

## Tension Control of Unwinder/Winder using a Tension Observer

宋丞鎬\* · 薛承基\*\*

(Seung-Ho Song · Seung-Ki Sul)

**Abstract** -The strip tension as well as the line speed should be controlled tightly for the quality of products and productivity of the continuous strip processing line. In this paper, a new tension control algorithm with tension observer is proposed using observed tension as a regulator feedback. The tension observer is based on the torque balance of a roller stand including the acceleration torque. Using this estimated tension, new tension controller can be constructed with faster dynamic response in case of line speed acceleration or deceleration. The proposed scheme needs no additional hardware because the inputs of observer, current and speed, are already being monitored by the motor drive system. Through the simulations and experiments with laboratory set up, performances of conventional schemes and proposed one are compared. The results show the effectiveness of the proposed tension controller.

**Key Words** : tension observer, tension control, unwinder/winder

### 1. 서 론

최근들어 교류 가변속 전동기 구동 장치의 고성능화에 따라 철강 압연을 비롯한 여러 연속 공정 라인에서 유도 전동기 구동 시스템이 널리 사용되고 있다[1]. 특히 제철, 제지, 인쇄, 섬유 등 여러 가지 산업의 작업 공정은 코일 또는 두루마리의 형태로 이송된 소재를 폴림롤에 의해 풀어서 작업하고, 작업이 끝난 소재를 감김롤에 의해 되감는 경우가 많다. 이러한 연속 공정 라인의 장력제어는 전동기 제어장치의 응용 분야 중에서도 가장 고정밀도 기술을 필요로 하는 분야 중의 하나이다[2]. 재료의 사행(蛇行)을 방지하고 제품의 품질을 좋게 하기 위해서는 공정 라인의 선속도를 변화시킬 때 발생하는 순시 장력의 변동을 최소화 하는 것이 매우 중요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 라인의 곳곳에 로드셀 등의 장력계를 설치하여 측정된 장력신호에 따라 스탠드간 장력을 제어하는 방식이 많이 사용되고 있다[2]. 그러나 장력 측정을 위해서는 센서를 장착하기 위한 구조물이 필요하고 측정된 신호가 미약하여 노이즈에 취약한 단점이 있다[2,3]. 따라서 장력 센서는 연속 공정의 일부 핵심 구동 장치에서만 사용되고 나머지 대부분의 구동물들은 속도제어 모드로 운전되는 것이 일반적이다. 이 경우 속도 기준값의 오차나 속도 제어계를 포함한 각 전동기 구동 시스템간의 특성 차이가 존재할 경우 실제 롤러의 선속도가 변동하고 따라서 큰 장력 오차가 발생한다.

산업계에서 일반적으로 많이 쓰이는 장력 제어 방식은 크

게 두 가지로 분류된다. 첫 번째는 필요한 장력에 비례하는 토크를 발생시키는 개루프 제어 방식이고 두 번째는 장력 센서를 사용하는 폐루프 제어 방식이다. 그러나 장력 센서를 사용하기 위해서는 센서를 장착하기 위한 구조물이 추가로 필요하고 측정된 신호가 미약하여 노이즈에 취약한 단점이 있다[3,4]. 또한 폴림롤과 감김롤은 재료의 풀고 감음에 따라 소재의 이동 경로(path)가 변화하므로 접촉식 센서를 사용하기 어렵다. 따라서 기존의 제어 시스템은 일반적으로 전동기의 토크분 전류를 조절하여 반지름에 알맞은 장력을 발생하도록 하는 개루프 제어방식이 주종을 이루고 있다.

참고 문헌[5]에서는 부하 토크 관측기를 사용하여 롤 전후의 장력 차이를 추정하고 그 값을 속도제어기 출력에 보상하는 것에 의해 장력의 영향을 최소화하는 비간섭 속도 제어를 제안하였다. 그 결과 속도 제어 특성은 획기적으로 개선되었으나 장력 제어 특성은 검토되지 않았다. 한편 최근에 두 개의 롤로 구성된 브라이들의 장력과 평균속도를 독립적으로 제어할 수 있는 비간섭 제어 알고리즘이 제안되었다[6]. 이 방식은 일종의 전향 보상에 의한 방법으로서 롤의 반지름과 관성이 동일한 경우에만 적용할 수 있는 단점이 있다.

본 논문에서는 장력 관측기를 써서 폴림롤 또는 감김롤의 장력을 관측하고, 이것을 피드백 신호로 이용하는 장력 제어를 제안한다. 제안된 장력 관측기는 가속 토크를 포함한 롤러의 토크 평형식에 기초를 두고 있으며, 일반적인 전동기 구동 시스템에서 이미 사용하고 있는 전류와 속도 정보를 장력관측기의 입력으로 사용하므로, 부가적인 하드웨어가 필요없는 장점이 있다. 즉, 장력 센서 없이 토크와 속도 정보만으로 폴림롤 또는 감김롤의 장력을 관측할 수 있다. 본 논문에서는 디지털 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 장력 제어 방법을 기존의 장력 제어 알고리즘과 비교 검토하고 그 우수성을 보였다.

\* 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 卒業 · 工博

\*\* 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 1999年 8月 6日

最終完了 : 1999年 11月 1日

## 2. 연속 구동 시스템의 모델링

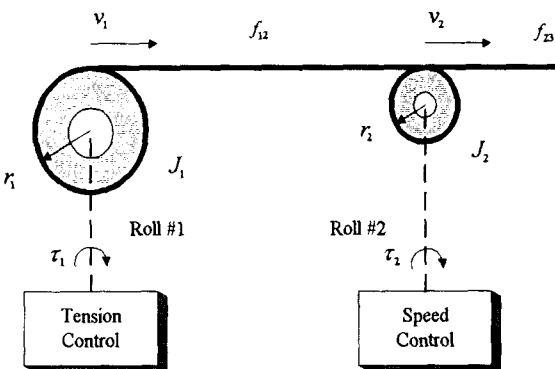
폴림롤의 장력 제어를 위한 시스템 구성을 그림1에 보였다. 이러한 구성은 다중 스펠 시스템을 구성하는 가장 작은 단위의 기본 요소라고 할 수 있다. #1 전동기는 장력 제어를 수행하고 #2 전동기는 선속도 제어를 수행한다. 전동기와 롤의 마찰이 없고, 롤과 스트립 사이에 미끄러짐(slip)이 발생하지 않는다고 가정하였으며, 전동기와 롤의 기어비는 1:1인 경우에 대하여 고찰하였다. 전동기와 롤을 연결하는 축의 강성이 충분히 커서 전동기와 롤을 하나의 관성계로 간주할 수 있다면 #1롤과 #2롤에서의 운동 방정식은 각각 식(1) 과 (2)와 같이 주어지며 스트립의 장력은 (3)과 같이 모델링하였다. 즉 한 스펠에서 소재의 장력은 그 스펠의 양 끝 롤러의 속도 차이의 1차 지연의 형태로 주어진다[7,8]

$$\frac{J_1}{r_1^2} \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{r_1} \tau_1 + f_{12} \quad (1)$$

$$\frac{J_2}{r_2^2} \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{r_2} \tau_2 + (f_{23} - f_{12}) \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} f_{12} = K_{12}(v_2 - v_1) - C_{12}f_{12} \quad (3)$$

여기서  $J_i$ 는  $i$ 번째 롤과 전동기를 포함한 등가 관성 모멘트이고,  $r_i$ 는 롤의 반지름을 나타내며,  $v_i$ 와  $\tau_i$ 는 각각 전동기의 선속도와 발생 토크를 나타낸다. 폴림롤의 반지름과 관성은 변화하는 변수이지만 그 변화가 충분히 느리므로 롤의 1회전당 한 번씩 계산된 값으로 갱신하고 있으며 그 사이 구간에서는 일정하다고 가정하였다. 또한  $f_{12}$ 는 두 롤 사이의 소재에 걸리는 장력이며,  $f_{23}$ 은 다음 스펠으로 연결되는 출력측 장력을 표시한다.  $K_{12}$ 는 해당 스펠의 스프링 계수로서 소재의 재질 및 사이즈에 따라 정해지며  $C_{12}$ 는 스트립 시정수의 역수에 해당한다[9].



$J_1, J_2$  : inertia of stand 1, 2 (motor + roll) [kgm<sup>2</sup>]  
 $r_1, r_2$  : radius of roll 1, 2 [m]       $v_1, v_2$  : speed of roll 1, 2 [m/sec]  
 $\tau_1, \tau_2$  : torque of motor 1, 2 [Nm]       $f_{12}, f_{23}$  : tension of span 12, 23[N]

그림 1 폴림롤의 장력 제어 시스템.  
 Fig. 1 Tension control system for pay-off reel.

## 3. 기존의 폴림롤/감김롤 장력 제어

폴림롤/감김롤의 장력제어에는 센서의 설치 비용 및 구조상의 난점 때문에 장력 센서를 사용한 피드백 제어 방식 보다 전동기의 토크를 조절하는 개루프 제어 방식이 많이 사용되고 있다. 이와 같은 기존의 개루프 장력 제어 블록도를 그림 2에 표시하였다. 소재의 장력을 제어하기 위해 전동기 토크분 전류를 식 (4)와 같이 장력 기준값과 롤의 반지름에 비례하도록 제어하고 있다. 따라서 일정한 장력을 유지하기 위해서는 롤의 반지름 감소(증가)에 따라 전동기 발생 토크를 감소(증가)시켜야 한다. 폴림롤의 경우는 장력을 발생시키기 위해 음의 부호의 토크가 필요하고 감김롤은 양의 부호의 토크를 발생한다. 즉 장력이 걸린 상태에서는 일반적으로 폴림롤은 발전(generating)모드로, 감김롤은 모터링(motoring)모드로 운전하게 된다. 한편 라인의 속도가 증가(감소)하는 동안 시스템의 에너지 증가(감소)가 필요하다. 그림 2에서 점선으로 표시한 부분은 이와 같이 속도 가감속시에 필요한 토크를 전향 보상(Feed-Forward Compensation : FFC) 하는 블록이다. 즉 라인의 선속도 기준값이 변동할 때 그 변동량에 비례하는 토크를 식(5)와 같이 미리 폴림롤/감김롤 측에 보상하는 방식이다. 이 때 정확한 보상을 하기 위해서는 폴림롤/감김롤의 속도 기준값과 관성을 정확히 알아야 한다. 인접한 롤은 선속도 기준값에 따라 비례 적분 속도 제어를 수행하고 있으며 각 롤의 전류 제어에는  $T_{cc}$ 의 시정수를 갖는 1차 지연으로 모델링 하였다.

$$\tau_1^* = -\hat{r}_1 f^* \quad : \text{without FFC} \quad (4)$$

$$\tau_1^* = -\hat{r}_1 f^* + \frac{\hat{J}_1}{r_1} \frac{dv^*}{dt} \quad : \text{with FFC} \quad (5)$$

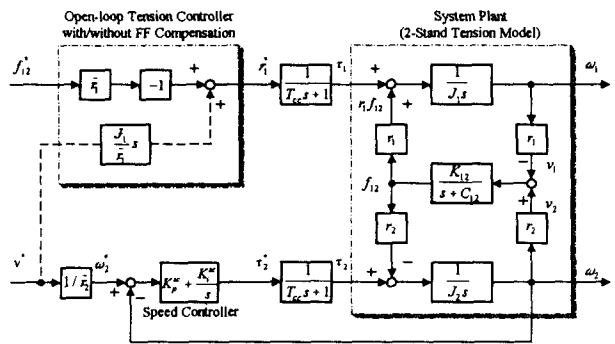


그림 2 기존의 개루프 장력 제어 블록도.

Fig. 2 Configuration of conventional tension feedback controller (PI).

## 4. 제안된 폴림롤/감김롤 장력 제어

### 4.1 제어 블록도 및 전달 함수

폴림롤(감김롤)은 공정 라인의 시작(끝)에 위치하므로 식 (1)에서 보는 바와 같이 한쪽 장력의 상호 결합 만을 가지게 되며 이 값은 전동기측에서 바라본 부하 토크에 해당한다.

그림 3에 제안된 장력 관측기와 이를 이용한 장력 제어기의 블록도를 표시하였다. 전동기 속도의 변화율과 전동기 출력 토오르크를 이용하여 부하 토오르크에 해당하는 장력은 식 (6)과 같이 구할 수 있다. 속도 측정값에는 필연적으로 측정 노이즈가 포함되어 있으므로, 식 (7)식과 같은 2차 저역 통과 필터를 포함한 미분 필터를 구성하여 전동기 속도의 변화율을 얻는다. 그 결과 설정된 차단 주파수 이상의 높은 주파수 영역에서 외란 억제 특성을 갖도록 설계할 수 있다. 식 (8)에 표시한 전동기 토오르크 또한 속도 측정과 신호 처리에 따른 시간 지연을 보상하기 위해  $T_f$ 의 시정수를 가지는 저역 통과 필터를 통과한 값을 사용한다. 제안된 장력 제어기는 식 (9)에 보인 바와 같이 장력 기준값과 관측된 장력의 오차를 이용하여 전동기 출력 토오르크를 결정하는 비례 적분 제어기 형태로 구성하였다. 여기서  $K_p^{tc}$ 는 장력 제어기의 비례 이득,  $K_i^{tc}$ 는 적분 이득을 의미한다.

$$\hat{f}_{12} = \frac{1}{r_1} (\hat{J}_1 \hat{\omega}_1 - \hat{\tau}_1) \quad (6)$$

$$\hat{\omega}_1 = \frac{\omega_f^2 s}{s^2 + 2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2} \omega_1 \quad (7)$$

$$\hat{\tau}_1 = \frac{1}{1 + T_f s} \tau_1 \quad (8)$$

$$\tau_1^* = -\left(K_p^{tc} + \frac{K_i^{tc}}{s}\right) (f_{12}^* - \hat{f}_{12}) \quad (9)$$

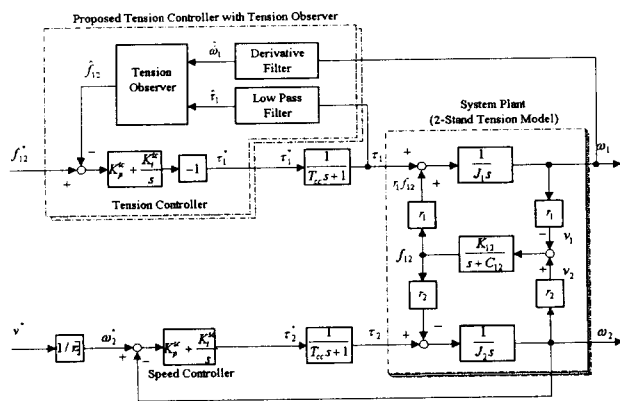


그림 3 제안된 폴림롤/감김롤 장력 제어기 구성도  
Fig. 3 Configuration for the proposed unwinder/winder tension controller.

관측된 장력은 근본적으로 전동기 토오르크와 반지름으로부터 계산되므로 정상 상태 제어 특성은 기존의 개루프 제어기의 특성과 비슷하다. 그러나 과도상태에서는 실제 속도의 가속과 감속에 필요한 토오르크를 고려하게 되므로 장력의 변동을 억제할 수 있다. 이와 같은 특성은 기존의 개루프 장력 제어에 속도 가감속에 필요한 토오르크 만큼 전향 보상을 것과 같은 효과를 내게 된다. 그러나 개루프 제어에 전향 보상을 더한 경우는 속도 지령치의 변화를 기준으로 보상 토오르크를 계산하게 되고 제안된 방법에서는 실제 속도의 변화율을 이용하여 가감속 토오르크 및 장력을 계산하게 된다.

#### 4.2 속도 미분기의 설계 및 구현

전동기의 가감속에 필요한 토오르크를 얻기 위해서는 전동기의 속도를 미분하는 것이 필요하다. 실제로 미분 신호처리는 잡음에 취약한 단점을 가지고 있으므로 입력신호를 곧바로 미분하기 보다는 미분 필터를 이용하여 제어시스템의 대역폭 보다는 다소 높은 대역폭을 가지면서 외부 잡음에 강한 특성을 얻는다. 제안된 방법에서는 그림 4에 보인 것과 같은 2차 미분 필터를 사용하였다. 이 블록도에서 입력 신호로부터 미분 출력에 해당하는까지의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\hat{x}}{x} = \frac{K_1 s}{s^2 + K_1 K_2 s + K_1} \quad (10)$$

식 (7)과 식 (10)을 비교하면  $K_1$ 과  $K_2$ 는 다음과 같이 정할 수 있다. 이 속도 미분기의 응답 특성은 차단 각주파수,  $\omega_f$ ,와 감쇠정수,  $\zeta_f$ ,에 의해 조절할 수 있으며 설계치는 약 차단 각주파수,  $\omega_f=31[\text{rad/sec}]$ ,와 감쇠정수,  $\zeta_f=0.79$ ,를 사용하였다. 설계된 속도 미분 필터의 주파수 응답 특성을 그림 5에 나타내었다.

$$K_1 = \omega_f^2, \quad K_2 = \frac{2\zeta_f}{\omega_f} \quad (11)$$

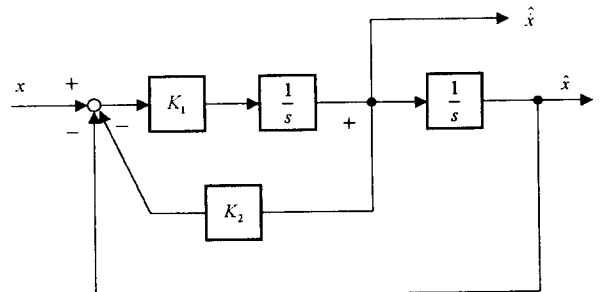


그림 4 2차 미분 필터의 구조.  
Fig. 4 Structure of a second order derivative filter.

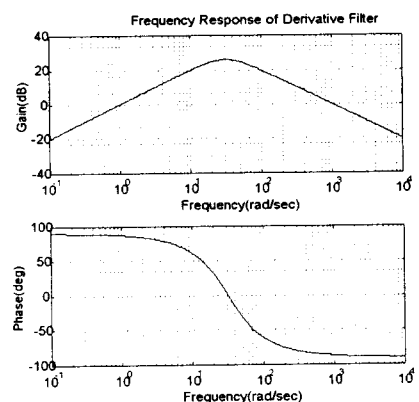


그림 5 속도 미분 필터의 보드 선도.  
Fig. 5 Bode diagram of speed derivative filter.

#### 4.3 폴림롤의 반지름 및 관성 계산

폴림롤과 감김롤 제어의 어려운 점은 반지름과 관성이 변화한다는 점이다. 일정한 선속도를 유지하기 위해서는 반지

름의 변화에 따라 각속도를 변경하여야 하며, 또한 관성의 변화는 가감속시의 속도오차를 유발하여 장력 변동을 일으키는 원인이 된다.

본 논문에서 사용된 반지름과 관성 계산방법은 다음과 같다. 반지름이 일정하고 그 값을 알고 있는 인접롤로부터 계속 순시 속도를 입력 받아서 적분하면 소재의 이송거리를 알 수 있다. 따라서 식 (12)와 같이 풀림롤이 한바퀴 운전하는 동안 측정된 풀림롤의 각속도와 전달받은 인접롤의 선속도를 누적하여 나누면 풀림롤의 반지름  $r_1$ 을 알 수 있다. 여기서  $r_2$ 는 인접롤의 반지름이다. 이 때 필요한 가정은 소재의 길이는 늘어나지 않고 일정하며, 인접롤에서 슬립이 발생하지 않아야 한다. 이와 같은 방법은 인접롤의 속도를 추가로 입력받아야 하는 문제가 있지만, 계산이 간단하고 충분한 장력이 인가된 경우에는 계산 결과가 정확하여 실제로 많이 사용되고 있다. 반지름 계산은 풀림롤을 기준으로 롤이 한바퀴 돌 때마다 한 번씩 수행되므로 속도 측정 노이즈에 둔감하게 된다.

$$\hat{r}_1 = \frac{r_2 \sum \omega_2}{\sum \omega_1} \quad (12)$$

풀림롤이나 감김롤의 경우 총 관성 모멘트는 식(13)과 같이 전동기에 의한 관성,  $J_M$ ,과 축을 포함한 롤의 관성,  $J_R$ , 그리고 코일에 의한 관성,  $J_C$ ,로 구분된다. 이중에서 전동기의 관성  $J_M$ 은 전동기의 특성값으로 상수이고 단위는  $[kgm^2]$ 이다. 롤의 관성은 식 (14)와 같이 구해지며, 여기서  $\rho$ 는 롤 재질의 밀도,  $W$ 는 롤의 축방향 길이,  $r_{10}$ 는 코일이 감기지 않은 빈 롤의 반지름을 의미한다. 코일의 관성은 시스템의 운전상황에 따라 변하는 변수로서 식 (15)와 같이 계산될 수 있으며, 여기서  $\rho_c$ 는 코일의 밀도,  $W_c$ 는 코일의 축방향 길이를 나타낸다. 코일의 반지름이 커짐에 따라 늘어나는 코일의 관성은 반지름의 4제곱에 비례함을 알 수 있다.

$$\hat{J}_1 = J_M + J_{R1} + J_{C1} \quad (13)$$

$$J_{R1} = \frac{\rho \pi W}{2} r_{10}^4 \quad (14)$$

$$J_{C1} = \frac{\rho_c \pi W_c}{2} (\hat{r}_1^4 - r_{10}^4) \quad (15)$$

### 5. 시뮬레이션

제안된 방법의 유용성을 입증하기 위하여 축소형 모델을 대상으로 시뮬레이션과 실험을 행하였다. 전동기와 롤러, 센서의 사양과 실험에 사용한 소재의 특성 등을 표 1에 나타내었고 시뮬레이션에도 동일한 값을 사용하였다.

그림 6은 풀림롤을 아무런 보상 없이 토오크분 전류 제어 모드로 가감속 운전한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 그림 6 (a)는 속도 기준과 실제 속도를 나타내고 있으며 10m/min에서 100m/min까지 가속한 후 다시 10m/min으로 돌아오는 과정을 나타내고 있다. 그림 6 (b)에 나타난 바와 같이 풀림롤의 출력 토오크,  $\tau_1$ ,이 일정한 값으로 유지되고 있으므로 시스템의 가속(또는 감속)에 필요한 토오크는 속도 제어 모드로 동작중인 풀림롤에서 공급하고 있다. 그 결과 그림 6 (c)에 보인 소재의 장력은 가속 중에는 기준값보다 증가하고 감

속 중에는 감소함을 알 수 있다. 가감속시의 장력 변동량은 약  $\pm 4kgf$ 에 이르며 이 값은 시스템의 관성이 클수록, 가감속 기울기가 클수록 커진다. 그림 6 (c)에는 제안된 장력 관측기에 의해 계산된 장력도 함께 보이고 있다.

그림 7은 제안된 장력 관측기를 이용한 장력 피드백 제어를 수행한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 제안된 방법에서는 전동기 출력 토오크와 측정된 속도의 미분값을 토대로 장력을 추정하고 그 값이 일정하게 유지되도록 제어하고 있다. 그 결과 그림 7 (c)의 실제 장력에 거의 변동이 발생하지 않음을 알 수 있다. 실제 장력의 변동은 가속하기 시작하는 부분과 끝부분에서 약 1.5kgf의 최대값을 보일 뿐 가감속 도중에는 장력이 일정하게 유지되고 있다. 그림 7 (c)에 보인 장력 관측값의 실제 장력과의 차이는 잡음의 영향을 억제하기 위한 속도 미분 필터의 신호 지연과 속도 증가에 따른 마찰 때문이다.

그림 8은 그림 6의 경우에 풀림롤 가감속시의 관성보상을 추가한 시뮬레이션 파형이다. 그림 8 (b)에서는 식 (5)와 같이 풀림롤측 토오크분 전류 기준값에 속도 기준값 변동분에 해당하는 가감속 보상항을 더하여 출력하고 있다. 가감속 보상항은 선속도 기준값의 기울기, 반지름, 관성 등으로 구성되며 따라서 기존의 무보상 제어 또는 제안된 제어 방법에서는 필요로 하지 않는 라인의 선속도 기준값을 추가로 알아야 한다. 이와 같이 가감속 보상이 정확히 이루어진 경우에는 그림 8 (c)에 보인 것처럼 가속하기 시작하는 부분과 끝부분에서 약간의 장력 변동이 발생할 뿐이고 가속하는 도중이나 감속하는 도중에는 장력이 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 한편 그림 8의 (d), (e)와 (f)는 인접한 롤의 속도제어 이득을 낮게 설정한 경우에 해당하는 시뮬레이션 결과로서, 속도 기준값에 의한 전향보상시 장력의 변동량이 인접한 브라이들의 속도제어 특성에 따라서 달라짐을 보인다. 즉 낮은 속도제어 응답성 때문에 실제 속도가 기준속도에 비해 늦게 변화할 경우 기준 속도의 변화량을 근거로 전향 보상을 수행하는 것에 오차가 발생할 수 있다.

표 1 기계 장치 설계 사양.

Table 1 Specification of mechanical set-up design.

	#1롤: 풀림롤(POR)	#2롤: 브라이들(BR1)
Motor Power	37kW	5.5kW
Motor Base Speed	1780 rpm (186rad/sec)	1150 rpm (120rad/sec)
Motor Torque	200 N.m	45 N.m
Line Speed	100 mpm (135rpm)	100 mpm (177rpm)
Acc./Dec. Rate	25 mpm/sec (33.7 rpm/sec)	25 mpm/sec (44.2 rpm/sec)
Roll Diameter	240 mm	180 mm
Inertia (Motor+Roll)	0.26kg.m <sup>2</sup>	0.08kg.m <sup>2</sup>
Load Cell	Normal Weight : 100kgf Accuracy : 1%	

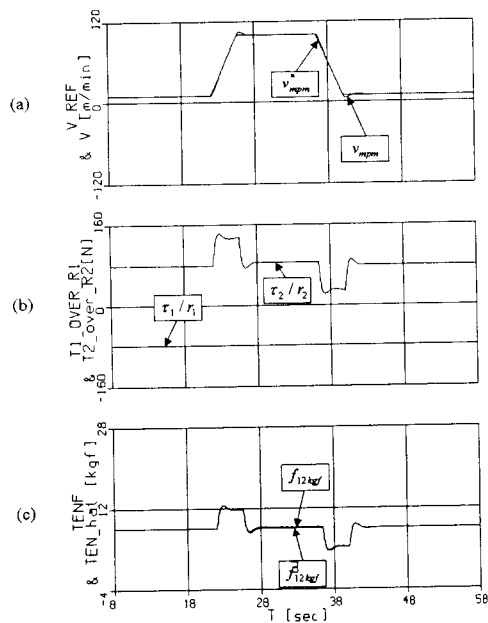


그림 6 기존의 장력분 전류 일정 제어 (선속도 10m/min에서 100m/min 가감속 시뮬레이션) (a)선속도 (b) 등가 힘 (토크/반지름) (c) 장력 및 장력 추정값.

Fig. 6 Conventional constant current control for open-loop tension control (Line speed reference from 10m/min to 100m/min.) (a) Line speed. (b) Equivalent force (torque/radius). (c) Measured and observed tension.

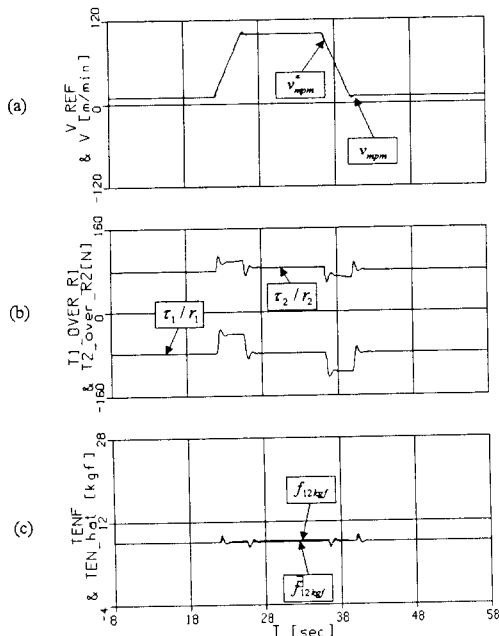
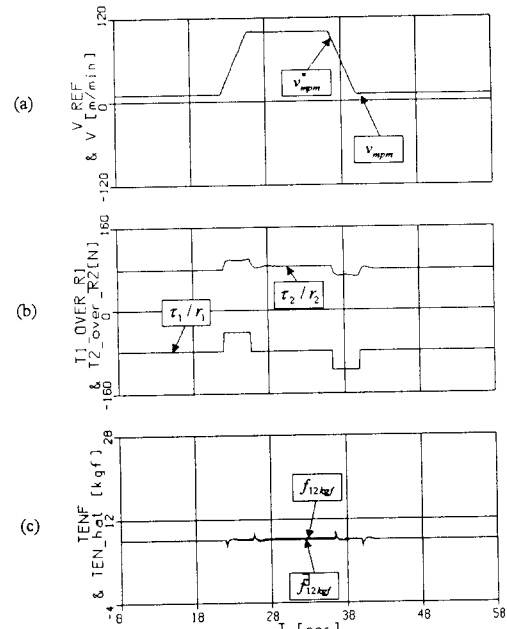


그림 7 제안된 장력 관측기를 사용한 장력 제어 (선속도 10m/min에서 100m/min 가감속 시뮬레이션) (a) 선속도, (b) 등가 힘(토크/반지름), (c) 장력 측정값 및 장력 추정값

Fig. 7 Proposed tension control using tension observer (Line speed reference from 10m/min to 100m/min.) (a) Line speed, (b) Equivalent force (torque/radius), (c) Measured and observed tension

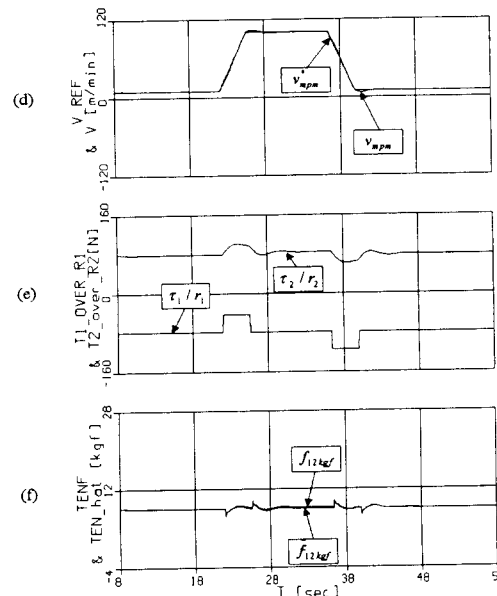


그림 8 선속도 기준 변화시 가감속 토크를 전향 보상하는 장력 분 전류 일정 제어 (선속도 10m/min에서 100m/min 가감속 시뮬레이션)

(a)~(c) : 인접한 전동기의 속도 제어기 이득이 큰 (30rad/s) 경우 (a) 선속도, (b) 등가 힘(토크/반지름), (c) 장력. (d)~(f) : 인접한 전동기의 속도 제어기 이득이 작은 (6rad/s) 경우 (d) 선속도, (e) 등가 힘(토크/반지름), (f) 장력.

Fig. 8. Conventional constant current control with feed-forward compensation of acceleration torque using line speed reference (Line speed reference from 10m/min to 100m/min.). (a) Line speed, (b) equivalent force (torque/radius), and (c) tension with high (30rad/s) gain of adjacent speed controller. (d) Line speed, (e) equivalent force (torque/radius), and (f) tension with low (6rad/s) gain of adjacent speed controller.

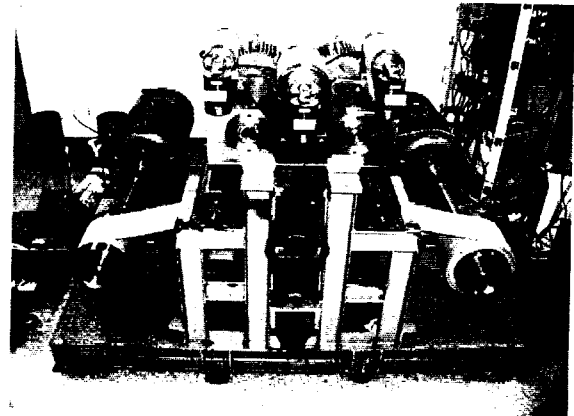
시스템의 마찰이 있을 경우에는 식 (6)에 의해 계산된 장력과 실제 장력 사이에 오차가 발생하게 되며 이와 같은 장력 오차는 일반적으로 속도가 높을수록 커진다. 이러한 문제는 기존의 개루프 제어 방법이나 제안된 방법 모두가 안고 있는 문제점으로서 이러한 장력 변동을 막기 위해서는 운전조건에 따라 마찰에 의한 기계적 손실을 보상하는 대책이 필요하다.

### 6. 실험

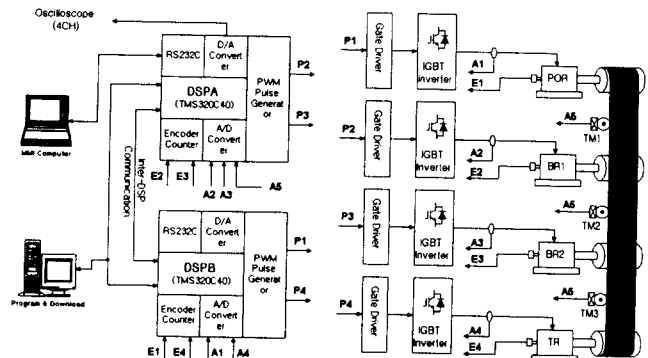
그림 9에 제작된 연속 구동 시스템 축소 모델의 사진과 제어 시스템 구성도를 보였다. 실험 장치에는 총 9개의 롤러가 장착되어 있으며 풀림롤과 감김롤을 포함한 4개의 롤러가 전동기로 구동되고 나머지 3개는 장력 측정롤(Tension Meter Roll), 또한 나머지 2개는 디플렉터 롤(Deflector Roll)로 사용된다. 3개의 장력 측정롤은 4개의 구동롤 사이에 위치하여 각 스패의 장력을 로드셀로 전달해 주는 역할을 한다. 그림 9 (b)에는 제어기와 전력회로 구성을 포함한 실험 장치 구성도를 나타내었다. 시스템의 장력과 속도를 제어하기 위해 디지털 신호 처리기(Digital Signal Processor: DSP)를 사용하여 유도 전동기의 회전자 자속 기준 벡터제어를 비롯한 모든 제어 기능 및 입출력 인터페이스를 수행하고 있다. 장력과 속도 기준값은 상위 컴퓨터(PC)로부터 #1 DSP측에 전달되며 #1 DSP와 #2 DSP간에는 DSP간 통신에 의하여 필요한 데이터(예를 들면 반지름 계산을 위한 인접롤의 속도 등)를 주고 받는다.

풀림롤(Pay-Off Reel, POR)과 감김롤(Tension Reel, TR)을 일정한 라인속도로 운전하면서 장력을 유지하기 위해서는 무엇보다도 정확한 반지름의 계산이 필수적이다. 그림 10은 제작된 연속 구동 시스템을 선속도 100m/min으로 구동하면서 계산된 풀림롤과 감김롤의 반지름을 동시에 출력한 파형이고 이 값은 실제 측정된 반지름과 1mm이내의 오차를 보였다. 감김롤의 경우는 소재가 감김에 따라 반지름이 증가하므로 각속도를 낮추어 선속도를 일정하게 유지하고 있고, 한편 풀림롤의 경우는 반지름이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이 실험에서 운전시간은 2분 정도이고, 총 이송거리는 약 200m 정도이다.

그림 11부터 13까지는 기존의 풀림롤 제어 방법과 제안된 방법을 비교하여 실험한 결과이다. 라인의 선속도를 10m/min에서 100m/min으로 변화시키면서 풀림롤이 1번 스패의 장력(TM1)을 제어하는 특성을 비교 검토하였다. 각 그림의 위에서부터 풀림롤의 선속도를 (a)에, 풀림롤이 발생하는 등가 힘(토크를 반지름으로 나눈 값)을 (b)에, 그리고 측정된 장력과 계산된 장력을 (c)에 보였다. 그림 11는 개루프 제어 특성으로서 반지름의 변화에 따라 원하는 장력을 발생시키기 위한 토크분 전류를 계산하여 출력하고 있다. 전동기의 출력을 일정하게 유지하면 정상상태 장력은 일정하게 유지되지만 가감속 중에는 그림 11 (c)에 보는 것처럼 장력이 변동하는 것을 알 수 있다. 이러한 장력 변동은 소재의 품질을 균일하게 유지하는데 나쁜 영향을 미치게 된다. 그림 12은 제안된 장력 관측기를 사용한 피드백 제어 특성이다. 관측기를 사용하여 계산된 장력이 기준값을 유지하도록 제어하고 있으며, 그 결과 그림 12 (c)에서 보는 것처럼 가감속중의 장력의 변동이 거의 사라지고 가속 시작 시점과 끝 시점에 약간의 변동이 남아 있다. 속도가 높을 때 나타나는 실제 장력의 리



(a)



(b)

그림 9 제작된 연속 구동 시스템 축소모델 (a)사진 (b)구성도.  
Fig. 9 Experimental setup (a) View of the experimental prototype (b) Configuration of the controller.

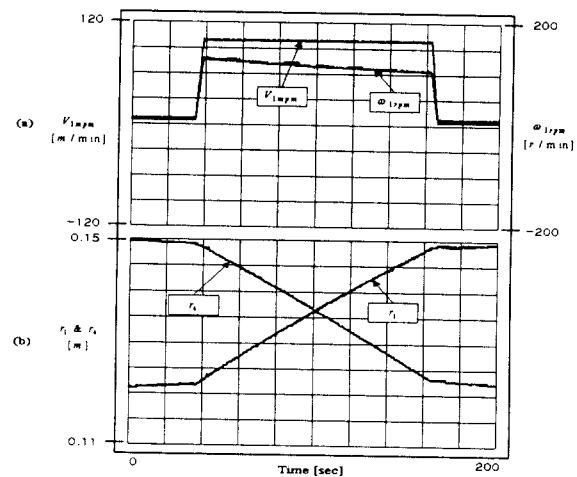


그림 10 풀림롤 및 감김롤의 선속도 일정제어를 위한 반지름 계산

- (a) 감김롤의 선속도와 각속도
- (b) 감김롤의 반지름과 풀림롤의 반지름

Fig. 10 Radius calculation of unwinder and winder  
(a) Line speed of winder, and angular speed of winder  
(b) Radius of winder, and that of unwinder

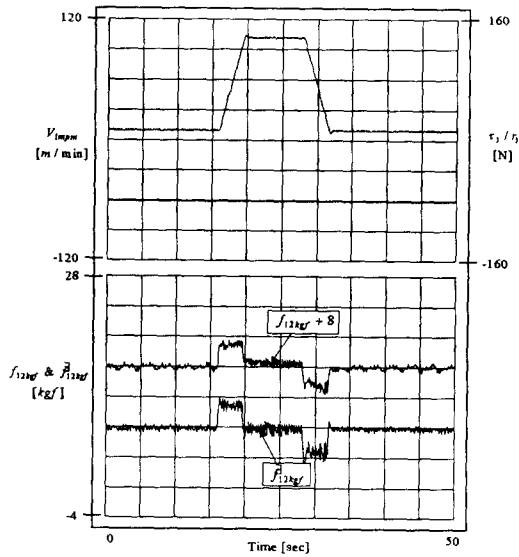


그림 11 기존의 장력분 전류 일정 제어 (선속도 10m/min 에서 100m/min 가감속 실험) (a) 선속도, (b) 등가 힘 (토크/반지름), (c) 장력 측정값(오프셋=8kgf), (d) 장력 추정값

Fig. 11 Conventional constant current control for open-loop tension control (Line speed reference from 10m/min to 100m/min.) (a) Line speed, (b) Equivalent force (torque/radius), (c) Measured tension with offset of 8kgf, (d) Observed tension.

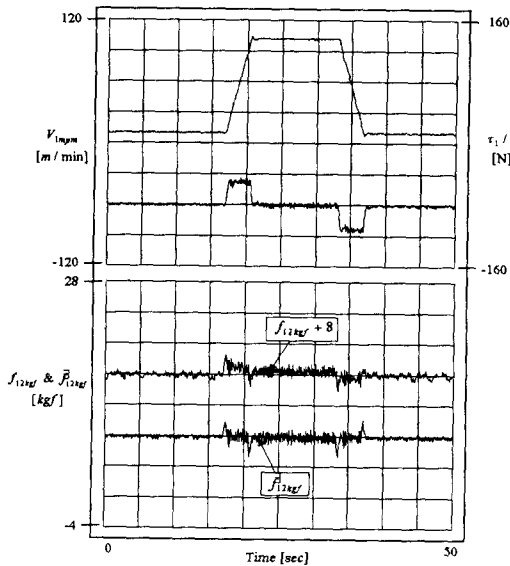


그림 12 제안된 장력 관측기를 사용한 장력 제어 (선속도 10m/min 에서 100m/min 가감속 실험) (a) 선속도, (b) 등가 힘(토크/반지름), (c) 장력 측정값(오프셋 =8kgf), (d) 장력 추정값

Fig. 12 Proposed tension control using tension observer (Line speed reference from 10m/min to 100m/min.) (a) Line speed, (b) Equivalent force(torque/radius), (c) Measured tension with offset of 8kgf, (d) Observed tension

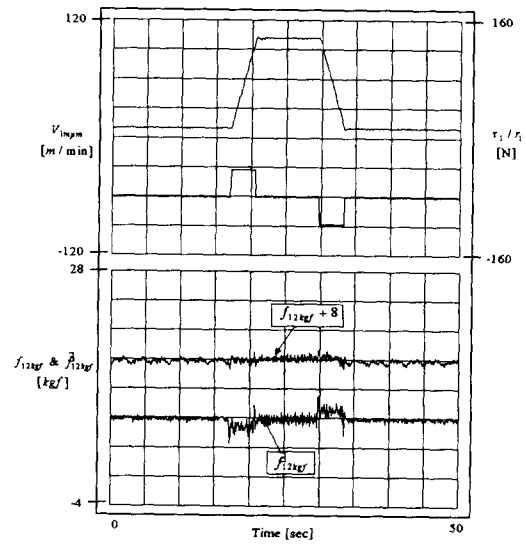


그림 13 선속도 기준 변화시 가감속 토크를 전향 보상하는 장력분 전류 일정 제어 (선속도 10m/min에서 100m/min 가감속 실험) (a) 선속도, (b) 등가 힘(토크/반지름), (c) 장력 측정값(오프셋=8kgf), (d) 장력 추정값

Fig. 13 Conventional constant current control with feed-forward compensation of acceleration torque using line speed reference (Line speed reference from 10m/min to 100m/min.) (a) Line speed, (b) Equivalent force(torque/radius), (c) Measured tension with offset of 8kgf, (d) Observed tension.

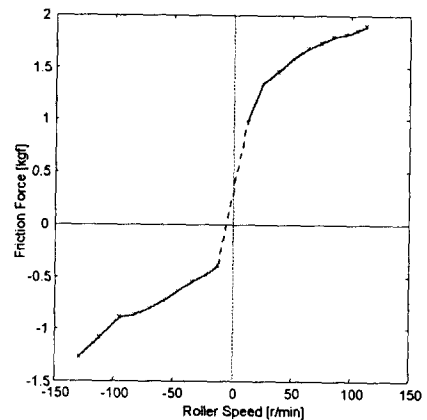


그림 14 측정된 풀림롤의 마찰 특성 곡선

Fig. 14 Measured characteristic curve of the friction loss for the pay-off reel.

풀은 롤을 비롯한 기계 구조물의 불균일성 때문에 나타난 것으로 보이며, 관측된 장력 값은 실제 장력과 같은 모양을 나타낸다. 그림 13은 기존의 개루프 제어 방법에 가감속 전향 보상을 포함한 경우이다. 인접한 롤의 속도 제어가 충분히 빨라서 실제 속도가 기준 속도에 잘 일치하는 경우에는 속도 기준값의 변동을 이용한 전향 보상에 의해 장력이 거의 변동하지 않고 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

그림 14에는 실제로 측정된 풀림롤의 마찰 특성 곡선을 나타

내었다. 마찰손실을 측정하기 위하여 폴립롤의 장력분 토오크 출력을 일정하게 유지한 상태에서 구동 속도를 변화시켜 가면서 정상상태 장력 측정값을 관찰하였다. 저속 부분에서는 정지 마찰력의 영향 때문에 손실 곡선의 기울기가 크며 속도가 증가함에 따라 그 기울기는 감소하고 있음을 보여준다.

### 7. 결 론

본 논문에서는 장력 관측기를 이용한 폴립롤 또는 감김롤의 장력 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 장력 관측기는 가감속 토오크를 포함한 롤의 토오크 방정식을 바탕으로 하고 있으며 전동기 출력 토오크와 속도의 변화량을 이용하여 부하 토오크 관측기를 구성한 형태이다. 관측된 장력을 이용하여 라인 속도의 가감속시에도 일정한 장력을 유지하도록 장력 제어기를 구성하였다. 제안된 알고리즘의 동작 특성을 디지털 시뮬레이션과 실험을 통해 기존의 개루프 장력 제어 방식과 비교한 결과 가감속중인 과도 상태에서도 폴립롤/감김롤의 장력을 일정하게 유지할 수 있다. 제안된 방법은 기존의 전동기 구동을 위해 측정되고 있는 속도와 전류 정보만을 필요로 하므로 간단하고 효과적으로 장력제어 시스템에 적용될 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] J.K. Seok, D.W. Chung, S.H. Song, S.K. Sul, B.K. Kwon, G.W. Park, W.C. Shin, E.S. Cho, J.S. Lee, C.H. Choi, "A New Approach to Advanced Cold Mill Drive Systems", IEEE Industry Application Society Annual Meeting, pp.2125~2130, 1997.
- [2] 포항종합제철주식회사, 2냉연 CAL TENSION 제어이론, 1988.
- [3] Norbert A. Ebler, Ragnar Arnason, Gerd Michaelis, and Noel DSa, "Tension Control: Dancer Rolls or Load Cells", IEEE Trans. on Industry Applications Vol. 29, No. 4, pp 727~739, 1993.
- [4] W. Wolfemann, "Tension Control of Webs-A Review of The Problems and Solutions in The Present and Future", Proc. of International Conference of Web Handling, pp.1~22, 1997.
- [5] W. Wolfemann, D. Schroeder, "Application of Decoupling and State Space Control in Processing Machines with Continuous Moving Webs", Proc. of IFAC, pp. 100~105, 1987.
- [6] S.H. Jeon, J.M. Kim, K.C. Jung, S.K. Sul, and J.Y. Choi, "Decoupling Control of Bridle Rolls for Steel Mill Drive System", IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 35, No.1, January/February, pp.119~125, 1999.
- [7] B.T. Boulter, "Improving Bridle Low-Speed Regulation Using Cascaded Current Followers", IEEE Industry Application Society(IAS) Annual Meeting Conf. Rec., pp.2237~2243, 1998.
- [8] Kee-Hyun Shin, "Distributed Control of Tension in Multi-span Web Transport System", Ph. D. Thesis, Oklahoma State Univ., 1991.

- [9] Seung-Ho Song and Seung-Ki Sul, "A New Tension Controller for Continuous Strip Processing Line", IEEE Industry Application Society(IAS) Annual Meeting Conf. Rec., pp.2225~2230, 1998.
- [10] Seung-Ho Song and Seung-Ki Sul, "Design and control of multi-span tension simulator", IEEE Industry Application Society(IAS) Annual Meeting Conf. Rec., pp.937~943, 1999.

## 저 자 소 개



**송 승 호(宋丞鎬)**

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 8월 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 1992년 8월-1995년 2월 포스콘 기술연구소 연구원.

Tel : 02-880-7991, Fax : 02-878-1452

E-mail : ssh@eepel.snu.ac.kr



**설 승 기(薛承基)**

1958년 3월 25일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1986년-1988년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 객원 연구원. 현재 서울대 공대 전기공학부 부교수

Tel : 02-880-7243, Fax : 02-878-1452

E-mail : sulsk@plaza.snu.ac.kr