

## 윙블로잉 공정에서 연신공명 불안정성을 줄이기 위한 제어전략

김현철, 정현욱, 현재천  
고려대학교 화공생명공학과, 유변공정연구센터

### Strategy to reduce draw resonance instability in film blowing process

Hyunchul Kim, Hyun Wook Jung, and Jae Chun Hyun  
Department of Chemical and Biological Engineering, Applied Rheology Center,  
Korea University

#### 서론

윙블로잉 공정은 용융 상태의 고분자 물질이 관상의 다이(die)를 통하여 일정한 유속으로 압출될 때, bubble 내부로의 공기 주입으로 인한 원주방향 연신과 압출속도보다 빠른 nip-roll의 권취속도로 인한 축방향 연신을 동시에 가하여 양방향성의 고분자윙블을 제조하는 공정이다. 이렇게 이축 연신이 일어나기 때문에 윙블 물성의 제어에는 용이하나 축방향의 연신속도, bubble내 압력, air ring에서의 냉각공기 속도 등 조절해야 할 공정 변수가 많고 복잡하여 이 공정에 대한 보다 엄밀한 이해가 필요하다[1].

윙블 블로잉 공정도 다른 신장 유동 공정과 같이 생산성을 높이면서 고성능의 윙블을 제조하는 것을 그 목적으로 하고 있다. 또한, 신장유동이 일어난다는 점과 자유계면을 가진다는 점에서 유사하다고 할 수 있으나, 타공정과 달리 윙블 블로잉에서는 두 방향의 연신이 일어나기 때문에, 조절 변수가 많아 유동해석이 난해하고, 연신공명, freezeline height의 주기적인 변화, bubble의 helical 거동 등 많은 불안정성 현상이 발생되므로 이 공정의 외란에 대한 민감도와 안정성에 관한 보다 체계적인 연구가 이루어져야 한다[2-5].

연신공명 현상을 중심으로 한 이론적 분석은 Cain and Denn [6]에 의해 뉴턴 유체와 Maxwell 유체에 대해 수행되었고, 이 후 Yoon and Park [7]에 의해 공압출 공정으로 확대되었다. 그러나, 이들 연구자들은 등은 공정 하에서 freezeline height를 고정된 것으로 가정하여 안정성을 분석하므로 그림 1과 같은 실제 변화를 설명할 수 없었다. 또한, 선형안정성 분석으로 안정성을 분석하여 방사공정이나 윙블 캐스팅 공정에서 수행되어진 것과 같은 비선형 동적 거동에 대한 결과는 윙블 블로잉 공정에서 아직 수행되어 있지 않은 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 윙블 블로잉 공정에서 나타나는 연신공명 현상의 엄밀한 분석을 위해 처음으로 비선형 과도 응답(transient response)을 계산하였고 이로부터 다양한 공정조건하에서 불안정한 거동 특성을 살폈다. 이로부터 구한 임계점 및 주기는 선형안정성 분석으로부터 정확하게 확인될 수 있으며, 특히 주기해의 거동이 실험과 정성적으로 잘 맞음을 확인하였다. 과도 응답으로부터 구축된 정보로 이 공정을 안정하게 하기 위한 방법론을 제시하였다.

#### 본론

신장변형 거동을 잘 묘사하는 점탄성 Phan-Thien and Tanner (PTT) 유체를 사용하여 윙블 블로잉 공정에 대한 일차원의 무차원 지배방정식을 구성하면 다음과 같다[1, 2].

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

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

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

Constitutive equation: PTT fluids

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

$$\text{where, } \mathbf{L} = \nabla \mathbf{v} - \xi \mathbf{D}, \quad \text{De} = \text{De}_0 \exp \left( k \left( \frac{1}{\theta} - 1 \right) \right)$$

Equation of energy:

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

Boundary conditions:

$$r = r_0, w = w_0, v = v_0, \theta = \theta_0, \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_0 \quad \text{at } z = 0 \quad \text{for all } t \quad (6)$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{v}{\sqrt{1 + (\partial r / \partial z)^2}} \frac{\partial r}{\partial z} = 0, \quad \theta = \theta_F \quad \text{at } z = X_F \quad \text{for all } t \quad (7)$$

이 지배방정식의 정상상태 및 과도응답 그리고 선형안정성 분석의 해를 구하기 위하여 OCFE(orthogonal collocation method on finite element)를 이용하였으며, 정상상태에서 같은 조건의 압력(B)와 축방향 응력( $T_z$ )에 대해 다중해가 존재하므로 steady-map를 얻기 위하여 pseudo arc-length continuation 기법을 사용하였다.

비등온 공정에서의 freezeline height의 변화를 모사하기 위하여, freeze line height를 임의의 고정된 지점으로 한 기존 연구자들과 달리 실험에 의해 밝혀진 결과를 토대로 휘름의 고형화 온도까지 냉각되는 지점으로 정의하였다. 또한, bubble 내부에 주입된 공기의 양도 기존의 연구자들이 사용한 cylindrical approximation 대신에 실제 적분한 값을 도입하여 보다 실제적인 bubble의 거동을 살필 수 있었다.

## 결과 및 고찰

그림 1은 Han and Park [2]에서 제시한 조건에서 얻어진 비등온 공정의 정상상태 해를 도시한 것이다. 이 경우, 두가지 형태로 결과를 정리할 수 있다. 그림 2(a)는 freezeline height이 5가 되도록 냉각 조건을 달리하면서 얻은 결과이고, 그림 2(b)는 일정 냉각 조건에서 구한 결과로, 이 때의 freezeline height는 매 지점마다 다르게 된다. 복잡한 형태의 다중해가 존재하므로 이러한 다중해에서 공정의 안정성의 변화를 고찰하는 것이 공정의 안정성 확보에 필수적인 요소이다.

공정의 안정성 해석에서 운전조건을 크게 두가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 일반적으로 적용되는 운전조건으로 권취속도와 bubble 내부에 주입된 공기의 양을 일정하게 유지하면서 안정성을 살펴보는 경우이고(그림3(a)), 다른 하나는 권취속도와 bubble 내부의 공기 압력을 일정하게 유지하면서 안정성을 살펴보는 것이다(그림 3(b)). 공정의 운전조건이 바뀔에 따라 비선형 공정 특성으로 인해 공정 변수들의 과도응답 거동이 달라지는 것을 볼 수 있다. 예를 들면, 그림 3(b)와 같이 압력을 일정하게 유지한 경우, D지점의 불안정한 조건이 외란의 조건에 따라 위의 불안정한 영역으로(E) 또는 아래의 안정한 영역으로(F) 이동하는 특이한 거동이 관찰된다. 전체적으로는 bubble내부의 공기양을 일정하게 유지하면서 운전하는 것이 더 안정한 조건임을 알 수 있다. 또한, bubble 내부의 공기양을 일정하게 유지하면서 운전시 A 지점이 B, C지점보다 더 불안정한 것을 알 수 있다. 이로부터 동일한 필름의 두께( $1/TR$ )를 얻기 위해서는 bubble 내부의 공기양과 연신비를 조절함으로써 blow-up ratio를 크게 하여 biaxial한 연신을 크게 하거나, blow-up ratio를 작게 하여 uniaxial한 연신을 크게 하는 것이 이 공정을 안정화시키는 방향임을 알 수 있는데, blow-up ratio가 작은 방향은 이 공정에서 의미가 없는 방향이므로 위의 영역으로 안정화시키는 방법을 생각할 수 있다.

이러한 선형 안정성분석의 결과는 과도응답 결과와도 정확하게 일치하였으며, 실험결과와도 정성적으로 잘 맞음이 확인되는 바, 필름 블로잉 공정의 안정성, 민감도, 생산성을 향상시키는 최적의 방법론을 제시하기 위한 유용한 정보라 할 수 있다.

#### 참고문헌

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

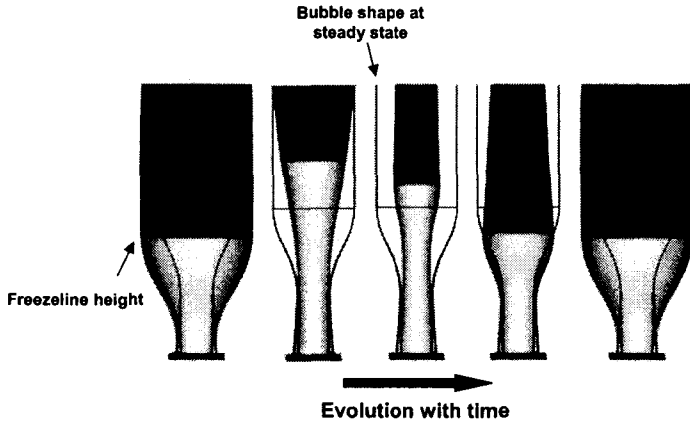


Figure 1. Transient bubble shape under the unstable condition.

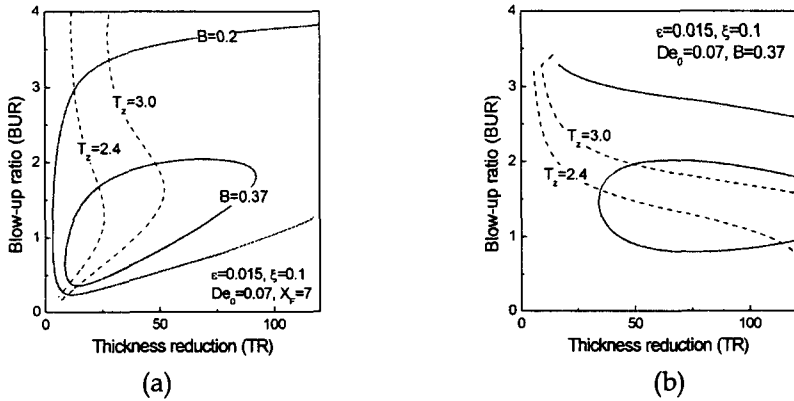


Figure 2. Nonisothermal steady solutions under (a) the fixed freezeline height and (b) fixed cooling conditions.

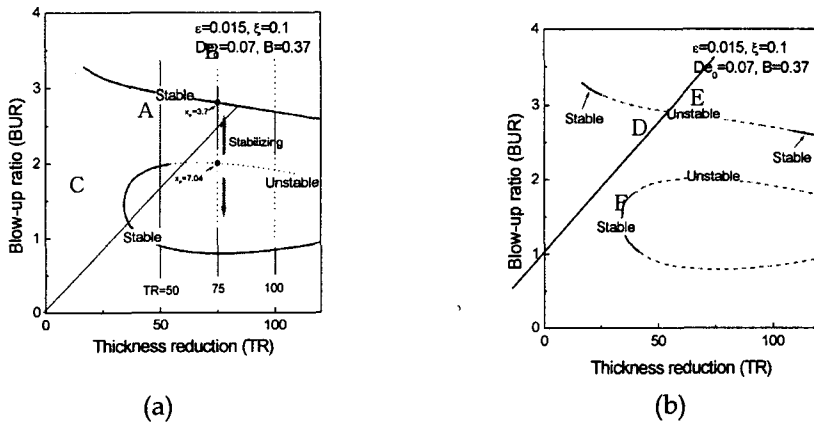


Figure 3. Stability results of the steady solutions of Fig. 3(b) to any disturbances under the following operating conditions: (a) constant air amount inside the bubble and (b) constant blow-up pressure.