

연속 공정 라인의 실시간 마찰손 보상을 통한 장력 제어 특성 개선

論 文

49B-10-9

Tension Control Using On-Line Compensation of Friction Loss for Continuous Strip Processing Line

李 廷 旭* · 崔 昌 鎬* · 玄 東 石*

(Jeong-Uk Lee · Chang-Ho Choi · Dong-Seuk Hyun)

Abstract - This paper proposes a tension control to compensate friction loss using on-line friction torque observer for a continuous strip processing line. Friction loss of roller results in significant deviation of strip tension, accordingly it has an influence on the operation of other adjacent rolls. To avoid tension variation of the strip, a friction torque observer is designed in adjacent roll, which operates in speed control mode. The observed torque is added to the torque limit reference of the pay-off reel for on-line compensation of both friction loss and acceleration/deceleration torque at the same time. The simulation and experimental results show improvement of tension control performance by the proposed friction compensation method.

Key Words : tension control, friction torque observer, friction loss, continuous strip processing line

1. 서 론

마찰은 모든 기계 장치에서 운행중에 발생하는 요소이다. 브레이크나 브라이들 롤과 같이 마찰을 이용하는 장치도 있지만, 일반적으로 마찰은 시스템의 제어 성능에 방해 요소이며 손실로 작용한다. 연속 공정 라인과 같이 소재가 일정 장력에 의해 연결되어 있는 경우에 롤에서 발생하는 마찰 손실은 스트립의 장력에 심각한 변형을 주며, 이로 인해 제품의 질이 저하될 수 있다[1-7]. 연속 공정 라인에서 발생하는 마찰손은 라인의 속도와 주변 롤과의 복합적인 관계에 의해 발생하기 때문에 이로 인해 발생하는 악영향을 효과적으로 억제하기가 매우 어렵다.

마찰에 대해서는 상당히 오래 전부터 연구가 이루어졌으며, 다양한 형태의 마찰을 보상하기 위한 수학적 모델들이 개발되었다[8,9]. 이러한 모델들은 주로 모터 단독에 대해 적용되는 것으로 연속 공정 시스템과 같이 여러 대의 롤이 소재에 의해 연결되어 운전되는 경우에는 적용이 용이치 않은 단점이 있다.

대부분의 마찰손을 나타내는 성분은 다음과 같이 요약될 수 있다: 1) 점성 마찰(viscous friction), 2) 쿨롱 마찰(coulomb friction), 3) 정지 마찰(static friction), 및 4) 풍손(square-law windage losses)[8]. 기계 장치의 마찰손은 어

떠한 형태로 표현되더라도 이러한 성분을 적절히 포함하고 있게 된다.

기존에는 연속 공정 라인에서 감김롤(winder)과 풀림롤(unwinder)의 장력 제어를 마찰손을 보상하기 위해 테이블 방식에 의한 전향 보상을 주로 이용하였다[1,2]. 이러한 보상 방법은 모터 단독에 대해 마찰 토크를 실측하고 이를 이용해 운전 속도에 따라 적절히 보상하는 방법으로 주로 속도 변화에 따른 토크 손실분만을 보상하는 방법이다. 그러나 연속 공정 라인의 특성상 소재가 일정 장력에 의해 이송되기 때문에 부하가 인가되어 있을 경우에는 실측한 값과 다를 수 있으며, 또한 속도와 마찰손사이의 비선형 관계에 의해 기준 장력과 실제 장력사이에 심각한 차이가 존재하게 된다. 장력 센서에 의한 장력 제한 제어가 라인 속도 변화에 따른 장력 변동을 최소화하는 데 효과적인 방법이나[3], 장력 센서 설치에 따른 비용 및 장소 등의 문제로 인해 한정된 범위내에서 적용이 이루어지고 있다[7]. 장력 관측기에 의한 장력 제한 제어는 관측기 설계시에 마찰손을 고려하지 않았기 때문에 마찰손을 보상하지 못한다[2]. 따라서 속도가 증가하면서 관측된 장력과 실제 라인의 장력사이에 상당한 차이가 발생한다.

본 논문에서는 연속 공정 라인의 장력 제어 특성 향상을 위해 새로운 마찰 토크 보상 방법을 제안한다. 마찰 토크 보상은 마찰손과 가감속 토크를 온라인으로 보상하며, 마찰 토크는 속도 제어 모드로 동작하는 인접롤에서 최소 차원 관측기에 의해 계산되어지며, 풀림롤의 장력 변동을 보상하기 위해 풀림롤의 제어 입력에 더해진다. 기존의 장력 제어 방법과 제안한 방법은 시뮬레이션과 실험을 통해 비교 검토하고, 제안된 방법의 온라인 마찰손 보상에 의한 뛰어난 제어 성능 및 안정성을 확인한다.

* 正 會 員 : (주)포스콘 技術研究所 先任研究員 · 工博

** 正 會 員 : (주)포스콘 技術研究所 首席研究員 · 工博

*** 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2000年 7月 10日

最終完了 : 2000年 10月 7日

2. 시스템 구성

그림 1은 연속 공정 라인용 시험 장치의 전형적인 기계 구성도를 나타낸 것이다[7]. 장력 시뮬레이터는 네 개의 구동롤과 장력 측정을 위한 3개의 비구동 롤, 지지를 위한 2개의 비구동 롤로 구성된다. 첫 번째 구동 롤은 Pay-Off Reel (POR)로 불리는 풀림롤이고, 마지막 구동롤은 Tension Reel (TR)이라 일컫는 감김롤이다. 다중 스펠 시스템의 장력 제어를 위해 두 개의 구동롤이 추가된다. 이는 전동기 (BR1, BR2)에 의해 구동되는 롤로서 큰 권부각(wrapping angle)에 의해 마찰에 의한 큰 토크를 발생시켜 전후 장력을 변경할 수 있게 된다. 세 개의 장력 측정용 롤(TM1, TM2, TM3)은 구간 장력을 측정하기 위해 로드 셀 위에 설치된 구조를 갖는다. 장력 시뮬레이터의 파라미터는 5장의 표 1에 정리하였다. 장력 설정치 및 운전 속도는 제어 특성에 따라 다양하게 설정할 수 있다.

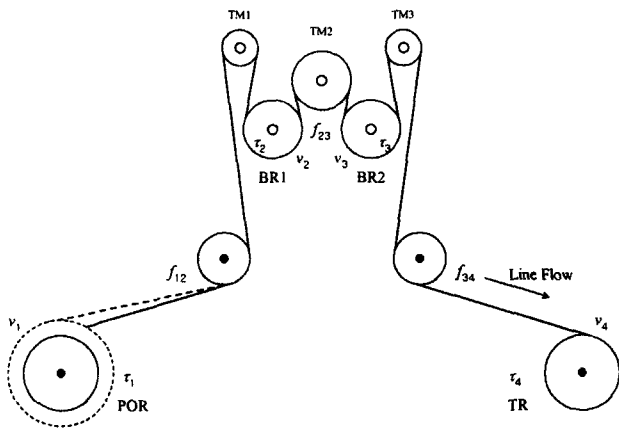


그림 1 연속 공정 라인의 전형적인 기계 시스템.

Fig. 1 Typical mechanical system of continuous strip processing line.

POR과 BR1의 토크와 속도의 기계적 방정식은 식(1), (2)와 같이 표현되며, 두 롤사이의 장력은 식(3)과 같은 장력 표현식으로 주어진다.

$$\tau_1 = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} - r_1 f_{12} + \tau_{fr1} \quad (1)$$

$$\tau_2 = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} - r_2 (f_{23} - f_{12}) + \tau_{fr2} \quad (2)$$

$$f_{12} = \frac{K_{12}}{S + C_{12}} (r_2 \omega_2 - r_1 \omega_1) \quad (3)$$

여기서 τ_i 은 모터의 토크, f_{i+1} 은 두 롤사이의 장력, J_i 은 모터와 롤의 관성, ω_i 은 롤의 각속도, r_i 은 롤의 반지름, K_{i+1} 은 스트립의 스프링 상수, C_{i+1} 은 스트립 스펠 상수의 역수, τ_{fr} 은 마찰손이다.

3. 온라인 마찰손 보상

3.1 기존 장력 제어에서의 마찰손

마찰 토크는 기계 장치 제어시에 항상 발생한다. 연속 공정 라인에서 이러한 마찰 토크는 소재의 장력에 변동을 주게 된다. 예를 들어 기존의 개루프 방식에 의한 정토크 장력 제어에서는 풀림롤(POR)에서 마찰손이 발생할 경우 인접롤인 BR1과 POR사이의 실제 장력은 마찰손의 영향으로 기준 장력보다 증가하게 된다. 이러한 현상은 마찰 토크에 의한 영향을 보상하지 않았기 때문에 발생하게 된다.

그림 2는 시험 장치에서 POR의 마찰손을 로드셀을 이용하여 측정한 결과이다. 속도에 따른 마찰손을 측정하기 위해 라인 속도를 일정하게 유지한 상태에서 모터의 토크를 일정하게 유지하고, 이 때의 장력을 로드셀에 의해 측정하는 것이다. 운전 속도는 -150rpm에서 +150rpm까지 변화시키면서 측정하였다. 저속에서는 정지 마찰력으로 인해 특성 곡선의 기울기가 가파르지만, 속도가 증가하면서 이러한 현상은 다소 둔화되고 있다.

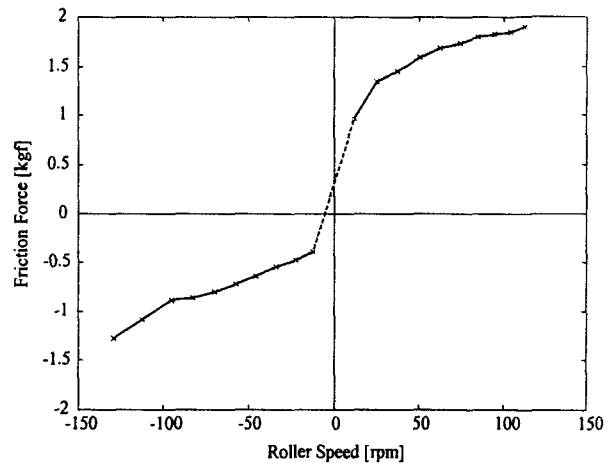


그림 2 POR의 마찰손 측정 곡선.

Fig. 2 Measured characteristic curve of the friction loss for the pay-off reel.

그림 3은 기존의 정토크 장력 제어 방식의 구성도를 나타낸 것이다. 감김롤과 풀림롤은 정토크 제어롤, 브라이들 롤은 속도 제어를 하고 있다. 이러한 운전 모드는 토크(또는 전류) 제한 제어(Torque Limit Control: TCL)라 불린다. 이러한 제어 구조에서 토크 기준치는 각 구간별 장력 설정치로부터 계산되어진다. 감김롤의 토크는 양의 토크이며 풀림롤의 토크는 음의 토크이다.

연속 공정 시스템은 이러한 기본적인 제어 구조에 다음과 같은 각종 보상들이 추가된다. 관성 보상(I.C.: Inertia Compensation) 블록은 가감속시에 변화하는 장력을 보상하기 위해 계산되어지는 토크이며, 기계적 손실 보상(M.C.: Mechanical Loss Compensation) 블록은 동작 속도에 따른 기계적 손실을 미리 테이블화된 데이터로부터 보상하기 위한 것이다. 기계적 손실을 테이블로 만들기 위해서는 모터의 운전 속도에 따라 손실 토크를 측정하는 과정이 필요하다. 그러나 연속 공정 라인에서 마찰손은 운전 속도뿐만 아니라 다양한 요소에 의해 결정되기 때문에 이러한 방법으로 효과적으로 보상하기는 상당히 어렵다. 결과적으로 장력 오차는 개루프 방식에 의해서는 피할 수 없게 된다.

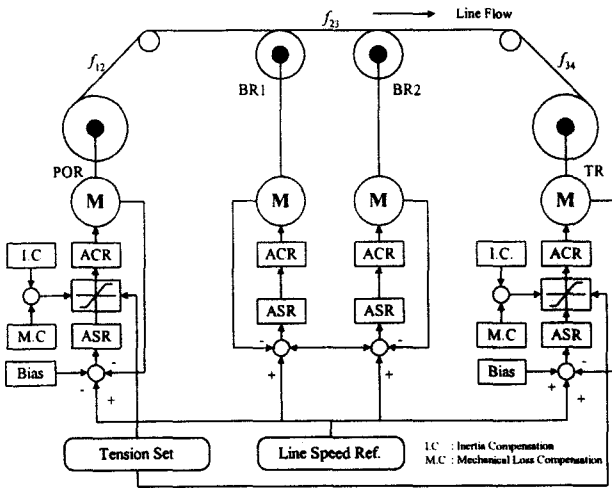


그림 3 기존의 개루프 장력 제어의 구성도(POR, TR: 토크 제한 제어, BR1, BR2: 속도 제어).

Fig. 3 Configuration of conventional open-loop tension control (POR, TR: torque limit control, BR1, BR2: speed control).

플립롤이나 감김롤에서 모터의 속도와 토크를 알 수 있다면 수학적인 관계식에 의해 장력을 계산할 수 있다[7]. 따라서 장력 관측기에 의한 장력 제한 제어가 가능한데, 모델링 과정에서 마찰손을 고려하지 않았다면 마찰손을 보상하는 것은 불가능하다.

장력 제어시 마찰로 인한 토크 감소나 증가는 소재의 장력에 심각한 변동을 유발하게 되는 데, 이러한 현상은 라인의 속도가 증가할수록 더욱 커지게 된다.

3.2 온라인 마찰손 보상

본 논문에서는 다음과 같은 과정에 의해 마찰손을 보상하고자 한다. 먼저, 그림 4에서와 같이 POR에서 마찰로 인해 발생하는 장력 상승을 보상하기 위해 인접롤인 BR1에서 마찰 토크 관측기를 설계한다. 이 때 제안한 방법의 기본적인 구조는 기존의 토크 제한 제어에 의한 개루프 방식과 동일하다. BR1에서 관측된 마찰 토크는 POR의 토크 제한 설정치에 직접 더해지며, BR1은 속도 제어 모드로 동작한다.

식(1), (2)로부터 모터의 외란은 부하 토크인 장력과 마찰 토크의 합으로 표현할 수 있다. 마찰을 비롯한 손실이 없다면 장력에 해당하는 양만큼만 토크가 발생된다.

$$\tau_{di} = r_i(f_{i+1} - f_{i-1}) + \tau_{fi} \tag{4}$$

BR1의 시스템 방정식은 속도와 외란을 상태 변수로 하여 다음 식(5)와 같이 유도된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_2 \\ \tau_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/J_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_2 \\ \tau_{d2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/J_2 \\ 0 \end{bmatrix} \tau_2 \tag{5}$$

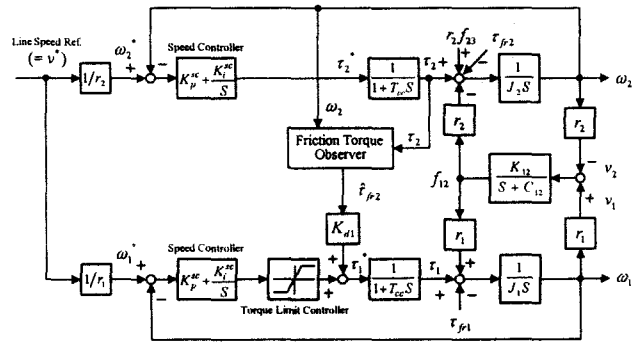


그림 4 제안한 온라인 마찰손 보상 방법의 블록도
Fig. 4 Block diagram of the proposed on-line compensation of friction loss.

관측기의 동특성을 외란 변화보다 빠르게 설정한다면 외란은 불연속 상수로 가정할 수 있고 식(6)과 같이 표현할 수 있다[9, 10].

$$\frac{d}{dt}(\tau_{di}) = 0. \tag{6}$$

외란 관측기는 모터의 속도와 토크를 입력으로 사용하여 최소 차원 관측기의 형태로 식(7), (8)과 같이 구성된다[10].

$$\frac{dz_2}{dt} = z_2 + \frac{H_2}{J_2}(\tau_2 - \hat{\tau}_{d2}) \tag{7}$$

$$\hat{\tau}_{d2} = z_2 - H_2\omega_2 \tag{8}$$

여기서 z_2 은 관측기 변수, \hat{J}_2 은 관성, H_2 은 관측기 이득이다.

사용한 외란 관측기의 관측 특성은 $\tau_2=0$ 일 때에 다음 식(9)와 같이 나타난다[10].

$$\frac{\hat{\tau}_{d2}(s)}{\tau_{d2}(s)} = \frac{\hat{J}_2}{J_2} \cdot \frac{1}{1 + (1/H_2)s} \tag{9}$$

BR1에서 관측된 마찰 토크는 POR의 마찰 토크뿐만 아니라 구간 장력을 유지하기 위한 BR1의 부하 토크도 포함하게 된다. 따라서 POR의 마찰로 인한 토크 성분($\hat{\tau}_{f2}$)은 관측된 외란 토크($\hat{\tau}_{d2}$)로부터 장력 기준치를 빼야 얻을 수 있다. BR1의 출력 토크는 속도 제어로 동작되기 때문에 BR1의 마찰 성분을 포함하게 된다.

POR의 마찰손 보상을 위한 전체 제어 입력은 식(10)과 같다. 첫 번째 항은 토크 제한 제어에 의해 미리 결정된 상수이며, 두 번째 항은 BR1에서 관측된 마찰 토크이다.

$$\tau_1^* = TLC + K_{d1}\hat{\tau}_{f2} \tag{10}$$

여기서 TLC 은 토크 제한 제어기의 출력이며 K_{d1} 은 관측된 마찰손에 대한 이득이다.

제안한 알고리즘은 다양한 속도 범위에서 마찰손을 관측할 뿐만 아니라 가감속시 관성에 의한 토크 변화량도 추정한다.

그림 5는 제안한 온라인 마찰 토크 보상에 대한 전체 제어 구성도이다. POR은 토크 제한 제어에 온라인 마찰손 보상이 추가된 것이며, 나머지 다른 물은 기존의 개루프 제어와 동일한 구조이다. 마찰 토크 관측기는 BR1에서 설계되어지며, 관측된 마찰 토크는 POR에서 보상되어지는 구조를 갖는다.

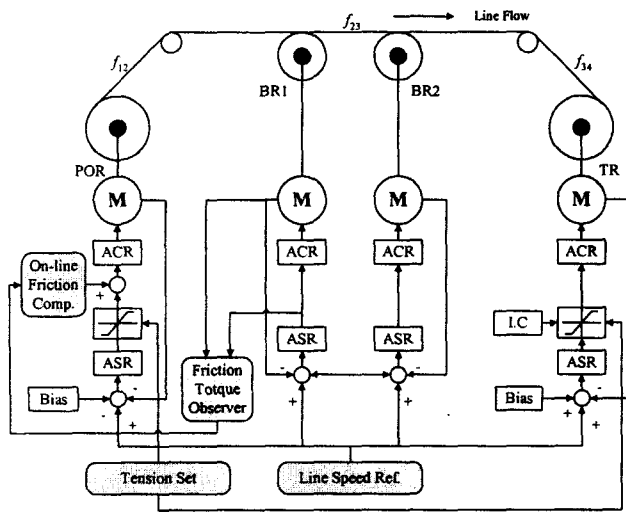


그림 5 제안한 온라인 마찰손 보상의 제어 구성도(POR: TLC + 온라인 마찰손 보상, BR1, BR2: 속도 제어, TR: TCL)

Fig. 5 Configuration of the proposed on-line friction compensation scheme (POR: TLC + on-line friction compensation, BR1, BR2: speed control, TR: TCL).

4. 시뮬레이션

그림 6은 POR과 TR 모두에 마찰손이 존재하는 경우의 개루프 정토크 장력 제어 방식의 제어 특성을 보이기 위한 것이다. 가감속시 관성을 보상하고 속도를 0 mpm에서 150 mpm까지 가감속 운전을 한 경우이다. 양쪽 물 모두에 마찰 성분이 존재하기 때문에 속도가 증가하면서 POR측 장력은 상승이 되고, TR측 장력은 감소가 되는 현상이 나타난다. 이러한 현상은 연속 공정 라인에서 마찰 성분이 라인의 장력에 미치는 현상을 단적으로 보여 준다.

그림 7은 온라인 마찰손 보상 방식의 장력 제어 특성을 나타낸 것이다. TM1의 장력 기준치 f_{12}^* 는 10kgf이고 TM3의 장력 기준치 f_{34}^* 는 20kgf이다. POR과 BR1사이의 장력은 BR1에서 관측된 온라인 마찰 토크를 POR에서 보상함으로써 제어된다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 제안된 알고리즘은 과도 상태뿐만 아니라 고속 운전시에도 장력 변동없이 정확한 제어가 가능하다.

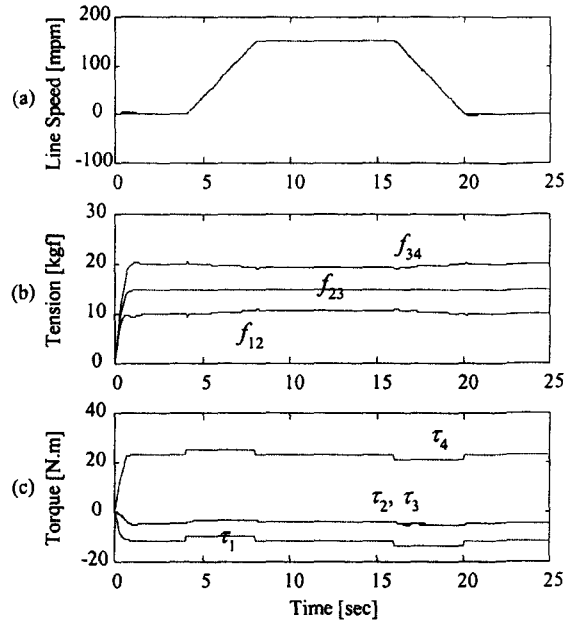


그림 6 마찰손을 갖는 연속 공정 라인의 정토크 장력 제어의 특성, (a) BR1의 라인 속도, (b) 장력, (c) 모터의 토크

Fig. 6 Characteristics of open-loop tension control in a CSPL having friction loss, (a) line speed of master motor BR1, (b) tension feedback, and (c) motor torque.

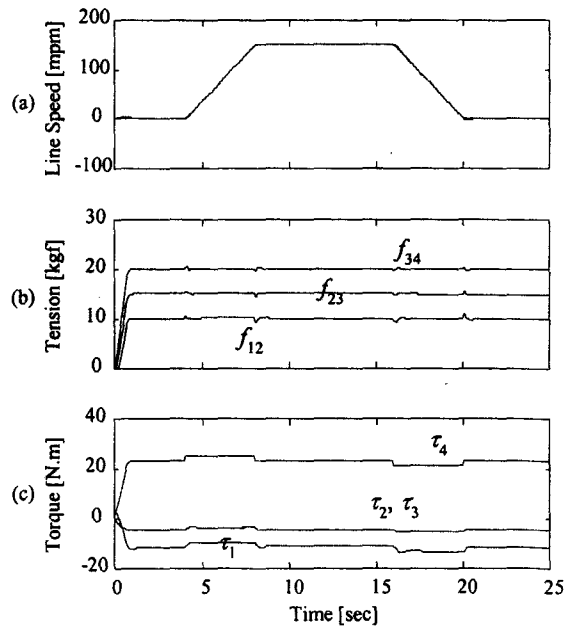


그림 7 제안한 온라인 마찰손 보상 방법의 시뮬레이션 결과, (a) BR1의 라인 속도, (b) 장력, (c) 모터의 토크

Fig. 7 Simulation results of the proposed on-line compensation of friction loss, (a) line speed of master motor BR1, (b) tension feedback, and (c) motor torque.

5. 실험 결과

그림 8은 다중 스펠 시스템의 다양한 장력 제어 시험을 위해 제작된 장력 시뮬레이터를 보인 것이다. 시험 장치는 연속 공정 라인의 주요 요소인 감김롤과 풀림롤, 브라이들 롤을 갖추고 있다. 각 구간별로 장력을 알 수 있도록 로드 셀이 장착되어 있으며 각 롤은 AC 유도 전동기에 의해 구동된다.

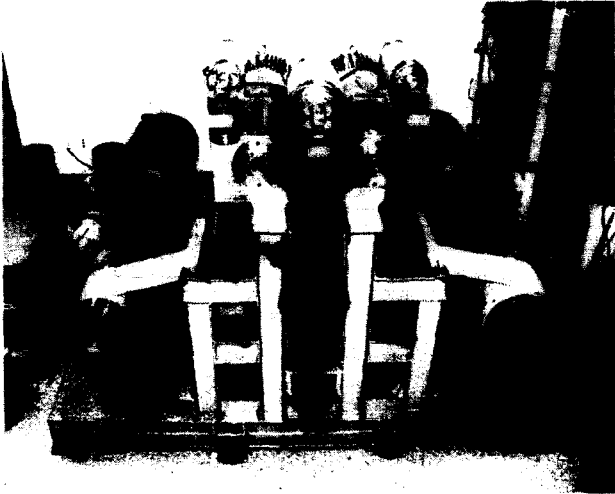


그림 8 다중 스펠 장력 시뮬레이터의 사진
Fig. 8 Photo of the multi-span tension simulator.

제어 알고리즘은 다중 DSP 제어기를 사용하여 구현하였으며 프로그램의 샘플링 시간은 2msec이다. 그림 9는 제어 장치의 구성도를 나타낸 것이며, 표1은 장력 시뮬레이터에 대한 각종 파라미터이다.

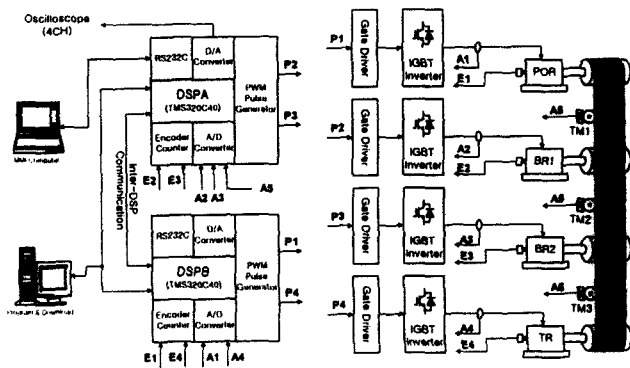


그림 9 다중 스펠 장력 시뮬레이터의 제어 장치 구성도
Fig. 9 Experimental set-up for the control of multi-span tension simulator.

그림 10과 그림 11은 기존의 장력 제어에 대한 실험 결과이다. 가속속 비율은 25 mpm/sec이며, 10mpm에서 100mpm 까지 변화시킨 경우로 POR과 BR1사이의 장력 기준치 f_{12}^* 는 8kgf이다. 그림 10은 관성 보상을 하지 않은 상태에서 토크 제한 제어에 의한 장력 제어의 실험 결과 파형이다.

(a) 라인 속도, (b) 등가 힘(토크/반지름), (c) 실제 장력을 나타낸 것이다. POR과 TR은 장력 기준치에 해당하는 일정 전류를 인가하고 BR은 속도 제어 모드로 운전한다. 가속속 시 장력 변동이 발생하는 것은 관성에 의한 것이며, 속도가 증가하면서 마찰손의 영향으로 실제 소재의 장력이 증가하고 있다.

표 1 장력 시뮬레이터의 파라미터.
Table 1 Parameters of tension simulator.

	POR, TR	BR1, BR2
Motor Power	37 kW	5.5 kW
Motor Base Speed	1780 rpm	1150 rpm
Motor Torque	200 N.m	45 N.m
Line Speed, V	100 mpm	100 mpm
Acc./Dec. Rate	25 mpm/sec	25 mpm/sec
Roll Radius, r	120 mm	90 mm
Inertia, J (Motor + Roll)	0.26 kg.m ²	0.08 kg.m ²
Strip Length, L	1.86 m	0.88 m
Spring Coeff., K	3.23e+6 N/m	6.82e+7 N/m
Load Cell	Rated capacity : 100 kgf Rated output : 3 mV/V	

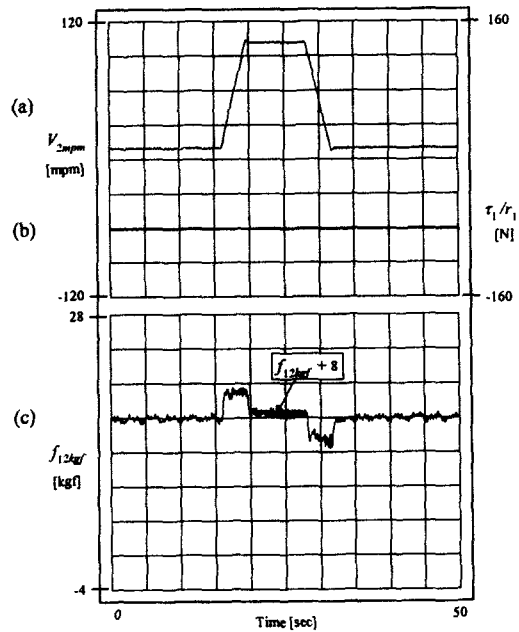


그림 10 관성 보상을 하지 않은 토크 제한 제어, (a) 라인 속도, (b) 등가 힘(토크/반지름), (c) 측정 장력
Fig. 10 Tension control based on torque limit control without inertia compensation, (a) line speed, (b) equivalent force (torque/radius), and (c) measured tension

그림 11은 장력 관측기를 이용한 장력 제한 제어의 실험 결과이다. (a) 라인 속도, (b) 등가 힘(토크/반지름), (c) 실제 장력 그리고 (d) 관측된 장력을 나타낸 것이다. 관측기 설계 시 마찰 성분은 모델에 고려하지 않았기 때문에 실제 장력

과 추정된 장력사이에 오차가 존재한다. 이는 모터 출력 토크에 마찰손에 해당하는 만큼 토크 보상이 되고 있지 않기 때문이다. 결과적으로 추정된 장력은 기준 장력과 일치하고 있지만, 실제 장력과 다소 차이를 나타내게 된다. 이러한 현상은 속도가 증가함에 따라 더욱 심하게 나타난다.

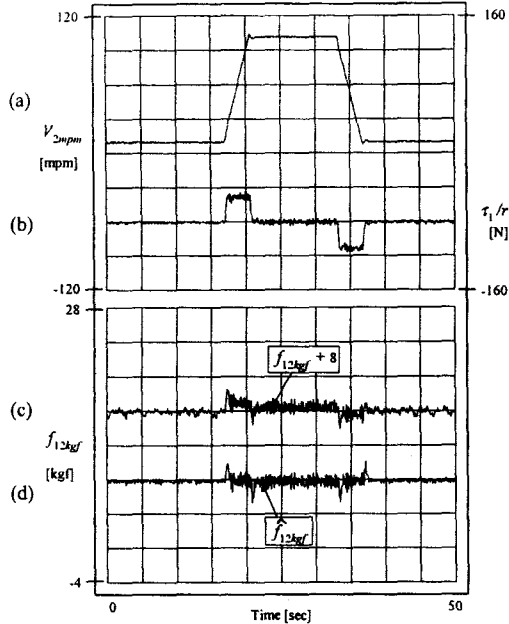


그림 11 장력 관측기에 의한 장력 궤환 제어, (a) 라인 속도, (b) 등가 힘(토크/반지름), (c) 측정 장력, (d) 관측 장력

Fig. 11 Observer based tension feedback control, (a) line speed, (b) equivalent force (torque/radius), (c) measured tension, and (d) observed tension

그림 12는 제안한 온라인 마찰손 보상 방법의 제어 성능을 나타낸 것이다. (a) BR1의 라인 속도 V_{2mpm} , (b) 등가 힘(토크/반지름) τ_1/r_1 , (c) 측정된 스트립 장력 f_{12} (오프셋: 8kgf), 그리고 (d) 관측된 마찰 토크를 보였다. BR1에서 설계된 마찰 토크 관측기는 실제로 롤의 속도에 따른 마찰손과 가속시 발생하는 장력 변동까지도 추정을 하게 되며, 이를 POR의 장력 제어에 사용하게 된다. 그 결과 그림 12(d)와 같이 마찰 토크를 얻을 수 있으며, 그림 12(b)와 같이 POR의 제어 토크가 마찰 토크와 가속 토크를 합성한 만큼 보상하고 있으며, 그림 12(c)와 같이 장력이 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다.

그림 13은 제안한 온라인 마찰손 보상 알고리즘의 과도 응답 특성을 나타낸 것이다. 라인 속도를 100mpm으로 유지한 상태에서 장력 기준치를 8kgf에서 12kgf로 증가시킨 경우의 실험 파형을 나타낸 것이다. 오버슈트 발생없이 빠른 과도 응답을 확인할 수 있다.

제안한 알고리즘은 가속속뿐만 아니라 고속 운전중에도 효과적으로 스트립의 장력을 제어할 수 있다. 마찰 토크 관측기가 별도의 관성 보상이 없이 장력 변동을 관측하게 된다.

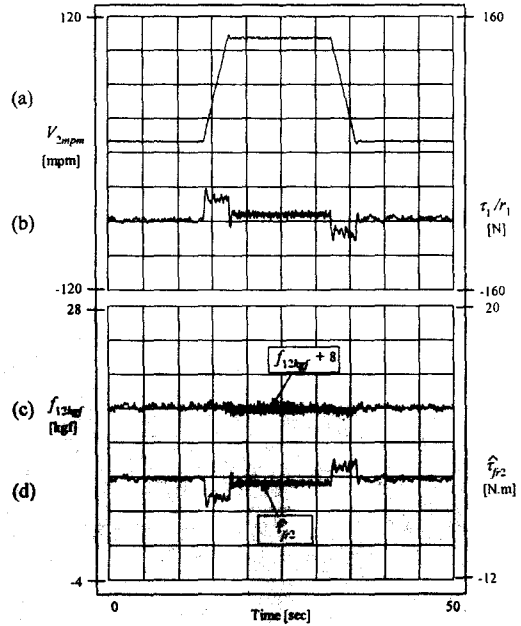


그림 12 제안한 온라인 마찰손 보상에 의한 장력 제어, (a) 라인 속도, (b) 등가 힘(토크/반지름), (c) 측정 장력, (d) 관측된 마찰토크

Fig. 12 The proposed tension control by on-line compensation of friction loss, (a) line speed, (b) equivalent force (torque/radius), (c) measured tension, and (d) observed friction torque

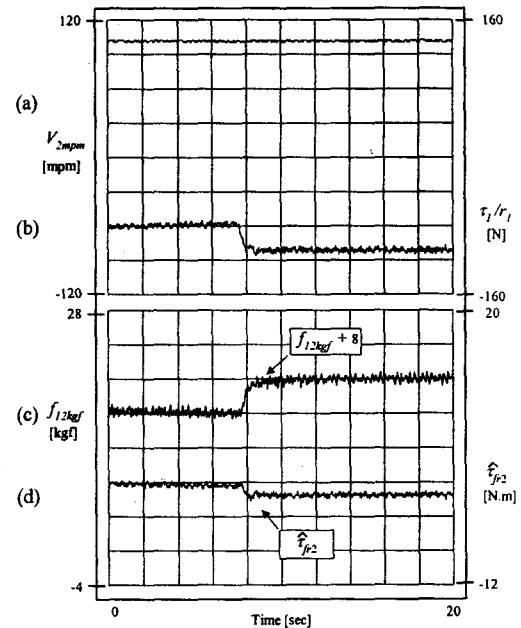


그림 13 제안한 온라인 마찰손 보상에 의한 장력 제어의 과도 응답 특성, (a) 라인 속도, (b) 등가 힘(토크/반지름), (c) 측정 장력, (d) 관측된 마찰 토크

Fig. 13 Transient response of the proposed tension control by on-line compensation of friction loss, (a) line speed, (b) equivalent force (torque/radius), (c) measured tension, and (d) observed friction torque

6. 결 과

본 논문에서는 감김률과 풀림률의 장력 제어시에 발생하는 마찰손을 온라인으로 보상하기 위한 방법을 설계하고 적용하였다. 속도 제어 모드로 운전하고 있는 인접롤에 마찰토크 관측기를 추가하여 마찰손을 관측하고 이 값을 감김률이나 풀림률에서 보상하였다. 제안한 보상 방법은 시뮬레이션과 실험을 통하여 기존의 장력 제어 방법과 비교하였으며, 제안한 온라인 마찰손 보상 알고리즘이 다양한 속도 영역에서 장력 변동을 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구에 조언을 해 주신 전북대 송승호 교수님께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] POSCO Eng. Dept., "Cold Rolling Mill Engineering", Technical Report, 1996, (in Korean).
- [2] Seung-Ho Song and Seung-Ki Sul, "A New Tension Controller for Continuous Strip Processing", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 2, pp.633-639, 2000.
- [3] W.Wolfermann, "Tension Control of Webs-A Review of The Problems and Solutions in The Present and Future", Proc. Of International Conference of Web Handling(IWEB4), pp.1-22, 1997.
- [4] Brain.T.Boulter, "Improving Bridle Low-Speed Regulation Using Cascaded Current Followers", IEEE Industry Application Society Annual Meeting, pp.2157-2164, 1998.
- [5] D.Stajic, N.Peric, and J.Deur, "Friction Compensation Methods in Position and Speed Control Systems", Proc. of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics - V3, pp.1261-1266, 1999.
- [6] 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.
- [7] Seung-Ho Song and Seung-Ki Sul, "Design and Control of Multi-span Tension Simulator", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 2, pp.64-648, 2000.
- [8] Karl J Astrom, "Control of Systems with Friction, Proc. Of the 4th International Conference on Motion and Vibration Control", V.1, pp.25-31, August, 1998.
- [9] M.Iwasaki, Y.Kitoh, and N.Matsui, "Analysis and Performance Improvement of Motor Speed Control System with Nonlinear Friction", Trans. IEE Japan, Vol.116-C, No.1, pp.96-102, 1996.
- [10] K.Kubo, F.Kozawa, and K.Kawasaki, "Disturbance

Torque Compensated Speed Observer for Digital Servo Drives", pp.132-139, 1989.

저 자 소 개



이 정 옥 (李 廷 旭)

1968년 4월 3일생. 1991년 고려대 공대 전기공학과 졸업, 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학), 현재 (주)포스콘 기술연구소 선임연구원

Tel : 02-3290-4475, Fax : 02-925-1812

E-mail : julee@poscon.co.kr



최 창 호 (崔 昌 鎬)

1956년 10월 18일생. 1979년 아주대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 (주)포스콘 기술연구소 수석연구원

Tel : 02-3290-4450, Fax : 02-925-1812

E-mail : choi97@poscon.co.kr



현 동 석 (玄 東 石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학), 1984-1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년-1989년 원혜공과대학 교환교수. 현재 한양대 공대 전기공학과 교수. 전력전자학회 회장

Tel : 02-2290-0345, Fax : 02-2290-0532

E-mail : dshyun@email.hanyang.ac.kr