

고분자의 섬유화 공정

1. 방사공정

고분자를 섬유로 전환시키는 공정을 방사공정(spinning process)이라 한다. 방사공정은 고분자물질을 bulk상으로부터 filament의 형태로 일차원화시키는 초기공정으로서 polypropylene등과 같은 polyolefin 섬유나, polyamide 및 polyester와 같은 polycondensate 섬유 등의 제조에 이용한다. 특히, polyamide 6 섬유는, 그 원료인 ϵ -caprolactam을 monomer로 사용하여 축합중합하여 만든 polymer chip을 사용해 주로 extruder type의 방사기를 사용하여 용융방사(melt spinning)하는 공정을 통하여 만들어진다. 즉, 용융된 고분자는 gear pump에 의해 토출량이 조절되어 nozzle을 통해 섬유상으로 외부로 압출된다.

일반적으로 polycondensate는 방사공정시 polymer 내에 함유된 수분에 의해 작업성이 나빠질 경우가 있다. 즉, 수분을 다량 포함하고 있는 polymer가 extruder 내부에서 용융될 때 screw를 지나면서 기포를 형성하고, 이것이 nozzle을 통과하면서 polymer의 연속성을 파괴하므로 사절을 야기한다. 따라서 방사를 위해 공급되는 polymer chip은 extruder에 투입되기 전에 건조시킬 필요가 있다. 특히, polyamide의 경우, chip의 건조는 산화방지를 위해서 질소 분위기에서 이루어지며 최종 수분률은 보통 500ppm 이하로 제어한다. 건조 온도는 100°C에서 120°C 사이에서 이루어진다. 이때, 적정 건조시간을 설정해 주어야 하는데, 이것은 너무 오랜 시간동안 건조시키면 황변을 야기할 수 있으며 또한 polymer의 점도 자체가 변할 수 있기 때문이다.

작업의 안정성과 균일한 섬유물성을 얻기 위해서는 polymer melt가 외부로 처음 나오는 통로인 nozzle의 온도조건부터 관리할 필요가 있다. 다시말해 nozzle의 표면온도는 일반적으로 설정된 방사온도와 동일하지 않다. 즉, 표면은 외부와 접해있기 때문에 열출입이 크므로 일반적으로 설정온도보다 낮으며, 또한 표면의 위치에 따라 다를 수가 있다. 이와 같이 nozzle의 표면온도가 불균일하면, nozzle에서 빠져나오는 섬유단면내의 온도차이가 생기며 이

로 인해 섬유단면상의 점도구배가 형성되어 섬유물성이 균일하지 못하고 작업성에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 또한 nozzle을 통해 압출되어 나오는 고온의 고분자에는 monomer나 oligomer 등이 포함되어 있어 fume의 형태로 배출되므로 이를 제거할 필요가 있다. 따라서 polyamide를 방사할 때에는 nozzle 바로 밑에 hood를 설치하여 nozzle 표면온도를 균일하게 유지하며, hood에 steam 장치를 부착하여 저분자 물질을 용해하여 흡입장치로 빨아들인다.

위와 같은 과정을 거친 고분자는 적절한 속도로 냉각과정을 거치게 되는데, 이를 위해 hood 하부에 냉각장치를 설치하여 일정한 속도의 냉각풍을 불어준다. 냉각거동은 섬유의 구조형성에 큰 영향을 주어 최종적인 섬유의 물성을 좌우할 수도 있으며, 또한 원활한 권취 작업을 위해서도 반드시 필요하다.

2. 권취공정

방사공정을 거쳐 냉각되어 고화된 filament는 유제를 부여받은 후, Godet roller를 통과하거나 또는 직접 winder에서 bobbin에 감긴다. 권취공정시 filament가 경험하는 변형 속도 및 온도조건에 따라 UDY(undrawn yarn), POY(partially oriented yarn), 및 FDY(fully drawn yarn) 공법으로 나뉜다. 이중 UDY와 POY는 보통 그 자체로는 물성이 불안정하여 별도의 연신공정을 필요로 하지만, Godet roller에서 열고정의 과정을 거치게 되는 FDY는 별도의 공정없이도 그 자체로 안정한 구조를 형성한다. 공법에 따른 대략적인 섬유의 물성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. 공법에 따른 polyamide 6 섬유의 강도 및 신도

공법	강도 (g/den)	신도 (%)
UDY	1.5~2.5	250~400
POY	4.0~5.0	60~80
FDY	5.0~6.0	30~45

FDY 공법은 고속 winder의 출현으로 활성화된 공법으로서 Figure 1에 개략적으로 도시하였다. 본 내용에서는 위의 공법 중 FDY 공법에 대해 좀 더 자세히 설명하기로 한다.

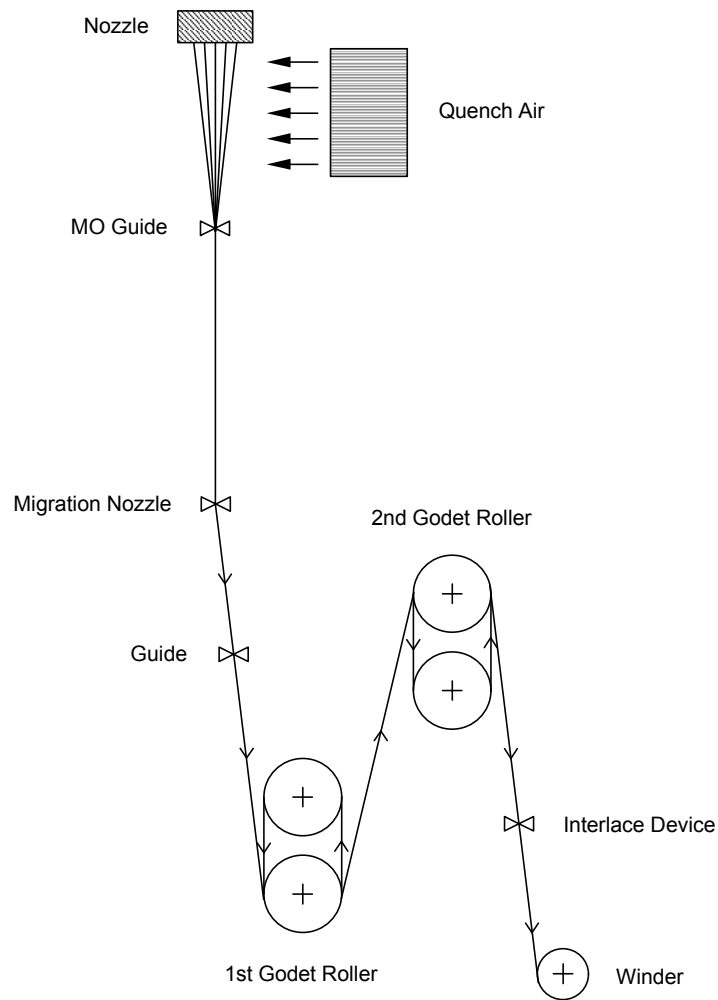


Figure 1. FDY 공법의 개략도

1) FDY 공법

고속방사의 개념은 1970년대 후반 고속 권취기의 도입으로 나타나기 시작하였다. 그때까지의 용융방사공법은 보통 2단계 공정에 의해 이루어져 왔다. 즉, 저속으로 미연신사를 제조한 후 불안정한 구조를 안정한 구조로 전환시키기 위해 연신공정에 보내져 연신사를 제조함으로써 원사제품으로 완성된다. 그러나 고속방사는 추가적인 연신공정을 거치지 않고도 2단계공정에 의한 원사의 물성과 비슷한 수준을 발현시키므로 생산성의 향상 및 비용의 절감 차원에서 FDY 공법이 선호되고 있다. FDY 공법에 대해 좀 더 자세하게 설명하면 다음과 같다.

방사구에서 빠져나온 고분자 용융물은 갑작스런 엔트로피의 증가로 인해 die swell 현상을 나타낸다. Die swell 현상은 설정한 draft ratio를 변화시키는 요인이 되므로 제어될 필요가 있다. 즉, 보통 draft ratio는 제 1 Godet roller에서의 섬유 단면적에 대한 초기단면적인 방사구의 단면적비로 나타내는데, die swell 현상은 실질적인 초기 단면적을 증가시키는 효과를 가져온다. Draft ratio가 크게 되면 방사장력이 크게 걸려 사절의 원인이 될 수 있어 안정한 작업을 억제하는 경향이 있다. 이러한 die swell 현상을 감소시키는 방법은 여러 가지가 있다. 다시말해, 방사구 지름에 대한 길이의 비인 L/D(length/diameter)를 증가시키는 방법, 방사구내의 벽면에서의 전단속도를 낮추는 방법, 가공온도를 증가시키는 방법, 토출량을 줄이는 방법, 그리고 방사속도를 증가시키는 방법 등이 있다. Die swell 현상은 완화현상이므로 위에 나열된 방법들은 모두 고분자의 완화거동과 밀접한 관계가 있다.

방사구에서 빠져나온 filament는 냉각거동을 개시하는데, 이를 제어하기 위해 적당한 온도 및 속도의 냉각풍을 불어주게 된다. 이러한 냉각거동은 섬유의 구조전이 과정에 관여하여 최종적인 물성에 큰 영향을 미친다. 특히 이형 단면사의 경우에는 이형도를 높이기 위해 냉각속도를 증가시킬 필요가 있다. 방사선상에서의 구조전이는 주로 배향결정화 거동과 밀접한 관계가 있는데, 이것을 냉각속도와 결정화속도의 측면에서 설명하면 다음과 같다.

냉각속도가 결정화속도보다 아주 느린 경우에는, 결정성장이 용이하여 결정의 개수는 감소하는 반면 결정의 크기는 증가하는 경향을 보이게 된다. 또한 결정화도 역시 증가하므로 비결정영역이 상대적으로 위축된다. 따라서 초기탄성계수가 증가하며 신도는 크게 감소하는 경향을 보이게 된다. 그리고 섬유외관에 있어서는 큰 결정이 가시광선 영역의 파장의 빛을 산란시켜 투명도가 저하되는 경향을 보이게 된다. 두 번째, 냉각속도와 결정화속도가 비슷한 수준이면, 분자쇄는 결정화가 진행될 수 있는 환경에 놓이게 되어 결정화가 일어나는데, 결정크기는 작아지며 결정의 개수는 증가하는 경향을 보이게 된다. 섬유내의 결정은 물리적인 가교 역할을 하므로 상대적으로 질긴 특성을 갖게 된다. 이러한 섬유는 주로 의류용에 사용될 수 있다. 끝으로, 냉각속도가 결정화속도보다 상당히 크면, 결정이 상당부분 제어된 비결정성에 가까운 섬유를 얻을 수 있다. 따라서 신장거동이 용이하고 신도가 증가하며 강도는 감소하는 현상을 보인다. 또한 배향구조가 불안한 상태에 있으므로 열에 대한 형태안정성이 저하된다. 또한 투명도가 향상되는 경향을 보이게 된다. 위와 같은 원리는 섬유의 용도 및 특성에 맞게 적용되어야 한다.

냉각이 되어 고화된 filament는 유제를 부여함과 동시에 집속이 된다. 특히 유제부여방식은 MO(metered oiling) 방식을 사용하는데 이것은 유제를 일정한 유량으로 설정하여 부여하는 방식으로 FDY 공법에 가장 적합한 것으로 알려져 있다. 특히, 고속방사일수록 저점도의 유제를 사용하며, MO guide에 filament가 접촉하는 길이를 줄이는 방향으로 조절한다. 집속의 위치는 방사장력에 큰 영향을 미치는데, 집속점이 방사구에 가까울수록 방사장력이 감소하는 경향이 있다. 큰 방사장력은 사절의 가능성을 그만큼 높이므로 가능한 감소시키는 것이 바람직하다. 공기저항력 F_{drag} 은 섬유속도에 상당히 민감하며 섬유표면적이 클수록 증가하는데 filament를 방사구에 가깝게 집속하여 모아주면 유효표면적이 감소하므로 방사장력을 줄일 수 있는 것이다. 그러나 방사구에 너무 가깝운 위치에서 집속을 하게 되면, 완전히 고화되지 않은 상태에서 MO guide에 접촉하므로 filament의 응착이 발생하여 작업성이 저하되

고 원사의 품질에 나쁜 영향을 미칠 수도 있다.

집속된 filament는 migration nozzle을 통과하는데, 이것은 filament 표면에 유제가 고르게 묻도록 하여 집속성을 향상시키고 Godet roller에서의 열고정 과정시 filament의 유동을 감소시켜 공정성 및 품질향상에 기여하는 역할을 한다.

Migration nozzle을 통과한 filament는 Godet roller에 도달하여 약간의 연신과 열고정 과정을 겪게 된다. Godet roller는 Figure 1과 같이 두 부분으로 구성되며 각각의 부분은 2개의 roller가 쌍으로 이루어져 있다. 방사시 draft ratio는 제 1 Godet roller의 속도로 결정된다. 제 1 Godet roller의 속도와 제 2 Godet roller의 속도비로 연신비가 결정되며, polyamide 6의 FDY 공법에 적당한 연신비는 보통 1.1 ~ 1.4 수준이다. 제 2 Godet roller에서는 가열장치가 되어있어 연신할 때 온도를 높일 수 있다. 이것은 열에 의해 섬유 구조를 안정화시키는 역할을 수행하는 것으로서 FDY 공법에서 핵심적인 부분이다. 이러한 열고정 과정을 거쳐야만 얻어진 원사는 별도의 공정없이 사용될 수 있는 물성을 얻게 된다. 제 2 Godet roller를 빠른 속도로 통과하는 filament에 열을 가하여 열처리를 행하는데 있어, filament에 효율적인 열고정 효과를 부여하기 위해서는 제 2 Godet roller에서의 적절한 체류시간을 설정하는 것이 바람직하다. 이것은 감아주는 회전수로 조절할 수 있다. 너무 적게 감아주면 열고정효과가 미흡하게 되고, 너무 많이 감아주면 지나친 열에 너지를 받아 물성에 나쁜 영향을 미칠 수도 있다.

Godet roller를 통과한 filament는 interlace 장치에서 교락을 부여받게 된다. 교락은 일종의 꼬임으로서 filament들간의 집속을 좀 더 강화시키는 역할을 한다. 이때 교락수는 interlace nozzle의 압력으로 조절된다. 적절한 교락을 부여받은 filament는 winder에 감겨 최종적인 원사제품이 된다. 이때 제 2 Godet roller와 winder 사이에서 걸리는 장력은 bobbin의 형태에 영향을 미치는데, 이것은 해사성과 밀접한 관계가 있다. 따라서 원사의 섬도에 적절한 winding 장력을 부여하는 것이 중요하다. 보통 winder의 속도를 제 2 Godet

roller의 속도보다 줄여줌으로써 너무 큰 장력이 걸리는 것을 막는다.

2) 유제

유제는 방사공정에서 미연신사의 표면에 균일하게 부여함으로써 습윤효과를 주어 알맞은 분자배향을 이루어 bobbin의 양호한 package 형태를 이루며 평활성, 집속성 및 대전방지성을 부여시켜 연신작업성을 높이며 stretch 및 제편직 작업 등 2차 가공에서 금속 및 각종 guide와의 마찰에 견딜 수 있도록 하는 것이다. 또한 유제를 부여하는 위치는 방사장력과 밀접한 관계가 있다. 유제부여방식에는 MO(metered oiling) 방식과 RO(roller oiling) 방식이 있다.

3. Seasoning

Seasoning은 권취된 원사의 불안정한 분자구조를 안정시키거나 자유수축시 평형상태를 얻어 물성의 안정화를 이루기 위하여 bobbin 상태로 항온항습실에 방치함으로써 행해진다. 폴리아마이드섬유가 수분에 민감하다는 것은 잘 알려진 사실이며, Bobbin 내부와 외부의 수분률은 차이가 있게 마련이다. 이러한 차이는 bobbin 내부와 외부의 물성차이를 야기할 수 있으므로 항온항습의 조건하에 오래 방치함으로써 내부와 외부의 수분률의 차이를 최소화하는 것이 seasoning의 목적이다.