

## 관상 필름 블로잉 공정의 과도 응답과 연신공명 불안정성

김현철, 정현욱, 송현섭\*, 현재천  
고려대학교 화공생명공학과, 유변공정연구센터  
\*LG 화학 기술연구원

### Transient Response and Draw Resonance Instability in Tubular Film Blowing Process

Hyunchul Kim, Hyun Wook Jung, Hyun-Seob Song\*, Jae Chun Hyun  
Dept. of Chemical & Biological Eng., Applied Rheology Center, Korea Univ.  
\*LG Chem., Ltd., Research Park

#### 서론

관상 필름 블로잉 공정은 용융 상태의 고분자 물질이 환형의 die를 통하여 일정한 유속으로 압출될 때, bubble 내부로의 공기 주입으로 인한 원주방향의 연신과 nip-roll에서의 빠른 권취속도로 인한 축방향의 연신을 작용시킴으로써 관상의 고분자 필름을 제조하는 대표적인 다축 신장변형 공정이다(Fig. 1). 두 방향으로 연신되는 공정의 특성으로 인하여 축방향의 연신속도, bubble내 압력, air ring에서의 냉각공기 속도 등 다양한 공정 변수를 변화시킴으로써 제품의 물성을 제어할 수 있다(Pearson and Petrie, 1970; Middleman, 1977).

다른 신장 변형 공정인 방사, 필름 캐스팅 공정과 마찬가지로 필름 블로잉 공정의 주된 목적도 생산성을 높이면서 고성능의 필름을 제조하는 것이다. 그러나, 불안정성을 야기시키는 예기치 않은 많은 종류의 외란들로 인해 빠른 생산속도 하에서 제품의 균일성을 제어하는 것이 상당히 어려워진다. 다양한 외란에 의해 발생하는 공정의 안정성 문제는 산업적으로 생산성, 제품의 질, 이윤 등과 직결되기 때문에 이론적인 안정성 분석, 민감도 분석을 수행하는 것이 매우 중요하다. 특히, 필름 블로잉 공정의 경우, 다른 공정에 비해 제어 변수가 많고 특이한 불안정성들이 발생되어 보다 체계적인 연구가 필요하다(Han and Park, 1975; Kanai and White, 1984; Minoshima and White, 1986; Ghaneh-Fard and Lafleur, 1996).

공정의 불안정성, 즉, 연신공명 현상을 중심으로 한 이론적 분석은 Cain and Denn (1988)에 의해 뉴턴 유체와 Maxwell 유체에 대해 수행되었고, 이 후 Yoon and Park (2000)에 의해 공압출 공정으로 확대되었다. 그러나, 이는 선형 안정성 분석을 통해 이루어졌으며 방사공정이나 필름 캐스팅 공정에서의 같은 비선형 동적 거동에 대한 결과는 아직 이루어져 있지 않은 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 필름 블로잉 공정에서 나타나는 연신공명 현상을 해석하기 위해 비선형 지배방정식을 orthogonal collocation method로 수치적분하여 외란에 대한 과도 응답 거동을 살폈고 이를 실험 결과와 비교하고자 하였다.

#### 이론적 고찰

신장변형 거동을 잘 묘사하는 점탄성 PTT유체를 적용하여 이 공정에 대한 무차원 일차원 지배방정식을 제시하면 다음과 같다(Pearson and Petrie, 1970).

$$\text{Continuity equation: } \frac{\partial}{\partial t} \left( r w \sqrt{1 + \left( \frac{\partial r}{\partial z} \right)^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (r w v) = 0 \quad (1)$$

$$\text{Axial force balance: } \frac{2r w \sigma_{11}}{\sqrt{1 + \left( \frac{\partial r}{\partial z} \right)^2}} + B(r_F^2 - r_2) = T_z \quad (2)$$

$$\text{Radial force balance: } B = w \left( -\frac{\sigma_{11} (\partial^2 r / \partial z^2)}{(1 + (\partial r / \partial z)^2)^{3/2}} + \frac{\sigma_{33}}{r \sqrt{1 + (\partial r / \partial z)^2}} \right) \quad (3)$$

Constitutive equation: PTT fluids

$$\exp[\epsilon \text{De}_0 \text{tr } \tau] \tau + \text{De} \left[ \frac{\partial \tau}{\partial t} + v \cdot \nabla \tau - L \cdot \tau - \tau \cdot L^T \right] = 2 \frac{\text{De}}{\text{De}_0} D \quad (4)$$

Equation of energy:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{U}{w} (\theta - \theta_c) + E(\theta^4 - \theta_\infty^4) + \frac{v}{\sqrt{1 + (\partial r / \partial z)^2}} \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

Boundary conditions:

$$r = r_0 = 1, w = w_0 = 1, v = v_0 = 1, \sigma = \sigma_0 \quad \text{at } z = 0 \quad \text{for all } t \quad (6)$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} + v \frac{\partial r}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = x_T \quad \text{for all } t \quad (7)$$

정상상태의 해는 같은 조건의 압력(B)와 축방향 응력( $T_z$ )에 대해 다중해가 존재하므로 이를 효율적으로 계산하기 위해 pseudo arc-length continuation 기법을 사용하여 계산되었고, 과도 응답 거동은 거리에 대한 미분항은 OCFE (orthogonal collocation method on finite element)를, 시간 미분항은 FDM (finite difference method)을 이용하여 수치적분되었다. 본 계산은 다음과 같은 모델의 개선을 통해 수행되었다. 비등은 공정인 경우 freezeline height을 기존 연구자들과 같이 임의의 고정된 지점으로 가정하지 않고, 실험에 의해 밝혀진 결과를 토대로 bubble 이 고형화 온도까지 냉각되는 지점으로 정의하였다. 또한, bubble 내부에 주입된 공기의 양도 현실적인 모델로부터 예측되었다.

### 결과 및 토의

Fig. 2는 freezeline height ( $x_T=5$ )이 고정된 경우, 압력(B)과 축방향 응력( $T_z$ )이 변할 때 등온, 비등은 공정의 정상상태 해를 BUR(Blow-up ratio)과 TR(thickness reduction)에 대해 도기한 것이다. 같은 조건의 B-contour와  $T_z$ -contour가 교차되는 것으로 보아 다중해가 존재함을 볼 수 있다. PTT 유체의 거동은 다른 유체와 구별되는 몇 가지 독특한 거동을 나타낸다. 뉴턴 유체에서는 볼 수 없었던 BUR-TR map에서 isolated curve가 관찰되었다. 이는 extensional thickening한 유체의 특성이라고 판단된다. 즉, 유체가 extension thinning 거동으로 변할 경우 이러한 isolate curve는 없어지고 Newtonian과 유사한 결과를 보인다. 또한, 응력이 무한대로 blow-up되는 UCM 유체보다 더 현실적인 거동을 나타냄을 확인하였다.

이러한 정상상태의 해들에 다양한 외란을 도입하여 어떠한 과도 응답을 보이는지 살펴보는 것이 중요하다. Fig. 3은 등은 공정에서 (이 경우 freezeline height은 변하지 않는다고 가정하였다.) 연신공명 현상이 발생하였을 때 bubble의 반경과 두께의 시간에 따른 주기적 변화를 나타낸다. 이 변수들에 대한 phase trajectory로부터 서로 정반대의 거동을 나타냄을 뚜렷이 볼 수 있다. 비등은 공정에서는 phase trajectory가 등은 공정의 경우와는 다른 형태를 보이는데 이는 실험적인 결과와도 그 경향성이 일치하였다(Fig. 4).

이러한 과도 응답 결과로부터 다음과 같은 필름 블로잉 공정에 대한 연신공명 불안정성을 체계적으로 분석하였다. 첫째, 방사공정과 필름 캐스팅 공정으로부터 확인된 운동학적 파동들의 전파시간을 비교함으로써 도출된 안정성 기준식이 이 공정에도 정확히 적용됨으로써 안정성을 판별하는 중요한 indicator임을 밝혔다. 또한, 점탄성과 공정의 aspect ratio가 안정성에 미치는 영향을 살펴으로써 extension thickening & extension thinning 유체의 거동 차이를 조사하였다.

### 참고문헌

- Pearson, J. R. A. and C. J. S. Petrie, 1970, *J. Fluid Mech.*, **40**, 1.  
 Han, C. D. and J. Y. Park, 1975, *J. Appl. Polym. Sci.*, **19**, 3277.  
 Kanai, T. and J. L. White, 1984, *Polym. Eng. Sci.*, **24**, 1185.  
 Minoshima, W. and J. L. White, 1986, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **19**, 275.  
 Cain, J. J. and M. M. Denn, 1988, *Polym. Eng. Sci.*, **28**, 1527.  
 Ghaneh-Fard, A. and P. G. Lafleur, 1996, *AIChE J.*, **42**, 1388.  
 Yoon, K. S. and C. W. Park, 2000, *Int. Polym. Proc.*, **14**, 342.

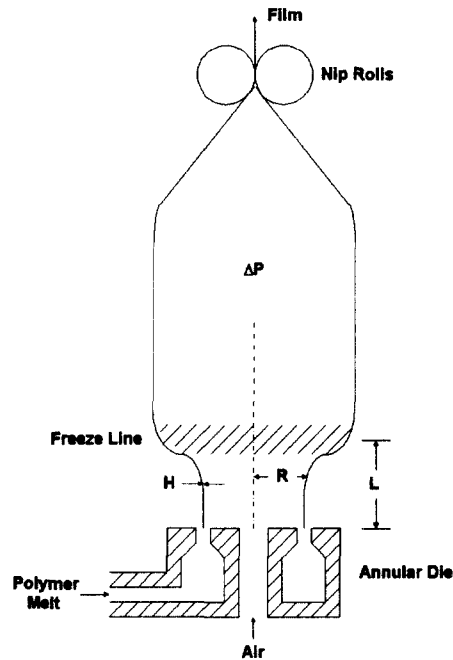


Fig. 1. Schematic diagram of tubular film blowing process.

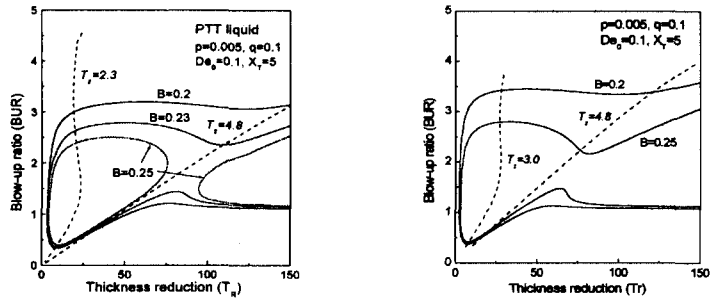


Fig. 2. Isothermal and nonisothermal steady solutions of a PTT fluid

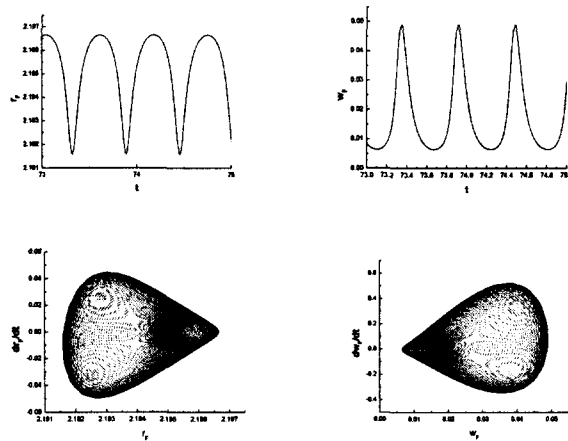


Fig. 3. Isothermal transient response of a PTT fluid:  
( $De_0=0.05$ ,  $\varepsilon=0.015$ ,  $\xi=0.1$ ,  $Dr=25$ )

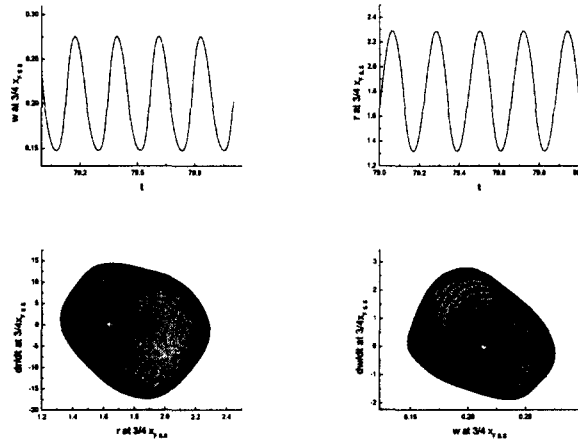


Fig. 4. Nonisothermal transient response of a PTT fluid:  
( $De_0=0.05$ ,  $\varepsilon=0.015$ ,  $\xi=0.1$ ,  $Dr=11.5$ )