

〈논 문〉

## 접압롤을 이용한 권취장력의 비선형 PID 제어

신기현\* · 김규태\*\* · 천성민\*\*

(1997년 10월 23일 접수)

### A Nonlinear PID Control of Winding Tension Using Contact Roll

K. H. Shin, K. T. Kim and S. M. Cheon

**Key Words :** Web(웹), Contact Roll(접압롤), NPID Controller(비선형 PID 제어기), Winding Tension(권취장력)

#### Abstract

In a web winding process, the contact roll plays many important roles including air-entrainment control and WIT(Wound In Tension) regulation. The behavior of contact roll significantly affects the winding tension characteristics specifically at the time of contact when the speeds of contact roll and the winding roll are not synchronized. A mathematical model for the web, the winding roll, and the contact roll is derived. By using the model derived, a nonlinear PID(NPID) controller is designed to control the winding tension at the time of contact and separation between the contact roll and the winding roll. Computer simulation study showed that the performance of the winding system with the NPID controller was significantly improved compared with that of a system with PID controller.

#### 기 호 설 명

$A$	: 소재 단면적	$u_1$	: 조작량
$b$	: 점성마찰계수	$v$	: 속도
$B$	: 웹 · 실린더 감쇠계수	$V$	: 정상상태로부터의 속도변화
$E$	: 소재 탄성계수	$\alpha, \beta$	: 제어제인 설계를 위한 상수
$e$	: 장력변화 에러	$\mu$	: 접압롤과 권취롤사이 표면마찰계수
$F$	: 마찰력	$\tau$	: 구동토크 변화량
$f_n$	: 접압력 변화	첨자	
$J$	: 롤 관성모멘트	$p$	: 실린더
$K$	: 스프링상수	$w$	: 권취롤
$k$	: Actuator gain		
$L$	: 스패ん길이(롤사이의 소재길이)		
$m$	: 질량		
$R$	: 롤반경		
$T$	: 정상상태로부터의 장력변화		

#### 1. 서 론

웹(web)을 가공하는 다중스팬 연속공정 시스템(multi-span continuous process system)은 풀림롤(unwinding roll)과 권취롤(winding roll) 그리고 많은 구동롤(driven roll)과 보조롤(idle roll)로 구성

\*회원, 건국대학교 기계설계학과

\*\*건국대학교 대학원 기계설계학과

된다. 웹은 풀림롤에서 권취물로 이동되면서 다양한 공정을 거치며, 이때 경유하는 스펀들에서 웹의 장력유지와 시스템 전체의 안정화는 중요한 제어문제가 된다. 특히 소재를 감는 권취공정에서는 시간이 지남에 따라 권취롤의 반경이 변하고, 권취물의 질량 및 관성모멘트가 변하며, 권취물의 기동과 정지시 웹의 속도가 가·감속구간을 갖는 등의 장력 변화요인이 존재한다. 그리고 접압롤(contact roll)의 접촉과 떨어짐, 님롤(nip roll)의 이동, 웹 커팅(cutting), 연속적인 권취롤 교체를 위한 터렛(turret)회전 등을 통해 소재의 장력은 변화하게 되고 권취물의 품질도 영향을 받는다.

권취공정에서 접압롤은 권취물에 접압력(contact force)을 가하여 권취되는 웹 층(layer)사이로의 공기유입(air entrainment)을 줄이고, WIT(Wound In Tension)을 조절하는 중요한 기능을 가지고 있다. 하지만, 회전하고 있는 권취롤과 접압롤이 접할 때 두 롤 사이의 정확한 속도동기는 어려운 문제이며, 두 롤의 속도차로 인해 접압력에 비례하는 마찰력이 발생하게 된다. 따라서 급격한 접압력의 변화는 마찰력을 유발하며 권취물의 구동토크의 갑작스러운 변화를 초래하여 권취장력의 동특성을 크게 악화시킬 수 있다.

웹의 장력제어와 웹 이송시스템(web transport system)에 대한 연구는 Granfell 이래 꾸준히 지속되어왔다.<sup>(1,3,4~6)</sup> 또한, 기동 및 정지시 권취물의 소재장력에 관한 연구,<sup>(6)</sup> 접압롤의 접압력과 권취롤의 WIT와의 관계에 대한 해석,<sup>(7,8)</sup> 그리고, 접압력의 동특성 변화와 권취장력 변화와의 관계에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 접압롤에 의한 접압력이 권취물로 전달되는 현상을 표현하는 접압력 발생기구에 관한 수학적 모델링을 수행하였다. 접압력 발생기구는 권취롤과 캐리지(carriage)와 접압롤로 이루어져 있으며, 권취롤의 최종 품질에 큰 영향을 미친다. 접압력 발생기구의 모델을 기존의 장력, 속도 모델과 결합하여, 연속공정 시스템의 장력거동에 관한 새로운 수학적 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 이용하여 접압롤이 접하고 떨어지는 순간에 발생하는 권취장력의 변화를 최소화할 수 있는 제어전략을 세우고, NPID(Nonlinear PID) 제어기를 설계하여 그 성능을 PID 제어기의 성능과 비교 평가하였다. 본 논문에서 설계된 NPID 제어기는 시스템의 출력을 관찰하여 출력이 레퍼런스(reference)로

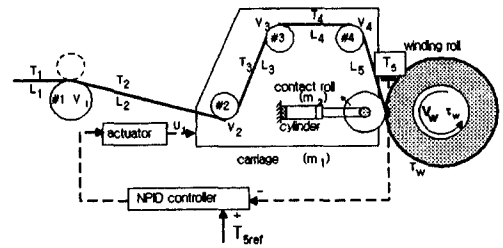


Fig. 1 Winding system configuration including winding roll, contact roll, and carriage

부터 떨어질 때는 조작량을 증가시키고, 반대의 경우에는 조작량을 감소시켰다.

시뮬레이션 연구결과, NPID 제어기는 이득값을 구하기에 비교적 용이하면서도 권취롤의 상태를 비롯한 시스템의 조건이 변하더라도 일반적인 PID 제어기에 비해 권취장력의 변화를 줄이고, 정착시간(settling time)을 줄이는데 있어서 성능이 우수함을 알 수 있었다.

## 2. 수학적 모델링

본 연구에서 대상으로 한 접압롤이 설치된 캐리지부와 권취롤에 대한 일반적인 시스템은 Fig. 1과 같다. 웹은 구동롤(#1)로 들어와 캐리지 안의 보조롤(idle roll, #2, #3, #4)들을 지나 권취롤에 감기게 된다. 권취롤에 웹이 감길 때 캐리지가 전진하여, 캐리지상에 유압 혹은 공기실린더로 지지되어 있는 접압롤을 권취롤에 접하게 하고 접압력을 가하게 한다. 권취공정 중에는 권취장력( $T_w$ )을 제어하기 위하여 계속적으로 적절한 접압력을 유지시키고, 권취공정이 끝나게 되면 캐리지는 후퇴되고, 권취 완료된 롤이 새로운 롤로 대체된다.

접압롤에 의하여 접압력이 권취롤에 가해질 때, 회전하고 있는 접압롤의 속도와 권취롤의 속도가 일치하지 않을 경우 마찰력( $F$ )이 두 롤사이에 발생한다. 접압롤의 접선방향 속도가 권취롤의 속도보다 큰 상태에서 두 롤이 접한다고 가정하고, 권취롤에 대한 자유물체도를 그리면 Fig. 2와 같다.

$f_n$ 은 접압롤이 권취롤과 접점에서 롤러의 반경방향으로 작용하는 접압력이고,  $F$ 는 두 롤의 비동기로 인해 생기는 마찰력이다.  $T_w$ 는 권취롤에 감기는 장력,  $\tau_w$ 는 권취롤을 구동하는 토크이다.  $R_w$ 는 권취롤의 반경이며,  $J_w$ 는 권취롤의 관성모멘트이다.  $F$ 는  $\tau_w$ 를 변화시키고 권취장력을 변화시킨다.

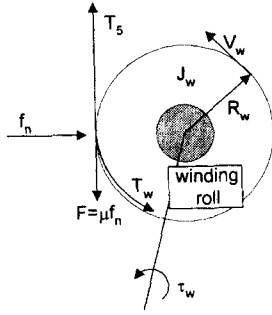


Fig. 2 Free body diagram for the winding roll

결국 접압롤이 권취롤에 접할 때 발생하는 권취장력의 변화는 두 롤의 접선속도와 롤 표면마찰계수의 크기, 두 롤 사이에 발생하는 접압력의 크기에 비례해서 달라진다. 생산현장에서 권취롤에 접압력을 가할 때, 일반적으로 접압 초기에는 권취롤과 접압롤의 접선방향 속도는 일치하지 않고, 두 롤이 접한 후에 속도동기가 이루어지고 있으며, 따라서 이 속도 불일치에 의한 권취장력 변화는 매우 심한 것으로 관측되었다.

Fig. 2의 자유물체도를 이용하여 Shin<sup>(1)</sup>의 웹에 대한 속도모델과 장력모델을 확장하면 식 (1), (2)와 같은 권취롤에 대한 선형화된 장력모델과 속도 모델을 구할 수 있다.

$$-\frac{d}{dt} [T_5(t)] = -\frac{v_{w0}}{L_5} T_5(t) + \frac{v_{40}}{L_5} T_4(t) + \frac{AE}{L_5} (V_w(t) - V_4(t)) \quad (1)$$

$$J_w \dot{V}_w(t) = -b_w V_w(t) + R_w^2 (T_w(t) - T_5(t)) + R_w (\tau_w + FR_w) \quad (2)$$

식 (2)에서  $FR_w^2$ 은 마찰력에 의한 구동토크 변화를 의미한다. Fig. 1의 연속공정 시스템에서 #1 롤과 #4 롤사이의 소재 장력과 물러속도에 대한 모델을 구하고 선형화하면 식 (3)~(9)로 나타낼 수 있다.<sup>(1)</sup>

$$J_1 \dot{V}_1(t) = -b_1 V_1(t) + R_1^2 (T_2(t) - T_1(t)) + R_1 \tau_1 \quad (3)$$

$$-\frac{d}{dt} [T_2(t)] = -\frac{v_{20}}{L_2} T_2(t) + \frac{v_{10}}{L_2} T_1(t) + \frac{AE}{L_2} (V_2(t) - V_1(t)) \quad (4)$$

$$J_2 \dot{V}_2(t) = -b_2 V_2(t) + R_2^2 (T_3(t) - T_2(t)) \quad (5)$$

$$-\frac{d}{dt} [T_3(t)] = -\frac{v_{30}}{L_3} T_3(t) + \frac{v_{20}}{L_3} T_2(t)$$

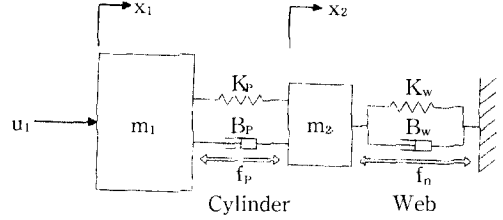


Fig. 3 Simplified model of contact roll, winding roll, and carriage

$$+ \frac{AE}{L_3} (V_3(t) - V_2(t)) \quad (6)$$

$$J_3 \dot{V}_3(t) = -b_3 V_3(t) + R_3^2 (T_4(t) - T_3(t)) \quad (7)$$

$$-\frac{d}{dt} [T_4(t)] = -\frac{v_{40}}{L_4} T_4(t) + \frac{v_{30}}{L_4} T_3(t) + \frac{AE}{L_4} (V_4(t) - V_3(t)) \quad (8)$$

$$J_4 \dot{V}_4(t) = -b_4 V_4(t) + R_4^2 (T_5(t) - T_4(t)) \quad (9)$$

Fig. 1의 캐리지부의 접압롤이 권취롤에 접하고 떨어질 때, 접압롤의 동특성을 해석하기 위한 권취롤, 접압롤 및 캐리지부에 대한 단순화된 모델은 Fig. 3과 같다. 캐리지부 전체의 질량을  $m_1$ , 접압롤의 질량을  $m_2$ 로 나타내고, 접압롤을 지지하고 있는 실린더 부분을 스프링과 댐퍼로, 권취롤에 감긴 소재를 댐퍼와 스프링으로 모델링하였다.  $u_1$ 은 캐리지에 인가되는 힘을 나타낸다.  $f_p$ 는 접압롤에 가해지는 힘,  $f_n$ 은 접압롤과 권취롤 사이의 반력, 즉 접압력을 나타낸다. Fig. 3의 모델에 대하여 뉴턴의 제2법칙을 적용하면 식 (10)~(13)으로 표현되는 수학적 모델을 구할 수 있다.

$$m_1 \ddot{x}_1 + B_p (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_p (x_1 - x_2) = u_1 \quad (10)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + B_w \dot{x}_2 + k_w x_2 = B_p (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_p (x_1 - x_2) \quad (11)$$

$$f_p = B_p (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_p (x_1 - x_2) \quad (12)$$

$$f_n = B_w \dot{x}_2 + k_w x_2 \quad (13)$$

### 3. 제어기 설계

권취장력제어의 제어루프(control loop)에 대한 블록다이아그램(block diagram)은 Fig. 4와 같다. 실험에 대비하여 제어기 출력신호가 10 Hz 저주파 통과필터(low-pass filter)를 거친 후, 캐리지를 구동시키는 액츄에이터 출력 힘( $u_1$ )이 되도록 제어루프를 구성한다. 본 논문에서 제안된 NPID 제어기

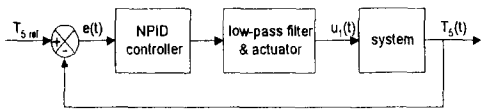


Fig. 4 Block diagram for the closed-loop tension control system

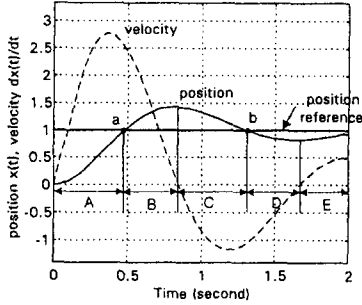


Fig. 5 Step response showing position (x) and velocity (dx/dt)

의 구조는 식 (14), (15)와 같다.

$$u(t)_{NPID} = k(K_n e - B_n \dot{e}) + kK_i \int_0^t e dt \quad (14)$$

$$e(t) = T_s ref - T_s \quad (15)$$

$K_n$ 과  $B_n$ 은 이후 제안되는 비선형함수에 의해 정해지는 제어이득이며,  $K_i$ 는 적분이득이다.  $k$ 는 구동기 이득(actuator gain)이다.  $e$ 는 장력 레퍼런스와 장력의 차이를 나타낸다. 식 (14)와 같이 NPID 제어기의 구조는 기존의 PID 제어기의 구조와 다른점은 없다. 하지만 NPID 제어기의 제어이득이 식 (16)과 같은 형태의 비선형함수에 의하여 정해진다. NPID 제어의 기본개념은 “서로상충되는 효과를 유발하는 PID 제어기의 비례이득(proportional gain)과 미분이득(derivative gain)의 조합을 어떻게 정하는 것이 시스템에 대한 과도반응을 최적화할 수 있는가”라는 질문으로부터 시작된다. 제안된 NPID 제어에서는 변수의 변화를 관찰하여 그 변화추이에 따라 비례이득 및 미분이득을 조정함으로써 시스템의 과도반응을 개선하고자 하는 것이다.

단일질량 시스템의 위치를 제어하는 예제를 통하여, NPID 제어기를 설계하기 전에 먼저 NPD (Non-linear Proportional and Derivative) 제어기의 기본 개념을 쉽게 설명할 수 있다. Fig. 5는  $M(d^2x/dt^2) = f_u + f_d$ 와 같이 정의되는 시스템에 대한 단위계단응답(unit step response)을 그린 것이다. 여기서,  $f_d$ 는 외란입력힘이고,  $f_u$ 는 제어입력힘이다. PD 제어기를 사용하여 제어입력은  $f_u = K \cdot e_p$

+  $B \cdot e_v$ 로 준다. 이때  $x_d$ 는 레퍼런스 위치이고, 에러는  $e_p = x_d - x$ ,  $e_v = dx_d/dt - dx/dt$ 와 같이 정의한다.

위치오차가 클때는, 제어입력량  $f_u = K \cdot e_p + B \cdot e_v$  중에서 위치오차를 줄이기 위한 비례이득항  $K \cdot e_p$ 가 큰 비중을 차지하며, 위치오차가 작을때는 제어입력량 중에서 미분이득항  $B \cdot e_v$ 가 큰 비중을 차지한다. 또한, Fig. 5의 a와 b에서와 같이 위치오차가 제로가 될 때에도 속도오차는 아직 최고치에 가까운 값에 머물고 있음을 알 수 있다. 따라서 위치오차가 작지만 증가하는 추세(Fig. 5의 B, D 구간)일 때는 미분이득항(댐핑)의 비중을 더욱 증가시켜야 한다. 이러한 제어기 설계의도를 반영할 수 있는 함수를 식 (16)과 같이 정의할 수 있다.<sup>(2)</sup>

$$B_n = \frac{B_1}{1 + \beta \exp^{\alpha e e}} + B_0 \quad (16)$$

식 (16)에서  $B_1$ ,  $B_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 상수이다.  $B_1$ 값의 최대값과 최소값은 각각  $B_1 + B_0$  및  $B_0$ 이다.  $\beta$ 는  $B_1$ 값이 최대( $\beta$ 가 작을 때) 혹은 최소( $\beta$ 가 클때) 값 중 어느 값에 더 가깝게 될지를 결정한다. 식 (16)의 가장 중요한 기능은 시스템의 거동이 오차가 증가하는 방향으로 진행될 때(Fig. 5의 B, D 구간)는 미분이득을 증가시키고, 오차가 감소하는 방향으로 진행될 때(Fig. 5의 A, C, E 구간)는 미분이득을 감소시키는 등 시스템의 거동추이에 따른 제어기의 미분이득 조정범위를 제공할 수 있다는 것이다. 시변시스템이나 외란은 일반적으로 시스템 거동의 오차를 증가시키므로 식 (16)과 같은 비선형제어기가 외란 및 시스템 파라미터변화에 따른 악영향을 시스템으로부터 제거하는데 더욱 효과적일 것이다.

웹의 감감에 의한 권취률 질량의 변화, 접압물의 접촉 및 분리 등 시변(time-varying) 비선형(non-linear)시스템의 특성을 해석하기 위하여 본 논문에서는 고정 미분이득대신 비선형함수인 식 (16)을 변형하여 미분이득함수로 사용하기로 하였다. 제어변수인 장력변화( $T_s$ )의 경향을 보다 쉽게 제어케인의 변화에 반영하고, 함수에 들어가는 계산식을 줄이기 위하여  $e$ 대신에  $dT_s/dt$ 를 사용하여 미분제어이득을 결정하는 새로 정의한 미분이득함수는 식 (16')과 같다. 또한 실제로 장력변화의 시간변화율이 매우 커지는 경우 지수(exponential)항을 너무 크게 함으로, 식 (16')에서와 같이 장력변화의 시간변화율의 부호만을 사용하도록 하였다.

$$B_n = \frac{B_1}{1 + \beta \exp^{\alpha \operatorname{sign}(dT_s/dt)e}} + K_o \quad (16')$$

유사한 관점에서, 고정 비레이드 대신 비선형함수인 식 (17)을 비레이드함수로 사용할 수 있다. Fig. 5의 B, D 구간에서 비레이드를 증가시킴으로써 시스템의 성능은 개선되며, 이는 정상상태오차 개선에 특히 유용하다. 이와 같이 기존의 PID 제어기와는 달리 NPID 제어기의 비레이드 및 미분이득이 시스템의 성능을 서로 보완하도록 정하여질 수 있다.

$$K_n = \frac{K_1}{1 + \beta \exp^{\alpha \operatorname{sign}(dT_s/dt)e}} + K_o \quad (17)$$

NPID 제어기는 제어제인의 비선형성에 의해 시스템의 비안정성을 초래할 수도 있다. 비선형제어제인을 가지는 2차 시스템에 대한 Lyapunov 함수를 찾아, 시스템의 안정성을 검증하여 보자. 식 (18)과 같은 2차 시스템에서 B와 K는 system의 내부 damping과 stiffness 계수이고, 양의 상수이다.

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = f_u \quad (18)$$

$$f_u = -\left(\frac{K_1}{1 + \beta_K \exp^{\alpha_K \operatorname{sign}(x)e}} + K_o\right)x - \left(\frac{B_1}{1 + \beta_B \exp^{\alpha_B \operatorname{sign}(\dot{x})e}} + B_o\right)\dot{x} \quad (19)$$

식 (19)와 같이 NPID 제어기의 제인을 사용하여 제어입력( $f_u$ )을 만든다. 제어제인  $K_1$ ,  $K_o$ ,  $B_1$ ,  $B_o$ 는 양의 상수로 선정하고, 설계파라미터인  $\alpha$ 와  $\beta$ 도 양의 상수이다. 여러 계수와 sign 함수로 구성되는 exponential 함수는 항상 양의 값을 갖는다. 식 (18), (19)은 식 (20), (21), (22)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$M\ddot{x} + B[x, \dot{x}]\dot{x} + K[x, \dot{x}]x = f_u \quad (20)$$

$$K[x, \dot{x}] = \frac{K_1}{1 + \beta_K \exp^{\alpha_K \operatorname{sign}(x)x}} + K_o + K \quad (21)$$

$$B[x, \dot{x}] = \frac{B_1}{1 + \beta_B \exp^{\alpha_B \operatorname{sign}(\dot{x})\dot{x}}} + B_o + B \quad (22)$$

식 (20)이 나타내는 시스템의 total energy는 식 (23)과 같이 나타낼 수 있고, 이것의 1차 미분은 식 (24)와 같다.

$$V = \int K[x, \dot{x}]x \, dx + \frac{1}{2}M\dot{x}^2 \quad (23)$$

Table 1 Control gains

PD	NPD	
K=1.1	$K_j=2.5$	$\alpha=1$
B=0.1	$K_o=1$	$\beta=100$
$K_j=10$	$B_j=3$	$K_j=10$
k=2	$B_o=0.1$	k=2

$$\begin{aligned} \dot{V} &= K[x, \dot{x}]x\dot{x} + M\dot{x}\ddot{x} \\ &= -B[x, \dot{x}]\dot{x}^2 \end{aligned} \quad (24)$$

식 (22)에 주어진  $B[x, \dot{x}]$ 은 항상 양수이다. Lyapunov 정리에 따라,  $\dot{V} \leq 0$ 이므로 NPID 제어기를 가지는 2차 시스템은 안정하다고 말할 수 있다. 선형 고차 시스템에 대해서 NPID 제어기를 적용하여도 안정성은 보장받을 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션

정상 운전상태에서 소재 장력은 294 N이며, 기준 권취장력 변화( $T_{s \text{ ref}}$ )는 10 N으로 가정하였다. 접압롤이 권취롤에 접했을 때 권취장력 변화( $T_s$ )가 기준값( $T_{s \text{ ref}}$ )을 추종하는 과도 상태를 분석하여 PID 제어기와 NPID 제어기의 성능을 비교한다. PID 제어기 이득과 NPID 제어기 이득은 상대적으로 웹이 권취롤에 적게 감긴 상태( $K_w=1.5 \times 10^5 \text{ N/m}$ ,  $B_w=700 \text{ N/ms}^{-1}$ )에서 접압롤이 권취롤에 접촉하는 것으로 가정하고 선정된 값으로 Table 1과 같다.

NPID 제어기의 제어이득을 구하기 위하여 우선 PID 제어기의 이득을 근계적법을 사용하여 구하였다. 그리고 근계적상의 안정한 범위의 극점을 선정하여 그때의 비레이드와 미분이득을 NPID 제어기의 이득으로 선정하였다.

권취초기에 코어의 소재에 따라 권취롤의 상태가 변화할 수 있으므로 초기조건을 변화시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 권취가 진행된 권취말기에 접압롤이 권취롤로부터 떨어지는 현상에 대하여 시뮬레이션하였다. 권취말기에는 권취롤의 직경이 커지므로  $K_w$ ,  $B_w$ 값과 권취롤의 질량을 변화시켜 권취말기 상태를 모델링하였다. 또한 웹 소재종류나 웹이 감긴 정도, WIT에 따라 변화하는 권취롤의 상태 변화를 고려하여 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에 사용된 각 상수 값들은 현장에서 사용되는 전형적

인 값들로서 Table 2와 같다.

4.1 권취초기 권취률에 접압물이 붙을 때

접압물이 권취롤에 접할때, 권취초기의 권취률 상태는 상대적으로 강성이 크고, 감쇠계수가 작다. 권취초기 권취률 표면특성을  $K_w=1.5 \times 10^5 \text{ N/m}$ ,  $B_w=700 \text{ N/ms}^{-1}$ 로 가정하였다. Fig. 6은 이 조건에서 PID와 NPID 제어를 이용한 시뮬레이션 결과이다. 권취초기 권취률에 접압물이 접할때, 기준 권취장력 변화( $T_{s \text{ ref}}=10 \text{ N}$ )로 수렴되는 권취장력

Table 2 Simulation parameters

$D_1$	0.3 m	A	$5.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
$D_2, D_3, D_4$	0.2 m	E	$2.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
$L_1$	0.45 m	$V_o$	6.67 m/s
$L_2$	1.15 m	$b_w$	0.1
$L_3$	0.39 m	$\mu$	0.3
$L_4$	0.4 m	$m_1$	500 kg
$L_5$	0.4 m	$m_2$	100 kg
$J_1$	$7.7106 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$K_p$	100000 N/m
$J_2, J_3, J_4$	$1.8933 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$B_p$	$2000 \text{ N/ms}^{-1}$

변화( $T_s$ )는 NPID 제어를 이용하여 제어될 경우, PID 제어기에 의해 제어된 권취장력 변화( $T_s$ )에 비해 같은 상승시간을 가지면서도 과도변화의 크기가 작고, 정상상태 수렴시간이 약간 빠름을 알 수 있다. Fig. 7은 같은 조건에서 권취률의 속도 변화이다. 권취장력이 NPID 제어기에 의하여 제어될 때, PID 제어기에 비하여 권취률의 초기속도 변화가  $0.1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  정도 커졌다. 이것은 NPID 제어기의 제어노력(control effort)이 PID 제어기의 제어노력보다 더 크다는 것을 의미하며, 결국 장력의 수렴속도가 빠르게 나타난 것과 연관된 경향을 나타내고 있다.

현장에서 사용되는 권취롤의 코어의 소재는 종이, 플라스틱, 스틸 등 다양하며, 이것은 시뮬레이션조건중  $K_w$  값의 변화로 나타낼 수 있다. 코어의 소재의  $K_w$ 값을 바꾸어 시뮬레이션한 결과는 Fig. 8(a), (b)와 같다. NPID 제어기에서 사용한 비선형 미분이득함수는 댐핑효과를 개선할 뿐만아니라, 위치오차가 작아지기 전까지 댐핑을 적게 적용하므로 상승시간(rise time)도 감소시킨다. 이러한 비선형 미분이득함수의 특성으로 인하여, Fig. 8(a), (b)에서는 PID 제어기보다 NPID 제어기에서 응답의 수렴속도가 빠르다는 것을 뚜렷하게 보여준다. 그러므로 NPID 제어기는, 필요에 따라 시스

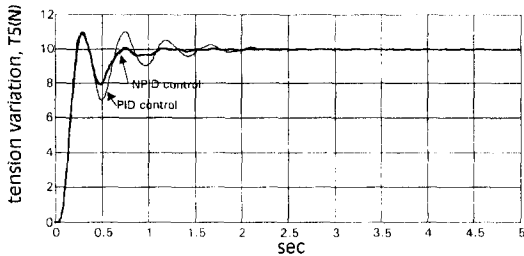
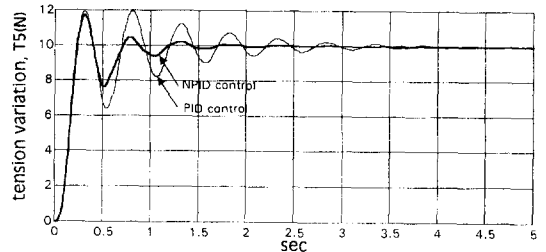


Fig. 6 Winding tension variation ( $K_w=1.5 \times 10^5 \text{ N/m}$ ,  $B_w=700 \text{ N/ms}^{-1}$ )



(a)  $K_w = -1.0 \times 10^5 \text{ N/m}$

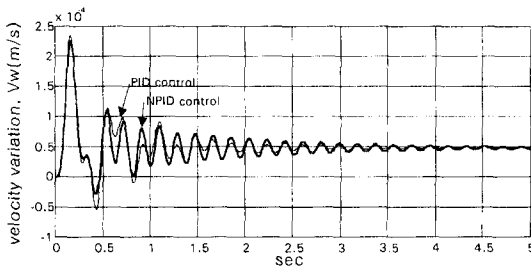
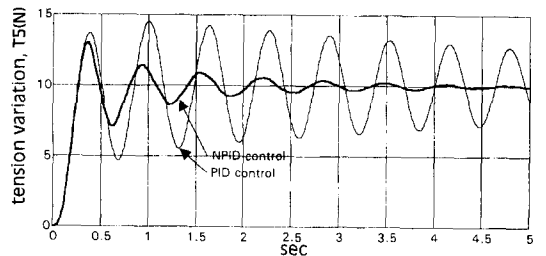


Fig. 7 Winding velocity variation ( $K_w=1.5 \times 10^5 \text{ N/m}$ ,  $B_w=700 \text{ N/ms}^{-1}$ )



(b)  $K_w = 0.5 \times 10^5 \text{ N/m}$

Fig. 8 Winding tension variation ( $B_w=700 \text{ N/ms}^{-1}$ )

템에서 코어의 소재가 변화될 경우에도 PID 제어기보다 나은 성능을 보장함을 알 수 있다.

4.2 권취말기 권취롤에서 접압롤이 떨어질 때

권취가 진행되어 풀반경이 증가함에 따라 소재의 쿠션(cushion)효과로 인하여, 권취초기 모델에서 권취롤의 상태를 나타내었던 강성은 상대적으로 작아지고, 감쇠계수는 상대적으로 커진다. 따라서, 권취가 진행되면서 권취롤의 상태가 변하는 것을 권취물 표면의 강성과 감쇠계수의 파라미터 변화로 표현할 수 있다. 그러한 이유로 권취롤의 권취말기 표면상태를 초기에 비해 작은 강성( $K_w=0.5 \times 10^5$  N/m), 비교적 큰 감쇠계수( $B_w=1300$  N/ms<sup>-1</sup>), 권취롤의 질량관성모멘트가  $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  증가한다고 가정하였다. 권취초기의 권취롤 상태에서 선정된 제어이득을 갖는 PID, NPID 제어기를 그대로 사용하여 접압롤이 권취롤에서 떨어질 경우, 권취장력 제어성능을 평가한다. Fig. 9은 접압롤이 권취롤에서 떨어질 때, 기준 권취장력 변화( $T_{s \text{ ref}}$ )가  $-10$  N일 때의 결과이다. PID 제어기에 의해 제어된 권취장력 변화는 5초가 지난 후에도 정상상태로 수렴되지 못한다. Fig. 6과 Fig. 9의 비교를 통

해 권취롤에 접압롤이 붙을 경우와 떨어질 경우, PID와 NPID 제어기의 제어성능에 변화가 있음을 알 수 있다. 즉, 권취공정 중에는 권취롤의 상태변화와 권취롤의 질량증가 등 다양한 변화(time-varying system)가 동시에 발생할 수 있으며, 이러한 시변(time-varying) 시스템에서 PID 제어기에 대한 NPID 제어기의 권취장력제어 성능차이가 더욱 현저함을 알 수 있었다. 권취말기 권취롤에서 접압롤이 떨어질 때, 권취롤의 속도변화는 Fig. 10과 같다. 권취초기의 경우(Fig. 7)와 비교하여, Fig. 10에서 권취롤의 속도변화의 차이가 더 심해진 것을 볼 수 있다. 시스템이 변화되었음에도 불구하고 원하는 제어성능을 보장하기 위하여, NPID 제어기

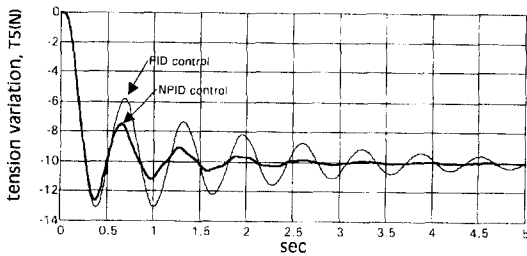


Fig. 9 Winding tension variation ( $K_w=0.5 \times 10^5$  N/m,  $B_w=1300$  N/ms<sup>-1</sup>,  $\Delta J_w=2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ )

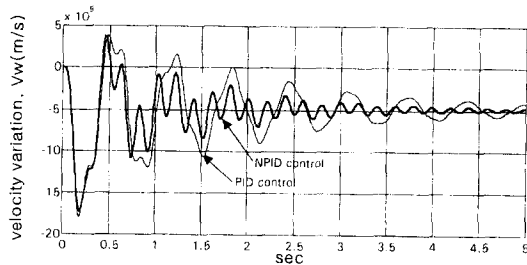
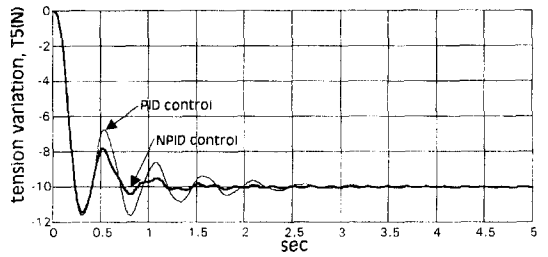


Fig. 10 Winding velocity variation ( $K_w=0.5 \times 10^5$  N/m,  $B_w=1300$  N/ms<sup>-1</sup>,  $\Delta J_w=2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ )

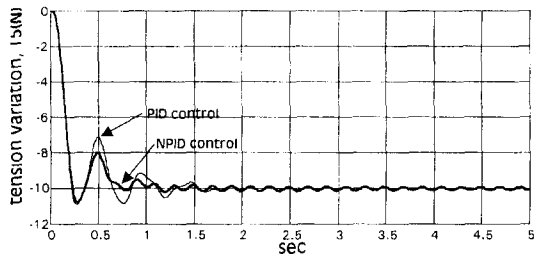


Fig. 11 Winding tension variation ( $B_w=1300$  N/ms<sup>-1</sup>,  $\Delta J_w=2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ )

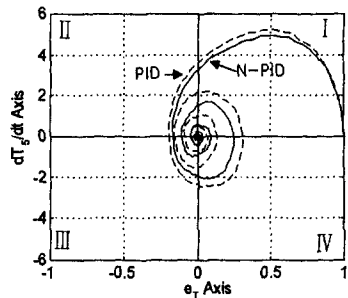


Fig. 12 Phase plane plot of the  $dT_5/dt$  vs. tension variation error  $e_T$

의 제어노력(control effort)이 PID 제어시스템에 비해, 더욱 강화되었음을 보여준다.

웹이 권취롤에 감길 때, WIT(Wound In Tension)가 작다면 권취롤의  $K_w$ 는 상대적으로 작은 값을 가질 것이라고 예상할 수 있다. 이러한  $K_w$ 의 변화에 대한 시뮬레이션의 결과는 Fig. 11(a), (b)와 같다. Fig. 11에서도 앞의 시뮬레이션 결과와 같이 PID 제어에 비하여 NPID 제어시에 빠른 수렴속도를 가짐을 알 수 있다.

마지막으로, Fig. 12는 권취초기 권취롤에 접압롤이 붙을 때의 장력제어에서 PID 제어기를 사용했을 때보다 NPID 제어기를 사용했을 때의 제어 성능을 비교한  $e_T-dT_S/dt$  phase plane plot이다.

NPID 제어기는 시스템의 상태변수의 변화추이에 따라 제어게인의 선정을 유동적으로 하므로 제어기에 지능을 부여했다고 할 수 있다. 제어기 설계자가 필요로 하는 더 많은 상태변수의 변화를 민감하게 고려하는 함수를 고안한다면, 더 복잡한 시스템에 대해서도 일반적인 제어기보다 빠른 수렴속도, 오버슈트의 빠른 감쇠와 같은 제어성능을 얻을 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 권취공정에서 접압롤이 권취롤에 붙고 떨어질 때, 발생하는 권취롤의 토크변화에 따른 권취장력의 변화를 줄이기 위한 제어전략을 제시하였다. 이를 위해 권취롤, 접압롤, 캐리지를 포함하는 접압력 발생기에 관한 수학적 모델을 유도하고 기존의 장력모델, 속도모델을 확장하여 두 모델을 통합함으로써 접압력 발생기를 포함하는 연속공정 시스템에 대한 새로운 수학적 모델을 개발하였다. 또한 제어대상 시스템의 파라미터가 변화하고 접압롤이 붙고 떨어지는 등의 비선형적인 상황을 극복하기 위하여 비선형 제어기인 NPID(Non-linear PID) 제어기를 제안하였다. NPID 제어기는 출력의 경향에 따라 그에 적절한 제어이득을 조정할 수 있다. 그러한 NPID 제어기는 PID 제어기에 비해, 제어된 변수값(value of a controlled variable)의 상승시간과, 동시에 정착시간을 줄일 수 있다.

시뮬레이션 연구를 통해, 권취 초기와 말기, 접압롤이 권취롤에 붙을 때와 떨어질 때의 PID, NPID 제어기의 제어성능을 비교하였다. 접압롤이

권취롤에서 접할 때와 떨어지는 경우, NPID 제어기가 PID 제어기에 비해 성능이 우수하였다. 그리고 권취롤의 상태가 변한 권취말기에 접압롤이 떨어질 때에는 그 성능차이가 더 심하였다. 여러 조건에 대한 시뮬레이션을 통해 NPID 제어기는 PID 제어기보다 더 나은 성능을 가진다는 것을 볼 수 있었다. 이것은 출력의 경향에 대해 제어 조작량을 좀더 동적으로 변화시킬 수 있는 NPID 제어기의 특성에서 기인한다. 반면에, NPID 제어기에 의하여 권취장력이 제어될 때 권취롤의 속도는, PID 제어기 이용시에 비하여 더 급격한 변화를 가진다. 이것은 비선형적으로 변화하는 제어입력을 제공하기 위한 현상이다. 실제 시스템 구현시에는 이러한 속도변화를 보장할 수 있는 충분한 용량의 구동모터와 고속연산이 가능한 프로세서가 필요하게 된다.

## 후 기

본 연구를 위한 연구비의 일부는 건국대학교 학술진흥처로부터 지원되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Shin, K. H., 1991, "Distributed Control of Tension in Multi-Span Web Transport Systems," Ph. D. Thesis Oklahoma State Univ.
- (2) Xu, Y., Ma D. and Hollerbach, J. M., 1993, "Nonlinear Proportional and Derivative Control for High Disturbance Rejection and High Gain Force Control," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Atlanta, pp. 752~759.
- (3) Grenfell, K. P., 1963, "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.
- (4) Wolfman, W. and Schroder, D., 1987, "Application of Decoupling and State Control in Processing Machines with Continuous Moving Webs," *Proc. International Federation of Automatic Control*, Munhen.
- (5) Reid, K. N., Shin, K. H. and Lin, K. C. 1992, "Variable-gain Control of Longitudinal Tension



- in a Web Transport System," *Web Handling, ASME. AMD*, Vol. 149.
- (6) Reid, K. N. and Lin, K. C., 1995, "Control of Longitudinal Tension in Multi-Span Web Transport Systems during Start Up," *Pro. on 3rd. Int. Conf. on Web Handling*, pp. 77~95.
- (7) Pfeiffer, David J., 1968 "Mechanics of a Rolling Nip on Paper Webs," *Tappi*, Vol. 51, No. 8, pp. 77A~85A
- (8) Pfeiffer, David J., 1977, "Nip Forces and Their Effect on Wound-in Tension," *Tappi*, Vol. 60, No. 2, pp. 115~117
- (9) Xu, Y., Ma, D. and Hollerbach, J. M., 1994, "Force and Contact Transient Control Using Nonlinear PD Control," *IEEE*, pp. 924~930.