

# 멀티스팬 연속공정 시스템의 장력 특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Characteristics of Tension in a Multi-span Web Transport System

신기현 (건국대 기계설계학과), 권순오, 이명욱, 천성민 (건국대 대학원)

K. H. Shin (Kon-Kuk Univ.), S. O. Kwon, M. W. Lee, S. M. Cheon (Kon-Kuk Univ.)

### ABSTRACT

A mathematical model describing the relationship between longitudinal tension and tangential velocity of web/roller in a multi-span web transport system has been developed<sup>[3]</sup>. An experiment was carried out for typical conditions to validate the mathematical model for tension behavior in a multispan system. A two-span prototype web transport system with winder and unwinder was manufactured for the experiment. By comparing simulation and experimental results, the mathematical model for tension and velocity in a multi-span web transport system is confirmed to be valid for typical conditions. Tension transfer phenomenon was also confirmed through the simulation as well as experimentation.

Key Words : multi-span web transport system(다중 스펠 웹 이송 시스템), mathematical model(수학적 모델), longitudinal tension(인장력), tension transfer(장력 전달)

### 기호설명

- A : 소재의 단면적
- E : 소재의 탄성계수
- h : 소재의 두께
- J : 롤의 관성모멘트
- K : 모터 상수
- R : 롤 반경
- T : 소재 장력
- u : 제어 입력
- v : 웹 소재의 이송 속도
- $\epsilon$  : 변형률
- $\rho$  : 밀도
- $\tau$  : 시간

### 첨자

- i : 초기값
- n : 정수 (1, 2, ...)
- o : 정상상태 운전 상태값
- u : 풀림롤
- w : 감김롤

### 1. 서론

두께에 비해 길이가 매우 긴 소재인 웹(web)을 가공하는 연속공정 시스템(continuous process system)은 풀림롤(unwinder)과 감김롤(winder), 다수의 구동롤러(driven roller) 및 비구동롤러(idle roller)들로 구성된다. 공정에 따라 서로 다른 운전 장력이 요구되며,

특정 스펠에서의 장력변화는 인접 스펠의 장력을 변화시키기도 한다. 또한, 웹의 장력변화가 심할 경우 시스템 불안정의 원인이 되기도 하며, 재료의 파단 및 제품의 품질저하를 초래한다. 따라서, 연속공정 시스템에서 웹의 장력거동에 대한 정확한 이해는 시스템을 안정적으로 운전하는데 매우 중요하다.

웹의 장력에 대한 수학적 모델은 Campbell<sup>[1]</sup>에 의해 연구가 시작되었고, Wolferman과 Schroder<sup>[2]</sup>에 의해 멀티스팬 웹 이송 시스템(multi-span web transport system)에 대해 연구되었다. Shin<sup>[3]</sup>은 다중스팬 시스템에서 인접 스펠간의 장력의 상호작용이 고려된 수학적 모델을 제안하였다.

본 연구에서는 Shin이 제안한 다중 스펠 시스템의 장력 모델을 실험적으로 검증하기위해 풀림롤, 감김롤 그리고 구동롤러로 구성된 두 개의 스펠을 갖는 연속공정 시스템을 제작하였다. 제작된 실험 장치를 이용하여, 특정 소재 및 운전 조건에서 Shin의 모델이 실제 장력 변화 거동을 매우 근사하게 묘사함을 확인하였다. 또한, 상단 장력(upstream tension)의 변화가 하단 장력(downstream tension)에 미치는 영향 등의 장력거동을 분석하였다.

### 2. 수학적 모델

단일 스펠에 대한 장력과 속도모델을 유도하기 위하여, Fig. 1과 같이 인접한 두 개의 구동롤러에 의해 구분되는 검사체적에 대해 질량보존 법칙을 적용

하면 식 (1)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \int_{x_1}^{x_2} \rho_2(x, t) A_2(x, t) dx = \rho_1(t) A_1(t) v_1(t) - \rho_2(t) A_2(t) v_2(t) \quad (1)$$

미소체적에 대해  $dx = (1 + \epsilon_x) dx_u$ ,  $w = (1 + \epsilon_y) w_u$ ,  $h = (1 + \epsilon_z) h_u$   $dm = \rho_w h dx = \rho_u w_u h_u dx_u$ 의 관계가 성립하고, 재료를 완전 탄성적이라 가정하며, Hooke's의 법칙( $t_n = A_n E_n \epsilon_n$ )을 적용하여 일반화하면 식 (2)와 같은 장력에 관한 수학적 모델을 유도할 수 있다<sup>[3]</sup>.

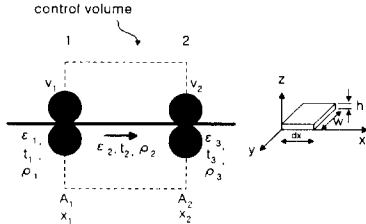


Fig. 1 One span web transport system

$$L_n \dot{t}_n = v_n (E_n A_n - t_n) - v_{n-1} (E_{n-1} A_{n-1} - t_{n-1}) \quad (2)$$

이중스팬 웹 이송시스템의 해석을 단순화하기 위해 비구동롤러의 동특성은 무시하고, Fig. 2와 같이 단순화된 이중스팬 웹 이송시스템(two span web transport system) 모델을 고려한다. 소재의 변형은 완전 탄성적이고 소재가 롤에 접촉한 부분에서는 미끄럼이 없다고 가정한다. 또한 소재 전 구간에서 폭 방향으로의 형상 및 두께 변화는 없다고 가정한다.

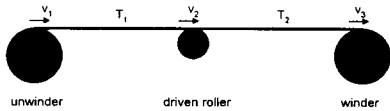


Fig. 2 Two span web transport system

Fig. 2의 이중스팬 웹 이송시스템에 대한 장력 및 속도 모델은 식 (3)~(7)과 같다.

$$J_1 \dot{v}_1 = R_u^2 (T_1 - T_u) - R_u K_u u_1 \quad (3)$$

$$J_2 \dot{v}_2 = R_2^2 (T_2 - T_1) + R_2 K_2 u_2 \quad (4)$$

$$J_w \dot{v}_3 = R_w^2 (T_w - T_2) + R_w K_w u_3 \quad (5)$$

$$L_1 \dot{T}_1 = v_2 (E_1 A_1 - T_1) - v_1 (E_1 A_1 - T_u) \quad (6)$$

$$L_2 \dot{T}_2 = v_3 (E_2 A_2 - T_2) - v_2 (E_2 A_2 - T_1) \quad (7)$$

폴립롤과 감김롤의 반경은 시간에 따라 각각 감소, 증가하며, 반경 변화와 소재의 속도와의 관계는 식 (8),(9)와 같이 표현될 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$R_u(\tau)^2 = R_{u0}^2 - \frac{h}{\pi} \int_{t_0}^{\tau} v_1(\tau) d\tau \quad (8)$$

$$R_w(\tau)^2 = R_{w0}^2 + \frac{h}{\pi} \int_{t_0}^{\tau} v_3(\tau) d\tau \quad (9)$$

따라서 폴립롤과 감김롤을 포함한 연속공정 시스템은 식(3)~(9)으로 표현되는 비선형 시변 시스템(non-linear time varying system)이다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치 구성

Fig. 2에서의 이중스팬 웹 이송 시스템에 대한 수학적 모델을 실험적으로 검증하기 위해 Fig. 3과 같은 감김롤과 폴립롤을 포함한 두 개의 스펠을 갖는 시스템을 구성하였다.

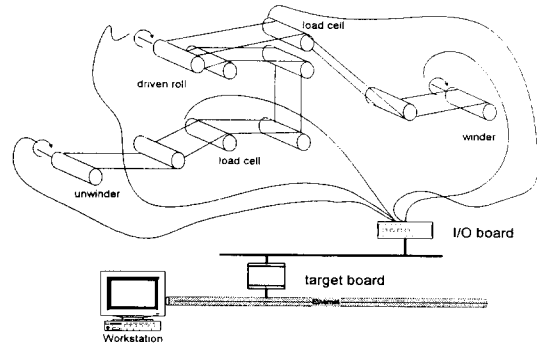


Fig. 3 Experimental equipment with two span web transport system

제작된 시스템은 소재의 이송을 위해 감김롤과 폴립롤, 구동롤을 가지며, 엔코더를 이용하여 소재의 이송속도를 측정한다. 양단에 로드셀(load cell)을 장착한 장력측정 롤러(pillow roller)를 이용하여 각 스펠에서의 소재 장력을 측정할 수 있다. 소재의 모터 구동과 속도 및 장력 측정을 위해 68030 CPU가 장착된 타겟 보드(target board)와 신호입출력 보드를 사용하였다.

시스템 운전을 위한 제어반의 사양 및 구성 부품들의 기능은 Table 1 및 2와 같다

Table 1. Specification of control system

developing Host	Sun SPARC workstation
target board	68030 cpu board
I/O board	VMEVMI 4514a I/O
motor	DC servo motor (300W)
control software	real-time scheduler VxWorks ver.5.1

Table 2. Components of the equipment

Components	Functions
winder/unwinder	소재가 감겨있는 코어(core) 고정 및 구동
driven roller	소재 구동
idle roller	소재 이송경로 및 스펠 길이 조정
pillow roller	이송속도 측정 및 장력 측정
gear box	모터 부하용량 증가 (1/10)
timing pully	모터와 감김롤(풀림롤, 구동롤)간 축 연결
load cell	장력 측정 센서

Table 4 Material properties

material	polyester
thickness	12 $\mu$ m
width	330 mm
span length	$L_1=2.985(m)$ $L_2= 2.897(m)$
Young's modulus	$3.9052 \times 10^8 \text{ kgf/m}^2$

3.2 실험 조건

실험에서 사용한 기준 속도 궤적은 Fig. 4와 같다. 웹은 시각  $\tau_1$ 까지 가속 구간을 거쳐 0.5m/s의 운전 속도로 유지되며, 장력( $T_1, T_2$ )은 일정한 운전 장력(약 1 또는 2kgf)로 유지시킨다. 시각  $\tau_2$ 에서 풀림롤의 선속도( $v_1$ )를 감소시켰을때 소재의 장력 변화를 관찰한다.

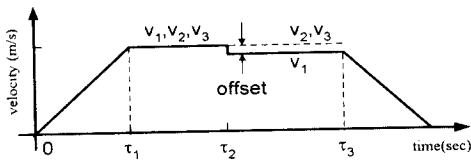


Fig. 4 Velocity profile

풀림롤과 감김롤 및 구동롤러로 구성된 이중스팬 웹 이송시스템의 장력 거동을 관찰하기 위한 실험 조건 및 소재의 물성치는 Table 3과 Table 4와 같다.

Table 3 Experimental conditions

operating velocity	0.5 m/s
operating tension	1 kgf or 2 kgf
unwinder diameter	0.07002 m*
winder diameter	0.0481 m*
velocity 변화량(offset)	0.0005 or 0.001 m/s

\* 실험 마다 변함.

세 개의 모터를 Fig. 4에서의 속도 궤적에 따라 구동하기위한 운용 프로그램은 Fig. 3과 같이 SUN SPARC 워크스테이션(workstation)상에서 실시간 스케줄러인 VxWorks를 개발환경으로 설계되었다. Table 5와 같이 태스크(task)들을 구분하였으며, 태스크마다 정의된 우선순위에 의해 Fig. 5에서와 같이 스케줄링 하였다.

Table 5 Tasks and functions

Task name	Functions
SetTime	system clock setting
Calibration	센서 calibration 수행
Calibration_end	calibration task 삭제
Run	모터 구동 및 센서신호 저장
Stop	모든 task를 삭제

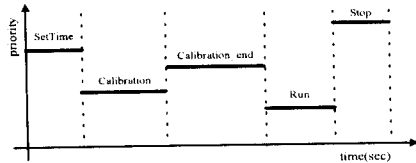


Fig. 5 Scheduling of task execution

4. 실험 결과

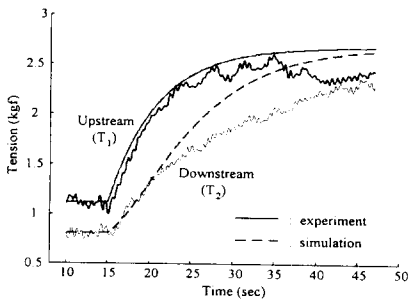
Fig. 6은 Fig. 2의 이중스팬 웹 이송시스템에서 풀림롤의 선속도( $v_1$ )를 시각 15초에서 정상상태 운전 속도로부터 0.0005m/s(운전속도의 0.1%) 감소시켰을 때의 장력 변화에 대한 시뮬레이션 및 실험결과를 나타낸다. Fig. 6(a)는 운전 장력이 각각  $T_1=1.1139\text{kgf}$ 와  $T_2=0.8063\text{kgf}$ 으로 1kgf부근일 경우의 결과를 나타내며, Fig. 6(b)는 운전 장력이 각각  $T_1=2.0845\text{kgf}$ 와  $T_2=1.88\text{kgf}$ 일 경우의 결과이다.

시스템의 시정수는  $L_1/v_1$ 이며, 5.97초이다. Fig. 6(a)의 경우, 상단 장력(upstream tension,  $T_1$ )은 과도구간에서 시뮬레이션 결과와 실험결과가 유사하다.

30초 이후에 실험 결과로부터 얻은 장력은 정상상태로 수렴해 감을 확인할 수 있으나 시뮬레이션 결

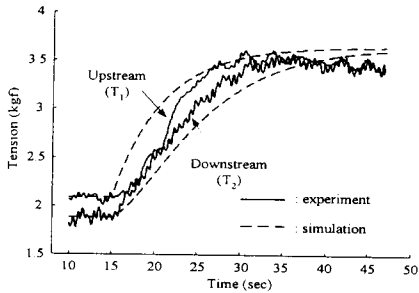
과와 차이를 나타내고 있다. 이는 Fig. 3에서와 같이 구동 모터와 연결된 롤러들 사이에 웹 경로 및 장력 측정을 위해 설치된 비구동롤러들의 베어링 마찰과 같은 비선형적 외란의 영향으로 추정된다.

Fig. 6에서와 같이 시뮬레이션 및 실험 결과로부터 상단 장력(upstream tension)의 변화에 따라 하단 장력(downstream tension)도 증가함을 알 수 있다. Fig. 4의 실험 조건에서와 같이 풀림롤의 선속도를 감소시켜 상단 장력이 증가되면, 하단 장력은 상단 장력의 변화에 의해 증가함을 나타낸다. 이는 상단 장력의 변화가 하단 장력에 전달됨을 의미한다. 식 (7)에서 하단 장력  $T_2$ 는 스펀 양단에서의 롤러의 선속도의 변화뿐 아니라 상단 장력  $T_1$ 의 영향을 받음을 알 수 있다. 이와 같이 상단 장력의 변화가 하단 장력으로 전달되는 현상을 장력 전달(tension transfer)라 한다.



operating tension  $T_1=1.1139\text{kgf}$ ,  $T_2=0.8063\text{kgf}$

(a)



operating tension  $T_1=2.0845\text{kgf}$ ,  $T_2=1.88\text{kgf}$

(b)

Fig. 6 Tension response in two span system for unwinder speed drop of  $-0.0005\text{ m/s}$

Fig. 6(b)에서는 시간 15초~20초 사이의 초기 과도 구간에서 상단 장력과 하단 장력이 거의 같은 값을 갖게 나타나는데, 이는 운전 장력이 Fig. 6(a)에 비해 거의 두 배로 높아짐에 따라 구동롤러와 웹 소재간

의 미끄러짐에 의해 상단 및 하단 장력이 동시에 증가한 것으로 추정된다.

측정된 장력신호는 약 1.6Hz로 진동하고 있다. 이러한 장력의 떨림은 편심된 롤러, 특히 풀림롤과 감김롤의 회전 주파수와 일치함을 확인할 수 있다. 본 실험에서 사용된 풀림롤과 감김롤은 롤과 코어(core)를 고정하기 위해 공압을 이용하므로, 편심되기 쉽다. 반경이 0.05m이고, 선속도가 0.5m/s인 경우 롤러의 회전 각속도는 10rad/s이고 주파수는 1.59Hz이다. 롤러가 회전 중심으로부터 한 방향으로 편심되어 있다면, 롤러의 선속도는 회전 주기와 동일한 주기로 변화될 것이며, 따라서, 소재의 장력도 진동하게 된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 Shin이 제안한바 있는 장력과 속도 모델을 실험적으로 검증하기 위해 이중 스펀을 갖는 웹 이송 시스템을 제작하고, 풀림롤의 선속도를 정상상태 운전 속도로 부터 감소시킬 때, 각 스펀에서의 장력의 변화를 관찰하였다. 특정 소재와 운전 조건에 대한 시뮬레이션과 실험 결과로부터 이상화된 장력 및 속도모델은 실제의 시스템을 적절히 묘사하고 있음을 확인할 수 있었다.

장력이 매우 낮거나, 운전 속도가 매우 빠른 경우에는 소재와 롤러의 미끄러움이 발생하기 쉽다. 따라서, 미끄러움이 발생하는 경우를 고려한 확장된 수학적 모델에 관한 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구의 일부는 한국과학재단의 지원으로 이루어졌습니다. (과제번호 : 951-1008-070-2)

## 참고문헌

- [1] Campbell, D.P., "Process Dynamics", John Wiley & Sons, Inc., 1958.
- [2] Wolfemann, W. and Schroder, D., "Application of Decoupling and State Space Control in Processing Machines with Continuous Moving Webs", Proc. International Federation of Automatic Control, Munhen, 1987.
- [3] Shin, K.H., "Distributed control of tension in multi-span web transport systems", Ph&D thesis, Oklahoma state univ., 1991.
- [4] 권순오, "다중 스펀 연속공정 시스템에서 가감속시의 장력제어에 관한 연구", 석사학위 논문. 건국대학교, 1996.