

## Winding/Unwinding 제어공정에서 반복 충격에 기인한 MD-밀도 변동의 모델링과 시뮬레이션

허유(경희대학교 기계·산업시스템공학부), 김형진\*(경희대학교 대학원 섬유공학과),  
김종성(경희대학교 대학원 섬유공학과), 전두환((재)섬유기계연구소)

### Modeling and Simulation of the Linear Density Variation by Repetitive MD-Impacts in a Winding/Unwinding Control Process

You Huh(Mech. and Ind. Systems Eng., Faculty, KHU), Hyung J. Kim(Textile Eng. Dept., Graduate School, KHU), Jong S. Kim(Textile Eng. Dept., Graduate School, KHU), Doo H. Chun(Korea Textile Machinery Institute)

#### ABSTRACT

In many manufacturing processes such as web formation, manufacturing of paper and nonwoven, fabric weaving, etc., planar sheets are transported and at the same time appropriate tension is imposed. The input material rolled up on beams is fed by unwinding the beam and the processed is then taken up on beams by winding it. While processed, the planar sheets are thrown under the processing load of impulse form, which causes irregular thickness of the processed sheet. To improve the quality of the product, a dynamic model is needed and the dynamic characteristics is to be analyzed by simulation. This study shows that density variation dynamics of the in-process-sheet in the machine direction can be described at each moment of disturbing impacts in forms of difference equations, while the impacts and tension, the time-dependency of the material properties were taken into account. Simulation showed the most serious variation of the density occurred in the process starting phase. The starting velocity curve with step form showed the least variation of the density. As the time order of the function of the starting velocity curve becomes higher, the density variation gets greater.

**Key Words :** density variation (밀도변동), Repetitive Impacts(반복충격), Winding/Unwinding(권취/해권), dynamic characteristics (동특성), difference equation(차분방정식), starting velocity curve(시동속도커브)

### 1. 서론

웹 형상물이나 유연 판상 구조물을 생산하는 제작 또는 부직포 생산 공정에서 제품의 품질은 물성의 균일성과 직접적으로 연관된다. 특히, 공정 재가 동시에 권취속도의 과도상태에 따른 공정 장력의 변화 및 반복 충격간의 간격 변동은 선밀도 증가나 감소로 띠 모양의 결함을 발생시키고 이는 곧바로 제품의 품질에 영향을 미친다. 따라서, 본 연구에서는 과도상태의 권취속도에 대한 제품의 인입 간격(indentation interval)을 이론적으로 모델링하고, 비례적분 제어기(PI-controller)를 이용한 제어 시스템을 이론적으로 구축하여 장력제어로서 충격 인입 간격을 제어하고자 하였다. 또한 공정이 정지된 동안 장력 완화로 인하여 변화하는 초기조건을 입력값으로 하여 과도 상태동안의 충격 인입간격을 제어해 보았다.

### 2. 동역학 모델링

#### 2.1 충격 인입 간격의 동역학 모델

송출-권취부가 메인 구동모터에 연동되어 있는 경우, 가공구간  $l$ 에서의 시료에 대한 질량보존에 의하여 송출-권취속도에 따른 장력 거동은 다음과 같이 나타낼 수 있다[1]:

$$l \cdot \frac{d\tau_2(t)}{dt} + v_2(t) \cdot \tau_2(t) = [A \cdot E \cdot (1 - p(t)) + p(t) \cdot \tau_{10}] \cdot v_2(t) \quad (1)$$

또한, 공정 중 시료의 장력 균형에 의하면, 충격 인입 간격(S)과 충격 발생 위치(L)를 묘사하는 기본 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다[2]:

$$(1+r) \cdot S^2(n) - [r \cdot S(n-1) + L(n-1)] + (1+r) \cdot S_{min} \cdot S(n) = 0 \quad (2)$$

$$+ r \cdot S(n-1) \cdot S_{min} + L(n-1) \cdot S_{min} - a = 0 \quad (3)$$

$$L(n) = L(n-1) + r \cdot [S(n-1) - S(n)] - S(n) + W_0 \quad (3)$$

#### 2.2 장력완화 현상에 따른 초기조건 설정

충격 인입 간격의 기본 방정식(식(1)~(3))은 장력의 완화현상에 의하여 주어지는 초기조건을 필요로 한다. 따라서 정지시간에 대한 장력완화가 충격 인입 간격 변화에 미치는 영향을 알아보기 위해 Fig.1과 같이 원료상태과 가공구간으로 나누어 다루었다.

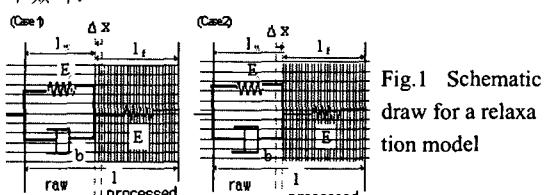


Fig.1 Schematic draw for a relaxation model

$$\tau_2(t) = \frac{E_w/l_w}{E_f/l_f + E_w/l_w} \cdot \tau_{20} \cdot \frac{E_f/l_f}{E_f/l_f + E_w/l_w} \cdot e^{-\frac{(E_f/l_f + E_w/l_w) \cdot A \cdot t}{b}} \cdot \tau_{20} \quad (4)$$

$$\Delta x(t) = \frac{1}{E_f/l_f + E_w/l_w} \cdot (1 - e^{-\frac{(E_f/l_f + E_w/l_w) \cdot A \cdot t}{b}}) \cdot \tau_{20} \quad (5)$$

### 2.3 장력 제어

본 연구에서는 여러 가지 제어기 형태 중 비례 적분제어기(PI-controller)를 사용하였다.

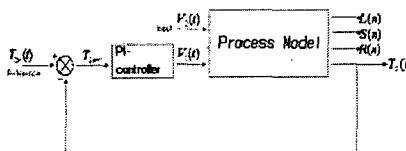


Fig.2 system for the Winding/Unwinding process with a series of Block diagram of feedback MD density control Impacts  
( $V_1(t)$ :Unwinding speed,  $V_2(t)$ :Winding speed,  
 $T_2(t)$ :Process tension,  $T_{2\text{ref}}(t)$ :Reference,  $T_{2\text{err}}$ :Tension error,  
 $L(n)$ :Impact position on the processed,  $S(n)$ :Impact spacing,  $R(n)$ :Impact intensity )

### 3. 시뮬레이션

#### 3.1 장력제어를 통한 시스템 응답

Fig.3은 공정 초기조건에서 권취속도의 입력구동이 지수함수적으로 주어졌을 때의 일반적인 공정 거동(Uncontrolled)과, Fig.2에서 제시한 장력 제어 시스템을 통해 되먹임제어가 된 후의 거동(Controlled)을 비교한 시뮬레이션 결과이다.

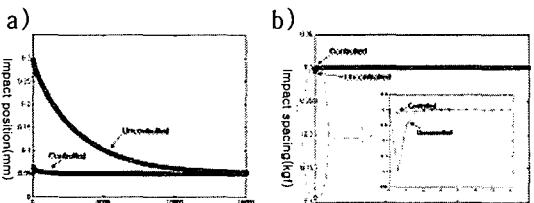


Fig.3 Response of the process by a tension control

##### a) impact position, b)impact spacing )

결과에 따르면, 충격 인입 위치는 장력제어로 인하여 위치 이동 폭이 대폭 줄어들었으나, 충격세기의 과도상태(권취속도의 영향)으로 인하여 완전한 제어가 이루어지지 못하였다(Fig.3-a). 가공물상에서의 충격 인입 간격의 변동은 정상상태까지 도달하는 시간은 비슷하지만 제어된 경우가 변동의 크기가 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다.(Fig.3-b)  
3.2 장력 완화에 대한 제어효과

Fig. 4-a)와 Fig.5-a)는 공정 정지시간 동안의 장력 완화와 이로 인한 충격 위치의 이동을 시뮬레이션 한 결과이고, 장력 완화시간이 200초와 2분 경과 후 공정을 재가동했을 때 변하게 되는 장력거동과 가공물 상의 충격 인입위치 이동을 각각 Fig.4-b),Fig.4-c)와 Fig.5-b), Fig.5-c)에 나타내었다. 시뮬레이션 결과에 의하면, 장력이 제어되는 경우 첫 번째로 부여되는 충격부터 오버슈트를 가지고 빨리 정상에 도달하였지만, 충격 위치에 대하여는 장력변화에 의하여 변화된 초기위치에 대한 자유응답의 영향으로 어느 정도의 과도상태를 겪은 후 정상상태에 도달하고, 또한 공정 정지 시간에

비례하는 과도상태 구간을 나타내었다. 따라서 충격 인입위치 변동에 직접적인 영향을 받는 충격 인입간격 또한 제어효과가 크게 나타나지 않았다.(Fig.6-a,b)

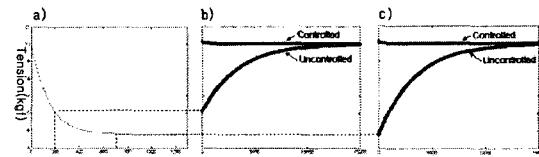


Fig.4 Tension relaxation and in-process-tension

(relaxation time b)200sec, c)700sec)

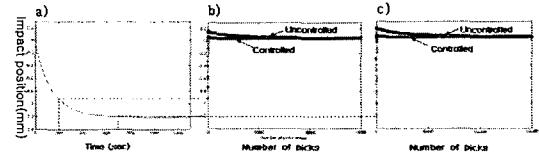


Fig.5 Variation of impact position a)due to tension relaxation and b,c)during the restarting phase of the process.

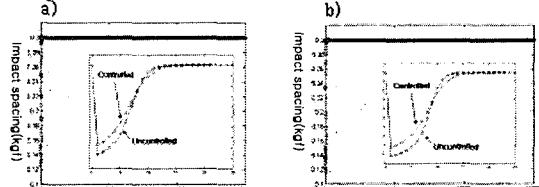


Fig.6 Variation of impact spacing caused by relaxation.

### 4. 결론

본 연구에서는 웨브 형상물을 생산하거나 유연 판상 구조물을 생산하는 공정에서 가공물의 역학적 성질의 증진을 위하여 jet 기구 또는 beating 과 같이 충격인입이 이루어지는 공정을 대상으로 동역학적 모델을 구하고, 공정 정지후, 재가동되는 과도상태동안 가공물 상에서의 충격 인입 간격의 변동을 억제하기 위하여 공정에 입력되는 winding speed 가 지수함수적 증가 형태를 가지는 경우에 unwinding speed 를 제어함으로써 공정장력의 제어 효과와 가공물의 기계방향의 밀도 불균형 대하여 살펴보았다. 그 결과, 송출 속도에 의한 장력의 자동제어를 통하여, 과도상태는 짧아지고, 충격 인입 간격의 변동은 작아지므로 장력제어를 통하여 MD 밀도의 변동을 억제하는 효과가 있음을 확인하였다.

### 참고문헌

- Y.Huh, S.H.Jang, and S.G.Lee, "Mathematical Modeling of the Tension Behavior for the Let-off Mechanism Driven by an Individual Motor", J. Korean Fiber Soc., 35(9), 569-576, 1998.
- Y.Huh, W.Y.Ryu, J.L.Woo, "Free Response of Pickspacing to the Initial Clothfell Position as an initial Condition", J.Korean Fiber Soc., 29, 19-28, 1992.
3. Y.Huh, H.J.Kim, J.S.Kim, S.H.Kim, "Analyzing the Pickspace Variation Due to the Warp Yarn Relaxation in Weaving Process", 한국섬유공학회 학술발표회 논문집, 38(1), 233-234, 2005.