

# 이동가공 공정에서 속도차에 기인한 장력변동의 자동제어에 관한 연구

허 유

경희대학교 섬유공학과

## 1. 서론

연속 섬유공정은 섬유물이 이동하는 가운데 연속적으로 기계적인 처리 또는 물리/화학적 가공이 행하여진다. 따라서 원료의 공급속도 (feeding speed)와 생산되는 제품의 방출속도(delivery speed)사이의 정확한 속도비를 유지하는 것은 공정처리를 받고 있는 섬유물에 가해지는 부하를 일정하게 하므로써 제품의 물리적, 화학적 성질을 균일하게 하여 품질유지에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 섬유물의 이동이 수반되는 연속 섬유공정은 합성섬유 방사공정에서부터 어패럴 생산공정에 이르기까지 거의 전 섬유산업에 걸쳐 활용되고 있으며, 이를 더 확대하면 공정시스템의 구성이 원료공급과 제품방출, 그리고 공정중에 공정처리 대상이 연속적으로 이동하는 모든 산업공정은 이에 해당된다고 할 수 있다. 따라서 공급속도와 방출속도를 제어하므로써 섬유물에 가해지는 장력을 일정하게 유지하려는 기술은 섬유물의 품질 고급화와 공정 최적화에 대단히 중요하다. 이러한 기술개발을 위한 연구는 이미 여러 학자를 통하여 이루어지고 있다(1-4). 그러나 섬유공정을 대상으로 실제 공정조건을 감안한 연구는 동특성 해석에 대하여 이루어져 있을 뿐이다(5,6). 본 연구에서는 이동가공 공정에서의 속도차에 의한 장력거동 모델을 바탕으로 장력제어를 위한 제어시스템을 구성하고 시뮬레이션을 통하여 제어결과를 해석하였으며 이를 실제 섬유공정을 대상으로 실험 결과와 비교하여 보았다.

최근 제직공정은 다양한 위사 투입법이 실용화되면서 소음 및 진동을 억제하고 생산성 향상과 작업환경 개선이 획기적으로 이루어졌으며(7), 직기의 성능증대, 직물의 품질향상을 위한 공정최적화, 생산유연성의 확대 및 자동화에 대한 연구들이 활발히 진행되었다(8,9). 특히 송출부에 구동 모우터를 설치하여 경사장력을 제어하는 active negative type의 송출기구와 직물권취부에도 구동모우터를 설치하는 분산구동형 직기의 경우(7,8), 직기 가동상태에서는 위사 1가닥이 공급될 때마다 직물권취에 대응하여 경사장력을 일정하게 유지하도록 경사의 일정길이를 정확히 공급하는 것이 대단히 중요하다(8-11). 따라서 본 연구에서는 제직공정을 실험대상으로 하였다.

## 2. 모델링

이미 알려진 바와 같이  $\tau_1$ 은 공급장력, 즉 경사비임상의 경사장력,  $\tau_2$ 는 제직구간에서의 장력,  $\rho_1$ 은 경사비임상의 경사밀도,  $\rho_2$ 는 제직구간에서의 경사밀도,  $m$ 은 제직공정중

단위시간당 경사질량의 변화량,  $A_1$ 은 경사비임상의 경사 단면적,  $A_2$ 는 제직구간에서의 경사 단면적,  $v_1$ 은 경사송출속도,  $v_2$ 는 직물권취속도,  $t$ 는 시간,  $L$ 은 제직구간의 길이라고 할 때, 송출속도  $v_1$ 과 권취속도  $v_2$  그리고 경사비임상의 경사장력  $\tau_1$ , 제직공정중의 경사장력  $\tau_2$ 와의 관계는

$$Lx \left[ (1 - f_2^{-1}(\tau_2(t))) \frac{d\rho_2(t)}{dt} - \rho_2(t) \frac{df_2^{-1}(\tau_2(t))}{dt} \right] = \rho_1(t) (1 - f_1^{-1}(\tau_1(t))) v_1(t) + x \left[ \frac{m(t)}{A_{20}} - \rho_2(t) (1 - f_2^{-1}(\tau_2(t))) v_2(t) \right] \quad (1)$$

으로 주어지게 된다. 실제 제직공정에서는 경사밀도가 일정하며 경사의 질량변화가 거의 없고, 경사의 인장특성이 선형 탄성변형을 한다고 가정할 수 있으므로

$$\rho_1 = \rho_2 = \text{constant}, \quad m = 0, \quad x = 1, \quad f_1(\epsilon) = f_2(\epsilon) = AE\epsilon$$

단,  $E$ 는 경사의 Young's Modulus

(1)식은

$$L \frac{d\tau_2(t)}{dt} = AE [v_2(t) - v_1(t)] + \tau_1(t)v_1(t) - \tau_2(t)v_2(t) \quad (2)$$

으로 된다.

경사장력을 일정하게 유지하기 위한 제어시스템을 구축하기 위하여 제어변수(controlled variable)는 경사장력  $\tau_2$ , 작동자 신호(actuator signal)는 송출속도  $v_1$ , 목표장력을  $R$ 로 나타낼 수 있다. 제직중의 경사장력 제어를 위하여는 개구운동 및 바디침운동에 기인하여 장력변동이 나타나므로 이를 감안하여 기본 경사장력의 제어에서는 일반적으로 비례 적분제어(Proportional Integral Control)가 이루어진다(12).

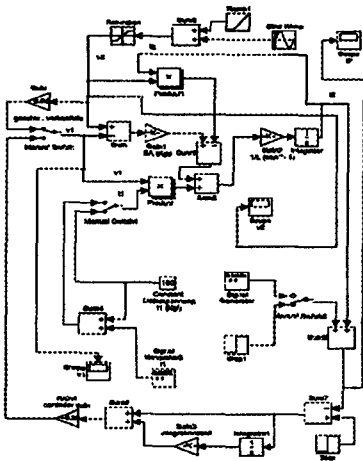


Fig.1 The simulation circuit for the tension control of the continuous processing system

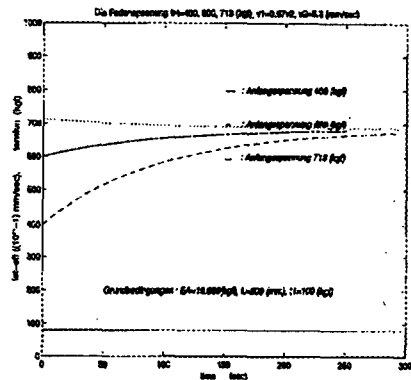


Fig.2 The simulation result for a constant input/output speed ratio  $k = 0.97$

따라서 제어기는

$$v_1(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(\tau) d\tau),$$

단  $e(t) = \tau_2(t) - R$ ,  $K$  : 제어기 이득,  $T_I$  : 적분시간

으로 주어진다. 제직공정의 공정변수는 권취속도  $v_2$ , 목표장력  $R$ 로 나타낼 수 있으며 공정경계조건은 제직구간의 길이  $L$ , 경사인장특성  $AE$ , 경사비임상의 경사장력, 즉 송출장력  $\tau_1$ 이라고 할 수 있다. 따라서 제직공정에서의 경사송출/직물권취 시스템에서의 경사장력제어문제는 연속 이동가공공정에서의 속도차이에 기인하는 장력변동의 자동제어시스템이라고 할 수 있다. 이러한 제어시스템을 Matlab<sup>TM</sup>을 이용하여 Fig.1과 같이 시뮬레이션 회로를 구성하였다.

### 3. 제어 시뮬레이션

본 연구에서는 Fig.1에 주어진 바와 같은 제어 시뮬레이션 회로를 이용하여 공정의 진행속도가 step형태로 변하는 경우와 ramp 형태로 변하게 되는 경우를 구분하여 시뮬레이션을 행하였다. 이를 위하여 사용된 파라메타는 실제 실험을 위한 값을 감안하여 다음과 같이 주어졌다.

$$\begin{aligned} L &= 800\text{mm}, AE = 19,600\text{kgf}, v_{2s} = 8.3\text{mm/sec}, \\ \tau_1 &= 100\text{kgf}, \tau_{20} = 400, 600, 713\text{kgf}, T_{\text{ramp}} = 0, 8.8\text{sec} (T_{\text{ramp}} : \text{ramp time}) \\ R &= 600\text{kgf}, K = 0.025\text{mm/kgf sec}, T_I = 25\text{sec} \end{aligned}$$

참고로 제어가 이루어지지 않고 공급속도와 방출속도를 연동시켜  $v_1 = k v_2(t)$ , 단  $k = 0.97$ 로 주어지는 경우의 시뮬레이션 결과는 Fig.2에 주어져 있다. 이에 의하면 초기값이 정상치와 차이가 나는 경우에는 시스템이 정상상태에 도달하는데에 20sec이상의 긴 시간이 필요함을 알 수 있다.

#### 3.1 공정속도가 step변화할 때의 장력제어

공정속도가 step형태로 변하는 경우는  $v_2(t) = v_{2s} = 8.3 u(t)$  (mm/sec) ( $u(t)$  : unit step function)로 주어지게 된다. 목표치가 600kgf일 때, 초기조건 400, 600, 713kgf에 따른 제어시스템의 응답을 살펴보면 Fig.3과 같다. 이 결과에 의하면 초기조건에 크게 영향을 받지 않으며 70sec 경과후에 시스템은 목표치에 다다랐다고 볼 수 있다. 이는 제어시스템의 구축을 통하여 뚜렷한 장력변동의 억제 효과를 볼 수 있다는 것을 말한다. 그러나 제어초기에는 초기치에 상관없이 장력의 overshoot가 발생함을 알 수 있다. 이는 초기 공정속도의 변화에 의하여 나타나는 장력의 변동에 제어시스템이 반응하여 공급속도를 변화시키는데 시간적 지연이 나타난다는 것을 의미한다.

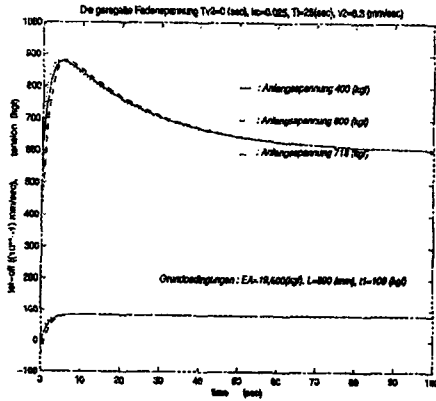


Fig.3 The simulated tension for the controlled system (step change of processing speed)

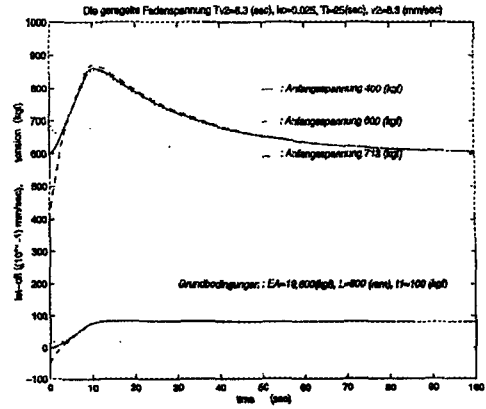


Fig.4 The simulated tension for the controlled system (ramp change of processing speed)

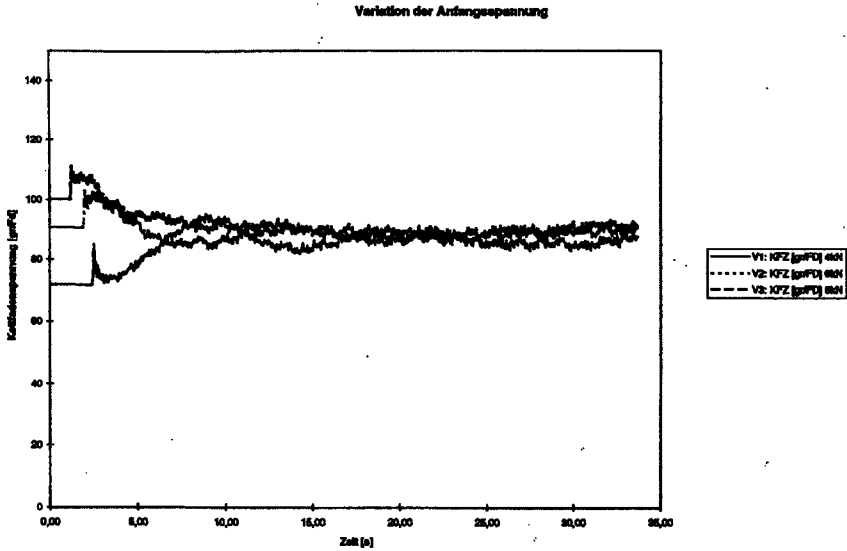
### 3.2 변화하는 공정속도에서의 장력제어

공정속도가 변화하는 경우, 장력  $\tau_2$ 는 공정속도에 비선형적으로 영향을 받으며, 이를 공급속도의 조정을 통하여 선형제어하는 경우에 해당된다. 본 연구에서는 속도변화가 있을 때의 장력제어효과를 알아보기 위하여 속도구배를 일정하게 두고 초기조건을 400, 600, 713kgf로하여 장력의 변동을 살펴보았다 (Fig.4).

Fig.4에서 볼 수 있는 바와 같이 속도변화가 점진적으로 나타나는 경우, 제어기의 동작에 의한 장력의 제어효과가 크게 나타날 수 있을 것으로 예상하였으나 초기 장력변동의 overshoot 현상은 억제할 수가 없음을 알 수 있다.

## 4. 제어 실험

섬유의 공급과 공정처리된 섬유물의 방출이 이루어지는 이동가공형 섬유공정은 대단히 많다. 본 연구에서는 공급/방출 속도차에 의하여 장력을 제어하는 것이 실제 공정에서 대단히 중요한 역할을 하고 있는 경사송출/직물권취가 이루어지는 제직시스템을 대상으로 실제 현장에서 가동중인 공정조건하에 경사장력의 제어효과를 실험해 보았다. 실제 장치는 단지 경사장력이 backrest의 변위에 의하여 측정되고 측정신호는 송출 모우터에 피이드백되어 송출속도를 제어한다는 설명만이 있을 뿐, 제어의 구성에 대한 기술적인 설명은 전혀 없기 때문에 본 연구에서는 측정된 제어신호의 형태를 바탕으로 제어시스템의 구성과 특성을 추정할 수 밖에 없었다. 본 실험을 위하여는 초기장력을 400, 600, 713kgf로 정하였다. Fig.5는 장력측정 결과를 보여준다.



**Fig.5 The tension signal measured in the continuous processing system with tension control**

이 결과에 의하면 초기가동상태에서 장력은 초기값과 상관없이 overshoot이 나타나며 시간이 경과함에 따라 점차 목표값에 다가가는 것을 알 수 있다. 이는 앞에서 주어진 시뮬레이션 결과와 잘 일치한다고 할 수 있으며 시스템의 구성상 실제 직기에서는 이미 산업계에 알려진 바와는 달리 전자송출 시스템이 초기구동에서 많은 문제점을 포함하고 있다는 것을 알 수 있다. 이와같은 결과는 시뮬레이션에 의하면 시스템의 구성상 공급속도와 공정속도의 정확한 속도비 유지는 공급장력 및 공정교란 때문에 의미가 없으나 공정장력을 제어하기 위하여 단지 장력 측정치의 피이드백으로써 공급속도를 조절한다는 것은 공정속도의 변화가 예상되는 경우에는 장력변동을 피할 수 없다는 것을 말하므로 이의 보완이 필요하다고 하겠다.

### 5. 결론

이동가공 공정에서 섬유물의 공급속도와 공정처리속도와 차이에 기인하는 장력을 일정하게 유지하기 위하여 제어시스템을 구축하고 시뮬레이션과 실험을 통하여 결과를 비교해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모델을 바탕으로한 장력 제어시스템의 시뮬레이션 결과는 실제 공정에서의 결과와 잘 일치하였다.
2. 공정속도 변화가 일어나는 경우, 장력제어 시스템은 목표치에 도달하는 시간,

즉 반응시간이 제어가 없는 시스템에 비하여 현저하게 짧다.

3. 장력제어시스템은 공정속도의 변화형태에 상관없이 초기 장력거동에 overshoot가 발생하여 제품결함을 일으키는 요인이 될 수 있다.

## 참고문헌

1. K. P. Grenfell, "Tension Control on Paper-making and Converting Machinery", *IEEE, Tran. on Applications and Industry, Vol. 83, July, 234-240 (1964)*
2. Soong. T. C, and Li. C, " An Elastic Analysis of Multroll Endless Web System", *ASME Tran. on Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, Vol. 101, Dec. 308-313, (1979)*
3. D. P. D. Whitworth, M. C. Harrison, "Tension Variation in Pliable Material in Production Machinery", *Appl. Math. Modeling, Vol. 7, June (1983)*
4. Karl. N. Reid, Ku-Chin. Lin, " Control of Longitudinal Tension in Multi-Span Web Transport System During Start up", *Proc. on 3rd. Int. Conf. on Web Handling, 77-99 (1995).*
5. R. Beyreuther, "Dynamik von Fadenbildungs- und Fadenverarbeitungsprozessen", 49-52, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1986
6. 허 유, 장승호, 이석규, 이재원, 박정일, "송출/권취 시스템에서의 장력 거동 해석", 한국섬유공학회 추계 학술발표 논문집, 11. 1. 1997.
7. Ishida, T., " Innovations in Weaving Machinery the Course of Loom Development," Osaka Senken Ltd. (1994)
8. M. Polke, F. Portele, "State of Art and Development of Process Control Techniques for the Textile Industry", *Melliand Texiberichte 65, 291-297 (1984)*
9. D. C. Snowden, "The Production of Woven Fabric", *Textile Progress, 4, No.1, 17-33 (1972)*
10. Y. Huh, S. T. Lee, Y. Ryu, and J. L. Woo, "Effect of Starting up Conditions on the Product Quality in the Weaving Process", *J. Korean Fiber Soc., 31, No.2, 111-117 (1994)*
11. B. Wulfhorst and B. Obolenski, "Beurteilung von Mabnahmen zur Vermeidung von Anlaufstellen in Geweben", *Melliand Textilberichte, 71, 24-31 (1990).*
12. B. Wulfhorst, E. Cremer, D. Boehm, and W. Jaeger, "Computersimulation der Kettfadenbelastung beim Webprozess", *Melliand Textilberichte, 74, 613-617 (1993).*