

# 고속인쇄기 Unwinder 구간의 텐서를 이용한 장력제어기 설계에 관한 연구

## Study on The Design of Tension Controller by using The Dancer in Unwinder Section of Converting Machine

\*성창엽<sup>1</sup>, 강현규<sup>2</sup>, #신기현<sup>3</sup>, 권순오<sup>4</sup>, 최재호<sup>5</sup>

\*C. Y. Seong<sup>1</sup>, H. K. Kang<sup>2</sup>, #K. H. Shin(khshin@konkuk.ac.kr)<sup>3</sup>, S. H. Kwon<sup>4</sup>, J. H. Choi<sup>5</sup>

<sup>1,2</sup> 건국대 대학원 기계설계학과, <sup>3</sup> 건국대학교 기계항공공학부, <sup>4</sup> (주)성안기계, <sup>5</sup> 건국대 대학원 기계설계학과

Key words : Tension control, Dancer system, Gravure printing, Roll to Roll

### 1. 서론

고속 인쇄를 목적으로 하는 그라비아 프린팅 시스템(gravure printing system)은 대단위 롤투롤(roll to roll)공정의 대표적인 시스템이다. 아래의 Fig. 1 과 같은 그라비아 프린팅 시스템(continuous process system)은 각 공정 구간에서 소재의 진행 방향에 따른 적절한 장력유지와 시스템 전체의 안정화가 중요한 제어 목표가 된다. 각 공정 구간에서 소재 이송에 영향을 미치는 장력은 구동롤의 회전 속도와 이전 스펠(span)에서의 장력변화에 의해 좌우 되며, 이는 구동롤의 회전 속도를 제어함으로 적절한 운전장력을 유지한다. 특히, 소재가 풀리면서 다음 구간으로 이송되는 풀림롤(unwinder roll)구간에서의 장력 제어는 일반적으로 댄서(dancer)시스템을 이용하여 장력의란을 감쇠시키는데, 댄서를 이용한 장력제어와 관련된 연구는 Shin[2]의 장력모델을 바탕으로 패시브 댄서(passive dancer) 모델을 제안 하였고, Pagilla[3]는 넓은 주파수 범위의 장력의란 제어를 위한 액티브 댄서(active dancer)를 제안하였으며, Ramamurthy[4]는 패시브 댄서와 액티브 댄서의 비교 연구를 수행하였으나 액추에이터(actuator)의 동특성에 의해 제어성능이 중속되는 한계를 갖는다.

현재 미국과 유럽지역에서는 500mpm(m/min)이상의 고속 인쇄 기술을 보유하고 있으나, 현재 국내에서는 300mpm 이하의 인쇄기술에 머무르고 있는 실정이다. 따라서, 고속인쇄기술의 선진화, 국산화 및 생산성 향상을 위한 연구가 필요하며, 이에 500mpm의 고속인쇄 시 적절한 장력제어와 시스템의 안정화에 대한 연구가 진행되어야 하겠다.

본 연구에서는 개발된 댄서 시스템의 수학적 모델을 이용하여 300mpm 이상의 고속인쇄 시 풀림롤 구간에서의 댄서롤을 중심으로 전·후 스펠의 장력의란에 대한 장력변화 시뮬레이션(simulation) 및 실험을 통한 장력제어 성능을 평가하였다.

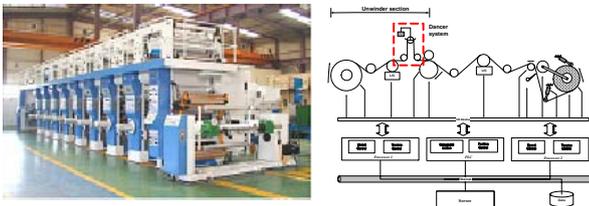


Fig. 1 그라비아 프린팅 시스템(gravure printing system)

### 2. 시스템의 정의 및 모델

본 연구를 위해 선택된 그라비아 프린팅 시스템에 대한 모델은 Fig. 1 과 같으며, 풀림롤 구간에서는 댄서 시스템의 댄서 암(arm)의 각도(degree)변화를 피드백(feedback)하여 풀림롤의 속도를 제어한다. 또한 풀림롤에서 소재가 풀리면서 반경이 줄어들게 되는데, 이를 고려하여 풀림롤의 속도를 제어한다. Fig. 2 는 풀림롤 구간에서 장력의란에 대한 댄서의 위치변화를 나타내고 있으며, Fig. 3 은

풀림롤 구간에서 댄서 시스템이 적용된 장력제어 방법에 대한 블록선도(block diagram)를 나타내고 있다.

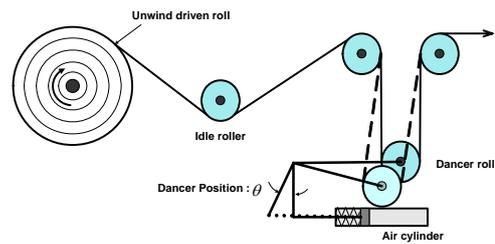


Fig. 2 Schematic of unwinder section

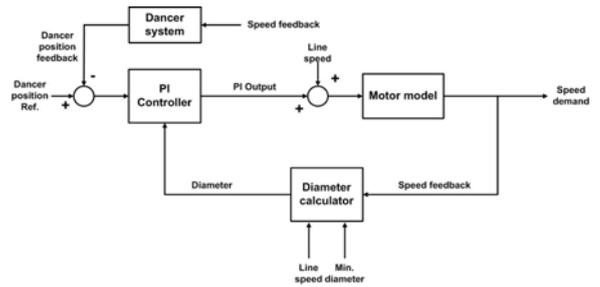


Fig. 3 Tension control block of unwinder section

### 2.1 수학적 모델

Fig. 4 의 그림과 같이 댄서롤을 중심으로 전·후 스펠(span)에 시간에 대한 수학적 장력모델은 식(1), (2)와 같다.

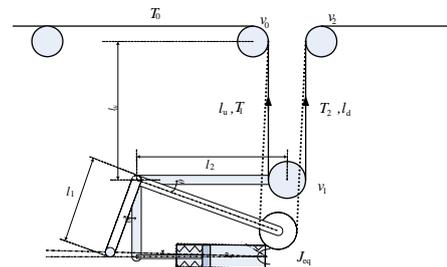


Fig. 4 Schematic of dancer system

$$l_1 \ddot{\theta}_1(t) = AE \{V_1(t) - V_0(t)\} + v_{00} T_0(t) - v_{10} T_1(t) + \frac{l_2}{l_u} AE v_{10} \theta(t) + AE l_2 \dot{\theta}(t) \quad (1)$$

$$l_d \ddot{T}_2 = AE(V_2 - V_1) + v_{10} T_1 - v_{20} T_2 + AE(v_{20} \frac{l_2}{l_d} \theta - v_{10} \frac{l_2}{l_u} \theta + l_2 \dot{\theta}) \quad (2)$$

아이들(idle)롤인 댄서롤의 속도는 물의 전·후 스펠의 장력차와 베어링 마찰에 의해서 결정된다. 다음의 식(3)은 댄서롤의 속도 방정식이다.

$$J_d \dot{V}_d(t) = \{T_2(t) - T_1(t)\} r_d^2 - b_d V_d(t) \quad (3)$$

텐서롤의 전·후 스펠에서 발생하는 장력과 공압 실린더 (air cylinder)에서 발생하는 스프링력 및 공압으로 인한 텐서 암의 회전운동 방정식은 다음의 식(4)와 같다.

$$J_{eq} \ddot{\theta}(t) = -I_2 \{T_1(t) + T_2(t)\} - \frac{24}{0.078} I_1^2 \theta(t) - b \dot{\theta}(t) \quad (4)$$

폴림롤에서 소재가 풀리며 이송되는데, 이때 시간에 따른 반경 변화는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R(t)^2 = R_0^2 - \frac{h}{\pi} \int_{t_0}^t v(t) dt \quad (5)$$

가·감속 및 정속에서 폴림롤의 속도 변화  $V_0$ 에 의해 발생하는 장력외란으로 인해 텐서롤 전·후 스펠의 장력 변화량  $T_1, T_2$ 는 텐서의 각도 변화  $\theta$ 에 영향을 미치게 되는데, 이는 장력외란에 대한 텐서 시스템의 감쇠성능을 평가할 수 있는 주요 인자가 된다.

### 3. Simulation & Experiment

식(1)~(4)와 같이 유도된 텐서 시스템과, 식(5)의 폴림롤의 반경변화 모델을 이용하여 고속인쇄(470mpm)시 폴림롤 구간(unwinder section)에서 텐서시스템을 이용한 장력제어 성능을 평가하기 위해 아래 Table 1과 같은 조건으로 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

Symbol	Value	Expression
$v_{ref}$	470[mpm]	Operating velocity
$t_{ref}$	100[N/m]	Operating tension
$E$	210[Mpa]	Young's modulus
$J_{eq}$	0.03[kgf·m <sup>2</sup> ]	Equivalent inertia

Table 1 Simulation & Experiment conditions

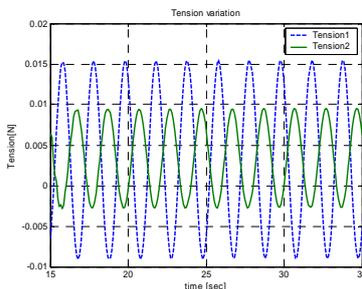


Fig. 5 Simulation for tension variation  $T_1$  &  $T_2$

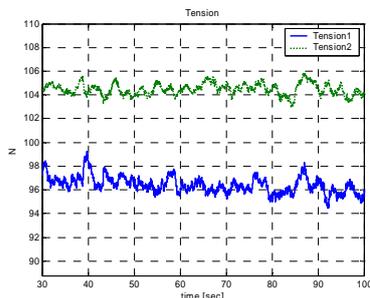


Fig. 6 Experiment for tension variation  $T_1$  &  $T_2$

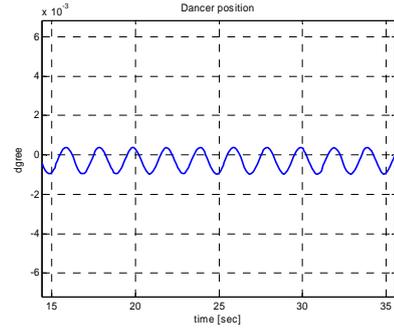


Fig. 7 Simulation for degree  $\theta$  of dancer arm

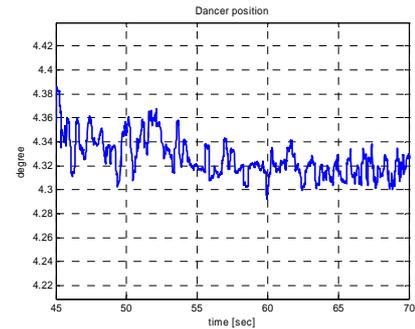


Fig. 8 Experiment for degree  $\theta$  of dancer arm

Fig. 5의 시뮬레이션과 Fig. 6의 실험과 같이 텐서롤을 중심으로 이전 스펠에서의 장력외란은 텐서롤을 지나면서 감쇠되는 경향을 보이고 있으며, Fig. 7의 시뮬레이션과 Fig. 8의 실험에서 처럼 텐서 암의 각도 변화량은 매우 작음을 알 수 있다. 고속인쇄에서도 안정하게 장력제어를 하고 있는 것으로 평가할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문은 그라비아 프린팅 시스템의 폴림롤 구간에서 텐서 모델과 폴림롤의 소재가 풀리면서 변화되는 반경변화 모델을 이용, 시뮬레이션과 실험을 통하여 고속인쇄(470mpm)시 텐서시스템의 장력제어 성능을 평가하였다.

### 후기

본 논문은 서울시 산학연 협력사업인 “e-Printing 부품산업 클러스터 구축사업”과 (주) 성안기계의 지원을 받아 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사를 표한다.

### 참고문헌

1. Kee-Hyun Shin, “Tension Control,” Tappi Press, Atlanta, 2000.
2. Shin, K. H., “Distributed Control of Tension in Multi-Span Web Transport Systems,” Ph.D. thesis, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma, 1991.
3. Pagilla, P. R., Perera, L. P., and Dwivedula, R. V., “The Role of Active Dancers in Tension Control of Webs,” Proceedings of the Sixth International, 2001.
4. Ramamurthy V. Dwivedula, “Characteristics of active and passive dancers : A comparative study,” Control Engineering Practice, Vol. 14, Issue 4, pp. 409-423, 2006