

연속 공정 라인의 실시간 마찰손 보상을 통한 장력 제어 특성 개선

이정욱*, 최창호*, 송승호**, 현동석***

* (주)포스코 기술연구소, **기초전력공학공동연구소, ***한양대학교 전기공학과

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

Jeong-Uk Lee*, Chang-Ho Choi*, Seung-Ho Song**, Dong-Seek Hyun***

*POSCON R&D Center, **EESRI, ***HanYang University

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 experimental results show improvement of tension control performance by the proposed friction compensation method.

1. 서 론

마찰은 모든 기계 장치에서 운행중에 발생하는 요소이다. 브레이크나 브라이들롤과 같이 마찰을 이용하는 장치도 있지만, 일반적으로 마찰은 시스템의 제어 성능에 방해 요소이며 손실로 작용한다. 연속공정라인과 같이 소재가 일정 장력에 의해 연결되어 있는 경우에 롤에서 발생하는 마찰 손실은 소재의 장력에 심각한 변형을 주며, 이로 인해 제품의 질이 저하된다[1-5]. 마찰손은 라인의 속도와 주변 롤과의 복합적인 관계에 의해 발생하기 때문에 이로 인한 악영향을 억제하기가 어렵다.

기존에는 연속 공정 라인에서 감김롤과 풀림롤의 장력 제어시 마찰손을 보상하기 위해 테이블 방식에 의한 전항 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 기존 장력과 실제 장력사이의 심각한 차이가 존재하게 된다. 장력 센서에 의한 장력 폐환 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[5]. 장력 관측기에 의한 장력 폐환 제어는 관측기 설치시에 마찰손을 고려하지 않았기 때문에 마찰손을 보상하지 못한다[2]. 따라서 속도가 증가하면서 관측된 장력과 실제 라인의 장력사이의 상당한 차이가 발생한다.

본 논문에서는 연속공정라인의 장력제어 특성 향상을 위해 새로운 마찰 토크 보상 방법을 제안한다. 마찰 토크 보상은 마찰손과 가감속 토크를 온라인으로 보상하며, 마찰 토크는 속도제어 모드로 동작하는 인접롤에서 최소 차원 관측기에 의해 계산되어 풀림롤의 장력 변동을 통해 비교 검토하고, 제안된 방법의 온라인 마찰손 보상에 의한 뛰어난 제어 성능 및 안정성을 확인하였다.

2. 시스템 구성

그림 1은 연속공정 라인용 시험장치의 전형적인 기계

구성을 나타낸 것이다[5]. 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. 다중스팬 시스템의 장력 제어를 위해 두 개의 구동롤이 추가된다. 이는 전동기(BR1, BR2)에 의해 구동되는 롤로서 큰 권부각에 의해 마찰에 의한 큰 토크를 발생시켜 전후 장력을 변경할 수 있게 된다.

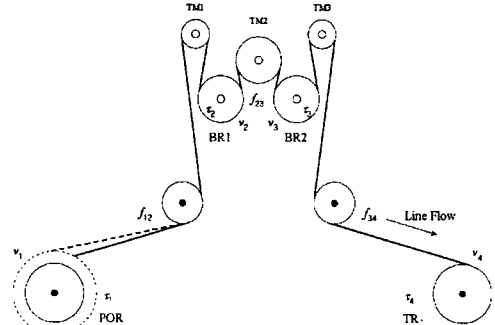


그림 1. 연속 공정 라인의 전형적인 기계 시스템

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

$$\tau_1 = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} - r_1 f_{12} + \tau_{p1} \tag{1}$$

$$\tau_2 = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} - r_2 (f_{23} - f_{12}) + \tau_{p2} \tag{2}$$

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

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

의 토크를 일정하게 유지하고 이 때의 장력을 로드셀에 의해 측정한다. 운전 속도는 -150rpm에서 +150rpm까지 변화시키면서 측정하였다. 저속에서는 정지 마찰력으로 인해 특성 곡선의 기울기가 가파르지만, 속도가 증가하면서 이러한 현상은 다소 둔화된다.

그림 3은 기존의 정토크 장력제어 방식의 구성도를 나타낸 것이다. 감김물과 풀림물은 정토크 제어, 브라이들 물은 속도제어를 하고 있다. 이러한 제어구조에서 토크 기준치는 각 구간별 장력 설정치로부터 계산된다. 감김물의 토크는 양의 토크이며 풀림물은 음의 토크이다.

연속공정시스템은 이러한 기본적인 제어 구조에 다음과 같은 각종 보상들이 추가된다. 관성보상(I.C) 블록은 가속시에 변화하는 장력을 보상하기 위해 계산되어지는 토크이며, 기계적 손실보상(M.C) 블록은 동작 속도에 따른 기계적 손실을 미리 테이블화된 데이터로부터 보상하기 위한 것이다. 기계적 손실을 테이블로 만들기 위해서는 모터의 운전속도에 따라 손실 토크를 측정하는 과정이 필요하다. 그러나 마찰손이 운전속도뿐만 아니라 다양한 요소에 의해 결정되기 때문에 이러한 방법으로 효과적으로 보상하기는 상당히 어렵다. 결과적으로 장력 오차는 이러한 개루프 방식에 의해서는 피할 수 없다.

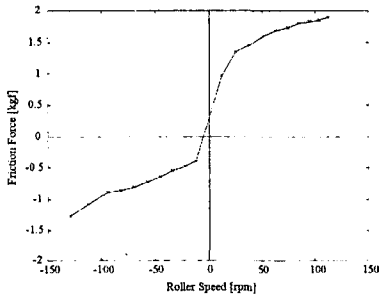


그림 2. POR의 마찰손 측정 곡선

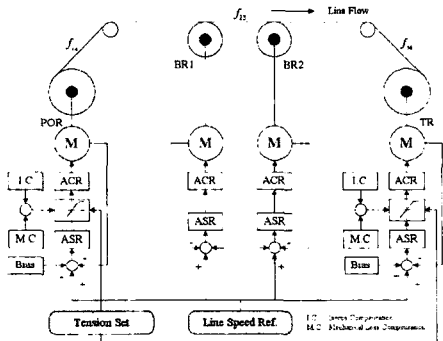


그림 3. 기존의 개루프 장력 제어의 구성도(POR, TR: 토크 제한 제어, BR1, BR2: 속도 제어)

풀림물이나 감김물에서 모터의 속도와 토크를 알 수 있다면 수학적 관계식에 의해 장력을 계산할 수 있다(5). 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 되는데, 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 인접물인 BR1에서 마찰 토크 관측기를 설치한다. 이 때 제안한 방법의 기본적인 구조는 기존의 토크 제한 제어에 의한 개루프 방식과 동일하다. BR1에서 관측된 마찰 토크는 POR의 토크 제한 설정치에 직접 더해지며, BR1

은 속도 제어 모드로 동작한다.

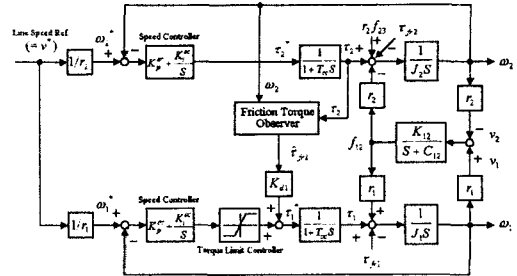


그림 4. 제안한 온라인 마찰손 보상 방법의 블록도

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

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

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_2 \\ \tau_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/J_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_2 \\ \tau_{d2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/J_2 \\ 0 \end{bmatrix} \tau_{r2} \quad (5)$$

관측기의 동특성을 외란 변화보다 빠르게 설정한다면 외란은 불연속 상수로 가정할 수 있다.

외란 관측기는 모터의 속도와 토크를 입력으로 사용하여 최소차원관측기의 형태로 식(6),(7)과 같다.

$$\frac{dz_2}{dt} = z_2 + \frac{H_2}{J_2} (\tau_2 - \hat{\tau}_{d2}) \quad (6)$$

$$\hat{\tau}_{d2} = z_2 - H_2 \omega_2 \quad (7)$$

여기서 z_2 은 관측기 변수, J_2 은 관성, H_2 은 관측기 이득이다.

BR1에서 관측된 마찰 토크는 POR의 마찰 토크뿐만 아니라 구간 장력을 유지하기 위한 BR1의 부하 토크도 포함하게 된다. 따라서 실제 마찰토크($\hat{\tau}_{f2}$)는 관측된 외란 토크($\hat{\tau}_{d2}$)로부터 장력 기준치를 빼야 얻을 수 있다.

POR의 마찰손 보상을 위한 제어입력은 식(8)과 같다.

$$\tau_{r1}^* = TLC + K_{d1} \hat{\tau}_{f2} \quad (8)$$

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

제안한 알고리즘은 다양한 속도 범위에서 마찰손을 관측하며, 가속시 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.

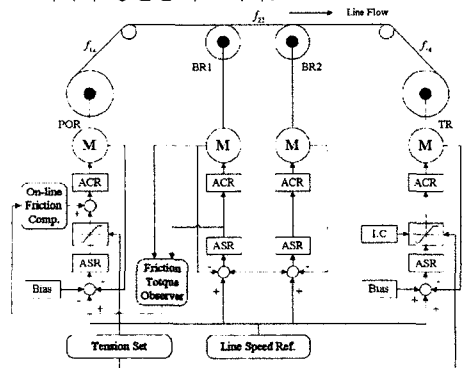


그림 5. 제안한 온라인 마찰손 보상의 제어 구성도 (POR: TLC + 온라인 마찰손 보상, BR1, BR2: 속도 제어, TR: TLC)

4. 실험 결과

그림 6은 다중 스펠 시스템의 다양한 장력 제어 시험을 위해 제작된 장력 시뮬레이터를 보인 것이다.

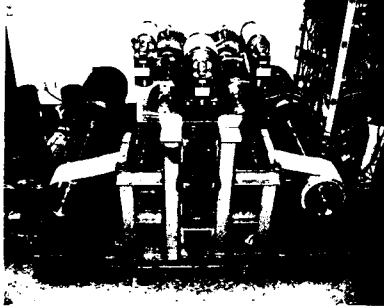


그림 6. 다중 스펠 장력 시뮬레이터의 사진

표 1. 장력 시뮬레이터의 파라미터.

	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 7, 8은 기존의 장력 제어에 대한 실험 결과이다. 10mpm에서 100mpm까지 변화시킨 경우이다. 그림 7은 관성 보상을 하지 않은 상태에서 토크 제한 제어에 의한 장력 제어의 실험 결과 파형이다. POR과 TR은 장력 기준치에 해당하는 일정 전류를 인가하고 BR은 속도 제어 모드로 운전한다. 가감속시 장력 변동이 발생하는 것은 관성에 의한 것이며, 속도가 증가하면 시 마찰손의 영향으로 실제 소재의 장력이 증가한다.

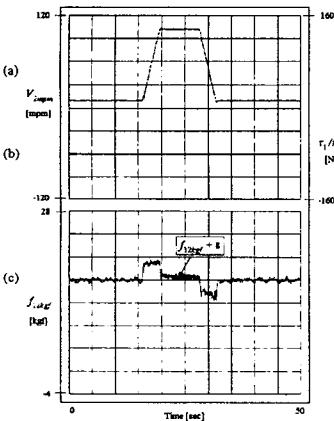


그림 7. 관성 보상을 하지 않은 토크 제한 제어, (a)라인 속도, (b)등가 힘(토크/반지름), (c)측정 장력

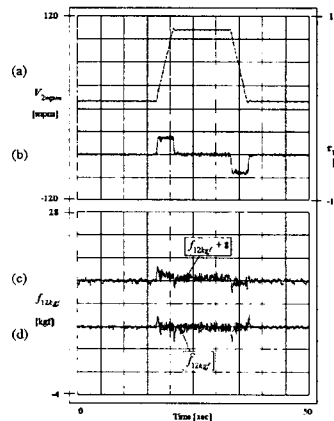


그림 8. 장력 관측기에 의한 장력 제한 제어, (a)라인 속도, (b)등가 힘(토크/반지름), (c)측정 장력, (d)관측된 마찰 토크

그림 8은 장력 관측기를 이용한 장력 제한 제어의 실험 결과이다. 관측기 설계시 마찰 성분을 모델에 고려하지 않았기 때문에 실제 장력과 추정된 장력 사이에 오차가 존재한다. 이는 모터 출력 토크에 마찰손에 해당하는 만큼 토크 보상이 되어 있지 않기 때문이다. 추정된 장력은 기준 장력과 일치하지만, 실제 장력과 다소 차이를 나타내게 된다.

그림 9는 제안한 온라인 마찰손 보상 방법의 제어 성능을 나타낸 것이다. BR1에서 설계된 마찰 토크 관측기는 롤의 속도에 따른 마찰손과 가감속시 발생하는 장력 변동까지도 추정을 하게 되며, 이를 POR의 장력 제어에 사용하게 된다. 그림 9(d)와 같이 마찰 토크를 얻을 수 있으며, 그림 9(b)와 같이 POR의 제어 토크가 마찰 토크와 가감속 토크를 합성한 만큼 상승하고 있다.

5. 결 과

본 논문에서는 감김롤과 풀림롤의 장력 제어시에 발생하는 마찰손을 온라인으로 보상하기 위한 방법을 설계하고 적용하였다. 속도 제어 모드로 운전하고 있는 인접롤에 마찰 토크 관측기를 추가하여 마찰손을 관측하고 이 값을 감김롤이나 풀림롤에서 보상하였다. 제안한 온라인 마찰손 보상 알고리즘이 다양한 속도 영역에서 장력 변동을 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하였다.

(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 Industry Application Society Annual Meeting, pp.2225~2230, 1998.
- (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), pp1~22, 1997.
- (4) 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.
- (5) Seung-Ho Song and Seung-Ki Sul, "Design and Control of Multi-span Tension Simulator", IEEE Industry Application Society Annual Meeting, pp.2225~2230, 1999.

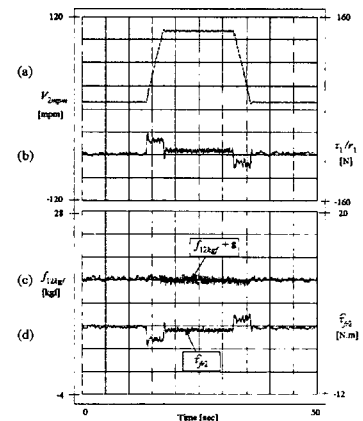


그림 9. 제안한 온라인 마찰손 보상에 의한 장력 제어, (a)라인 속도, (b)등가 힘(토크/반지름), (c)측정 장력, (d)관측된 마찰 토크