복합섬유의 고속용융방사에 대한 수치모사
- HDPE/PET 복합섬유 -

구본균, 김경효, 조현혹
부산대학교 공과대학 섬유공학과

1. 서론

복합방사에 의해 복수의 성분을 단섬유내에 함유하고 있는 섬유를 복합섬유라 하며 복합섬유에는 천연섬유인 양모섬유가 있고, 합성섬유로는 sheath/core형, side-by-side형, 해도형 등의 다양한 형태의 섬유가 있다. 최초로 side-by-side형의 비스코스 섬유가 1937년에 발명되었고, 이후 1960년대부터는 나일론 복합섬유가 양말·메리야스류, 부직포 제조의 용도로 사용되기 시작했고 최근에 와서는 극세섬유나 권축섬유 등 특수한 기능을 가진 섬유를 제조하기 위한 수단으로 sheath/core형을 비롯한 많은 형태의 복합섬유가 다양한 고분자의 조합으로 제조되고 있다[1].

sheath/core형의 복합섬유는 열융착부직포에 많이 사용되며, 이에 사용되는 복합섬유는 필라멘트간의 양호한 열융착을 위해서 sheath에 사용되는 고분자의 융점이 core에 사용되는 고분자의 융점보다 낮아야 한다. 이러한 이유로 본연구에서는 sheath 성분에 융점이 비교적 낮은 고밀도 폴리에틸렌(HDPE(11,28))을 사용하였고 core 성분에는 폴리에틸렌테레프탈레이트(PET)를 사용하였다. 복합섬유에 대한 공정상의 변화와 이에 따른 복합섬유의 구조 및 물성에 관한 연구[2]는 있으나, HDPE(11,28)/PET 복합섬유의 고속용융방사에 있어 수치해석을 이용한 연구는 거의 전무한 실정이며 단일성분 섬유의 방사에 대한 수치해석[3,4]이 대부분을 차지하고 있다. 따라서 본 연구에서는 sheath/core형의 HDPE(11,28)/PET 복합섬유에 대한 수치해석결과와 방사된 시료의 물성을 비교·검토함으로써 복합섬유의 구조형성과정을 고찰하고자 한다.

수치해석에 있어 sheath/core 각 성분의 성분비를 고려하여 지배방정식을 기술하였으며 연립미분방정식을 푸는 방법으로는 간편하고 계산의 신속성에 있어 유리한 Euler법[5]을 사용하였다.

2. 수치해석 및 실험

sheath/core 성분의 성분비를 고려하여 다음과 같은 지배방정식을 세웠으며 이때 다음과 같은 가정을 하였다. 구금을 통해 방사된 섬유는 항상 원형상태를 유지하며, 유동은 정상상태(steady state)이다. 섬유단면의 변화와 섬유 표면의 표면장력은 무시하고, 고속방사시 결정화 발열은 고려하지 않았다. 한편 유동은 뉴턴거동을 나타낸다고 가정하였다.

* Mass balance equation

$$W = W_1 + W_2 = (\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2) V$$

* Momentum balance equation

$$\frac{dF}{dz} = \frac{dF_1}{dz} + \frac{dF_2}{dz} = (W_1 + W_2)(\frac{dV}{dz} - \frac{g}{V}) + \pi D \tau_f$$

* Energy balance equation

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{\pi D h}{C_{p1} + C_{p2}}(T - T_a)$$

* Constitutive equation

$$\frac{dV}{dz} = \frac{F_1 + F_2}{A_1 \eta_1 + A_2 \eta_2}$$

위의 지배방정식에 사용된 기호에 대한 설명은 *Table* 1과 같다.

Table 1. Parameters used for the simulation

1	Sheath component	V	Velocity of fiber
2	Core component	F	Tension
ρ	Density of polymer	g	Acceleration of gravity
W	Mass out flow rate	τ_f	Air-friction coefficient
D	Diameter of fiber	h	Heat transfer coefficient
A	Area of cross section	C_p	Specific heat of polymer
η	Elongational viscosity		

위의 연립미분방정식을 푸는데는 여러 가지 방법이 있으나 기존의 연구[3,4]에서는 주로 Euler방법과 Runge-Kutta방법을 사용했는데, 여기서는 보다 간편한 Euler방법을 사용하였다. 차후에 여러 방법들에 대한 검토가 진행되어야 할 것이다.

sheath성분으로는 HDPE(11)(MFR=11), HDPE(28)(MFR=28)를 core성분으로는 PET($[\eta]$=0.62 dL/g)를 사용하였으며 sheath, core성분의 토출비는 1:1로 하였다. 시료의 방사에 사용된 방사조건은 *Table* 2와 같다.

Table 2. Spinning conditions of bicomponent fibers used in the simulation

Variables	Conditions
Mass flow rate	W = 5.0 g/min
Spinning temperature	T_0 = 290 ℃
Spinning diameter	D_0 = 0.5 mm
Ambient temperature	T_a = 25 ℃
Sheath component	HDPE(11), HDPE(28)
Core component	PET

복합섬유중의 각성분의 분자배향을 평가하기 위해, 간섭현미경(Carl Zeiss Jena Co.)에 편광현미경을 장착하여 섬유축방향과 그에 수직한 방향의 편광하에서 섬유의 복굴절률을 측정하였으며, 방사선상의 직경의 변화는 단색 레이저를 사용하여 20cm 간격으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

고속방사시 발생하는 결정화 현상을 고려하지 않았기 때문에 섬유의 세화 거동을 정확히 예측할 수는 없지만 토출지점과 권취지점의 직경에 대한 예측치와 실측치는 상당한 일치를 보이고 있음을 *Figure* 1을 통해서 알 수 있다. 예측치는 권취속도 3km/min, 5km/min의 값이 거의 일치하고 있으나 실측치는 약간의 차이를 보이고 있다. 하지만 권취속도가 증가함에 따라 섬유직경이 감소하는 경향은 예측치, 실측치에 있어 유사하다.

Figure 2에 sheath성분(HDPE(11))과 core성분(PET)이 받는 응력을 각각 나타내었는데 모든 권취속도에서 core의 PET가 sheath의 HDPE(11)보다 더 큰 응력을 받고 있음을 알 수 있다. $Stress = \eta(T) \times dV/dz$의 관계식과 각 성분의 점도의 온도 의존성을 고려하고, 토출되는 순간과 권취지점의 각 성분의 점도를 계산해 보면, 토출 초기단계에서는 HDPE(11)성분의 점도와 PET성분의 점도가 비슷하고 속도구배도 비슷하므로 각 성분이 받는 응력의 크기도 비슷하다. 그러나 권취지점 근처로 가면서 토출거리가 증가함에 따라 섬유는 점차 냉각되어 PET성분의 점도가 더욱 커지게 되고, 이는 PET성분이 받는 응력을 증가시킨다. 권취속도가 증가함에 따라 각각의 성분이 받는 응력의 차는 더욱 증가(*Figure* 3)하게 되고 이는 core성분에 있는 PET의 분자배향의 상대적 증가를 가져 온다. 권취속도에 따른 각 성분에 대한 복굴절률을 조사해 보면 *Figure* 4와 같은데 이를 응력 분포와 비교해 보면 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다. 이로써 core성분인 PET의 물성이 sheath성분인 HDPE(11)의 물성보다 더욱 나아지고 복합섬유의 물성을 좌우하고 있음을 알 수 있다.

결론적으로 권취속도가 증가함에 따라 복합섬유의 물성이 향상되는 원인을 규명하는 수단으로 수치모사를 사용했는데 각 성분이 받는 응력의 증가가 분자배향을 증가시키고 이로 인해 복합섬유의 물성이 증가함을 알 수 있다. core에 있는 PET가 복합섬유의 물성 향상에 더욱 많은 기여를 한다고 여겨진다. 또한 권취속도가 증가할수록 PET의 기여도는 증가함을 나타내었다.

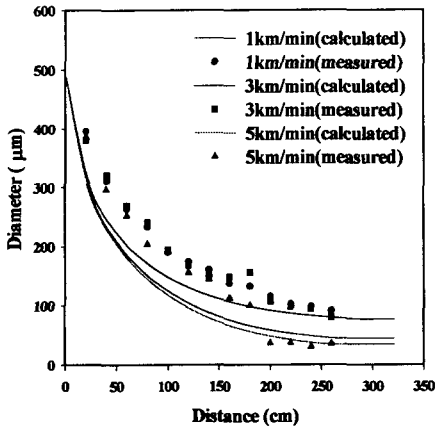

Figure 1. Calculated and measured diameter profiles for bicomponent spinning of HDPE(11)/PET.

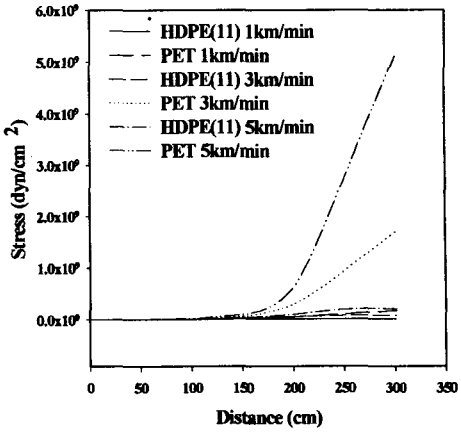

Figure 2. Calculated spinline stress profiles at several velocity for bicomponent fiber of HDPE(11)/PET.

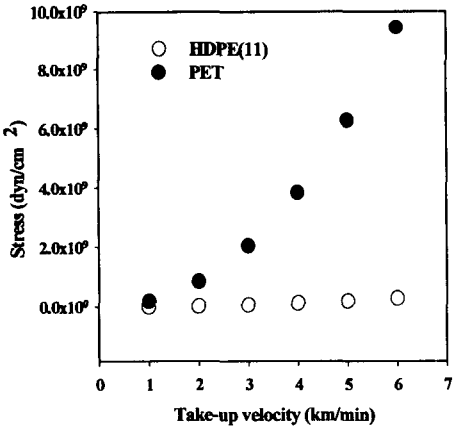

Figure 3. Calculated stresses as a function of spinning velocity at take-up point.

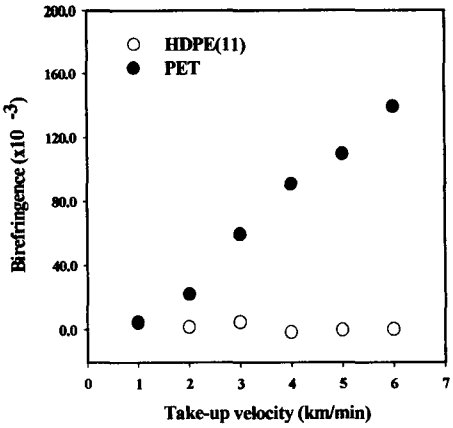

Figure 4. Birefringence of HDPE(11) and PET components in bicomponent fibers as a function of spinning velocity.

5. 참고문헌

1. T. F. Cooke, "Handbook of Fiber Science and Technology"(M. Lewin Ed.), V. 3, p.247, Marcel Dekker, 1996.
2. H. H. Cho and T. Kikutani, *J. Korean Fiber Soc.*, **33**, 360(1996).
3. J. Shimizu, N. Okui and T. Kikutani, "High Speed Fiber Spinning"(A. Ziabicki and Kawai, Ed.), p.173, John Wiley & Sons, N. Y., 1985.
4. K. F. Zieminski and J. E. Spruiell, *J. Appl. Polym. Sci.*, **35**, 2223(1988).
5. J. D. Fairs and R. L. Burden, "Numerical Method", p.150, PWS Publishing Company, 1993.