

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

論 文  
48B-9-7

## Speed and Tension Control of Continuous Strip Processing Line using Continuous Load Balance Control

宋丞鎬\* · 薛承基\*\*  
(Seung-Ho Song · Seung-Ki Sul)

**Abstract** - This paper proposes a new speed and tension control algorithm for multi-span continuous strip processing line. In this algorithm the speed reference of each roll is adjusted to make the output force follow the load balance reference using an outer loop controller in cascade. Using the information of the output force of the adjacent roll, it is shown that the strip tension between two rolls can be controlled as the desired value without tension sensor. An experimental set-up which consists of 4 driven and 3 measuring rolls is designed and built for the multi-span speed and tension control. The experimental result reveals conspicuous improvement of tension control performance by the proposed algorithm comparing to the conventional tension feedback controller.

**Key Words** : continuous load balance control, multi-span system, speed and tension control

### 1. 서론

연속 구동 시스템은 자동화된 생산 및 처리 공정에서 여러 대의 전동기 구동시스템이 연속된 재료를 이송, 가공하는 장치 및 그 제어 시스템을 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 롤러의 단독 속도 제어뿐만 아니라 라인 전체의 속도를 원하는 패턴으로 운전 하면서 스탠드간 장력을 일정하게 유지하는 것이다. 장력이 일정하게 유지되지 못하면 소재의 사행(蛇行), 흠집(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 구동물들은 속도제어 모드로 운전 되는 것이 일반적이다. 이 경우 속도 기준값의 오차나 속도 제어계를 포함한 각 전동기 구동 시스템간의 특성 차이가 존재할 경우 실제 롤러의 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 제안된 방법의 과도 상태 응답 특성이 우수하고 시스템의 동작이 안정적임을 확인하였다.

### 2. 연속 구동 시스템의 모델링

그림 1은 2개의 롤과 그 사이의 스트립 소재로 구성된 단위 시스템의 구성도이다. 각 전동기의 출력 토크 평형식은 입출력 장력을 고려하여 식(1)과 같이 표시되고, 소재의 장력은 질량 보존의 법칙과 후크의 법칙으로부터 (2)식과 같이

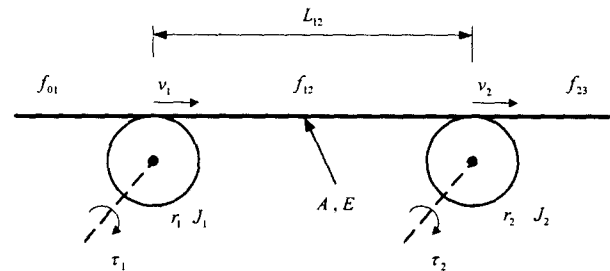


그림 1 기계계 단일 스패의 모델링

Fig. 1 Modeling of single span of continuous strip processing line

\* 正 會 員 : 서울대 大學院 電氣工學部 卒業 · 工博

\*\* 正 會 員 : 서울대 電氣工學部 副敎授 · 工博

接受日字 : 1999年 6月 23日

最終完了 : 1999年 8月 16日

유도된다[4]. (1)식에서 풀림롤(unwinder)과 감김롤(winder)의 경우에는 반지름과 관성이 가변이며, (2)식에는 속도와 장력의 곱이 포함되어 있으므로 이 식들은 시변 계수 비선형 미분 방정식의 형태이다.

$$J_i \frac{dv_i}{dt} = r_i \tau_i + r_i^2 (f_{i,i+1} - f_{i-1,i}) \quad I=1,2 \quad (1)$$

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

여기서  $J_i$ 는  $i$ 번째 롤과 전동기를 포함한 등가 관성 모멘트이고,  $r_i$ 는 롤의 반지름을 나타내며,  $v_i$ 와  $\tau_i$ 는 각각 전동기의 선속도와 발생 토크를 나타낸다. 또한 전술한 바와 같이  $f_{i-1,i}$ 는 입력측 장력을 의미하며, 출력측 장력은  $f_{i,i+1}$ 로 표시하였다.  $E$ 는 소재의 탄성계수 (Young's modulus)이고  $A$ 는 소재의 단면적,  $L_{12}$ 는 스펀의 길이를 나타낸다.

일반적으로 소재의 두께가 롤의 직경에 비해 매우 작으므로 시간에 대한 반경의 변화율 및 질량 변화율이 크지 않다고 가정하고, 식(1) (2)를 동작 속도 부근에서 선형화(linearize)하면, (3)과 같은 소신호 상태 방정식으로 표현할 수 있다. 여기서  $\Delta$ 는 각 신호가 정상 상태 평형값으로부터 변동분(small signal)임을 나타내는 기호이다. 정상상태에서 운전중인 두 롤의 속도  $V_1 \cong V_2$ 는 거의 같은 값을 가지므로, 이것을 평균 동작 속도  $V_0$ 로 표시하였다. 따라서 (2)식의 계수를 (4)식과 같은 스프링 계수와 시정수의 역수를 도입하여 간단히 표시할 수 있다. 이와 같은 시스템의 특성 방정식은 (5)와 같고, 고유진동 주파수와 감쇠 정수는 (6)으로 표시된다. 일반적으로 시스템의 스프링 계수는  $10^7$ 정도의 매우 큰 값을 가지므로 플랜트의 특성은 고유 진동주파수 부근에서 매우 진동적임을 알 수 있다.

$$\dot{X} = AX + B_1U + B_2W \quad (3)$$

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

$$W = [\Delta f_{01} \ \Delta f_{23}]^T$$

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

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

$$K_{12} \equiv \frac{EA}{L_{12}}, \quad C_{12} \equiv \frac{V_0}{L_{12}} \quad (4)$$

$$\det(sI - A) = s \left[ s^2 + C_{12}s + K_{12} \left( \frac{r_1^2}{J_1} + \frac{r_2^2}{J_2} \right) \right] = 0 \quad (5)$$

$$\omega_{n12} = \sqrt{K_{12} \left( \frac{r_1^2}{J_1} + \frac{r_2^2}{J_2} \right)}, \quad \zeta_{12} = \frac{C_{12}}{2\omega_{n12}} \quad (6)$$

이와 같은 선형화된 단일 스펀 시스템의 블록도를 그림 2에 제시하였다. 각 전동기와 롤을 합쳐서 1차 관성계로, 소재의 장력 수식을 선속도 차이의 1차 지연으로 모델링하였다. 여기서 점선은 앞뒤로 연결된 스펀과의 상호 결합항을 나타내고 있다. 만일 앞,뒷단 장력의 변동이 없다면, 두 롤 사이의 장력은 각 전동기의 구동 토크를 각각의 반지름으로 나눈 등가 힘에 따라 결정된다. 속도의 변동이 없는 정상상태에서 각 롤은 (7)식과 같이 입출력 힘의 차이 만큼에 해당하는 토크를 발생하여 힘의 평형을 이루게 된다.

$$\frac{\tau_i}{r_i} = f_{i,i+1} - f_{i-1,i} \quad (7)$$

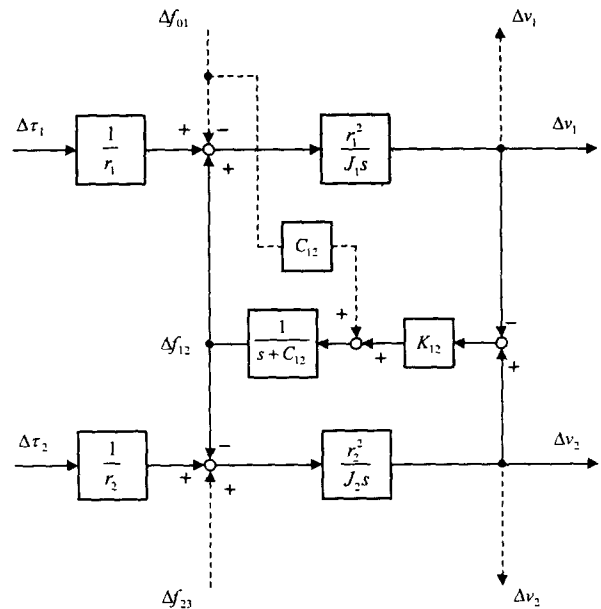


그림 2 선형화된 단일 스펀의 블록도  
Fig. 2 Linearized block diagram of single span system

### 3. 기존의 장력 피드백 비례 적분 제어

#### 3.1 제어기 구성 및 응답 특성 해석

일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 장력 피드백 제어 방법은 기준 장력과 측정된 장력간의 오차를 비례 적분 제어를 통해 인접롤의 전동기 속도 지령에 가감해 주는 방법이며, 인접한 3개의 롤을 대상으로 이 방식을 적용한 예를 그림 3에 나타내었다. 여기서 각 구동 전동기는 속도 제어 모드로 동작하며, 상위 제어기(host computer)에서 장력 측정과 제어를 모두 수행한 후 그 결과를 각 전동기 구동장치에 전달하는 형태로 구성되어 있다.

제어기의 특성 해석을 위하여 단일 스펀에 대한 소신호 제어 블록도를 그림 4에 나타내었다. 각 제어기 블록의 기호 중에서 위첨자 t는 장력 제어기, s는 속도 제어기를 의미하고, 아래 첨자 p는 비례 이득, i는 적분 이득, 숫자 2는 롤 번호를 의미한다. 이와같은 단일 스펀의 장력 제어 기준값으로부터 발생 장력에 이르는 전달함수는 식(8)과 같이 계산된다. 여기서 분모는 (9)식과 같이 주어지는 특성 다항식이며 이것의 근을 구해보면 장력 제어 시스템의 동작 특성과 안정도를 파악할 수 있다.

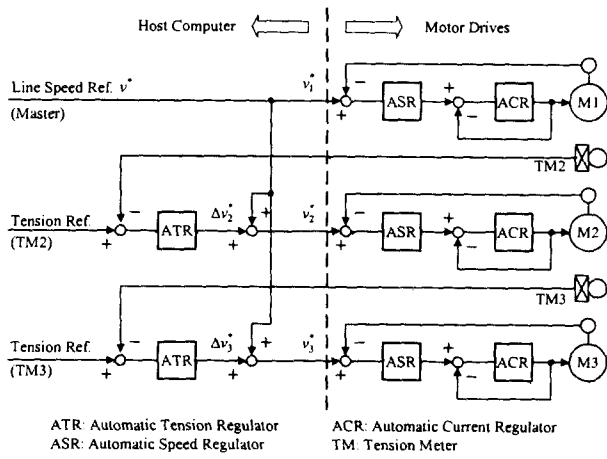


그림 3 기존의 비례 적분 장력 제어 구성도  
Fig. 3 Configuration of conventional tension feedback controller (PI)

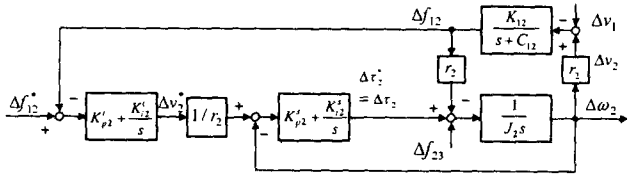


그림 4 기존의 비례 적분 장력 제어 단위 블록도  
Fig. 4 Unit block diagram of the conventional tension controller (PI)

$$\frac{\Delta f_{12}}{\Delta f_{12}^*} = \frac{K_{12} K'_{r2} K'_{r2} s (s + \frac{K'_{12}}{K'_{r2}}) (s + \frac{K'_{12}}{K'_{r2}})}{D_i} \quad (8)$$

$$D_i(s) = J_2 s^4 + [J_2 C_{12} + K'_{r2} s^3] s^3 + [K_{12} K'_{r2} K'_{r2} s + K'_{r2} s + K'_{r2} C_{12} + r_2^2 K_{12}] s^2 + [K_{12} (K'_{r2} K'_{r2} + K'_{r2} K'_{r2}) + K'_{r2} C_{12}] s + K_{12} K'_{r2} K'_{r2} \quad (9)$$

4. 제안된 연속 부하 분담 제어

4.1 연속 부하 분담 제어 블록도 및 전달 함수

제안된 방식은 그림 5에 보인 바와 같이 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 롤로부터 받은 출력 피드백 값과 자신의 출력값을 근거로 하여 부하 분담 비율에 따라 (10)과 같이 계산된다. 이 때 각 롤의 마찰 손실은 무시하였고, 첫 롤의 입력측 장력과 마지막 롤의 출력측 장력은 일정하게 유지된다고 가정하였다. 풀림롤, 감김롤 혹은 다른 장력 제어 장치에 의해 입출력 장력이 유지되는 중간 섹션에 대하여 이와 같은 가정이 성립한다.

$$f_i^* = K_i (f_{i-1} + f_i), \quad i > 1 \quad (10)$$

$$K_i = \frac{f_i^{set}}{f_{i-1}^{set} + f_i^{set}} \quad (11)$$

여기서  $f_i$ 는 각 롤의 토크를 반지름으로 나눈 등가 출력(힘)이며,  $K_i$ 는 해당 롤의 부하 분담 비율로서 각 롤이 발생하기 원하는 힘의 기준값으로부터 계산된다. 예를 들어 세 개의 롤이 3:3:4의 비율로 총 100[N]의 힘을 분담하려고 할 때  $f_1^{set}=30[N]$ ,  $f_2^{set}=30[N]$ ,  $f_3^{set}=40[N]$ 으로 선정하면 된다.

제어 대상인 연속 공정 시스템의 운전 방식에 따라 각 지점의 장력 기준값이 장력 지도(tension map)의 형태로 미리 정해지면 이와 같은 분담 비율은 쉽게 계산될 수 있고, 만일 한 지점의 장력 기준값이 변동하면 해당하는 부하 분담 비율을 조정하는 것에 의해 전동기의 부하 토크를 원하는 비율로 제어할 수 있다.

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 6에 제안된 연속 부하 분담 제어의 기본 단위 블록을 소신호로 표시하여 제안된 제어기의 특성을 검토하였다.

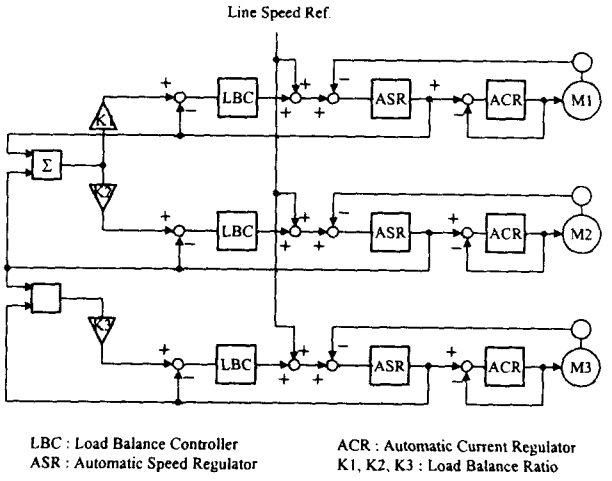


그림 5 제안된 연속 부하 분담 제어기 구성도  
Fig. 5 Configuration for the proposed continuous load balance controller

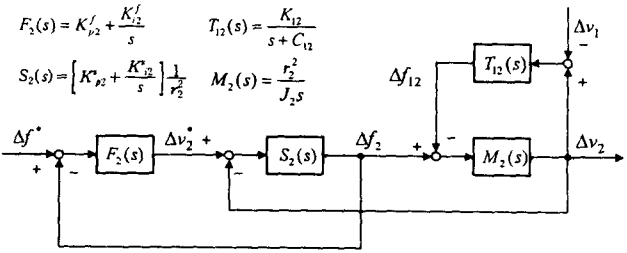


그림 6 연속 부하분담 제어기의 기본 단위 블록  
Fig. 6 Unit block diagram of the proposed continuous load balance controller

여기서 부하 분담 비율  $K_i$ 를 조절하는 것을 상위 제어계의 기준 입력값이 변동하는 것으로 등가화 하여 해석하였다.  $F_2, S_2, M_2$ , 와  $T_{12}$  는 각각 상위 힘 제어기, 속도 제어기, 전동기, 스트립 장력에 해당하는 블록이다.

제안된 제어기의 기준 입력으로부터 장력까지의 전달함수를 구하면 식(12)와 같고,  $D_2$ 는 (13)식과 같이 표시되는 특성 다항식이다.

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

$$= \frac{K_{12} K'_{\rho 2} K^s_{\rho 2} (s + \frac{K'_2}{K'_{\rho 2}}) (s + \frac{K^s_2}{K^s_{\rho 2}})}{D_2}$$

$$D_2(s) = (J_2 + J_2 K'_{\rho 2} K^s_{\rho 2}) s^4 + [J_2 C_{12} + K^s_{\rho 2} + \frac{J_2}{r_2} (C_{12} K'_{\rho 2} K^s_{\rho 2} + K'^s_{\rho 2} K^s_{\rho 2} + K'^s_{\rho 2} K^s_{\rho 2})] s^3$$

$$+ [K_{12} K'_{\rho 2} K^s_{\rho 2} + K^s_{\rho 2} + K^s_{\rho 2} C_{12} + r_2^2 K_{12} + \frac{J_2}{r_2} (C_{12} K'_{\rho 2} K^s_{\rho 2} + C_{12} K'^s_{\rho 2} K^s_{\rho 2} + K'^s_{\rho 2} K^s_{\rho 2})] s^2$$

$$+ [K_{12} (K'^s_{\rho 2} K^s_{\rho 2} + K^s_{\rho 2} K^s_{\rho 2}) + K^s_{\rho 2} C_{12} + \frac{J_2}{r_2} C_{12} K'^s_{\rho 2} K^s_{\rho 2}] s + K_{12} K'^s_{\rho 2} K^s_{\rho 2} \quad (13)$$

4.2 상위 힘 제어기 설계

속도제어기 선정에 의하여 속도 제어계의 응답성이 교차각주파수에 대한 1차 필터의 형태로 표시될 수 있고, 입출력 장력의 변동이 없다고 가정하면  $i$ 번째 상위 힘 제어계의 개루프 전달함수는 다음과 같이 주어지며 이것의 보드 선도를 그림 6에 표시하였다.

$$G^0_{fc}(s) = \frac{\Delta f_i}{\Delta f^*} = \frac{J}{r^2} K'_p \omega_f \left( \frac{s/\omega_f + 1}{s/\omega_{sc} + 1} \right) \quad (14)$$

이 그림에서 상위 분담 제어기의 절점 주파수  $\omega_f$ 를 설계된 속도 제어계의 교차각주파수  $\omega_{sc}$ 보다 3배 이상 크게 잡는 것으로 하였다. 이 그림에서  $|G^0_{fc}(j\omega_{fc})|=1$ 이 되도록 하면 비례 이득  $K'_p$ 값과 적분 이득  $K'_i$ 는 식 (15)와 같이 얻을 수 있다.

$$K'_p \cong \frac{r^2}{J} \frac{\omega_{fc}}{\omega_f \omega_{sc}}, \quad K'_i \cong K'_p \omega_f \quad (15)$$

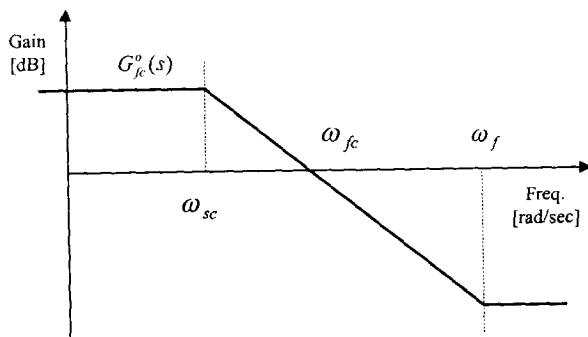


그림 7 제안된 연속 부하 분담 제어기 보드 선도  
Fig. 7 Bode diagram of proposed continuous load balance controller

4.3 연속 부하 분담 제어의 구현

연속 구동 시스템에 적용하기 위해서는 그림 8과 같이 인접한 물과의 데이터 통신이 필요하다. 바로 옆  $i-1$ 번째 롤의 출력(실제로는 토오크분 전류 기준값의 이동 평균)을 전달받아  $i$ 번째 롤의 출력과 합하여 그 평균값을  $i$ 번째 롤의 부하 분담 제어기 기준값으로 사용한다. 같은 방법으로  $i$ 번째 롤의 출력값도 또한  $i+1$  번째 롤로 전달된다. 이를 위해서 한 전동기 구동장치에 각각 한 채널의 통신 입력과 한 채널의 출력이 필요하다.

일반적으로 장력 측정 장치로 많이 사용되는 로드셀의 경우 출력 신호가 미약하고 신호선의 배선이 길수록 잡음의 영향을 받기 쉽다. 따라서 신호처리용 증폭기와 차단 주파수가 십Hz부근의 강력한 저역 통과 필터를 사용하는 경우가 많다 [3]. 이러한 필터의 사용은 장력 제어기의 동특성을 제한하는 요인이 된다. 제안된 연속 부하 분담 제어 방식에서는 각 전동기의 출력 토오크 차이를 제어하므로 장력 측정 신호의 시간 지연 등의 문제가 없다. 오히려 각 전동기의 토오크분 전류는 수kHz의 샘플링 주파수로 제어되며 출력 토오크의 평균값을 얻기 위한 필터의 시정수는 대략 10msec 정도로서, 이렇게 얻어진 정보를 이용하면 기존의 장력 피드백 센서보다 빠른 응답 특성을 얻을 수 있다.

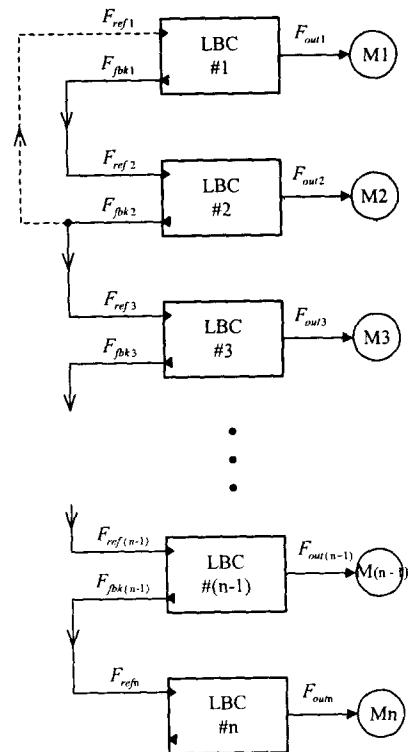


그림 8 연속 부하 분담 제어를 위한 데이터 통신  
Fig. 8 Data communication for continuous load balance control

4.4 제어계의 안정도

제안된 제어계의 특성 다항식 (13)을 다음 (16)식과 같이 간단히 표시할 수 있고 이 때  $a, b, c, d$ 는 모두 양수이다.

$$D_2(s) = (J_2 + J_2 K_p K_i^s)(s^4 + as^3 + bs^2 + cs + d) \quad (16)$$

시스템의 안정도를 판별하기 위하여 Routh-Hurwitz 테이블을 구하면 (17)과 같다.

$$\begin{array}{l} s^4: \quad 1 \quad b \quad d \\ s^3: \quad a \quad c \\ s^2: \quad \frac{ab-c}{a} \quad d \\ s^1: \quad \frac{abc-c^2-a^2d}{ab-c} \\ s^0: \quad d \end{array} \quad (17)$$

Routh-Hurwitz criterion에 의해 만일 (18)식이 성립하면 동작점 부근에서 선형화된 시스템은 점근적으로 안정(asymptotically stable)하다.

$$abc > c^2 + a^2d \quad (18)$$

a, b, c에는 플랜트의 파라미터, 속도제어기 이득, 상위 분담제어기 이득 등이 포함되어 있으나 그 중에서 상위 분담제어기 이득만을 가변 요소로 하여 위 식이 성립하는지 수치적으로 확인한 결과 통상의 범위의 이득값에 대하여 시스템이 항상 (18)식을 만족함을 알 수 있었다. 반면에 기존의 비례적분 피드백 제어의 경우는 비례이득과 적분 이득에 따라 안정영역이 제한되는 것을 확인하였다. 이러한 사실은 다음과 같은 근궤적법에서도 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

기존 제어기와 제안된 제어기에 대하여 상위 제어기의 비례이득을 변화시키면서 시스템의 극점을 관찰한 결과를 그림 9에 보인다. 기존 제어기의 경우는 비례 이득을 증가시킴에 따라 시스템의 극점이 불안정 영역으로 이동함을 알 수 있다. 반면에 그림 (b)에 보인 제안된 부하 분담 제어기의 경우는 극점이 안정영역에 머무르고 있다.

### 5. 실험

#### 5.1 실험 장치 구성

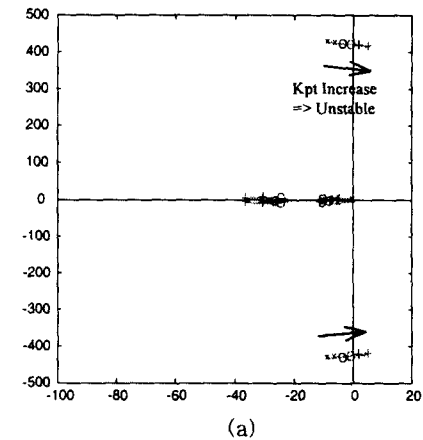
그림 10은 제안된 알고리즘을 검증하기 위하여 설계, 제작된 실험 장치의 외형 사진과 구성도이다. 실제의 장력 제어

표 1 장력 시스템 축소 모델 설계 사양.

Table 1 Specification of designed multi-span tension simulator

전동기	유도기 37kW 2대(POR,TR) 5.5kW 2대(BR1, BR2)
롤	반지름 r1=0.12m, r2=0.09m, r3=0.09m, r4=0.12m
실험 소재	스팬 길이 L12=1.86m, L23=0.88m, L34=1.86m Paper : E=11×10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup> , 폭=200mm, 두께=0.08mm
장력 센서	로드셀 (6개): 정격 하중 200kgf, 출력 3mV/V, 저항 380Ω

root locus of conventional system : Kpt=0.00003~0.003



root locus of conventional system : Kpf=0.00004~0.004

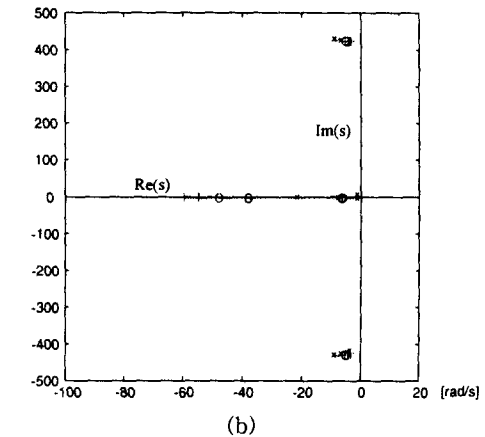


그림 9 기존 제어기(a)와 제안된 제어기(b)의 근궤적 비교.

Fig. 9 Comparison of root locus.(a) Conventional feedback (PI) controller. (b) Proposed controller.

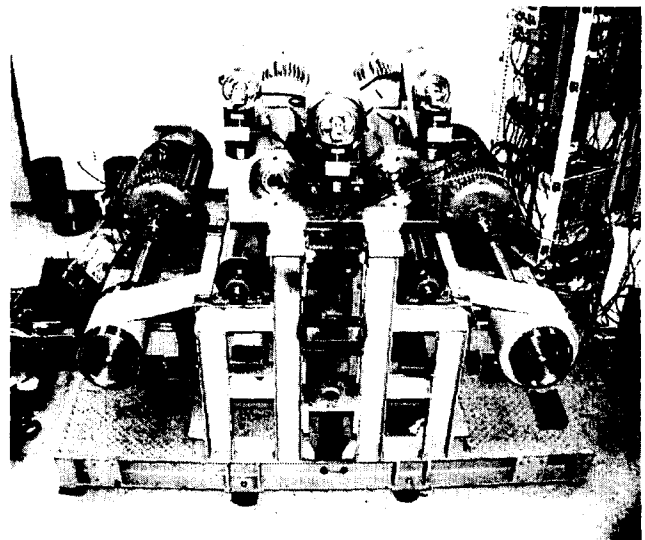


그림 10 (a) 제작된 연속 구동 시스템 축소 모델 사진

Fig. 10 (a) View of the experimental prototype

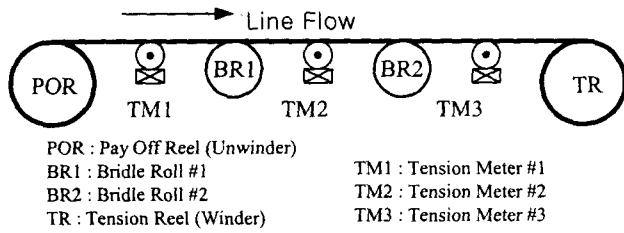


그림 10 (b) 제작된 연속 구동 시스템 축소 모델 구성도.  
 Fig. 10 (b) Configuration of the experimental prototype.

시스템을 축소한 모델로서 풀림롤과 감김롤에는 37KW 유도 전동기를 사용하였고 브라이들 역할의 중간 구동롤은 5.5KW 유도 전동기를 이용하였다. 실험의 편리성과 구동장치의 용량 및 설치공간 확보 등의 문제를 고려하여 구조가 간단하면서도 원하는 실험목적에 알맞도록 구동롤과 축정롤을 중심으로 설계, 제작하였다. 설계 파라미터는 표 1에 정리하였다.

5.2 실험결과

그림 11 은 인접한 3개의 구동롤을 속도 제어 모드로 운전하여 라인의 선속도 (i)를 10m/min에서 100 m/min으로 가감속한 실험 파형이다. 반지름 오차, 속도 제어계 특성차 등에 의해 발생한 미세한 속도 오차가 각 지점의 장력 (ii), (iii), (iv)에 큰 변동을 일으키고 있음을 확인할 수 있다. 그림 12 (a)는 TM2장력 기준값은  $f_{23}^* = 14 \text{ kgf}$  로, TM3의 장력 기준값은  $f_{34}^* = 8 \text{ kgf}$  로 설정하고 장력 피드백 제어를 수행한 경우로서 속도 가감속 과도 상태에도 (iii)과 (iv)에 나타난 TM2와 TM3의 장력이 변동하지 않고 일정하게 제어된다. 그림 12 (b)는 TM3 장력 기준값을 스텝으로 8kgf에서 11kgf로 변경시켰을 때 기존 장력 피드백 제어의 응답이다.

그림 13은 제안된 연속 부하 분담 제어를 이용한 속도 가감속 및 장력 제어 실험 파형이다. 그림 13 (a)에서 풀림롤의

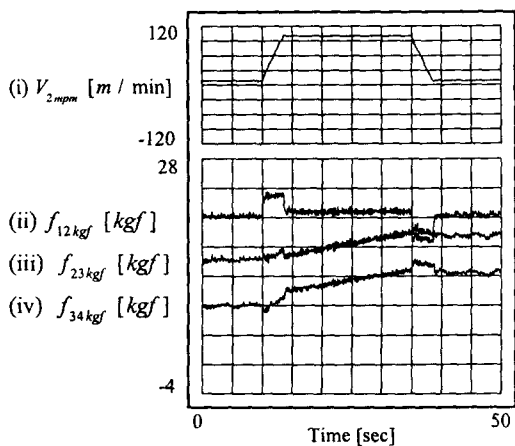


그림 11 속도제어 모드 가감속 운전시 각 스펠의 장력 변동 (속도 불일치에 대한 보상 없음).  
 Fig. 11 Tension variation during speed control mode operation (without any compensation for speed error).

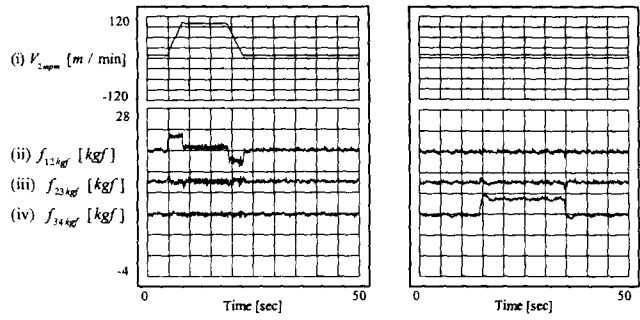


그림 12. 기존의 장력 피드백 제어 응답 (TM2장력과 TM3장력을 피드백 제어 모드 운전중).  
 (a) 선속도 지령 10m/min 에서 100m/min으로 변화시  
 (b) TM3기준값 8kgf 에서 11kgf로 변경시.

Fig. 12. Tension feedback control response (using TM2 and TM3 as tension feedback sensors).  
 (a) Line speed reference is changed from 10m/min to 100m/min  
 (b) TM3 reference is changed from 8kgf to 11kgf.

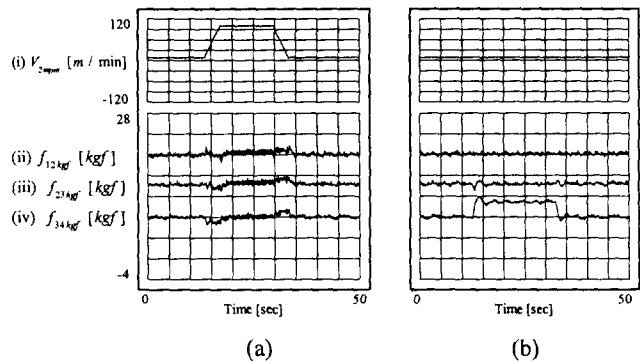


그림 13 제안된 연속 부하 분담 제어 응답 (2,3,4번 롤을 연속 부하 분담 제어 모드 운전중).  
 (a) 선속도 지령 10m/min 에서 100m/min으로 변화시  
 (b) TM3기준값 8kgf 에서 11kgf로 변경시.

Fig. 13. Control response of proposed continuous load balance algorithm. (Three rolls are controlled using proposed algorithm).  
 (a) Line speed reference is changed from 10m/min to 100m/min  
 (b) TM3 reference is changed from 8kgf to 11kgf.

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 11에서 나타났던 장력 편향현상이 없이 장력이 원하는 기준값으로 제어되는 것을 알 수 있다. 그림 13 (b)는 TM3 장력 기준값을 8kgf에서 11kgf로 스텝으로 변경시켰을 때의 제안된 제어 알고리즘의 응답 파형이다. 장력 기준값의 변경에 따라 부하 분담비를 바꾸어 제어한 결과 TM3 장력값이 기준값을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

## 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 실험 장치를 설계, 제작하였고, 디지털 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 구현 가능성 및 효용성을 확인하였다. 향후에는 시스템의 마찰 특성을 고려하여 적응적, 지능적으로 구동 롤간의 불균형을 억제하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

실험 장치의 제작과 실험에 많은 도움을 주신 (주)포스콘의 최창호 부장님과 박일영, 이정욱 대리님께 깊이 감사드립니다.

## 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. Wolfemann, 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.
- [6] J.K. Seok, D.W. Chung, S.H. Song, S.K. Sul, B.K. Kwon, G.W. Park, W.C. Shin, E.S. Cho, J.S. Lee, C.H. Choi, A New Approach to Advanced Cold Mill Drive Systems, IEEE Industry Application Society Annual Meeting, pp.2125~2130, 1997.
- [7] S.H. Jeon, J.M. Kim, K.C. Jung, S.K. Sul, and J.Y. Choi, Decoupling Control of Bridle Rolls for Steel Mill Drive System, IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 35, No.1, January/February, pp.119~125, 1999.
- [8] Seung-Ho Song and Seung-Ki Sul, A New Tension Controller for Continuous Strip Processing Line, IEEE Industry Application Society(IAS) Annual Meeting

Conf. Rec., pp.2225~2230, 1998.

- [9] Seung-Ho Song and Seung-Ki Sul, Design and control of multi-span tension simulator, IEEE Industry Application Society(IAS) Annual Meeting Conf. Rec., 1999 (to be published).

## 저 자 소 개



송 승 호 (宋丞鎬)

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 8월 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 1992년 8월 ~ 1995년 2월 포스콘 기술연구소 연구원.

Tel : (02) 880-7991

E-mail : ssh@eepel.snu.ac.kr



설 승 기 (薛承基)

1958년 3월 25일생. 1980년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1986년 ~ 1988년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 객원 연구원. 현재 서울대학교 공과대학 전

기공학부 부교수

Tel : (02) 880-7243

E-mail : sulsk@plaza.snu.ac.kr