

멀티-스팬 연속 공정 시스템의 실시간 장력 제어

신 기 현*

Real-Time Tension Control in a Multi-Span Continuous Process System

Kee-Hyun Shin*

ABSTRACT

A tension control strategy for a multi-span web transport system is proposed. This strategy is developed by using the tension transfer phenomena in multi-span systems. The performance of this control strategy is compared with that of an existing control strategy through a computer simulation. A real-time software is designed based on the proposed tension control strategy by using VxWorks real-time scheduler. The importance of tension transfer and the location of master speed drive in tension control is demonstrated.

Keywords : Real-Time, Web, Tension Control, Multi-Span

Nomenclature

- A:소재의 단면적
- L:Span의 길이
- T:초기 정상 상태로부터의 장력 변화량
- v:롤의 접선 속도
- V:초기 정상 상태로부터의 롤 속도 변화량
- E:Young's modulus

Subscript

- i:Stand No.

1. 서 론

얇은 철판, 플라스틱 필름, 종이, 천, 선(wire) 재료 등, 구부러지기 쉽고, 길이나 폭에 비하여 두께가 상대적으로 매우 작은, 선 종류를 포함한, 박판 재료를 웹이라 칭한다.⁽¹⁾ 웹 형태의 재료는 종종 가장 효율적으로 가공되거나(manufactured) 여러 가지 공정(processing)에 있어서 편리한 경우가 많다. 웹 재료를 취급하는 제조 시스템은 연속 공정 시스템(continuous processing system, CPS)이라 불린다. CPS에서는 웹 재료가 일련의 구동 롤러(driven roller)나 안내 롤러(idle roller)에 의하여 연속적으로 이송되는 동시에 여러 가지 공정이(예, 기계적 공정, 화학적 공정, 전기적 공정) 이루어진다. 전형적인 연속 공정 시스템은 Fig.

* 건국대학교 기계설계학과(정회원)

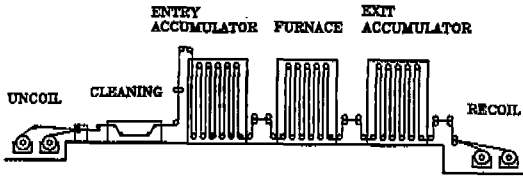


Fig. 1 연속 풀림 라인

1에 보이는 바와 같은 연속 풀림 라인(continuous annealing line)이다.

CPS의 각 공정 구간에서는 소재가 이웃하는 롤러 및 롤 사이에서 동시에 공정이 이루어진다. 때문에 여러 변수간 상호간섭(interaction)이 매우 심하여, 목적하는 사양에 대한 요구되는 장력의 크기 및 롤 속도가 정확히 제어되지 않거나, 정확한 시간(timing)에 TASK간 동기가 이루어지지 않으면, 소재가 파단(necking)되거나 제품의 품질 저하를 유발하여 커다란 경제적 손실을 입을 수도 있다.⁽⁷⁾

이와 같이 여러가지 요인들로 인한 제품의 품질 저하 및 경제적 손실을 최소화하기 위하여, 공정중인 소재의 장력, 롤 속도를 정확한 시간에 원하는 수준 및 정밀도로 유지되도록 감시하고 제어하는 것이 중요하다.

특히 다중 스펠 연속 공정 시스템(multi-span continuous process system, MSCPS)에서 요구되는 제어 문제는, 각 공정 구간에서 재료의 진행 방향(machine direction)에 따른 소재의 장력 유지와 동시에 시스템 전체의 안정화에 있다. 기존의 MSCPS에서의 장력 제어는 장력 전달 현상이 고려되지 않아 제어 시스템의 정적 및 동적 특성이 왜곡되는 경우가 많았다. 즉, up-stream(down-stream)에서 장력 제어를 위해 특정 스탠드(stand)에서의 롤러의 속도를 변경하면 연속적으로 down-stream(up-stream)에서의 롤러의 속도를 변화시켜 주었다(successive control).⁽⁸⁾ 이러한 연속 공정 시스템의 안정화 및 효과적인 제어를 위해서는 실시간 소프트웨어(real-time software)가 필요하다.

본 연구에서는 연속 공정 시스템에서 '장력 전달'이라는 물리적 현상⁽⁹⁾을 고려하여, MSCPS에서의 open-loop draw control을 통한 장력 제어 시에 필요한 장력 제어 전략을 제안하였다. 또한 연속 공정 라인에서의 장력 제어를 위한 실시간 소프트웨어를 설계하고, Force target board, VxWorks 실시간 스케줄러(scheduler)를 이용하여 실시간 시뮬레이션을 수행하

였다. 주기적 TASK간의 동기화는 watchDog timer와 semaphore를 이용하였다.⁽⁸⁾ 시뮬레이션을 통한 연구 결과, MSCPS에서의 장력 제어를 위해서는 장력 전달 현상 때문에 master speed drive(MSD)의 위치가 중요하다는 것이 판명되었다. 일반적으로 MSCPS의 up-stream에 MSD를 위치시키는 것이 down-stream 혹은 최종 스탠드에 위치시키는 것보다 장력 제어 시스템의 정적 및 동적 특성이 우수함을 보였다. 또한 MSD를 up-stream에 위치시키는 경우에, 장력 전달 현상이 있으므로 연속적으로 롤의 속도를 변경시키지 않는 것이 제어 시스템의 성능을 향상시킬 수 있었다. 시뮬레이션 대상 플랜트(plant)는 압연 공정시스템으로 하였다.

2. 실시간 소프트웨어 설계

연속 압연 공정 시스템의 장력 제어를 용이하게 하기 위하여 실시간 소프트웨어가 설계되었다.⁽⁴⁾ 네개의 스탠드를 가진 압연 공정 시스템에 대한 실시간 장력 제어 시스템 구성도가 Fig. 2에 있다.

소재와 롤 사이에는 미끄럼이 없는 점이 존재하는 것으로 가정하였다. 소재의 장력은 open-loop draw control을 이용(소재 양단에 있는 압연 롤의 접선 방향의 속도 차를 이용)하여 제어된다.

실시간 소프트웨어는 실시간 장력 제어 시스템을

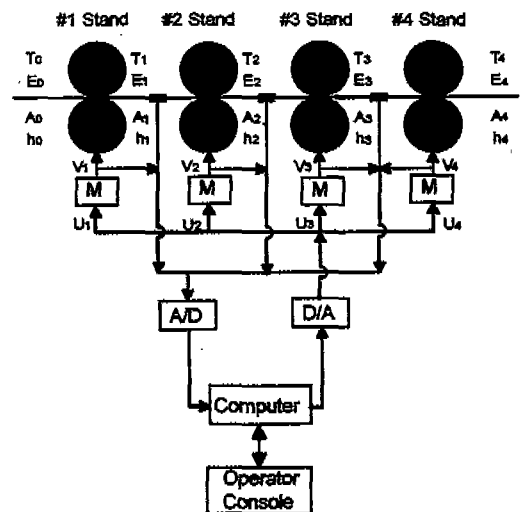


Fig. 2 MSCPS에서의 소재 장력 제어를 위한 실시간 시스템

VxWorks 실시간 스케줄러를 이용하여 시뮬레이션할 수 있도록 설계되었다. 수학적 모델을 이용하여 실제 시스템을 대신하였고,⁽²⁾ 시뮬레이션하여 얻은 값들로 계측한 값을 대신하였다.

실시간 소프트웨어를 위한 사양(Specifications) 및 조건(Requirements)

연속 압연 공정 시스템에 대한 수학적 모델은 샘플링 주기 (sampling period)에 따라 주기적 (periodically)으로 수행 (activate)되어야 한다. 수학적 모델과 제어 알고리즘 계산 태스크는 장력 제어를 원활히하기 위하여 시뮬레이션시에 동기되어야 한다 (synchronized).⁽³⁾ 하나의 태스크가 글로벌 데이터 (global data)를 사용하고 있는 동안에는 다른 태스크가 그 데이터를 사용하지 못하도록 그 데이터는 보호되어야 한다 (mutual exclusion). 주기적 태스크 (periodic tasks)의 주기 (period)는 일정하게 유지되어야 한다. 상태 변수의 값들은 주기적으로 파일 (file)에 저장 (data logging)되어야 한다.

Tasking 및 Task의 구조

실시간 소프트웨어의 사양 및 조건을 만족시키기 위하여 실시간 시스템의 태스크를 다음과 같이 분류하였다.

```

speedModel()
speedControl()
tensionModel()
dataLogger()
finish()
    
```

태스크의 우선 순위는 speedModel(), speedControl(), tensionModel() 순이다. speedModel(), tensionModel() 태스크들은 실제 연속 압연 공정의 시뮬레이션을 담당한다. 이 프로그램의 운용 (operation)은 Force target board에 down load된 start() 함수의 실행으로 시작되며, 이것은 실시간 함수의 초기화, 사용될 파일의 개방, 모든 태스크의 생성, mutual exclusion 및 동기화할 semaphore의 생성 (create), timer의 초기화, 사용자로부터 필요한 파라미터 값의 확보 및 시스템의 clock을 setting한다. 끝으로 watchDog timer가 Execution() 함수를 부름으로써 실시간 프로그램은 시작하게 된다. 실시간 시스템의 behavioral requirement는 Fig. 3과 같다.

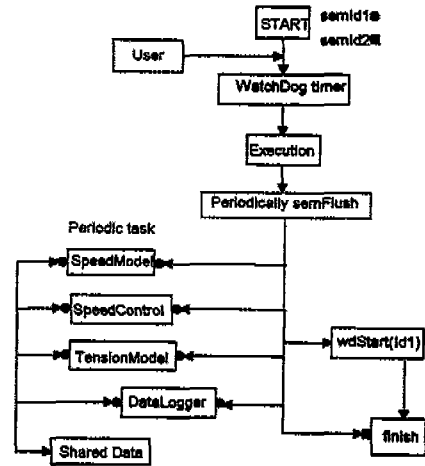


Fig. 3 Behavioral Requirement의 관계

주기적 Task를 위한 Time Scheduling

주기적 태스크의 타이밍을 보장하기 위하여, 시스템 clock 함수인 tickSet(), tickGet() 함수를 이용하여 태스크의 수행 시간을 측정하고(예 1), watchDog timer가 주기적으로 semaphore를 주어(예 2) block되어 있던 태스크들을 해제시켜 줌으로써 주기적 태스크 (periodic task)의 수행 (activation)을 예정된 일정한 주기에 맞출 수 있다.

예 1)

```
tickSet()
```

```
{Task execution}
```

```
tickGet()
```

예 2)

```
wdStart(wdId1, total_execution_time, Execution(), sid1)
```

장력 제어 시스템(i번째 section)

이 예제 (압연 공정 시스템)를 위하여 상태 되먹임 제어 기법을 이용하여 속도 제어를 시도하였고 장력 제어 시스템은 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 i번째 section에서의 speedModel 태스크는 control 태스크의 출력 (output) U_i 를 입력 (input)으로 사용하고, i 및 i-1번째 section

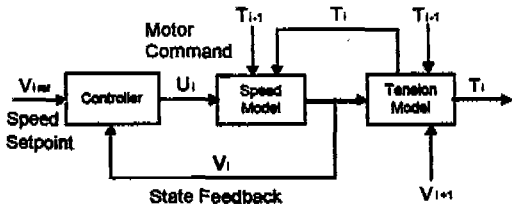


Fig. 4 상태 되먹임 장력제어 시스템

의 장력과 상호 작용이 있음을 알 수 있다. 또한 tensionModel 태스크는 speedModel 태스크의 출력 V_i 를 입력으로 사용하고, $i-1$ 번째 section의 장력과 $i+1$ 번째 section의 속도와의 상호작용이 있음을 알 수 있다.

이산화된 수학적 모델

장력 및 속도에 대한 수학적 모델은 샘플링 주기를 0.01초로 하여 이산화 되었다.^{(2), (4)}

장력 모델:

$$T_1(k+1) = 0.9704 T_1(k) + 48.2723 V_2(k) \quad (1)$$

$$T_2(k+1) = 0.0232 T_1(k) + 0.9608 T_2(k) - 47.1845 V_2(k) + 36.0247 V_3(k) \quad (2)$$

$$T_3(k+1) = 0.0003 T_1(k) + 0.0285 T_2(k) + 0.9418 T_3(k) - 0.7052 V_2(k) - 351360 V_3(k) + 23.7795 V_4(k) \quad (3)$$

속도 모델:

$$V_2(k+1) = 1.000 V_2(k) - 0.9810 T_1(k) + 0.9810 T_2(k) + 74.48 U_2(k) \quad (4)$$

$$V_3(k+1) = 1.000 V_3(k) - 0.9810 T_2(k) + 0.9810 T_3(k) + 74.48 U_3(k) \quad (5)$$

$$V_4(k+1) = 1.000 V_4(k) - 0.9810 T_3(k) + 74.48 U_4(k) \quad (6)$$

이산화된 상태 되먹임 제어

제어는 z-domain에서 원하는 폴(pole)이 모두 0.35에 위치하도록 다음과 같이 설계되었다.⁽⁶⁾

$$U_2(k) = -0.0083(V_{2ref} - V_2(k))$$

$$U_3(k) = -0.0083(V_{3ref} - V_3(k))$$

$$U_4(k) = -0.0083(V_{4ref} - V_4(k))$$

3. 멀티-스팬 시스템에서의 장력 제어 전략

Fig. 5에서는 세개의 스패를 가진 멀티-스팬 시스템

을 도시하였다. 기존의 많은 연속 공정 시스템에서는 MSD를 down-stream에 위치시키는 것(Fig. 5의 (B)의 경우)이 일반적이다. MSD가 Fig. 5의 (B)처럼 위치하였을 때 장력 T_3 를 제어하기 위해서는 속도 V_3 를 변화시켜야 하고, 이에 따라 속도 V_2, V_1 을 연속적으로 변화시키는 제어 방법이 일반적으로 사용되고 있다. 이러한 제어 전략을 successive control이라 한다. 압연 공정에서는 최종 section 및 스탠드 출측에서의 소재 두께 및 장력 제어가 매우 중요하기 때문에 MSD를 down-stream에 위치시킬 수도 있다. 그러나 두께 변화에 커다란 영향을 미치는 장력의 제어 측면에서 볼때는, Fig. 6에서도 볼 수 있듯이 up-stream의 장력이 down-stream으로 영향을 미치기 때문에(장력 전달) MSD의 위치를 down-stream에 위치시키므로써 소재의 장력을 제어하는 것은 바람직하지 못함을 알 수 있다.

MSD를 up-stream(Fig. 5의 (A)경우)에 위치시켰을 때 유사한 방법이 흔히 적용된다.

본 연구에서는 MSD의 위치에 따른 제어 효과와, 현장에서 흔히 사용되는 successive control의 문제점을 지적하고, 장력 전달이라는 물리적 현상을 이용하여 멀티-스팬 시스템에 대한 장력 제어 전략을 제안하고자 한다.

Successive control의 원리

Fig. 5에서 장력 $T_i(i=1, 2, 3)$ 에 대한 수학적 모델은 다음과 같다.⁽²⁾

$$\frac{d}{dt} [T_1(t)] = -\frac{v_{20}}{L} T_1(t) + \frac{v_{10}}{L} \frac{A_1 E_1}{A_0 E_0} T_0(t) + \frac{A_1 E_1}{L} [V_2(t) - V_1(t)] \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} [T_2(t)] = -\frac{v_{30}}{L_2} T_2(t) + \frac{v_{20}}{L_2} \frac{A_2 E_2}{A_1 E_1} T_1(t) + \frac{A_2 E_2}{L_2} [V_3(t) - V_2(t)] \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} [T_3(t)] = -\frac{v_{40}}{L_3} T_3(t) + \frac{v_{30}}{L_3} \frac{A_3 E_3}{A_2 E_2} T_2(t) + \frac{A_3 E_3}{L_3} [V_4(t) - V_3(t)] \quad (9)$$

식 (7), (8), (9)를 관찰하면, 소재의 장력 T_i 는 소재 양단에서의 소재 속도(롤러의 접선 속도) V_{i+1} 와 V_i 의 차이로 제어할 수 있음을 알 수 있다. 그전에 식

(7)과 (8)에서 V_2 를 변화시키면 장력 T_1 과 T_2 가 모두 변한다. Successive control의 원리는, Fig. 5에서 MSD가 (A)에 있을 때, T_1 을 제어하기 위하여 V_2 를 변화시키면, V_2 변화의 영향을 T_2 와 T_3 에 미치지 않도록 하기 위하여 V_3 및 V_4 를 필요한 만큼 조정하여 보상하여 준다는 아이디어에서 출발되었다. 그러나 V_2 에 변화가 있을 때 정상 상태에서 (7)식과 (8)식을 이용하여 T_2 를 구해보면 $T_2(\infty)$ 는 $T_2(0)$ 와 같음을 알 수 있다. 이는 V_2 의 변화에 따른 T_1 의 변화량이 T_2 로 전달되는 장력 전달 현상 때문이다.⁽¹⁾ 즉 successive control에서는 장력에 대한 모델 (7), (8), (9) 대신에 다음과 같은 모델을 사용하였음을 알 수 있다.

$$\frac{d}{dt}[T_1(t)] = -\frac{v_{20}}{L} T_1(t) + \frac{A_1 E_1}{L} [V_2(t) - V_1(t)] \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt}[T_2(t)] = -\frac{v_{30}}{L_2} T_2(t) + \frac{A_2 E_2}{L_2} [V_3(t) - V_2(t)] \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt}[T_3(t)] = -\frac{v_{40}}{L_3} T_3(t) + \frac{A_3 E_3}{L_3} [V_4(t) - V_3(t)] \quad (12)$$

식 (10)~(12)을 모델로 이용하였을 때에는 successive control은 매우 효과적임을 알 수 있다.

장력 전달을 이용한 멀티-스팬 장력 제어 전략

식 (7)~(9)와 같이 장력 전달 현상을 반영할 수 있는 장력 제어 모델을 이용하였을 때는, 한 스펠에서의 장력 T_i 는 소재 양단에서의 소재의 속도뿐만 아니라, upstream에서의 장력 T_{i-1} 에도 영향을 받음을 알 수 있다. 그러므로 예를들어 Fig. 5에서 MSD가 (A)에 있을때 T_1 을 제어하기 위하여 V_2 를 변화시키더라도, V_2 의 변화가 연속적으로 T_2 , T_3 에 미치는 영향을 보상하기 위하여 연속적으로 V_3 , V_4 를 변화시키지 않아도 T_2 , T_3 는 정상 상태에서 크게 변화하지 않는다. 오히려 연속적으로 V_3 , V_4 를 변화시켜주면 T_2 , T_3 에 대한 외란이 될 뿐이다.

즉 장력 전달 현상을 멀티-스팬 시스템의 장력제어에 이용하면 제어 방법이 더욱 간단하며, 성능도 좋아지게 된다.

MSD의 위치에 따른 제어 전략

Fig. 6에서 보는 바와 같이 소재와 롤 사이에 미끄러짐이 없는 경우 장력은 upstream(T_{i-1})에서 downstream(T_i)으로 전달된다. 그러므로 MSD를 down-

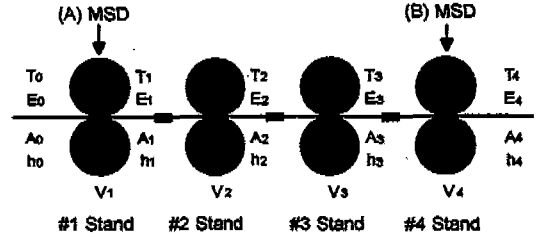


Fig. 5 멀티-스팬 시스템

stream 혹은 최종 스펠드에 위치시키면 (Fig. 5에서 (B)) 장력 전달 현상을 멀티-스팬 시스템의 장력 제어에 이용할 수가 없고 부득이 successive control방법을 이용하여 장력 제어를 위한 속도 변화를 upstream방향으로 보상하여 주어야 한다. 이는 위에 제시된 제어 전략에 비하여 제어 노력(control effort)이 추가로 필요하며 과도 성능도 저하시키기 쉽다.

결론적으로 멀티-스팬 시스템에서의 장력 제어에 필요한 단순하고도 효과적인 제어 전략은, MSD를 제어하려고 하는 소재 스펠드의 upstream에 위치시키고 장력 전달 현상을 이용하는 것이라 하겠다.

실시간 시뮬레이션

MSCPS에서의 장력 제어시 장력 전달 현상과 MSD의 위치에 따른 현상을 고려한 제어 시스템의 우수성을 입증하기 위하여 아래의 두 가지 경우에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

- (A) MSD가 MSCPS의 첫 번째 스펠드 (Fig. 5의 (A))에 있는 경우
- (B) MSD가 MSCPS의 최종 스펠드 (Fig. 5의 (B))에 있는 경우

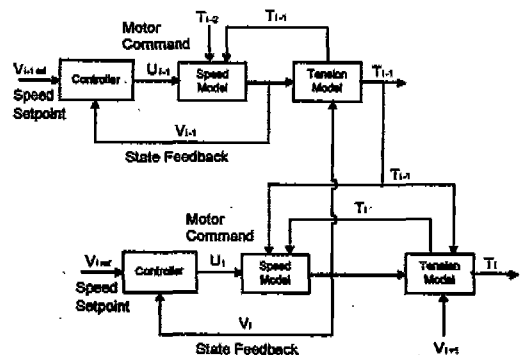


Fig. 6 멀티-스팬 장력 제어 시스템 (2 스펠)

위의 각 경우에 대하여 speed model에 장력의 상호 작용을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 비교 연구하였다. 시뮬레이션시 입축 및 출축 장력(Fig. 5에서 T_0, T_4)은 일정하다고 가정하였고, step 입력의 크기는 operating speed의 1%로 하였다. 또한 실시간 시스템은 Table 1에 주어진 파라미터 값을 이용한 시뮬레이션을 통하여 평가되었다.

(A) MSD의 위치가 첫 번째 스탠드에 있을 경우
(제어 목표: $T_1(\infty) = 48, T_2 = T_3 = 0(KN)$)

1. Speed model에서 장력의 상호 작용을 고려하지 않은 경우

입력 V_2 를 step으로 주었을 경우의 장력 변화는 Fig. 7에서와 같다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 T_1 을 제어하기 위해 V_2 를 증가시켰다. T_1 은 원하는 대로 제어되었으나 down-stream의 T_2, T_3 가 up-stream의 영향으로 operating value로부터 감소함을 알 수 있다. 이는 장력 전달 현상(tension transfer) 때문이다.⁽²⁾

입력 V_2, V_3, V_4 을 동기시켜 step으로 주었을 경우의 장력 변화는 Fig. 8과 같다(successive control).⁽⁵⁾ Fig. 8에서 볼 수 있듯이 T_1 을 제어하기 위해

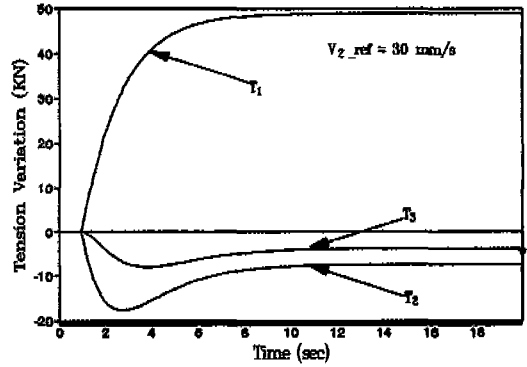


Fig. 7 속도 입력에 대한 장력 변화

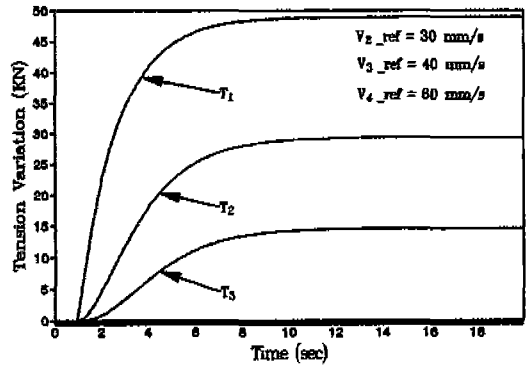


Fig. 8 동기화된 속도 입력에 대한 장력 변화

Table 1 예제 시스템 Simulation을 위한 Parameter값

Parameter		Value
E_0, E_1, E_2, E_3	소재의 young's modulus	2,450 N/mm ²
L_1, L_2, L_3	span length	1,000 mm
R_1, R_2, R_3, R_4	roll radius	150 mm
J_1, J_2, J_3, J_4	mass moment of inertia	237x10 ³ Kgmm ²
Bf_1, Bf_2, Bf_3, Bf_4	friction	0.2
C_1, C_2, C_3, C_4	motor torque/speed const	0.01
K_1, K_2, K_3, K_4	motor torque const.	12x10 ⁶
A_0	cross sectional area	3,000 mm ²
A_1	cross sectional area	2,500 mm ²
A_2	cross sectional area	2,000 mm ²
A_3	cross sectional area	1,500 mm ²
A_4	cross sectional area	1,000 mm ²
V_{10}	strip exit speed	2,400 mm/s
V_{20}	strip exit speed	3,000 mm/s
V_{30}	strip exit speed	4,000 mm/s
V_{40}	strip exit speed	6,000 mm/s
h_0	strip thickness	3.0 mm
h_{10}	strip thickness	2.5 mm
h_{20}	strip thickness	2.0 mm
h_{30}	strip thickness	1.5 mm
h_{40}	strip thickness	1.0 mm

각 스탠드(V_3, V_4)에 질량 보존 법칙에 따른 속도 변화를 입력으로 주었으나 입력을 V_2 한곳에 준 경우(Fig. 7)보다 operating value로부터의 원하지 않는 T_2, T_3 의 변화가 더 크게 나타났다.

2. Speed model에서 장력의 상호 작용을 고려한 경우
입력 V_2 를 step으로 주었을 경우의 장력 변화는 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 V_2 를 증가시켜 T_1 은 제어되었고, down-stream의 T_2, T_3 는 transient가 존재하며 정상 상태 오차는 작음을 알 수 있다.

입력 V_2, V_3, V_4 을 동기시켜 step으로 주었을 경우의 장력 변화는 Fig. 10과 같다(successive control). Fig. 10에서 볼 수 있듯이 T_1 은 약간의 오차는 있으나 원하는 정상 상태에 이르렀고, T_2, T_3 는 각각 원하지 않는 값으로 증가하였다.

이와 같이 MSD가 첫 번째 스탠드에 있는 경우에는

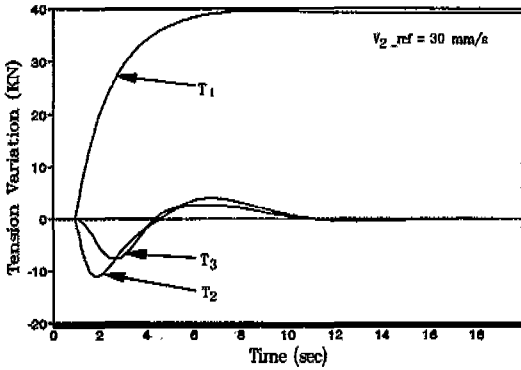


Fig. 9 속도 입력에 대한 장력 변화 (장력의 상호 작용을 고려한 경우)

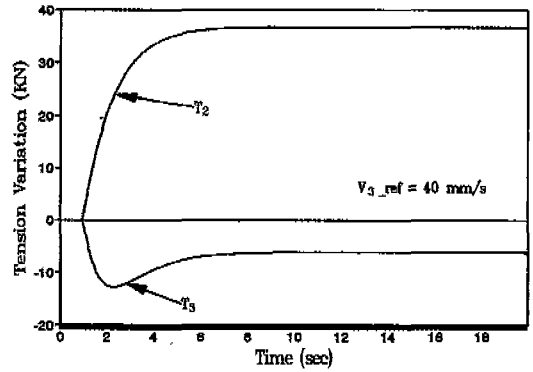


Fig. 11 속도 입력에 대한 장력 변화

각 스탠드에 질량 보존 법칙에 의거한 속도 보정치를 인가하는 것 (successive control)은 그렇지 않을 경우 (Fig. 9)에 비하여 제어 시스템의 성능을 오히려 저하시키는 것을 볼 수 있다. 이는 successive control에서 장력 전달 현상을 고려하지 못한 결과이다.

(B) MSD의 위치가 네 번째 스탠드에 있을 경우(제어 목표 $T_3(\infty) = -25, T_1 = T_2 = 0(KN)$)

1. Speed model에서 장력의 상호 작용을 고려하지 않은 경우

입력 V_3 을 step으로 주었을 경우의 장력 변화는 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 V_3 을 제어하여 T_3 를 제어하려 하였으나 up-stream에 장력 변화가 발생되었고, 다시 이 장력 변화가 T_3 에 영향을 주어 T_3 는 제어 목표대로 제어되지 않았음을 알 수 있다.

입력 V_1, V_2, V_3 을 동기 시켜 step으로 주었을 경우의 장력 변화는 Fig. 12와 같다. (successive control) Fig. 12에서 볼 수 있듯이 T_3 을 제어하기 위해 V_3 를 변화시킬 때 질량 보존 법칙에 의거한 보정치만큼 V_1, V_2 에 입력을 주었다. 이때 T_3 은 원하는 값에 이르렀다.

2. Speed model에서 장력의 상호 작용을 고려한 경우
입력 V_3 을 step으로 주었을 경우의 장력 변화는 Fig. 13과 같다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이 T_3 을 제어하기 위해 V_3 을 조절하였으나 up-stream의 장력 변화가 다시 down-stream에 영향을 주어 T_3 는 transient를 가지며, 정상 상태 오차가 존재함을 알 수 있다. (Fig. 12의 T_3 과 비교)

입력 V_1, V_2, V_3 을 동기시켜 step으로 주었을 경우 (successive control). Fig. 14에서 볼 수 있듯이 T_3

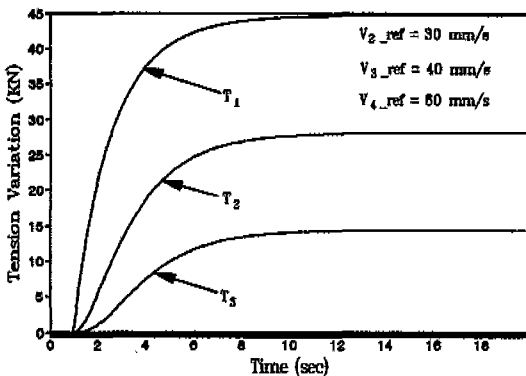


Fig. 10 동기화된 속도 입력에 대한 장력 변화 (장력의 상호 작용을 고려한 경우)

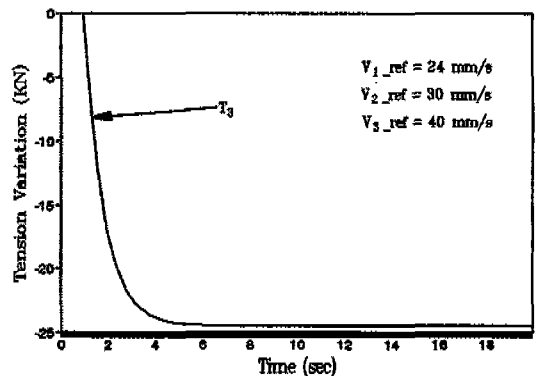


Fig. 12 동기화된 속도 입력에 대한 장력 변화

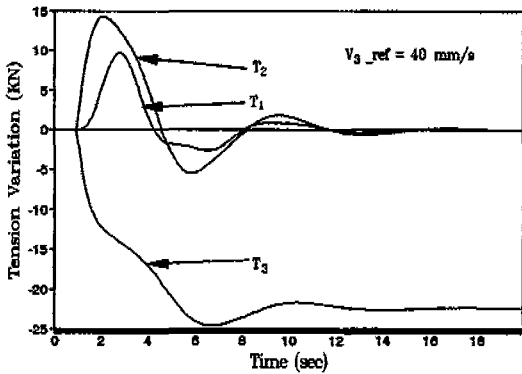


Fig. 13 속도 입력에 대한 장력 변화(장력의 상호 작용을 고려한 경우)

을 제어하기 위해 질량 보존 법칙에 의거한 양만큼 각 스텐드에 속도를 조절하였으나 T_1 , T_2 는 약간 감소함을 알 수 있었고, T_3 는 미소한 정상 상태 오차가 존재하였다. 이는 양호한 성능이나 입측 장력이 변화가 없다는 가정하에 제안된 값이다. 그러므로 MSD를 down-stream 혹은 마지막 스텐드에 두고 successive control technique을 사용할 때는 입측에서의 장력이 일정하도록 유지하여야 원하는 장력 제어가 가능함을 알 수 있다. 다음 예제에서 위의 가정이 없을 때의 경우에 대한 결과를 볼 수 있다.

T_1 이 일정치 않을 때, 즉 $V_1=0$ 이라고 가정하고 V_2 , V_3 를 step으로 주었을 경우의 장력 변화는 Fig. 15와 같다.

Fig. 15에서 볼 수 있듯이 입측 장력의 변화가 있을 경우에는 T_1 , T_2 의 변화가 Fig. 14에서 보다 더욱 현

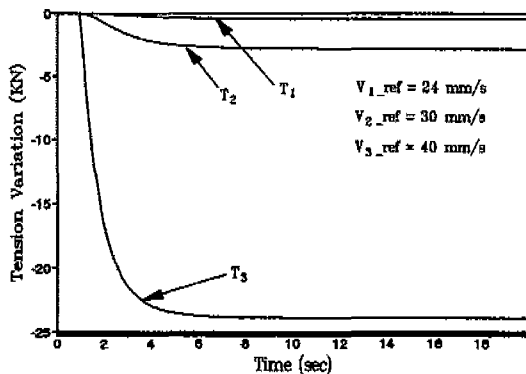


Fig. 14 동기화된 속도 입력에 대한 장력 변화 (장력 상호 작용을 고려한 경우)

저할 뿐 아니라 T_3 가 원하는 데로 제어되지 않았다.

이와 같이 MSD가 최종 스텐드에 있는 경우에는 각 스텐드에 질량 보존 법칙에 의거한 속도 보정치를 인가하여도 약간의 오차가 존재하며, 또한 입측 장력의 변화가 없다는 가정이 반드시 포함되어져야 한다. 그렇지 않을 경우에는 Fig. 15에서 알 수 있듯이 시스템의 성능이 저하됨을 알 수 있었다.

4. 결 론

1) 멀티-스핀 연속 공정 시스템에서의 장력 제어를 위하여 제안된 제어전략은 MSD를 up-stream에 위치시키고 장력 전달 현상을 이용하는 것이다.

2) 제안된 제어 전략은 구현하기에 간단하면서도, 제어 노력(control effort)을 줄이고, 시스템 성능을 향상시킨다.

3) MSD를 down-stream에 위치시키고 successive control technique을 이용하기 위해서는 입측 장력을 일정하게 유지시켜 주어야 한다.

4) 멀티-스핀 시스템의 장력 제어를 위한 실시간 소프트웨어가 설계되었다.

5) 향후, 두께 제어 모델 등의 압연 공정에 대한 모델 보완 및 실시간 제어 프로그램을 이용한 실험을 통한 연구가 계속되어야 하겠다.

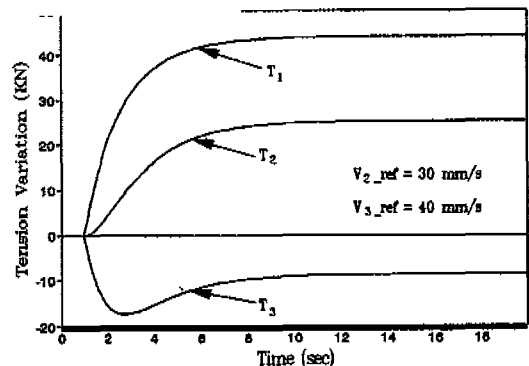


Fig. 15 T_1 이 일정치 않을 때, 속도 입력에 대한 장력 변화

참고문헌

1. Shin, K.H., Distributed Control of Tension in Multi-Span Web Transport Systems, Ph.D Thesis, Oklahoma State Univ., May, 1991.
2. 신기현, 홍완기. "압연공정에서의 판두께 제어", 한국자동제어학술회의 논문집, 1993, pp.1141-1146.
3. VxWorks programmer's guide, release 5.1, WIND RIVER SYSTEM, Feb., 1993.
4. 신기현 외 다수, "Real-time control of longitudinal tension in a continuous process system", 대한 기계 학회 추계학술대회 논문집, 1992, pp.513-517.
5. 자동제어 정비, 제철 전기 콘트롤 주식회사.
6. Katsuhiko Ogata, Modern Control Engineering, 2nd Edition, Prentice-Hall, 1990.
7. Rangunathan Rajkumar, Synchronization in real-time systems, Kluwer Academic Publishers.
8. K. P., Grenfell, "Tension Control on Paper-making and converting Machinery", Proc. IEEE Ninth Annual Conference on Electrical Engineering in the Pulp and Paper Industry, Boston, Mass. June 20-21, 1963.
9. D.L. King, "The Mathematical Model of a Newspaper Press", Newspaper Techniques, 3-7, Dec. 1969.
10. G. Brendenburg, "New Mathematical Models for web Tension and Register Error", Proc.1, 3rd Internation IFAC Conf. on Instrumentation and Automation in the Paper, Ruber and Plastic Industries, Brussels, May 24-26, 1976.
11. J.J. Shelton, "Dynamics of Web Tension Control for Winding Superconducting Coils", Proc. Southeastconf. Reg. 3 Conf., Roanke, Va, Apr.1-4, 1979.
12. W. Wolfermann and D. Schrober, "Application of Decoupling and State Control in Processing Machines with Continuous Moving Webs", Proc. International Federation of Automatic Control, Munhen, 1987.
13. L. Sha, R. Rajkumar, J. Lehoczky, K. Ramamritham, "Mode Change Protocols for Priority-Driven Preemptive Scheduling", The Journal of Real-Time System, 1, Kluwer Academic Pub., Netherlands, 1989.
14. B. Sprunt, L. Sha, J. Lehoczky, "Aperiodic Task Scheduling for Hard-Real-Time System", The Journal of Real-Time Systems, 1, Kluwer Academic Pub., Netherlands, 1989.
15. P. Puschner, C.H. Koza, "Calculating the Maximum Execution Time of Real-Time Program", The Journal of Real-Time System, Kluwer Academic Pub., Netherlands, 1989.