

## 생분해성 랩 와인딩 기계의 장력제어를 위한 모델링

박우철\*(전남대 대학원 기계공학과), 김해성(전남대 대학원 기계공학과), 김동일(전남대 대학원 기계공학과), 양성모(전북대 기계항공시스템학과), 기창두(전남대 기계시스템공학부)

### Modeling for Tension Control of the Bio-Wrap Winding Machine

W. C. Park(Mecha. Eng. Dept. CNU), H. S. Kim(Mecha. Eng. Dept., CNU), D. I. Kim(Mecha. Eng. Dept., CNU), S. M. Yang(Mecha. Dept., CBNU), C. D. Kee(Mecha. Eng. Dept., CNU)

#### ABSTRACT

This Paper describes the mathematical modeling and control of the tension and the speed of moving Bio-wrap in a wrap winding machine. In winding process, important control specifications include the regulation of wrap tension and velocity. In this research, a tension and velocity model has been developed for winding processes. A prototype winding system has been constructed, and the controller has been implemented in a real time PC-based environment. The tension control system is modeled a MIMO of the two-input and four-output system. The performance of the modeled system has been evaluated via simulation using MATLAB and experiments.

**Key Words :** Wrap(랩), Wrap-winding Machine(랩 와인딩 기계), Tension Control(장력 제어), Velocity Control(속도 제어)

#### 1. 서론

생분해성 랩(Bio-wrap)은 자체적으로 부식성을 가지고 있는 폐기물 처리가 용이한 친환경적인 비닐 제품으로 접착력과 인장강도 및 맴브레인 효과가 뛰어나 생분해성 랩에 대한 소비가 점차적으로 확대되고 있다. 생분해성 랩은 일반 랩에 비해 접착력 및 장력이 4 배정도 우수하며, 1/2 정도(8 micron)의 두께를 가지고 있다. 그러나 박막이기 때문에 제품의 불량률이 높고, 이를 위한 장력 제어가 상당히 까다롭다. 따라서, 이를 제어하기 위한 시스템의 수학적 모델링이 요구되고 있다.

랩을 가공하는 연속 공정시스템에서 랩은 풀럼(Upwinding roll)에서 감김률(Winding roll)로 이송되면서, 여러 개의 를을 통해 다양한 공정을 거치게 된다. 공정 작업 속도의 증가 추세에 따라 속도의 변화량은 더욱 커지게 되고, 랩의 이송속도의 변화량은 랩의 장력 변화를 발생시키게 된다.

이러한 장력변화는 랩의 주름(Wrinkle)과 변형(Deformation), 심할 경우 파단(Break)이 발생하게 되어 제품에 경제적 손실을 주게 된다. 이러한 손실을 최소화하기 위해서는 이송중의 재료의 장력 변

화를 감시하고 장력 변화를 안정화하는 것은 매우 중요하다.

웹(Web)의 장력제어와 이송시스템(Web transport system)에 대한 수학적 모델링에 관한 연구는 Granfel<sup>1</sup> 이후 Wickert<sup>2</sup>, Ebler<sup>3</sup>, Sakamoto<sup>4</sup> 등과 같은 이들에 의해 장력모델은 꾸준하게 연구되어 왔다. Granfel은 단일 웹 스팬의 이송방향으로의 동역학적 거동을 연구하기 위한 수학적인 모델을 개발하였고, King<sup>5</sup>과 Brandenburg<sup>6</sup>는 Granfel의 연구를 개선하여 장력전달(Tension transfer) 현상을 예측할 수 없는 문제점을 해결하고자 웹스팬의 입력측에서의 웹장력을 고려하였다. Brandenburg은 웹의 변형이 매우 작다고 가정하고, 변형도의 변화에 따른 웹의 변화와 레지스터 오차(Register error)의 장력에 대한 영향을 연구하였다.

본 논문에서는 랩 이송 시스템에서의 장력제어를 위한 이상화된 수학적 모델을 제안하고, 장력제어기 설계가 용이하도록 하였고, 감김률의 반경이 시간에 따라 변화됨에 따라, 를 반경 변화를 보상 할 수 있는 랩 와인딩기계의 장력 모델링을 완성하였다. 모델링의 검증은 공학용 해석용 프로그램(Matlab)을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션과 DSP를 이

용한 실험을 비교하여 수학적 모델을 검증하였다.

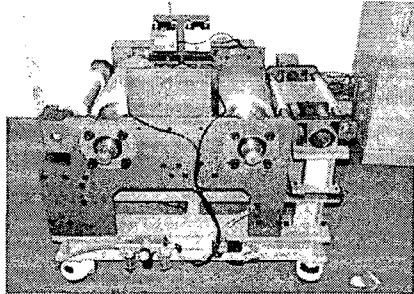


Fig. 1 Prototype of the Bio-wrap winding machine

## 2. 시스템의 정의 및 모델

일반적인 랩 이송기계는 풀럼롤(Unwind roll), 유도롤(Driven roll), 감김롤(Wind roll), 그리고 장력측정을 위한 로드셀(Load cell)로 구성된다. 그러나 실제 생산공정에서 사용되는 랩 와인딩 기계와는 달리 실험실 차원에서 연구가 가능하도록 Fig. 1 과 같이 2 개의 모터에 의해 롤과 유도롤을 구동하도록 와인딩기계의 프로토 타입을 설계 제작하여 독립된 모터에 의해 각각 구동 토크가 제어되도록 하였다

### 2.1 랩의 장력과 모터의 모델링

Fig.1 의 랩 와인딩 기계의 모터와 롤의 수학적 모델링을 위해 다음과 같은 가정을 한다.

- (1) 소재의 두께가 롤의 반경에 비해서 매우 얇고 일정하다.
- (2) 롤과 이송되는 랩은 미끄러짐(Slip) 현상은 없다.
- (3) 소재는 랩은 밀도나, 탄성계수의 변화는 없다.

Fig. 2 에서 모터의 동력을 전달하는 벨트의 무게가 영(zero)에 가깝고, 벨트의 전달효율은 100%이라고 하면, 에너지 보존의 법칙에 의해 다음의 관계를 유도할 수 있다.

$$\tau_a(t)\omega_a(t) = \tau_b(t)\omega_b(t) \quad (1)$$

$$\tau_b(t) = \tau_a(t) \frac{R_b}{R_a} \quad (2)$$

여기서  $\omega$ 와  $R$ 은 롤러의 각속도와 반경이고,  $\tau$ 은 토크를 나타낸다. 랩 와인딩 기계에 사용되는 모터는 전류에 비례적으로 토크를 발생하므로 전류에 의한 토크식을 유도할 수 있다.

$$\tau_a(t) = k_i \cdot i(t) \quad (3)$$

여기서  $k_i$  는 모터 토크 상수이고,  $i(t)$  는 모터의 전기자에 인가되는 전류이다. 모터의 모델을 간단히 하기 위해, 모터에 입력되는 전압  $u(t)$  은 모터

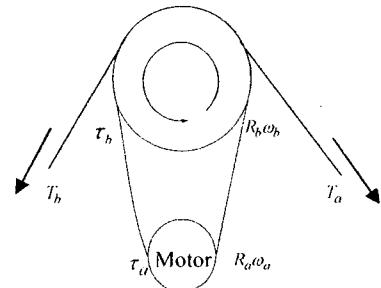


Fig. 2 The schematics of the roll and motor

의 전기자에 인가되는  $i(t)$  전류와 비례한다고 가정하면 모터의 전압모델은 아래와 같이 표현된다.

$$\tau_a(t) = \frac{k_i}{k} u(t) = k_i u(t) \quad (4)$$

상수  $k_{ia} = k_i (R_b / R_a)$  를 새로 정의하면 랩에 걸리는 장력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{T}(t) = \tau_b(t) - B\omega_b(t) + (T_b(t) - T_a(t))R_b \quad (5)$$

$$T(t) = J\omega_b \quad (6)$$

여기서  $J$  는 모터의 관성모멘트,  $T(t)$  는 장력,  $B$  는 접성마찰계수를 의미한다.

### 2.2 랩의 인장력과 속도의 관계

모터에 인가되는 입력전압을 조절한다는 것은 랩에 걸리는 장력과 속도를 제어한다는 것을 의미한다. 각롤에 뉴턴의 운동법칙을 Fig. 3 에 적용하면 아래와 같다.

$$J_1 \dot{\omega}_1(t) = k_{i1} u_1(t) - B_1 \omega_1(t) + T_1(t)R_1 \quad (7)$$

$$J_2 \dot{\omega}_2(t) = k_{i2} u_2(t) - B_2 \omega_2(t) - T_2(t)R_2 \quad (8)$$

$$I_{i1} \dot{\phi}_{i1} = (T_1(t) - T_2(t))R_1 \quad (9)$$

$$I_{i2} \dot{\phi}_{i2} = (T_2(t) - T_1(t))R_2 \quad (10)$$

여기서  $I_{i1}$  과  $I_{i2}$  는 로드셀이 장착된 아이들(Idle) 롤의 회전관성을 의미한다. 식 (7)을 회전속도에 대해서 정리하면 다음과 같다.

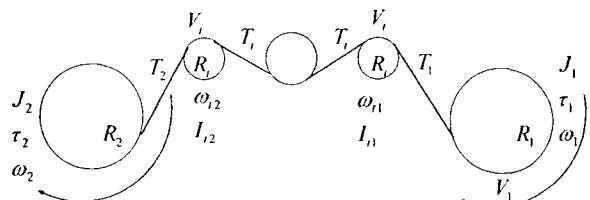


Fig. 3 Layout of the wrap winding machine

$$\dot{\omega}_1(t) = \frac{k_{11}u_1(t) - B_1\omega_1(t) + T_1(t)R_1}{J_1} \quad (11)$$

$$\dot{\omega}_2(t) = \frac{k_{12}u_2(t) - B_2\omega_2(t) - T_2(t)R_2}{J_2} \quad (12)$$

$$\dot{\omega}_{n1} = \frac{(T_1(t) - T_i(t))R_i}{J_n} \quad (13)$$

$$\dot{\omega}_{i2} = \frac{(T_2(t) - T_i(t))R_i}{J_{i2}} \quad (14)$$

Chen<sup>7</sup> 이 제안한 장력기법을 활용하면 장력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T(t) = KS(t) + D\dot{S}(t) \quad (15)$$

여기서  $K$ 는 랩의 스프링 상수이고,  $D$ 는 댐핑상수를 의미한다. 룰과 룰사이의 랩의 길이 변화  $S(t)$ 를 구하기 위해 인접한 두 룰 사이에서 랩의 미끄러짐(Slip)이 발생하지 않는다고 가정 하면, 랩의 길이 변화  $S(\zeta)$ 는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$S(\zeta) = \int_{\zeta_0}^{\zeta} r(\zeta)\omega(\zeta)d\zeta \quad (16)$$

식 (16)를 이용하여, 각 룰에 발생하는 길이의 변화는 다음과 같다.

$$S_1 = S_{10} + \int_{\zeta_0}^{\zeta} R_i\omega_{i1}(\zeta)d\zeta - \int_{\zeta_0}^{\zeta} R_i\omega_{i1}(\zeta)d\zeta \quad (17)$$

$$S_i = S_{10} + \int_{\zeta_0}^{\zeta} R_i\omega_{i1}(\zeta)d\zeta - \int_{\zeta_0}^{\zeta} R_i\omega_{i1}(\zeta)d\zeta \quad (18)$$

$$S_2 = S_{20} + \int_{\zeta_0}^{\zeta} R_2\omega_2(\zeta)d\zeta - \int_{\zeta_0}^{\zeta} R_2\omega_2(\zeta)d\zeta \quad (19)$$

랩에 걸리는 장력 변화율은 식 (17)~(18)을 식 (15)에 의해 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{T}_1(t) = K(R_i\omega_{i1}(t) - R_i\omega_{i1}(t)) + D(R_i\dot{\omega}_{i1}(t) - R_i\dot{\omega}_{i1}(t)) \quad (20)$$

$$\dot{T}_i(t) = K(R_i\omega_{i1}(t) - R_i\omega_{i1}(t)) + D(R_i\dot{\omega}_{i1}(t) - R_i\dot{\omega}_{i1}(t)) \quad (21)$$

$$\dot{T}_2(t) = K(R_2\omega_2(t) - R_2\omega_2(t)) + D(R_2\dot{\omega}_2(t) - R_2\dot{\omega}_2(t)) \quad (22)$$

식 (20)~(21)에 회전속도에 앞에서 정의된 식 (11)~(12)에 의해  $\dot{T}(t)$ 는 다음과 같이 정리한다.

$$\dot{T}_1(t) = \left( \frac{DR_iB_1}{J_1} - KR_1 \right) \omega_1(t) + KR_i\omega_{i1}(t) \quad (23)$$

$$- \left( \frac{DR_i^2}{J_n} + \frac{DR_i}{J_1} \right) T_i(t) + \frac{DR_i^2}{J_n} T_i(t) - \frac{DR_i k_{11}}{J_1} u_1(t)$$

$$\dot{T}_i(t) = -KR_i\omega_{i1}(t) + KR_i\omega_{i2}(t) + \left( \frac{DR_i^2}{J_n} - \frac{DR_i^2}{J_{i2}} \right) T_i(t) \quad (24)$$

$$+ \frac{DR_i^2}{J_{i2}} T_2(t) - \frac{DR_i^2}{J_n} T_i(t)$$

$$T_i(t) = \left( KR_2 - \frac{DB_2R_2}{J_2} \right) \omega_2(t) - KR_i\omega_{i2}(t) + \frac{DR_i^2}{J_{i2}} T_i(t) \quad (25)$$

$$- \left( \frac{DR_i^2}{J_2} + \frac{DR_i^2}{J_{i2}} \right) T_2(t) + \frac{DR_i k_{12}}{J_2} u_2(t)$$

### 2.3 풀럼롤과 감김롤의 반경변화 모델링

풀럼롤과 감김롤은 랩의 이송됨에 따라 반경변화 및 관성모멘트가 변화하게 된다.<sup>8</sup>

실제의 풀럼롤과 감김롤은 Fig. 4(a)와 같이 중심축을 중심으로 나선형으로 감겨 있다. 랩이 두께가 반경에 비해 매우 얇고 일정하다고 가정하면, 나선형으로 감겨 있는 룰은 Fig. 4(b)와 같이 공동 중심을 갖는 원통 형상의 합으로 볼 수 있다.

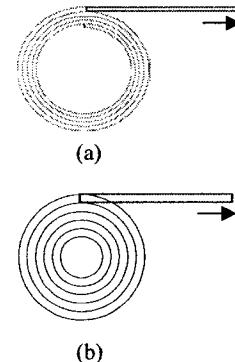


Fig. 4 Winding and Unwinding roll Structure :  
(a) Real roll structure, (b) Idealized roll structure

실제 룰의 질량변화는 질량의 보존 법칙에 따라 아래와 같이 유도된다.

$$\Delta M = \rho h w \int_{\zeta_0}^{\zeta} v(t) dt \quad (26)$$

여기서  $\rho$ ,  $h$ ,  $w$ 는 랩의 밀도, 두께, 폭을 나타내며  $v(t)$ 는 랩의 이송속도를 의미한다. 반경변화에 따른 이상화된 룰의 질량변화는 다음과 같다.

$$\Delta M = \rho w \pi (R^2 - R_0^2) \quad (27)$$

위의 두 식을 이용하면 풀럼롤과 감김롤의 룰의 반경 변화 모델링 수식을 유도해 낼 수 있다.

$$R(t)^2 = R_0^2 \pm \frac{h}{\pi} \int_{\zeta_0}^{\zeta} v(t) dt \quad (28)$$

여기서 ? 는 감김률, ? 는 풀럼률을 의미한다.

## 2.4 랩 와인딩기계의 상태 방정식

위의 유도된 운동방정식을 제어하기 용이한 형태로 변화시키기 위해서 상태변수  $X$ 를 정의한다.

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7]^T = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_{i1} \ \omega_{i2} \ T_1 \ T_i \ T_2]^T$$

$$\dot{x}_1 = -\frac{B_1}{J_1}x_1 + \frac{R_1}{J_1}x_5 + \frac{k_{11}}{J_1}u_1 \quad (29)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{B_2}{J_2}x_1 - \frac{R_2}{J_2}x_7 + \frac{k_{12}}{J_2}u_2 \quad (30)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{R_t}{I_{t1}}x_5 + \frac{R_t}{I_{t1}}x_6 \quad (31)$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{R_t}{I_{t2}}x_6 + \frac{R_t}{I_{t2}}x_7 \quad (32)$$

$$\dot{x}_5 = \left( \frac{DR_1B_1}{J_1} - KR_1 \right)x_1 + KR_1x_3$$

$$- \left( \frac{DR_1^2}{I_{t1}} + \frac{DR_1}{J_1} \right)x_5 + \frac{DR_1^2}{I_{t1}}x_6 - \frac{DR_1k_{11}}{J_1}u_1 \quad (33)$$

$$\dot{x}_6 = -KR_1x_3 + KR_1x_4$$

$$+ \left( \frac{DR_1^2}{I_{t1}} - \frac{DR_1^2}{I_{t2}} \right)x_5 - \frac{DR_1^2}{I_{t1}}x_6 + \frac{DR_1^2}{I_{t2}}x_7 \quad (34)$$

$$\dot{x}_7 = \left( KR_2 - \frac{DB_2R_2}{J_2} \right)x_2 - KR_1x_4 + \frac{DR_1^2}{I_{t2}}x_5$$

$$- \left( \frac{DR_2^2}{J_2} + \frac{DR_1^2}{I_{t2}} \right)x_7 + \frac{DR_2k_{12}}{J_2}u_2 \quad (35)$$

상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (36)$$

$$Y = CX$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{B_1}{J_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{R_1}{J_1} & 0 & 0 \\ -\frac{B_2}{J_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_2}{J_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_t}{I_{t1}} & \frac{R_t}{I_{t1}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_t}{I_{t2}} & \frac{R_t}{I_{t2}} \\ \left( \frac{DR_1B_1}{J_1} - KR_1 \right) & 0 & KR_1 & 0 & -\left( \frac{DR_1^2}{I_{t1}} + \frac{DR_1}{J_1} \right) & \frac{DR_1^2}{I_{t1}} & 0 \\ 0 & 0 & -KR_1 & KR_1 & \left( \frac{DR_1^2}{I_{t1}} + \frac{DR_1}{J_1} \right) & -\frac{DR_1^2}{I_{t1}} & \frac{DR_1^2}{I_{t2}} \\ 0 & \left( KR_2 - \frac{DB_2R_2}{J_2} \right) & 0 & -KR_1 & \frac{DR_1^2}{I_{t2}} & 0 & -\left( \frac{DR_2^2}{J_2} + \frac{DR_1^2}{I_{t2}} \right) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{k_{11}}{J_1} & 0 \\ 0 & \frac{k_{12}}{J_2} \\ 0 & 0 \\ -\frac{DR_1k_{11}}{J_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{DR_2k_{12}}{J_2} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_t \end{bmatrix}$$

## 3. 시뮬레이션 및 실험

식 (36)으로 표현되는 시스템에 대한 시뮬레이션 결과와 측정된 실험 결과를 비교하여 수학적 모델링의 적합성을 고찰하고자 한다. 실험에 사용된 모터의 드라이브는 Unidrive(Control Techniques)를 이용하였고, 실시간 제어를 위한 DSP 보드는 RG-DSPIO(Realgain, TMS320C32)을 이용하였다. 시뮬레이션과 실험에 이용된 공학용 툴은 Matlab7.0 과 CemTool 5.0 (Realgain)을 이용하였다.

시뮬레이션은 Matlab 의 Simulink 를 사용하였고, 이때의 사용되는 상태방정식들은 식 (36)을 사용하였다.

모터 드라이브에 인가되는 입력 신호에 대한 기준 궤적은 다음의 Fig. 5 와 같이 0.67sec 간의 가속 구간을 거쳐, 200m/min 의 속도를 갖도록 하였다. 이때 모터 드라이브에 인가되는 전압은 2.13V 기준 입력 신호를 갖게 된다.

출력신호는 모터에 장착된 엔코더 값과 로드셀 값으로 DSP 에서 샘플링 된다. 측정값은 DSP 에서 동기 샘플링 되도록 하였으며 샘플링 값들은 다시 Matlab 을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

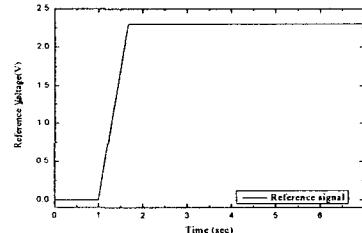


Fig. 5 The reference input signal

## 4. 결과 및 검토

Fig. 5 에 나타낸 기준 입력 신호를 와인딩 기계에 인가하였을 때의 컴퓨터 시뮬레이션과 측정된 실험 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. Fig. 6(a)에서 나타냈듯이 풀럼률과 감김률에서의 속도에 대한 시뮬레이션 결과는 두 둘에서 속도 차를 가지며 정상상태에 이르고 있었으나, 실험값은 작은 속도 자연을 가지고 있었다. 이는 모델링 과정에서 랩의 탄성계수는 항상 일정하다고 가정하였지만, 생분해성 랩은 비선형적인 스프링상수를 가지기 때문에 작은 속도차가 발생하는 것으로 사료된다. 그러나 정상상태에 수렴하는 시간은 잘 일치함을 볼 수 있었다

Fig. 6(b)는 장력에 대한 결과 비교를 나타내었다. 시뮬레이션 결과와 측정된 장력은 거의 동일한 거동을 보여주었지만, 모터에 전류가 인가되는 시점에서 서로의 관성에 의해 장력이 발생하고 있음을

보여주고 있다. 정상상태에 이르면 서로의 값들은 영(zero)으로 수렴해가는 것을 확인할 수 있다. 이 때 발생되는 시뮬레이션과 실험값의 차이는 생분해성 랩이 점탄성적인 거동을 하기 때문이 것으로 추정된다. 또한, Fig. 6(b) 장력 부호가 반대인 것은 식(22)에서 토크를 계산하기 위해 시계방향을 (+)에 두고 계산되어 반대로 표현되어있지만, 실제로는 같은 값을 갖는다.

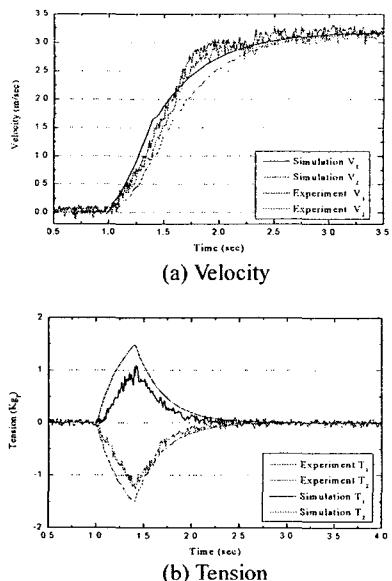


Fig. 6 The Comparison between simulation and experiment

## 5. 결 론

본 연구에서는 생분해성 랩이 풀럼롤과 감김롤을 통과하는 공정시스템에서 속도에 의해 장력이 조절되는 수학적인 모델링 기법을 제안하였고, 이를 시뮬레이션과 실험 결과를 비교하였다.

실험결과에서 알 수 있듯이 모델링을 하기 위해 가정하였던 생분해성 랩의 탄성계수 고정은 속도에 대해서 시뮬레이션 결과보다 작은 속도차를 갖는다는 것을 확인하였고, 이러한 점탄성적 거동은 시뮬레이션 결과보다 더 낮은 장력을 갖게 됨을 확인하였다. 임출력 관계만 고려할 경우, 제안된 수학적 모델의 유효성을 확인하였다. 또한, 속도와 장력의 수학적인 관계를 이용하면, 장력 제어 시스템을 구축할 수 있을 것으로 예상된다.

구동되는 롤에서의 속도변화는 다음 롤에서 속도 및 장력의 변화를 야기하기 때문에 장력을 원하는 값으로 유지하기 위해서는 하나의 구동롤의 속도제어만으로 제어가 될 수 없으므로 효과적인 실시간 제어를 위해서는 다중변수 제어기의 설계가 필요하

다.

향후 논문에서는, 랩 와인딩 기계의 감김롤 및 풀럼롤을 포함하는 다중변수 제어기에 관한 연구와 실시간 제어에 관한 연구를 진행할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 한국산업기술재단 지역혁신 인력양성 사업의 연구지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. K.P.Granfell, *Tension Control on Paper-Marking and Converting Machinery?* Proc. IEEE Ninth Annual Conference on Electrical Engineering in the Pulp and Paper Industry, Boston, Mass. June pp.20-21, 1963
2. J.Wickert, C.D.Mote Jr., *Recent research on the vibration and stability of axially-moving materials?* Shock Vibr. Dig. Vol.20, No.5, pp.3-13, 1988
3. N.A.Ebler, R.Arnason, G.Michaelis, N.D.Jaeger, *Tension control: dancer rolls on load cells?* IEEE Trans.IND. Appl. Vol.29, No.4, pp.727-739, 1993
4. T.Sakamoto, Y.Fujino, *Modeling and analysis of a web tension control system?* Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp.358-362, 1995
5. D.L.King, *The mathematical model of a newspaper press?* Newspaper Techniques, Dec, pp.3-7, 1969
6. G.Brandenburg, *New mathematical models for web tension and register error?* Proc. 13rd International IFAC Conf. on Instrumentation and Automation in the Paper, Rubber and Plastics Industries, Brussels, May pp.24-26, 1976
7. C.L.Chen, K.M.Chang, C.M.Chang, *Modeling and Control of a web-fed Machine?* Applied Mathematical Modeling Vol.28, pp.863-876, 2004.
8. K.H.Shin, *Distributed Control of tension in Multi-Span Web Transport Systems?* Ph.D. Thesis, Oklahoma state Univ., May, 1991.