

본 연구는 건국대학교 학술진흥처의 연구비지원으로 수행되었습니다.

접압롤 및 보조nip롤이 있는 권취공정에서의 장력의 비선형 PID제어

신기현*, 김규태**, 천성민***

Non-linear PID Tension Control in a Winding Process with a Contact Roll and a Nip Roll

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

ABSTRACT

The contact roll is often used to regulate the winding tension as well as the entrained air in a wound roll by adjusting the contact force to the winding roll. But the contact force generated by other rolls, like assistant nip rolls, in a winding(or roll changing) process may act as disturbance to the control of the winding tension. In this paper, the mechanism of a roll change process is analyzed. And, the behavior of the contact and the nip rolls are mathematically modeled. A nonlinear PID(NPID) controller is designed to control the winding tension and to reject the effect of disturbance generated by the nip roll on the winding tension variation. Computer simulation study showed that the performance of the suggested NPID controller is improved compared with that of the PID controller in controlling the winding tension and in rejecting the effect of the disturbance.

Key Words : Web (웹), Roll Change Process (권취롤 교환 공정), Contact Roll (접압롤), Nip Roll (보조nip롤), NPID Controller (비선형 PID 제어기), Winding Tension (권취장력)

기 호 설 명	_____
A	소재 단면적
b_f	점성마찰계수
$b_{w,c}$	모델링에 사용된 감쇠 상수
$B_{n,0.1}$	NPID제어기에서의 게인 상수
D	롤 직경
E	소재 탄성계수

e	장력변화 에러
F	마찰력
f	접압력 변화
J	롤 관성모멘트
$k_{w,c}$	모델링에 사용된 스프링 상수
$K_{n,0.1}$	NPID제어기에서의 게인 상수
k	액츄에이터 게인 상수

* 건국대학교 기계공학부
 ** 한국타이어
 *** 건국대학교 기계공학부 대학원

L	스팬 길이 (롤 사이의 소재 길이)
m	질량
R	롤 반경
T	정상 상태에서부터의 장력변화
u	조작량
V	정상 상태에서부터의 속도변화
α	제어게인 설계를 위한 상수
β	제어게인 설계를 위한 상수
μ	접압롤과 권취롤사이 표면마찰계수
τ	구동토크 변화량

참 자

c	실린더
w	권취롤

1. 서 론

연속적이며 잘 구부러지는 판이나 선 형태의 재료를 웹(web)이라한다. 웹을 생산하고 가공하는 시스템을 연속 공정시스템(continuous process system)이라 한다. 연속 공정시스템에서 웹은 최종적으로 권취롤(winding roll)에 감기게 되는데, 이 공정을 권취공정(winding process)이라한다. 권취공정은 접압, 커팅(cutting), 권취롤교환(roll change) 공정 등으로 구성된다. 커팅이나 롤교환 공정은 권취공정을 비연속적으로 만드는 공정이다. 현장에서는 터렛(turret)을 이용하는 연속적인 권취롤교환 공정이 이루어지고 있으며, 이러한 연속공정을 통하여 생산성을 향상시키고 있다.

권취공정에서 접압롤(contact roll)은 적절한 접압력을 권취롤 표면에 가함으로써 권취되는 웹의 장력(WIT, Wound In Tension)을 제어하고 권취된 웹 사이로의 공기유입(air entrainment)현상을 방지하는 역할을 한다. 또한 보조넙롤(nip roll), 커터롤(cutter roll), 벨트가이드롤(belt guide roll)은 권취롤교환 공정에서 순차적으로 권취롤에 접한다. 이러한 접압롤이나 보조롤들이 권취롤에 접할 때, 권취롤과 보조롤들간의 정확한 속도 동기는 어려운 문제이고, 이때문에 권취장력에 급격한 변화가 생김을 현장에서 관찰하였다. 권취장력의 변화는 웹 생산 라인에서 최종제품의 품질에 영향을 미치므로, 웹 생산 공정에서 접압력에 의한 권취장력변화는 중요한 제어의 대상이 된다.

웹의 장력제어와 웹 이송 시스템에 대한 연구는 Gren-

fell⁽¹⁾이래 꾸준히 지속되어왔다. ^(1,3,4,5,6) Lin과 Shin⁽⁶⁾은 권취롤의 기동 및 정지시 소재의 장력변화에 관한 연구를 하였다. 또한, 접압력과 권취된 장력(WIT)의 관계에 대한 해석^(7,8), 접압력의 동특성과 권취장력 변화에 대한 연구가 수행되어 왔다⁽¹⁰⁾.

본 논문에서는 현장에서 이루어지고 있는 권취공정을 순차적으로 분석하였고, 권취롤에 접압력을 가하는 여러 보조롤들에 대해 그 역할을 규명하였다. 보조롤들이 권취롤에 접압력을 가할 때, 두 롤 사이의 속도 불일치로 인해 발생하는 장력의 변화를 연구하기 위하여 접압력발생기구에 대한 모델을 개발하였다. 이 모델을 Shin⁽¹¹⁾의 속도,장력모델에 추가하여 접압력을 고려하는 속도,장력모델로 확장하였다. 접압롤을 이용하여 권취장력을 제어하는 동시에, 추가로 권취롤에 접하는 보조넙롤때문에 발생하는 장력변화를 레귤레이션하기 위한 방법으로 권취장력을 피드백(feedback)하는 PID 제어기와 비선형 PID 제어기(Nonlinear-PID controller)를 설계하였다. NPID 제어기는 Shin⁽¹⁰⁾이 사용한 비선형 PD 제어기에 제어성능을 향상시키기 위하여 I제어기를 추가한 형태이다. 컴퓨터 시뮬레이션 연구결과를 통해 각 제어기를 이용한 장력제어의 성능을 비교하였다.

2. 권취롤 교환 공정

권취공정은 캐리지(carriage)와 접압롤, 웹이 감기고 있는 코어(old core)와 새로 교환될 코어(new core), 각 코어의 보조넙롤, 코어의 교환을 돕는 터렛, 그리고 웹을 자르기 위한 커터(cutter)와 커터롤, 벨트가이드롤로 구성되어 있다. Fig. 1은 권취롤 교환 미커니즘(mechanism)을 포함한 권취공정 시스템의 개략도이다.

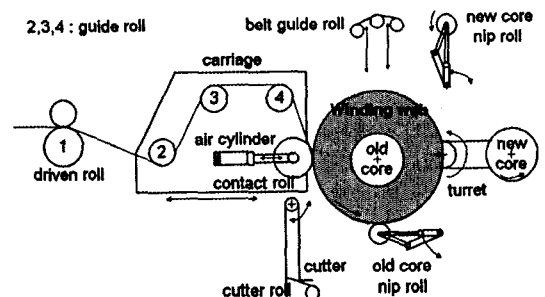


Fig. 1 A winding system with roll change mechanism

연속적인 권취롤교환을 위한 권취롤교환 공정의 순차적인 작동 순서는 다음과 같다. Fig. 2와 같이 접압롤은 권취초기에 권취롤에 접하여 말기까지 일정한 접압력을 권취롤에 가한다. 권취가 완료되면 Fig. 3과 같이 미리 회전하고 있던 보조넙롤(old core nip roll)이 권취롤에 접한다.

Fig. 4에서와 같이 터렛 회전이 가능하도록 캐리지가 후퇴된 후, 터렛이 회전을 시작한다. 캐리지의 후퇴에 의해서 접압롤이 권취롤에서 떨어지고 보조넙롤이 접압롤

을 대신해서 권취롤에 일정한 접압력을 가한다. 터렛이 반시계 방향으로 회전하여, Fig. 5와 같이 권취중인 코어와 새 코어의 위치를 바꾼다. 이때, 다른 보조넙롤(new core nip roll)은 웹이 지나가는 경로를 만든다.

터렛 회전이 완료되면, 후퇴해 있던 캐리지는 전진하여 Fig. 6과 같이 접압롤이 새 코어에 접하도록 한다. 그 다음에 새 코어에 웹이 감기는 것을 돕기 위해 벨트가이드롤을 위에서 아래로 이동한다.

벨트가이드롤의 이동이 끝나면, 커터의 주행을 돕기 위해 커터롤을 상승시켜 웹의 경로를 변경시킨다. 웹의 폭 방향으로 커터가 주행되고, 웹은 새 코어에 감기기 시작한다. 새 코어에 권취가 시작된 후 벨트가이드롤과 커터롤은 제자리로 복귀하고, 만권된 권취롤과 보조넙롤은 정지한다.

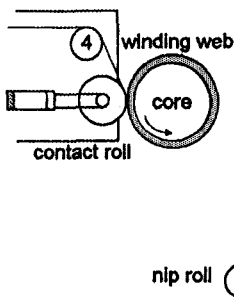


Fig. 2 Contact roll in a winding system

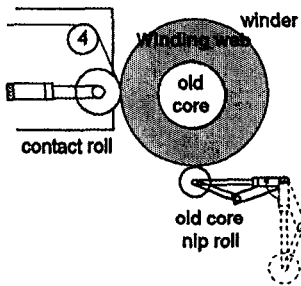


Fig. 3 Old core nip roll in a winding system

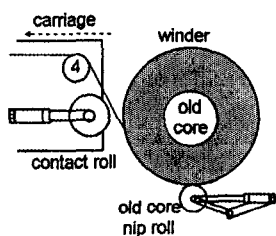


Fig. 4 Moving of carriage

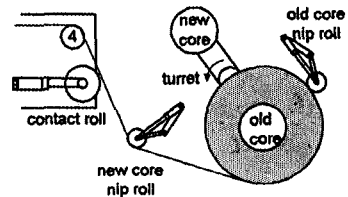


Fig. 5 Rotation of turret

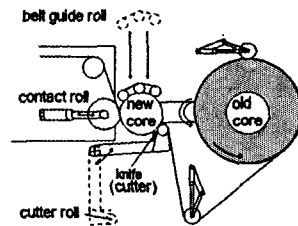


Fig. 6 Cutting and roll change mechanism

3. 시스템 모델

권취롤 교환 공정중에 접압롤과 보조넙롤로 인한 권취장력변화에 대한 연구를 위하여, 대상으로한 권취장력 제어 시스템의 구성은 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에서 1~4번 롤 구간에서 웹의 장력 모델과 각 롤들에 대한 속도 모델은 식(1)~(8)과 같이 표현된다.⁽¹⁾

$$J_1 \dot{V}_1(t) = -b_f V_1(t) + R_1^2(T_1(t)) + R_1 \tau_1 \quad (1)$$

$$L_2 \dot{T}_2(t) = -V_{2o} T_2(t) + V_{1o} T_1(t) + AE(V_2(t) - V_1(t)) \quad (2)$$

$$J_2 \dot{V}_2(t) = -b_{f2} V_2(t) + R_2^2(T_3(t) - T_2(t)) \quad (3)$$

$$L_3 \dot{T}_3(t) = -V_{3o} T_3(t) + V_{2o} T_2(t) + AE(V_3(t) - V_2(t)) \quad (4)$$

$$J_3 \dot{V}_3(t) = -b_{f3} V_3(t) + R_3^2(T_4(t) - T_3(t)) \quad (5)$$

$$L_4 \dot{T}_4(t) = -V_{4o} T_4(t) + V_{3o} T_3(t) + AE(V_4(t) - V_3(t)) \quad (6)$$

$$J_4 \dot{V}_4(t) = -b_{f4} V_4(t) + R_4^2(T_5(t) - T_4(t)) \quad (7)$$

$$L_5 \dot{T}_5(t) = -V_{wo} T_5(t) + V_{4o} T_4(t) + AE(V_w(t) - V_4(t)) \quad (8)$$

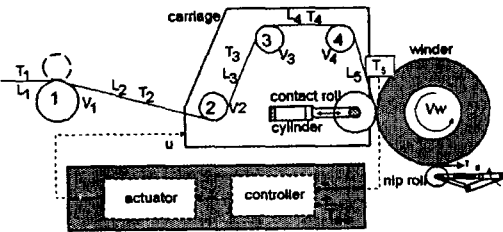


Fig. 7 A winding tension control system

Fig. 7의 캐리지와 접압롤, 권취롤을 포함한 접압력 발생 기구에 관한 단순화된 모델은 Fig. 8과 같고, 이로부터 유도된 수학적 모델은 식 (9)~(12)와 같다.⁽¹⁰⁾

$$m_1 \ddot{x}_1 + b_c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_c(x_1 - x_2) = u \quad (9)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + b_w \dot{x}_2 + k_w x_2 = f_c \quad (10)$$

$$f_c = b_c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_c(x_1 - x_2) \quad (11)$$

$$f_{cn} = b_w \dot{x}_2 + k_w x_2 \quad (12)$$

f_c 는 접압롤에 가해지는 실린더 힘이며, f_{cn} 은 접압력이 다. m_1 은 캐리지의 질량을 나타내며, m_2 는 접압롤의 질량을 나타낸다. k_c 와 b_c 는 접압롤과 캐리지사이에서 작용하는 실린더의 특성을 나타내는 스프링,댐퍼 계수이다. k_w 와 b_w 는 권취롤에 감긴 소재의 롤반경방향 특성을 나타낸다.

접압롤의 회전속도가 권취롤의 회전속도보다 빠를 경우, 두 롤이 접하고 떨어질 때 접압력(f_{cn})에 비례하는 마찰력(F)이 발생한다. 접압롤에 의해 권취롤로 전달되는 토크량은 마찰력과 권취롤의 반경에 의해 결정되는 값으로 $F \times R_w$ 로 표현할 수 있다. 이를 롤의 속도 모델에 추가하여 식 (13)과 같은 권취롤의 속도 모델로 확장시킬 수 있다(Fig. 8 자유물체도 참고).

$$J_w \dot{V}_w(t) = -b_{fw} V_w(t) + R_w^2(T_w(t) - T_5(t)) + R_w(\tau_w + FR_w) \quad (13)$$

권취공정 말기에 접압롤이 권취롤에 접해 있을 때 보조닐롤(nip roll)은 Fig. 9와 같이 추가로 권취롤에 접압력을 가한다.

보조닐롤과 권취롤의 회전 선속도 불일치에 의해 권취롤의 구동토크에 변화가 있게 된다고 가정한다. 이로인해 발생하는 권취장력에 변화는, 식 (14)에서와 같이, 권취롤의 속도모델에서 구동토크(τ_d) 변화로 나타낼 수 있다.

$$J_w \dot{V}_w(t) = -b_{fw} V_w(t) + R_w^2(T_w(t) - T_5(t)) + R_w(\tau_w + FR_w + \tau_d) \quad (14)$$

4. 제어기 설계

Fig. 10은 접압롤에 의해서 권취장력을 제어할 수 있는 권취장력 제어 시스템의 블록다이아그램(block diagram)을 나타낸다.

Fig. 10과 같은 권취장력 제어시스템은 시스템에 레퍼런스로 주어지는 권취장력변화를 잘 추종하여야하며, 시스템에 가해지는 토크변화에 의해 생기는 장력변화를 레

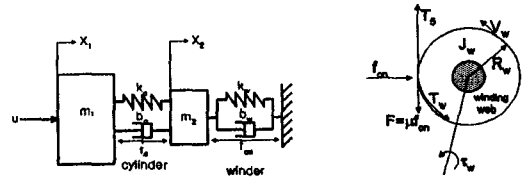


Fig. 8 A contact force generator and the free body diagram for contact mechanism at the time of contact

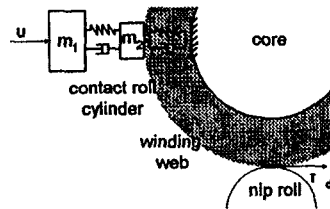


Fig. 9 Winder contacted by a nip roll

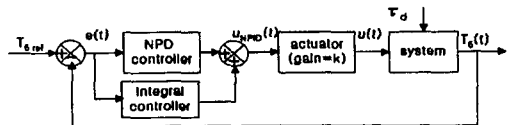


Fig. 10 Block diagram of a winding tension control system

연속적인 권취롤교환을 위한 권취롤교환 공정의 순차적인 작동 순서는 다음과 같다. Fig. 2와 같이 접압롤은 권취초기에 권취롤에 접하여 말기까지 일정한 접압력을 권취롤에 가한다. 권취가 완료되면 Fig. 3과 같이 미리 회전하고 있던 보조넙롤(old core nip roll)이 권취롤에 접한다.

Fig. 4에서와 같이 터렛 회전이 가능하도록 캐리지가 후퇴된 후, 터렛이 회전을 시작한다. 캐리지의 후퇴에 의해서 접압롤이 권취롤에서 떨어지고 보조넙롤이 접압롤

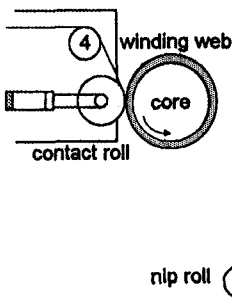


Fig. 2 Contact roll in a winding system

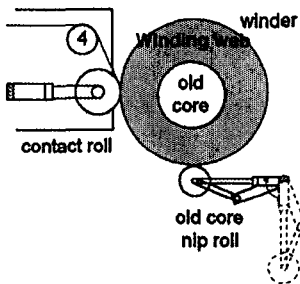


Fig. 3 Old core nip roll in a winding system

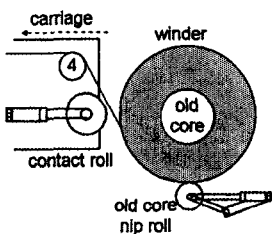


Fig. 4 Moving of carriage

을 대신해서 권취롤에 일정한 접압력을 가한다. 터렛이 반시계 방향으로 회전하여, Fig. 5와 같이 권취중인 코어와 새 코어의 위치를 바꾼다. 이때, 다른 보조넙롤(new core nip roll)은 웹이 지나는 경로를 만든다.

터렛 회전이 완료되면, 후퇴해 있던 캐리지는 전진하여 Fig. 6과 같이 접압롤이 새 코어에 접하도록 한다. 그 다음에 새 코어에 웹이 감기는 것을 돕기 위해 벨트 가이드롤을 위에서 아래로 이동한다.

벨트 가이드롤의 이동이 끝나면, 커터의 주행을 돕기 위해 커터롤을 상승시켜 웹의 경로를 변경시킨다. 웹의 폭 방향으로 커터가 주행되고, 웹은 새 코어에 감기기 시작한다. 새 코어에 권취가 시작된 후 벨트 가이드롤과 커터롤은 제자리로 복귀하고, 만권된 권취롤과 보조넙롤은 정지한다.

3. 시스템 모델

권취롤 교환 공정중에 접압롤과 보조넙롤로 인한 권취장력변화에 대한 연구를 위하여, 대상으로한 권취장력 제어 시스템의 구성은 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에서 1~4번 롤 구간에서 웹의 장력 모델과 각 롤들에 대한 속도 모델은 식(1)~(8)과 같이 표현된다.⁽¹⁾

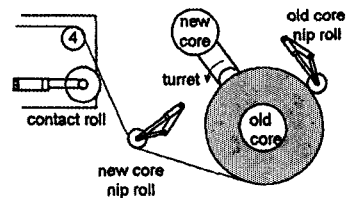


Fig. 5 Rotation of turret

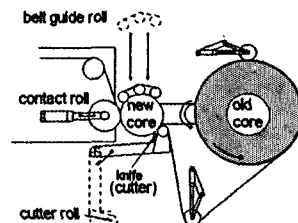


Fig. 6 Cutting and roll change mechanism

$$J_1 \dot{V}_1(t) = -b_{f1} V_1(t) + R_1^2 (T_1(t)) + R_1 \tau_1 \quad (1)$$

$$L_2 T_2(t) = -V_{2o} T_2(t) + V_{1o} T_1(t) + AE(V_2(t) - V_1(t)) \quad (2)$$

$$J_2 \dot{V}_2(t) = -b_{f2} V_2(t) + R_2^2 (T_3(t) - T_2(t)) \quad (3)$$

$$L_3 T_3(t) = -V_{3o} T_3(t) + V_{2o} T_2(t) + AE(V_3(t) - V_2(t)) \quad (4)$$

$$J_3 \dot{V}_3(t) = -b_{f3} V_3(t) + R_3^2 (T_4(t) - T_3(t)) \quad (5)$$

$$L_4 T_4(t) = -V_{4o} T_4(t) + V_{3o} T_3(t) + AE(V_4(t) - V_3(t)) \quad (6)$$

$$J_4 \dot{V}_4(t) = -b_{f4} V_4(t) + R_4^2 (T_5(t) - T_4(t)) \quad (7)$$

$$L_5 T_5(t) = -V_{wo} T_5(t) + V_{4o} T_4(t) + AE(V_w(t) - V_4(t)) \quad (8)$$

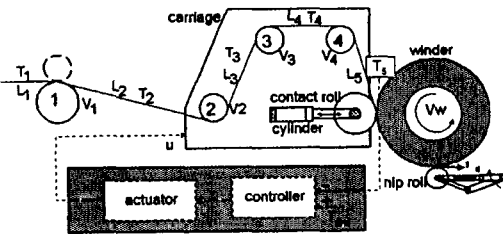


Fig. 7 A winding tension control system

Fig. 7의 캐리지와 접압롤, 권취롤을 포함한 접압력 발생 기구에 관한 단순화된 모델은 Fig. 8과 같고, 이로부터 유도된 수학적 모델은 식 (9)~(12)와 같다.⁽¹⁰⁾

$$m_1 \ddot{x}_1 + b_c (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_c (x_1 - x_2) = u \quad (9)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + b_w \dot{x}_2 + k_w x_2 = f_c \quad (10)$$

$$f_c = b_c (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_c (x_1 - x_2) \quad (11)$$

$$f_{cn} = b_w \dot{x}_2 + k_w x_2 \quad (12)$$

f_c 는 접압롤에 가해지는 실린더 힘이며, f_{cn} 은 접압력이다. m_1 은 캐리지의 질량을 나타내며, m_2 는 접압롤의 질량을 나타낸다. k_c 와 b_c 는 접압롤과 캐리지사이에서 작용하는 실린더의 특성을 나타내는 스프링,댐퍼 계수이다. k_w 와 b_w 는 권취롤에 감긴 소재의 롤반경방향 특성을 나타낸다.

접압롤의 회전속도가 권취롤의 회전속도보다 빠를 경우, 두 롤이 접하고 떨어질 때 접압력(f_{cn})에 비례하는 마찰력(F)이 발생한다. 접압롤에 의해 권취롤로 전달되는 토크량은 마찰력과 권취롤의 반경에 의해 결정되는 값으로 $F \times R_w$ 로 표현할 수 있다. 이를 롤의 속도 모델에 추가하여 식 (13)과 같은 권취롤의 속도 모델로 확장시킬 수 있다(Fig. 8 자유물체도 참고).

$$J_w \dot{V}_w(t) = -b_{fw} V_w(t) + R_w^2 (T_w(t) - T_5(t)) + R_w (\tau_w + FR_w) \quad (13)$$

권취공정 말기에 접압롤이 권취롤에 접해 있을 때 보조닐롤(nip roll)은 Fig. 9와 같이 추가로 권취롤에 접압력을 가한다.

보조닐롤과 권취롤의 회전 선속도 불일치에 의해 권취롤의 구동토크에 변화가 있게 된다고 가정한다. 이로 인해 발생하는 권취장력에 변화는, 식 (14)에서와 같이, 권취롤의 속도모델에서 구동토크(τ_d) 변화로 나타낼 수 있다.

$$J_w \dot{V}_w(t) = -b_{fw} V_w(t) + R_w^2 (T_w(t) - T_5(t)) + R_w (\tau_w + FR_w + \tau_d) \quad (14)$$

4. 제어기 설계

Fig. 10은 접압롤에 의해서 권취장력을 제어할 수 있는 권취장력 제어 시스템의 블록다이어그램(block diagram)을 나타낸다.

Fig. 10과 같은 권취장력 제어시스템은 시스템에 레퍼런스 주어진 권취장력변화를 잘 추종하여야하며, 시스템에 가해지는 토크변화에 의해 생기는 장력변화를 레

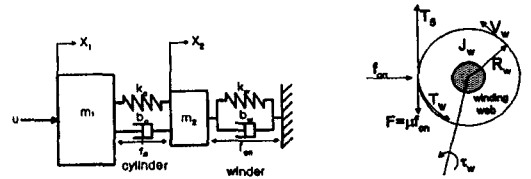


Fig. 8 A contact force generator and the free body diagram for contact mechanism at the time of contact

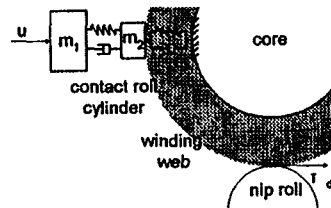


Fig. 9 Winder contacted by a nip roll

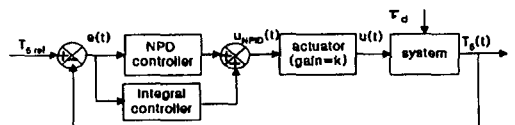


Fig. 10 Block diagram of a winding tension control system

클레이션해야한다.

권취장력 제어를 위해 Shin(10)이 사용한 NPD 제어기를 변형시켜, 식 (15)와 같이 NPID 제어기를 설계한다.

$$u(t) = k \cdot u_{NPID}(t)$$

$$u_{NPID}(t) = K_n \cdot e(t) + B_n \cdot \dot{e}(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) dt \quad (15)$$

(단, $e(t) = T_{5ref} - T_5$)

k 는 액추에이터 게인이다. K_n 과 B_n 이 포함된 두 항은 NPD제어기를 나타내며 세 번째항은 일반적인 I 제어기를 나타낸다. 본연구에서 I 제어기의 제어게인 K_i 는 여러 번의 시뮬레이션을 통한 시행착오법을 이용하여 결정한다.

식 (15)에서 나타나는 NPID 제어기는 일반적인 PID 제어기의 구조와 비교해 다를 바가 없다. 하지만 제어 게인(K_n, B_n)이 식 (16), (17)과 같은 비선형 함수 형태를 가진다는 것이 NPID 제어기의 특징이다. NPID 제어기는, 과도구간에서 시스템 응답(T_5 의 시간에 대한 변화량)과 장력오차를 이용하여 제어게인을 유동적으로 선정하도록써 고정된 제어게인을 가지는 일반 PID 제어기보다 나은 제어성능을 얻을 수 있는 잇점을 갖는다.

$$K_n = \frac{K_1}{1 + \beta \exp^{\alpha \text{sign}(dT_5/dt)e}} + K_o \quad (16)$$

$$B_n = \frac{B_1}{1 + \beta \exp^{\alpha \text{sign}(dT_5/dt)e}} + B_o \quad (17)$$

식 (16), (17)에서와 같이 결정된 K_n 과 B_n 값은 항상 각각 $K_o + K_1, K_o + B_o + B_1, B_o$ 의 사이에 존재하게 된다. K_1, K_1 와 B_1, B_o 를 구하기 위해서, 우선 시스템의 안정성을 보장하는 PID제어기의 게인 K, B 를 근계적을 이용하여 선정한다. 구해진 제어이득 K 와 B 를 기준으로 $K_o < K < K_1, B_o < B < B_1$ 의 관계를 만족하도록 K_1, K_o 와 B_1, B_o 를 결정한다. 상수 α 와 β 는 시뮬레이션 연구를 반복하여 결정한 값이다⁽²⁾. α 는 장력변화율과 오차가 제어게인에 미치는 민감도(sensitivity)를 조정하는 상수이다. 또한, β 는 각각 K_1 및 B_1 의 K_o 및 B_o 에 대한 상대적 기여도(weighting)를 결정하는데 중요한 요인이 된다.

식 (18)과 같은 간단한 2차시스템의 예를 통하여 비선형 제어기의 작동원리와 안정성을 설명하고자한다.

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

B 와 K 는 시스템 내부의 댐퍼 계수와 스프링계수이고, 양의 상수이다. Fig. 11에서 회색 부분과 같이 시스템의 거동이 오차가 증가하는 방향으로 진행될 때 제어게인은 더 커져야한다. 그리고 오차가 줄어드는 방향으로 진행될 때는 제어게인은 작아져야한다. 이러한 제어게인의 거동을 식 (16), (17)로부터 얻을 수 있고, 고정된 게인을 가지는 일반적인 PID 제어기를 사용할 때보다 시스템은 빠른 수렴속도를 가질 것이라는 예상을 할 수 있다.

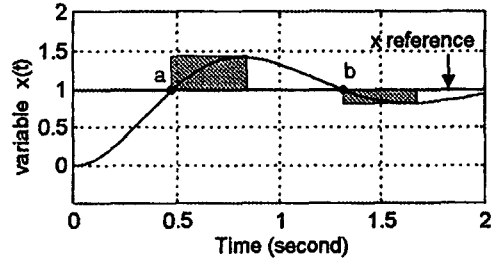


Fig. 11 Step response of a general 2nd order system

일반적으로 비선형 제어기는 시스템의 불안정성을 초래할 수도 있다. 식 (16), (17)과 같은 형태의 비선형 제어 게인을 가지는 2차 시스템에 대한 Lyapunov 함수를 찾아, 시스템의 안정성을 검증하여보자. 식 (19)와 같이 NPD 제어기의 게인을 사용하여 식 (18)로 표현되는 시스템을 위한 제어입력(f_u)을 만든다.

$$f_u = - \left(\frac{K_1}{1 + \beta_k \exp^{\alpha_k \text{sign}(x)\dot{x}}} + K_o \right) x - \left(\frac{K_1}{1 + \beta_B \exp^{\alpha_B \text{sign}(x)\dot{x}}} + B_o \right) \dot{x} \quad (19)$$

제어게인 K_1, K_o, B_1, B_o 는 양의 상수로 선정하고, 설계 파라미터인 α 와 β 도 양의 상수이다. 여러 계수와 시그넘(sign) 함수로 구성되는 지수(exponential) 함수는 항상 양의 값을 갖는다. 식 (18),(19)은 식 (20),(21),(22)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$M\ddot{x} + B[x, \dot{x}]\dot{x} + K[x, \dot{x}]x = 0 \quad (20)$$

$$K[x, \dot{x}] = \frac{K_1}{1 + \beta_k \exp^{\alpha_k \text{sign}(\dot{x})x}} + K_o + K \quad (21)$$

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

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

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

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

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

5. 시뮬레이션

권취롤교환 공정 중에서 접압롤이 붙는 순간과 보조널롤이 붙는 순간, 그리고 다시 접압롤이 떨어지는 순간에 장력변화가 심하게 일어난다. 이러한 경우에 대한 NPID 제어기의 권취장력제어 성능을 일반적인 PID 제어기와 비교를 통해 알아본다.

Table 1은 사용된 제어기의 제어 이득값을 나타낸다. 그리고, 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 각 값들과 조건들은 현장에서 사용되는 전형적인 값들로서 Table 2와 같다.

접압롤이 권취롤에 접하는 공정은 권취초기에 이루어진다. 권취 초기의 권취롤의 상태는 권취롤에 감긴 소재의

Table. 1 Control gains

PID	NPID		
K=2.2	$K_I = 5$	$B_I = 6$	$\alpha = 1$
B=0.2	$K_D = 2$	$B_D = 0.2$	$\beta = 100$
$K_I = 20$	$K_I = 20$		

Table. 2 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_0	6.67 m/s
L_2	1.15 m	b_w	0.1
L_3	0.39 m	μ	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 N/ms ⁻¹

특성을 스프링계수 $K_w = 1.5 \times 10^5 \text{ N/m}$ 와, 뎀퍼계수 $B_w = 700 \text{ N/ms}^{-1}$ 로 가정하였다. 이러한 가정하에서 Fig. 12는 NPID 제어기와 PID 제어기의 권취장력 제어성능을 보인 것이다.

기준 권취장력($T_{5ref} = 10\text{N}$)으로 수렴되는 권취장력은 NPID 제어기에 의하여 제어될 경우, PID 제어기에 의해 제어될 경우에 비해 같은 상승시간을 가지면서도 정상상태 수렴시간이 빠름을 알 수 있다.

Fig. 13은 Fig. 12와 같은 조건에서 NPID제어기와 PID 제어기의 성능을 비교한 것이다. NPD 제어기에 추가된 I 제어기는 정상상태 오차를 개선하였다.

보조널롤이 권취롤에 접하고, 접압롤이 권취롤에서 떨어지는 현상은 권취말기에 일어난다. 권취된 웹의 양을 고려하여 $K_w = 0.5 \times 10^5 \text{ N/m}$, $B_w = 1300 \text{ N/ms}^{-1}$ 로 가정하고, 권취롤의 질량 증가는 질량관성 모멘트의 변화 ($\Delta J_w = 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)로 나타내었다. 보조널롤은 권취롤에 1N의 접압력을 가한다고 가정하였다. Fig. 14는 보조널롤에 의해 발생하는 권취장력 변화를 레플리케이션하는 것에 대하여 시뮬레이션을 한 결과이다.

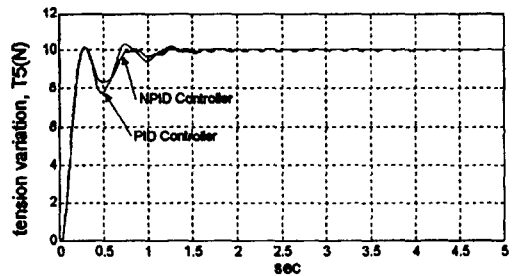


Fig. 12 Tension variation under NPID/PID control ($K_w = 1.5 \times 10^5 \text{ N/m}$, $B_w = 700 \text{ N/ms}^{-1}$)

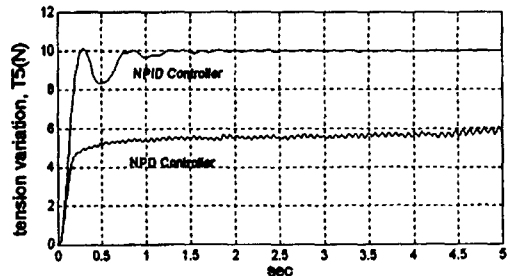


Fig. 13 Tension variation under NPID/NPD control ($K_w = 1.5 \times 10^5 \text{ N/m}$, $B_w = 700 \text{ N/ms}^{-1}$)

보조넵롤이 권취롤에 접할 때 권취장력이 급격히 변화되고, 높은 빈도의 장력변화가 계속됨을 알 수 있다. 또한 이러한 보조넵롤에 의한 장력변화를 접압롤의 접압력 제어에 의해서 줄일 수 있음을 알 수 있다. Fig. 15는 Fig. 14와 같은 조건에서 *NPID* 제어기의 성능을 비교할 수 있는 결과이다. *NPID* 제어기를 사용했을때에 비해 *NPD* 제어기를 사용하였을 때의 장력변화는 수렴 속도가 느리고, 정상상태 오차가 있다는 것을 알 수 있다.

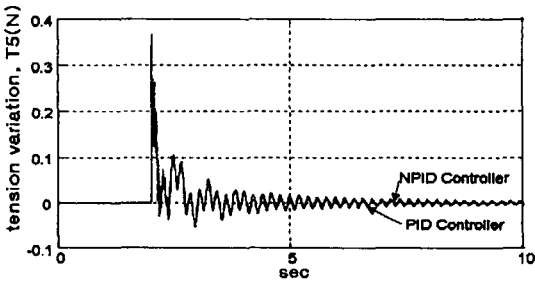


Fig. 14 Tension variation under NPID/PID control ($K_w=0.5 \times 10^5 \text{ N/m}$, $B_w=1300 \text{ N/ms}^2$, $\Delta J_w=2 \text{ kg m}^2$)

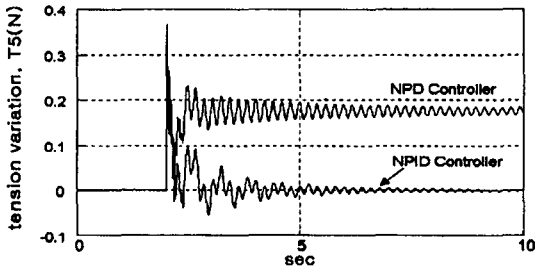


Fig. 15 Tension variation under NPID/NPD control ($K_w=0.5 \times 10^5 \text{ N/m}$, $B_w=1300 \text{ N/ms}^2$, $\Delta J_w=2 \text{ kg m}^2$)

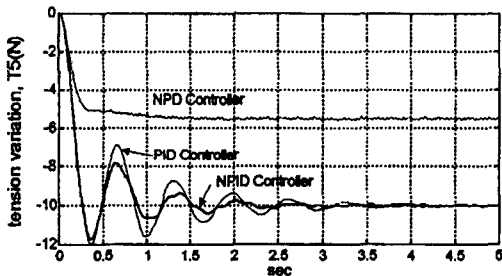


Fig. 16 Tension variation under NPID/NPD/PID control ($K_w=0.5 \times 10^5 \text{ N/m}$, $B_w=1300 \text{ N/ms}^2$, $\Delta J_w=2 \text{ kg m}^2$)

Fig. 16은 권취 말기에 접압롤이 권취롤에서 떨어질 때의 권취장력 변화이다. 접압롤이 권취롤에서 떨어질 경우에도 출력의 정상상태 수렴 속도 면에서 *NPID* 제어기의 권취장력 제어 성능이 *PID* 제어기보다 우수하였다. 또한 *NPID* 제어기는 기준장력변화에 수렴하지 못함을 알 수 있다.

6. 결론

권취공정 중에 접압롤이 권취롤에 붙고 떨어질 때, 권취롤교환 공정 중에 보조넵롤이 권취롤에 붙고 떨어질 때, 장력 변화가 급격함을 현장에서 관찰한 바 있다. 본 논문에서는 권취롤 교환 공정을 비롯한 권취공정 전반에 대한 이해를 바탕으로 권취공정 중에 발생하는 장력의 변화를 최소화할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

접압롤과 보조넵롤이 권취롤에 접하거나 떨어질때, 발생하는 접압력은 권취롤의 구동토크의 증감을 초래한다. 접압력을 발생하는 접압롤과 권취롤 그리고, 캐리지로 이루어진 기구에 관한 수학적 모델을 구하고, 접압롤과 보조넵롤들이 권취롤에 전달하는 토크량이 시스템 거동에 반영될 수 있도록 Shin⁽¹⁾의 소재의 장력모델, 롤의 속도모델을 확장하였다. 확장된 모델을 이용하여 권취장력을 제어하기 위한 *NPID* 제어기를 설계하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 연구를 통하여 접압롤이 권취롤에 접하고 떨어질 때 발생하는 장력의 변화와 보조넵롤의 접촉으로 인한 권취장력의 변화를 *NPID* 제어기를 이용한 접압롤의 접압력 제어로 줄일 수 있음을 확인하였다.

NPID 제어기는 제어게인을 선정하는 함수에 의해 성능이 결정된다. 본 논문에서 사용한 식(16), (17)의 비선형 함수 이외의 다양한 함수를 개발하여 그 성능을 비교할 필요가 있다.

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. Xu, Y., Ma, D., and Hollerbach, J.M., "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. 1993.
3. 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.
 4. 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.
 5. 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.
 6. K. N. Reid, 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.
 7. J. David Pfeiffer, "Mechanics of a Rolling Nip on Paper Webs", Tappi, Vol. 51, No. 8. 1968.
 8. J. David Pfeiffer, "Nip forces and their effect on wound-in tension", Tappi, Vol. 60, No .2. 1977.
 9. Xu, Y., Ma, D., and Hollerbach, J.M., "Force and Contact Transient Control Using Nonlinear PD Control", IEEE, pp. 924-930. 1994.
 10. K. H. Shin, K. T. Kim, "비선형 PD제어기를 이용한 접압력 및 장력제어", 한민족과학기술자대회. 1996.