

점탄성 유체의 용융방사공정의 동특성

I. 정상상태의 방사사선의 거동

김주환* · 김병민 · 이상현 · 유병규 · 현재천

고려대학교 화학공학과

*SKC 연구소

(1993년 3월 8일 접수, 1993년 6월 25일 채택)

Dynamic Characteristics of the Melt Spinning of Viscoelastic Fluids

I. Steady State Behavior of the Spinline

Joo Hwan Kim*, Byung Min Kim, Sang Heon Lee, Byung Kyu Yoo and Jae Chun Hyun

Department of Chemical Engineering, Korea University

*R&D Center, SKC Co., Ltd.

(Received 8 March 1993; accepted 25 June 1993)

요 약

합성섬유 제조의 가장 중요한 공정인 용융방사공정의 동특성을 모사를 통해 고찰했다. 연속방정식, 운동식, 에너지식, 그리고 물질의 구성방정식으로 구성된 일차원 모델을 이용한 지배방정식을 물질상수와 운전조건을 바꾸면서 풀어, 실제 공장에서 중요하게 인식되는 공정조건들의 방사사선에 미치는 영향을 알아봤다. 모사를 통한 이러한 예측은 공정의 안정성과 품질로 대표되는 생산성 향상에 필수적인 정보를 제공해 준다. 특히 방사속도, 냉각조건, 방사길이 등의 운전조건과 점탄성 유체의 특성이 방사공정을 어떻게 좌우하는지를 본 연구에서 다루었다.

Abstract—Dynamic characteristics of melt spinning, the most important process in synthetic fibers manufacturing, has been investigated by conducting a simulation. The governing equations of one-dimensional model comprising the continuity equation, the equation of motion, the energy equation, and the constitutive equation of the materials, have been solved for different material constants and different operating conditions to find out the effect of the industrially important operating variables on the spinline dynamics. This kind of prediction through a simulation provides valuable information to the productivity improvement of melt spinning, i.e., process stability and product quality. Specifically, in this study we evaluated how the spinning process is influenced by the characteristics of viscoelastic fluids and the operating conditions such as spinning velocity, cooling conditions, spinning distance, and so forth.

1. 서 론

용융방사공정은 용융된 고분자 물질을 spinneret를 통해서 압출시킨 후 냉각공기를 불어서 냉각시키고, 압

출속도보다 빠른 속도로 take-up에서 잡아 당김으로써 방사사선에서 신장유동을 유발시키고, 그 결과 filament내의 분자배향의 축진을 통해서 제품의 물리적 성질 등을 좋게 만드는 공정이다. 합성섬유중에서 가장 대

표적이라고 할 수 있는 폴리에스터와 나일론이 이 방법에 의해서 생산되므로, 용융방사 공정은 오래 전부터 실험실과 공장현장에서 공히 많은 연구가 진행돼 왔다. 그러나 위에서 간단히 기술한 바와 같이 용융방사에서는 신장변형(extensional deformation)과 열전달(heat transfer)과 고형화(solidification)에다 배향(orientation)과 결정화(crystallization)도 같이 발생하므로, 단순한 전달현상(transport phenomena) 뿐만 아니라 유변학(rheology), 형구학(morphology), kinetics를 같이 다루어야 하기 때문에, 아직도 완전한 이론적 이해가 이루어져 있지 않고 연구가 계속 진행되고 있다.

방사공정의 이론적 연구는 Ziabicki[1]에 의해서 시작됐다. 최초로 지배방정식들을 사용해서 공정의 동역학(dynamics)의 기본을 수립했고, 많은 공정상의 변화에 대해서 체계적인 분석을 했다. 방사사선(spinline or threadline)에 미치는 공기의 마찰 항력과 직각으로 붙어주는 냉각공기에 의한 열전달의 모델링은 Kase와 Matsuo[2]에 의해서 처음 수식화되어 지배방정식에 포함되었다. 또한, 모델링에서 중요한 것중의 하나인 고분자 용융체에 대한 유변학적 묘사(rheological representation)를 위해서, 가장 간단한 Newton 유체로부터 power-law 유체를 거쳐 본체적인 점탄성 유체(viscoelastic fluids)의 모델에 이르는 많은 식들중에서 실제 공정에 가장 잘 맞는 식을 찾는 노력이 계속되고 있다. 이것은 바로 유변학의 최근 발전사라고 그대로 일치하는 것으로, 물질에 가장 적합한 구성방정식(constitutive equation)-혹은 유변방정식(rheological equation)-을 만드는 연구가 그 요체가 된다.

방사공정에서 또 한 가지 중요한 것은 최근 유변학에서도 그 중요도가 크게 부각되고 있는 신장유동(extensional or elongational flow)이다. 전통적으로 유체역학 등에서 중요시 됐던 전단유동(shear flow)만으로는 신장변형으로 특징지어지는 방사공정을 설명할 수 없음을 자명한 일이다. 따라서 신장유동에 맞는 유변학적 모델링과 유변학적 분석이 방사공정의 연구에 필수가 된다 이러한 맥락에서 점탄성 유체를 나타내는 대표적인 모델의 하나인 White-Metzner 모델을 써서 White[3]가 방사공정의 동특성에 대한 연구를 했고, 그 후 Denn 등[4]도 같은 모델을 가지고 많은 연구를 수행했다.

방사공정에서 중요한 것들중에서 끝으로 한 가지만 더 거론하면, 그것은 공정의 안정성(stability) 문제다. 많은 공정들과 마찬가지로 방사공정도 그 속도를 높이면 불안정하게 되는데, 특히 권취점(take-up)에서의 속도를 높여서 연신률(draw ratio)을 어느 한계 이상으로 크게 하면, 연신공명(draw resonance)이라 불리는 독특한 불안정성이 발생한다. 실제 공정에서도 생산성 향상에

상한점 구실을 하는 이 불안정성은 이론적으로도 재미있는 과제로, Pearson과 Matovich[5]가 최초로 분석한 이래, 많은 이론적 결과(예를 들면, Denn과 Fisher[6], Hyun[7])와 실험적 결과(예를 들면, Donnelly와 Weinberger[8], Matsumoto와 Bogue[9])가 발표됐다.

이러한 방사공정의 일반적인 설명을 배경으로, 본 연구에서는 변형률 속도(strain rate)에 따라 변하는 물질의 풀림시간(relaxation time)을 갖는 구성방정식을 포함하는 지배방정식을 사용해서, 물질상수와 공정변수들의 방사공정에 미치는 영향을 중심으로 방사공정의 정상상태에서의 동특성을 고찰한다.

2. 지배방정식

용융방사공정의 지배방정식들을 다음과 같은 가정 아래서 구성하기로 한다(Hyun과 Ballman[10] 또는 Mewis와 Petrie[11]). (1) 방사사선의 단면적 방향으로 유체의 속도분포, 온도분포, 응력분포가 일양하고, 따라서 방사거리 좌표만 고려한 일차원 모델(one-dimensional model)을 채택한다. (2) 거리방향 좌표의 원점은 extrudate swell(혹은 die swell이라고도 함)이 생기는 점으로 한다(이 가정은 결국 spinneret 이전의 유체의 유동과 이에 수반하는 extrudate swell을 본 모델에서는 포함하지 않는 것을 의미한다.). (3) 방사사선의 응력은 방사거리 방향의 normal stress만을 고려한다(단면적 방향의 stress equation은 지배방정식에서 제외한다.). (4) 방사되는 유체는 비압축성이다.

위와 같은 가정들을 사용한 용융방사공정의 지배방정식들은 다음과 같다.

연속식:

$$\left(\frac{\partial A}{\partial t}\right)_x + \left(\frac{\partial(AV)}{\partial X}\right)_t = 0 \quad (1)$$

운동식:

$$\rho A \left[\left(\frac{\partial V}{\partial t}\right)_x + V \left(\frac{\partial V}{\partial X}\right)_t \right] = \left(\frac{\partial(A\sigma)}{\partial X}\right)_t + \rho g A - 2D_r \sqrt{\pi A} \quad (2)$$

에너지식:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_x + V \left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)_t = \frac{2\sqrt{\pi h}(T_a - T)}{\rho C_p \sqrt{A}} \quad (3)$$

구성방정식:

$$\sigma + \lambda \left[\left(\frac{\partial \sigma}{\partial t}\right)_x + V \left(\frac{\partial \sigma}{\partial X}\right)_t - 2\sigma \left(\frac{\partial V}{\partial X}\right)_t \right] = 2G\lambda \left(\frac{\partial V}{\partial X}\right)_t \quad (4)$$

유체의 풀림시간:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{1 + a\lambda_0\sqrt{3\dot{\epsilon}}} \quad (5)$$

유체 풀림시간의 온도의존식:

$$\lambda_0 = \frac{\mu_0}{G} = \frac{\mu_{00}}{G} \exp\left[\frac{E}{RT_0}\left(\frac{T_0}{T} - 1\right)\right] \quad (6)$$

여기서

A = 방사사선의 단면적

T = 방사사선의 온도

σ = 방사사선의 응력(stress)

X = 방사거리 좌표

λ_0 = 변형이 없을 때의 유체의 풀림시간

V = 방사사선의 속도

T_0 = 냉각공기의 온도

t = 시간

λ = 유체의 풀림시간

G = 유체의 modulus

$\dot{\epsilon} = \left(\frac{\partial V}{\partial X}\right)_t$ = 방사선의 변형률 속도(속도기울기)

a = 유체의 풀림시간의 변형률 속도에 대한 의존도를 나타내는 상수

h = 방사사선과 냉각공기 사이의 열전달 계수

ρ = 유체의 밀도

D_f = 단위표면적의 공기마찰 항력

T_0 = 기준온도

μ_{00} = 온도 T_0 에서의 유체의 점도

R = 기체 상수

C_p = 유체의 열용량

g = 중력 가속도

μ_0 = 온도 T에서의 유체의 점도

E = 점도의 활성화에너지

또한 열전달 계수와 공기마찰 항력은 다시 아래와 같은 실험식으로 표현된다. Kase와 Matsuo[2]에 의하면 열전달 계수는 다음과 같고,

$$h = 0.473 \times 10^{-4} A^{-1/3} V^{1/3} \left[1 + \left(\frac{8V_f}{V} \right)^2 \right]^{1/6} \quad (7)$$

여기서 V_f = 방사선에 직각으로 붙어주는 냉각공기의 속도다.

공기마찰 항력(air drag)은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} D_f &= \frac{\rho_f V_f^2}{2} C_f = \frac{\rho_f V_f^2}{2} [0.65(\text{Re}^*)^{-0.8}] \\ &= \frac{\rho_f V_f^2}{2} \left[0.65 \left(\frac{2V\sqrt{A}}{v\sqrt{\pi}} \right)^{-0.8} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Table 1. The material constants and the reference spinning conditions

$a = 0.4$	$r = 40$
$\mu_x = 2.0 \times 10^4 \text{ g/cm} \cdot \text{sec (at } 220^\circ\text{C)}$	$A_0 = 1.14 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$
$G = 4.0 \times 10^6 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}^2$	$V_0 = 20 \text{ cm/sec}$
$E = 4600 \text{ cal/mol}$	$A_L = 2.85 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$
$\rho = 0.83 \text{ g/cm}^3$	$V_L = 800 \text{ cm/sec}$
$C_p = 0.7 \text{ cal/g} \cdot \text{K}$	$L = 50 \text{ cm}$
	$T_0 = 220^\circ\text{C}$
	$T_a = 25^\circ\text{C}$
	$V_y = 100 \text{ cm/sec}$

여기서

C_f = 마찰계수

Re^* = 공기 흐름의 Reynolds number

ρ_f = 공기의 밀도

v_f = 공기의 kinematic viscosity

결국 위에서 설명한 가정 아래서 용융방사공정을 설명하는 지배방정식들은 식 (1)부터 (8)까지의 식들로 구성된다. 따라서 방사공정의 동특성을 알아보기 위해선 유체의 물질상수들과, 방사공정의 운전조건들을 위 지배방정식들에 넣어서 해를 구하는 모사를 수행해야 된다.

본 연구에서는 정상상태의 방사사선의 거동을 고찰함으로 식 (1)-(4)에 있는 시간에 대한 도함수 항들을 영(零)으로 놓고 풀었다. 방정식들을 푸는 순서는 먼저 속도 profile를 가정해서 연속식, 운동식, 에너지식들로부터 단면적, 응력, 온도, profiles를 구한 후, 구성방정식으로부터 구해지는 속도가 가정한 속도에 수렴할 때까지 초기 응력값을 변화시키면서 반복 계산한다.

Table 1에 설명해 있는 조건들을 가지고 방사공정을 실행했을 때를 기준으로 택했고, 조건을 달리했을 때의 각각의 경우를 이 기준과 비교함으로써 각 조건이 방사공정에 미치는 영향을 고찰했다(따라서, 아래에서 같다, 다르다고 표현한 것은 이 기준과 비교한 조건들을 의미한다.).

Case 1: Spinneret에서의 같은 단면적, 다른 속도(다른 압출량); take-up에서의 같은 단면적, 다른 속도-연신률과 단면적은 일정하고 spinneret과 take-up에서의 속도만 바뀌었을 때, 방사속도 변화의 영향을 고찰하기 위한.

Case 2: Spinneret에서의 다른 단면적, 다른 속도(같은 압출량); take-up에서의 같은 단면적, 같은 속도-take-up의 조건은 일정하고 spinneret의 조건만 바뀌었을 때, 연신률 변화의 영향을 고찰하기 위한.

Case 3: Spinneret에서의 같은 단면적, 같은 속도(같은 압출량); take-up에서의 다른 단면적, 다른 속도-spinneret의 조건은 일정하고 take-up의 조건만 바뀌었을 때,

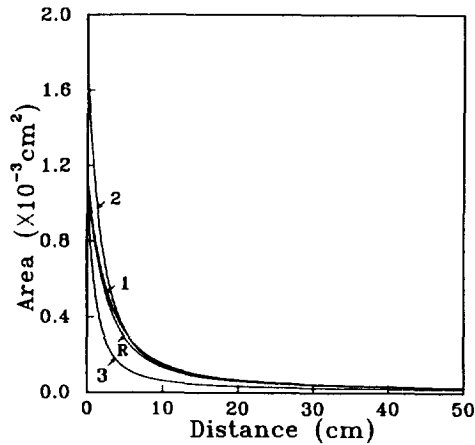


Fig. 1. Threadline cross-sectional area plotted against spinning distance for the reference conditions and cases 1-3.

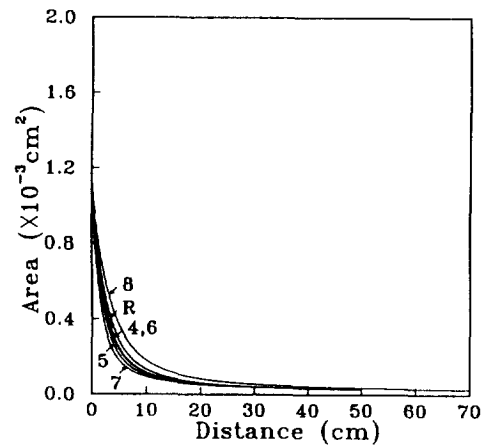


Fig. 2. Threadline cross-sectional area plotted against spinning distance for the reference conditions and cases 4-8.

연신률 변화의 영향을 고찰하기 위함.

Case 4: 냉각공기의 온도의 영향을 고찰하기 위함.

Case 5: 냉각공기의 속도의 영향을 고찰하기 위함.

Case 6: Spinneret 온도의 영향을 고찰하기 위함.

Case 7: 유체 점도(혹은 풀림시간)의 영향을 고찰하기 위함.

Case 8: 방사거리의 영향을 고찰하기 위함.

3. 결과와 고찰

기준 조건으로 방사했을 때, 여섯 가지 방사변수들의 profiles를 방사거리에 대해서 그린 결과는 각 그림에서 R(기준)로 표시된 곡선들이다. 이들의 특징에 대해서 설명하면 다음과 같다. 첫째, 방사사선의 단면적은 Fig. 1 과 2의 R 곡선이 나타내듯이 spinneret에서 나오자마자 급격하게 줄고 take-up에 가까워질수록 그 변화되는 정도가 아주 작아진다. 이것은 방사사선의 신장변형에 대한 저항인 유체의 점도가 온도에 대해서 지수 함수인고로 [식 (6)], spinneret에 가까울수록 온도가 높아 변형이 쉽고, take-up에 가까워질수록 온도가 낮아져 변형이 어려워지기 때문이다. 둘째, 방사사선의 온도(Fig. 3의 R 곡선)는 단면적과는 달리 전 방사구간에 걸쳐 비슷한 추세로 감소한다. 이것은 방사사선의 냉각공기에 의한 냉각은 열전달의 특성상 순간적으로 일어날 수 없고, 경과하는 시간과 비슷하게 진행되기 때문이다. 방사사선에서 발생할 수 있는 결정화(crystallization)에 의한 온도상승은 에너지식에 결정화 열에 대한 항을 우변에 포함시키면 쉽게 모사할 수 있다. 방사사선의 동특성 고찰을 간단히 하기 위해서 본 연구에서는 이 결정화

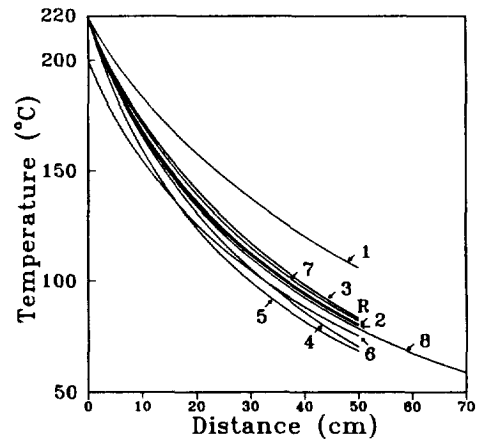


Fig. 3. Threadline temperature plotted against spinning distance for the reference conditions and cases 1-8.

열을 포함하지 않았다.

셋째, 방사사선의 속도 곡선은 Fig. 4와 5에 나와 있듯이 일반적으로 sigmoidal 한 모양을 보인다. 이것은 사선이 냉각되는 비등온 방사공정의 특징중의 대표적인 것으로 위에서 설명한 단면적 곡선과 같은 이유에 근거한다. 즉 사선이 변형하는 정도는 온도가 가장 높은 spinneret에서 제일 크고, 방사거리가 증가할수록 일양하게 작아지기 때문에, 방사사선의 속도곡선은 변곡점(inflexion point)을 갖는 S-shape 모양을 갖게 된다. 등온 방사의 경우는 변곡점이 없이 일양하게 증가하는 곡선이 된다.

넷째, 방사사선의 변형률 속도(strain rate)는 Fig. 6

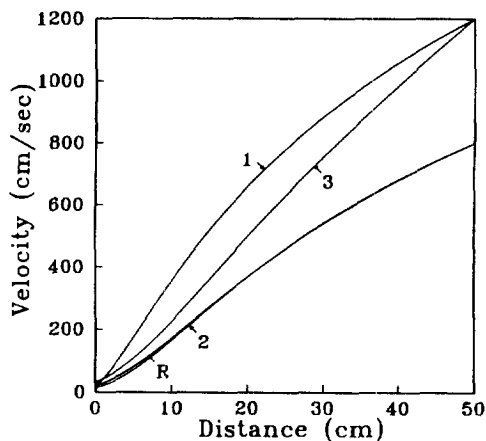


Fig. 4. Threadline velocity plotted against spinning distance for the reference conditions and cases 1-3.

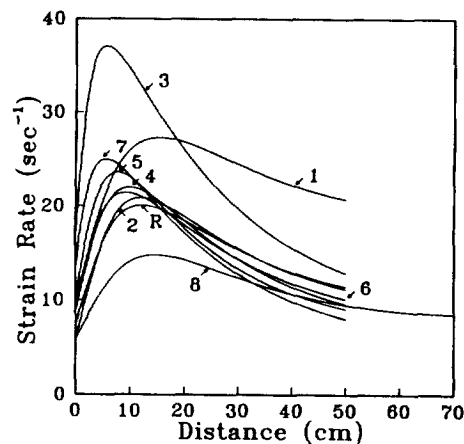


Fig. 6. Threadline strain rate plotted against spinning distance for the reference conditions and cases 1-8.

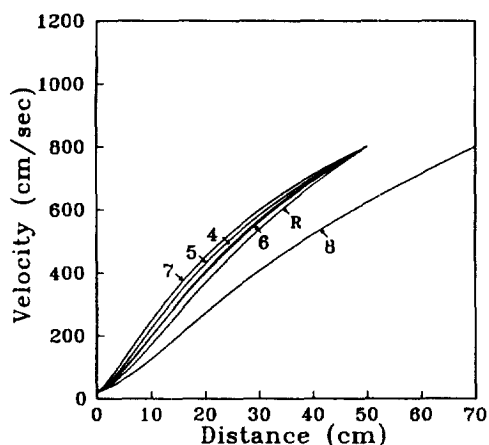


Fig. 5. Threadline velocity plotted against spinning distance for the reference conditions and cases 4-8.

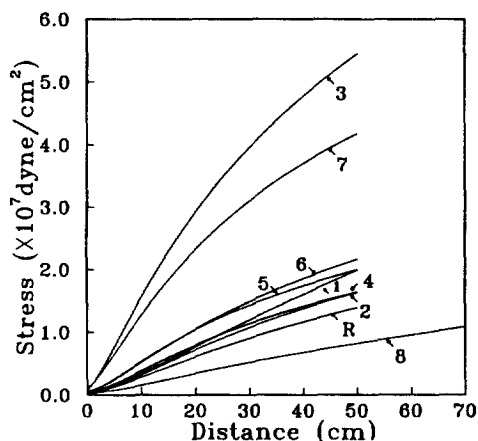


Fig. 7. Threadline stress plotted against spinning distance for the reference conditions and cases 1-8.

에서 보듯이 극대점을 갖는 곡선이 된다. 이것은 이 변형률 속도가 바로 위에서 설명한 속도 곡선의 기울기가 되므로, 속도 곡선의 변곡점에서 극대치를 보이기 때문이다. 다시 말해서 방사사선은 이 점에서 가장 큰 변형률 속도를 경험하게 된다.

다섯째, 방사사선의 응력과 이 응력을 위의 변형률 속도로 나누어서 얻어지는 신장점도(extensional viscosity)는 Fig. 7과 8에서 보듯이 방사거리에 따라 각각 증가하는 곡선들을 나타내고 있다.

여섯째, 신장점도를(전단점도와 같은 개념으로) 변형률 속도에 대해서 그리면 Fig. 9와 같이 된다. 이 그림의 다소 독특한 모양은 Fig. 6에 나타난 변형률 속도가 극대점을 갖는다는 사실에 기인한다.

이제 이러한 기준 조건과 비교한 여덟 가지의 경우를

가지고 각 변수들이 방사사선에 미치는 영향을 고찰하기로 한다.

3-1. Case 1

Spinneret과 권취점에서 공회 속도가 기준보다 50% 증가한 경우(연신률은 기준과 같은 40이고, Spinneret과 권취점에서의 단면적도 기준과 같음)로서, 각 그림에서 1로 표시된 곡선들이다. 기준과 비교해서 이 경우는 같은 단면적에서 시작해서 같은 단면적으로 권취되고 그 속도만 다르기 때문에, Fig. 1이 보여주듯이 방사사선의 단면적은 기준과 거의 같고, 방사속도는 Fig. 4에서 알 수 있듯이 기준보다 그 크기가 전체적으로 50% 증가해 있다. 속도가 빠르면 변형이 빨리 이루어지고 시간도 짧게 걸리기 때문에 이 경우는 기준보다 냉각시간이 짧게

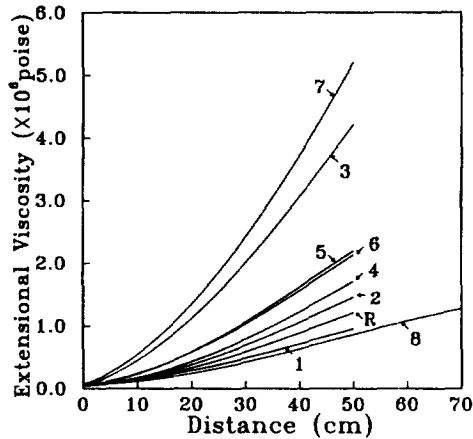


Fig. 8. Threadline extensional viscosity plotted against spinning distance for the reference conditions and cases 1-8.

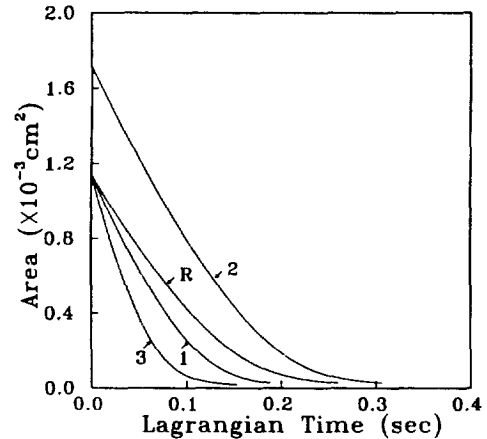


Fig. 10. Threadline cross-sectional area plotted against Lagrangian time for the reference conditions and cases 1-3.

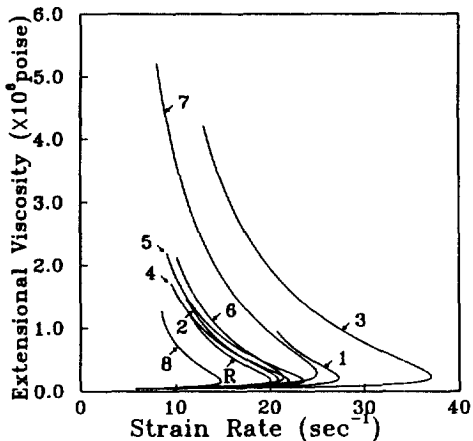


Fig. 9. Threadline extensional viscosity plotted against threadline strain rate for the reference conditions and cases 1-8.

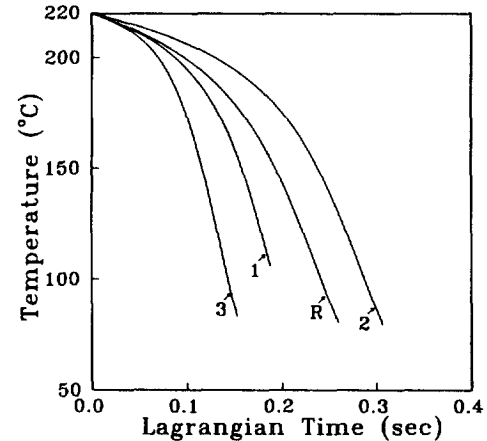


Fig. 11. Threadline temperature plotted against Lagrangian time for the reference conditions and cases 1-3.

되고, 따라서 방사사선의 온도는 Fig. 3이 나타내듯이 기준보다 높게 된다. 그러나 변형률 속도(strain rate 혹은 속도 기울기)는 시간이 짧아지는 이유로 기준보다 크게 되고(Fig. 6), 빠른 변형으로 인해서 사선의 응력(stress)이 커지게 된다(Fig. 7). 그러므로 제품인 filament 내의 분자 배향(orientation)이 크게 되고, 강도(strength)도 증가하게 된다(이것은 rheo-optical coefficient가 비슷하다고 가정하면, stress가 큰 쪽이 배향과 강도가 공히 커지게 되기 때문이다.). 이와 같은 사선내의 배향의 증가는 바로 고속방사에서의 spin-draw의 효과를 설명하여 주는 것으로, 본 모사를 통해서 spin-draw yarns의 고강도의 이유를 쉽게 예측할 수 있다.

신장점도(stress를 strain rate로 나눈 값)는 기준과 비교한 strain rate의 증가가 stress의 증가보다 더 크게 돼서, 이 경우 기준보다 오히려 작게 된다(Fig. 8).

방사속도를 크게 해주면, spinneret에서 take-up까지의 방사시간이 짧게 되어서 strain rate와 stress가 증가하게 된다는 위의 설명을 분명히 보여주기 위해서 Fig. 10-15는 위 그림들과 똑같은 변수들을 이번엔 방사시간(Lagrangian time)에 대해서 plot 해 본 결과를 나타내고 있다. 즉 유체가 경험하는 시간에 따라 변수들의 변화가 어떻게 되는지를 보여주고 있다. Fig. 1-8(Eulerian plots)과 같은 정보지만, 이들 그림은 유변학적 변화를 실제 시간대에 맞추어서 표현해주고 있다 하겠다.

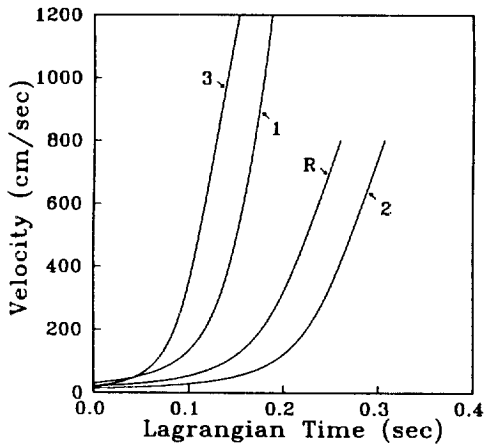


Fig. 12. Threadline velocity plotted against Lagrangian time for the reference conditions and cases 1-3.

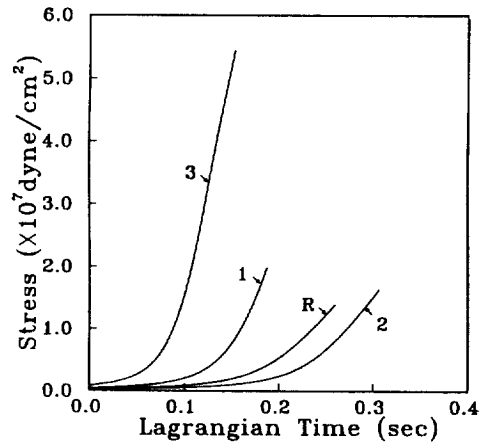


Fig. 14. Threadline stress plotted against Lagrangian time for the reference conditions and cases 1-3.

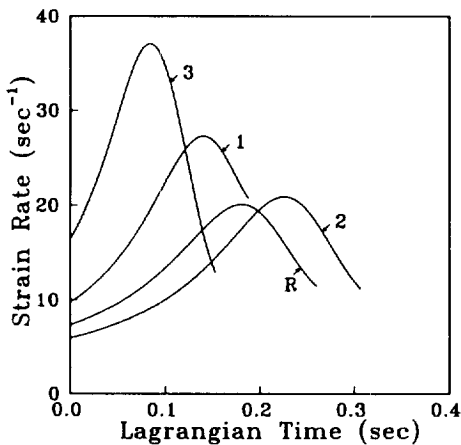


Fig. 13. Threadline strain rate plotted against Lagrangian time for the reference conditions and cases 1-3.

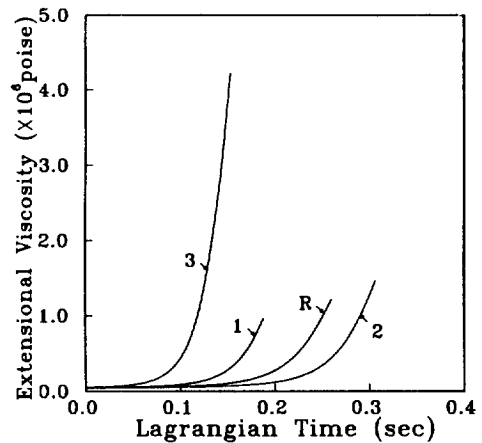


Fig. 15. Threadline extensional viscosity plotted against Lagrangian time for the reference conditions and cases 1-3.

Lagrangian plots가 Eulerian plots와 다르게 나타내는 가장 두드러진 점은, 비등은 방사공정에서 방사사선의 모든 변수들의 변화가 시간상으로 spinneret를 출발한 직후에는 아주 작게 일어나다가 얼마 후부터 본격적으로 일어난다는 사실이다. 이 점은 거리상으로 많은 변화가 spinneret 근처에서 일어남을 보이는 Eulerian plots에서는 쉽게 인지되지 않는 것으로, 방사사선의 속도가 spinneret 근처에서 작고 따라서 경과하는 시간이 길게 되는데 기인한다.

3-2. Case 2

이 경우는 take-up의 조건은 기준과 같이 놓고, spinneret에서의 속도를 1/3 줄여서(단면적은 따라서 1/3 늘

려서) 연신률이 1.5배 됐을 때의 거동을 설명해주고 있다. Spinneret 근처에서 단면적은 크게 변하나(Fig. 1), 방사사선의 온도(Fig. 3), 속도(Fig. 4), 변형률 속도(Fig. 6), 응력(Fig. 7), 신장점도(Fig. 8 또는 9) 등은 기준과 비교해서 별로 차이가 없다. 즉 연신률이 1.5배가 되에도 불구하고 spinneret 조건을 바꾸는 것이 이들 Eulerian plots에는 별 변화를 주지 않는다. 하지만 유체가 경험하는 시간상으로는 큰 변화를 준다는 사실을 Lagrangian plots인 Fig. 10-15에서 쉽게 알 수 있다(곡선 2가 곡선 R과는 모든 그림에서 완전히 다름). 이 경우가 Lagrangian plots의 유용성을 여실히 증명하고 있다 하겠다.

3-3. Case 3

이 경우는 spinneret의 조건은 기준과 같이 놓고, take-up에서의 속도를 1.5배로 늘려서(단면적은 따라서 1.5배로 줄여서) 연신률을 1.5배로 늘렸을 때의 거동을 설명해주고 있다. 위의 Case 2와 연신률이 1.5배 되는 점에서는 같지만, 모든 Eulerian plots와 Lagrangian plots에서 보는데로 결과는 아주 다르다. 즉 take-up에서의 조건을 바꾸는 경우(Case 3)는 spinneret에서의 조건을 바꾸는 경우(Case 2)와는 달리 Lagrangian plots에서는 물론 Eulerian plots에서도 방사사선에 큰 변화를 초래한다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 Case 2에서 방사시간이 기준보다 길어지는 정도에 비해서 Case 3에서 시간이 짧아지고 변형률 속도와 응력 등이 커지는 정도가 훨씬 크기 때문이다.

위 Eulerian plots에서 중요한 것 하나는 온도 곡선(Fig. 3)이다. 즉 다른 변수들과 달리 온도만은 연신률과 권취속도가 1.5배가 됨에도 불구하고 기준과 거의 같은 곡선을 보인다는 것이다. 이것은 Case 3의 조건 변동이 두 가지 서로 반대되는 영향을 방사사선의 냉각에 미치기 때문이다. 다시 말해서 권취속도가 커짐으로 인한 냉각시간의 단축은 방사사선의 냉각을 더디게 함에 반해서, 권취 단면적이 작아짐으로 인한 열전달의 증가는 사선의 냉각을 빠르게 하기 때문이다. 후자의 열전달 증가는 식 (3)의 우변항의 분모에 단면적이 포함되어 있다는 것과, 식 (7)에서 열전달 계수가 단면적에 역비례한다는 것으로 쉽게 알 수 있다(Case 2의 온도곡선이 기준과 비슷하다는 사실도 같은 논리로 설명할 수 있다.).

3-4. Case 4

냉각공기의 온도를 20°C에서 10°C로 낮추었을 때의 경우를 각 그림의 곡선 4가 보여주고 있다. 이 경우는 방사사선의 온도가 낮아지고 응력과 신장점도는 커지지만 그 정도가 별로 크지 않다. 즉 냉각공기 온도의 변화는(그 정도가 비현실적으로 크지 않는 한) 방사조건을 크게 바꾸지 않는다는 사실을 알 수 있다.

3-5. Case 5

방사사선에 직각으로 붙여주는 냉각공기의 속도를 2배로 해줄 때 그 영향은 냉각공기의 온도를 낮추었을 때와 거의 같다는 것을 각 그림의 곡선 5가 보여주고 있다. 이것은 두 경우 공히 열전달을 통한 사선의 에너지식에 작용하기 때문에 당연한 결과다. 따라서 두 경우가 방사사선의 응력을 높이기 때문에 유체의 배향(orientation) 증진을 통한 제품 filament의 강도 향상(그 정도는 작지만)에 손쉬운 방법임을 본 모사를 통해서 쉽게 알 수 있다.

3-6. Case 6

각 그림의 곡선 6은 spinneret의 온도를 200°C에서 220°C로 낮추었을 때의 변화를 보여주고 있다. 위의 냉각조건을 바꾸었을 두 경우(Case 4와 5)와 비교해서 방사사선에 대동소이한 변화를 가져오는 것을 알 수 있다.

3-7. Case 7

이 경우는 유체의 점도가 기준보다 40% 증가했을 때로 각 그림의 곡선 7이 나타나고 있다. 방사사선에 미치는 변화는 위의 세 경우(Case 4, 5 그리고 6)와 비슷하지만, 응력(Fig. 7과 14)과 신장점도(Fig. 8, 9 그리고 15)에 미치는 영향에 있어서는 점도의 경우가 더 크다. 이것은 점도의 증가는 운동식과 구성방정식에 직접 영향을 주어 방사사선의 응력을 크게 하는 반면, spinneret 온도의 감소(Case 6)나 냉각조건 증가(Case 4와 5)는 에너지식을 통해서만 점도를 경유해서 지배방정식에 영향을 주기 때문이다.

3-8. Case 8

이 경우는 방사거리를 50 cm에서 70 cm로 40% 증가시켰을 때다. 각 그림의 곡선 8에서 쉽게 알 수 있듯이 방사거리는 모든 변수에 직접적인 영향을 준다. 이것은 방사거리를 바꾸면, 방사시간(냉각시간)이 변함은 물론, 냉각면적도 변하고 공기 항력, 중력의 크기도 변하기 때문이다. 방사길이가 커지면 사선의 온도가 내려가지만 중력이 커짐으로 변형률 속도, 응력, 신장점도는 작아진다.

4. 결 론

비등온 방사공정을 묘사하는 지배방정식들을 풀어서 정상상태에서의 방사사선의 동특성을 알아보았다. 기준조건을 정하고, 여러 가지 운전조건, 물질조건들이 사선의 속도, 단면적, 온도, 응력, 변형률 속도, 신장점도에 미치는 영향을 이 기준과 비교해서 고찰했다. 방사사선의 신장변형, 열전달 및 응력 생성이 이러한 조건들과 어떻게 연결되는가를 예측해주는 본 방사 모사는, 실제 산업에서 접하는 방사공정의 많은 경우에 대해서 이론적인 근거를 제시하고 새로운 공정 개발의 방향에 도움을 준다고 생각한다.

감 사

본 연구는 한국과학재단의 지원(901-1005-015-2)과 주식회사 럭키의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. Ziabicki, A.: "Fundamentals of Fibre Formation", John Wiley & Sons, New York(1976).
2. Kase, S. and Matsuo, T.: *J. Poly. Sci., Part A*, **3**, 2541 (1965).
3. White, J. L.: *Polymer Engineering Reviews*, **1**, 297 (1981).
4. Denn, M. M., Petrie, C. J. S. and Avenas, P.: *AIChE J.*, **21**, 791(1975).
5. Pearson, J. R. A. and Matovich, M. A.: *Ind. Eng. Chem. Fund.*, **8**, 605(1969).
6. Fisher, R. J. and Denn, M. M.: *AIChE J.*, **22**, 236 (1976).
7. Hyun, J. C.: *AIChE J.*, **24**, 418(1978).
8. Donnelly, G. J. and Weinberger, C. B.: *Ind. Eng. Chem. Fund.*, **14**, 334(1975).
9. Matsumoto, T. and Bogue, D. C.: *Poly. Eng. Sci.*, **18**, 564(1978).
10. Hyun, J. C. and Ballman, R. L.: *J. Rheology*, **22**, 349 (1978).
11. Mewis, J. and Petrie, C. J. S.: "Encyclopedia of Fluid Mechanics", ed. by Chermisinoff, N. D., Vol. 6, 111(1987).