

<論 文>

연속공정 시스템에서의 장력의 가변이득 PID 제어

신 기 현*

(1994년 10월 8일 접수)

Variable-Gain PID Control of Longitudinal Tension in a Web Transport System

Kee-Hyun Shin

Key Words : Web Tension Control(웹장력제어), Variable-Gain(가변이득), Winding(권취) Time-Varying(시변수), Model(모델)

Abstract

Fixed-gain and variable-gain PID control of tension in the winding section of a simple web transport system were evaluated. An open-loop mathematical model for the web transport system was derived and used for the design of the PID controllers. The winding roll radius is a time-varying parameter in the model. The fixed-gain PID controller designed at a particular instant of time could not meet the desired specifications, whereas the variable-gain PID controller could produce accurate tension control in the winding section. An advantage of the variable-gain control is its simplicity. This approach is easy to implement and shows promise for applications where the time-varying parameters are easily measured.

기 호 설 명

| | |
|--|-----------------------------|
| A, A_n : 웹의 단면적 | K_2 : 모터상수 |
| a_n : 상수 | k_r : 상수 |
| b_n : 상수 | L : 웹스팬의 길이 |
| B_{fn} : 베어링의 회전 마찰계수 | R_b : 권취울 |
| dm : 미소 웹요소의 질량 | R_n : 롤이나 롤러의 반경 |
| dx : 미소 웹요소의 길이 | R_{n0} : 권취롤의 초기반경 |
| E : 탄성계수 | r : 상수 |
| E_o : 전압 | s : 라플라스 오퍼레이터 |
| e_{ss} : 정상상태 오차 | t : 시각 |
| h : 웹두께 | T_n : 정상상태 장력 값으로부터의 장력변화 |
| J_n : 롤이나 롤러의 관성모멘트 | T_{2ref} : 기준장력 |
| J_{n0} : $R_n=1$ 일 때의 롤이나 롤러의 관성 모멘트 | U_n : 정상상태 값으로부터의 입력변화 |
| K_p : PID 제어기의 비례이득 | v_{n0} : 웹속도의 정상상태 값 |
| K_i : PID 제어기의 적분이득 | V_n : 웹속도의 정상상태 값으로부터의 변화 |
| K_d : PID 제어기의 미분이득 | v_n : 웹의 속도 |
| | w : 웹의 폭 |
| | x_n : 웹길이 방향의 위치 |

*정회원, 건국대학교 기계설계학과

- a_n : 상수
- β_n : 상수
- ϵ_{no} : 웹변형도의 정상상태 값
- ϵ_n : 웹변형도의 정상상태 값으로부터의 변화
- ϵ_n : 변형도
- ω_n : 원하는 시스템의 고유진동수
- ζ : 원하는 시스템의 댐핑상수
- ρ : 웹 미소요소의 밀도

하첨자

- o : 정상상태
- f : 마찰
- n : 0, 1, 2, 3, ...
- u : 장력이 없을 때의 웹상태
- x, y, z : 직각좌표계

1. 서 론

연속적이고, 매우 길며, 구부러지기 쉬운 박판(thin plate) 혹은 선(wire) 형태의 재료를 총괄하여 웹(web)재료라고 한다. 웹재료는 중간제품 혹은 완제품을 제조하는 과정에서 일련의 연속적인 공정을 거치게 된다. 보통 각기 다른 공정을 거칠 때마다 요구되는 장력(tension)의 수준 및 정확도가 다르다. 장력의 변화가 심할 경우에는 공정 중에 재료의 파단, 제품의 품질 저하 등으로 인하여 상당한 경제적 손실을 입을 수도 있다. 이러한 손실을 최소화하기 위하여 공정 중에 재료의 장력을 감시하고 원하는 수준과 정확도를 유지하도록 제어하는 것은 매우 중요하다.

웹의 장력제어와 웹이송 시스템(web transport system)에 대한 연구는 Campbell⁽¹⁾ 이래 꾸준히 지속되어 왔다.^(1~12) Campbell, Brandenburg,⁽²⁾ King⁽³⁾은 웹의 이송방향으로의 동력학적 거동에 대한 기본적인 연구를 수행하였다. Campbell은 단일 웹스팬의 이송방향으로의 동력학적 거동을 연구하기 위하여 수학적 모델을 개발하였으나, 그의 모델은 단일 웹스팬의 입측에서의 웹장력을 고려하지 않았다. 즉, 그의 모델로는 '장력전달(tension transfer)' 현상을 예측할 수 없다. 이에 반하여, King과 Brandenburg는 그들의 수학적 모델 개발에 입측에서의 웹장력을 고려하였다. Brandenburg는 웹의 변형도(strain)가 매우 작은 경우를 가정하였고, 변형도(strain)의 변화에 따른 웹의 단면적

의 변화, 온도 및 레지스터 오차(register error)의 장력에 대한 영향도 그의 수학적 모델에 반영하였다.

웹이송 시스템에서의 장력제어에 관한 비교적 최근의 연구는 Wolferman과 Schroder⁽⁸⁾에 의하여 보고되었다. 그들은 최적 출력피드백(optimal output feedback) 테크닉을 이용하여 구동 롤러의 속도를 제어하고, 웹스팬 양단에서의 속도차로 웹의 장력을 제어하였다. 관측기(observer)를 설계하여, 웹스팬 양단에서의 롤러의 속도제어에 대한 웹장력의 영향을 관측하여 이용함으로써 속도 제어 성능을 향상시켰다. 그러나, 이들의 장력제어 방법은 구동롤러의 속도와 장력 간의 관계를 이용한 장력의 개루프(open-loop)제어에 국한되었다(draw control). 이와 같은 제어방법으로는 장력 전달 현상에 의한 이웃하는 웹스팬으로부터의 외란의 영향을 제거할 수 없고 웹스팬간의 상호 작용의 영향도 억제하기 어렵다. 또한 장력은 구동 롤러의 속도 변화에 매우 민감하므로, 롤러의 속도를 이용한 장력의 개루프제어를 위해서는 롤러 속도의 극히 정확한 제어가 요구되며, 이는 제어 시스템 구성에 비용 부담이 크게 되는 원인이 된다.

본 논문에서는 웹이송 시스템에서의 장력 제어를 위한 이상화된 수학적 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 장력제어기 설계에 용이한 동시에 장력 전달 현상을 반영한다. 개발된 모델에서 웹이송 시스템의 i 번째 스펀에서의 장력(T_i)은 스펀 입측에서의 장력(T_{i-1}), 스펀양단에서의 웹의 속도 (V_i, V_{i-1})의 함수이다. 또한 웹이송 시스템 중 반경이 시변수인(time-varying) 권취롤(winding roll)이 포함된 권취구역(winding section)에서의 장력 제어를 위하여 고정이득(fixed-gain) 및 가변이득(variable gain) PID 제어기를 설계하였다. 고정이득 및 가변이득 PID 제어기를 이용한 제어 시스템의 동적 성능이 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 결정되고 비교되었다. 권취롤의 반경이 시간에 따라 변화할 때 가변이득 PID 제어기를 이용하였을 때만 정확한 장력제어를 할 수 있음을 알 수 있었다.

2. 수학적 모델 개발

웹이송 시스템의 모델링과 해석을 용이하게 하기 위하여 단위요소(primitive element) 개념을 도입하였다. 단위 요소의 예는 Fig. 1에 보인 바와 같이

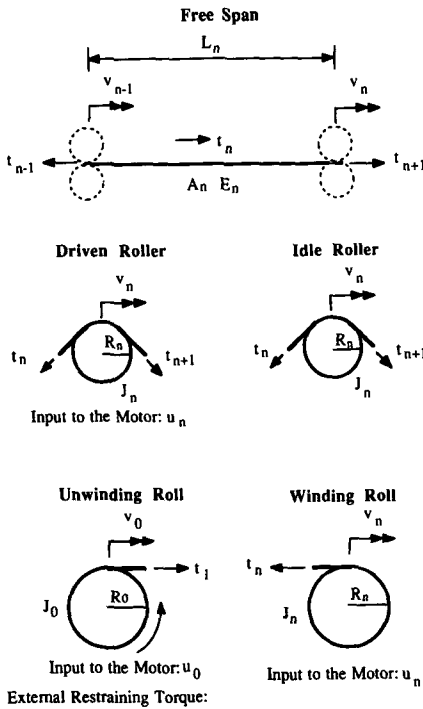


Fig. 1 Primitive elements

하나의 프리스팬(free span), 구동롤러(driven roer), 지지롤(idle roll), 풀림롤(unwinding roll), 권취 롤(winding roll) 등이다. 질량보존의 법칙, 후크의 법칙, 뉴톤의 법칙 등을 이용하여 이러한 단위 요소에 대한 동적 모델을 유도하였다.

2.1 장력과 웹 속도의 관계

Fig. 2에 있는 단일 스패ن 시스템을 이용하여 장력과 웹속도의 관계를 구하였다. 이상화된(idealized) 수학적 모델 유도를 용이하게 하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 웹 재료와 롤러가 접촉하고 있는 구간의 웹

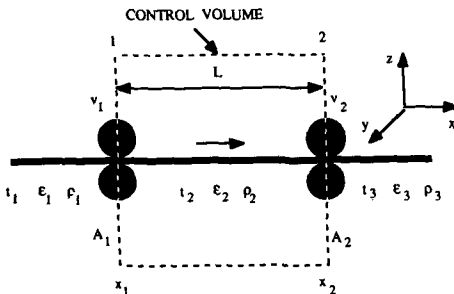


Fig. 2 Single-span system

길이가 롤러 사이의 웹의 길이에 비하여 무시할 만큼 짧다.

(2) 웹의 두께는 롤러의 반경에 비하여 매우 작다.

(3) 웹과 롤러 사이에는 미끄러짐이 없다.

(4) 단일 웹스팬 내에서는 온도나 습도 변화가 없다.

(5) 웹의 단면적이 일정하다.

(6) 웹의 변형도가 매우 작다(strain $\ll 1$).

(7) 단일 웹스팬 내에서 변형도는 고르게 분포되어 있다(uniform).

(8) 웹스팬 내에서 밀도와 탄성계수는 변화하지 않는다.

(9) 웹은 탄성 변형한다.

(10) 웹이송 방향의 응력이 월등히 크다.

Fig. 2의 제어 용적(control volume)에 질량 보존의 법칙을 적용하면 다음과 같다.⁽¹³⁾

$$\frac{d}{dt} \int_{x_2}^{x_1} \rho_2(x, t) A_2(x, t) dt = \rho_1(t) A_1(t) v_1(t) - \rho_2(t) A_2(t) v_2(t) \quad (1)$$

Fig. 3의 미소 웹요소(infinitesimal element)에서, 장력이 있을 때와 없을 때의 웹의 상태는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$dx = (1 + \epsilon_x) dx_u \quad (2)$$

$$w = (1 + \epsilon_y) w_u \quad (3)$$

$$h = (1 + \epsilon_z) h_u \quad (4)$$

$$dm = \rho w h dx = \rho_u w_u h_u dx_u \quad (5)$$

단, 첨자 u 는 웹에 장력이 없을 때의 상태를 나타낸다.

식(1)~(5)를 조합하여 간단히 하면, 다음과 같은 비선형의 변형도와 웹속도의 관계를 구할 수 있다.

$$L \frac{d}{dt} [\epsilon_2(t)] = -v_2(t) \epsilon_2(t) + v_1(t) \epsilon_1(t) + v_2(t) - v_1(t) \quad (6)$$

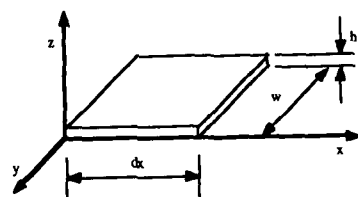


Fig. 3 Infinitesimal mass element from a web span

식(6)을 선형화하면 아래와 같이 식 (7)을 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt}[\epsilon_2(t)] = -\frac{v_{20}}{L}\epsilon_2(t) + \frac{v_{10}}{L}\epsilon_1(t) + \frac{V_2(t)}{L} - \frac{V_1(t)}{L} \quad (7)$$

가정 (4)~(10)을 적용하면 후크의 법칙으로부터 식(8)을 얻을 수 있다.

$$T_2 = AE\epsilon_2 \quad (8)$$

식(7)과 식(8)을 결합하면 장력과 속도관계를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt}[T_2(t)] = -\frac{v_{20}}{L}T_2(t) + \frac{v_{10}}{L}T_1(t) + \frac{AE}{L}(V_2(t) - V_1(t)) \quad (9)$$

2.2 장력과 롤러 속도관계

롤러는 웹 이송 시스템의 중요한 기본 요소 중의 하나이다. Fig. 2의 단일 스패ن 양단의 롤러는 모두 모터에 의하여 구동된다고 가정한다. Fig. 2의 위치2(position 2)에 있는 롤러의 원주방향 접선속도와 웹장력간의 관계는 롤러의 토크 평형식으로부터 구할 수 있으며, (3)~(10)의 가정에 다음과 같이 표현된다.⁽¹³⁾

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{B_{f2}}{J_2}V_2 + R_2^2(T_3 - T_2)\frac{R_2}{J_2}K_2U_2 \quad (10)$$

식(10)에서 U_2 는 Fig. 2에서 롤러를 구동하는 모터에 대한 입력이다.

3. 권취구간에서의 가변제어 시스템 설계

Fig. 4에 있는 권취구간에는 장력제어 시스템이

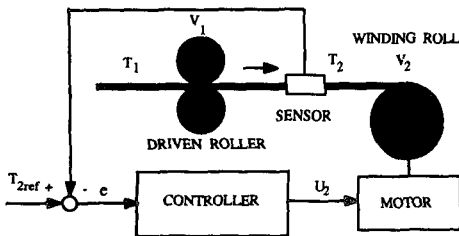


Fig. 4 Winding section with closed-loop tension control

구현되어 있다. 가변이득 PID 제어기의 성능을 검토하기 위하여 페루프제어 시스템이 다음과 같은 사양(specifications)을 만족시키는 2차 시스템처럼 거동하도록 설계하고자 한다.

- 정상상태 오차 $e_{ss} = 0 \text{ lbf}$
- 페루프 시스템의 댐핑상수 $\zeta = 0.7$
- 페루프 시스템의 고유진동수 $\omega_n = 10 \text{ rad/sec}$

위의 설계 사양에 대하여 고정이득 PID 제어기와 가변이득 PID 제어기를 설계하고 그들의 성능을 평가하고자 한다.

3.1 고정이득 PID 제어기

PID 제어기는 다음 식에 의하여 표현된다.

$$G_c = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (11)$$

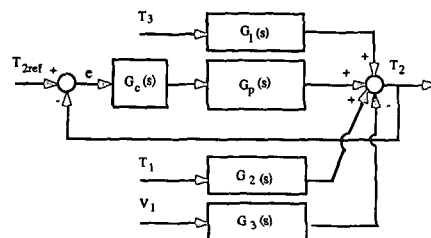
식(9)와 (10)으로 표현된 선형화된 수학적 모델이 권취구간에서 제어기 설계에 사용될 수 있다. Fig. 5는 페루프 시스템에 대한 블럭선도이다. 페루프 전달 함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_2 = \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} T_{2ref} + \frac{G_1}{1 + G_c G_p} T_3 + \frac{G_2}{1 + G_c G_p} T_1 - \frac{G_3}{1 + G_c G_p} V_1 \quad (12)$$

$T_1 = V_1 = T_3 = 0$ 인 특수한 경우에 식(12)는 다음과 같이 단순화시킬 수 있다.

$$\frac{T_2}{T_{2ref}} = \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} \quad (13)$$

혹은,



$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$: PID controller,

$$G_p(s) = \frac{1}{\Delta} K_2 \frac{AER_2^2}{LJ_2}, \quad G_1(s) = \frac{1}{\Delta} \frac{AER_2^2}{LJ_2}, \quad G_2(s) = \frac{1}{\Delta} \frac{v_{20}(s + \frac{B_{f2}}{J_2})}{L}$$

$$G_3(s) = \frac{1}{\Delta} \frac{AE}{L} (s + \frac{B_{f2}}{J_2}), \quad \Delta = s^2 + \frac{v_{20}}{L} s + \frac{v_{20}B_{f2}}{LJ_2} + \frac{AER_2^2}{LJ_2}$$

Fig. 5 Block diagram for a single-span system with closed-loop tension control

$$\begin{aligned} \frac{T_2}{T_{2ref}} &= \frac{b_2s^2 + b_1s + b_0}{s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \\ &= \frac{b_2s^2 + b_1s + b_0}{F(s)} \end{aligned} \quad (14)$$

단,

$$\begin{aligned} a_0 &= \beta_0 K_i \\ a_1 &= a_0 + \beta_0 K_p \\ a_2 &= a_1 + \beta_0 K_d \\ b_0 &= \beta_0 K_i \\ b_1 &= \beta_0 K_p, b_2 = \beta_0 K_d \end{aligned}$$

그리고

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \frac{v_{20} B_{f2}}{L J_2} \\ \alpha_1 &= \frac{v_{20}}{L} + \frac{B_{f2}}{J_2} \\ \beta_0 &= K_2 \frac{A E R_{20}}{L J_2} \end{aligned}$$

페루프 장력제어 시스템에 대한 3차 특성 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$F(s) = (s+r)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) = 0 \quad (15)$$

단 $r = K_r |\zeta\omega_n|$, $K_r > 10$

PID 제어기의 이득은 식 (14)와 (15)를 비교하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_i = \frac{1}{\beta_0} k_r \zeta \omega_n^3 \quad (16)$$

$$K_p = \frac{1}{\beta_0} \left(\frac{2\zeta\omega_n \beta_0 K_i}{\omega_n^2} + \omega_n^2 - \alpha_0 \right) \quad (17)$$

$$K_d = \frac{1}{\beta_0} \left(\frac{\beta_0 K_i}{\omega_n^2} + 2\zeta\omega_n - \alpha_1 \right) \quad (18)$$

식(16)~(18)을 이용하면, 주어진 개루프 시스템 파라미터와 페루프 장력제어 시스템의 요구되는 사양에 대하여 PID 제어기가 설계될 수 있다.

3.2 가변이득 PID 제어기

식(14)에서 권취률(windig roll)의 반경 R_2 와 관성 모멘트 J_2 는 시간에 따라 변화한다. 그런데 권취률의 관성모멘트는 롤의 밀도가 알려지면 권취률의 반경의 함수로 표현될 수 있다. 여기서, '권취율' R_b 를 다음과 같이 정의한다.

$$R_b = \frac{R_2}{R_{20}} \quad (19)$$

식(16)~(18)의 α_0 , α_1 그리고 β_0 는 다음과 같이 권취율 R_b 의 함수로 쓰여질 수 있다.

$$\alpha_0 = \frac{v_{20} B_{f2}}{L J_{20}} \frac{1}{R_b^4} + \frac{A E R_{20}^2}{L J_{20}} \frac{1}{R_b^2} \quad (20)$$

$$\alpha_1 = \frac{v_{20}}{L} + \frac{B_{f2}}{J_{20}} \frac{1}{R_b^4} \quad (21)$$

$$\beta_0 = K_2 \frac{A E R_{20}}{L J_{20}} \frac{1}{R_b^2} \quad (22)$$

단, 권취률은 고른밀도(uniform density)의 재질로 구성되어 있다고 가정한다.

3.3 고정이득 PID 제어

식(16)~(22)을 이용하면 특정 순간 혹은 특정 권취율에 대하여 한 세트의 PID 제어기 이득을 구할 수 있다. 예를 들면 $R_b = 1.0$ 일 때 PID 제어기의 이득은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_i = \frac{1}{\beta_0} k_r \zeta \omega_n^3 \quad (23)$$

$$K_p = \frac{1}{\beta_0} \left(\frac{2\zeta\omega_n \beta_0 K_i}{\omega_n^2} + \omega_n^2 - \alpha_0 \right) \quad (24)$$

$$K_d = \frac{1}{\beta_0} \left(\frac{\beta_0 K_i}{\omega_n^2} + 2\zeta\omega_n - \alpha_1 \right) \quad (25)$$

단,

$$\alpha_0 = \frac{v_{20} B_{f2}}{L J_{20}} + \frac{A E R_{20}^2}{L J_{20}} \quad (26)$$

$$\alpha_1 = \frac{v_{20}}{L} + \frac{B_{f2}}{J_{20}} \quad (27)$$

$$\beta_0 = K_2 \frac{A E R_{20}}{L J_{20}} \quad (28)$$

3.4 가변이득 PID 제어

식(14)에 의해 표현된 페루프 전달함수에 있는 파라미터 (R_2 , J_2)는 권취율(build-up ratio)의 함수이며, 시간에 따라 변화한다. 가변이득 제어의 기본 개념은 파라미터가 변화함에 따라 PID 제어기의 이득을 그 변화에 맞추어 계속하여 변화시키는 것이다.

가변이득장력제어기에 대한구성도(schematic diagram)가 Fig. 6에 있다. 제어기의 이득(gain)은 권취율, R_b 의 함수이다. 제어기 이득은 식(16)~(22)에 있는 알고리즘을 사용하여 결정할 수 있다. 식(16)~(22)에서 α_0 , α_1 , β_0 는 권취율의 함수이고 시간의 함수임을 기억할 필요가 있다. 페루프 전달함수의 s 평면에서의 극점(pole) 위치는 시간에 따른 시스템 파라미터의 변화에 따라 변한다. 가변이득 제어 알고리즘은 변화하는 모든 R_b 값에 대해서도 장력제어 시스템이 설계 사양을 맞출 수 있도록 페

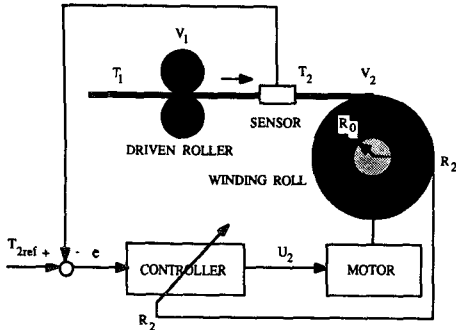


Fig. 6 Winding section with closed-loop tension control using a variable-gain controller

루프 극점의 위치를 계속하여 변화시킨다. (update)

4. 고정이득 및 가변이득 PID 제어 예제

4.1 고정이득 PID 제어

권취 구역에서 고정이득 PID 제어기법을 이용할 때 장력제어 시스템의 동적 특성을 결정하기 위하여 하나의 예제를 풀어 보고자 한다. Fig. 7에 여러가지 권취율에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과가 도시되었다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터 값과 시스템에 대한 조건(conditions)은 부록에 정리하였다. 권취구역에서 권취율이 변화함에 따라 롤의 직경 및 관성모멘트가 변화하여, $R_b=1$ 에 대하여 설계된 고정이득 PID 제어기는 권취구역에서의 원하는 장력 사양을 만족시키지 못함을 알 수 있다.

4.2 가변이득 PID 제어

권취구역에서 가변이득 PID 제어기법을 이용할 때 장력제어 시스템의 동적 특성을 결정하기 위하여

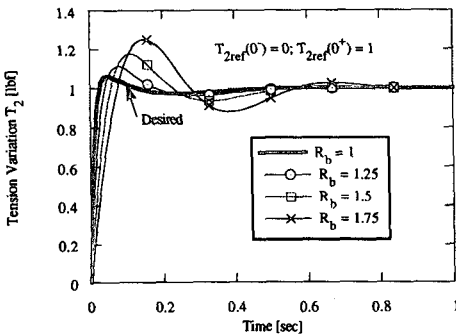


Fig. 7 Step responses for system with fixed-gain PID controller

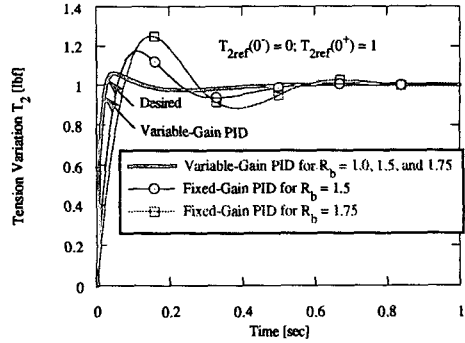


Fig. 8 Step responses for system with fixed-gain PID and variable-gain PID controller

여 또 다른 예제를 풀어 보았다. Fig. 8에 보여진 바와 같이 고정이득 PID 및 가변이득 제어기를 사용했을 때의 장력제어 시스템에 대한 단위 응답(step response)결과를 비교하였다. 가변이득 제어기를 이용했을 경우에는 모든 R_b 값에 대하여 제어 시스템에 요구되는 사양을 모두 만족시킴을 보여주었다.

5. 결 론

웹이송 장치에서 장력제어를 위한 간단한 수학적 모델이 개발되었다. 이 모델을 이용하여 웹의 권취 구간에서 사용할 수 있는 가변이득 PID 제어기가 제안되었다. 개발된 가변이득 PID 제어기는, 시변(time-varying) 파라미터가 있는 시스템의 제어시에, 다른 '적응제어' 기법에 비하여 설계 및 적용이 간단하다는 장점이 있다. 그러나, 권취롤의 반경, 혹은 시스템 파라미터에 측정오차가 있거나 외란이 있을 경우에는 제어기의 성능이 떨어지는 약점이 있다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) Brandenburg, G., 1976, "New Mathematical Models for Web Tension and Register Error," *Proc. 1. 3rd International IFAC Conf. on Instru-*

- mentation and Automation in the Paper, Rubber and Plastics Industries*, Brussels, May 24~26.
- (3) King, D. L., 1969, *The Mathematical Model of a Newspaper Press*, Newspaper Techniques, Dec, pp. 3~7.
- (4) Whitworth, D. P. D. and Harrison, M. C., 1983, "Tension Variations in Pliable Material in Production Machinery," *Appl. Math. Modeling*, Vol. 7, pp. 189~196.
- (5) Veits, V. L., Beilin, I. Sh. and Merkin, V. M., 1983, "Mathematical Models of an Elastic Strip in Mechanisms with Flexible Couplings," *Soviet Applied Mechanics*, Vol. 19, No. 8, Aug. pp. 721~726.
- (6) Soong, T. C. and Li, C., 1979, "An Elastic Analysis of Multiroll Endless Web Systems," *ASME Trans. on Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 101, Dec. pp. 308~313.
- (7) Shelton, J. J., 1988, "Dynamics of Web Tension Control with Velocity or Torque Control," *Proc. ACC*.
- (8) Wolfermann, W. and Schroder, D., 1987, "Application of Decoupling and State Space Control in Processing Machines with Continuous Moving Webs," *Proc. International Federation of Automatic Control*, Munhen.
- (9) Wahlstrom, B., Juusela, A., Ollus, M., Narvainen, P., Lehmus, I. and Lonnqvist, P., 1983, "A Distributed Control System and Its Application to a Board Mill," *Proc. International Federation of Automatic Control*, pp. 1~14.
- (10) Martin, J. R., 1973, "Tension Control for Web-Off-Set," *The Penrose Graphic Arts and International Annual*, Vol. 66, pp. 209~214.
- (11) Bryant, G. F. and Higham, J. D., 1971, "A Method of Realizable Non-Interactive Control Design for a Five Stand Rolling Mill," *Proc. FAC/IFIP Conference on Digital Computer Applications to Process Control*, Helsinki, Finland, June.
- (12) Endersby, D. C. and Zucker, E., 1966, "Direct Tension Control by Strain Gauges and Disc Brakes for Rewinders," *Pulp and Paper Magazine of Canada*, Vol. 67, No. 9, Sept, pp. 393~398.
- (13) Shin, K., 1986, "Tension Control in a Moving Web," Unpubl. M. S. Report, Oklahoma State Univ.
- (14) Dorf, R. C., 1981, *Modern Control Systems*, 3rd. Ed. Addison Wesley.

부 록

시뮬레이션을 위한 시스템 상태 및 파라미터 값

System Conditions :

$$T_n(0) = 0.0 \text{ (1bf)}, n=1, 2$$

$$V_n(0) = 0.0 \text{ (ft/sec)}, n=1, 2$$

Parameter Values :

$$A = 0.12 \text{ (in}^2\text{)}$$

$$E = 350,000 \text{ (1bf/in}^2\text{)}$$

$$J_{20} = 94.0 \text{ (1bf-in-sec}^2\text{)}$$

$$L = 120 \text{ (in)}$$

$$v_{n0} = 1,000 \text{ (ft/min)}, n=1, 2$$

$$k_r = 13$$