

# 전기장내에서 하전된 고분자 젯의 역학적 거동 모사

박해동, 유웅열\*

서울대학교 공과대학 재료공학부

## Numerical Modeling of the Mechanical Behavior of Charged Polymer Jets in the Electric Field

Haedong Bak and Woong-Ryeol Yu\*

Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

### 1. 서론

전통적인 섬유 제조 방식은 습식, 건식, 용융방사 등, 주로 압출과 같은 기계적인 힘에 의해 섬유를 형성하는 방법으로서, 이들 방사공정에 의해 나노 스케일의 직경을 갖는 섬유를 제조하는 데에는 한계가 있었다. 현재에는 전자기적인 힘에 의해 섬유를 형성하는 전기방사가 보편화되어 거의 모든 선형 고분자로부터 나노섬유를 제조할 수 있게 되었으나 이들 대부분의 연구는 나노섬유 웹에 관한 것이다. 전기방사를 이용하여 연속적인 그리고 곧은 (straight) 나노섬유를 제조하기 위해선 새로운 전기방사 기구의 설계가 필요하며, 이에 무엇보다 중요한 요소는 전기장 내에서 하전된 고분자의 역학적 거동을 해석하는 것이다. 이에 본 연구에서는 전기방사 기구의 주사체에 형성되는 고분자 젯(jet)의 역학적 거동을 유한요소법을 이용하여 해석하고자 한다.

### 2. 역학적 모델링

#### 2.1. 이론

주사체의 주사부를 그림 1에 나타내었다. 주사부의 반지름을  $R$ 이라 하고, 주사부의 길이를  $L$  고분자 용액을 밀어낸 지점부터 도착 지점까지의 거리를  $H$ 라고 했을 때, 고분자 젯의 거동을 지배하는 Navier-Stokes 방정식과 경계조건은 다음과 같다[1]. 여기서  $\vec{V}$ ,  $\rho$ ,  $v$ 는 각각 속도벡터, 밀도, 점도를 나타낸다.

\* Navier-Stokes 방정식 :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \\ \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \nu \nabla^2 \vec{V} \end{cases} \quad \text{in } \Omega$$

\* 경계 조건

$$\begin{aligned} z=H, \quad 0 \leq r < R &: u=0, v=v_0 \\ (H-L) \leq z \leq H, \quad r=R &: u=0, v=0 \\ z < H, \quad r=0 &: u=0, \partial v / \partial n = 0 \\ z \leq (H-L), \quad 0 < r < R &: \partial u / \partial n = \partial v / \partial n = 0, p = p_0 + \delta p \\ \text{where } \delta p &= \gamma \vec{\nabla} \cdot \vec{n} - \gamma \frac{\epsilon_0}{2} [ E_n^2 - \beta E_n^2 + (\beta-1) E_t^2 ] \end{aligned}$$

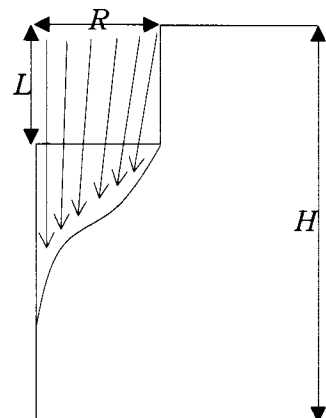


그림 1. 주사부 모습

## 2.2. 수치해석법

본 연구에서는 remeshing 기법과 유한요소법을 이용하여 Navier-Stokes 방정식의 해를 구하였다 (그림 2). 첫 번째 단계의 해는  $L=2mm$  반경  $R=0.5mm$ 의 실린더 위에서  $\vec{V}_0$ 의 속도로 고분자 용액을 공급했을 때, 실린더 아래에서의 속도  $\vec{V}$ 를 유한요소법을 사용하여 구하였는데, 예상대로 포물선 형태를 보였다. 이후, 여기서 구한 속도를 가지고 미소시간 ( $\Delta t$ ) 후의 고분자 젯의 형상을 예측하고, 예측된 형상을 새로운 도메인으로 설정하여 다시 유한요소법으로 Navier-Stokes 방정식을 풀었다. 이와 같은 방식을 반복하여 고분자 젯의 형상을 계산할 수 있었다.

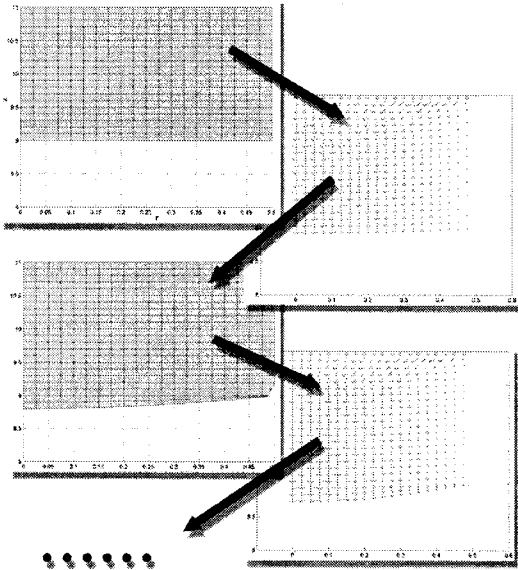


그림 2. Remeshing 기법 (주어진 mesh에서 속도를 계산한 후 적절한 시간  $\Delta t$  후의 각 점의 위치를 파악하여 새로운 도메인을 설정하는 방법)

## 3. 결과 및 고찰

유한요소법을 이용하여 얻은 고분자 용액의 속도 벡터를 그림 3에 나타내었다. 고분자 용액을 밀어낸 지점인  $z=11mm$ 에서부터 주사체의 끝부분인  $z=9mm$  지점까지의 속도 벡터의 분포는 역시 포물선의 형태를 지니고 있으며, 이후 속도 벡터는 점차 중심축을 향해 수렴해가고 있다. 이 추세가 계속된다면 고분자가 방사되는 형상은 cone-shape으로 변화됨을 알 수 있다.

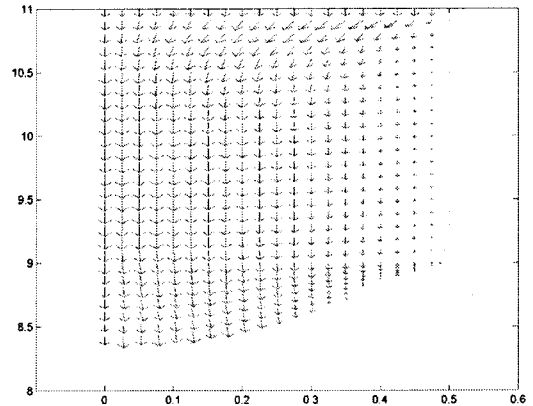


그림 3. 중심축 향하고 있는 고분자 용액의 속도 벡터

## 4. 결론

본 연구에서는 하전된 고분자 젯의 거동을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 비록 고분자 용액의 meniscus를 8.5mm 부분까지만 계산하였지만, 지속적인 연구를 통하여 전체적인 고분자 젯의 거동을 해석하면 보다 실용적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 나노섬유 물성을 좌우하는 위평 현상에 대해서도 해석이 가능할 것이므로 연속적이고 끝은 나노섬유 제조를 위한 새로운 전기방사 기구의 설계가 가능할 것이다.

## 참고문헌

1. Fang Yan, Bakhtier Farouk, Frank Ko, Numerical modeling of an electrostatically driven liquid meniscus in the cone-jet mode, Journal of Aerosol Science, 2002