초고속방사 핵심기술의 적정화

1. 개요

섬유제조를 위한 방사공정시 속도의 급격한 증가는 생산성의 증가를 가져오지만, 방사속도의 증가에도 원하는 물성의 섬유 및 작업의 안정성 확보를 위해서는 그에 따른 제어기술이 수반되어야 한다. 초고속방사에 의한 섬유제조에 있어서 핵심기술은 용융고분자의 유동성 증대, 균일한 토출, 균일한 냉각 및 급유, 마찰의 최소화, 권취기술 등으로 볼 수 있다.

고속으로 강한 장력을 받으며 진행하는 섬유 내부에 극미한 결점이라도 이는 결국 실의 파단을 야기하는 치명적인 결점이 될 수 있다. 따라서 고분자 용융물의 균질성은 일차적으로 확보되어야 하며 이를 위해 금속화합물을 첨가하는 경우가 있다. 또한 강직할수록 장력은 더욱 크게 걸리므로 섬유가 이를 견딜 수 없는 수준이면 역시 파단을 야기할 수 있다. 따라서 방사온도 등을 상승시키는 방법을 적용하여 유동성을 향상시켜야 한다.

초고속방사의 경우 섬유는 공기중을 빠른 속도로 뚫고 지나가므로 와류의 영향을 받기 쉽다. 일반적으로, 와류는 섬유의 불균일한 냉각을 초래하므로 적정한 냉각풍 속도에서 균일한 냉각이 요구된다. 다음으로는 급유방법으로 일반적인 롤 급유(roll oiling) 방식에서는 필라멘트수가 많아 공기와 접하는 유효표면적이 넓어지므로 공기저항에 의한 방사장력이 크기 때문에 냉각직하에서의 MO(metered oiling)방식에 의한 급유방법이 채택되며, 이는 또한 집속 가이드 역할을하여 사품질의 향상도 기할 수 있으며 가이드는 섬유와의 마찰을 최소화되도록 가공한 것을 사용하여야 한다.

2. 고분자

고속방사로 섬유를 제조할 때에는 방사속도의 고속화에 의한 drip발생이

용이하게 되므로 초고속방사에 적합한 고분자의 요구특성과 그에 대한 고분자의 개질에 관한 연구가 필요하게 되며, 특히 균질한 고분자의 유동특성을 요구한다.

이러한 유동성 향상을 위해서는 점도가 낮은 고분자를 사용하거나 방사온도를 상승시켜 유동성을 향상시키는 방법이 주로 사용되어 왔지만, 점도가 낮은 고분자를 사용하면 물성이 저하되는 문제가 있으며 방사온도를 상승시키는 것 또한 고분자의 산화 또는 열화로 인하여 방사시 방사구금 주변에 열화고분자가 부착되거나 monomer와 oligomer가 탄화부착하여 방사구금으로부터 고분자의 정상적인 토출이 방해되며, 이 부착물이 성장하여 방사공정에서 섬유가 사절되는 원인이 된다.

Nylon의 분자내에 존재하는 말단 NH_2기와 분자간의 수소결합은 첨가제의 영향을 받기 쉽다. 이런한 개념을 이용하여 적절한 첨가제에 의해 고분자를 개질함으로써 고분자의 유동성을 향상시킬 수 있다. 이때 사용되는 첨가제로는 금속화합물이 사용될 수 있으며, 그런한 화합물의 종류로는 금속-acetate와 금속-stearate가 있다. 이러한 금속화합물을 첨가함으로써 이형성을 좋게 하여 열화물의 부착력을 감소시킬수 있으며 고분자의 내열성 또한 향상되어 고분자의 열화 자체를 줄일 수가 있다.

3. 여과 및 Nozzle Pack

여과는 섬유의 제조에 있어서 방사연신성 향상을 위한 가장 중요한 요소이며, 특히 연신공정에서의 사절, wrap 및 원사의 모우수준을 결정한다. 여과의 역할은 기포(수분), 이물(gel, TiO_2) 등의 여과, 혼련, 세분화 등이다.

고속방사에 사용한 DN filter는 stainless wire를 가늘게 만들어 뒤엉켜 놓고 압착하여 제직한 부직포 형태의 filter로서 일반 wire mesh에 비하여 미세한 공극을 갖는다. 따라서 이물질 제거 능력이 우수하면서도 고분자의 통과성

또한 우수하며 여과물 축적에 의한 pack압 상승과 pack leak 등의 문제도 mesh filter보다 훨씬 적다. 일반 mesh filter의 가장 미세한 것이 400 mesh인데 비하여 DN filter는 1,250～2,500 mesh까지 제작이 가능하여, 고청정도의 고분자가 요구되는 고속방사공정에서는 매우 유용하다.

Pack은 용융방사에 있어서 방사, 연신공정의 성능을 결정하는 중요한 기술이며, 이것에 의해 작업성과 제품의 품위가 결정된다. 고속방사, 고강력사 등의 특수한 섬유에서는 pack의 구조가 작업성과 품질에 큰 영향을 준다.

섬유는 용융 고분자가 dead space에서 체류하게 되면 열화에 의하여 절단될 수 있으므로 dead space를 줄여야 하며 distributor(분배판)의 중심과 외측의 온도차에 의하여 작업성과 품질에 영향을 줄 수 있으므로, 고속방사의 경우 dead space를 줄이고 체류시간을 같게 할 수 있는 분배판를 사용해야한다. 이러한 분배판을 사용함으로써 pack내에 다른 이동경로를 가지는 용융고분자의 온도차를 줄이고 토출차를 2～3% 이내로 유지시킬 수 있다. 그리고 고속방사용 nozzle을 설계할 때에는 다음 사항을 염두에 두어야 한다.

첫째, PCD (nozzle 중앙에서 방사구간의 거리)가 최소가 되도록 설계하여 공기와의 마찰(air drag)을 줄여 방사 장력을 낮추어야 한다.

둘째, 적정한 토출량과 적정한 방사 draft 및 전단속도를 가질 수 있도록 구금의 지름을 설계해야 한다.

셋째, 방사구의 모양은 일반 flat type 보다 hyperbolic type이 고분자의 균일한 유동성을 확보하는데 더욱 유리하다.

넷째, 방사 nozzle의 L/D가 증가함에 따라 용융고분자의 겉보기점도가 감소하여 방사성이 향상되므로 고속방사의 경우 3～4 정도가 적당하다.

4. 냉각

냉각공정은 섬유의 내부에 배향 및 결정화의 급격한 구조전이가 이루어지

는 공정이므로 대부분의 섬유물성이 결정되며 작업성에도 크게 영향을 준다. 따라서 다음과 같은 사항에 유의하여야 한다. 우선 모든 필라멘트가 균일한 냉각이 되도록 해야 하고, 냉각 개시점에서 충분히 냉각되어야 하며 섬유 전체를 유리전이 온도까지 냉각시켜야 하고 와류가 없는 안정된 냉각풍이 요구된다. 일반적으로 알려진 바에 따르면 냉각에 따른 섬유표면의 온도구배는 원사의 물성관리 항목중 특히 U% 불량의 원인이 되는 것으로 알려져 있으므로 원사표면의 균일 냉각은 원사 물성관리에 있어 매우 중요한 요인이 된다.

Filament 내부의 온도구배는 U%에 영향을 미치는 인장응력(σ, tensile stress)을 변화시키는데 그 mechanism은 다음과 같다.

$$\sigma = \eta_e \left(\frac{dV}{dx} \right) \qquad (1)$$

where η_e : Elongational viscosity

$\frac{dv}{dx}$: Velocity distribution

*dv/dx*가 일정하면, σ는 η_e에 비례하는 값을 갖는다. 그런데 η_e는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\eta_e = \eta_e^* \times \exp\left(\frac{E}{T + 273} \right) \qquad (2)$$

위 (2) 식에서 η_e^* 와 E 는 중합물 고유의 특성이므로, 위의 식 (1), (2)으로부터 η_e와 σ는 온도변화에 반비례하는 것을 알수가 있다. 즉, 사표면의 냉각효율에 따라 온도구배가 나타나면, σ값이 달라져 불균일한 사표면 형성의 원인이 된다. 따라서 방사공정중의 균일한 사표면 온도가 U% 관리의 핵심이 되므로 균일한 냉각을 통한 사표면온도를 균일하게 관리하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

고속방사의 경우 방사속도의 증가에 의해 방사장력이 급격하게 증가하여 외부의 작은 변화에도 사의 고화점이 많이 흔들리므로 외부교란 원인을 줄여주는 것이 필수적이다. 특히 냉각풍의 속도에 있어서는, 공기저항이 커서

수반기류에 의한 냉각효과가 커지므로 가능한 수준으로 약하게 하는 것이 유리하다.

5. 유제부착

급유장치는 롤 급유(roll oiling)방식과 MO(metered oiling)방식이 있으며, 급유위치는 냉각직하에서 하는 방식과 방사 튜브직하 즉 권취상부에 설치하는 방법이 있다. 급유장치를 설치하는 위치는 필라멘트 다발의 집속 상태의 영향으로 위치에 따라 권취장력에 큰 영향을 미친다. 고속방사 공법에서는 권취장력이 높아지므로 급유장치는 냉각직하에 설치하는 것이 유리하다. 롤 급유 방식은 필라멘트가 개섬된 상태로 접촉 되므로 필라멘트 표면의 유막형성이 균일하게 되는 유리한 점이 있는 반면 개섬된 상태로 필라멘트가 주행하므로 방사 튜브에서 공기 저항을 많이 받아 권취장력이 상승하므로 고속방사 방식에서는 불리하다. 또한 롤 급유 방식에서는 유제를 계속 순환시키고 롤러 표면 접촉에 의하여 급유하므로 유제관리가 어렵고 OPU(oil pick up)의 조정이 다소 변동이 있으나, MO 방식은 기어 펌프에 의하여 유제량을 조정하고 공급된 유제가 손실없이 필라멘트에 급유되므로 이 점에 있어서는 유리하다.

Table 1. 유제 부여방법 및 특성

방 법 / 항 목	Roll Oiling		Metered Oiling	
	냉각직하	권취상부	냉각직하	권취상부
방사장력	×	××	○	××
균일 부착성	○	○	○	○
OPU 제어	×	×	○	○
유제제어	××	×	○	○
작업의 편의성	××	○	△	○

MO 방식에 사용되는 Oiling Guide는 유제를 공급하는 기능외에 집속 가이드 역할도 겸하고 있으므로 사품질에도 영향을 줄 수 있는데, 고속방사의 경우 방사속도의 증가에 따라 섬유가 높은 방사 장력하에서 guide와 접촉하게 되므로 이때 사용되는 guide는 마모에 대한 저항성이 커야 한다. 그리고 섬유표면의 손상을 억제하기 위하여 섬유와 guide간의 마찰을 최소화하여야 하므로 HF(high fired) 가공이나 LF(low friction)가공한 guide를 사용하여야 한다.

섬유방사과정중에 구금으로부터의 거리 x에서의 장력 $F(x)$는 식(3)으로 표시된다.

$$F(x) = F_L + \int_x^L \rho g A \, dx - W(V_L - V) - \int_x^L \left(\frac{\rho_a}{2}\right) V^2 \pi D C_f \, dx \qquad (3)$$

여기서, x와 L은 방사구로부터의 거리, F_L은 거리 L에서의 장력을 표시한다. 우변의 제 2항은 섬유의 자중에 의한 힘(F_{GRAV})을 표시하며 ρ와 A는 각각 섬유의 밀도와 단면적이고 g는 중력가속도이다. 제 3항은 섬유의 속도증가에 의한 관성력(F_{IN})이며, W는 질량토출량, V_L과 V는 각각 방사구로부터의 거리 L과 x에서의 속도이다. 제 4항은 공기밀도 ρ_a에서 속도 V로 이동할 때 섬유의 표면 마찰로부터 발생하는 공기항력(F_{AERO})이며, D는 섬유의 직경, C_f는 공기저항계수이다.

고속방사에서는, 방사장력에 영향을 주는 위의 세가지 힘 중에서 공기항력(F_{AERO})이 가장 지배적으로 작용한다. 즉 고속화될수록 섬유표면에서의 마찰에 의한 공기항력(F_{AERO})이 가장 영향을 미친다는 것이다.

방사장력을 감소시키기 위해서는 draft의 감소, 방사속도의 감소, 공기저항을 감소시키는 방법 등이 있다. 이중에서 방사장력에 가장 큰 영향을 주는 공기항력을 감소시키기 위하여서는 구금 직하에서 MO guide 방식에 의한 유제부여방법이 채택되어야 하며, 설치 위치는 구금에 가까울수록 방사장력이 저하되어 유리하나 사의 고화점 위치보다 높게되면 완전히 고화되지 않은 상태에서 MO guide에 접촉되므로 융착에 의한 작업성 저하 및 섬유의 품질에 나쁜 영향을 미치게 되어 그 위치 설정이 매우 중요하다.