

Two-Drum Winder 권취 공정 시스템에서의 적응 PID 제어기를 이용한 장력제어

Tension Control Using Adaptive PID Controller in the Two-Drum Winder Web Transport System

최 승 규, 이 동 빈, 임 화 영

(Seung-Gyu Choi, Dong-Bin Lee, and Hwa-Yeong Yim)

Abstract : In this paper, we developed modeling of tension and speed dynamics for a two-drum winder in a three span continuous web transport system which had not been tried previously. Dynamic modeling of the time-varying nonlinear system was derived by considering the effect of the radii and mass moment of inertia in the unwinder and the two-drum winder through winding up the web. After linearizing it, we designed with a variable-gain a PID controller for tension control and a PI controller for speed. Simulation is carried out with the variation of radii and moment of inertia at high speed for the proposed tension control system with the two-drum winder and the variable-gain a PID controller. Results show good performance of tension control during the speed change speed at a start-up and stop.

Keywords : two-drum winder, unwinder, winding process, adaptive PID controller, tension, speed, web transport, nonlinear, moment of inertia, roll radii, variable-gain

I. 서론

웹 재료는 연속적이고 길며 구부러지기 쉬운 박판, 혹은 선 형태로 되어 있어서 중간 제품 또는 완제품을 제조하는 연속공정에서 가공된다. 각각의 공정에서는 웹에 따라 요구되는 장력(tension)의 정확도 및 크기가 다르며 장력의 변화가 심할 경우에는 제품의 품질 저하 등으로 인한 손실을 입을 수도 있다. 특히, 제지 권취 공정의 경우 웹 재료의 탄성계수는 여타 철강과 같은 금속의 웹 재료와는 비교할 수 없을 정도로 작기 때문에 정밀한 제어를 더욱 필요로 한다. 기존 논문[1][2]에서는 출력제한으로 롤 속도를 제어하고, 롤의 속도차에 의한 장력 영향을 고려하여 속도 제어 성능을 향상시켰으나 장력의 개루프 제어에 국한되었다. 최근에는 권취구역에서의 장력 제어를 가능케 하도록 풀림롤의 반경과 관성모멘트에 의해 제어기의 이득이 변화하는 가변이득 PID 제어기를 설계하는 연구[3][4]가 있었다. 기동시의 소재 장력 제어에 관한 연구[5]는 고정 이득 PID 제어기를 이용하여 가속 구간에서의 장력을 제어하였으나 풀림롤과 감김롤의 반경 변화가 클 경우에는 소재의 파단을 일으킬 수 있고, 정상 상태의 오차를 동반하게 되는 문제점이 있었다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 가변속도의 연속공정 시스템의 장력 제어에 관한 연구[6]는 성능 향상에 큰 기여를 하였으나 기동, 가속, 정속, 감속의 속도 스케줄을 갖는 연속적인 속도 변화 시스템에 사용되기에는 무리가 있었다. 또한 이상의 기존의 논문들은 감김롤이 단일롤로 구성된 멀티스팬(multi-span) 시스템이므로 현재 감김롤의 세계적 추세인 Two-drum Winder[10]에 의한 제어를 적용하지 않은 연구였다.

본 논문에서는 처음으로 기존의 문헌[7]에서 발표되지

않은 Two-drum Winder가 포함된 권취 공정 시스템에서의 Two-drum Winder 및 풀림롤의 반경과 관성 모멘트 변화를 고려하는 시변 비선형 모델을 유도하였다. 장력을 제어하기 위해 구성된 시스템의 모델을 구간별로 비선형성에 대응하여 극배치 기법을 통해 적응 PID 제어기를 설계하였다. 설계된 적응 PID 제어기는 시스템의 파라미터인 풀림롤 및 Two-drum Winder의 장력과 관성모멘트의 변화 즉, 증가 또는 감소하는 작업 속도 변화구간에서도 일정한 장력을 유지하기 위해 제어기의 이득이 변화되도록 설계하였다. 이로써 권취 공정 시스템에서의 비선형성과 공정 변화에 대응한 성능 향상을 시도하였다. 제안한 Two-drum Winder가 포함된 적응 PID 제어기를 이용하여 권취 공정에서 기동과 정지시를 포함하여 제어기의 장력이 미소한 범위내에 유지되는 제어 성능을 시뮬레이션을 통해서 검증하도록 시도하였다.

II. Two-drum Winder 권취 공정 시스템의 모델링

본 연구를 위하여 그림 1과 같이 풀림롤, 구동롤 2개, 그리고 Two-drum Winder를 포함한 3-스팬 권취 공정 시스템을 선정하였다. 여기서 풀림롤(Unwinder)은 소재가 감겨있는 롤로서 웹은 풀림롤로부터 롤 #1, 롤 #2를 거쳐 Two-drum Winder의 쉑핑롤(Shipping Roll)에 감기게 된다. 롤 #1은 소재의 속도를 기준 제력에 따라 정확한 속도로 유지하기 위한 롤로서 정해진 속도 궤적의 스케줄을 갖는다. 이 롤 #1을 MSD (Master Speed Drive)라고 하고 이득이 고정된 PI 속도 제어기에 의해 웹을 이송시킨다. 반면, 풀림롤, 롤 #2, Two-drum Winder는 각각의 스펜에서의 장력을 제어하기 위한 롤들이다.

1. 풀림롤, 롤 #1, 롤 #2의 시스템 모델링

다음은 Two-drum Winder를 포함하지 않은(그림 1의 v_2 까지) 롤의 속도 모델로서 일반적인 멀티스팬 권취 공정

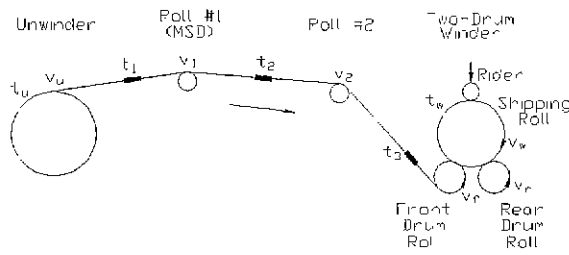


그림 1. 풀림롤과 Two-drum Winder가 포함된 3-스팬 권취 공정 시스템.

Fig. 1. 3-span winding web transport system with Unwinder and Two-drum Winder.

시스템의 모델링[3]이 된다. 수학적 모델링 식을 유도하기 위해 다음 가정을 둔다.

<가정>

- 1) 웹 재료와 롤러가 접촉하고 있는 구간의 웹 길이가 롤러 사이의 웹의 길이에 비하여 무시할 만큼 짧다.
- 2) 웹의 두께는 롤러의 반경에 비하여 매우 작다.
- 3) 단일 웹 스패 내에서 온도나 습도의 변화가 없다.
- 4) 웹의 단면적은 일정하다.
- 5) 웹의 변형도가 매우 작다. (변형도 $\ll 1$)
- 6) 단일 웹 스패 내에서 변형도의 분포는 고르다.
- 7) 웹 스패 내에서 밀도와 탄성계수는 변화하지 않는다.
- 8) 웹은 탄성 변화한다.
- 9) 웹 이송 방향의 응력이 월등히 크다.
- 10) 웹과 롤러 사이에는 미끄러짐(slip)이 없다.

1.1 소재의 장력에 대한 동적 모델

변형전의 미소 웹 요소의 질량과 변형후의 질량이 같음을 이용하여 각 스패에서의 소재에 대한 장력 모델은 다음의 (1)과 같이 비선형 식으로 나타낼 수 있다[5].

$$\dot{t}_{n+1}(t) = \frac{v_{n+1}(t)(AE - t_{n+1}(t))}{L_{n+1}} - \frac{v_n(t)(AE - t_n(t))}{L_{n+1}} \quad (1)$$

1.2 소재의 속도에 대한 동적 모델

그림 2에서 롤러의 베어링 마찰을 무시하고 표면사이의 미끄러짐이 없다고 가정을 하면 “소재의 이송속도=롤러의 회전속도”이고, 소재의 장력 t_n, t_{n+1} 과 롤에 인가되는 구동 토크 τ 와의 관계로부터 토크의 평형식을 이끌어 낼 수 있다. 이 토크의 평형식에서 각속도와 선속도와와의 관계를 이용하여 소재의 속도에 대한 동적모델은 다음의 (2)와 같이 된다[5].

$$J_n \dot{v}_n = R_n^2(t_{n-1} - t_n) + R_n k_n U_n \quad (2)$$

2. Two-drum Winder의 모델링

기존 논문에서 감김롤은 해석의 용이함을 위해 단일롤을 고려하고 있으나 고도의 기술력을 가진 선진 외국 기업이 출시하는 시스템은 두 개의 드럼롤 위에 감김롤인 쉽핑롤이 위치하고 있으며, 감김 정도(hardness)를 고려할 수 있는 그림 3의 Two-drum Winder를 채택하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 현실적인 제어 알고리즘을 제안하기 위하여

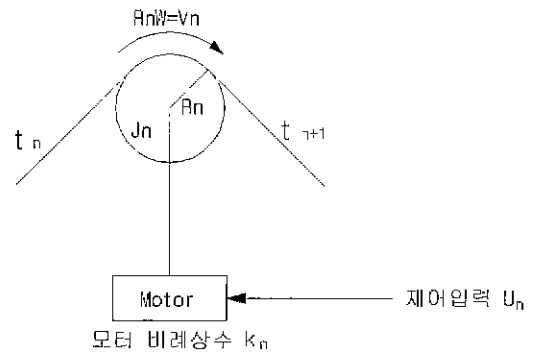


그림 2. 속도모델.

Fig. 2. Speed dynamics for web.

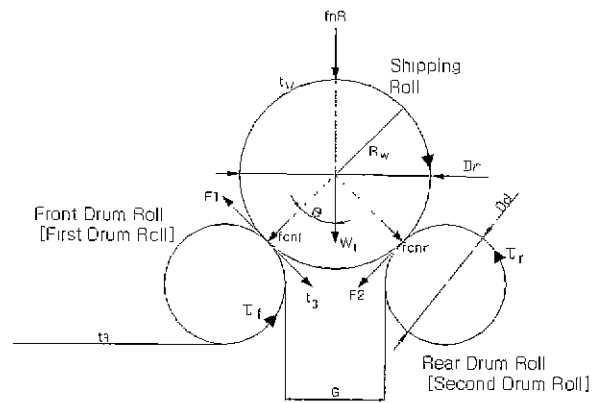


그림 3. Two-drum Winder.

Fig. 3. Modeling of two-drum Winder.

Two-drum Winder의 모델링을 시도하였다. 수학적 모델링에 필요한 다음 사항을 <가정>에 추가한다.

- 11) Front Drum Roll(이하 FDR)과 Rear Drum Roll(이하 RDR)의 반경은 같고, 서로 중심축의 위치가 지면과 서로 같은 높이에 위치하고 있다.
- 12) 웹과 FDR간에는 슬립이 없고, 웹과 RDR간에는 슬립이 존재한다

FDR과 RDR간의 회전속도의 차이(약 10%의 속도차)로 인하여 쉽핑롤에 감기는 웹에 경도(hardness)가 발생되므로 FDR과 쉽핑롤 사이에는 슬립이 존재하지 않고, FDR보다도 회전속도가 빠른 RDR과 쉽핑롤간에는 슬립이 있다고 가정을 하였다.

2.1 소재의 속도에 대한 동적 모델식의 유도

그림 3과 가정 11)과 같이 FDR과 RDR의 반경이 같고, 중심축의 위치가 지면과 서로 같은 높이에 위치하므로 FDR과 쉽핑롤, RDR과 쉽핑롤 사이에 존재하는 접압력은

$$f_{cn-f} = f_{cn-r} = \frac{W_f + f_a R}{2 \cos \theta} \quad (3)$$

이고, 접압력의 벡터(납벡터, nip vector)와 수직방향의 W_f 사이의 각도 θ 는 (4)와 같이 표현 가능하다.

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{D_a + G}{D_a + D_r} \right] \quad (4)$$

그림 3과 가정 12)에 의해 접압력과 마찰력 사이의 관계는

$$F_1 < \mu \cdot f_{cn-f} \quad (5)$$

$$F_2 = \mu \cdot f_{cn-r} \quad (6)$$

으로 나타낼 수 있고, FDR과 쉽핑롤사이에는 슬립이 존재하지 않으므로 FDR과 쉽핑롤의 선속도는 같다.

따라서 (7)과 같은 관계가 성립하고

$$\dot{\theta}_f R_f = \dot{\theta}_w R_w \quad (7)$$

RDR과 쉽핑롤사이의 관계식은

$$\tau_r \geq F_2 R_w \quad (8)$$

이 된다. 그림 4와 같이 각 요소를 분해한 후 FDR에서의 토크의 평형식을 구하면

$$J_f \dot{\theta}_f = J_f \frac{\dot{v}_f}{R_f} = \tau_f - F_1 R_f + (t_w - t_3) R_f \quad (9)$$

이 되므로, 소재의 속도에 대한 동적 모델링은 (10)과 같다.

$$\dot{v}_f = \frac{R_f}{J_f} \tau_f - \frac{R_f^2}{J_f} (F_1 - t_w + t_3) \quad (10)$$

RDR에서의 토크의 평형식을 구하면

$$J_r \dot{\theta}_r = J_r \frac{\dot{v}_r}{R_r} = \tau_r - F_2 R_r \quad (11)$$

로 유도되므로 RDR에서의 소재의 동적 모델식은

$$\dot{v}_r = \frac{R_r}{J_r} \tau_r - \frac{R_r^2}{J_r} F_2 \quad (12)$$

이다. 쉽핑롤에서의 토크 평형식을 구하면

$$J_w \frac{\dot{v}_w}{R_w} = F_1 R_w + F_2 R_w = R_w (F_1 + F_2) \quad (13)$$

이므로 쉽핑롤에서의 소재의 속도에 대한 동적 모델식은

$$\dot{v}_w = \frac{R_w^2}{J_w} (F_1 + F_2) \quad (14)$$

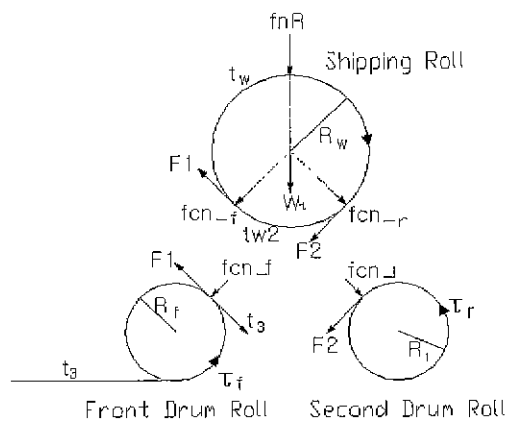


그림 4. Two-drum Winder 각 요소의 분해.
Fig. 4. Physical analysis of Two-drum Winder

이며, (7)에 의하여 $\dot{v}_f = \dot{v}_w$ 이고 따라서, (10)과 (14)는 동치이므로, \dot{v}_w 은

$$\dot{v}_w = \frac{R_f}{J_f} \tau_f - \frac{R_f^2}{J_f} (F_1 - t_w + t_3) \quad (15)$$

와 같다. (15)의 양변에 $J_f J_w$ 를 곱한 후 F_1 에 대해서 쓰면

$$F_1 = \frac{J_w R_f \tau_f - J_f R_w^2 F_2 - J_w R_f^2 t_3 + J_w R_f^2 t_w}{J_f R_w^2 + J_w R_f^2} \quad (16)$$

과 같이 표현할 수 있고, 또한 F_2 역시 (6)과 같이 정의되어 있으므로, (16)과 (6)의 결과를 (14)의 F_1, F_2 에 대입하면 \dot{v}_w 를 구할 수 있다. 지금까지 유도한 속도에 관한 식을 (1)에 적용하면 스펜 3에 서의 소재의 장력의 동적 모델식을 얻을 수 있다.

$$L_3 \dot{t}_3 = v_f (EA - t_3) - v_r (EA - t_2) \quad (17)$$

2.2 소재의 장력에 대한 동적 모델식의 유도

소재의 장력에 대한 동적 모델식을 유도하기 위해서는 L_w (FDR과 쉽핑롤의 접점부터 RDR과 쉽핑롤의 접점까지 호의 길이)의 유도가 선행되어야 한다. (4)에 의해 θ 는 정해지고 L_w 는 쉽핑롤의 원주의 총 길이중 2θ 만큼 호의 길이를 뺀 길이 이므로

$$L_w = 2\pi R_w \left(\frac{360^\circ}{360} - \frac{2\theta^\circ}{360} \right) \quad (18)$$

이 된다. 쉽핑롤의 장력 t_w 에 대한 식은 (17)과 유사하게

$$L_w \dot{t}_w = v_r (EA - t_w) - v_f (EA - t_3) \quad (19)$$

이므로 (18)을 (19)의 L_w 에 대입한 후 \dot{t}_w 에 대해 정리하면 유도하려는 소재의 장력에 대한 동적 모델식은

$$\dot{t}_w = \frac{360}{2\pi R_w (360 - 2\theta)} \{ v_r (EA - t_w) - v_f (EA - t_3) \} \quad (20)$$

같이 구할 수 있다. 그러나, (20)의 \dot{t}_w 는 이상적인 경우이며 일반적으로 감겨지기 직전의 스펜의 장력(본 논문에서는 t_3)을 t_w 와 동일하게 간주한다.

3. 폴림롤과 쉽핑롤의 반경의 변화 모델

폭이 W인 소재가 속도 $v(\tau)$ 로 이송될 때 시각 t_0 부터 t 까지 폴림롤과 감김롤에서의 질량의 증가 또는 감소는

$$\Delta M = \rho h W \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau \quad (21)$$

이고, 시각 t_0 에서의 반경을 R_0 , 시각 t 에서의 반경을 $R(t)$ 라고 하면, 질량은

$$\Delta M = \rho W \pi (R(t)^2 - R_0^2) \quad (22)$$

와 같이 표현되므로, (21)과 (22)의 우변을 서로 동치로 놓고 $R^2(t)$ 에 관하여 정리하면

$$R^2(t) = R_0^2 + \frac{h}{\pi} \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau \quad (23)$$

이 된다. (23)은 시간에 따라 증가하므로 감김롤의 반경 변화식이다. 반대로 풀림롤의 반경 변화식은 감소하므로 감김롤과 풀림롤의 반경 변화식을 같이 표현하면 (24)와 같다[5].

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 \pm \frac{h}{\pi} \int_{t_0}^t v(z) dz} \quad (24)$$

여기서, +; 감김롤, -; 풀림롤, $v(t)$ 는 감김롤[풀림롤]에서의 웹의 속도이다.

4. 전체 권취 공정 시스템의 모델링 식

1절, 2절, 3절로부터 그림 1의 풀림롤과 Two-drum Winder가 포함된 연속공정 시스템의 모델링식을 롤 기준으로 정리하면 (25)~(34)와 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

1) Unwinder

$$R_u = \sqrt{R_w^2 - \frac{h}{\pi} \int_{t_0}^t v_u(z) dz} \quad (25)$$

$$v_u = \frac{R_u^2}{J_u} (t_1 - t_u) - \frac{R_u}{J_u} k_u U_u \quad (26)$$

2) 롤 #1(MSD)

$$\dot{t}_1 = \frac{v_1}{L_1} (EA - t_1) - \frac{v_u}{L_1} (EA - t_u) \quad (27)$$

$$\dot{v}_1 = \frac{R_1^2}{J_1} (t_2 - t_1) + \frac{R_1}{J_1} k_1 U_1 \quad (28)$$

3) 롤 #2

$$\dot{t}_2 = \frac{v_2}{L_2} (EA - t_2) - \frac{v_1}{L_2} (EA - t_1) \quad (29)$$

$$\dot{v}_2 = \frac{R_2^2}{J_2} (t_3 - t_2) + \frac{R_2}{J_2} k_2 U_2 \quad (30)$$

4) Two-drum Winder

$$\dot{t}_3 = \frac{v_3}{L_3} (EA - t_3) - \frac{v_2}{L_3} (EA - t_2) \quad (31)$$

$$\dot{v}_w = \frac{R_w^2}{J_w} (F_1 + F_2) \quad (32)$$

$$\dot{t}_w = \dot{t}_3 \quad (33)$$

$$R_w = \sqrt{R_w^2 + \frac{h}{\pi} \int_{t_0}^t v_w(\tau) d\tau} \quad (34)$$

여기서, F_1, F_2 는 각각

$$F_1 = \frac{J_w R_f \tau_f - J_f R_w^2 F_2 - J_w R_f^2 t_3 + J_w R_f^2 t_w}{J_f R_w^2 + J_w R_f^2}$$

$$F_2 = \mu \cdot f_{cmr} \text{이다.}$$

III. 권취 공정의 장력 및 속도 제어기의 설계

다수의 변수들이 상호 작용하는 다변수 비선형 시스템인 권취 공정 시스템에서 웹의 특성, 웹의 속도, 풀림롤 및 감김롤의 반경과 관성 모멘트의 변화에도 균일한 장력 제어 성능을 유지하기 위하여 적응 PID 장력 제어 알고리즘을 채택하였고 소재의 속도가 기준 속도를 추종하는 스케줄을 갖는 PI 속도 제어기를 선정하였다.

1 풀림롤의 적응 PID 장력 제어기의 설계

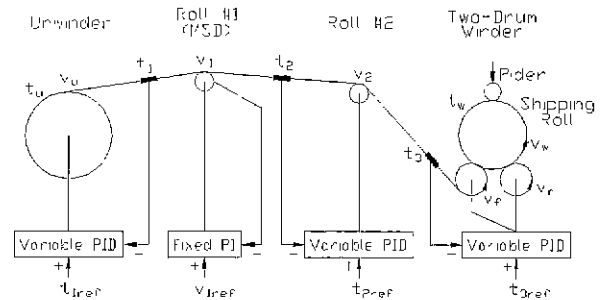


그림 5. 권취 공정의 장력 제어 시스템의 구성.

Fig. 5. Configuration of tension control system in winding process.

그림 5는 전체 권취 공정 시스템의 장력 제어 블록도이다.

여기서 적응 PID 장력 제어 알고리즘을 사용하는 롤은 풀림롤, 롤 #2, Two-drum Winder이고, 롤 #1과 연관된 제어기는 속도 스케줄을 기준값으로 갖는 고정 PI 속도 제어기이다. 먼저, 풀림롤의 장력제어기를 설계한다. 그림 6은 풀림롤의 적응 PID 장력 제어기의 블록도이다.

그림 6, 그림 7과 (25)에서와 같이 풀림롤의 속도로부터 풀림롤의 반경이 계산되고, 반경이 계산되면 풀림롤의 관성 모멘트는 웹의 밀도만 안다면 쉽게 구해진다.

이렇게 구해진 풀림롤의 반경과 관성모멘트가 PID 제어기의 제어 이득값인 K_p, K_i, K_D 를 결정하는데 사용되므로 이득값이 고정된 제어기와는 달리 권취 시스템의 파라미터가 변경되어도 균일한 제어가 가능하도록 제어 이득값이 변경되는 제어기이다. (25)는 풀림롤에서의 반경의 변화와 소재의 이송속도간의 관계식이고 (26)에서 t_u 는 풀림롤에 감겨있는 소재의 장력이다. 소재를 감는 방법에 따라 t_u 는 반경에 따라 다른 분포를 나타내지만 일정하다고 가정을 한다 제어기의 P, I, D 이득을 각각 선정하기 위해, 비선형적인 소재 장력 모델을 임의의 시각 t 에서 선형화를 한다 웹의 두께가 롤의 직경에 비해 매우 작으므로 시간에 대한 롤의 반경 변화 및 질량 변화 속도는 크지 않다. 따라서 시간에 대해 부분 선형이라고 가정할 수 있으며, 임의의 시각 t 에서 풀림롤의 반경이나, 관성 모멘트는 일정한 값을 갖는다고 할 수 있다.

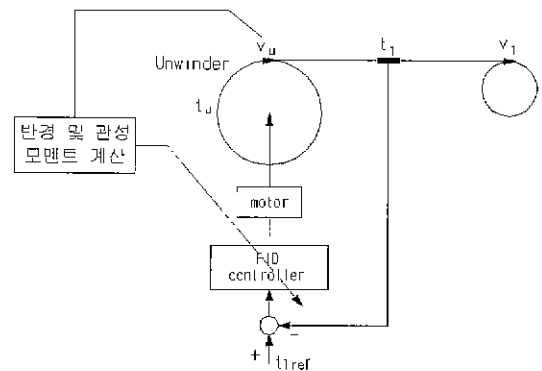


그림 6. 풀림롤에서의 장력제어.

Fig. 6. Tension control of Unwinder.

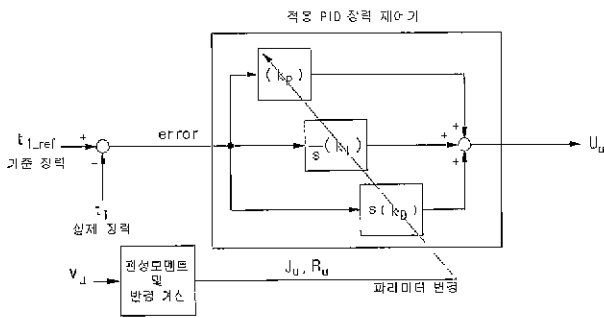


그림 7. 폴림롤의 적응 PID 장력 제어기.
Fig. 7. Adaptive PID tension controller in Unwinder.

정상상태에 대해 선형화된 장력모델은 (35)와 같다.

$$\frac{dT_1}{dt} = -\frac{V_{10}}{L_1} T_1 + \frac{(EA - T_{10})}{L_1} V_1 - \frac{(EA - T_u)}{L_1} V_u \quad (35)$$

(26)과 (35)를 Laplace 변환하고, 제어 입력 $U_u(s)$ 와 장력 $T_1(s)$ 와의 관계식으로 표현하면,

$$T_1(s) = \frac{G_1(s)}{G_D(s)} V_1(s) + \frac{G_2(s)}{G_D(s)} U_u(s) \quad (36)$$

이다. 여기서 $G_D(s), G_1(s), G_2(s)$ 는 (37)~(39)와 같이

$$G_D(s) = s^2 + \frac{V_{10}}{L_1} s + \frac{(EA - T_u) R_u^2}{L_1 J_u} \quad (37)$$

$$G_1(s) = \frac{(EA - T_{10})}{L_1} s \quad (38)$$

$$G_2(s) = \frac{(EA - T_u)}{J_u L_1} R_u k_u \quad (39)$$

나타낼 수 있다. 제어기의 출력 $U_u(s)$ 도

$$U_u(s) = e(s) \left(K_P + \frac{K_I}{s} + sK_D \right) \quad (40)$$

로 표현할 수 있다. (36)에서 $V_1(s)$ 를 zero 즉, 속도에 대한 정상상태로부터의 변화가 없다고 가정을 한 후, (40)의 PID 제어기를 사용하여 블록도를 그리면 그림 8과 같다.

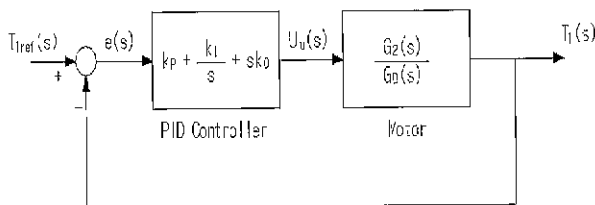


그림 8. 폴림롤의 장력제어 시스템의 블록선도.
Fig. 8. Block diagram of tension control system in Unwinder.

그림 8에서 $G_D(s)$ 와 $G_2(s)$ 는 각각 (37), (39)와 같으므로 PID 제어기와 플랜트의 전달함수의 곱을 $G(s)$ 라고 하면 $G(s)$ 는

$$G(s) = \left(K_P + \frac{K_I}{s} + sK_D \right) \left(\frac{Ck_u}{s^2 + \frac{V_{10}}{L_1} s + CR_u} \right) \quad (41)$$

$$= \frac{k_u CK_D s^2 + k_u CK_P s + k_u CK_I}{s^3 + \frac{V_{10}}{L_1} s^2 + CR_u s}$$

로 표현된다. 여기서, C는

$$C = \frac{(EA - T_u) R_u}{J_u L_1} \quad (42)$$

이다. 따라서 폐루프의 전달함수 $M(s)$ 는

$$M(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} = \frac{b_1 s^2 + b_2 s + b_3}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \quad (43)$$

과 같고, 특성방정식을 $S_1(s)$ 라고 하면 $S_1(s)$ 는

$$S_1(s) = s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 \quad (44)$$

이다. 여기서, 각각의 항의 계수는 (45)~(50)과 같다.

$$a_1 = \frac{V_{10}}{L_1} + \frac{(EA - T_u) R_u k_u K_D}{J_u L_1} \quad (45)$$

$$a_2 = \frac{(EA - T_u) R_u (k_u K_P + R_u)}{J_u L_1} \quad (46)$$

$$a_3 = \frac{(EA - T_u) R_u k_u K_I}{J_u L_1} \quad (47)$$

$$b_1 = \frac{(EA - T_u) R_u k_u K_D}{J_u L_1} \quad (48)$$

$$b_2 = \frac{(EA - T_u) R_u k_u K_P}{J_u L_1} \quad (49)$$

$$b_3 = \frac{(EA - T_u) R_u k_u K_I}{J_u L_1} \quad (50)$$

설계된 장력 제어 시스템은 3차 시스템이므로 원하는 특성방정식을 (51)과 같이 $S_2(s)$ 로 정의한다.

$$S_2(s) = (s + K_r \zeta \omega_n)(s^2 + 2 \zeta \omega_n s + \omega_n^2) \quad (51)$$

폴림롤의 장력 제어 시스템이 다음의 안정한 극점을 갖도록 K_P, K_I, K_D 값을 정의하도록 하겠다.

$$\lambda_1 = -10.8750 + 9.5908 j$$

$$\lambda_2 = -10.8750 - 9.5908 j$$

$$\lambda_3 = -217.5$$

위의 극점을 갖는 ω_n, K_r, ζ 를 계산하면

$$\omega_n = 14.5, \quad K_r = 20, \quad \zeta = 0.75 \quad (52)$$

와 같다. 여기서, K_r 은 임의의 양의 실수이다, (51)에 (52)의 ω_n, ζ, K_r 을 대입한 후 전개하고 s 에 관한 다항식으로 표현한 식을 제어기가 포함된 실제 시스템의 특성방정식인 (44)와 동치로 놓고 이를 K_P, K_I, K_D 에 대해 정리하면 (53)~(55)와 같이 제어이득을 구할 수 있다.

$$K_P = \frac{2\zeta\omega_n + K_r\zeta\omega_n - \frac{V_{10}}{L_1}}{(EA - T_u)R_u k_u} \frac{1}{J_u L_1} \quad (53)$$

$$K_I = \frac{\omega_n^2 + 2K_r\zeta^2\omega_n^2 - \frac{(EA - T_u)}{L_1}}{(EA - T_u)R_u k_u} \frac{1}{J_u L_1} \quad (54)$$

$$K_D = \frac{K_r\zeta\omega_n^3}{(EA - T_u)R_u k_u} \frac{1}{J_u L_1} \quad (55)$$

제어기의 이득에는 플립플의 관성모멘트인 J_u 와 반경 R_u 가 분모항에 들어가 있고 이 이득은 시스템 전달함수의 특성방정식의 계수들인 (45)~(50)에 들어가 있습니다. 따라서 권취공정 구역에서는 이러한 파라미터의 변화로 고정 이득으로서는 균일하게 장력제어를 할 수 없고 안정한 극점을 유지할 수가 없으므로 가변이득을 필요로 하게된다. (53)~(55)의 모든 변수들을 설정할 수 있으므로 PID 제어기의 이득인 K_P, K_I, K_D 를 정할 수 있고 안정한 적용 PID 장력 제어기를 설계할 수 있다. (53)~(55)의 J_u 와 R_u 는 고정된 값이 아니므로 제어기의 이득들도 변화하는 적응성을 갖게 된다. 연속 공정 시스템이 시변 시스템이므로 비록 J_u 와 R_u 가 변한다하더라도 권취 시스템은 항상 동일한 안정한 극점을 갖게 된다. 그림 6의 롤 #2와 Two-drum Winder의 장력제어기도 플립플의 적용 PID 장력 제어기의 설계방법과 동일한 방법으로 설계할 수 있다.

2. MSD(Master Speed Drive)의 PI 속도 제어기의 설계
MSD 롤 #1은 앞에서 언급한 것과 같이 웹의 이송속도에 관한 스케줄과 관련있는 플로서 속도 제어기에 의하여 제어된다.

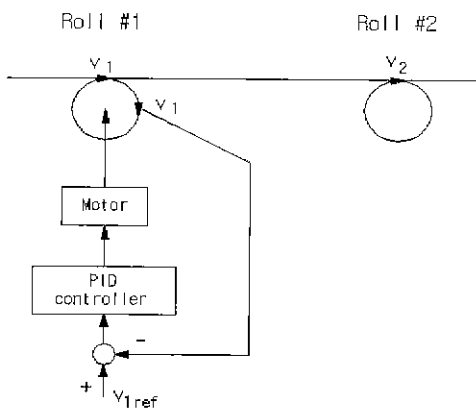


그림 9. MSD 속도 제어 시스템.
Fig. 9. Speed control system of MSD.

롤 #1의 속도에 관한 동적 모델식인 (28)에서 정상상태로부터 장력의 변화가 없다고 가정하면 (56)과 같이 간단히 변형된다.

$$\dot{v}_1 = \frac{R_1}{J_1} k_1 U_1 \quad (56)$$

(56)을 Laplace 변환하고 $\frac{V_1(s)}{U_1(s)}$ 에 관하여 정리하면 (57)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_1(s)}{U_1(s)} = \frac{R_1 k_1}{J_1 s} \quad (57)$$

(57)은 간단한 적분 모델이므로 (58)과 같이 PI제어기로써 원하는 성능을 만족시킬 수 있다.

$$U_1(s) = (K_P + \frac{K_I}{s})e(s) \quad (58)$$

(57)과 (58)을 이용하여 PI 속도 제어기가 포함된 롤 #1의 시스템 블록도를 그리면 그림 10과 같다.

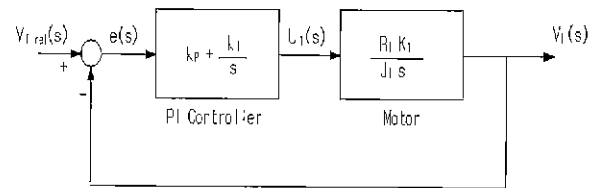


그림 10. MSD의 속도 제어 블록도.
Fig. 10. Block diagram of speed in MSD.

PI 제어기와 플랜트의 전달함수의 곱을 $G(s)$ 라고 하고, 페루프의 전달함수를 $M(s)$ 라고 하면, $G(s)$ 와 $M(s)$ 는

$$G(s) = \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right) \left(\frac{R_1 k_1}{J_1 s} \right) \quad (59)$$

$$M(s) = \frac{V_1(s)}{V_{1ref}(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \quad (60)$$

로 표현할 수 있다. (59)를 (60)에 대입하고 정리하면 페루프 전달함수 $M(s)$ 는

$$M(s) = \frac{\frac{K_P k_1 R_1}{J_1} s + \frac{R_1 k_1 K_I}{J_1}}{s^2 + \frac{K_P R_1 k_1}{J_1} s + \frac{R_1 k_1 K_I}{J_1}} \quad (61)$$

이 된다. 설계하고자 하는 속도 제어 시스템은 2차 시스템이므로 원하는 특성방정식을 (62)와 같이 $S(s)$ 로 정의하면

$$S(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (62)$$

과 같으므로 안정한 극점

$$\lambda_1 = -10.8750 + 9.5908j$$

$$\lambda_2 = -10.8750 - 9.5908j$$

을 갖게하는 ζ, ω_n 을 (63)과 같이 정할 수 있다.

$$\zeta = 0.75, \quad \omega_n = 14.5 \quad (63)$$

(61)의 페루프 전달함수의 분모인 시스템의 특성방정식과 (63)의 ζ, ω_n 을 갖는 (62)를 갖게하는 K_P, K_I 를 정하면 식 (64)와 (65)와 같이 MSD 롤 #1의 고정 PI 속도 제어기를 설계할 수 있다.

$$K_p = \frac{2J_1 \zeta \omega_n}{R_1 k_1} \quad (64)$$

$$K_I = \frac{J_1 \omega_n^2}{R_1 k_1} \quad (65)$$

IV. 권취 공정 시스템의 장력 제어 시뮬레이션

3.1절, 3.2절에서 설계한 적응 PID 장력 제어기와 MSD의 고정 PI 속도 제어기를 그림 5에서 표현한 권취 시스템에 적용하여 시뮬레이션을 시행하였다. 시뮬레이션 파라미터는 표 4와 같다. 앞에서 언급하였듯이 풀림롤, 쉽핑롤의 적응 PID 장력 제어기는 각각의 관성모멘트와 반경에 의해 제어기 이득인 K_p, K_I, K_D 가 원하는 장력으로 유지시키도록 계속적으로 변경된다. 시뮬레이션에서 직류모터의 모터상수는 모두 1로 정했다. 2.5절의 장력 제어기에서 알 수 있듯이 장력을 유지시키는데 필요한 제어입력 U 가 직류모터의 상수값과 곱해져서 적절한 토크(τ)가 롤에 가해지게 된다. MSD인 롤 #1의 기준속도는 0초부터 7.5초까지의 가속구간을 거쳐 7.5초부터 12.5초는 정상작업 속도 구간으로 60 (m/s)의 선속도를 갖으며, 12.5초부터 20초까지의 감속구간을 거쳐 정지하는 공정 스케줄을 갖는 것으로

표 1. 시뮬레이션에 사용된 권취공정 시스템 파라미터.

Table. 1. Parameters of winding process.

설 명	기 호	파 라 미 터
소재의 탄성계수	E	$2.4 \times 10^8 (N/m)$
소재의 두께	h	$6.0 \times 10^{-7} (m)$
소재의 폭	W	$0.5 (m)$
소재의 단면적	A	$1.83 \times 10^{-7} (m^2)$
소재의 밀도	ρ	$700 (kg/m^3)$
스팬 1의 길이	L_1	$5 (m)$
스팬 2의 길이	L_2	$5 (m)$
스팬 3의 길이	L_3	$5 (m)$
풀림롤의 초기 관성모멘트	J_u	$20205 (N.m. sec^2)$
풀림롤의 초기 반경	R_u	$1.4 (m)$
쉽핑롤의 초기 관성모멘트	J_w	$500 (N.m. sec^2)$
쉽핑롤의 초기반경	R_w	$0.34 (m)$
FDR의 관성모멘트	J_r	$705.75 (N.m. sec^2)$
FDR의 반경	R_f	$0.38 (m)$
RDR의 관성모멘트	J_f	$705.75 (N.m. sec^2)$
RDR의 반경	R_r	$0.38 (m)$
롤 #1의 관성모멘트	J_1	$1.98475 (N.m. sec^2)$
롤 #1의 반경	R_1	$0.0875 (m)$
롤 #2의 관성모멘트	J_2	$1.98475 (N.m. sec^2)$
롤 #2의 반경	R_2	$0.0875 (m)$
라이더에서 누르는 힘	$f_n R$	$10 (N)$
모든 스펠의 기준 장력	t_{ref}	$40 (N)$

하였다. 기준 장력값은 40N으로 하였다. 장력의 초기값도 역시 40N으로 하였다. 이는 실제 시스템에서와 마찬가지로 초기 기동전 먼저 각 스펠의 웹 장력을 40N으로 맞추어 놓은 다음 기동하는 것을 의미한다.

그림 11은 풀림롤과 감감롤인 쉽핑롤의 반경 변화를 나타낸 그림이다. 풀림롤의 반경은 시간에 따라 점차 감소하며 반대로 쉽핑롤은 증가함을 알 수 있다.

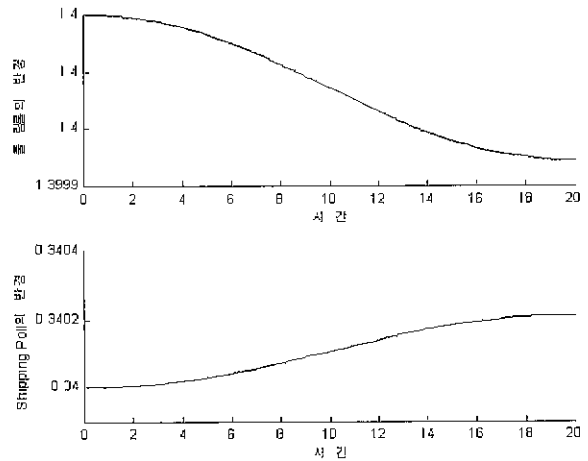


그림 11. 풀림롤 쉽핑롤의 반경변화.

Fig. 11. Radii change of Unwinder and shipping roll.

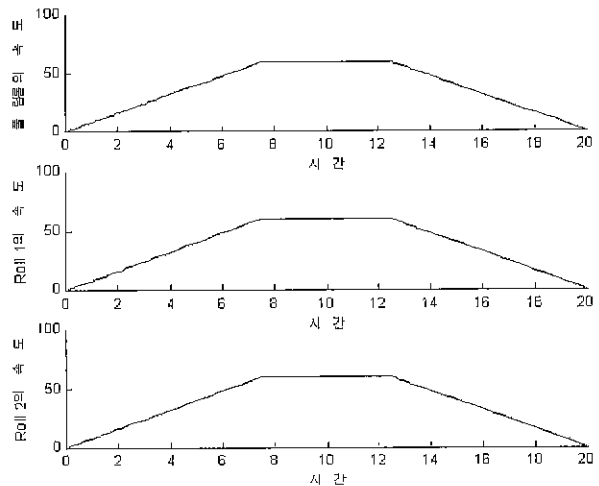


그림 12. 풀림롤, 롤 #1, 롤 #2의 속도 궤적.

Fig. 12. Trajectory of speed in Unwinder, roll #1 and roll #2.

그림 12는 풀림롤, 롤 #1, 롤 #2의 속도 궤적을 나타내었다.

그림 13은 FDR, RDR, 쉽핑롤의 속도 궤적을 나타낸 그림이다. 롤 #1의 속도는 고정 속도 PID 제어기에 의한 속도 궤적인 반면, 풀림롤과 롤 #2, 쉽핑롤의 속도궤적은 기준 장력값인 40N을 유지시키는데 필요한 토크에 의한 속도 궤적이다.

그림 14, 15, 16은 각각 스펠 1, 스펠 2, 스펠 3에서의 소재의 장력의 변화 곡선이다. 표 2의 각 스펠에서의 장력 오

차 분석에서 알 수 있듯이 설계된 장력 제어기들에 의한 각 스펀에서의 장력이 기준 장력값에 대해 적은 오차 범위내로 잘 제어되고 있음을 보여주고 있다.

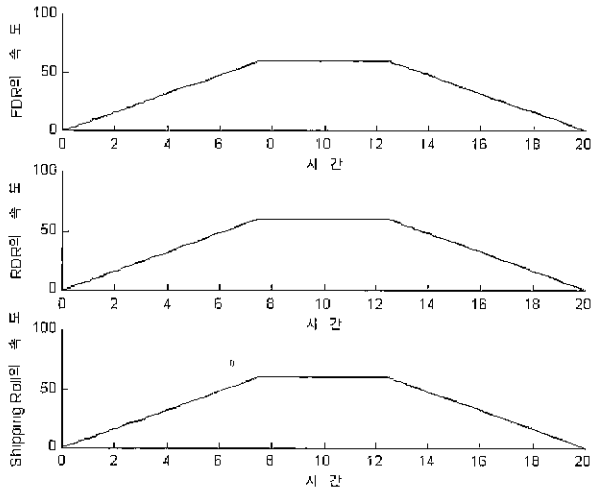


그림 13. FDR, RDR, 첩핑롤의 속도 궤적.

Fig. 13. Trajectory of speed in FDR, RDR and shipping ro...

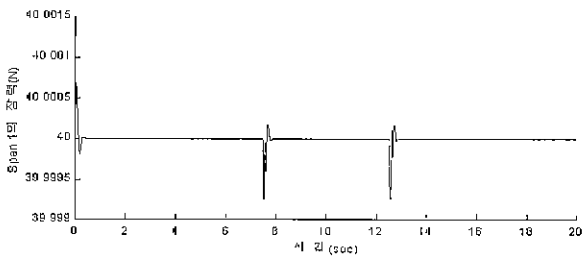


그림 14. 스펀 1에서의 장력.

Fig. 14. Tension in span 1

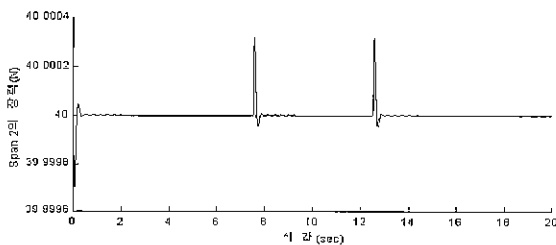


그림 15. 스펀 2에서의 장력.

Fig. 15. Tension in span 2.

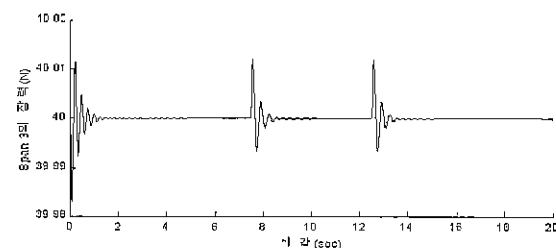


그림 16. 스펀 3에서의 장력.

Fig. 16. Tension in span 3.

V. 결론

최근 권취 시스템의 제품들은 감김롤의 감김 정도(winding hardness)를 고려하기 위해서 단일롤이 아닌 Two-drum Winder로 적용해 가고 있다. 본 논문에서는 Two-drum Winder의 장력과 속도에 대한 등적 모델식을 유도하였다. 이 식을 이용하여 풀림률, 감김률의 반경과 관성모멘트의 변화에 적응성이 있도록 가변 이득을 갖는 적응 PID 장력 제어기를 설계하였다. 3-스팬 연속공정 시스템에 이 설계한 제어기를 이용하여 성능 평가를 하였을 때, 일반적으로 장력의 변화량(기준 장력의 약 10% 이내)과 기준[5]의 연구 결과(약 0.8% 이내)를 감안하면 본 논문의 연구 결과(기준 장력의 약 0.042% 이내 : 표 2)에서 장력 변동은 매우 적음을 볼 수 있다. 설계한 적응 PID 장력 제어기는 롤과 롤간, 가,감속시 등 전체 권취 공정 시스템에서 우수한 성능을 나타내면서 장력 변동은 현저히 감소하였음을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

표 2 각 스펀에서의 장력오차 분석(적용 PID).
Table. 2. Analysis of tension error at each span.

스 팬	장력변화범위 (N)	장력오차범위 (N)	t_{ref} 에 대한 최대 오차 백분율(%)
스팬 1	39.9993 ~ 40.0008	-0.0008 ~ 0.0007	0.002
스팬 2	39.9997 ~ 40.0003	-0.0003 ~ 0.0003	0.00075
스팬 3	39.9831 ~ 40.0118	-0.0118 ~ 0.0169	0.04225

참고문헌

- [1] Grenfell, K. P., "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.
- [2] W. Wofermann, and D. Schroder, "Application of decoupling and state space control in processing machines with continuous moving webs", *Proc. International Federation of Automatic Control*, Munhen, 1997.
- [3] 신기현, "연속공정 시스템에서의 장력의 가변이득 PID 제어", *대한기계학회논문집*, 제19권, 제3호, 724-730, 1995.
- [4] 신기현, "다중스팬 공정 시스템에서의 비간섭 장력제어", *대한기계학회논문집*, 제19권, 제10호, 2548-2554, 1995.
- [5] K. N. Reid and K. c. Lin, "Control of longitudinal tension in multi-span web transport systems during start up", *Pro. on 3rd. Int. Conf. on Web Handling*, pp. 77~95, 1995.

[6] 신기현, 권순오. “변속시의 멀티 스펙 연속 공정 시스템의 장력 제어”, 한국 정밀공학회 ‘95년 추계학술대회 논문집, 548-559, 1995.
 [7] David R. Roisum, “The mechanics of windeing”, Tappi, Tappi Press. 1994.
 [8] Li-Xing Wang, “A course in fuzzy systems & control”, Prentice Hall PTR Prentice-Hall Inc., 1997.
 [9] Li-Xing Wang, “Adaptive fuzzy systems and control”, Prentice Hall PTR Prentice-Hall Inc., 1994.
 [10] 임화영, “권취 공정 시스템의 모델링 기술개발에 관한 연구 (1차년도 최종 보고서)”, 산업자원부, 6~42, 1998.

기호

- A : 소재의 단면적
- E : 소재의 탄성계수
- W : 소재의 폭
- ρ : 소재의 밀도
- L_n : span(롤과 롤사이의 소재의 길이)
- h : 소재의 두께
- $R_n(t)$: 시각 t 일때의 롤 n 의 반경
- R_m : 시각 t_0 에서의 롤 n 의 초기 반경
- $v_n(t)$: roll n 의[roll n 에서의 소재의 이송]속도
- G : Front Drum Roll(FDR)과 Rear Drum Roll(RDR)사이의 간격
- D_n : roll n 의 Diameter(지름)
- J_n : roll n 의 관성모멘트

- $f_n R$: 라이더(Rider)에서 쉽롤(Shipping Roll)에 가해지는 실린더(Cylinder)의 힘
- $fcn-f$: FDR에 가해지는 쉽롤의 접압력
- $fcn-r$: RDR에 가해지는 쉽롤의 접압력
- $F1$: FDR과 쉽롤과의 마찰력
- $F2$: RDR과 쉽롤과의 마찰력
- μ_n : 웹(web)과 FDR, RDR간의 마찰계수
- τ_n : 모터에 의해 롤 n 에 전달되는 토크량
- U_n : 롤 n 과 연결된 모터에 가해지는 제어입력
- k_n : 롤 n 과 연결된 모터의 적류 모터상수
- K_P : PID 제어기의 비례이득
- K_I : PID 제어기의 적분이득
- K_D : PID 제어기의 미분이득
- T_n : 정상상태 값으로 부터의 소재의 장력의 변화
- $T_{n,0}$: 정상상태의 소재의 장력
- V_n : 정상상태 값으로 부터의 소재의 속도 변화
- $V_{n,0}$: 정상상태의 소재의 속도

첨자

- 0 : 정상상태
- n : 1, 2, 3, ... 그리고, u, f, r, w .
- u : 풀림롤(unwinder)
- f : Front Drum Roll(FDR)
- r : Rear Drum Roll(RDR)
- w : 감김롤(본 논문에서는 쉽롤)



최 승 규
 1971년 6월 24일생. 1996년 광운대 제어계측공학과 졸업. 1996~1997년 LG산전 인천설계실. 2000년 광운대학교 동대학원 제어계측공학과 석사졸업. 현재 LG전자 디지털미디어 연구소 DST팀 주임연구원



이 동 빈
 1963년 4월 3일생. 1992년 광운대 전자통신공학과 졸업. 1992~1997 (주)쌍용정공 연구소 근무. 2000년 광운대 대학원 제어계측공학과 석사졸업. 2000년 동대학원 박사과정.



임 화 영
 1947년 4월 19일생. 1973년 한양대학교 전기과 졸업. 1976년 동대학원 전기과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기과 졸업(박사). 1982년~98년 광운대학교 전기과교수. 1988년~현재 광운대학교 제어계측공학과 교수 및 공대학장.