

변속시의 멀티 스팬 연속 공정 시스템의 장력 제어

(Longitudinal Tension Control at Start and Stop in a Multi-span Continuous Process System)

신기현, 권순오(한국대학교 기계설계학과)

K.H. Shin, S.O. Kwon (Kon-Kuk Univ. Mechanical Design and Production Engineering)

Abstract : A time-varying nonlinear mathematical model was derived to consider the effect of change in roll radius on tension variation during winding and unwinding. A variable-gain PID controller was designed for tension control at start and stop in a multi-span continuous process system. The controller gains are updated at every control loop as roll radii continuously change. Computer simulation was carried out by using the mathematical model and the controller developed for a typical operating condition including acceleration and deceleration. When the variable-gain PID controller was used, the tension control performance was improved compared with that of existing control method during start-up and stop.

1. 서론

A	소재의 단면적
E	소재의 탄성계수
h	소재의 두께
J	롤의 관성 모멘트
K	상수
L	스팬의 길이 (롤 사이의 소재 길이)
R	롤의 반경
t	소재 장력
T	정상 상태로부터의 장력 변화
u	제어 입력
v	소재의 이송 속도
V	정상 상태로부터의 속도 변화
w	소재의 폭
ρ	소재의 밀도
τ	시각

2. 원리

i	초기 상태량
n	1, 2, 3, ...
o	시각 τ 로부터 $\Delta \tau$ 동안의 정상 상태
u	풀립롤 (Unwinder)
w	감김롤 (Winder)

3. 계산 방법

다중 스팬 연속 공정 시스템(multi-span web transport system)에서는 각 공정 구간에서의 재료 진행 방향(machine direction)에서의 소재의 장력 유지와 동시에 시스템 전체의 안정화가 중요한 제어 목표가 된다. 기존의 다중 스팬 연속 공정 시스템에서의 장력 제어 방법으로는 successive control^[1], draw control 등이 이용되고 있다. 이때 소재의 장력 및 롤 속도가 서로 간섭을 일으

거 각 공정 구간에서 독립적으로 일정한 장력을 유지하는데 많은 어려움이 있다. 웹의 장력 제어와 웹 이송 시스템(web transport system)에 대한 연구는 campbell^[2]이래 꾸준히 지속되어 왔다. 특히 wahlstrom^[3]은 large-scale web transport system의 분산 제어 scheme에 대한 개념을 제시한 바 있다.

연속 공정 시스템에는 일반적으로 소재를 풀고 다시 감는, 풀립롤(unwinder roll)과 감김롤(winder roll)이 있다. 롤 속도와 소재 장력 간의 상호 작용 이외에도 소재를 이송시킴에 따라 풀립롤과 감김롤에서는 롤 반경이 변화하며, 이에 따라 관성 모멘트가 증가 또는 감소한다. 이러한 롤 반경 및 관성 모멘트의 변화는 시스템 모델 자체의 변화를 초래하게 되어, 시변 시스템(time-varying system)을 형성하게 된다. 이러한 시스템의 변화로 인해 소재의 장력을 균일하게 유지하는 것은 더욱 어려워진다. 이외에도 소재의 이송 속도는 정지 상태로부터 정상 작업 속도를 거쳐 최종 정지시까지 변화하면서 가속 및 감속 구간이 존재하게 된다. 최근에는 공정 작업 속도의 증가 추세에 따라 속도의 변화량은 더욱 커지고 있으며, 이러한 조건에서의 장력 제어는 더욱 많은 소재의 파단과 제품의 불량을 초래하게 되는 원인이 되기도 한다.

Shin^[4]은 Winding시의 롤 반경 변화를 보상할 수 있는 장력 제어기법을 제안하였다. 그러나, Shin이 제안한 기법은 각 build-up ratio에 따라 개별적인 가변 이득 제어기를 설계한 것으로, start-up 및 stop시와 같은 연속적인 속도 변화 시스템에 사용되기에에는 부적합하다. Start-up시의 소재 장력 제어에 관한 연구는 Lin^[5]에 의해 이루어진 바 있다. 그의 연구는 고정 게인(fixed gain)을 갖는 PID 제어기를 이용하여 가속 구간에서의 장력을 제어하였다. 그러나, 고정 이득 제어기를 사용함으로써 풀립롤과 감김롤의 반경 변화가 클 경우에는 소재의 파단을 일으킬 수 있고, 정상 상태 오차를 동반하게 된다.

본 연구에서는 기존의 연구들을 확장하여, 특정 연속 공정 시스템에서의 풀럼롤과 감김롤의 반경 및 관성 모멘트 변화를 고려할 수 있는 시변 비선형 모델(time-varying nonlinear model)을 유도하였고, 소재 이송 시스템의 전체적인 모델을 구성하였다. 구성된 시스템의 모델을 구간별로 선형화하고, 극배치 기법을 통해 간단한 가변 이득 PID 제어기(variable-gain PID controller)를 설계하였다. 설계된 제어기는 풀럼롤 및 감김롤에서의 반경과 관성 변화를 고려하고, 증가 또는 감소하는 작업 속도 변화구간에서도 일정한 장력을 유지하기 위해 제어 계인(gain)이 계속해서 보상되도록 설계되었다. 시스템의 전 공정을 간략히 표현할 수 있는 수학적 모델과 설계된 가변 이득 PID 제어기를 이용하여, 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였고, 시스템의 start 및 stop시에 제어기의 장력 제어 성능을 검증하였다. 가변 이득 PID 제어기를 이용한 장력 제어를 수행한 결과, 가·감속에 따른 넓은 범위에서의 풀럼롤 및 감김롤의 반경 및 관성 변화에도 적은 장력의 변화 범위 내에서 장력을 적절히 유지할 수 있음을 확인하였다.

2. 시스템 모델

본 연구를 위해 선택된 풀럼롤과 감김롤을 포함한 멀티 스팬 연속 공정 시스템에 대한 모델은 Fig. 1과 같다. 풀럼롤로부터 소재가 이송될 때 첫 번째 구동롤은 소재 속도를 기준 궤적에 따라 정확한 속도로 유지하기 위한 롤러로서 이를 MSD(Master Speed Drive)라고 한다. 그 이하의 롤러는 각 스팬(span)에서의 소재 장력을 조절하기 위한 구동롤들이다.

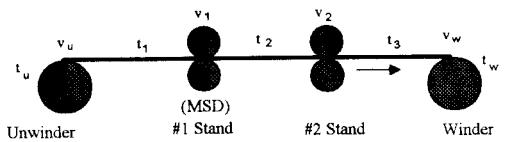


Fig. 1 풀럼롤 및 감김롤을 포함한 연속 공정 시스템

감김롤(winder roll)과 풀럼롤(unwinder roll)에서는 소재가 코어(core)를 중심으로 Fig. 2에서와 같이 나선형으로 감겨 있다. 그러나, 소재의 두께가 반경에 비해 매우 얇고 일정하다고 가정하면, 나선형으로 감겨 있는 끈을 Fig. 3과 같이 공통 중심을 가진 원통 형상의 합으로 볼 수 있다.^[6]

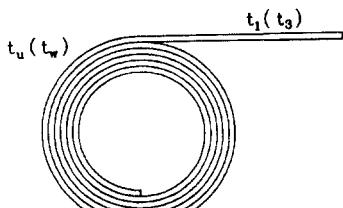


Fig. 2 풀럼롤(감김롤)에서의 소재의 감김 상태

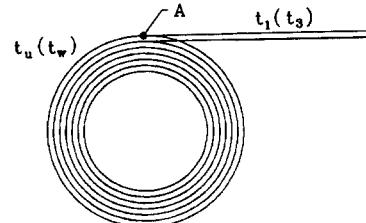


Fig. 3 이상화된 풀럼롤(감김롤) 구조

Fig. 3과 같이 모델된 풀럼롤과 감김롤의 형상으로부터 소재가 이송됨에 따른 롤의 반경의 변화를 질량 보존의 법칙으로부터 간단히 유도할 수 있다. 소재가 $v(\tau)$ 의 속도로 이송될 때 시간이 지남(τ_0 부터 τ 까지)에 따른 풀럼롤 및 감김롤에서의 질량의 감소 또는 증가량은 다음의 식 (1)과 같다.

$$\Delta M = \rho h w \int_{\tau_0}^{\tau} v(\tau) d\tau \quad (1)$$

또한, 시각 τ_0 에서의 초기 롤의 반경이 R_0 이고, 시각 τ 에서의 감김롤과 풀럼롤에서의 반경을 R 이라고 할 때 반경 변화 관점에서 계산한 질량 변화량은 식 (2)와 같다.

$$\Delta M = \rho w \pi (R^2 - R_0^2) \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)로부터 시간에 따른 반경 변화는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(\tau)^2 = R_0^2 \pm \frac{h}{\pi} \int_{\tau_0}^{\tau} v(\tau) d\tau \quad (3)$$

(+ : 감김롤, - : 풀럼롤)

각 스팬에서의 소재에 대한 장력 모델은 다음의 식 (4)와 같은 비선형 식으로 유도될 수 있다.^[5]

$$L_n \dot{t}_n = v_n(E_n A_n - t_n) - v_{n-1}(E_{n-1} A_{n-1} - t_{n-1}) \quad (4)$$

롤러의 배어링 마찰을 무시하고 소재와 롤러의 표면 사이에 미끄러짐(slip)이 없다고 가정하면 소재의 속도에 대한 수학적 모델은 식 (5)와 같다.^[5]

$$J_n \dot{v}_n = R_n(t_{n+1} - t_n) + Ku_n \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)를 통해 소재의 장력은 롤러의 속도에 의해 변화될 수 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 1과 같은 연속 공정 시스템을 묘사하는 운동방정식은 식 (3)~(5)를 이용하여 식 (6)~(14)로 나타낼 수 있다.

$$R_u(\tau)^2 = R_{u0}^2 - \frac{h}{\pi} \int_{\tau_0}^{\tau} v_u(\tau) d\tau \quad (6)$$

$$J_u \dot{v}_u = R_u(t_1 - t_u) - Ku_u \quad (7)$$

$$L_1 \dot{t}_1 = v_1(E_1 A_1 - t_1) - v_u(E_u A_u - t_u) \quad (8)$$

$$J_n \dot{v}_1 = R_1(t_2 - t_1) + K u_1 \quad (9)$$

$$L_2 \dot{t}_2 = v_2(E_2 A_2 - t_2) - v_1(E_1 A_1 - t_1) \quad (10)$$

$$J_2 \dot{v}_2 = R_2(t_3 - t_2) + K u_2 \quad (11)$$

$$L_3 \dot{t}_3 = v_3(E_3 A_3 - t_3) - v_2(E_2 A_2 - t_2) \quad (12)$$

$$J_3 \dot{v}_w = R_w(t_w - t_3) + K u_w \quad (13)$$

$$R_w(\tau)^2 = R_{wo}^2 + \frac{h}{\pi} \int_{t_w}^{\tau} v_w(\tau) d\tau \quad (14)$$

3. 제어기 설계

대상이 되는 시스템은 풀림률과 감김률을 모두 포함하므로 시스템의 수학적 모델이 식 (6)~(14)에서와 같이 시간에 따라 변화하는 시변(time-varying) 시스템이다. 이 시변 시스템에는 공정 속도 케이지이 최초의 구동에서부터 최종 정지 시까지 가속 및 감속 구간이 존재하며 제어에 사용될 장력 모델들은 모두 비선형 모델이다.

3.1 Master speed drive의 속도 제어

MSD가 기준 속도를 추종하도록 하기 위해 속도 되먹임 제어기를 설계한다. 식 (9)에서의 를 속도 모델로부터 입력 u 와 소재 속도 v 와의 관계식을 유도하면 다음의 식 (15)와 같다.

$$\frac{V_1(s)}{U(s)} = \frac{R_1 K}{J_1 s} \quad (15)$$

식 (15)는 간단한 1차 모델로서 안정한 시스템이므로 다음의 식 (16)과 같은 PI 제어기로서 원하는 성능을 만족시킬 수 있다.

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) e(s) \quad (16)$$

$$\text{단, } e(s) = V_{ref} - V_1(s)$$

식 (16)의 제어기를 이용하여 폐루프 시스템을 구성하면 다음의 식 (17)과 같다.

$$\frac{V_1(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{b_1 s + b_2 s}{s^2 + a_1 s + a_2} \quad (17)$$

$$\text{단, } a_1 = b_1 = \frac{KR_1 K_p}{J_1}, \quad a_2 = b_2 = \frac{KR_1 K_i}{J_1}$$

식 (17)과 같이 구성된 폐루프 시스템에서 제어 개인(gain) K_p , K_i 를 설정하기 위해 기준 모델(reference model)을 설정하고, 구성된 폐루프 시스템이 주어진 기준 모델과 같은 동특성을 갖도록 개인을 결정한다.^[4] 모델의 폐루프 전달함수는 2차 시스템이므로 다음의 식 (18)과 같은 2차 특성 방정식을 갖는 기준 모델을 선정한다.

$$s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega^2 = 0 \quad (18)$$

식 (17)과 식 (18)을 이용하여 속도 되먹임 시스템에 대한 PI 제어기의 개인 값들을 구하면 다음의 식 (19)와 식 (20)과 같다.

$$K_p = \frac{2J_1 \zeta \omega_n}{R_1 K} \quad (19)$$

$$K_i = \frac{J_1 \omega_n^2}{R_1 K} \quad (20)$$

3.2 풀림률에 대한 장력 제어기 설계

풀림률과 첫 번째 스팬에서의 장력 모델은 다음의 식 (21)~(23)과 같다.

$$R_u = \sqrt{R_{wo}^2 - \frac{h}{\pi} \int_{t_w}^{\tau} v_u(\tau) d\tau} \quad (21)$$

$$J_u \dot{v}_u = R_u^2 (t_1 - t_u) - R_u K u_u \quad (22)$$

$$L_1 \dot{t}_1 = v_1(EA - t_1) - v_u(EA - t_u) \quad (23)$$

위의 식 (21)은 풀림률에서의 반경 변화와 소재 이송 속도간의 관계식이다. 식 (22)에서 t_u 는 풀림률에 감겨 있는 소재의 장력을 의미하며, 일정한 것으로 가정한다. 실제로 많은 경우 소재를 되감을 때 가능한 한 낮은 장력을 유지하면서, 일정한 장력 분포를 가지도록 한다. 또한 t_1 과 t_u 는 Fig. 3에서와 같이 A점을 기준으로 서로 독립적인 변수로 가정한다.

식 (21)과 식 (22)에서 보는 것과 같이 풀림률의 반경 및 관성 모멘트의 시간에 따른 변화로 인해 시스템 모델은 연속적으로 변화한다. 따라서, 풀림률로부터 풀려 나오는 소재의 장력을 제어하기 위해서는 모델 변화를 고려할 수 있는 제어 시스템이 필요하다. 이와 같은 시변 비선형 시스템(time-varying nonlinear system)에서의 장력 제어를 위하여 가변 이득 PID 제어기(variable-gain PID controller)를 설계한다.

제어기의 P, I, D 제어 개인(control gain)을 설정하기 위해, 비선형인 소재 장력 모델을 선형화 한다. 웹의 두께 가를의 직경에 비해 매우 작으므로 시간에 대한 둘의 반경 및 질량의 변화 속도는 빠르지 않다. 따라서, 시간에 대해 부분 선형(piece-wise linear)이라고 가정하면, 임의의 시각 τ 에서 풀림률의 반경이나, 관성 모멘트는 일정한 값을 갖는다고 할 수 있다. 특정 시각에 대하여 선형화된 장력 모델은 다음의 식 (24)와 같다.

$$\frac{dT_1}{dt} = -\frac{V_{10}}{L_1} T_1 + \frac{(AE - T_{10})}{L_1} V_1 - \frac{(AE - T_u)}{L_1} V_u \quad (24)$$

식 (22)와 식 (24)를 조합하여 입력 U_u 와 장력 T_1 과의 관계식을 유도하여 다음과 같은 식 (25)를 구할 수 있다.

$$T_1(s) = \frac{G_1(s)}{G_D(s)} V_1(s) + \frac{G_2(s)}{G_D(s)} U_u(s) \quad (25)$$

$$\text{단, } G_1(s) = \frac{(EA - T_{10})s}{L_1}, \quad G_2(s) = \frac{(EA - T_u)R_u K}{J_u L_1}$$

$$G_D(s) = s^2 + \frac{V_{10}}{L_1} s + \frac{(EA - T_u)R_u^2}{J_u L_1}$$

사용될 PID 제어기는 다음의 식 (26)과 같다.

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_I}{s} + s K_D \right) e(s) \quad (26)$$

$$\text{단, } e(s) = T_{ref} - T_1(s)$$

MSD 속도 제어기의 설계 과정과 같이 위의 식 (25)에서 V_1 을 영(zero)으로 가정하고 식 (26)의 PID 제어기를 사용하여, T_1 과 T_{ref} 와의 폐루프 시스템을 유도할 수 있다. 폐루프 전달함수는 다음의 식 (27)과 같다.

$$\frac{T_1(s)}{T_{ref}(s)} = \frac{b_1 s^2 + b_2 s + b_3}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \quad (27)$$

$$\text{단, } a_1 = \frac{V_{10}}{L_1} + \frac{(EA - T_u)R_u K K_D}{J_u L_1}$$

$$a_2 = \frac{(EA - T_u)R_u(R_u + K K_p)}{J_u L_1}$$

$$a_3 = \frac{(EA - T_u)R_u K K_I}{J_u L_1}$$

$$b_1 = \frac{(EA - T_u)R_u K K_D}{J_u L_1}$$

$$b_2 = \frac{(EA - T_u)R_u K K_p}{J_u L_1}$$

$$b_3 = \frac{(EA - T_u)R_u K K_I}{J_u L_1}$$

임의의 동특성을 갖는 기준 모델을 선정하여, 극배치 기법을 통해 가변 제어기의 개인들을 선정할 수 있다. 식 (27)에서와 같이 장력 모델에 대한 폐루프 전달함수는 3차 시스템이므로 기준 모델의 특성 방정식을 다음의 식 (28)과 같은 3차 모델로 구성한다.

$$(s + K_r \xi \omega_n)(s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2) = 0 \quad (28)$$

위의 식 (28)에서 K_r 을 크게 함으로써, 3차 모델의 동특성을 잘 알려진 2차 모델과 같이 결정할 수 있다. 식 (27)의 시스템 폐루프 전달함수가 식 (28)의 기준 모델과 같은 동특성을 갖도록 개인들을 설정하여 구해진 각 개인들은 식 (29)~(31)과 같다.

$$K_r = \frac{J_u L_1}{(EA - T_u)R_u K} K_r \xi \omega_n^3 \quad (29)$$

$$K_p = \frac{J_u L_1 (\omega_n^2 + 2K_r \xi^2 \omega_n^2)}{(EA - T_u)R_u K} - \frac{R_u}{K} \quad (30)$$

$$K_D = \frac{J_u L_1 (K_r \xi \omega_n + 2\xi \omega_n) - J_u V_{10}}{(EA - T_u)R_u K} \quad (31)$$

위의 식들에서와 같이 모델 구조가 변화하는 풀럼롤에서의 장력 제어를 위한 PID 제어기의 개인들은 풀럼롤의 반경(R_u)과 관성 모멘트(J_u) 및 시각 τ 로부터 $\Delta \tau$ 의 부분 선형 구간에서의 정상 상태 소재 이송 속도(V_{10})에 의해 변화됨을 알 수 있다. 즉, 소재가 이송됨에 따라 임의의 시각 τ 에서 측정된 상태량들을 기초로 제어 개인들이 보정되어 모델 변화의 영향을 고려할 수 있는 적절한 제어량을 생성하게 된다.

감김률에 대한 장력 제어기의 설계는 위에서 유도된 풀럼롤의 가변 이득 PID 제어기의 설계와 같은 과정을 통해 유도 될 수 있다. 즉, 풀럼롤에서의 장력 제어기의 설계 과정과 같이 t_0 에 대한 모델을 구간 선형화하고 식 (5)의 톤 속도 모델과 식 (17)의 제어기를 조합하여 폐루프 시스템을 구성한다. 기준 모델을 이용한 극배치 기법을 통해 가변 이득 PID 제어기의 개인들을 결정할 수 있다. 감김률에서의 반경 변화는 식 (14)와 같이 시간이 경과함에 따라 증가한다는 점이 풀럼롤에서의 반경변화 차이가 있다.

소재 이송을 위한 구동 롤러에서의 장력 제어를 위한 제어기는 앞에서 설계된 풀럼롤 및 감김률의 제어기와 같은 방법으로 구해진다. 설계된 제어기는 톤 반경과 관성 모멘트의 변화가 없이 일정하고, 단지 소재가 가속 및 감속 구간을 거치게 됨에 따른 이송 속도의 변화에 의해 제어 개인이 보상된다.

이상과 같이 장력 제어를 위해 설계된 제어기 및 MSD의 톤 속도 제어기를 포함한 시스템 전체의 구성도는 아래의 Fig. 4와 같다.

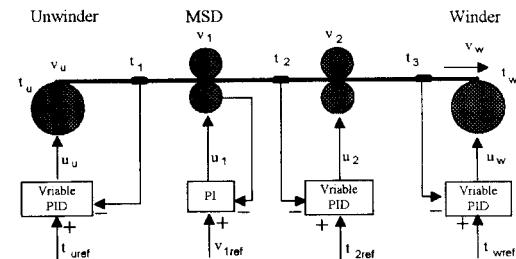


Fig. 4 연속 공정 시스템의 장력 제어 구성도

4. 시뮬레이션

식 (6)~(14)로 표현되는 연속 공정 시스템의 장력 및 속도 모델과 풀럼롤 및 감김률에서의 반경변화식을 이용하여, 장력 제어를 위한 세 개의 가변 이득 PID 및 PI 제어기를 설계하고, 소재의 정상 속도 구간 및 가·감속 구간에서의 시스템 장력 제어 성능을 평가한다.

시스템의 소재 속도에 대한 기준 궤적은 다음의 Fig. 5와 같이 5초간의 가속 구간을 거쳐 6m/s (=360m/min)의 정상 작업 속도에 이른 후, 다시 5초간의 감속 구간을

거쳐 정지하게 되는 공정 스케줄(schedule)을 갖는 것으로 한다. 이러한 소재 속도 케적에 대해 모든 공정 구간에서의 장력을 50N으로 일정하게 유지하는 것을 제어 목표로 한다.

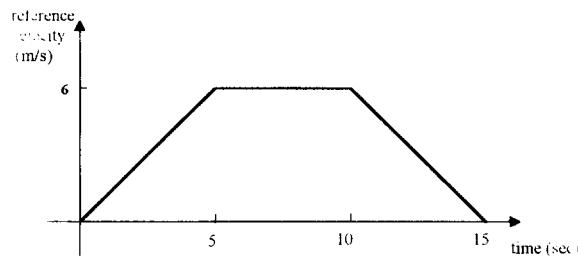


Fig. 5 기준 속도 케적

시뮬레이션에 사용된 각 상수 값들은 아래의 Table 1과 같다.

Table 1. 시뮬레이션 상수 및 조건

상수	값
E	2.4×10^8 (N/m ²)
h	6.0×10^{-7} (m)
J	0.171 (N·m·sec ²)
J _{ui}	21.192 (N·m·sec ²)
J _{wi}	0.083 (N·m·sec ²)
L	3.05 (m)
R	0.182 (m)
R _{ui}	0.607 (m)
R _{wi}	0.152 (m)
w	0.305 (m)
ρ	1.4×10^4 (kg/m ³)

장력 제어 및 MSD의 룰 속도 제어를 위해 설정된 기준 모델에 대한 특성 방정식은 다음과 같은 특성 값을 갖도록 한다.

$$\begin{aligned}\zeta &= 0.75 \\ \omega_n &= 14.5 \\ K_r &= 20.0\end{aligned}$$

구해진 각각의 룰 속도 및 장력 제어기를 통해 Fig. 4에서와 같은 장력 제어 시스템을 구성하여, 기준 룰 속도 케적 및 장력 값에 대해 장력 거동에 대한 시뮬레이션을 수행한다. 가변 제어기를 이용한 시뮬레이션을 통해 얻어진 장력의 거동 및 룰 속도 케적에 관한 결과가 다음의 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다.

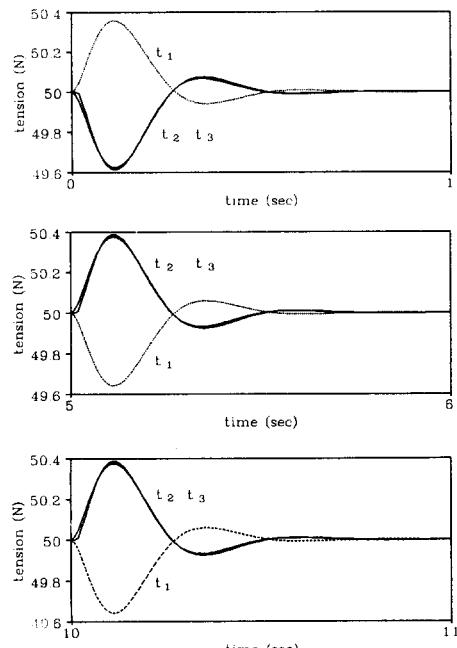


Fig. 6 소재의 장력 변화 곡선

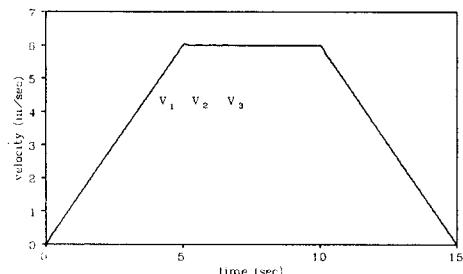


Fig. 7 소재의 속도 케적

Fig. 6은 룰의 속도 변화에 따른 각 공정 구간에서의 장력 변동에 관한 결과를 나타낸다. MSD 룰의 속도가 영(zero)으로부터 가속 구간을 거치면서, 풀립룰에서의 장력(T_1)은 초기에 증가한다. 그러나 시간이 지남에 따라 풀립룰의 회전속도가 증가하면서 장력은 초기의 기준 값으로 다시 수렴하게 됨을 알 수 있다. 이와는 반대로 MSD 룰을 지난 소재의 장력(T_2, T_3)은 초기에는 MSD 룰 속도(V_1)의 급격한 증가로 인하여 장력의 감소 현상을 보인다. 그러나 설계된 장력 제어기를 통해 구동 룰러의 속도(V_2)를 증가시키면서 장력의 변화를 극복하고, 초기 장력을 유지하게 된다.

룰 속도가 정상 작업 속도에 이르는 5초 부근에서는 초기 가속 구간에서의 소재의 장력 거동과는 반대로 풀립룰에서의 장력(T_1)은 오히려 감소하고 MSD 룰을 지난 소

재 장력(T_2 , T_3)은 증가한다. 이것은 풀림롤 및 감김롤, 그리고 그 외의 구동롤의 관성의 영향으로, 장력 제어를 위한 룰의 회전 속도가 MSD 룰의 회전 속도보다 순간적으로 빠르기 때문이다. 그러나, 이때 역시 과도 구간을 지나면서 장력은 정상 상태로 빨리 수렴하게 됨을 알 수 있다. 감속이 시작되는 10초 부근에서는 기준이 되는 MSD 룰의 속도가 감소하기 시작하면서 T_1 은 감소하고, T_2 및 T_3 는 증가하는 과도 구간에서의 장력 변화를 보이게 된다. 그러나, 가속 구간에서와 같이 시간이 지남에 따라 소재 장력이 기준 장력 값과 유사함을 알 수 있다. 결국, 가변 이득 PID 제어기를 이용한 장력 제어를 통해 룰의 회전 가속도가 변화하는 구간에서 다소의 장력 변화를 보이며, 1초 내에 기준 장력치로 수렴 해감을 알 수 있다.

연속 공정 시스템에서의 장력 변화량은 일반적으로 기준 장력치에 대해 10% 정도의 범위임을 감안한다면, Fig. 4에서 나타난 장력의 변화량은 매우 적은 것이다. 이는 설계된 제어기가 풀림롤과 감김롤의 반경 변화 및 기준 속도의 변화를 고려하여 제어기의 개인들을 보정함으로서 소재의 장력 변화량을 최소화할 수 있기 때문이다.

Fig. 7은 룰 속도의 변화를 나타내는 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 룰들은 기준 룰 속도 궤적을 잘 추종하고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 연속 공정 시스템의 풀림롤 및 감김롤의 반경 변화와 관성 모멘트의 변화를 고려할 수 있는 모델을 유도하였다. 풀림롤과 감김롤의 반경 변화식을 포함한 연속 공정 시스템의 시변 비선형 모델을 이용하여, 가속 및 감속 구간을 포함한 공정 속도 변화 과정에서의 장력 제어를 위한 간단한 PID 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기는 정상 공정 속도 구간 및 가·감속 구간에서도 일정한 장력을 유지하기 위해 계속적으로 제어 개인을 보정 할 수 있는 가변 제어기이다. MSD 룰 속도의 변화에 대해 풀림롤과 감김롤 및 그 외의 구동 룰러는 소재의 기준 속도가 변화하는 초기에서 장력의 변화를 최소화할 수 있었다.

기존의 고정 이득 PID 제어기^[5]를 이용한 장력 제어에서는 룰 반경의 변화에 따른 과도 구간에서의 장력 변화량이 매우 심한 것에 비해, 본 연구에서 설계된 가변 이득 PID 제어기를 이용하여 과도 구간에서의 장력 변화량을 크게 감소시킬 수 있었다. 또한 고정 이득 PID 제어기(fixed-gain PID controller)를 이용하여 장력을 조절할 경우, 가속 및 감속 구간에서의 소재 장력은 기준 장력치에 대해 정상 상태 오차를 유발하는데 반해, 가변 이득 PID 제어기를 이용한 장력 제어의 경우, 소재 장력은 룰 속도 변화 및 풀림롤과 감김롤의 반경 변화 등에 대해 정상 상태 오차를 영(zero)으로 수렴시킴으로서直율적으로 소재 장력을 일정하게 유지할 수 있었다.

그러나, 소재의 두께가 두꺼워지면, 룰 반경의 변화 속도가 빨라진다. 이는 모델 구조가 급격히 변화함을 의미 하며, 이로 인해 정상상태 오차는 존재하지 않으나 장력

의 변화량이 커지며 과도 구간에서의 장력의 진동 현상이 심하게 발생될 수 있다. 또한 공정 속도의 변화가 급격할 경우에도 풀림롤 및 감김롤의 반경 및 관성의 변화 속도가 빨라져, 결국 급격한 모델 구조의 변화를 초래하게 된다. 이런 경우, 부분 선형성을 만족하기 위한 시간 간격 ($\Delta \tau$)이 매우 짧아져야 할 것이다. 따라서, 고속 생산 설비에서의 제어기는 빠른 제어 개인의 보정을 위해 고속 연산이 필요하게 된다.

참고 문헌

- [1] K.H. Shin, "Distributed Control of Tension in Multi-Span Web Transport Systems" Ph.D. Thesis, Oklahoma State Univ., May, 1991.
- [2] K.P. Grenfell, "Tension Control on paper-making and converting Machinery", Proc. IEEE Ninth Annual Conference on Electrical Engineering in the Pulp and Paper Industry, Boston, Mass. June 20-21, 1963
- [3] W. Wolfman and D. Schroder, "Application of Decoupling and State Control in Processing Machines with Continuous Moving Webs", Proc. International Federation of Automatic Control, Munhen, 1987.
- [4] K.N. Reid, K.H. Shin, K.C. Lin, "Variable-gain Control of Longitudinal Tension in a Web Transport System", AMD Vol. 149, Web Handling, ASME 1992.
- [5] K.N. Reid, K.C. Lin, "CONTROL OF LONGITUDINAL TENSION IN MULTI-SPAN WEB TRANSPORT SYSTEMS DURING START UP", Proc. on 3rd. Int. Conf. on Web Handling, pp. 77-95, 1995.
- [6] K.H. Shin, K.B. Kim, H.S. An, W.K. Hong, "Thickness Control in Metal-srip Milling Process", KACC, pp. 1141-1146, 1993.
- [7] "APPLIED NONLINEAR CONTROL", Prentice-Hall, Inc., 1991