

장력 관측기에 의한 연속공정라인의 장력 제어

이정욱*, 박일영*, 최창호*, 현동석**
 *(주)포스콘 기술연구소, **한양대 전기공학과

Tension Control for a Continuous Processing Line using Closed Loop Observer

Jeong-Uk Lee, Il-Young Park, Chang-Ho Choi, Dong-Seok Hyun
 *POSCON R&D Center, **HanYang Univ.

Abstract - To control a continuous processing line, it is necessary to take the entire system into account. In this paper observers to estimate the line tension are discussed. Considering a tension as a external disturbance, a closed loop observers are designed. It becomes clear that the proposed tension control scheme has high accuracy performance and simplicity.

이 생산되느냐에 따라 시스템의 구조 및 공정이 다르게 구성되며, 라인 속도 및 장력 설정치가 달라지게 된다 [2-4].

실제로 위의 연속 공정 시스템을 모델링하고, 시뮬레이션 및 실험에 사용하기 위해 사용하는 장력 제어 시스템의 모델을 그림 1과 같이 나타낸다.

1. 서 론

최근 AC 모터 드라이브의 고성능화로 인해 유도전동기가 제철, 제지 등과 같은 연속공정 분야에 많이 적용되고 있으며, 연속공정이 효과적으로 수행되기 위해서는 장력 제어와 속도 제어가 필수적으로 요구된다. 장력 제어는 고품질의 철강제품을 생산하기 위해 요구되며, 속도 제어는 각 공정의 특성을 고려하여 이루어지며 제품의 생산량을 좌우하게 된다[1].

연속 공정 라인에는 다양한 전기 및 기계장치로 구성되어 있으며, 서로 다른 역할에 따라 제어 구조도 달라지게 된다. Plastic, textile, rubber, metal, paper 및 steel 등을 처리하는 공정은 각종 처리과정을 연속적으로 거치면서 긴 라인을 통과하게 된다[1,4]. 따라서 각각의 롤은 서로간에 영향을 미치게 되며, 장력은 라인 속도에 의해 영향을 받게 된다. 속도제어만을 할 경우에는 처리 과정중에 장력 변화를 제어할 수 없게 되므로, 각 부분에 대한 장력제어를 위해서는 장력을 검출할 수 있는 장치를 설치하고 장력제어기를 추가하여야 한다 [3,4].

본 논문에서는 연속 공정 라인의 장력 제어를 위해 장력을 예측하기 위한 관측기를 설계한다. 각 롤에 대해 장력을 임의의 외란항으로 처리하고, 페루프 구조에 의한 관측기를 설계한다. 장력은 두 개의 롤사이에 작용하는 힘으로 표현되기 때문에 이러한 관계를 이용해 각 부의 장력 제어기를 구성한다. 제안한 방법은 가감속 특성을 장력제어기에 의해 제어할 수 있으며 정상상태 오차 없이 장력을 정확하게 예측할 수 있다.

2. 장력 제어 시스템 모델

그림 1은 연속 공정 시스템을 간략히 나타낸 것이다. 전체 시스템은 철판을 감기 위한 TR(Tension Reel)과 풀기 위한 POR(PayOff Reel)이 있으며, 각 공정 라인의 장력을 분리하고 일정 장력을 유지하는 데 브라이들롤(BR : Bridle Roll)을 이용한다. 연속적인 공정이 가능하도록 입출측에 Looper를 두어 철판을 저장한다. 이외에 각 라인별로 도급장치, 소둔장치, 청정장치 등이 추가 구성된다. 연속공정 시스템은 비교적 외란이 많고, 특히 속도와 장력간의 간섭성이 존재하며, 관성에 의한 기계적인 영향 등이 존재하기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위한 제어 기술이 요구된다. 어떤 종류의 제품

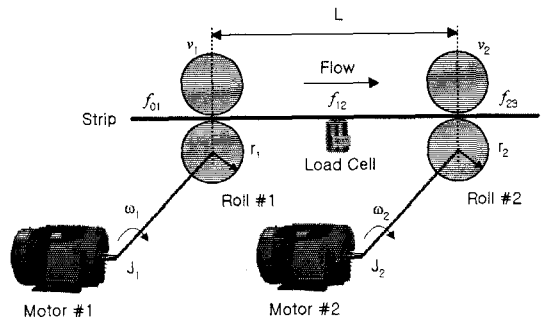


그림 1. 장력 제어 시스템의 모델

수학적 모델링을 용이하게 전개하기 위하여 다음과 같은 몇 가지 가정을 한다[1].

- (1) 철판과 롤사이에 미끄러짐이 없다.
- (2) 철판의 단면적은 일정하다.
- (3) 철판과 롤이 접촉하고 있는 구간은 롤과 롤사이의 거리에 비해 무시할 만 하다.
- (4) 철판의 두께는 롤의 반경에 비하여 매우 작다.

두 롤간에 작용하는 장력은 식(1)과 같다[4].

$$\frac{df_{12}}{dt} = \frac{AE}{L} (v_2 - v_1) + \frac{1}{L} (v_1 f_{01} - v_2 f_{12}) \quad (1)$$

여기서 f : 두 롤간의 장력 [N], v : 롤의 속도 [m/sec], A : 진행방향에 수직인 단면적 [m²], E : 탄성계수 (Young's modulus) [N/m²], L : 롤간 거리 [m]

식(1)에서 상수 E 는 상당히 큰 값으로 장력 변동은 두 롤간의 속도차에 의해 발생한다. 일정 속도로 철판이 이동하고 있다면 속도와 장력의 곱으로 나타나는 항에 의해 장력의 전달 현상을 설명할 수 있다.

식(1)의 장력과 속도와의 수학적인 모델은 비선형이기 때문에 시스템 해석을 위해 perturbation method에 의해 선형화한다[4].

$$f_{12} = \frac{K}{(s + C)} (v_2 - v_1) \quad (2)$$

여기서 $K(=AE/L)$ 는 철판의 스프링상수 [N/m]를 의미하고, $C(=V_{20}/L)$ 는 $1/(\text{strip-span velocity time constant})$ [1/sec]로 동작 속도에 따라 변화하는 값이

다. 위 식으로부터 두 물사이의 장력은 두 물의 속도차에 대한 1차 지연을 가짐을 의미한다.

전동기의 속도 및 토크와 장력과의 관계는 식(3),(4)와 같다.

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = \tau_2 + r_2(f_{23} - f_{12}) \quad (3)$$

$$v_2 = r_2 \cdot \omega_2 \quad (4)$$

여기서 J : 전동기의 관성(kg·m²), r : 물의 반지름(m), ω : 전동기의 각속도(rad/sec), τ : 전동기의 토크(N·m)

위의 방정식으로부터 입력 토크에 대한 장력 및 속도의 전달함수는 식(5),(6)과 같이 표현된다.

$$\frac{F_{12}(s)}{T_2(s)} = \frac{K \frac{r_2}{J_2}}{s^2 + C_s + K \left(\frac{r_1^2}{J_1} + \frac{r_2^2}{J_2} \right)} \quad (5)$$

$$\frac{V_2(s)}{T_2(s)} = \frac{\frac{r_2}{J_2} \left(s^2 + C_s + K \frac{r_1^2}{J_1} \right)}{s \left[s^2 + C_s + K \left(\frac{r_1^2}{J_1} + \frac{r_2^2}{J_2} \right) \right]} \quad (6)$$

그림 2는 장력 제어 시스템의 제어 구성도를 나타낸 것이다. 하나는 속도제어를, 다른 하나는 장력제어를 나타낸 것이다.

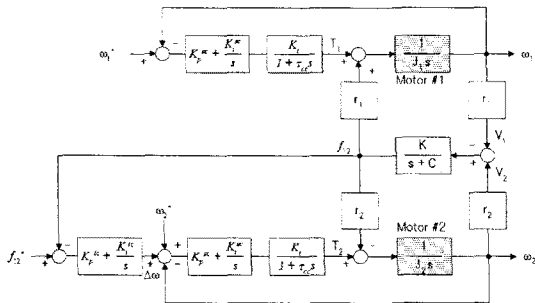


그림 2. 장력 제어 시스템의 제어 블록도

3. 장력 제어

연속공정 시스템은 다양한 기능을 갖는 물로 구성되어며, 각각의 역할에 따라 제어 방안이 다양하게 구성된다. POR과 TR은 주로 장력에 해당하는 전류로 ASR 출력을 제한하는 방법인 CLC(Current Limit Control)를 사용하며, 브라이들 물은 각 구간의 장력을 유지하고 그룹내의 물의 부하분담 기능을 갖도록 하기 위해 주로 ASR 제어를 한다.

다음은 제어에 사용되는 각종 제어 방법 및 보상기법을 간단히 정리한 것이다.

관성보상(I.C.) : CLC 제어를 할 경우 가감속시 장력 변동을 억제하기 위해 관성에 해당하는 토크를 계산하여 전류제한기의 제한값을 가변시킨다.

Bias : 두 물사이의 속도차를 유발하여 장력을 유지하기 위해 기준 속도에 speed bias를 인가한다. POR은 음(-)의 값을, TR은 양(+)의 값을 인가하여 토크를 조절한다.

Droop : 정속 구동시 각 물의 장시간 사용에 따른 마모, 관성 변화 등으로 인한 모터의 과부하를 방지하기 위해 출력 토크의 일정량을 속도 기준값에서 빼 준다.

L/B(Load Balance Control) : 브라이들 물에서 각각의 물이 분담해야 할 부하를 항상 일정하게 유지하기 위해 각각의 부하분담률을 계산하고, 이를 제어한다.

ATR(Automatic Tension Regulator) : 임의 구간의 장력 변화를 제어하기 위해 속도제어기의 전단에 그림2와 같이 장력제어기를 구성한다. ATR은 PI 제어기로 설계하며, 장력제어기에 의해 계산된 값은 식(7)과 같이 속도 기준치에 추가된다.

$$\Delta\omega = \left(K_p^{tc} + \frac{K_i^{tc}}{s} \right) (f_{12}^* - f_{12}) \quad (7)$$

여기서 K_p^{tc}, K_i^{tc}: ATR gain.

4. 장력 관측기 설계

장력 제어 시스템은 각각의 물이 철판에 의해 연결되어 있기 때문에 그림 2에서와 같이 모터에 대해 장력이 일종의 외란으로 작용하게 된다. 실제로 장력 설정치는 순간적으로 변화하지 않으며, 관측기의 동특성을 빠르게 설정하면 외란의 변화를 0으로 가정할 수 있다. 따라서 식(3)과 식(8)로부터 속도 오차를 이용해 페루프 장력 관측기를 식(9)와 같이 설계할 수 있다.

$$\frac{df_d}{dt} = \frac{d}{dt}(r_2 f_{12}) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{f}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/J \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ f_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/J \\ 0 \end{bmatrix} \tau + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} (\omega - \hat{\omega}) \quad (9)$$

여기서 $\hat{\omega}$, \hat{f}_d : 관측치, k₁, k₂는 관측기 이득으로 일반적인 Luenberger Observer 설계 방법에 의해 구한다.

5. 시뮬레이션 및 실험

그림 3은 연속 공정 시스템을 모의 구현하기 위해 당사에서 시제작한 시험장치이다. 본 장치는 다양한 방법의 실험을 위해 물 구조를 구성하였으며, 장력 센서(load cell)를 장착하고 있다.

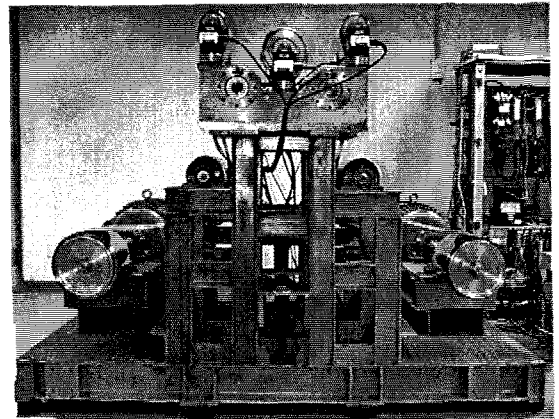


그림 3. 연동 구동 제어 시험 장치

그림 4는 현재 철판라인에서 주로 사용하고 있는 제어 구성도를 나타낸 것이다. POR과 TR은 CLC 제어, BR은 ASR 제어로 구성된다. 그림 6은 TR에 ATR 제어에 의한 ASR 제어를 적용한 것으로 장력 관측기에

의해 관측된 장력을 사용한다. 그림 8은 장력제어기의 장력을 실제 센서에 의해 측정된 경우와 본 논문에서 제안한 관측기를 사용한 경우를 비교한 것이다.

장력제어기를 추가할 경우, 기존의 방법과 비교해 성능뿐만 아니라 구성면에서도 여러 가지 이점이 있다. 특히 관성보상등의 보상과정이 필요치 않으며, 기본적인 제어구조가 ASR이기 때문에 속도 동기가 용이하며, ATR에 의해 안정성과 동특성이 크게 향상된다.

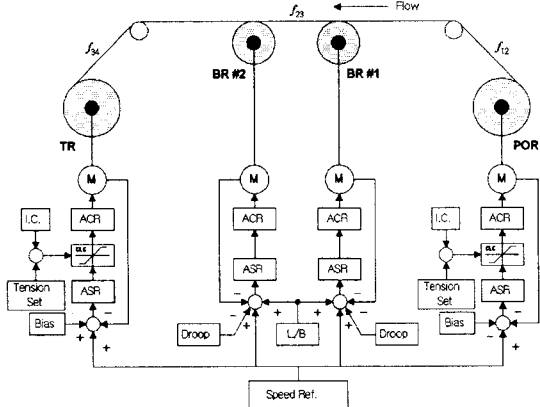


그림 4. 기존의 연동 구동 제어기 구조

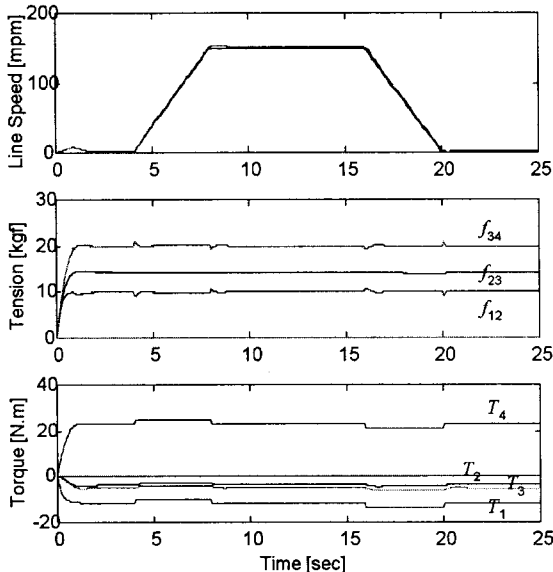


그림 5. 기존의 시뮬레이션 결과



그림 6. 제안한 연동 구동 제어기 구조

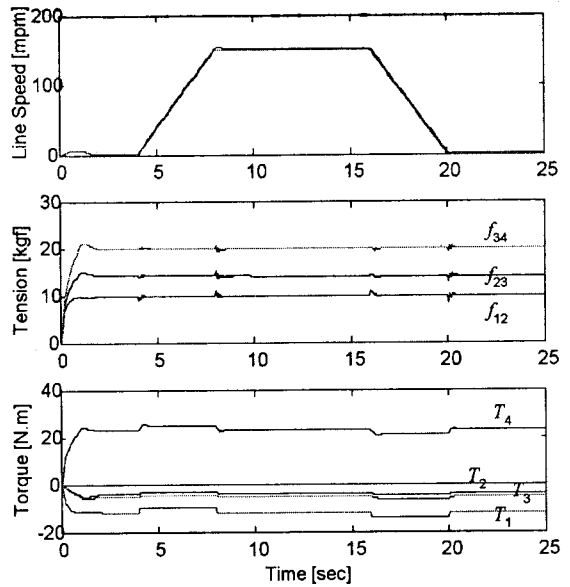


그림 7. 제안한 시뮬레이션 결과

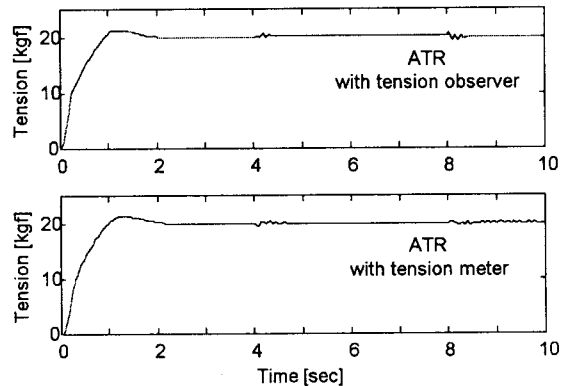


그림 8. 장력 제어기 특성 비교

6. 결 론

본 논문에서는 연속공정 시스템에 장력제어기를 적용하여 제어 성능을 향상시키는 방법을 제안하였다. 전체 시스템의 고성능화와 안정성 향상을 위해 장력제어기를 추가한 속도제어기를 기본 구조로 하며, 하드웨어의 추가 설치가 필요없는 장력 관측기를 설계하였다. 이러한 제어 구조는 과도 상태에서의 우수한 동특성과 정상상태에서의 뛰어난 성능을 보장한다.

(참 고 문 헌)

- [1] "냉연설비 종합 Eng'ng 기술개발(I) - LINE 연동구동 제어기법 개발", RIST & POSCON, 1998.3.
- [2] Seok-Ho Jeon and et al, "Decoupling Control of Bridle Rolls for Steel Mill Drive System", IEEE IAS Annual Meeting Conf. Rec., pp.2144-2150, 1997.
- [3] Seung-Ho, Song and Seung-Ki Sul, "A New Tension Controller for Continuous Strip Processing Line", IEEE IAS Annual Meeting Conf. Rec., pp.2225-2230, 1998.
- [4] W.Wolfermann, "Tension Control of Webs - A Review of the Problems and Solutions in the Present and Future"