

< 논문 >

## 인발 집속유체의 정상유동 특성

허 유\* · 김 종 성\*

(2005년 7월 4일 접수, 2006년 5월 24일 심사완료)

### Steady-Flow Characteristics of Bundle Fluid in Drawing

You Huh and Jong Seong Kim

**Key Words:** Bundle Drawing(집속 인발), Bundle Fluid(집속 유체), Velocity Profile(속도 분포 곡선), Linear Density Profile(선밀도 분포 곡선), Model Parameter(모델 파라메타)

#### Abstract

Drawing is a mechanical operation attenuating material thickness to an appropriate level for the next processing or end usage. When the input material has a form of bundle or bundles made of very thin and long shaped wires or fibers, this attenuation operation is called "bundle drawing" or "drafting". Bundle drawing is being used widely in manufacturing micro sized wires or staple yarns. However, the bundle processed by this operation has more or less defects in the evenness of linear density. Such irregularities cause many problems not only for the product quality but also for the efficiency of the next successive processes. In this research a mathematical model for the dynamic behavior of the bundle fluid is to be set up on the basis of general physical laws containing physical variables, i.e. linear density and velocity as the dynamic state variables of the bundle fluid. The governing equations resulting from the modeling show that they appear in a slightly different form from what they do in a continuum fluid. Then, the governing equations system is simplified in a steady state and the bundle dynamics is simulated, showing that the shape of the velocity profiles depends on two model parameters. Experiments confirm that the model parameters are to be well adjusted to show a coincidence with the theoretical analysis. The higher the drawing ratio and drawing speed are, the more sensitive becomes the bundle flow to exogenous disturbances.

#### 기호설명

- $L$  : 인발 게이지
- $n(t, x)$  : 시각  $t$ , 위치  $x$  에서 집속체 구성 섬유 수
- $v_i(t, x)$  : 시각  $t$ , 위치  $x$  에서 집속체 내  $i$ -번째 섬유  
의 속도
- $v(t, x)$  : 시각  $t$ , 위치  $x$  에서의 집속체 평균 속도
- $l_n(t, x)$  : 시각  $t$ , 위치  $x$  에서 집속체 내  $i$ -번째 섬유  
의 선밀도
- $l_b(t, x)$  : 시각  $t$ , 위치  $x$  에서 집속체의 선밀도

#### 1. 서론

일반적으로 선재를 생산하는 분야에서는 굵기가 얇은 원재료의 형상을 가늘고 길게 변형시키기 위하여 일정 공정 구간에서 원재료의 공급속도보다 방출속도를 크게 하고, 동시에 재료의 굵기 변화가 목적에 맞게 이루어지도록 보조장치를 부착하는 기계적 조작이 이루어지는데, 이러한 조작을 인발(drawing)이라고 한다.<sup>(1)</sup> 대부분의 인발은 연속 조작과 선재를 원하는 굵기로 가공하기 위하여 다이/롤러(Die/Roller) 시스템을 이용하거나, 공급/권취 롤러 시스템을 이용한다. 다이/롤러 시스템에서는 원료 선재를 일정 직경크기의 다이에 인입하고 권취 롤러로써 방출되는 가공선재에 인장력을 부여하여 권취하거나, 공급/권취 롤러 시스템에서는 공급 롤러와 권취 롤러의 선

\* 책임저자, 회원, 경희대학교 기계산업시스템공학부  
E-mail : huhyou@khu.ac.kr  
TEL : (031)201-2516 FAX : (031)202-8106

\* 경희대학교 대학원 섬유공학과

속도 비를 이용하여 인발 제품의 굵기를 용도에 맞도록 가늘게 만든다. 특히, 공급되는 선재의 굵기가 대단히 가늘고 여러 가닥으로 구성되어 있는 인발 조작용은 집속 인발(bundle drawing)이라고 하며, 공급/권취 롤러 시스템을 이용한 집속 인발 조작용은 롤러 드래프팅(roller drafting)이라고 한다. 롤러 드래프팅은 일정 길이를 갖는 선형 재료, 즉, 스테이플을 주 원료로 하여 이를 혼합, 집속하고, 공정 처리를 다루는 섬유 산업에서 광범위하게 사용되고 있으며, 방직사 생산에 있어 대단히 중요한 조작용이다. 이 조작용은 여러 공정에서 반복 이행되며, 다음 공정에 적합하도록 집속된 스테이플의 굵기를 가늘게 하고, 동시에 집속체의 불균제를 최소화하여 제품의 품질을 결정하는데 결정적 역할을 한다. 드래프팅에 대한 연구는 일찍이 Balls에 의한 '드래프트 파' 개념<sup>(2)</sup>을 시작으로 Grishin,<sup>(3)</sup> Rao<sup>(4)</sup> 등에 의해 길이분포가 있는 원료로 구성된 이상적인 집속체가 롤러 드래프팅을 받을 때 나타나는 굵기 불균제의 발생원인에 대한 연구가 이루어졌으며, 원료의 길이 분포와 공정 조건이 불균제의 발생에 크게 영향을 미치고, 최종 제품의 역학적 성질, 특히 강신도와 상관성이 높다는 사실이 밝혀졌다. 또한 Dutta,<sup>(5)</sup> Mandl<sup>(6)</sup> 등은 공정특성을 파악하고 제어하기 위하여 구성섬유를 일정 길이의 스텝 펄스 형태로 가정하여 드래프트 시스템을 시간 영역에서 이론적으로 모델링하고 스펙트럼 해석을 하였으며, Catling,<sup>(7)</sup> Huh<sup>(8)</sup> 등은 불균제 발생기구의 실험적 모델을 바탕으로 불균제 제어를 위한 제어 시스템의 구축에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 집속체 인발 공정에는 원료 집속체의 길이 분포, 집속도, 인발비, 생산 속도, 인발 게이지 등 원료 및 공정 요인들이 동시에 작용하기 때문에 개별 요인을 독립적으로 다루는 경우, 각 요인간의 교호작용(interaction)에 의한 오차가 커져서 이용하는데 제한적이며, 실험적 모델링은 공정 조건에 따라 반복적으로 이루어져야 하는 어려움이 있다. 한편, Reid,<sup>(9)</sup> Shin<sup>(10)</sup> 등은 집속체의 유동이 일어나는 웹 운반을 대상으로 웹 장력을 일정하게 유지하기 위한 모델링과 장력 제어시스템을 구축하였다. 그러나 이 연구에서는 웹의 변형이 나타나는 구간 내에서 웹의 두께와 속도 분포 상태가 출력 웹의 두께에 미치는 영향을 무시함으로써 장력에 의하여 웹의 두께를 균일하게 유지

하기 어려운 웹 두께의 불균제 파장 범위가 존재하게 된다.

본 연구는 인발 조작용에서 인발 구간 내의 집속 유체 운동을 이론적으로 모델화하기 위하여 질량 평형과 운동량 평형을 바탕으로 구성 모델과 보조 방정식을 도입하였다. 이러한 전체 시스템은 비선형 연립 편미분 방정식계로 표현되므로 일반해를 구하기가 어렵다. 더욱이 집속체의 특성을 나타내는 구성 모델과 보조 방정식에 따라 해를 구하는 방법을 다르게 설정해야 하고, 결과를 실험적으로 확인하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 일반해를 구하기 전에 우선적으로 정상상태에서 집속체의 유동특성이 어떻게 나타나는가를 확인하고자 단순화된 정상상태 모델을 바탕으로 집속체의 속도 및 선밀도 분포를 시뮬레이션하고, 결과를 실험적으로 확인하였다. 또, 인발 조작용에 의한 집속 유체의 동적 거동이 외부 교란에 비교적 강인하게 유지되기 위한 공정 설정과 인발된 집속체의 선밀도 변동을 최소화시키는 모델 파라메타의 조건을 제시하였다.

## 2. 이론적 모델링

### 2.1 가정

인발에 의한 집속체 유동계의 동적 거동을 모델링하기 위하여

- (1) 집속체는 평행 배열되어 있는 섬유로 구성되어 있으며,
- (2) 구성섬유의 선밀도는 동일하고,
- (3) 집속 유체에 작용하는 표면력은 구성 섬유 간 마찰력에 의한다.

고 가정한다.

인발 게이지(drawing gauge)가  $L$  인 공급/권취 롤러 구간 내에서 움직이는 집속체를 Fig. 1과 같이 나타내고, 공급 롤러의 중심을 원점으로 하여  $x$  만큼 떨어진 거리에 있는 제어용적(control volume)을 생각하면

$$l_b(t, x) = \sum_{i=1}^{n(t, x)} l_{fi}(t, x) = l_f \cdot n(t, x)$$

로 나타낼 수 있다.

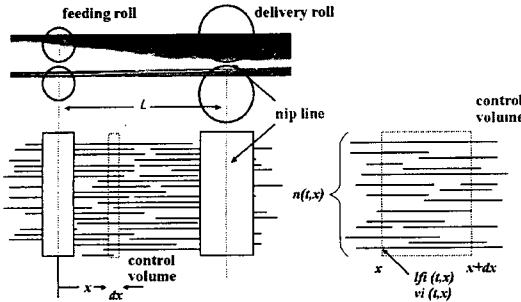


Fig. 1 Schematic description of the bundle drawing

2.2 질량 평형

Fig. 1에 주어진 제어 용적에 대하여, 위치  $x$ 에 있는 표면을 통해 들어가는 집속체의 단위 시간당 질량 유량(mass flow rate)은

$$\sum_{i=1}^{n(t,x)} l_{fi}(t,x) \cdot v_i(t,x) = l_f(t,x) \cdot \sum_{i=1}^{n(t,x)} v_i(t,x)$$

$$= l_f \cdot n(t,x) \cdot \sum_{i=1}^{n(t,x)} v_i(t,x) / n(t,x) = l_b(t,x) \cdot v(t,x)$$

으로 주어진다. 같은 방법으로 위치  $x+dx$ 에 있는 표면을 통해 나가는 집속체의 질량 유량은

$$\sum_{i=1}^{n(t,x+dx)} l_{fi}(t,x+dx) \cdot v_i(t,x+dx) = l_f(t,x+dx) \cdot \sum_{i=1}^{n(t,x+dx)} v_i(t,x+dx)$$

으로 나타낼 수 있다.

따라서, 질량보존에 의하여 연속방정식은

$$\frac{d\left\{ \sum_{i=1}^{n(t,x)} l_{fi}(t,x) \cdot dx \right\}}{dt} = l_b(t,x) \cdot v(t,x) - l_b(t,x+dx) \cdot v(t,x+dx) \quad (1)$$

와 같이 주어지며, 이를 정리하면, 인발 구간 내에서 집속 유체의 선밀도와 평균 속도와의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \{l_b(t,x)\}}{\partial t} = - \frac{\partial \{l_b(t,x) \cdot v(t,x)\}}{\partial x} \quad (2)$$

2.3 운동량 평형

제어 용적에서의 운동량 변화율은 위치  $x$ 의 표면을 통하여 들어오는 단위 시간당 집속 유체의 운동량과 위치  $x+dx$ 의 표면을 통하여 나가는 집속 유체의 단위 시간당 운동량, 그리고 위치  $x$  및  $x+dx$  사이에 작용하는 표면력(surface force)의 합으로 나타낼 수 있으므로 운동방정식은

$$\frac{\partial}{\partial t} \{l_b(t,x) \cdot dx \cdot v(t,x)\}$$

$$= l_b(t,x) \cdot \{v(t,x)^2 + Var[v_i(t,x)]\}$$

$$- l_b(t,x+dx) \cdot \{v(t,x+dx)^2 + Var[v_i(t,x+dx)]\}$$

$$+ f(t,x+dx) - f(t,x) \quad (3)$$

와 같이 주어진다. 이 식을 정리하면 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \{l_b(t,x) \cdot v(t,x)\}$$

$$= - \frac{\partial}{\partial x} \{l_b(t,x) \cdot v(t,x)^2\} - \frac{\partial}{\partial x} \{l_b(t,x) \cdot Var[v_i(t,x)]\} + \frac{\partial f(t,x)}{\partial x} \quad (4)$$

이때,  $Var[v_i(t,x)]$ 는  $(t,x)$ 에서의 집속체 구성섬유의 속도 분산치를 나타낸다.

식 (4)에서 볼 수 있는 바와 같이 운동 방정식의 우변 둘째 항은 연속 유체의 운동 방정식<sup>(11)</sup>에서는 나타나지 않는 항이다. 집속 유체의 경우, 표면력이 유체의 위치에 따른 운동량의 변화뿐만 아니라 구성 섬유간의 속도 분산을 일으키는 데에도 작용한다는 것을 알 수 있다. 이에 따라 선형 운동이 일어나는 집속체의 유동은 연속체의 유동과는 다른 방정식으로 묘사되는 것을 알 수 있다.

2.4 구성모델

주어진 가정에 따라 인발에 의한 집속체의 운동은 구성 섬유간의 마찰력 전달에 의하여 일어난다고 하면, 표면력과 집속체의 변형과의 관계를 나타내는 구성 모델은 다음과 같이 제안할 수 있다; 즉, 집속체의 변형율이 크면 클수록 집속체에 가해지는 표면력도 많이 가해져야 하며, 이와 동시에 집속체의 선밀도가 클수록 집속체에 가해지는 표면력도 크다. 따라서 구성 방정식은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(t,x) = \mu \cdot l_b(t,x) \cdot \left\{ \frac{\partial v(t,x)}{\partial x} \right\} \quad (5)$$

( $\mu$ 는 집속체 구성섬유의 배열 및 표면상태와 내부적 마찰에 관계하는 모델 파라메타)

2.5 속도분산 보조방정식

식 (4)로 주어진 운동 방정식은 구성 섬유간의 속도 분산을 나타내는 항을 포함하고 있으므로 전체 모델에 대한 일반해를 구하기 위해서는 속도분산에 관한 보조방정식이 필요하다.

일반적으로 집속체를 구성하는 개별 섬유의 속도 분산은 섬유 길이의 분포, 표면 성질, 집속체의 구조, 인발 속도, 인발비 등에 크게 영향을 받는다. 만일 균일한 섬유장  $L$ 을 갖는 구성 섬유가 집속체를 구성하고, 인발 구간의 길이를 섬유장과 같도록 설정하여, 인발을 받는 집속체의 구성 섬유는 공급속도  $v(t,0)$  또는 인발속도  $v(t,L)$ 로 움직인다면(2속도 모형), 인발 구간 내에서의 속도 분산은

$$Var[v_i(t,x)] = \frac{\sum_{i=1}^{n(t,x)} [v_i(t,x) - v(t,x)]^2}{n(t,x)} \quad (6)$$

$$= p(t,x)\{v(t,0) - v(t,x)\}^2 + (1-p(t,x))\{v(t,L) - v(t,x)\}^2$$

(단,  $p(t,x)$ 는  $(t,x)$ 에서 제어움직에 포함되는 구성 섬유 중에서 공급속도  $v(t,0)$ 로 움직이는 섬유의 비율.)로 나타낼 수 있으며, 이를 정리하면,

$$Var[v_i(t,x)] = p(t,x) \cdot \{1 - p(t,x)\} \cdot \{v(t,L) - v(t,0)\}^2 \quad (7)$$

이 되고,

$$p(t,x) = (1 - \frac{x}{L}) \text{ for } 0 \leq x \leq L \quad (8)$$

로 나타낼 수 있다. 실제 유동계 내에서는 섬유장은 분포를 하며, 속도는  $v(t,x)$ 로 나타나고, 인발 구간의 양단에 작용하는 파지 물리는 면접촉을 하고 있으므로, 위 식을 감안하여 적용 가능한 별도의 모델이 제시되어야 한다. 따라서 집속체 구성 섬유간의 속도 분산은 집속체의 평균 속도가 크면, 크게 나타나고, 인발 구간의 양단에 작용하는 롤러 파지에 의하여 속도 분산은 zero이므로, 이를 다음과 같이 표현하고,

$$Var[v_i(t,x)] \propto v(t,x) = g(t,x) \cdot v(t,x) \quad (9)$$

$g(t,x)$ 는  $g(t,0) = 0, g(t,L) = 0$ 의 조건을 만족하는 함수로서 이를 규정하는 일반 모델이 요구된다. 본 연구에서는 일반적으로 적용 가능한  $g(t,x)$ 를 찾아보기 전에 단순화 과정에서 적용할 수 있는 단순 모델을 다음 절에서 제시한다.

### 2.6 정상상태 모델 단순화

위에 주어진 식 (2), (4), (5), (9)는 집속 유체의 동적상태를 지배하는 방정식이다. 집속체의 선밀도와 속도는 서로 비선형 연립으로 나타나며, 더욱이 구성 섬유의 속도 분산에 대한 해도 함께 구해야 한다. 이러한 시스템의 해는 수치 해석을

통하여 얻게 되는데, 이를 위해서는 시간  $t$ 와 위치  $x$ 에 대한 마디 간격의 조절과 해의 수렴성을 확인하여야 하므로 많은 시행착오를 반복하여야 하는 어려움이 있다. 본 연구에서는 집속체 유동계의 일반적 거동 특성을 찾기 전에 우선 정상상태에서 구성 섬유의 속도 분산 모델을 도입함으로써 단순화된 집속 유체의 상태가 연속체 유동과 어떻게 다른가를 먼저 찾아보고자 한다.

집속 인발 공정이 정상 상태에서 이루어지는 경우, 시간에 대하여 집속체의 선밀도와 속도의 변화는 일어나지 않으므로

$$\frac{\partial \{l_b(t,x)\}}{\partial t} = 0, \text{ 그리고 } \frac{\partial \{v(t,x)\}}{\partial t} = 0$$

이다. 따라서  $l_b(t,x) = l_b(x), v(t,x) = v(x)$ 로 나타낼 수 있다.

또한, 식 (2)에서

$$\frac{\partial \{l_b(t,x) \cdot v(t,x)\}}{\partial x} = 0,$$

이며, 식 (4), (5)로부터

$$f(t,x) = \mu \cdot l_b(t,x) \cdot \left\{ \frac{\partial v(t,x)}{\partial x} \right\} = l_b(t,x) \cdot v(t,x)^2 + l_b(t,x) \cdot Var[v_i(t,x)] \quad (10)$$

이 된다.

한편, 집속체는 공급 롤러 및 권취 롤러에서 면접촉에 의하여 파지되고, 구성 섬유간의 마찰이 대단히 크므로 인발 파지점 근처에서의 구성 섬유간의 속도 분산은 zero이며, 또, 인발 구간 내의 어떤 위치에서 속도 분산의 최대점이 존재한다고 할 수 있다. 또, 정상상태에서는 시간에 따른 변동이 나타나지 않으므로 집속 유동계의 해를 구하기 쉬운 단순 모델로서

$$g(t,x) = a_0 \cdot (1 - \cos \frac{2\pi}{L}x) \quad (\text{단, } a_0 : a \text{ constant}) \quad (11)$$

로 나타낸다면, 정상상태에서의 집속체의 평균 속도 분포  $v(x)$ 는

$$\mu \cdot \left\{ \frac{dv(x)}{dx} \right\} = v(x)^2 + a_0 \cdot v(x) \cdot (1 - \cos \frac{2\pi}{L}x) \quad (12)$$

을 만족시켜야 하며, 선밀도 분포  $l_b(x)$ 는

$$\mu \cdot \frac{d\{l_b(x)\}}{dx} + a_0 \cdot (1 - \cos \frac{2\pi}{L}x) \cdot l_b(x) = -m_0 \quad (13)$$

(단,  $m_0 = l_b(0) \cdot v(0) = \text{constant}$ )

을 만족시켜야 한다.

식 (12)와 (13)에 무차원 위치 변수  $z$  및 무차원 속도와 선밀도  $V(z), L_b(z)$ 를 도입하면

$$\left\{ \frac{dV(z)}{dz} \right\} = v_e \cdot V(z)^2 + a_e \cdot V(z) \cdot (1 - \cos 2\pi z) \quad (14)$$

$$\frac{d\{L_b(z)\}}{dz} + a_e \cdot (1 - \cos 2\pi z) \cdot L_b(z) = -v_e \quad (15)$$

이 된다. 이때, 무차원 길이  $z$ , 무차원 변수  $V(z)$ ,  $L_b(z)$ , 무차원 모델 파라메타  $v_e$ 와  $a_e$ 는

$$z = \frac{x}{L}, \quad V(z) = \frac{v(z)}{v(0)}, \quad L_b(z) = \frac{l_b(z)}{l_b(0)},$$

$$v_e = \frac{L}{\mu} \cdot v(0), \quad a_e = \frac{L}{\mu} \cdot a_0$$

로 주어진다.

### 3. 시뮬레이션

정상 상태의 인발 조작에서 나타나는 집속체 유동계의 동적 상태를 평균 속도와 선밀도의 분포를 통하여 확인하고자, 식 (14)와 (15)를 바탕으로 시뮬레이션을 통하여 나타날 수 있는 분포 형태를 구하였다. Fig. 2와 Fig. 3는 그 결과를 보여 준다.

Fig. 2에 따르면 인발 구간 내의 집속 유체는 공급 롤러를 지나며 점차 가속이 일어나지만, 경계조건을 만족시키는 모델 파라메타  $v_e$ 와  $a_e$ , 즉, 집속체 성질을 나타내는  $\mu$ 와 집속체의 유동 상태에 의존하는  $a_0$ , 그리고 인발 조건을 나타내는  $L$  값에 따라 가속이 달라지며, 여러 형태의 속도 분포 곡선이 존재하는 것을 볼 수 있다.

집속 유체의 속도 분포 형태는 크게 3가지로 분류할 수 있는데, 1) S-모양의 속도 분포 곡선을 가지며, 권취 롤러에서 속도 기울기가 zero인 경우, 2) S-모양의 속도 분포 곡선을 가지지만 권취 롤러에서 속도 기울기가 나타나는 경우, 그리고 3) 속도 기울기가 권취 롤러에 접근함에 따라 단 순 증가하는 경우로 나눌 수 있다.

모델 파라메타 값에 따라 (1)의 경우에는 변형을 위하여 비교적 큰 힘이 요구되는 집속체에 나타난다. 양단 파지점에서 집속 유체의 변형이 작게 나타나지만, 인발력에 의하여 구성 섬유들의 속도 분산이 커지면서, 집속체가 가속된다.

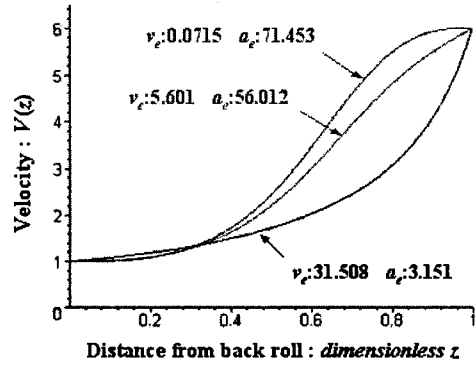


Fig. 2 The profiles of the mean velocity in the drawing zone for various parameter values [l<sub>b</sub>(0)=24g/m, DR=6.0 v(0)=100m/min]

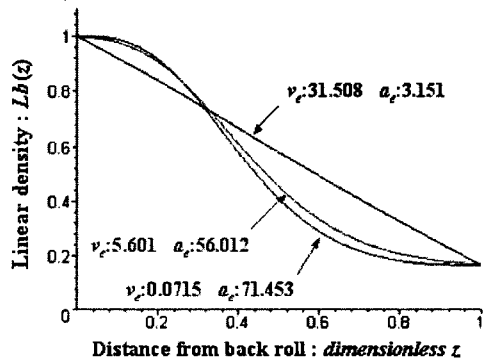


Fig. 3 The profiles of the linear density in the drawing zone for various parameter values [l<sub>b</sub>(0)=24g/m, DR=6.0 v(0)=100m/min]

집속체는 권취 롤러에 도달하기 전에 인발 속도에 거의 도달하게 되며, 권취 롤러의 파지선을 운동 불연속이 없이 통과한다.

반면에 (3)의 경우는 구성 섬유의 미끄럼이 용이하고, 구성 섬유의 속도 분산이 작아서 집속체의 변형이 비교적 균일하게 나타난다. 그 결과, 가속이 서서히 이루어져서 권취 롤러에 다가감에 따라 지속적으로 속도가 증가하며, 파지선을 통과하는 순간에는 일정한 속도로 회전하는 권취 롤러에 의하여 가속도가 급격히 zero로 변하게 된다. 따라서 권취 롤러 근처에서 집속 유체의 가속도 불연속이 발생하게 되어 교란이 나타나기 쉬운 것을 알 수 있다. (2)의 경우는 모델 파라메타 값이 (1)과 (3)의 중간에 위치는 경우에 해당되며, (1)의 경우와 유사한 속도 분포 곡선을 가지지만, (3)의 경우와 같이 집속체가 권취 롤러에

다가감에 따라 가속 상태가 지속되어 파지선을 통과하는 순간에 가속도 불연속이 나타난다.

한편, Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 집속 유체의 선밀도 분포는 인발력이 크게 필요한 집속체일수록 역 S형태의 분포를 하게 되고, 공급 롤러 및 권취 롤러 근처에서 선밀도 변화가 작아지는 것을 알 수 있다.

일반적으로 인발 공정을 거친 출력 집속체의 선밀도는 권취 롤러 근처에서의 집속체 선밀도에 의하여 결정된다고 생각할 수 있다. 따라서 공정 중 외부 교란에 의하여 모델 파라메타에 변화가 생기거나, 경계조건의 변동이 발생하더라도 출력 집속체의 선밀도 변동을 최소화 하려면, 권취 롤러 근처에서의 집속체의 선밀도 변화가 작도록 공정 조건을 설정하는 것이 좋다. 즉, 모델 파라메타  $v_e$ 는 작게 설정하고,  $a_e$ 는 크게 하는 것이 집속 유체가 외부 교란에 강인하다는 것을 의미한다.

#### 4. 실험

##### 4.1 인발 장치

롤러를 이용한 인발은 공급 롤러의 선속도에 비하여 권취 롤러의 선속도를 크게 설정하여 입력에 비하여 출력의 선밀도를 작게 함으로써 원하는 굵기를 얻게 된다. 실제 집속 인발을 위한 장치는 다중 스펀 롤러 쌍으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 Fig. 4에 주어진 바와 같이 3개의 롤러 쌍으로 구성된 인발 장치를 제작하여 집속 유체의 동특성 실험 대상으로 이용하였다.

각 롤러 쌍의 하부 롤러는 서보 모터에 의하여 구동되며, 상부 롤러는 집속체 파지를 위한 아이들 압력 롤러 (idle pressure roller)이다. 입력 롤러와 미들 롤러 사이의 집속 유동계는 공급되는 집속체에 초기 긴장을 일으키는 파단 인발 (break draft)을 가하고, 미들 롤러와 권취 롤러 사이의 유동계에서 주 인발(main draft)이 이루어진다.

##### 4.2 실험조건

본 실험에는 평균 길이 27.5mm인 섬유로 이루어진 평균 선밀도 3.2g/m 집속체를 원료로 사용하였으며, 인발 조건은 Table 1에 주어진 바와 같다.

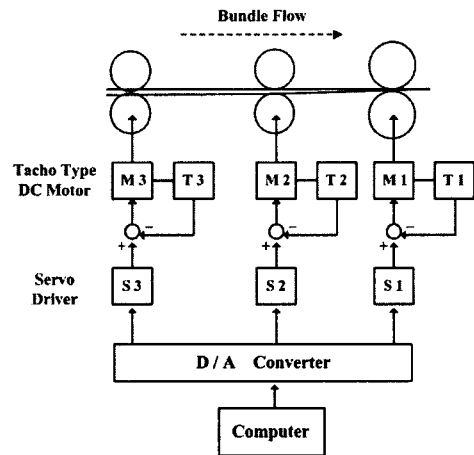


Fig. 4 Block diagram of the experimental roll draft system

Table 1 Experimental process conditions of bundle drawing system

Drawing gauge length (mm)	break	45
	main	40
Drawing ratio	break	1.32
	main	5.7
	total	7.5
Delivery speed (m/min)		68.1
		107.6
No. of input bundles		7
Linear density of the input bundle (g/m)		22.4

##### 4.3 선밀도 분포 측정

인발 중의 집속 유체의 속도 분포는 인발 게이지가 작고, 롤러에 의하여 측정 장치의 설치 공간이 제한되며, 웹의 인장 변형이 연속적으로 나타나기 때문에 측정하기가 대단히 어렵다. 그러나 정상 상태에서는 집속 유체의 선밀도 분포 측정이 비교적 용이하고, 선밀도 분포로부터 속도 분포를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 집속체 유동 모델을 확인하기 위하여 선밀도 분포,  $lb(x)$ 를 절단 중량법 (cutting and weighing method)에 의하여 측정하였다. 정상 상태에서 가동이 되고 있는 인발 장치를 급정지하고, 인발 구간 내의 집속체를 시료로 채취한 후, 중량 측정 시료의 길이를 변화시키며, 각 시료 길이  $\Delta x$ 에 대한 중량  $\Delta G(x)$ 를 측정하여, 선밀도  $\Gamma(x)$ 를 구하고, 시료

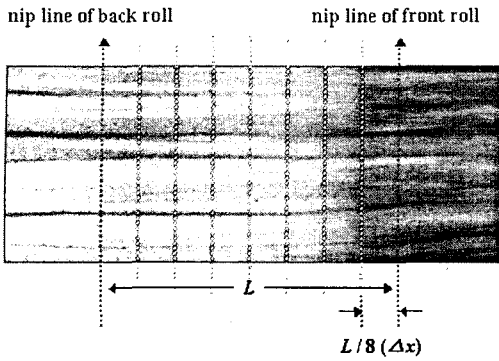


Fig. 5 The cut interval of the bundle sampled in the main drawing zone

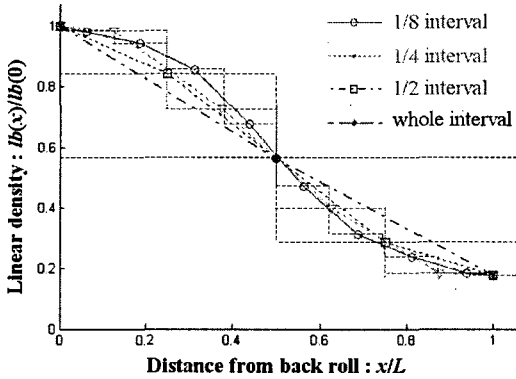


Fig. 6 The linear density profiles for various length of specimen(L=40mm, v(0)=12.2m/min, DR=5.7)

길이를 점차 작게 함으로써 근사화를 통하여 선 밀도 분포  $lb(x)$ 를 얻었다.

$$lb(x) \equiv \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \Gamma(x) \cong \frac{\Delta G(x)}{\Delta x}$$

이를 위하여 Fig. 5와 같이 인발 구간을 1/2, 1/4, 1/8 등 소구간( $\Delta x$ )으로 나누어 각각의 무게 ( $\Delta G(x)$ )를 측정하였다. Fig. 6은 시료 크기가 작아짐에 따라 선밀도 분포 곡선이 근사화 되어가는 과정을 보여준다.

### 5. 결과 및 고찰

집속 인발 구간 내에서의 집속체의 선밀도 분포에 대한 실험 결과는 Fig. 7에 주어진 점선과 같다. 이 결과에 의하면, 공급 롤 근처에서는 선

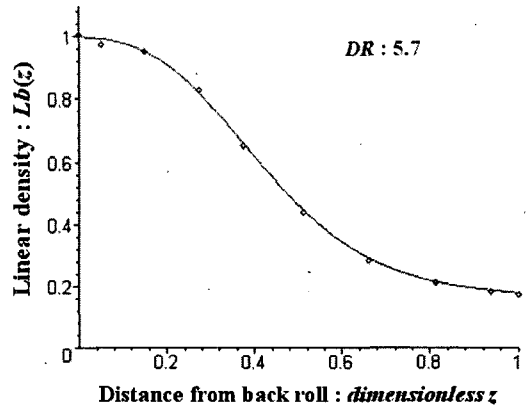


Fig. 7 Experimental and theoretical profiles of the bundle linear density(DR=5.7,  $v_e=0.132$ ,  $a_e=1.362$ )

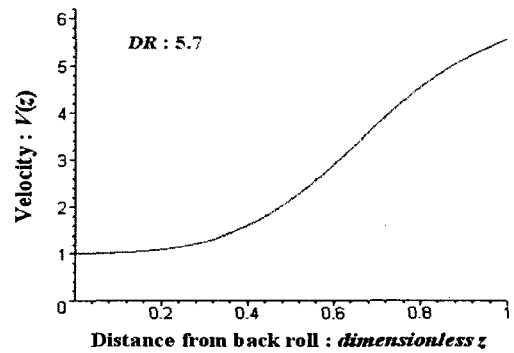


Fig. 8 Theoretical profiles of the mean velocity of the bundle(DR=5.7,  $v_e=0.132$ ,  $a_e=1.362$ )

밀도가 서서히 작아지다가 인발 구간에 점차 진입함에 따라 선밀도 저하가 점점 커져서 권취 롤을 빠져 나가기 전에 이미 출력 집속체의 선밀도에 거의 도달하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7에서 점선으로 표시된 실험 결과를 바탕으로 이와 근사한 선밀도 분포를 보이는 이론 모델의 시뮬레이션 결과는 곡선으로 표시되어 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 이론적 모델을 바탕으로 한 선밀도 분포곡선은 실험결과와 잘 일치한다.

선밀도 분포 시뮬레이션에서 유효하게 추정된 파라미터  $a_e$ 를 이용하여 이론적 속도 분포 모델에 대입하여 얻은 시뮬레이션 결과는 Fig. 8에 주어져 있다. Fig. 8에 의하면 집속체가 인발됨에 따라 집속체의 속도는 점차 증가되어 인발 구간

내에서 S형상의 속도 분포를 보인다.

그러나 권취 롤러의 파지선 근처에서는 속도 분포 곡선의 기울기가 zero가 되지 않는다. 즉, 실제 인발 공정에서는 집속체가 권취 롤러를 통과할 때, 가속도 불연속에 의하여 jerk가 발생하게 되는 것을 알 수 있다.

5.1. 인발 속도의 영향

일반적으로 인발 공정의 생산성을 증대시키기 위해서는 인발 속도를 크게 하므로써 얻을 수 있다. 그러나 집속체 구성 섬유간의 마찰이 속도의 의존성을 가지므로 집속체 유동에서의 속도 및 선밀도 분포는 인발 속도에 영향을 받을 수 있다. 본 연구에서는 이를 확인하기 위하여 동일 인발비 5.7에서 집속체의 인발 속도를 68.1m/min, 107.6m/min(집속체 공급속도는 각각 12.2m/min, 18.85m/min)로 달리하는 경우, 속도에 따른 집속체의 속도 및 선밀도 분포를 살펴보았다.

선밀도의 경우, Fig. 9가 보여주는 바와 같이 실험 및 시뮬레이션(점선 및 곡선)에 따라 선밀도 분포는 인발 속도에 따라 차이가 나타남을 확인할 수 있다. 즉, 인발 속도가 커지면, 공급 롤러 근처에서 조기에 집속체가 가늘어 지지만, 집속체가 빠른 속도로 움직임에 따라 인발 구간의 중앙부에서는 집속체가 충분히 가늘어지지 못하고,

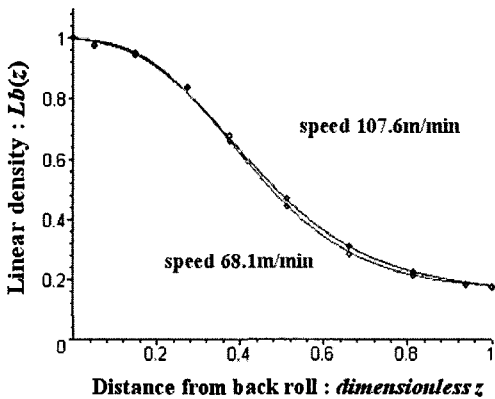


Fig. 9 Experimental and adjusted profiles of the dimensionless linear density for different delivery speeds( $v_e=0.132$ ,  $a_e=1.362$  for  $v(L)=68.10$ m/min,  $v_e=0.203$ ,  $a_e=1.195$  for  $v(L)=107.6$ m/min)

권취 롤러 가까이 다가감에 따라 조건에 맞는 굵기로 변환됨을 알 수 있다. 이는 Fig. 10에서와 같이 무차원 속도 분포 곡선에서 확인될 수 있다. 무차원 속도 분포 곡선을 실제 속도 크기로 나타내면(Fig. 11), 인발 구간 내에서의 집속체의 속도 분포가 인발 속도에 따라 뚜렷이 다르게 나타난다. 또, 인발 속도가 커짐에 따라 권취 롤러 근처에서의 속도 기울기가 커지고, 따라서 외부 교란에 대하여 출력 집속체의 선밀도가 쉽게 변동할 수 있음을 예상할 수 있다.

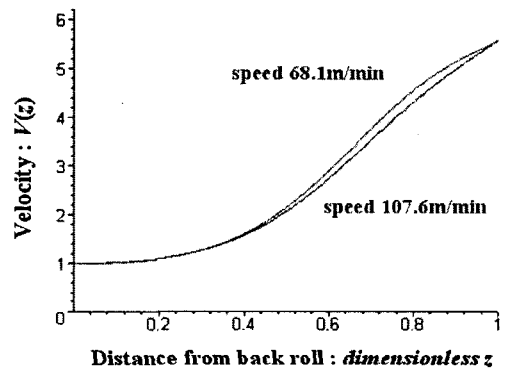


Fig. 10 Theoretical profiles of the dimensionless mean velocity for different delivery speeds ( $v_e=0.132$ ,  $a_e=1.362$  for  $v(L)=68.10$ m/min,  $v_e=0.203$ ,  $a_e=1.195$  for  $v(L)=107.6$  m/min)

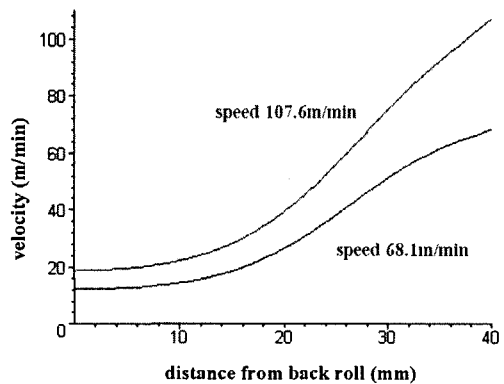


Fig. 11 Theoretical profiles of the mean velocity of the fiber bundle for different delivery speeds( $L=40$ mm,  $DR=5.7$ ,  $\mu=3700$ m<sup>2</sup>/min,  $a_0=126.0$  for  $v(L)=68.10$  m/min,  $a_0=110.5$  for  $v(L)=107.6$  m/min)



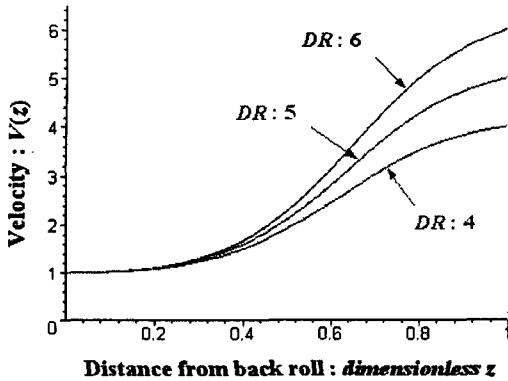


Fig. 12 The profiles of the mean velocity in the draft zone for various draft ratios(DR=4,  $v_e=0.1$ ,  $a_e=1.166$ , DR=5,  $v_e=0.1$ ,  $a_e=1.355$ , DR=6,  $v_e=0.1$ ,  $a_e=1.506$ )

## 5.2 인발비의 영향

인발 공정에서는 주어진 원료 집속체를 이용하여 서로 다른 선밀도를 갖는 여러가지 집속체를 생산해야 하는 경우가 많다. 이러한 경우에는 인발비를 달리하며 원하는 집속체의 선밀도를 얻어야 한다. 본 연구에서는 인발비가 인발 구간 내에서의 집속체 유동에 어떠한 영향을 미치는가를 확인해 보았다. Fig. 12와 Fig. 13은 각각 속도 분포 및 선밀도 분포 결과를 보여준다.

Fig. 12에 의하면, 주어진 원료 집속체와 공정 조건 하에서 인발비가 커짐에 따라 인발 구간 내에서의 속도가 급격히 증가하는 분포 형태를 가지며, 권취 롤러 근처에서의 속도 기울기가 커진다. 이는 인발비가 커질수록 집속체가 권취 롤러 파지선을 통과하며 발생할 수 있는 jerk가 커진다는 것을 말한다. 따라서 인발비를 크게 하는 경우에는 집속체 구성 섬유들의 동적 안정성을 확보할 수 있도록 집속체의 성질과 공정 조건을 설정하는 것이 중요한 과제가 된다.

한편, 인발 구간 내의 집속체 선밀도 분포는 Fig. 13과 같이 서로 다른 인발비에 대하여 역 S형상을 가지며, 인발비의 크기에 따라 선밀도 분포 곡선이 순차적으로 아래쪽에 위치한다. 이는 인발 구간 내의 위치에 따른 순간 인발비는 단순 증가한다는 것을 의미한다. 인발에 의하여 집속체의 정상 유동이 이루어지는 경우, 시뮬레이션 (Fig. 2, Fig. 3) 및 실험 결과 (Fig. 7, Fig. 9)에 따르면 유동 구간 내에서의 속도분포는 크게 3가지 형태

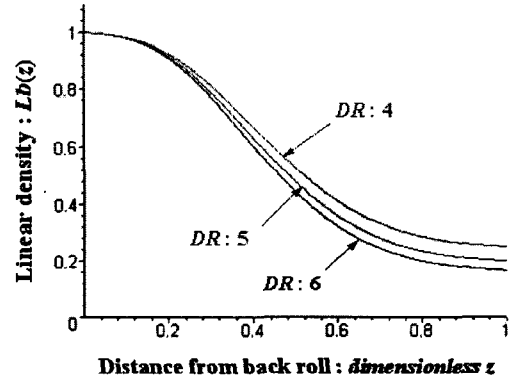


Fig. 13 The profiles of the linear density in the draft zone for various draft ratios(DR=4,  $v_e=0.1$ ,  $a_e=1.166$ , DR=5,  $v_e=0.1$ ,  $a_e=1.355$ , DR=6,  $v_e=0.1$ ,  $a_e=1.506$ )

로 나타나며, 공정 파라메타의 변화를 일으키는 외부 요인이나 집속체의 성질에 변화가 생기면, 출력 집속체의 선밀도 변동을 최소화하기 위해서 권취 롤러 근처에서의 집속체의 선밀도 변화가 작도록 공정 조건을 설정하는 것이 유리하다. 이는 곧, 모델 파라메타  $v_e$ 는 작게 유지하고,  $a_e$ 는 크게 선정하는 것이 공정 요인에 강인하다는 것을 의미한다. 더우기, 인발 속도와 인발비가 커지면 권취 롤러 근처에서의 집속체의 선밀도 변화가 커지므로, 이러한 공정 조건 및 집속체 물성의 선택이 더욱 중요해진다.

## 6. 결론

본 연구에서는 집속체 인발 공정을 집속 유동계로 다루어서 인발 조작을 이론적으로 모델화하기 위하여 연속 방정식과 운동 방정식을 유도해 본 결과, 지배 방정식계를 완성하기 위하여 구성 모델에 더하여 연속체 유동에서는 나타나지 않는 집속체 구성요소의 속도 분산에 대한 정보를 제공하는 보조 방정식이 필요함을 확인하였다.

정상상태에서 적용할 수 있는 단순화된 공정모델을 설정하고, 인발 구간 내에서의 집속체 평균 속도 및 굵기의 분포를 해석하기 위하여 정상 상태에서 집속체 구성섬유의 속도분산이 속도에 비례하고, 인발 위치에 따라 sinusoidal form으로 가정한 경우, 속도 및 선밀도 분포에 영향을 미

치는 모델 파라메타가 2개 존재하며, 이를 추정하여 모델에 도입한 결과, 시뮬레이션과 실험적 결과가 잘 일치함을 확인하였다.

인발 구간 내에서의 집속체는 인발이 진행됨에 따라 S-형태의 속도 분포를 가지며, 선밀도는 단순 감소한다. 그러나 권취 롤러의 파지선 근처에서 속도 기울기에 불연속이 생겨서 jerk가 발생하며, 이러한 동적 불연속성은 인발 속도와 인발비가 커짐에 따라 증가하였다. 따라서, 외부 교란이나 집속체의 성질 변화가 출력 집속체의 선밀도 변동에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 모델 파라메타를 활용하여 공급 속도를 작게 하고, 속도 분산을 크게 설정하며, 구성 섬유의 성질(배열, 표면상태, 마찰성 등)이 일정한 집속체를 선택하는 것이 좋다는 것을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2004-000-10690-0) 지원으로 수행되었으며 당 재단의 지원에 감사드린다.

## 참고문헌

- (1) Kalpakjian, S. and Schmid, S.R., 2001, "Manufacturing Engineering and Technology," *Prentice Hall International*, p. 369.
- (2) Balls, W.L., 1928, "Studies of Quality in Cotton," MacMillan and Co., Ltd., London, p. 122.
- (3) Grishin, P.A., 1954, "Theory of Drafting and Its Practical Applications," *J.T.I.*, Vol. 45, pp. 167~266.
- (4) Rao, J.S., 1961, "A Mathematical Model to the Ideal Sliver and Its Application to the Theory of Roller Drafting," *J.T.I.*, Vol. 52, pp. 571~601.
- (5) Dutta, B. and Grosberg, P., 1973, "The Dynamic Response of Drafting Tension to Sinusoidal Variations in Draft Ratio under Conditions of Sliver Elasticity in Short-staple Drafting," *J.T.I.*, Vol. 64, pp. 534~540.
- (6) Mandl, G. and Noebauer, H., 1977, "The Influence of Cotton-Spinning Machinery on the Random Irregularity of Sliver and Yarns - Part I, II, III," *J.T.I.*, Vol. 68, pp. 387~393, 394~399, 400~406.
- (7) Catling, H. and Davies, I., 1966, "Conservation of Mean Level in Autolevelling," *J.T.I.*, Vol. 57, pp. 395~415.
- (8) Huh, Y. and Woo, J.L., 1993, "Identification of the Dynamic Behavior of Sliver by the Roller Drafting (I)," *J. Korean Fiber Soc.*, Vol. 30, pp. 527~536.
- (9) Reid, K.N. and Lin, K.C., 1995, "Control of Longitudinal Tension in Multi-span Web Transport Systems during Start Up," *Proceedings on Internal Conference on Web Handling*, pp. 77~95.
- (10) Shin, Kee-Hyun, 1995, "Variable-Gain PID Control of Longitudinal Tension in a Web Transport System," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 19, No. 3, pp. 724~730.
- (11) Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N., 1960, "Transport Phenomena," *John Wiley & Sons*, New York and London, p. 78.