

## 다중 변수 분산 제어기법을 이용한 생분해성 랩 와인딩 기계의 제어기 설계

김해성\*(전남대 대학원 기계공학과), 박우철(전남대 기계공학과), 신윤덕(전남대 기계공학과),  
양성모(전북대 기계항공시스템공학부), 기창두(전남대 기계시스템공학부)

### The Design of the Controller for Bio-wrap Winding Machine using Multi-variable Decentralized Control Technique

H. S. Kim\*(Mecha. Eng. Dept., CNU), W. C. Park(Mecha. Eng. Dept., CNU), Y. D. Shen(Mecha. Eng. Dept.,  
CNU), S. M. Yang(Mecha. Eng. Dept., CBNU), C. D. Kee(Mecha. Eng. Dept., CNU)

#### ABSTRACT

In this paper, the control strategy of the tension and speed based a prototype bio-wrap winding machine is developed. The decentralized control strategy using PID control algorithm applied for each subsystem is proposed to control the each system's desired outputs, because the tension of each subsystem effects that of next roll system. The computer simulations and the experiment results are presented to show that the proposed control scheme is feasible for a prototype bio-wrap winding machine.

**Key Words** : Wrap(랩), Wrap Winding Machine(랩 와인딩 기계), PID controller(비례 적분 미분 제어기),  
Multivariable Decentralized control(다중변수 분산 제어)

#### 1. 서론

랩은 식품의 생명인 신선한 맛과 향을 자연 그대로 보존하기 위해 널리 사용되고 있다. 생분해성 랩은 자체적으로 분해되는 성질을 갖고 있어 폐기물 처리가 매우 용이한 친환경적인 비닐제품으로서 그 두께는 기존 제품의 1/2 정도(8  $\mu\text{m}$ )이나 접착력 및 인장력이 우수하여 식품 포장용, 일회용 종이용기, 의료용 장갑 등 여러 분야에 널리 보급될 전망이다.

현재 국산화된 생분해성 랩 제조기는 원료추출 후부터 특수 표면 처리된 6 개의 회전 롤러에 의해 순차적으로 가공되어 최종 단계의 롤러에 의해 감겨져 제품이 상품화되고 있다. 하지만, 6 개의 회전 롤러는 AC 백터 전동기에 의해 각각 구동되면서 동기 제어로 연속된 공간간 속도 제어로 운전하나 각 롤러의 속도가 주위 환경 및 생산 속도에 따라 제어가 어려워 제품의 품질을 떨어뜨리고 있다. 다시 말해, 연속적인 구동 롤러들 사이에 있는 생분해성 박막 랩의 속도와 장력을 기준 입력 값으로

유지하는 것이 중요하다. 충분하지 못한 장력이 걸린 채 이송하는 랩은 적절하게 감겨지지 않으며, 랩에 공기가 주입되거나, 접힘(winkle)을 발생시킨다. 반면에 지나치게 높은 장력에서는 랩이 늘어지게 되며 심할 경우에 랩이 끊어질 수도 있다.

본 연구에서 생분해성 랩 와인딩 기기는 풀림롤(unwinding roll), 비구동롤(driven roll), 로드셀(load cell), 감김롤(winding roll), 접압롤(contact roll)로 구성되어 있으며, 장력 제어 시스템의 수학적 모델은 J. Wickert<sup>1</sup>, N.A. Ebler<sup>2</sup>, T. Sakamoto<sup>3</sup>에서 이미 개발되었다. 여기에서 장력 제어 시스템은 다중입력과 다중출력의 구조를 가지면서, 이웃하는 시스템 사이의 장력을 통해 상관관계를 가지는 여러 개의 하위 시스템으로 구성되어 있다. 또한, T. Bastogne<sup>4</sup>는 와인딩 기기에서 다중변수 장력 제어를 위한 선형 속도-토크 제어 구성에 기반을 둔 제어기를 제안하였다.

본 논문은 시스템 파라미터, 구조적인 불확실성 등에 강인하게 반응하는 생분해성 랩 와인딩 시스템에 대하여 통합된 속도 장력 제어기를 제시할 것

이다. 먼저 생분해성 랩 와인딩 기기에 대한 수학적 모델을 제시하고, 랩의 속도와 장력 제어를 위한 다중 변수 PID 제어기에 의한 시뮬레이션과 통합 속도 장력 제어를 적용한 실험 결과를 나타내었다. 마지막으로, 분산 제어 알고리즘을 시스템에 적용하여 시뮬레이션하였다.

## 2. 수학적 모델링

본 연구에서 고려되는 프로토타입 랩 와인딩 기기에 대한 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다.

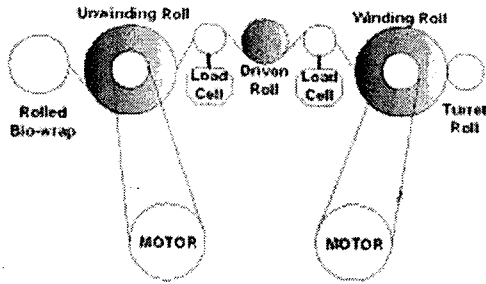


Fig. 1 Layout of the bio-wrap winding machine

### 2.1 모터와 랩의 장력에 관한 모델링

Fig. 2와 같이 벨트의 두께가 매우 얇다고 가정하면, 롤러 각각에 걸리는 벨트의 질량을 0이라고 할 수 있고 벨트의 전달 효율을 100%라고 할 수 있다. C. Chen<sup>5</sup>의 웹 공급 기기에 대한 수학적 모델링 접근 방법을 적용하여 프로토타입 랩 와인딩 기기에 대한 수학적 모델링을 유도하면 모터의 전압 모델은 다음과 같다.

$$\tau_b = k_{Ia}u(t) \quad (1)$$

여기서  $k_{Ia}$ 는 상수이다.

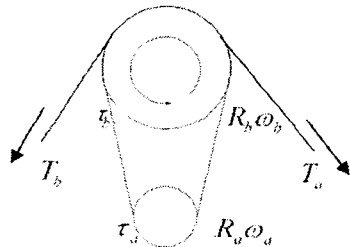


Fig. 2 Diagram of the Roller and the Motor

롤러에 걸리는 토크  $\tau_b(t)$ 와 랩의 장력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$J\dot{\omega}_b = k_{Ia}u(t) - B\omega_b(t) + (T_b(t) - T_a(t))R_b \quad (2)$$

여기서  $J$ 는 모터의 관성모멘트,  $T$ 는 랩에 걸리는 장력,  $B$ 는 점성마찰계수를 의미한다.

### 2.2 랩의 속도와 장력에 관한 모델링

모터에 인가되는 입력전압을 조절한다는 것은 랩에 걸리는 속도로부터 장력을 제어한다는 것을 의미한다. 뉴턴의 운동법칙에 의해 Fig. 3의 수식을 유도하고 회전속도에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\omega}_1(t) = \frac{k_{I1}u_1(t) - B_1\omega_1(t) + T_1(t)R_1}{J_1} \quad (3)$$

$$\dot{\omega}_2(t) = \frac{k_{I2}u_2(t) - B_2\omega_2(t) - T_2(t)R_2}{J_2} \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_{11}(t) = \frac{(T_1(t) - T_1(t))R_1}{I_{11}} \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_{12}(t) = \frac{(T_2(t) - T_1(t))R_1}{I_{12}} \quad (6)$$

여기서  $I_{11}$ ,  $I_{12}$ 는 로드셀이 장착된 비구동롤의 회전관성을 의미한다.

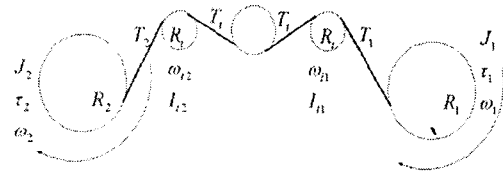


Fig. 3 The schematic of the wrap winding machine

두 롤 사이에서 랩의 미끄러짐이 발생하지 않는다고 가정하면, 각 롤에 발생하는 랩의 길이 변화는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$s_1 = s_{10} + \int_{t_0}^t R_1\omega_1(\zeta)d\zeta - \int_{t_0}^t R_1\omega_2(\zeta)d\zeta \quad (7)$$

$$s_2 = s_{20} + \int_{t_0}^t R_2\omega_2(\zeta)d\zeta - \int_{t_0}^t R_2\omega_1(\zeta)d\zeta \quad (8)$$

$$s_2 = s_{20} + \int_{t_0}^t R_2\omega_2(\zeta)d\zeta - \int_{t_0}^t R_1\omega_1(\zeta)d\zeta \quad (9)$$

랩에 걸리는 장력은  $T(t) = KS(t) + DS'(t)$ 와 같이 표현된다. 랩에 걸리는 장력의 변화율은 이 식을 미분하고, (3)-(6)을 대입하여 얻을 수 있다.  $K$ 는 랩의 스프링 상수이고,  $D$ 는 랩의 감쇠 상수를 의미한다.

$$\dot{T}_1(t) = \left( \frac{DR_1B_1}{J_1} - KR_1 \right) \omega_1(t) + KR_1\omega_{11}(t) - \left( \frac{DR_1^2}{I_{11}} + \frac{DR_1}{J_1} \right) T_1(t) + \frac{DR_1^2}{I_{11}} T_2(t) - \frac{DR_1k_{I1}}{J_1} u_1(t) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{T}_1(t) = & -KR_1\omega_{11}(t) + KR_1\omega_{12}(t) \\ & + \left( \frac{DR_1^2}{I_{11}} - \frac{DR_1^2}{I_{12}} \right) T_1(t) + \frac{DR_1^2}{I_{12}} T_2(t) - \frac{DR_1^2}{I_{11}} T_1(t) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{T}_2(t) = & \left( KR_2 - \frac{DB_2R_2}{J_2} \right) \omega_2(t) - KR_1\omega_{12}(t) \\ & + \frac{DR_1^2}{I_{12}} T_1(t) - \left( \frac{DR_2^2}{J_2} + \frac{DR_1^2}{I_{12}} \right) T_2(t) + \frac{DR_2k_{12}}{J_2} u_2(t) \end{aligned} \quad (12)$$

(3)-(6)과 (10)-(12)식을 상태방정식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu \\ Y &= CX \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} X &= [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7]^T \\ &= [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_{11} \ \omega_{12} \ T_1 \ T_1 \ T_2]^T \\ Y &= [R_1x_1 \ R_1x_2 \ R_1x_3 \ R_2x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7]^T \\ &= [v_1 \ v_{11} \ v_{12} \ v_2 \ T_1 \ T_2 \ T_3]^T \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{B_1}{J_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{B_1}{J_1} & 0 & 0 \\ -\frac{B_2}{J_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_2}{J_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_1}{I_{11}} & \frac{R_1}{I_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_1}{I_{12}} & \frac{R_1}{I_{11}} & 0 \\ \left( \frac{DR_1^2}{J_1} - KR_1 \right) & 0 & KR_1 & 0 & -\left( \frac{DR_1^2}{I_{11}} + \frac{DR_1^2}{J_1} \right) & \frac{DR_1^2}{I_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & -KR_1 & KR_1 & \left( \frac{DR_1^2}{I_{11}} + \frac{DR_1^2}{I_{12}} \right) & -\frac{DR_1^2}{I_{12}} & \frac{DR_1^2}{I_{11}} \\ 0 & \left( KR_2 - \frac{DB_2R_2}{J_2} \right) & 0 & -KR_1 & \frac{DR_2^2}{I_{12}} & 0 & -\left( \frac{DR_2^2}{J_2} + \frac{DR_1^2}{I_{12}} \right) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{k_{11}}{J_1} & 0 \\ 0 & \frac{k_{12}}{J_2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{DR_1k_{11}}{J_1} \\ 0 & \frac{DR_1k_{12}}{J_2} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_2 \end{bmatrix}$$

### 2.3 시뮬레이션 및 실험

앞에서 얻어진 상태방정식을 이용하여 속도와 장력에 관하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행한 다음, 실험 결과와 비교하여 모델링 식과 플랜트와의 적합성을 알아보았다. 먼저, 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험에 사용할 기준 속도 궤적은 Fig. 4 와 같다. 이는 일반적인 랩 생산속도인 200m/min 에 기준하여 모터 드라이브 입력 전압 2.13V 로 설정하였다.

실험은 Realgain 사의 RG-DSPIO 를 사용하였으며, 공학 해석용 프로그램인 CEMTOOL 과 SIMTOOL 을 사용하였다. 상태방정식의 파라미터 값은 다음과 같다.

$$B_1 = B_2 = 9.9 \times 10^{-2} \text{ Ns/m}$$

$$\begin{aligned} J_1 = J_2 = I_{11} = I_{12} &= 4 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2 \\ R_1 = R_2 &= 0.1 \text{ m}, \quad R_r = 0.0185 \text{ m} \\ D &= 0.3 \text{ Ns/m}, \quad K = 450 \text{ N/m} \\ k_{11} = k_{12} &= 0.318 \text{ Nm/V} \end{aligned}$$

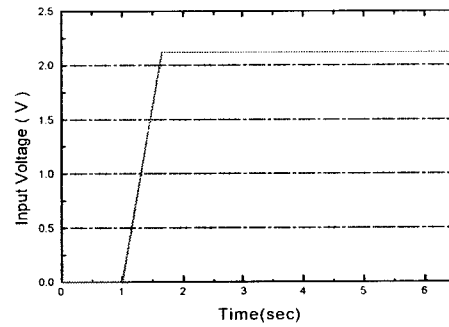
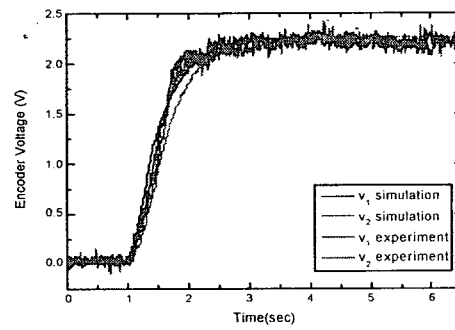
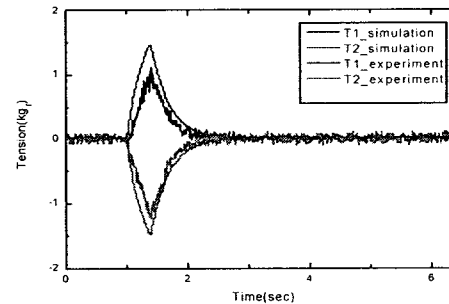


Fig. 4 Reference input signal



(a) Velocity



(b) Tension

Fig. 5 The result of simulations and experiments about velocity and tension

Fig. 5(a), (b)에서 얻어진 결과로부터 랩 와인딩 기기에 대한 속도와 장력에 관한 모델링 식의 적합성을 확인할 수 있었으며, 속도와 장력에 관한 모델링 결과와 실험값의 오차는 각 롤러간의 속도 차이가 발생하여 랩에 연신을 일으키기 때문이다. 다시 말하면, 랩의 인장으로 인하여 스프링 상수(K)가 비선형적으로 증가되는 것이 원인으로 추정된다.

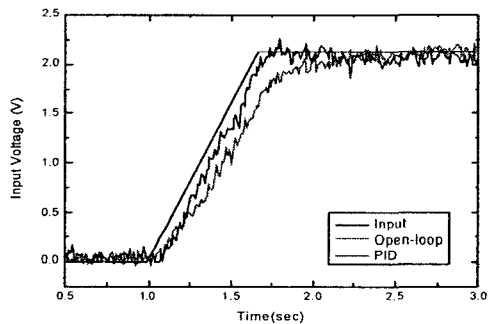
### 3. 랩 와인딩 기기의 제어기 설계

#### 3.1 다중 변수 PID 제어

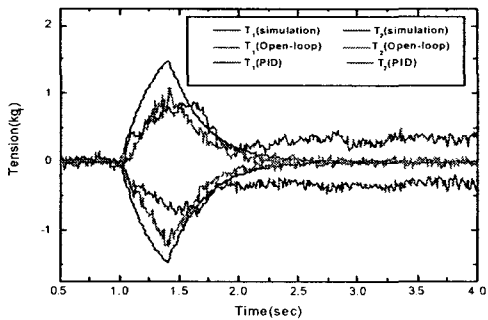
Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 개방형(Open-loop) 시스템에서는 초기 장력이 크게 진동하게 된다. 이는 랩의 연신과 주름이 발생되어 결과적으로 랩의 품질을 상당히 저하시키는 주요인으로 작용한다.

초기 장력의 진동 특성을 개선하고, 기준 입력 속도가 시스템에 강건하게 작용하기 위해서 본 논문에서는 다중 변수 PID 제어기를 설계하였다.

본 연구에서는 산업용 제어시스템에 자주 사용되는 PID 제어기를 적용하여, 모터 엔코더로부터 들어오는 출력 전압을 RG-DSPIO 로 연산 처리하여 다시 입력으로 되먹임 하였다. 속도에 관한 기준 입력 신호와 개방형 응답과 PID 제어기를 사용하였을 때의 응답을 실험을 통하여 측정하였다. 각각의 게인 값은  $P=2, I=1, D=0.1$ 로 하였다.



(a) Reference input voltage



(b) Tension

Fig. 6 Experiments of open-loop and PID

Fig. 6(a)의 결과로부터 알 수 있는 것처럼 기준 입력 전압에 대해서 개방형 시스템보다 PID 제어기의 시스템 성능이 훨씬 양호하게 추종하였음을 알 수 있다.

Fig. 6(b)의 결과로부터 개방형 시스템과 PID 제어기의 성능은 모두 컴퓨터 시뮬레이션의 결과보다

양호하게 나왔지만, 장력의 초기 진동 특성에 대하여 PID 제어기가 장력의 최고값과 정상상태의 차이가 작은 값을 갖기 때문에 제어 성능이 더욱 우수하다는 것을 확인하였다. PID 제어기의 경우,  $\tau_1$  과  $\tau_2$  의 정상상태 값의 부호가 반대인 것은 토크가 걸리는 방향이 서로 반대이기 때문이다. 이러한 결과로부터 PID 제어기의 도입은 랩 와인딩 기기의 속도와 장력에 관한 제어 성능을 더욱 향상시킬 수 있다.

#### 3.2 다중 변수 분산 제어

실제의 랩 와인딩 공정은 여러 개의 구동 롤러와 아이들 롤러로 이루어져 있으며, 작업 공정은 연속적으로 이루어지기 때문에 각각의 롤러에 걸리는 장력과 속도를 제어하기가 어렵다. 하지만, 분산 제어 기법을 적용하여 하나의 전체 시스템을 여러 개의 부시스템으로 나누어 제어하면 각각의 시스템을 제어하고 해석하는데 필요한 계산시간을 줄일 수 있고, 제어 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

연속 공정 시스템의 장력 제어를 위해 분산 제어 기법을 적용하기 위해서 Fig. 7(a)와 같이 시스템 1의 출력인 장력을 동일한 시스템의 입력으로 하여 시스템 2의 장력 거동을 PID 제어를 사용하여 시뮬레이션 하였다.

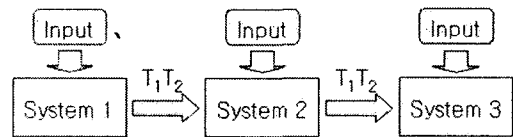


Fig. 7(a) Blockdiagram of decentralized control

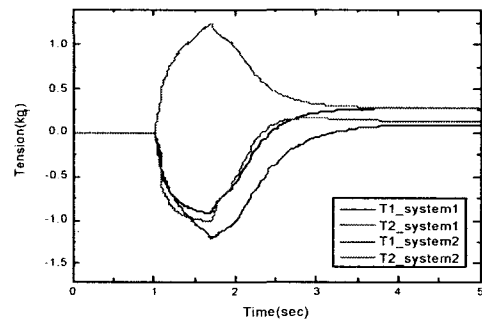


Fig. 7(b) Simulation of the decentralized PID control

Fig. 7(b)의 결과로부터 시스템 2의 장력변화가 시스템 1의 장력변화보다 크고, 위상이 반대이며, 수렴시간도 약간 길어짐을 알 수 있다. 이는 시스템 1의 장력이 시스템 2의 장력에 영향을 주기 때문이다. 장력 전달 현상의 영향은 시스템 2의 첫 번째 롤러에서 더욱 크게 나타난다. 시스템 2에서

는 장력이 전달에 의한 영향이 외란으로서 작용한다. 하지만 이는 시스템 1의 장력으로부터 예측 가능하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 생분해성 랩이 여러 개의 물러를 통과하는 연속 공정 시스템에 적용될 수 있는 속도와 장력에 관한 다중변수 제어기법을 제시하였다.

이를 위해 먼저 시스템에 대한 모델링 식을 제시하고 시뮬레이션과 실험을 통해 플랜트와 모델과의 적합성을 검증하였다.

검증된 모델로부터 속도와 장력의 제어를 위해 다중 변수 PID 제어를 제시하고, PID 제어의 적용 가능성을 실험을 통하여 검증하였다. 제시된 PID 제어기는 속도를 기준 입력 신호에 대하여 강인하게 추종하였으며, 장력의 진동 현상을 개선시켰다.

마지막으로 여러 개의 물러를 갖는 연속 공정 시스템에 적용 가능한 다중변수 분산 제어기법을 시뮬레이션을 하여 전체 시스템의 속도와 장력 제어 성능을 개선할 수 있음을 확인하였다.

생분해성 랩은 온도와 습도에 대하여 재료 특성이 비선형적으로 거동한다. 따라서, 랩의 온도와 습도에 관한 데이터베이스를 구축하여 각각의 경우에 대하여 강건하게 시스템이 제어될 수 있도록 하는 연구의 필요성이 요구된다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

1. J. Wickert, C.D. Mote Jr., "Current Research on the Vibration and Stability of Axially-moving Materials", Shock Vibr. Dig. Vol. 20 (5), pp.3-13, 1998.
2. N.A. Ebler, R. Arnason, G.Michaelis, N.D'Sa, "Tension Control: Dancer Rolls or Load Cells, IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 29 (4), pp.727-739, 1993.
3. T. Sakamoto, Y. Fujino, "Modelling and Analysis of a Web Tension Control System", Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp.358-362, 1995.
4. T. Bastogne, N. Noura, P. Sibille, A. Richard, "Multivariable Identification of a Winding Process by Subspace Methods of Tension Control", Control Eng.

Practice 6, pp.1077-1088, 1998

5. 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.
6. K. H. Shin, "Distributed Control of Tension in Multi-Span Web Transport Systems," Ph.D. Thesis, Oklahoma state Univ., May, 1991.