

연속 부하 분담 제어를 이용한 연속 구동 시스템의 속도 및 장력 제어 특성 개선

송승호\*, 설승기\*, 이정욱°, 박일영°, 최창호°  
 \*서울대학교 전기공학부 °(주) 포스코 기술연구소

Speed and Tension Control of Continuous Strip Processing Line Using Continuous Load Balance Control

Seung-Ho Song\*, Seung-Ki Sul\*, Jeong-Uk Lee°, Il-Young Park°, Chang-Ho Choi°  
 \*School of Electrical Engineering, Seoul National Univ. °R&D Center, POSCON Corporation

**Abstract** - 본 논문에서는 다수대 전동기로 구성된 연속 구동 시스템의 속도 및 장력 제어를 위한 연속 부하 분담 제어를 제안한다. 제안된 방법을 이용하여 장력 센서를 사용하지 않고 인접한 전동기의 출력 토크를 원하는 비율로 조절하는 것에 의해 물리적인 장력을 제어할 수 있다. 제안된 방식의 특성과 기존의 장력 센서를 이용한 피드백 제어 특성을 시뮬레이션과 실험을 통해 비교 검토하였다. 4개의 구동롤로 구성된 다중 스펀 축소 모델을 설계, 제작하여 제안된 방법의 유용성을 입증하였다.

1. 서 론

연속 구동 시스템은 자동화된 생산 및 처리 공정에서 여러 대의 전동기 구동시스템이 연속된 재료를 이송, 가공하는 장치 및 그 제어를 의미한다. 이와 같이 생산 및 처리가 연속으로 이루어지는 공정은 제철, 제지, 인쇄, 섬유등 주요 핵심 산업을 망라하고 있다. 이러한 연속 공정 라인에서 전동기 구동 장치의 제어 목적은 대상 물리의 단독 속도 제어뿐만 아니라 라인 전체의 속도를 원하는 패턴으로 운전하면서 스탠드간 장력을 일정하게 유지하는 것이다. 장력이 일정하게 유지되지 못하면 소재의 사행(蛇行), 홉집(Chatter Mark), 열 뒤틀림(Heat Buckling)등이 발생하여 제품의 품질 저하를 가져오게 된다[1].

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 구동롤들은 속도제어 모드로 운전되는 것이 일반적이다. 이 경우 속도 기준값의 오차나 속도 제어계를 포함한 각 전동기 구동 시스템간의 특성 차이가 존재할 경우 실제 물리의 선속도가 변동하고 따라서 큰 장력 오차가 발생한다.

본 논문에서는 장력 센서를 사용하지 않고 전동기 출력 토크 정보를 공유하는 것에 의해 각 구동롤이 발생하는 출력(힘)을 원하는 비율로 일정하게 유지하도록 제어하는 연속 부하 분담 제어를 제안한다. 제안된 방법은 장력 센서 없이도 효과적으로 소재의 장력을 제어할 수 있고, 각 개별 전동기 제어 장치가 연속적으로 부하 분담 제어를 수행하므로 상위 제어기의 부담을 덜 수 있는 장점이 있다. 제안된 방법을 실험적으로 검증하기 위하여 4개의 구동롤과 3개의 측정롤로 구성된 철강 압연용 연속 구동 시스템을 설계, 제작하였다. 기존의 장력 피드백 제어 방식과 속도 및 장력 제어 특성을 비교한 결과 오히려 제안된 방법의 과도 상태 응답 특성이 우수하고 시스템의 동작이 안정적인 것을 확인하였다.

2. 연속 구동 시스템의 모델링

그림 1은 2개의 롤과 그 사이의 스트립 소재로 구성된 단위 시스템의 구성도를 나타낸다. 각 전동기의 출력토크의 평형식은 식(1)로 표시되고, 소재의 장력은 질량 보존의 법칙과 후크의 법칙으로부터 (2)식과 같이 유도된다 [4]. 이것을 동작 속도 부근에서 선형화하면, (3)과 같은

소신호 상태 방정식으로 표현할 수 있다. 여기서 Δ는 각 신호가 정상 상태 평형값으로부터 변동분(small signal)임을 나타내는 기호이다. 시스템의 특성 방정식은 (4)와 같이 표시되고, 고유진동 주파수와 감쇠 정수는 (5)처럼 표시된다. 일반적으로 시스템의 스프링 계수는 10<sup>7</sup> 정도의 매우 큰 값을 가지므로 플랜트의 특성은 고유 진동주파수 부근에서 매우 진동적임을 알 수 있다.

$$J_i \frac{dv_i}{dt} = r_i \tau_i + r_i^2 (f_{i+1} - f_{i-1}), \text{ where } i = 1, 2. \tag{1}$$

$$\frac{d}{dt} f_{12} = \frac{EA}{L_{12}} (v_2 - v_1) + \frac{1}{L_{12}} f_{01} v_1 - \frac{1}{L_{12}} f_{12} v_2 \tag{2}$$

$$\dot{X} = AX + B_1 U + B_2 W \tag{3}$$

where

$$X = [\Delta v_1, \Delta f_{12}, \Delta v_2]^T, U = [\Delta \tau_1, \Delta \tau_2]^T, W = [\Delta f_{01}, \Delta f_{23}]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{r_1^2}{J_1} & 0 \\ -K_{12} & -C_{12} & K_{12} \\ 0 & -\frac{r_2^2}{J_2} & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} \frac{r_1}{J_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_2}{J_2} \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} -\frac{r_1^2}{J_1} & 0 \\ C_{12} & 0 \\ 0 & \frac{r_2^2}{J_2} \end{bmatrix}.$$

$$K_{12} = \frac{EA}{L_{12}} : \text{Spring Coeff. [N/m]}, C_{12} = \frac{V_0}{L_{12}} : \text{Inverse Time Constant [1/sec]}$$

$$\det(sI - A) = s^3 + C_{12}s + K_{12} \left( \frac{r_1^2}{J_1} + \frac{r_2^2}{J_2} \right) = 0 \tag{4}$$

$$\omega_{n12} = \sqrt{K_{12} \left( \frac{r_1^2}{J_1} + \frac{r_2^2}{J_2} \right)}, \text{ and } \xi_{12} = \frac{C_{12}}{2 \cdot \omega_{n12}} \tag{5}$$

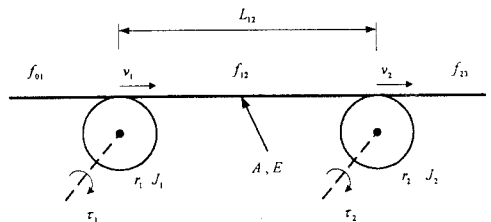


그림 1. 기계계 단일 스펀의 모델링.

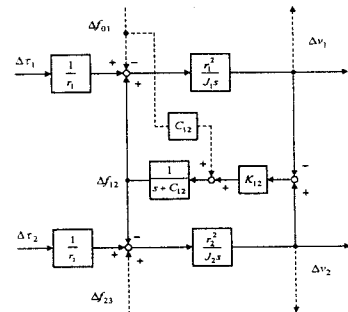


그림 2. 선형화된 단일 스펀의 블록도.

### 3. 기존의 장력 피드백 비례 적분 제어

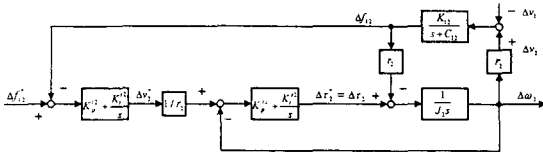


그림 3. 기존의 비례 적분 장력 제어 블록도.

$$\frac{\Delta f_{12}}{\Delta f^*} = \frac{K_{12} K_p' K_p' \left( s + \frac{K_i'}{K_p'} \right) \left( s + \frac{K_i'}{K_p'} \right)}{\Delta_i} \quad (6)$$

$$\Delta_i(s) = J_2 s^4 + \{J_2 C_{12} + K_p'\} s^3 + \{K_{12} K_p' K_p' + K_i' + K_p' C_{12} + r_1^2 K_{12}\} s^2 + \{K_{12} (K_i' K_p' + K_p' K_i') + K_i' C_{12}\} s + K_{12} K_i' K_p' \quad (7)$$

### 4. 제안된 연속 부하 분담 제어

#### 4.1 연속 부하 분담 제어 블록도 및 전달 함수

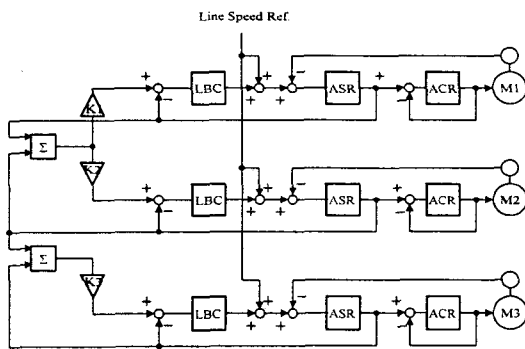
전류제어기와 속도제어기가 직렬로 연결된 기존의 제어기 구조에 상위 부하 분담 제어기를 추가하여 각 구동물이 발생하는 출력을 일정하게 유지하도록 속도 기준값을 조정한다. 이 때 상위 부하 분담 제어기의 출력 분담 기준값은 인접한 물로부터 받은 출력 피드백 값과 자신의 출력값을 근거로 하여 부하 분담 비율에 따라 (6)과 같이 계산된다. 이 때 각 물의 마찰 손실은 무시하였고, 첫 물의 입력측 장력과 마지막 물의 출력측 장력은 일정하게 유지된다고 가정하였다. 풀림롤, 감김롤 혹은 다른 장력 제어 장치에 의해 입출력 장력이 유지되는 중간 섹션에 대하여 이와 같은 가정이 성립한다.

$$f_i^* = K_i (\bar{f}_{i-1} + \bar{f}_i) \quad (8)$$

$$K_i = \frac{f_i^{set}}{f_{i-1}^{set} + f_i^{set}} \quad ; \text{desired output force ratio of the roll}$$

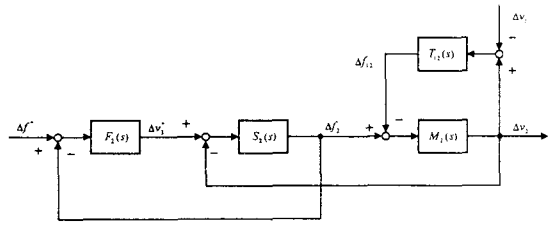
제안된 방식은 각 전동기가 속도 제어를 수행하기 위해 발생하고 있는 토크를 참조하여 부하 분담 양을 결정하므로 정해진 양의 토크를 발생하는 토크 제어 모드 운전과는 다르다. 즉 전동기가 발생할 토크의 절대값을 지정하는 것이 아니라 인접 롤의 부하 상황에 따라 상대적인 비율을 맞추는 방향으로 제어하게 된다.

그림 5에 제안된 연속 부하 분담 제어의 기본 단위 블록을 소신호로 표시하여 제안된 제어기의 특성을 검토하였다. 여기서 부하 분담 비율  $K_i$ 를 조절하는 것을 상위 제어계의 기준 입력값이 변동하는 것으로 등가화 하였다.  $F_2, S_2, M_2$  와  $T_{12}$  는 각각 상위 힘 제어기, 속도 제어기, 전동기, 스트립 장력에 해당하는 블록이다.



LBC : Load Balance Controller  
ASR : Automatic Speed Regulator  
ACR : Automatic Current Regulator  
K1, K2, K3 : Load Balance Ratio

그림 4. 제안된 연속 부하 분담 제어기 구성도.



$$F_1(s) = K_p' + \frac{K_i'}{s}, \quad S_1(s) = \left( K_p' + \frac{K_{12}}{s} \right) \frac{1}{r_1^2}, \quad M_1(s) = \frac{r_1^2}{J_2 s}, \quad T_1(s) = \frac{K_{12}}{s + C_{12}}$$

그림 5. 제안된 연속 부하 분담 제어기의 기본 단위 블록.

$$\frac{\Delta f_{12}}{\Delta f^*} = \frac{F_2 S_2 M_2 T_{12}}{1 + M_2 T_{12} + S_2 M_2 + F_2 S_2 + F_2 S_2 M_2 T_{12}} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta f_{12}}{\Delta f^*} = \frac{K_{12} K_p' K_p' \left( s + \frac{K_i'}{K_p'} \right) \left( s + \frac{K_i'}{K_p'} \right)}{\Delta_2} \quad (10)$$

$$\Delta_2(s) = (J_2 + J_1 K_p' K_p') s^4 + \{J_2 C_{12} + K_p' + J_2 / r_1^2 \times (C_{12} K_p' K_p' + K_i' K_p' + K_p' K_i')\} s^3 + \{K_{12} K_p' K_p' + K_i' + K_p' C_{12} + r_1^2 K_{12} + J_2 / r_1^2 \times (C_{12} K_p' K_p' + C_{12} K_p' K_i' + K_i' K_p')\} s^2 + \{K_{12} (K_i' K_p' + K_p' K_i') + K_i' C_{12} + J_2 / r_1^2 \times C_{12} K_i' K_p'\} s + K_{12} K_i' K_p'$$

#### 4.2 상위 힘 제어기 설계

입출력 장력의 변동이 없다고 가정하면 상위 힘 제어계의 개루프 전달함수는 다음과 같이 주어지며 이것의 보드 선도를 그림 6에 표시하였다.

$$G_{fc}^o(s) = \frac{\Delta f}{\Delta f^*} = \frac{J}{r^2} \cdot K_p' \omega_f \left( \frac{s/\omega_f + 1}{s/\omega_{fc} + 1} \right) \quad (11)$$

이 그림에서 상위 분담 제어기의 절점 주파수  $\omega_f$  를 속도 제어계의 교차각주파수  $\omega_{fc}$  보다 3배 이상 크게 잡는 것으로 하였다.  $|G_{fc}^o(j\omega_{fc})| = 1$  이 되도록 하면 비례이득  $K_p'$  값과 적분 이득  $K_i'$  은 식 (12)와 같다.

$$K_p' = \frac{r^2}{J} \frac{\omega_{fc}}{\omega_f \cdot \omega_{fc}}, \quad K_i' = \omega_f K_p' \quad (12)$$

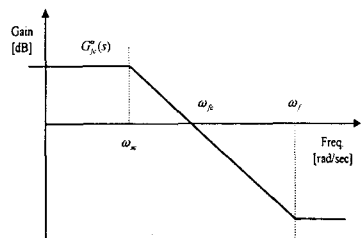


그림 6. 제안된 연속 부하 분담 제어기 보드 선도.

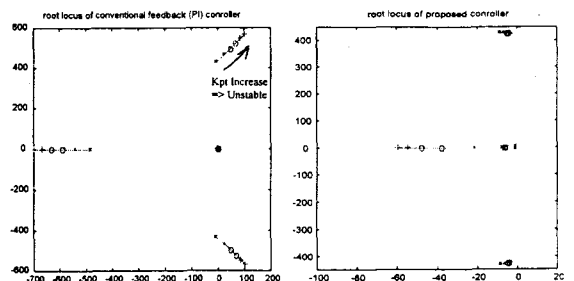


그림 7. 기존 제어기(좌)와 제안된 제어기(우)의 근궤적 비교.

## 5. 실험

### 5.1 실험 장치 구성

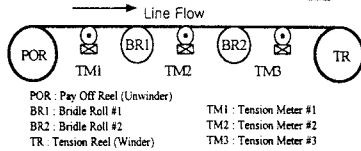
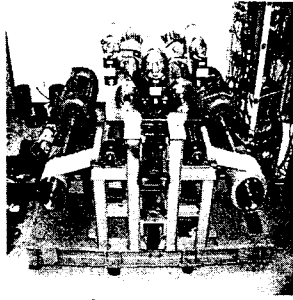


그림 8. 제작된 연속 구동 시스템 축소 모델 사진 및 구성.

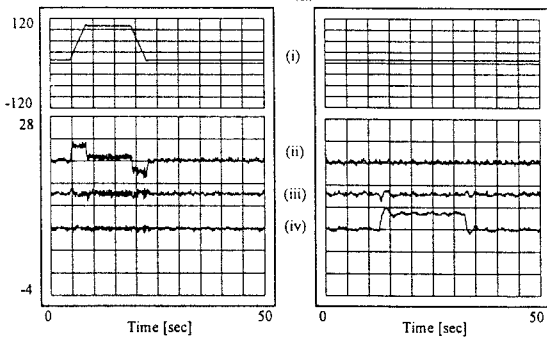
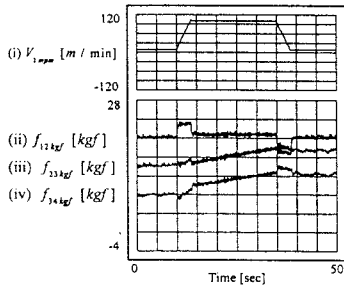


그림 9. 기존 제어기 동작 특성 (a) 속도 제어 모드 운전시 (무보상), (b)(c) 장력 피드백을 이용한 비례 적분 제어시.

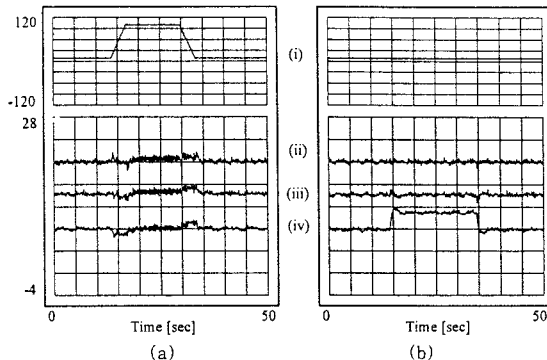


그림 10. 제안된 연속 부하 분담에 의한 속도 및 장력 제어. (a) 100m/min 가감속, (b) 11kgf 장력 스텝 응답.

표 1. 실험 장치 설계 사양.

전동기	유도기 37kW 2대(POR, TR) 5.5kW 2대(BR1, BR2)
롤	반지름 $r_1=0.12m, r_2=0.09m, r_3=0.09m, r_4=0.12m$
실험 소재	스팬 길이 $L_{12}=1.86m, L_{23}=0.88m, L_{34}=1.86m$
	Steel: $E=200 \times 10^9 N/m^2$ 폭=200mm 두께=0.15mm Paper: $E=11 \times 10^9 N/m^2$ 폭=200mm 두께=0.08mm
장력 센서	로드셀: 정격 하중 200kgf 출력 3mV/V 저항 380Ω 6개

### 5.2 실험 결과

그림 9 (a)는 인접한 3개의 구동롤을 속도 제어 모드로 운전하여 라인의 속도 (i)를 10m/min에서 100 m/min으로 가감속한 실험 파형이다. 반지름 오차, 속도 제어계 특성차 등에 의해 발생한 미세한 속도 오차가 (ii), (iii), (iv)의 장력에 큰 변동을 일으키고 있음을 확인할 수 있다. 그림 9 (b)는 TM2장력 기준값은  $f_{23}^* = 14$  kgf 로, TM3의 장력 기준값은  $f_{34}^* = 8$  kgf 로 설정하고 장력 피드백 제어를 수행한 경우로서 속도 가감속 과도 상태에도 (iii)과 (iv)의 TM2와 TM3의 장력이 변동하지 않고 일정하게 제어된다. 그림 9 (c)는 TM3 장력 기준값을 스텝으로 8kgf에서 11kgf로 변경시켰을 때 제어 응답이다.

그림 10은 제안된 연속 부하 분담 제어를 이용한 속도 가감속 및 장력 제어 실험 파형이다. 그림 10 (a)에서 폴림롤의 제어시 가감속 토오크를 효과적으로 보상함으로써 (ii)에 보인 TM1의 장력이 어느 정도 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 이 때 장력 센서를 사용하지 않고도 각 전동기의 부하출력을 일정한 비율로 유지함으로써 그림 9(a)에서 나타났던 장력의 편향현상이 없이 원하는 기준값으로 제어되는 것을 알 수 있다. 그림 (b)는 TM3 장력 기준값을 8kgf에서 11kgf로 스텝으로 변경시켰을 때의 제안된 제어 알고리즘의 응답 파형이다. 장력 기준값의 변경에 따라 부하 분담비율을 바꾸어 제어한 결과 TM3 장력값이 기준값을 잘 추종하고 있으며 동특성이 오히려 장력 센서를 사용한 제어기(그림9(c))보다 우수한 것을 알 수 있다. 그 이유는 제안된 방식의 상위 제어기는 출력 토오크 차이를 순시적으로 제어하는 구조이므로 속도 제어기를 내부 루프로 갖는 기존의 비례 적분 제어기 보다 빠른 응답을 얻을 수 있다. 이러한 결과는 시뮬레이션 결과와도 일치한다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 속도 제어 모드로 운전하는 연속 구동 시스템에서 인접한 롤의 구동 전동기가 담당하는 부하를 정해진 비율로 분담하도록 제어하는 것에 의해 원하는 지점의 장력을 제어할 수 있음을 보였다. 이러한 연속 부하 분담 제어 알고리즘은 장력 센서를 사용하지 않고, 분산된 개별 전동기 구동 장치에서 구현할 수 있도록 설계되었으므로 적은 비용으로 장력을 제어할 수 있고, 확장성도 우수한 특징을 갖는다. 제안된 알고리즘의 동작 확인을 위하여 연속 구동 실험장치를 설계, 제작하였고, 디지털 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 구현 가능성 및 효용성을 확인하였다. 향후에는 시스템의 마찰 특성을 고려하여 적응적, 능동적으로 구동롤간 불균형을 억제하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 포항종합제철주식회사, 2년연 CAL TENSION 제어이론, 1988.
- [2] 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.
- [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, pp.1~22, 1997.
- [4] Kee-Hyun Shin, Distributed Control of Tension in Multi-span Web Transport System, Ph. D. Thesis, Oklahoma State Univ., 1991.
- [5] 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.