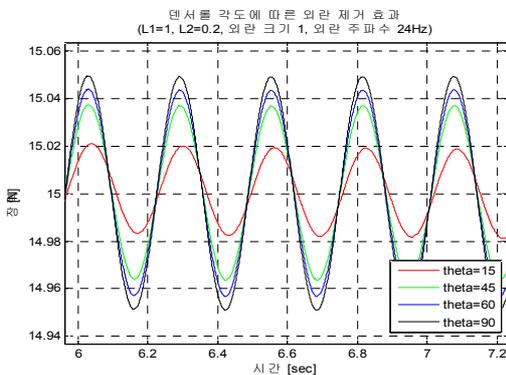


Fig. 6 Performance of disturbance attenuation[Case a, b]

(2) L_1, θ 가 일정하고 L_2 의 거리가 변하는 경우 [Case c, d]
 (c)와 (d)의 경우는 좌우대칭으로 볼 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 출력함수를 T 로 두었을 경우 외란제거효과를 나타낸다. 이 경우에 (c)와 (d)는 동일한 결과를 얻는다. 하지만 출력함수를 T_2 로 할 경우에는 (c)의 경우가 성능이 더 뛰어나다. 하지만 T_2 는 실제 실험에서는 측정하기 불가능한 구간이므로 일반적으로 T 를 출력함수로 사용하는 것이 일반적이라 할 수 있다.

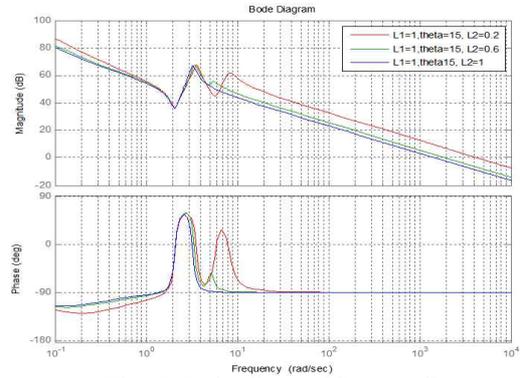


Fig. 7 Bode diagram[Case c, d]

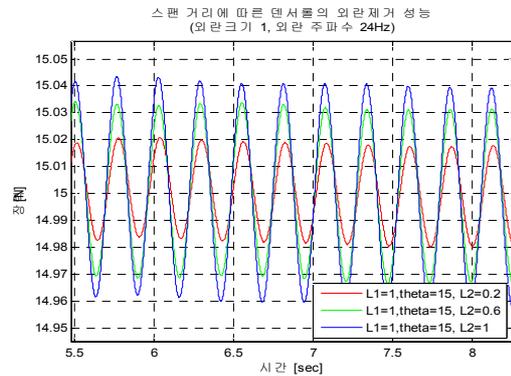


Fig. 8 Performance of disturbance attenuation[Case c, d]

5. 결론

본 논문에서는 운전 중 발생할 수 있는 외란의 유입에 대해서 능동 댄서롤시스템의 스펠 간의 구조를 변경함으로써 외란제거 효과가 달라진다는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 댄서롤이 좌우 아이들롤러와 이루는 각도가 작을수록 그리고 스펠간의 거리 L_1 과 L_2 가 크게 날수록 외란제거효과가 좋아진다는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 외란의 영향을 최소화하는 댄서롤시스템을 설계하는데 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Kee-Hyun Shin, 2000, Tension Control, Tappi Press, Atlanta, pp. 13~44.
2. Pagilla, P. R., Perera, L. P., and Dwivedula, R. V., 2001, "The Role of Active Dancers in Tension Control of Webs," Proceedings of the Sixth International Conference on Web Handling, pp. 227~242.
3. Pagilla P. R. "Periodic Tension Disturbance Attenuation in Web Process Lines Using Active Dancers", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 125, pp361 ~ 371, 2003
4. H. Koç, D. Knittel, M. de Mathelin, G. Abba "Modeling and Robust Control of Winding System for Elastic Webs", IEEE Trans. on Control Systems, Vol. 10, No. 2, March, pp197~208, 2002
5. 강현규, 성장엽, 신기현, "컨버팅 머신의 텐서모델링 및 안정도 해석", 대한기계학회 춘계학술대회, pp1424-1429, 2006.