

Poly(lactic acid) 용융방사공정의 동역학 해석

오태환,* 김성철

영남대학교 섬유패션학부
712-749 경북 경산시 대동 214-1

(2009년 8월 11일 접수; 2009년 9월 2일 수정본 접수; 2009년 9월 3일 채택)

Analysis on Poly(lactic acid) Melt Spinning Dynamics

Tae Hwan Oh* and Seong Cheol Kim

School of Textiles, Yeungnam University
214-1 Daedong, Kyeongsan, Kyungbuk 712-749, Korea

(Received for review August 11, 2009; Revision received September 2, 2009; Accepted September 3, 2009)

요 약

Poly(lactic acid) (PLA) 용융방사공정의 속도, 직경, 온도, 인장응력 분포를 구하기 위해 수치모사를 실시하였다. 유한차분법을 이용하여 반지름 방향으로의 온도분포곡선을 구하였다. 방사속도 1 km/min에서 5 km/min까지 방사속도에 따른 PLA 방사공정의 변화와 poly(ethylene terephthalate) (PET)와의 거동을 비교해 보았고, 방사공정변수가 섬유 중심부와 표면과의 온도차에 미치는 영향을 살펴보았다. PLA는 용융온도가 PET에 비해 낮음에도 불구하고 동일 방사조건에서 더딘 냉각속도를 보였고 방사거리에 따른 방사속도의 증가도 PET가 더 빠른 양상을 나타내었다. PLA의 섬유중심부와 섬유표면과의 온도차는 약 4.6 K에 이르렀는데, 이는 PET의 10.4 K에 비하여 낮은 값이다. PLA 섬유중심부와 표면과의 온도차는 냉각풍속도와 방사온도가 증가할수록 증가하였고, 냉각풍 온도가 감소할수록 증가하는 경향을 나타내었다.

주제어 : PLA 용융방사, 수치모사, 유한차분법, 온도변화, 공정변수

Abstract : Profiles development of melt spinning process of poly(lactic acid) (PLA) was simulated via a numerical method and the radial temperature distribution was calculated using finite difference method. The spinning speed ranged from 1 km/min to 5 km/min was analyzed and the effect of spinning conditions on the radial temperature distribution was investigated. At low spinning speed, the difference between PLA and poly(ethylene terephthalate) (PET) was relatively small. As the spinning speed increased, the difference in velocity profile became prominent. PLA showed a slower spinning speed than PET and solidified more slowly. The temperature difference between the core and surface of the PLA filament reached 4.6 K, which was less than that of PET filament with a difference of 10.4 K. The radial temperature difference increased with increasing the cooling-air velocity and the spinning temperature.

Keywords : PLA melt spinning, Numerical method, Finite difference method, Temperature profile, Process variable

1. 서 론

화석연료의 고갈과 환경오염에 대한 해결 방안으로 천연에

너지, 자원재활용, 이산화탄소 저감 방안 등에 관한 많은 관심과 연구가 진행되어 왔으며 최근에는 친환경 녹색성장 분야에 대한 활발한 연구와 상품 개발이 다양한 분야에서 진행되고

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: : taehwanoh@ynu.ac.kr

있다[1-3]. 고분자재료 분야에서는 생분해성 고분자나 재배 가능한 식물을 원료로 하는 재생 가능한(renewable) 재료들이 많은 관심을 받고 있으며, 이 중 poly(lactic acid) (PLA)는 생분해가 가능하여 제품 사용 후 폐기물을 매립하면 완전히 자연 분해되는 청정소재로 식물인 옥수수 전분을 출발 원료로 하는 고분자 소재로 Cargill Dow Polymers사(현재 Nature Works®)에 의해 상업적인 고분자의 생산이 가능해진 이후 학술적 연구 뿐만 아니라 섬유, 플라스틱, 포장재 등과 의료용 재료 분야에서 응용제품이 생산되고 있으며, 앞으로 기존의 석유화학 제품에서 만들어지는 고분자들의 많은 양을 대체할 것으로 예상된다[4-8].

PLA는 생분해 성능과 함께 기계적 물성도 우수하고 용융방사가 가능하여 섬유분야에서도 상업화를 위한 노력이 진행되어 일부 제품이 일본에서 먼저 상업화가 되었고, 최근에는 휴비스, 도레이세한 등의 국내 업체에서도 상업화를 추진 중이다. PLA 섬유는 인체친화적이고 촉감이 부드러우며 면과 폴리에스터(poly(ethylene terephthalate), PET) 섬유 등과의 혼방이 가능해 섬유로의 용도가 확대되고 있으며 의류용 이외에도 부직포로 제조하여 산업용으로 용도 확대가 이루어지고 있다.

용융방사공정(melt spinning process)은 연속적인 변형공정으로 방사공정의 동역학을 해석하기 위한 노력은 Kase and Matuso[9]를 시작으로 해서 많은 연구자들에 의해 진행되었으며 수치해석적 방법을 통해 이루어지고 있다[9-12]. 이를 위해서는 방사공정을 지배하는 연속방정식(continuity equation), 운동량방정식(momentum equation), 에너지방정식(energy equation), 조성방정식(constitutive equation)으로 이루어진 지배방정식(governing equations)을 세우고, 미분방정식의 형태로 주어진 연립방정식을 수치해석적 방법으로 해를 구하면 된다.

본 연구에서는 수치해석적 방법을 통해 PLA 섬유를 제조하는 주된 방법인 용융방사(melt spinning) 공정의 동역학을 해석하고자 한다. 이를 통해 용융방사의 공정 변수인 섬유지름, 속도, 온도, 인장응력의 변화를 살펴보고 균일한 섬유를 제조하기 위해 조절하는 용융방사의 공정 변수에 따른 섬유 표면과 중심 부분의 온도 편차를 계산해 공정 변수의 영향을 살펴보고자 한다.

2. 이 론

일축신장인 용융방사공정의 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다. 지배방정식을 유도하기 위한 가정으로는 1) 고분자 용융체는 연속체(continuum), 2) 용융체의 유동은 정상상태(steady state)와 비압축성(incompressible), 3) 섬유단면은 원형, 4) 용융체는 뉴턴거동, 5) 다이팽윤(die swell)효과는 무시, 6) 섬유형성 중의 결정화도와 배향도와 같은 구조 변화는 무시한다는 것들이다 [9-12]. 아래 식은 용융방사공정을 단순화하기 위하여 각 방정식을 섬유 단면에 대해 평균하여 섬유 축 방향인 z축 방향에 대해 나타낸 식으로 thin filament equation으로 불리는 섬유형성공정을 나타내는 일반적인 지배방정식이다[9,10].

$$W = \rho A v_z \tag{1}$$

$$dF/dz = W(dv_z/dz - g/v_z) + \pi \rho_a v_z^2 C_f D/2 \tag{2}$$

$$dT/dz = -\pi Dh(T - T_a)/(WC_p) \tag{3}$$

$$F = \eta A(dv_z/dz) \tag{4}$$

여기서, W 는 토출량(mass flow rate), A 는 섬유단면적, v_z 는 섬유의 속도, ρ_a 는 공기의 밀도, F 는 작용하는 힘, z 는 축 방향의 임의 지점, D 는 섬유지름, C_f 는 표면마찰계수(skin friction coefficient), g 는 중력상수, C_p 는 열용량(specific heat capacity of polymer), h 는 열전달계수(heat transfer coefficient of polymer), T 는 섬유의 온도, T_a 는 섬유 주위 공기의 온도(temperature of surrounding air), η 는 신장점도(elongational viscosity)이다.

용융점도는 온도만의 함수로 가정하였으며 다음의 Eq. 5와 같으며, Cooper-Whiet and Mackay[13]가 구한 온도에 따른 용융점도 값으로부터 선형회귀를 통해 구하였다. PLA의 용융점도의 거동은 넓은 전단속도 범위에서 뉴턴 거동에 가까우며 높은 전단속도 영역에서 약간의 전단박화(shear thinning) 현상을 보인다.

$$\eta = 1.3 \times 10^{-5} \exp\left(\frac{9142.7}{T + 273}\right) \tag{5}$$

경계조건은 다음과 같다.

$$T(0) = T_{die}, v_z(0) = v_0, v_z(L) = v_L \tag{6}$$

여기서 T_{die} 는 방사온도(spinning temperature), v_0 는 초기 토출속도(initial speed), v_L 은 방사속도(spinning speed), L 은 방사길이로 노즐(nozzle or spinneret)에서 권취기(winder)까지의 거리를 의미한다.

물질상수와 열역학적 변수들의 관계는 다음과 같으며 Table 1에 주요 변수들에 대해 정리하였다[9-12].

$$h = 0.42 \left(\frac{k_a}{D}\right) \text{Re}_d^{0.334} \left[1 + \left(\frac{8v_a}{v_z}\right)^2\right]^{0.1667} \tag{7}$$

$$C_f = 0.37 \text{Re}_d^{-0.61} \tag{8}$$

$$\text{Re}_d = \left(\frac{v_z D}{\mu_a}\right) \tag{9}$$

여기서 k_a 는 공기의 열전도도(thermal conductivity of air),

Table 1. Material parameters used in the simulation

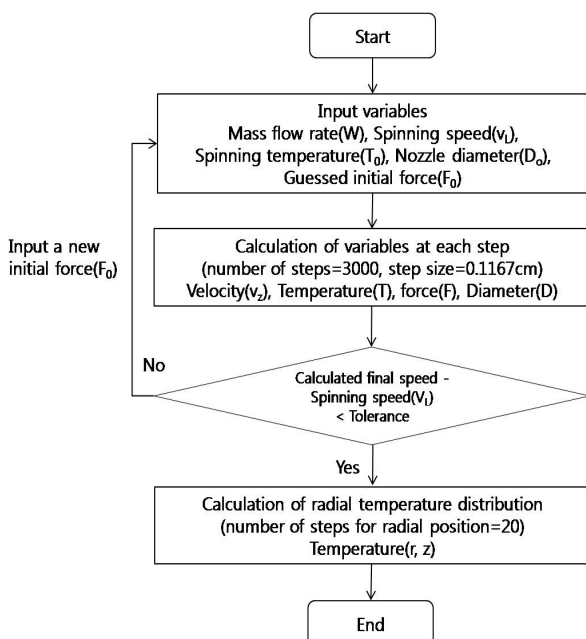
Parameters	Values
Thermal conductivity of air (k_a , g · cm/sec ³ · K)	2.63×10^3
Kinematic viscosity of air (μ_a , cm ² /sec)	0.29
Thermal conductivity of PLA (k_p , g · cm/sec ³ · K)	2.63×10^3
Thermal conductivity of PET (k_p , g · cm/sec ³ · K)	2.09×10^3
Specific heat capacity of PLA (C_p , cm ² /sec ² · K)	$(1.9424 + 1.055 \times 10^{-3}T) \times 10^7$
Specific heat capacity of PET (C_p , cm ² /sec ² · K)	$(1.26 + 2.52 \times 10^{-3}T) \times 10^7$
Density of PET (ρ , g/cm ³)	$1.356 - 5 \times 10^{-4}T$
Density of PLA (ρ , g/cm ³)	$1.1452 / (1 + 7.4 \times 10^{-4}(T - 150))$
Elongational viscosity of PET (η , Poise)	$0.73 \exp(5300 / (T + 273))$

v_a 는 냉각공기의 속도(cooling-air velocity), μ_a 는 공기의 동역학적점도(kinematic viscosity of air), Re_d 는 레이놀즈수(Reynolds number)이다.

Eqs. 1-4의 연립미분방정식을 풀기 위해 shooting method와 Euler method를 사용하여 계산하였다. 수치해석 방법은 Figure 1에 순서대로 나타내었다. 이때 tolerance는 0.001이었으며, 수치모사를 위한 방사조건은 Table 2에 나타내었다.

Eqs. 1-4의 연립미분방정식을 수치해석적으로 해를 구한 후 반지름 방향으로의 온도 분포를 구하기 위한 반지름 방향(r)과 섬유축 방향(z)을 모두 고려한 2차원의 에너지방정식은 다음과 같다[14].

$$\frac{WC_p}{\pi R^2} \left[\frac{r}{R} \frac{dR}{dz} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial z} \right] = k_p \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (10)$$

**Figure 1. Flow chart of the numerical simulation.****Table 2. Conditions for melt spinning in the simulation**

No.	Spinning speed (km/min)
1	1.0
2	2.0
3	3.0
4	4.0
5	5.0

Mass flow rate: 5.0 g/min · hole, Quench air velocity: 0.3 m/sec, Quench air temperature: 288 K, Spinning temperature of PLA : 503 K, Spinning temperature of PET : 563 K

여기서 k_p 는 고분자의 열전도도(thermal conductivity of polymer), R 은 섬유의 반지름이다. Eq. 10을 풀기 위해 무차원 변수를 도입하여 Eq. 10을 무차원화하면 다음과 같다[14].

$$\frac{\partial \theta}{\partial \zeta} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \quad (11)$$

여기서 $\xi = \frac{r}{R}$, $\zeta = \frac{\pi k_p z}{WC_p}$, $\theta = \frac{T - T_a}{T_{die} - T_a}$ 이다. 이때 경계조건은 다음과 같다.

$$T(r, 0) = T_{die}; \quad \theta(\xi, 0) = 1.0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial T(0, z)}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial \theta(0, \zeta)}{\partial \xi} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial T(R, z)}{\partial r} = -\frac{h}{k_p} (T(R, z) - T_a); \quad \frac{\partial \theta(1, \zeta)}{\partial \xi} = -\frac{hR}{k_p} \theta \quad (14)$$

Eq. 11의 미분방정식을 풀기 위해 유한차분법(Finite difference method, FDM)인 implicit Crank-Nicolson method를 이용하여 행렬식의 형태로 전개하고, 행렬식을 Gauss-Seidel iterative

Table 3. Conditions for melt spinning of PLA in the simulation.

Reduced value	Quench air velocity (m/sec)	Quench air temperature (K)	Spinning temperature (K)
-1	0.2	288	493
0	0.3	293	503
1	0.4	298	513

Mass flow rate: 5.0 g/min · hole, Spinning speed: 5 km/min

method를 사용하여 해를 구하였다. 용융방사공정의 해석에 가장 많이 사용되는 PET와의 비교를 위해 방사온도를 제외한 동일 조건에서 PET와 PLA를 비교해 보았다. PET와의 비교를 위한 방사조건은 Table 2의 방사속도 1 km/min와 5 km/min의 두 경우에 대해 실시하였다. 수치해석 프로그램은 FORTRAN을 사용하여 작성하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 2는 PLA 용융방사공정의 속도곡선을 나타낸 그림이다. PLA의 방사속도 곡선은 일반적인 용융방사 섬유에서 나타나는 전형적인 s자형 속도 곡선[15]과 유사한 형태를 나타내고 있다. 방사노즐에서 가까운 초기변형구간에서는 방사속도에 따른 차이가 뚜렷하지 않으나 방사거리 50 cm 이후부터 본격적으로 속도 증가가 발생하여 방사속도 증가에 따른 속도의 증가 속도에 차이가 뚜렷해진다.

Figure 3은 PLA섬유의 방사속도구배(velocity gradient)를 나타낸 그림이다. 속도구배는 신장변형의 속도를 나타낸다. 방사속도가 증가할수록 속도구배 곡선의 최대값이 증가하고 최대값이 나타나는 방사선상의 지점이 권취(winding) 부위로 약간씩 이동하고 있다. 속도구배 최대값은 방사속도 1 km/min에서 13.2 s^{-1} , 방사속도 5 km/min에서 83.8 s^{-1} 을 나타내었다. 토출량(mass-flow rate)을 고정하였으므로 모든 조건에서 초기속도는 동일하며 최종 권취속도를 변화시켰으므로 방사속도의

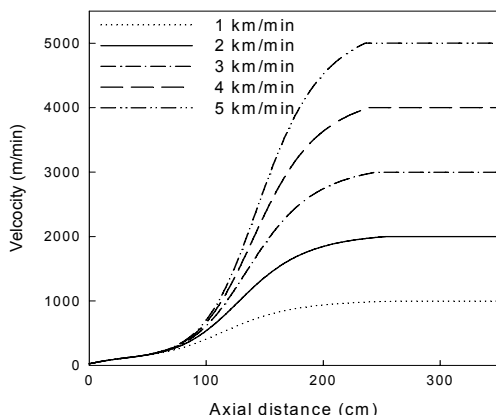


Figure 2. Velocity profiles of PLA running filament for different spinning speeds.

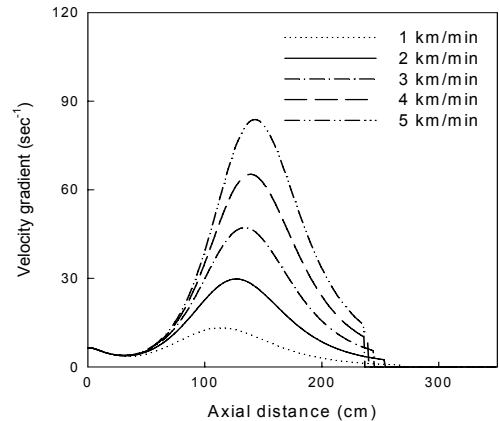


Figure 3. Velocity gradient profiles of PLA running filament for different spinning speeds.

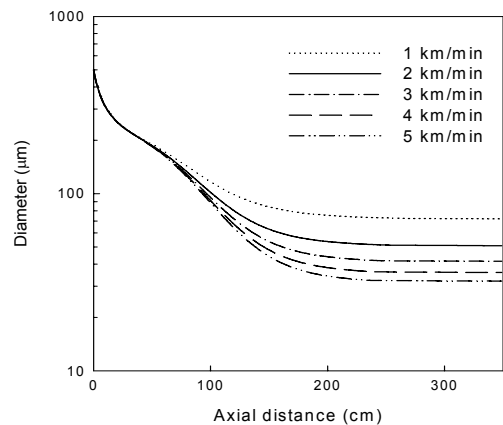


Figure 4. Diameter profiles of PLA running filament for different spinning speeds.

증가에 따라 방사연신비(draw ratio)는 증가하게 되고 이에 따라 속도구배도 방사속도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타낸다.

Figure 4는 섬유 축 방향에 따른 지름의 변화를 나타낸 곡선이다. 섬유의 주행속도를 구하면 연속방정식에 의해 섬유의 지름을 계산할 수 있다. 용융방사공정에서는 방사속도와 토출속도의 비인 연신비에 의해 용융고분자가 축 방향으로 신장하게 되고 속도의 증가에 따라 직경은 감소하게 된다. 속도곡선에서와 마찬가지로 방사노즐 근처의 초기 변형구간에서는 직경의 차이가 적다가 초기변형구간 이후에 방사속도가 증가할수록 급격한 직경의 감소가 나타난다.

Figure 5는 방사속도에 따른 온도 곡선의 변화를 나타낸 것인데 온도곡선은 토출량이 동일하고 방사속도만 다른 조건이므로 방사속도에 따라 약간의 변화만 있을 뿐 큰 영향을 미치지 않았다. 방사속도가 증가할수록 지름의 감소가 크므로 냉각효율이 높아져 냉각속도가 약간 증가하는 경향을 보였다.

Figure 6은 방사속도에 따른 인장응력의 변화를 나타낸 것으로서 방사속도가 증가할수록 인장력은 증가한다. 방사속도가 증가할수록 방사연신비는 증가하게 되고, 힘의 평형식에서

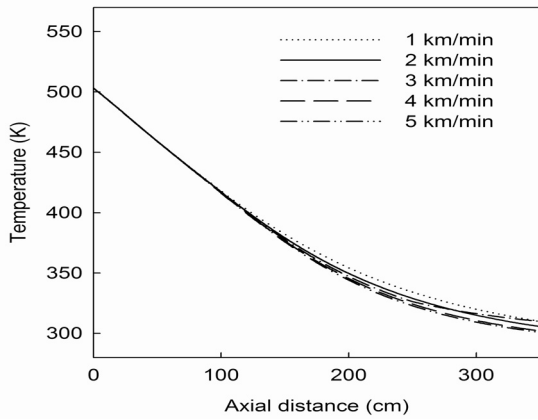


Figure 5. Temperature profiles of PLA running filament for different spinning speeds.

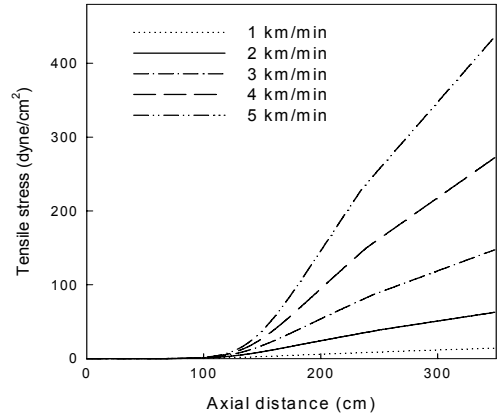


Figure 6. Tensile stress profiles of PLA running filament for different spinning speeds.

방사선상에서 작용하는 주된 힘인 유변학적 힘이 속도구배의 값에 비례하므로 신장력은 방사속도의 변화에 따라 증가해서 증가하게 된다.

Figure 7은 PLA와 PET와의 용융방사공정의 속도, 지름, 온도, 응력 곡선을 비교해 나타낸 그림이다. 두 섬유유 의 거동을 비

교한 것은 PET는 합성섬유 중 가장 많이 생산되는 섬유로 대부분의 화학섬유 제조회사가 PET 제조설비를 보유하고 있으므로 PET의 거동과 PLA의 방사동역학을 비교해봄으로써 PET 제조 설비를 활용하여 PLA를 제조하는데 있어 참조하기 위함이다. 방사온도의 경우 PLA와 PET의 용융온도가 다르기

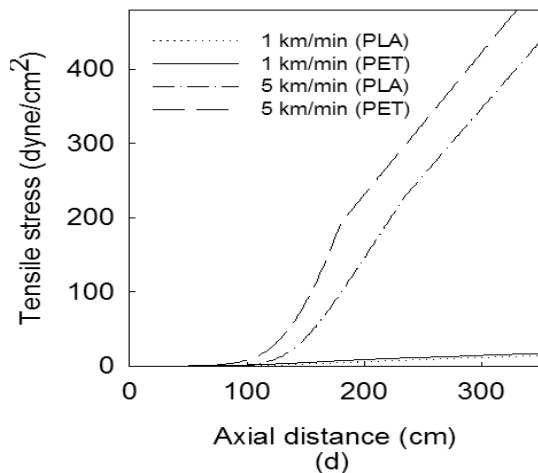
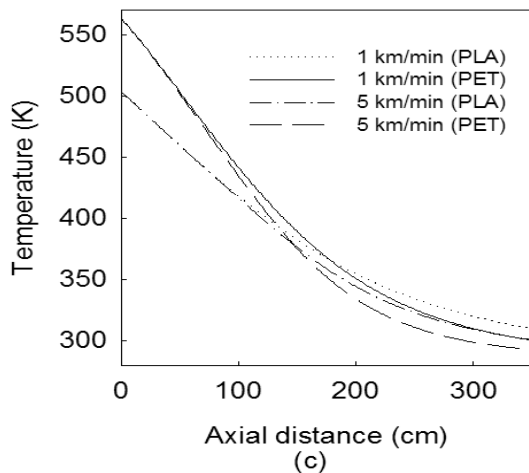
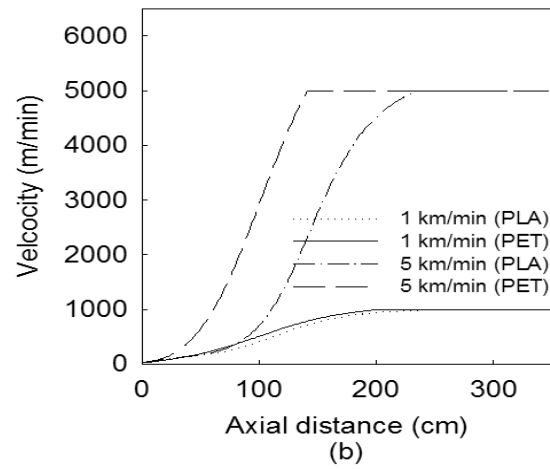
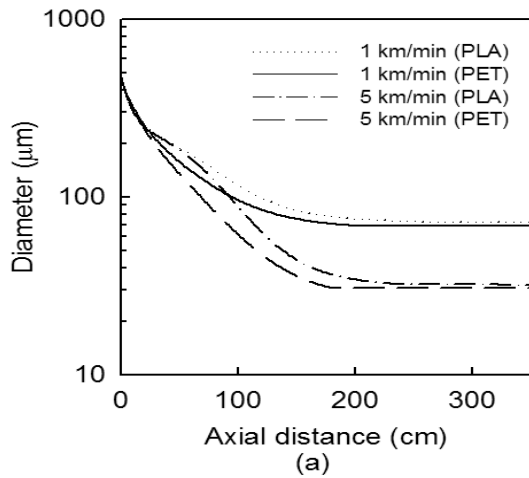


Figure 7. Comparison of PLA and PET for (a) diameter, (b) spinning velocity, (c) temperature and (d) stress profiles.

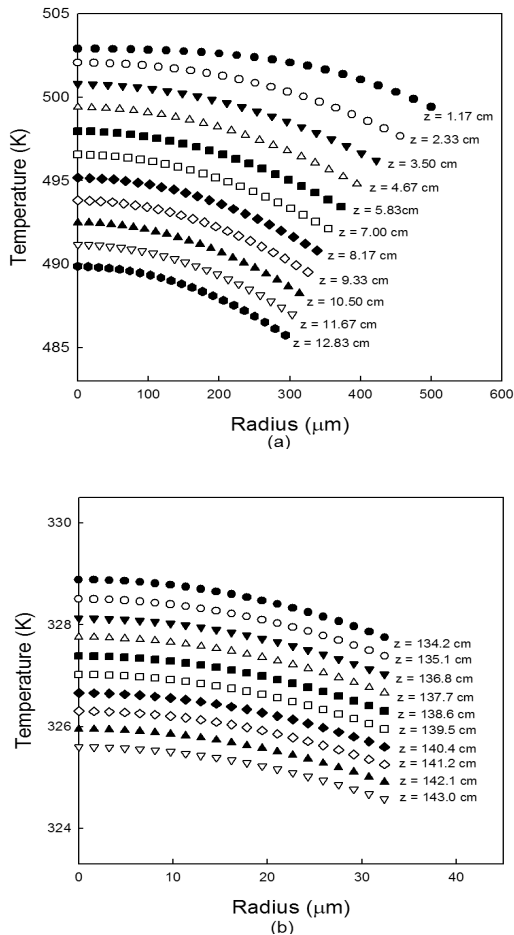


Figure 8. Radial temperature distributions (a) at initial deformation region and (b) near solidification region: No. 5 condition in Table 2.

때문에 PLA는 503 K로 PET는 563 K로 달리하였다. 방사온도를 제외하고 다른 방사조건은 모두 동일하게 하여 PLA와 PET 방사속도 곡선(Figure 7(b))을 비교해보면 저속영역인 방사속도 1 km/min에서는 차이가 적었으나, 고속방사 영역인 방사속도 5 km/min에서는 PET의 방사거리에 따른 속도의 증가가 PLA에 비해 현저하게 빠르게 나타났다. 온도곡선을 살펴보면 PET의 방사온도가 PLA 보다 60 K 이상 높은데도 불구하고 PET의 냉각속도가 PLA에 비해 빠르고 특히 5 km/min의 고속영역에서 냉각속도의 차이가 더 심해져 방사길이 148.2 cm 지점에서 PET의 온도가 PLA의 온도보다 낮아지는 결과가 나타났다. 이는 Table 1에서 볼 수 있듯이 PLA의 열용량이 PET의 열용량 보다 약간 큰 값을 갖고, PET의 경우 섬유직경의 감소가 더 커서(Figure 7(a)) Eq. 7에서도 볼 수 있듯이 열전달계수가 직경에 반비례하므로 직경이 작아진 PET의 경우 열전달이 더 잘 일어나 PLA 대비 냉각속도가 빨라지게 된다. 인장응력(Figure 7(d))도 큰 속도구배에 기인하여 고속영역에서 PET가 PLA의 인장응력보다 큰 값을 나타내었다.

Figure 8은 방사노즐 근처와 고화점(solidification point) 부근에서의 반지름 방향으로의 온도분포를 나타낸 그림이다. 방

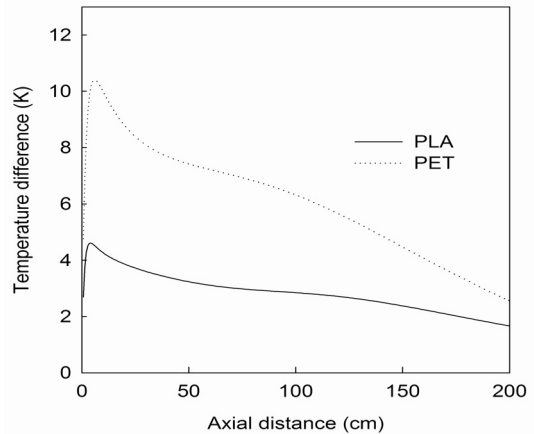


Figure 9. Temperature difference profiles between the center and surface for PLA and PET spinning: No. 5 condition in Table 2.

사노즐 근처에서 섬유 중심부와 표면 부분의 온도차가 크고, 고화점 부근에서는 차이가 감소함을 볼 수 있다. Figure 9는 섬유 중심부와 표면 사이의 온도차를 방사선상에 따라 나타낸 그림이다. 방사노즐에 아주 가까운 부근에서 최대값을 나타낸 이후에 온도차가 점점 감소하는 것을 볼 수 있다. 이때 PLA의 섬유중심부와 표면간의 최대 온도차는 4.6 K였다. 방사온도를 제외한 동일 조건의 PET와 비교해 보면 PET의 경우 섬유중심부와 표면 사이의 온도차는 10.4 K로 PLA에 비해 높은 값을 나타내었다. 섬유의 균제도(uniformity) 측면에서는 PET보다 섬유중심부와 표면과의 온도차가 상대적으로 적은 PLA가 유리할 것으로 예상된다.

Figure 10은 동일한 토출량과 방사속도 조건에서 나머지 용융방사 조건인 냉각풍 속도, 냉각풍 온도, 방사온도에 따른 섬유중심부와 표면간의 최대 온도차에 대해 살펴본 것이다. 방사조건은 Table 3에 나타내었는데 실제 생산조건에서 변화시킬 수 있는 범위의 값을 선택하였다. 그림에서 볼 수 있듯이

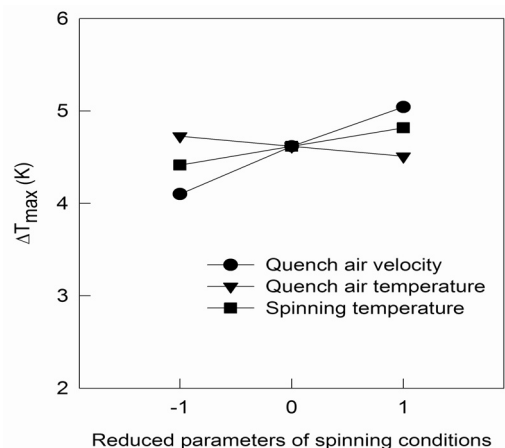


Figure 10. Effect of spinning parameters on radial temperature difference for PLA spinning.

냉각풍속도와 방사온도가 증가할수록, 냉각풍 온도가 감소할수록 섬유중심부와 표면간의 온도차는 증가하는 경향을 나타내었고 냉각풍속도에 따라 가장 큰 변화를 나타내었다. 하지만 모든 공정변수에서 섬유중심부와 표면과의 차이는 4~5 K 정도이며, 공정변수의 변화에 따라 비교적 작은 차이를 나타내었다.

4. 결 론

PLA의 용융방사공정의 동역학을 수치해석 방법을 통해 모사한 결과 섬유의 지름, 속도, 온도, 응력 변화를 구할 수 있었으며 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) PLA의 용융방사공정 변수인 지름, 속도, 온도, 응력의 변화는 방사속도 1 km/min의 저속영역에서는 PET와 유사한 거동을 나타내었으나 고속방사 영역인 5 km/min 영역에서는 방사거리에 따른 주행속도의 증가가 PET 보다 느렸고, 냉각속도도 느렸다.
- (2) 방사속도 1~5 km/min의 범위에서 속도구배는 13.2 ~ 83.8 s⁻¹였으며 방사속도가 증가할수록 최대값이 증가하고 최대값이 나타나는 섬유축 방향의 지점이 권취 부위로 이동되었다.
- (3) 섬유의 중심부와 표면과의 온도차는 PLA가 PET에 비해 적은 값을 나타내었다. PLA의 경우 섬유 중심부와 표면과의 온도차가 4.6 K인데 비해 PET의 경우 10.4 K 였다.
- (4) 섬유의 중심부와 표면과의 온도차에 미치는 공정변수의 영향은 냉각공기의 속도와 방사온도는 증가할수록 냉각공기의 온도는 감소할수록 커지는 경향을 나타내었다.

참 사

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI-0401-04) 지원으로 수행되었습니다.

사용기호

- A ; Cross-sectional area of running filament (cm²)
 C_f ; Skin friction coefficient
 C_p ; Specific heat capacity of polymer (cm²/sec² K)
 D ; Diameter (cm)
 F ; Force (dyne)
 L ; Spinline length (cm)
 R ; Radius (cm)
 Re_d ; Reynolds number
 T ; Temperature of running filament (K)

- T_a ; Temperature of surrounding air (K)
 T_{die} ; Spinning temperature (K)
 W ; Mass flow rate (g/min)
 g ; Gravity constant (cm/sec²)
 h ; Heat transfer coefficient of polymer (g/cm² · sec³ · K)
 k_a ; Thermal conductivity of air (g/cm · sec³ · K)
 k_p ; Thermal conductivity of polymer (g/cm · sec³ · K)
 v_a ; Quench air velocity (cm/sec)
 v_0 ; Initial speed (cm/sec)
 v_L ; Spinning speed (cm/sec)
 v_z ; Velocity of running filament (cm/sec)
 z ; Axial position (cm)
 η ; Elongational viscosity (Poise)
 μ_a ; Kinematic viscosity of air (cm²/sec)
 ρ_a ; Air density (g/cm³)

참고문헌

1. Narayan, R., "Drivers and Technology Examples: Biobased & Biodegradable Polymer Materials," in Khemmani, K. C., and Scholz, C., Eds., Rationale, ACS, Washington DC (2006).
2. Lipinsky, E. S., and Sinclair, R. G., "Is Lactic Acid a Commodity Chemical?," *Chem. Eng. Prog.*, **82**, 26-31 (1986).
3. Kim, Y. H., and Yi, J. H., "Environmental Sensing Technology with Nanotechnology for the Clean Technology," *Clean Tech.*, **11**, 75-82 (2005).
4. Mezghani, K., and Spruiell, J. E., "High Speed Melt Spinning of Poly(L-lactic acid) Filaments," *J. Polym. Sci. Pol. Phys.*, **36**, 1005-1012 (1998).
5. Fambri, L., Pegoretti, A., Mazzurana, M., and Migliaresi, C. J., "Biodegradable Fibers," *J. Mater. Sci.-Mater. M.*, **5**, 679-683 (1994).
6. Janzen, J., Dorgan, J. R., Knauss, D. M., Hait, S. B., Limoges, B. R., and Hutchinson, M. H., "Fundamental Solution and Single Chain Properties of Polylactides," *J. Polym. Sci. Pol. Phys.*, **43**, 3100-3111 (2005)
7. Dorgan, J. R., Lehermeier, H., and Mang, M., "Thermal and Rheological Properties of Commercial Grade Poly(lactic acid)s," *J. Polym. Environ.*, **8**, 1-9 (2000) .
8. Ramkumar, D. H. S., and Bhattacharya, M., "Steady Shear and Dynamic Properties of Biodegradable Polyesters," *Polym. Eng. Sci.*, **38**, 1426-1435 (1998) .
9. Kase, S., and Matsuo, T., "Studies on Melt Spinning. I. Fundamental Equations on the Dynamics of Melt Spinning," *J. Polym. Sci. Pol. Chem.*, **3**, 2541-2554 (1965).
10. Kikutani, T., Radhakrishnan, J., Arikawa, S., Takaku, A., Okui,

- N., Jin, X. Niwa, f., and Kudo, Y., "High-speed Melt-spinning of Bicomponent Fibers-Mechanism of Fiber Structure Development in Poly(ethylene Terephthalate)/ Polypropylene System," *J. Appl. Polym. Sci.*, **62**, 1913-1924 (1996), .
11. Shenoy, A. V., and Nadkarni, V. M., "Using Poly(ethylene Terephthalate) Melt Spinning Simulation for Process Optimization," *Text. Res. J.*, **54**, 778-783 (1984).
 12. Dutta, A., and Nadkarni, V. M., "Identifying Critical Process Variables in PET Melt Spinning," *Text. Res. J.*, **54**, 35-42 (1984).
 13. Cooper-White, J. J., and Mackay, M. E., "Rheological Properties of Poly(lactides). Effect of Molecular Weight and Temperature on the Viscoelasticity of Poly(l-lactin acid)", *J. Polym. Sci. Pol. Phys.*, **37**, 1803-1814 (1999).
 14. Hutchenson, K. W., Edie, D. D., and Riggs, D. M., "Calculated Internal Stress distributions in Melt-spun Fibers," *J. Appl. Polym. Sci.*, **33**, 1073-1088 (1987).
 15. Oh, T. H., Nam, Y. S., Kim, K. J., and Kim, Y. H., "Theoretical Analysis of the Melt Spinning Process of Poly(trimethylene Terephthalate) Fibers," *Fiber. Polym.*, **8**, 507-511 (2007).