

방사공정에서 방사속도가 안정성에 미치는 영향

이주성, 정현욱*, 김현철, 이기섭, 현재천
고려대학교 화학공학과
미네소타주립대 화학공학과*

Effect of Spinning Speed on the Stability of Spinning Process

Joo Sung Lee, Hyun Wook Jung*, Hyun Chul Kim, Ki Seob Lee,
Jae Chun Hyun

Department of Chemical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea
Department of Chemical Engineering and Materials Science,
University of Minnesota, Minneapolis MN55455, U.S.A.*

서론

고분자 공정의 안정성 분석은 산업계나 학계의 중요한 관심사 중 하나이다. 전자의 경우 제품의 품질 향상을 포함한 생산성 향상이 주 목적이고, 후자의 경우 공정 해석에 있어서 안정해의 존재와 안정성 영역을 확인하고 이러한 현상의 물리적 의미를 해석하는 것을 주 목적으로 한다.

신장 변형이 지배적인 고분자 공정에서도 안정성 분석은 중요한 연구 대상이 되어 왔으며, 특히 이들 공정에 대한 안정성 분석에서는 연신비가 임계점 이상으로 커지는 경우, 방사사선의 면적과 힘 등 방사사선의 변수들이 주기적인 진동을 보이는 연신공명(draw resonance) 현상에 대한 많은 이론적, 실험적 결과들이 도출되어 왔다[1-5]. 방사공정에서 나타나는 각 공정변수가 안정성에 미치는 영향을 분석한 결과, 물질변수인 유체의 점탄성도의 변화는 신장 농화(extension thickening)와 신장 담화(extension thinning) 거동을 보이는 유체에서 서로 상이한 안정화 경향이 나타나며[6], 공정변수인 사선냉각은 유체의 성질에 관계없이 항상 공정을 안정화시킨다고 알려져 있다[7]. 본 논문에서는 방사공정에서 나타나는 공정변수의 하나인 방사속도가 방사공정의 안정성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

방사속도가 방사공정의 연신공명 현상에 미치는 영향을 고려하기 위해 운동식에 유변화적인 힘 이외에 관성력(inertia), 중력(gravity), 공기항력(air drag) 등의 이차적인 힘을 포함한 모델을 제시하였으며, 구성방정식으로 유체의 신장변형 거동에 가장 적합하다고 알려진 Phan-Thien Tanner 유체를 대상으로 지배방정식을 구성한 후, 선형안정성 분석을 통해 방사공정의 안정성을 고찰하였다.

이론적 고찰

관성력, 중력, 공기항력 등의 이차적인 힘을 고려한 비등온 방사공정의 무차원 지배방정식은 다음과 같다. 또한, 구성방정식으로는 Phan-Thien Tanner 유체를 사용하였다.

$$\text{연속식: } \frac{\partial a}{\partial t} + \frac{\partial(av)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\text{운동식: } C_{in} \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{1}{a} \frac{\partial(a\tau)}{\partial x} + C_{gr} - C_{ad} v^{1.19} a^{-0.905} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } C_{in} = \frac{\rho V_0 L}{2\eta_0}, C_{gr} = \frac{\rho g L^2}{2\eta_0 V_0}, C_{ad} = \frac{3.122 \times 10^{-4} V_0^{0.19} L^2}{2\eta_0 A_0^{0.905}} \quad (3)$$

$$\text{구성방정식: } Kr + De \left[\frac{\partial \tau}{\partial t} + v \frac{\partial \tau}{\partial x} - 2(1 - \xi) \tau \frac{\partial v}{\partial x} \right] = \frac{\partial v}{\partial x} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } K = \exp(2\varepsilon De \tau), De = De_0 \exp \left[k \left(\frac{1}{\theta} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

$$\text{에너지식: } \frac{\partial \theta}{\partial t} + v \frac{\partial \theta}{\partial x} = -St v^{1/3} a^{-5/6} (\theta - \theta_a) \left[1 + \left(8 \frac{v_y}{v} \right)^2 \right]^{1/6} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } St = \frac{1.67 \times 10^{-4} L}{\rho C_p A_0^{5/6} V_0^{2/3}} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{경계조건: } a = a_0 = 1, v = v_0 = 1, \theta = \theta_0 = 1 & \quad \text{at } x=0 \\ v = v_L = r & \quad \text{at } x=1 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, a =무차원 방사단면적, v =무차원 방사속도, τ =무차원 축방향 응력, x =무차원 방사거리, t =무차원 시간, C_{in} =관성력 계수, C_{gr} =중력 계수, C_{ad} =공기 항력 계수, De =Deborah 수, ε, ξ =PTT 유체의 물질 상수, θ =무차원 방사사선 온도, θ_a =무차원 냉각 공기 온도, v_y =무차원 냉각 공기 속도, St =Stanton 수, r =연신비이며, 하첨자 0, L 은 각각 방사구와 권취점을 나타낸다.

결과 및 토의

선형안정성 분석을 위하여 거리와 시간에 대한 의존성이 분리된 미소외란을 계에 도입하여, 지배방정식을 선형화하였으며, 방사구에서 단면적, 속도, 온도가 일정하다는 조건과 권취점에서 연신비가 일정하다는 경계조건을 사용하였다. 이때, 방사구에서의 응력은 일정하지 않다. 이상의 식으로 행렬식으로 표현되는 고유치(eigenvalue) 문제를 구성하여, 고유치를 계산하였다.

선형안정성 분석 결과 신장 농화 거동을 보이는 유체와 신장 담화 거동을 나타내는 유체 모두 저속영역에서는 방사 속도가 증가할수록 불안정한 거동을 나타내었으며, 고속 영역에서는 방사 속도가 증가함에 따라 공정이 안정화되었다(Table 1, Fig. 1).

방사속도 변화에 의한 안정성의 변화는 모델에서 고려한 이차적인 힘에 기인한다. 즉, 식(3)에서 볼 수 있듯이 방사속도의 변화는 운동식에 포함된 이차적인 힘들의 계수를 변화시키게 된다. Fig. 2에서 보이듯이 중력에 대한 항은 저속영역에서 비교적 큰 값을 가지지만, 속도가 증가함에 따라 전체 힘에서 차지하는 비율이 감소하고, 관성력에 대한 항은 속도가 작은 영역에서는 적은 값을 가지지만, 속도의 증가에 따라 힘의 크기와 전체 힘에서 차지하는 비율이 크게 증가한다. 이에 반해 공기항력은 수치모사한 범위 내에서는 영향이 크지 않다[8].

방사속도 변화에 의한 이차적인 힘들의 변화는 방사공정의 안정성에도 영향을 주게된다. 중력에 의한 영향이 커질수록 방사공정을 안정하게 하고, 이러한 영향은 저속 방사 영역에서 지배적으로 나타난다. 또한, 관성력이 커지는 경우에도 공정은 안정화되며, 이는 고속 방사 영역에서 지배적이 된다. 마지막으로 공기항력의 효과가 증가하는 경우에도 방사공정을 안정화시키지만, 이는 중력, 관성력의 영향에 비해 미미한 것으로 나타났다(Table 1, Fig. 3).

결과적으로 저속 방사 영역에서의 방사 속도 증가는 방사공정에 작용하는 이차적인 힘 중 저속 영역에서 지배적으로 나타나는 중력의 영향을 줄여주므로 공

정이 불안정하게 되는 반면에, 고속 방사 영역에서의 방사 속도 증가는 고속 방사 영역에서 지배적인 관성력을 증가시킴으로써 공정을 안정하게 유도하게 된다.

감사

본 연구는 유변공정연구센터(한국과학재단 ERC)의 연구지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. D. Gelder, *Ind. Eng. Chem. Fundm.*, **10**, 534 (1971).
2. R. J. Fisher and M. M. Denn, *AIChE J.*, **22**, 236 (1976).
3. S. Kase and M. Araki, *J. Appl. Polym. Sci.*, **27**, 4439 (1982).
4. A. N. Beris and B. Liu, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **26**, 341 (1988).
5. S. E. Bechtel, J. Z. Cao and M. G. Forest, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **41**, 201 (1992).
6. J. S. Lee, H. W. Jung, S. H. Kim and J. C. Hyun, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, in press
7. H. W. Jung, H.-S. Song and J. C. Hyun, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **87**, 165 (1999).
8. Ziabicki, A. and H. Kawai, "High-Speed Fiber Spinning," John Wiley & Sons (1985).

Table 1. Effects of spinning velocity for extension thickening fluid ($\varepsilon=0.015$, $\xi=0.1$) at $r=40$ and $\lambda=0.001$

	Spinning velocity (V_0)	Deborah number (De)	Tension							Stability
			Rheological dyne	Gravity		Inertia		Air drag		
				dyne	C_{gr}	dyne	C_{in}	dyne	C_{ad}	
Low speed range	10.0	1.25×10^{-4}	32896	1151	10.88	13866	0.0139	1.305	1.8×10^{-4}	stable
	13.8	1.73×10^{-4}	43774	1176	7.88	27352	0.0191	1.874	1.9×10^{-4}	Critical pt.
	15.0	1.88×10^{-4}	47202	1180	7.25	31984	0.0208	2.060	2.0×10^{-4}	unstable
Diverging point	15.5	1.94×10^{-4}	48630	1183	7.02	34207	0.0215	2.138	2.0×10^{-4}	unstable
High speed range	16.0	2.00×10^{-4}	50058	1184	6.80	36509	0.0222	2.217	2.0×10^{-4}	unstable
	17.1	2.13×10^{-4}	53200	1188	6.36	41833	0.0237	2.392	2.0×10^{-4}	Critical pt.
	20.0	2.50×10^{-4}	61483	1196	5.44	57615	0.0278	2.862	2.1×10^{-4}	stable

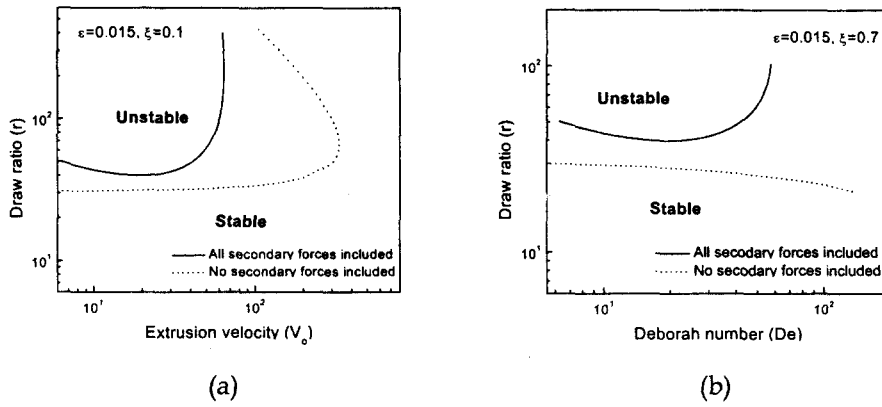


Fig. 1. Effect of spinning speed on the stability (a) extension thickening fluid ($\epsilon=0.015$, $\xi=0.1$) and (b) extension thinning fluid ($\epsilon=0.015$, $\xi=0.7$).

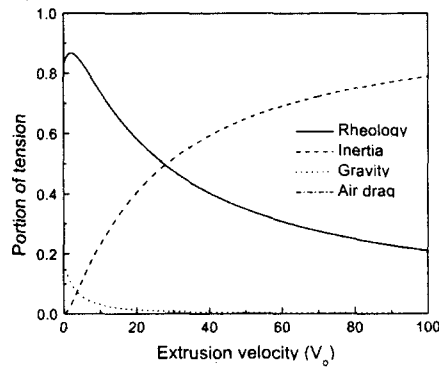


Fig. 2. Contribution of secondary forces to spinline tension.

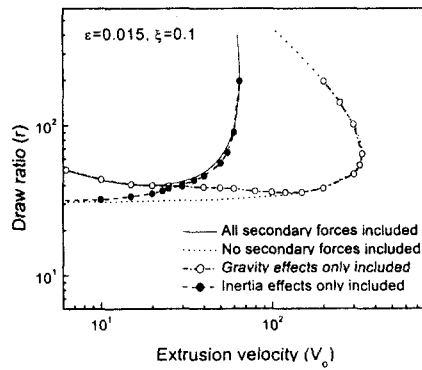


Fig. 3. Effect of the each secondary forces on the critical drawdown ratio.