

제철 냉연 라인 연속 공정 시스템의 고속·고정도 장력 제어

박일영*, 이정옥*, 김영균*, 최창호*, 김근영**, 이창한**
 *(주)포스코 기술연구소, **포항산업과학연구원

High Speed/Accuracy Tension Control for Continuous Processing Line of Steel Plant

Il-Young Park, Jeong-Uk Lee, Young-Gyun Kim, Chang-Ho Choi, Gun-Young Kim, Chang-Hwan Lee
 *POSCON R&D Center, **RIST

Abstract - This paper deals with the tension control of continuous processing line for steel plant. In order to improve the tension control performance, tension control is included in POR. FF compensation is applied to get the same speed characteristics during acceleration and deceleration period. In simulation roll diameter variation and inertia variation are considered. It becomes clear that the proposed tension control system has high accuracy performance.

1. 서 론

제철 냉연 라인의 연속 공정에서 철판은 각종 처리과정을 연속적으로 거치면서 긴 라인을 통과하게 된다. 보통 각기 다른 공정을 거칠 때마다 요구되는 장력의 수준 및 정확도가 다르다. 장력 변화가 심할 경우에는 공정 중에 재료의 파단, 제품의 품질 저하 등으로 인하여 상당한 경제적 손실을 입을 수 있다. 따라서 생산성을 증가시키기 위해 고속에서 정확한 장력을 유지하도록 제어하는 것은 매우 중요하다.

최근에 일본의 Mitsubishi와 Hitachi, 유럽의 Siemens 및 Ansaldo 등 선진 외국업체들은 현재 Motor Drive에 선택사양으로 장력제어 기능을 제공하고 있으나, 국내에는 아직 이러한 기술을 보유하고 있지 못한 실정이다[1,2]. 이러한 기술을 보유할 경우 저가의 시스템을 구성할 수 있어 국제경쟁력을 강화할 수 있으며, 제철, 제지, 필름 등 각종 연속공정 시스템의 공정라인을 일괄 공급할 수 있는 기술을 습득할 수 있다.

본 논문에서는 독자적인 제철 냉연 라인의 연속 공정 기술을 습득하는 과정의 일환으로 연속 공정 시스템에서 고속·고정도의 장력 제어를 위한 특성을 파악하고, 실질적인 상황을 고려한 수학적 모델과 시뮬레이션을 개발하고 이를 축소 모델을 통해 입증하고자 한다. 각 롤(roll)사이의 장력과 철판의 권취에 의한 롤의 직경 변화 및 관성 변화 등을 고려하고, 전동기와 롤간의 긴축 및 기어에 의한 연결 등을 고려한 축진동 모델을 고려한 수학적인 모델을 유도하고, 고속에서 고정도의 장력 제어 및 전체 라인의 속도 동기화를 위한 제어 알고리즘을

개발하고자 한다.

2. 장력 제어 시스템의 모델

그림 1은 연속 공정 시스템을 나타낸 것이다. 전체 시스템은 입축, 중앙 및 출축 설비로 구성되며, 철판을 감기 위한 TR(Tension Reel)과 풀기 위한 POR(PayOff Reel)이 있으며, 각 공정 라인의 장력을 분리하고 일정 장력을 유지하는 데 브라이들 롤(BR:Bridle Roll)을 이용한다. 연속 공정 시스템은 비교적 외란이 많고, 특히 속도와 장력간의 간섭성이 존재하고, 관성에 의한 기계적인 영향 등이 존재하기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위한 제어 기술이 요구된다[2-4].

실제로 위의 연속 공정 시스템을 모델링하고, 시뮬레이션 및 실험에 사용하기 위해 사용하는 장력 제어 시스템의 모델을 그림 2와 같이 나타낸다.

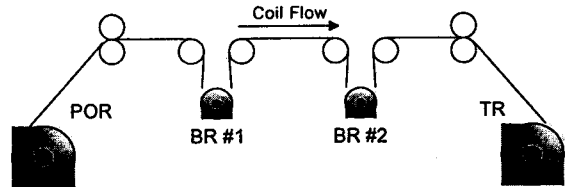


그림 2. 장력 제어 시스템의 모델

수학적 모델 유도를 용이하게 하기 위하여 다음과 같은 몇 가지 가정을 한다[1,3,4].

- (1) 철판과 롤사이에는 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.

$$\frac{dF_2}{dt} = \frac{AE}{L}(V_2 - V_1) + \frac{V_1}{L}F_1 - \frac{V_2}{L}F_2 \quad (1)$$

여기서 A: 진행방향에 수직인 단면적, E: 탄성계수, L: 롤간의 거리

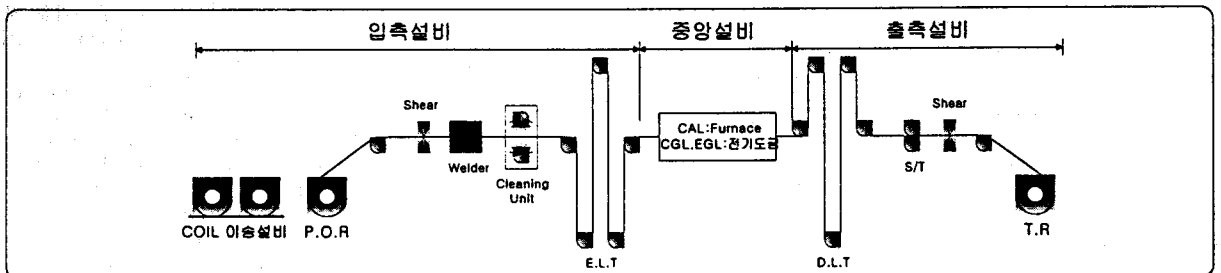


그림 1. 연속 공정 시스템

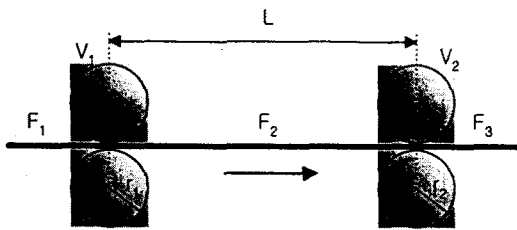


그림 3. 장력 모델

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

전동기의 속도 및 토크와 장력과의 관계는 식(2), (3)과 같다.

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = T_1 + r_1 \cdot F_2 - r_1 \cdot F_1 \quad (2)$$

$$v_1 = r_1 \cdot \omega_1 \quad (3)$$

여기서 J: 전동기의 관성, r: 롤의 반지름, ω : 전동기의 각속도, T: 전동기의 토크, v: 라인 속도

실제로 POR와 TR은 철판의 권취에 의해 롤의 반경이 변화하므로 모터 축방향의 단면적을 이용하여 모델링하면 식(4), (5)와 같이 된다.

$$r_1 = \sqrt{(L_r - \int_0^t v_1 dt) \cdot \frac{d}{\pi} + r_{10}^2} \quad \text{for POR} \quad (4)$$

$$r_2 = \sqrt{(\int_0^t v_2 dt) \cdot \frac{d}{\pi} + r_{20}^2} \quad \text{for TR} \quad (5)$$

여기서 L_r : 철판의 총길이, d: 철판의 두께, r_{10}, r_{20} : 롤 자체의 반지름

철판을 이송하는 물과 전동기는 긴 축으로 연결되어 있으며, 중간에 기어가 존재하는 기계적인 구조를 가진다. 그림 4는 이러한 구조를 3관성계로 나타낸 것으로 긴 축에 의해 나타나는 반공진점에 의해 축진동이 발생하게 되며, 이는 속도 제어기의 응답성을 빠르게 하지 못하는 원인이 된다. 식(6)은 전동기와 물의 영향을 모델링하고 시뮬레이션 하기 위해 시스템을 2관성계로 표현한 것이다.

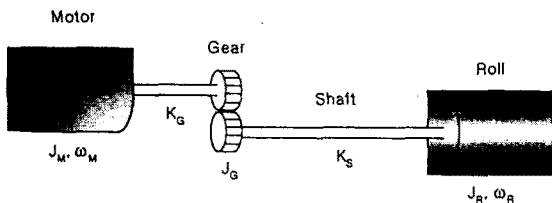


그림 4. 3관성계 시스템

$$\begin{aligned} \omega_M &= \frac{1}{J_M S} (T_e - T_{sh}) \\ \omega_R &= \frac{1}{J_R S} (T_{sh} - T_L) \\ T_{sh} &= \frac{K_{sh}}{S} (\omega_M - \omega_R) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 ω_M : 전동기 각속도, ω_R : 물의 각속도, J_M : 전동기 관성, J_R : 물의 관성, T_{sh} : shaft 토크, K_{sh} : shaft stiffness(= $1/(1/K_g + 1/K_s)$).

2.2 장력 제어 특징

기존의 장력 제어 방식은 크게 2가지로 구분된다. 하나는 출측전동기(TR)는 속도를 제어하고, 입측전동기(POR)는 장력을 제어하기 위해 장력에 해당하는 토크 제어를 하는 것이고, 다른 하나는 입측전동기에 장력을

센서에 의해 궤환받아 장력 제어기를 구성하는 것이다. 이러한 방식은 두 롤간의 장력을 제어하는 데 효과적인 방법으로 속도 변화나 롤 직경 변화 및 관성 변화에 대해 효과적인 방법이다. 그림 5는 이러한 장력 제어 방식을 나타낸 것이다.

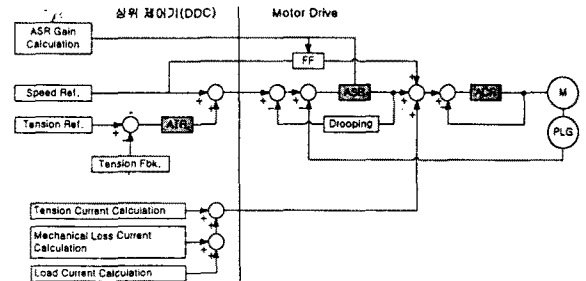


그림 5. 장력 제어 방식

연동 구동 시스템에서 장력 변동을 최소화하기 위해 각 롤간의 속도 동기가 반드시 이루어져야 한다. 철판의 권취에 의한 롤의 직경 변화로 인한 관성 변화 및 롤에서 가감속시에 부담하게 되는 전후 부하(철판, 비구동 롤 등)의 관성에 의한 영향으로 속도 제어기의 응답성이 달라져 장력 변동의 요인으로 작용하므로 이를 보상하는 속도 제어가 요구된다.

동일 속도에 의한 정속 구동시 각 롤의 마모, 관성 변동 등에 따라 부분적으로 임의의 전동기에 과부하가 걸리는 현상을 방지하기 위해 속도 제어기 양단에 drooping loop를 적용하여 속도를 저하시키는 역할을 하게 되는 데, 가감속시에 비교적 큰 양의 장력 변동을 유발하게 되므로 drooping에 의한 속도 저하량을 예측하여 이를 보상해 주어야 한다.

일정 장력을 유지하기 위해 각 종 보상량이 추가된다. 롤 전후에 장력차를 발생시키고자 할 때 소요되는 토크를 환산하여 전류 제어기에 인가하여 전동기가 이를 감당하도록 한다. 기계적인 손실이나 액중 저항 보상에도 이와 같은 원리는 마찬가지로 적용된다.

이와 같은 과정은 DDC와 같은 상위 제어기에서 처리하고 있으며, 속도제어기와 전류제어기는 Motor Drive에서 수행한다.

3. 장력 제어 알고리즘

본 연구에서 연동 구동 시스템에 적용하고자 하는 장력 제어 시스템의 제어 구조는 그림 6과 같다.

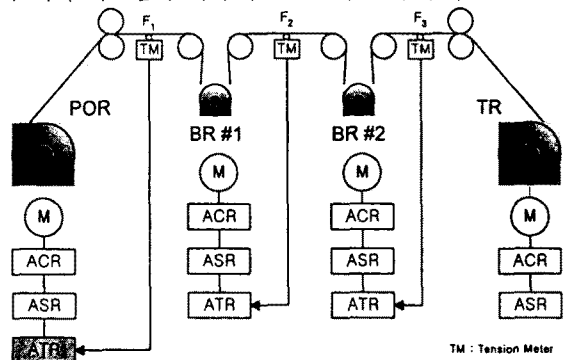


그림 6. 장력 제어기의 구조

일반적으로 브라이들 롤이 ATR 제어를 하고 POR과 TR은 ASR 제어를 행하지만, 철판의 권취에 의해 롤의 직경이 변화하고 이로 인해 관성이 변화하는 경우에 롤 전후에 장력차가 필요할 때에는 POR에도 ATR 제어를 추가하여 고속이나 가감속시에 장력 제어의 성능을 향상

시킨다. 그림 7은 그림 6에 대한 제어 블록도로 축진동 모델을 포함하고 있으며, 두 개의 롤이 장력에 의해 결합되어 있는 것을 나타낸 것이다.

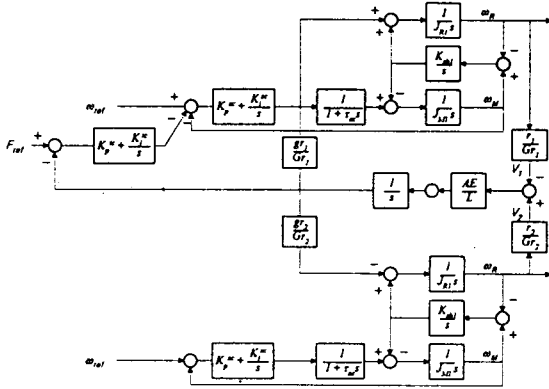


그림 7. 제어 블록도

3.1 장력 제어기

장력 제어기는 PI 제어기로 구성되며, ATR 출력은 ASR의 속도 기준치에 추가된다.

$$\Delta\omega = (K_{fp} + \frac{K_{fi}}{s})(F_{ref} - F) \quad (7)$$

앞에서 설명했듯이 롤 전후의 장력 차를 발생시키기 위해 필요한 전류는 식(8)과 같고, 이것은 전류 제어기에 제어 입력으로 추가된다.

$$i_{dd} = \frac{9.8 \cdot r \cdot F}{2 \cdot G_R \cdot K_t}(T_1 - T_2) \quad (8)$$

여기서 G_R : 기어비, K_t : 토크 상수

3.2 속도 제어기

속도 제어기는 PI 제어기로 구성되며, 기준치는 ASR 앞단의 ATR의 출력과 상위 제어기로부터 받는 속도 기준치(i_{com})의 합으로 식(9)와 같이 구성된다.

$$\omega_{ref} = \omega_{com} + \Delta\omega \quad (9)$$

연동 구동 롤의 속도를 동기시키기 위한 feed forward 입력은 식(10)과 같으며, ASR의 출력은 식(11)과 같다.

$$i_{ff} = a \frac{d\omega_{ref}}{dt} \quad (10)$$

$$i_{ref} = (K_{sp} + \frac{K_{si}}{s})(\omega_{ref} - \omega) \quad (11)$$

4. 디지털 시뮬레이션

철판의 권취에 따른 POR과 TR의 롤 직경을 변화시키면서 제어를 하였으며, 이로 인해 나타나는 관성 변화를 고려하였다. POR과 TR의 전동기 상수는 동일하게 놓고, 기계적인 손실은 없다고 가정하였다. 전동기와 롤 사이에 발생하는 축진동 현상을 시뮬레이션에 포함하였다. 그림 8은 POR을 ASR 제어한 경우로 가감속시 속도 응답의 불일치가 나타나고 있으며, 각 롤간의 장력중 F_1 (ASR 제어)에서는 장력 변동이 나타나고 있다. 실제로 변화되는 POR과 TR의 직경을 그림에 나타내었다.

그림 9는 롤의 속도 동기를 위해 feedforward 보상을 하고, POR을 ATR로 제어한 경우이다. 각각의 롤 전후의 장력을 직접 제어함으로써 정밀한 장력 제어가 가능하다. 또한 가감속시 속도 동기가 이루어지고 속도 응답성이 향상됨을 알 수 있다.

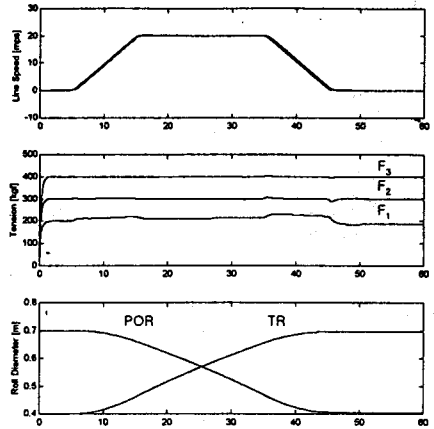


그림 8. 기존의 연동 제어(POR : ASR 제어)

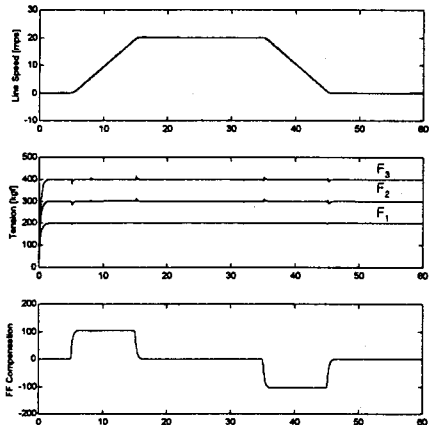


그림 9. 제안한 연동 제어(POR : TR 제어)

5. 결 론

본 연구는 독자적인 제철 냉연 라인의 연속 공정 기술을 습득하는 과정의 일환으로 연속 공정 시스템의 고속·고정도 장력 제어에 관한 것이다. 본 연구에서 적용한 속도 동기화와 장력 제어기법은 기존의 제어 방법에 비해 우수한 장력 제어와 속도 응답성을 가지고 있다. 여기서 개발·습득한 제어기술을 실험적으로 증명하기 위해 현재 축소 모델이 제작중에 있으며, 시스템 파라미터가 변화하거나 외란에 보다 둔감한 제어기를 얻기 위한 제어 방법이 필요하다. 또한 연동 구동 롤간의 속도 동기 및 장력 제어의 저해 요인인 축진동을 억제하기 위한 보다 실용적인 제어 방법이 요구된다. 이러한 연구를 토대로 하여 skin mill이나 looper control 등에도 적용할 수 있는 기술을 확보하기 위한 연구가 차후에 이루어질 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] "Mill Drive용 Tension 제어 알고리즘 개발", RIST & POSCON, 1997.12.
- [2] "냉연설비 종합 Eng'ng 기술개발(I) - LINE 연동구동 제어기법 개발", RIST & POSCON, 1998.3.
- [3] 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.
- [4] 정경철, "연속 공정 시스템의 폐관 선형화를 이용한 장력 제어", 1998.2.
- [5] Naotake Shibata, Hideki Honda, "2慣性系の外亂抑壓制御", 技報 安川電氣 第5巻 NO.4 1995.