

집속체 유동 점도와 드래프트 안정성

허 유¹, 김종성², 서문원³

¹경희대학교 기계.산업시스템 공학부, ²경희대학교 대학원 섬유공학과, ³노스캐롤리나 주립대학 섬유공학과

Kinematic Viscosity of Fiber Bundle Flow and Draft Stability

You Huh¹, Jong S. Kim², Moon Won Suh³

¹Faculty of Mechanical and Industrial Systems Engineering, Kyunghee University, Yongin, 449-701, Korea

²Department of Textile Engineering, Graduate School, Kyunghee University, Yongin, 449-701, Korea

³Department of TATM, College of Textiles, NCSU, Raleigh, North Carolina, 27695, USA

1. 서론

드래프트 기구와 같이 불연속 집합체를 다루는 공정에서의 집속유동 특성은 원료가 가지고 있는 물리적 성질과 형태분포 요소 등에 의하여 크게 영향을 받으며 공정 조건에 대하여 대단히 민감하다. 특히, 원료의 형태적 성질 및 구성 원료간의 응집력과 배열상태 등에 의존하는 집속체 유동 점도는 이웃하는 섬유 간에 drag force를 발생시키고 부유섬유의 운동을 유도하는 동시에, 속도 분산을 일으킴으로써 출력 집속체의 굵기 변동성 및 드래프트 안정성에 직접적인 영향을 끼치는 대단히 중요한 인자이다. 선행연구에서 제시한 집속 유동모델에 의하면, 이러한 특성치의 변동은 출력 불균제를 약화시키기도 하지만, 일정 공정조건과 함께 드래프트 파를 일으키고 이는 공정 공명으로 이어진다[1]. 본 연구에서는 이러한 이론적 결과를 실제 공정에서 나타나는 집속 점도 값의 범위에서 재해석하고, 동시에 이론적 모델의 유효성을 확인하기 위하여, 공정조건에 따라 집속체의 유동점도 값을 실험 통하여 측정하였다. 또, 경계조건인 스텝변화에 대한 시스템 응답의 이론적, 실험적 결과를 비교하여 속도분산 모수를 추정하였으며, 나아가 주어진 모델 파라메타 범위에서 유동계의 상태변화가 일어나는 주요 공정 변수의 임계값을 찾고, 이로부터 집속유동 시스템의 안정성에 대한 기준을 제시하였다.

2. 집속유동 모델

드래프트 구간 내 집속체의 동적거동을 묘사하는 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 연속방정식, 운동방정식, 구성모델, 그리고 속도분산 보조방정식으로 구성된다 [2].

$$(l_b)_t + (l_b \cdot v)_x = 0 \quad (1)$$

$$(l_b \cdot v)_t + (l_b \cdot v^2)_x + (l_b \cdot Var[v_i])_x = (f)_x \quad (2)$$

$$f = \mu \cdot l_b \cdot (v)_x \quad (3)$$

$$Var[v_i] = a_0 \cdot v \cdot \left(1 - \cos \frac{2\pi}{L} x \right) \quad (4)$$

$$\text{경계조건: } v(t, x=0) = v_0, v(t, x=L) = v_L = v_0 \cdot D_R, l_b(t, x=0) = l_{b0} \quad (5)$$

이때, 상태변수 vv 와 l_b 는 각각 유동계 내 시간 t 와 위치 x 에서의 집속체 속도와 선밀도 분포를 나타내며, a_0 와 μ 는 각각 구성섬유 간의 속도분산과 유동 점도에 관계하는 모델 파라메타로서 원료의 길이 분포 및 표면 특성, 개섬도 등에 의존한다.

3. 실험

점도는 재료에 가해지는 전단력과 이때의 변형률과의 관계로부터 정의된다. 따라서 본 연구에서는 공정 중 집속체에 가해지는 힘을 측정하고 힘-변형과의 관계를 나타내는 구성모델(식(3))을 이용하여 점성 모수 μ 의 값을 구하였다. 이때, 드래프트 구간에서 집속체에 작용하는 드래프트 힘과 속도 변화율은 일정하다고 가정한다. 그러면 집속체 유동 점도 μ 는

$$\mu = \frac{f}{l_b \cdot (v)_x} = f_0 \cdot \frac{L}{v_0 \cdot (D_R - 1)}, \quad f_0 = f/l_b : \text{specific drafting force} \quad (6)$$

으로 정의 할 수 있으며, 유동계 구간의 길이 L , 공급 속도 v_0 그리고 드래프트 비에 영향을 받는다.

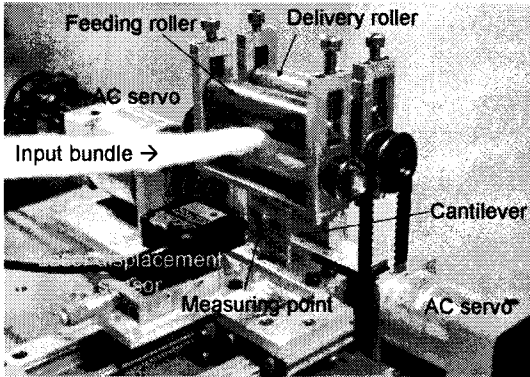


Fig. 1 Measuring device of drafting force

따라서 본 연구에서는 드래프트 조건에 따른 드래프트 힘의 크기를 측정하기 위하여, 2/2 롤러 드래프트 기구를 대상으로 분리구동을 통한 속도 및 드래프트 비, 그리고 롤러 게이지를 자유롭게 제어할 수 있도록 하였으며, 드래프트 힘의 측정은 공급롤러 하단의 외팔보에 걸리는 힘에 비례하여 선형변형을 일으키는 범위에서 변위 레이저 센서를 이용하여 측정이 이루어 졌다. 측정된 변위 값은 calibration curve로부터 힘으로 환산하여 사용한다. Fig. 1은 드래프트 힘을 측정하기 위하여 제작된 장치를 보여주고 있으며 실험에 사용된 시료의 사양과 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Process conditions and specification of the material used for experiment

Process condition		Material	
Roller gauge (mm)	40, 45, 50, 60	Cotton sliver	
Draft ratio	2 ~ 30	Mean fiber length (mm)	34.3
Delivery speed (m/min)	10	Micronaire value	4.29
Thickness of input bundle (kTex)	2.6, 6.4, 12.8, 16.0, 19.2,	Nep Cnt/g	114

4. 결과 및 토의

4.1. 집속체 유동 점도

Fig. 2a)는 롤러 게이지 40mm, 생산속도 10m/min에서 입력 집속체의 굵기에 따른 드래프트 힘 (specific force, force/Tex)을 드래프트 비에 따라 나타낸 실험 결과이다. Specific force는 입력 굵기에 관계없이 거의 유사한 크기를 가졌으나, 드래프트 비가 증가함에 따라 힘이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 거동은 H.R. Plonsker [3]를 포함한 여러 연구 결과에서도 확인된다. Fig. 2b)는 Fig. 2a)에서 측정된 결과와 식(6)을 바탕으로 집속 유동점도의 크기를 찾은 결과이다. 점도의 크기는 약 50~800 m^2/sec 범위에서 존재하며, 입력 굵기에 관계없이 드래프트 비가 증가함에 따라 처음에 급격하게 감소하다가 드래프트 비 10 이상에서는 서서히 감소하여 나타났다. 롤러 게이지에 따른 집속 유동 점도는 Fig. 2c)에 주어진 바와 같이 $L=40mm$ 에서 가장 크게 나타나고, $L=45\sim60mm$ 에 대하여는 서로 비슷한 크기를 가졌다. 이는 사용된 섬유의 평균 섬유장이 34.3mm으로써 $L=40mm$ 로 주어지는 경우, 롤러 양단에 동시에 파지되는 섬유가 존재하게 되므로 드래프트 힘이 상대적으로 크게 측정되기 때문에 나타나는 현상으로 보인다.

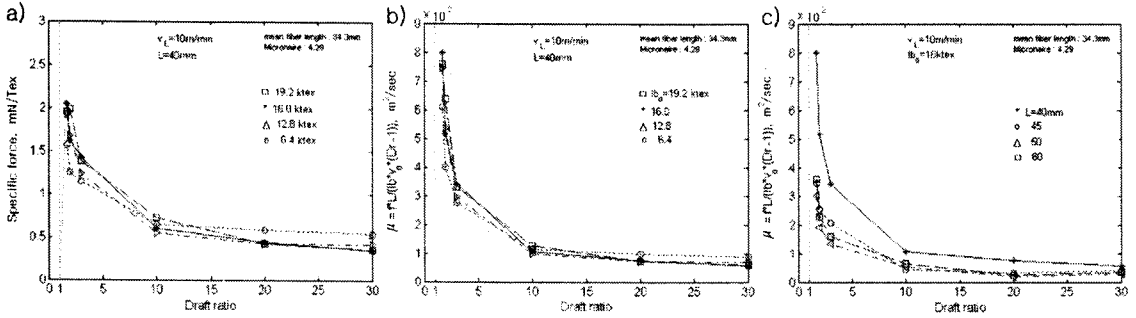


Fig. 2 Experimental results; a)drafting force, b)the viscosity of bundle to the input thickness, and c)the viscosity of bundle to the roller gauge against draft ratios. ($v_L=10\text{m/min}$)

4.2. 속도분산 모수

연속체와는 달리 불연속 집합체에 대한 유동에 있어서 구성섬유 간의 속도분산은 점도와 함께 집속 유동에 영향을 끼치는 대단히 중요한 인자이다. 그러나 유동계 내 속도분산을 얻기 위해서는 드래프팅이 일어나는 동안 개별 구성섬유의 속도를 위치에 따라 모두 측정해야 하는 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 속도분산에 관계하는 모수 a_0 를 찾기 위하여, 입력 스텝변화에 대한 출력 굵기의 과도응답을 측정하고, 같은 조건에서 얻어진 모델 시뮬레이션 결과를 이와 비교하여 속도분산 모수 a_0 를 추정하였다. 이때, 시뮬레이션은 동일 조건에서 측정된 점도 값을 적용한다. Fig. 3b)는 롤러 게이지 60mm, 생산속도 10m/min에 대하여 드래프트 비를 30에서 10으로 스텝 감소(Fig. 3a)) 시켰을 때, 출력 집속체에 나타나는 굵기 과도응답을 보여주는 그림이며, a_0 값에 대한 이론적 결과(점선)와 측정 신호(실선)의 비교를 용이하게 하기 위하여 이를 동시에 나타내었다. 이때, 시뮬레이션에서의 점도(μ) 값은 $50\text{m}^2/\text{sec}$ 이 사용되었다. 결과에 따르면, 드래프트 비의 스텝증가에 대하여 출력 굵기는 갑자기 증가하여 큰 피크를 보인 후, 서서히 정상상태에 도달하는 거동을 관찰 할 수 있으며, a_0 값이 $200\text{m}/\text{sec}$ 근처의 값을 가질 때, 이론적 결과와 측정신호가 서로 유사한 거동을 보였다. 즉, $a_0=100\text{m}/\text{sec}$ 에 대하여는 D_R 30인 구간에서 지속적인 굵기 변동이 나타나고 첫 번째 피크가 실험결과에 비하여 크게 나타났으며, $a_0=300\text{m}/\text{sec}$ 인 경우에는 피크가 상대적으로 작은 값을 가졌다. 따라서 주어진 조건에서는 속도분산 모수가 $200\text{m}/\text{sec}$ 근처에서 나타난다고 추정할 수 있다.

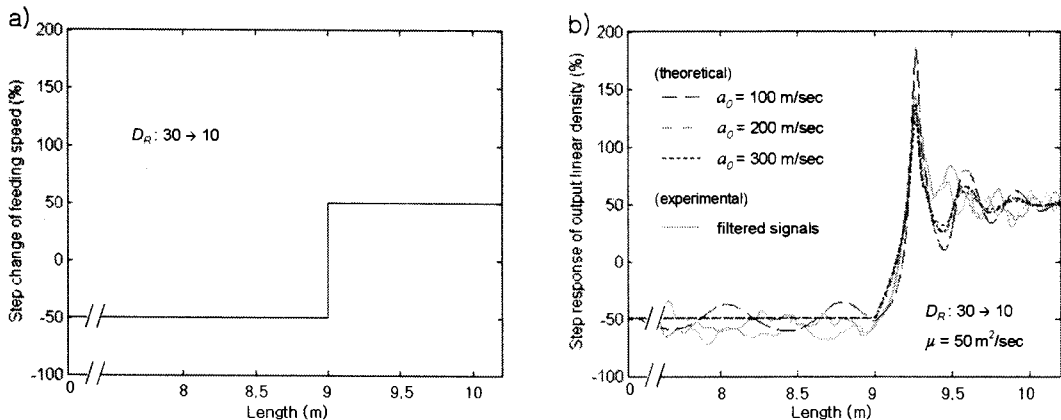


Fig. 3 a)Input signal of draft ratio and b)thickness response of output bundle: comparison of the experiment(solid lines) and the theoretical result(dots and dashes)

4.3. 드래프트 안정성

본 연구에서는 실제 공정에서 나타나는 집속체의 유동점도 범위에서 주요 공정변수에 따른 드래프트 안정성을 판별하기 위하여, 실험을 통해 얻은 점성모수 μ 와 모델과 함께 추정된 속도분산 모수 a_0 를 이론적 모델에 적용하고 선형 안정성 해석[1]을 통하여 집속유동의 상태(stable/unstable) 변화가 일어나는 임계값을 찾았으며, 이로부터 집속유동 시스템의 안정성에 대한 기준을 제시하였다. Fig. 4는

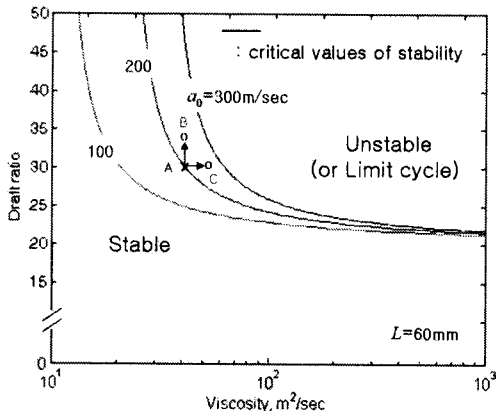


Fig. 4 Stability diagram for bundle flow (delivery speed=10m/min, $L=60\text{mm}$)

의 영킴을 작게 하고, 구성섬유의 속도 분산을 크게 하는 것이 드래프트 안정성 측면에서 효율적이라 할 수 있다. 특히, 드래프트 비 약 20 이하에서는 집속체의 점도와 속도분산 크기에 관계없이 항상 안정한 영역이 나타나는 것을 관찰 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 집속체 유동 이론을 실제 공정에서 나타나는 파라메타 범위에서 재해석하고, 주요 공정변수에 대한 드래프트 안정성을 제시하기 위하여, 공정조건에 따라 집속체의 유동점도 값을 실험 통하여 측정하였으며, 경계조건에 대한 출력 굽기의 과도응답을 실험 값과 비교하여 속도 분산 모수를 추정하였다. 또, 주어진 모델 파라메타 범위에서 유동계의 상태변화가 일어나는 주요 공정변수의 임계값을 찾고, 이로부터 시스템의 안정성 판별의 기준이 되는 stability diagram을 얻었다. 그 결과, 본 연구에서 사용한 시료를 대상으로 집속체 유동 점도는 약 $50\sim 800\text{m}^2/\text{sec}$ 범위에서 분포하고 있었으며, 낮은 드래프트 비에서 높은 유동 점도를 가지고, 드래프트 비가 증가함에 따라 급격하게 감소 한 후, 드래프트 비 10 이상에서는 서서히 감소하는 거동을 보였다. 또한 선형 안정성 해석에 의하면, 드래프트 비 20 이하에서는 집속체의 유동점도와 속도분산에 관계없이 항상 안정한 영역이 나타났으며, 높은 드래프트 비에서는 집속체의 영킴을 적게 하고 속도분산을 크게 하는 것이 시스템의 안정성을 위한 적절한 조치임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. J. S. Kim, Y. Huh, and C. Cherif, (2007), "Phase Plane Analysis in Bundle Flow", 9thATC in Taiwan.
2. You Huh and Jong S. Kim, (2004), "Modeling the Dynamic Behavior of the Fiber Bundle in a Roll Drafting Process", T.R.J., 74(10), 872.
3. Harvey R. Plonsker and Stanley Backer, (1967), "The Dynamics of Roller Drafting. Part I :Drafting Force Measurement.", T.R.J., 37, 673-687