특 집

섬유 형성 가공

김 정 철 · 최 영 근 · 함 진 수

1. 서 론

섬유는 일반적으로 단면이 무척 가늘고(직경이 수십 micron이내) 길이방향이 단면의 직경에 비해 수천배 이상 긴 고분자 집합체를 의미한다. 섬유 형성 가공은 천연섬유인 silk를 흉내낸 Rayon에 그 근원을 둘 수 있지만 Nylon, PET 등이 개발된 1940년대 이후 많은 연구가 열가소성 고분자의 섬유화에 대하여 이루어져 왔다. 본고에서는 이러한 열가소성 고분자 물질의 섬유화, 특히 PET섬유의 제조 공정에 대하여 검토하여 보았다. PET 섬유의 제조공정은 PET resin을 중합하여 건조, 압출(extrusion)을 거쳐 방사구금(spinneret)을 통하여 방사하고 열처리 하여 권취하는 공정을 거치게 되는데 본고에서는 이중 압출, 방사, 가연(texturing) 공정 등에 대한 원리를 다루었다.

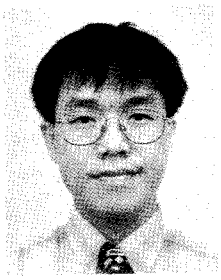
2. 압출(Extrusion)

압출기(Extruder)는 열가소성 고분자 chip을 녹이고(melting) 이송(pumping) 역할을 하는 기구로 PET, Nylon 등의 용융방사 공정에 사용된다. 압출기는 screw의 갯수, screw 형태 및 움직이는 원리에 따라 여러가지로 구분되어지는데 주로 화섬(synthetic fiber)방사에 널리 쓰이는 single screw extruder의 원리 및 사용시 문제점에 대하여 고찰해 보기로 한다.

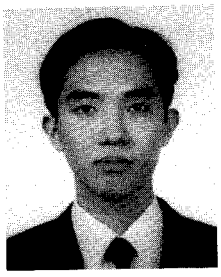
2.1 Chip 투입부(Feed Section)

압출기는 **그림 1**에서 보는 것과 같이 그성능에 따라 고체 고분자 물질이 투입, 이송되는 투입부(feed section), 고분자 chip을 녹이는 용융부(transition section), 마지막으로 용융된 고분자 유체를 압출기 밖으로 밀어내는 계량부(metering section)로 나뉘어진다. 먼

김정철
1981 한양대학교 섬유공학과(학사)
1983 서울대학교 대학원 섬유공학과(석사)
1983~현재 선경 인더스트리 섬유연구소 책임연구원
1987~1988 Battelle(U.S.) Visiting Scientist
1991~1995 Univ. Akron 고분자공학과(박사)



최영근
1986 서울대학교 섬유공학과(학사)
1986~현재 선경인더스트리 섬유연구소 선임연구원
1992~1993 서울대학교 대학원 섬유공학과(석사)



함진수
1993 건국대학교 섬유공학과(학사)
1993~현재 선경인더스트리 섬유연구소 연구원

Fiber Formation Processings of Synthetic Fibers

· 선경 인더스트리 섬유연구소(Jeong-Cheol Kim, Younggeun Choi, and Jinsoo Ham, R & D Center, Sunkyong Industries, 600 Jungja-dong, Changan-ku, Suwon-si, Kyungki-do 440-745, Korea)

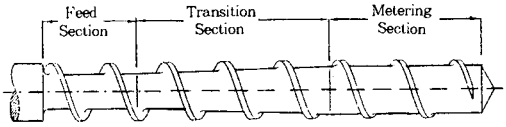


그림 1. 일반적인 압출기 screw의 구조.

저 투입부의 전반적인 상태를 살펴보면, hopper로 투입된 고분자 물질은 압출기 내부로 들어간다. 이때 사용되는 물질에 따라 쉽게 투입되지 않고 hopper내에 걸려있는 경우가 있어 특별한 장치를 해 주어야 할 때도 있다. 이것은 투입되는 물질에 따라 hopper내 물질이 고르게 압출기로 내려오지 않고 일부만 내려오거나(funnel flow) 아예 서로 엉켜 내려 오지 않는 현상(arching)이 발생하기 때문인데, 물질의 크기 (chip size)와도 크게 관계가 있어 물질의 크기가 작을수록 이러한 현상이 일어나지 않는 것으로 알려져 있다.

투입된 물질은 압출기 screw와 barrel 사이 공간(annular space)의 passive flight와 active flight 사이에 끼게 된다. Barrel은 정지해 있고 screw는 돌아가므로 물질이 받는 마찰력에 의해 앞으로 전진하게 된다. 이렇게 마찰력을 받은 물질은 서로 엉켜 공간을 꽉채운 sold bed 상태로 이송되는데 내부변형이 적어야 효과적으로 물질이 이송된다. 때로는 chip공급의 불량등에 의해 screw flight사이가 꽉차지 않는 기아상태(starved condition)가 될 때가 있는데 이렇게 되면 chip공급이 일정하지 못할뿐더러 상당히 비효율적인 운전이 된다. 이러한 형태의 chip이송을 "Archimedian transport"라고[1] 부르기도 한다. 이렇게 screw의 flight사이를 꽉채우며 변형이 적은 solid bed 상태로 이송이 되려면 사용물질의 chip size가 클수록 유리한 것으로 알려져 있는데 이것은 앞의 hopper투입의 유리한 경우와 상반되어 적당한 chip size선택이 필요한 것을 알 수 있다.

이송되는 solid bed를 앞으로 움직이는 힘은 앞에서 말한 것처럼 solid bed와 barrel의 마찰력에서 나오며 flight 각도와 screw와 solid bed 사이의 마찰력이 solid bed가 앞으로 움직이는 것을 방해하게 된다. 다시 말하면 solid bed와 barrel 사이의 마찰력을 증대시키면 압출기의 토출량을 증가시킬 수 있다는 결론이 나오게 되는데 이 생각을 이용하여 토출량이 증가되도록 개발한 것이 grooved extruder이다.[2] 이것은 extruder 투입부 부분의 barrel에 screw 길이 방향으로 길게 홈을 넣어줌으로 마찰력을 증가시켰는데 일반적인 경우 이 홈의 깊이는 hopper부분에서는 깊고 앞으로 갈수록 점점 낮아지다가 투입부 마지막 부분에서는 홈이 없어지게 설계되어 있다.

실제 용융방사를 하여 섬유를 생산하는 경우 여러대의 압출기를 동시에 사용하게 되는데, 오래된 설비일수록 압

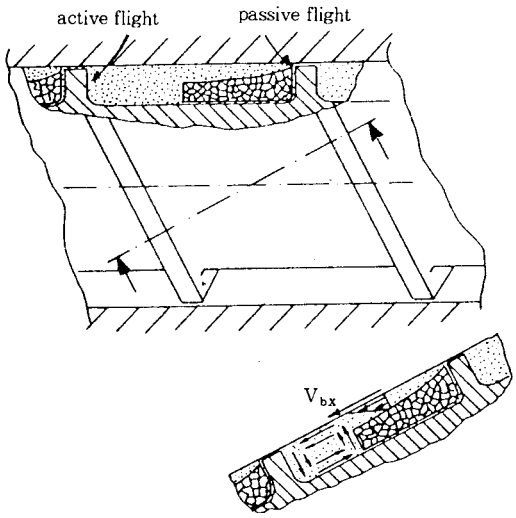


그림 2. Tadmor의 melting model.

출기 구조와 사용 물질이 동일함에도 불구하고 동일한 토출량을 내기위해서는 scerw 회전수를 각기 달리 해야하는 경우가 왕왕 발생하게 된다. 이것은 일반적으로 투입부의 barrel 표면이 오랜 이용 및 이물질 등으로 인해 screw 회전방향으로 barrel에 홈이 파진 때문이며 이홈이 크고 많을수록 압출기의 토출량은 줄어들게 된다. 이때 barrel의 투입부만 새로 교체하면 압출기별의 토출량 편차가 없는 상태로 돌아오게 된다.

2.2 용융부(Transition Section)

투입부를 통과한 고분자 solid bed는 용융부에 들어오면 barrel과 접한 부분부터 녹기 시작한다. 일반적으로 이 용융부의 시작은 hopper부위에서부터 screw 직경의 3내지 5배 정도 떨어진 곳부터 시작되는 것으로 알려져 있다. 고분자 물질을 녹이는 열은 barrel과의 마찰에 의한 마찰열과 heater에 의한 외부로부터의 열원에서 온다.

압출기내에서 고분자가 녹는 현상은 1959년 Maddock에 의해 처음 정성적으로 관찰되었으며[3] 이어 1967년 Tadmor에 의해 용융 model이 만들어졌다.[4] 그들에 의하면, barrel에 접한 부분부터 solid bed가 녹기 시작하며 이 녹은 부분은 barrel에 의한 drag force로 인하여 screw의 active flight쪽으로(screw 진행방향의 반대쪽, **그림 2**참조) 몰리게 된다. 이렇게 모인 용융 고분자는 "melt pool"을 형성하며 solid bed의 남은 부분을 passive flight 방향(screw 진행방향)으로 밀어준다. 이러한 원리로 용융과정이 진행이 되며 solid bed가 용융부를 통과할 때 전체가 완전히 녹아 계량부(metering zone)에 도달하게 된다.

용융의 원리는 이후 많은 연구자들에 의해 개량되거나 새로운 model들로 발표되었다. 발표된 model들과 Tadmor의 model의 주된 차이점은 용융도중 solid bed

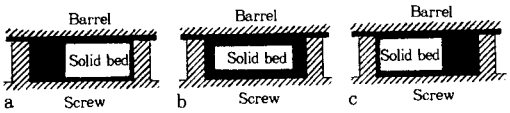


그림 3. 관찰된 melting 형태의 비교.
(a) Maddock, (b) Dekker, (c) Menges and Klenk.

의 위치로, Klein (1967)은[9,11] PVC 용융의 관찰을 통하여 solid bed가 용융되며 passive flight쪽이 아닌 active flight쪽으로 움직이는 것을 확인하였고, Dekker (1976)는[7] polypropylene의 용융현상 관찰을 통해 특별한 "melt pool"이 형성되지 않아 solid bed가 용융이 완전히 끝날 때까지 중앙에 위치한다고 보고하였다. 하지만 이러한 관찰들은 screw회전수가 상당히 낮다든지; screw channel이 특별히 얕다든지 하는 특수한 경우에만 해당되는 것으로 일반적인 용융공정에는 Tadmor의 model이 적용되는 것으로 알려져 있다. **그림 3**은 Klein과 Dekker의 관찰을 Tadmor의 관찰과 비교한 간단한 그림이다.

고분자 물질을 용융시키는 주된 열원은 압출기 외부의 heater에 의한 전도열로 생각되나 용융이 일어난 후 용융물의 흐름에 의한 대류열에 의해서도 상당한 용융이 일어나는 것으로 보고되어 있다. Sundstorm(1972)에[8] 의하면 대류열에 의한 효과가 전도열에 의해 일어날 용융효과의 20%정도에 해당된다고 한다.

압출기의 토출량을 높이기위해 앞의 용융이론들이 이용되었다. 그중 가장 먼저 상품화 된것이 screw를 변화시켜 solid bed가 전도열을 잘 받아 용융되도록 설계된 것으로 Maillerfer의 barrier screw가 그것이다.[9] 이것은 screw의 flight 사이를 둘로 나누어 용융된 melt와 solid bed가 각각 다른 channel로 진행되도록 만든 것으로 solid bed가 용융물의 방해없이 그대로 barrel에 접하도록 만들어 용융효과를 높인 것이다. 우리나라에서는 Barr type으로 알려진 이러한 형태의 screw는 엄격히는 screw flight의 helix angle 및 그 폭에 따라 Maillefer, Barr,[10] Dray and Lawrence,[11] Kim[12] 등으로 나뉘는데 일반적으로 conventional한 single screw의 경우보다 20-30% 토출량을 높일 수 있는 것으로 알려져 있다.

2.3 계량부(Metering Section)

압출기의 마지막에 위치하여 용융공정이 끝난 용융물을 다음 공정으로 밀어내는 작용을 하는 부분으로 이송부(melt conveying zone) 또는 압출부(pumping zone)라고 부르기도 한다. 이부위 내에서의 용융 고분자의 거동은 전단계와는 달리 몇가지 가정(Newtonian 유체, 정상유동, 벽에서의 no slip 등)으로 쉽게 수학적으로 접근할 수 있어 일찍부터 연구의 대상이 되어왔다.[13]

수학적으로 이부위를 통과하는 용융물의 양은 screw를 helix angle 따라 풀어놓은 직사각형의 duct 위를 전

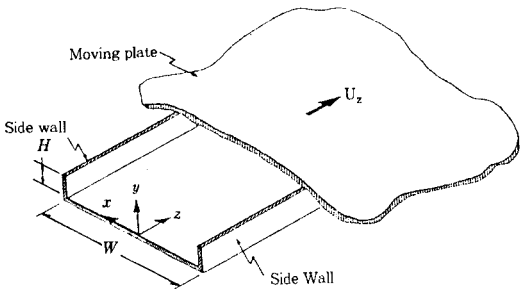


그림 4. 사각의 duct와 그위를 움직이는 plate.

단응력이 작용하여 용융물을 이송시키는 개념으로 계산이 된다(**그림 4** 참조). 이 계량부 끝에는 이어지는 공정에 의해 반대방향의 압력이 작용하여 용융물의 흐름을 막아준다. 이를 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\text{토출량} = \frac{1}{2} \cdot U_Z W_B F_D - \frac{WH^3}{12\mu} \cdot \frac{\Delta P}{Z} \cdot F_F \qquad (1)$$

여기서 μ는 유체의 점도를, ΔP는 끝부분에 형성된 압력을 뜻한다. 식은 다소 복잡하게 보이지만 의미를 말하자면 식 우변의 첫번째 항목은 전단응력에 의해 screw channel을 흐르는 유체의 양이고 두번째 항목은 계량부 끝에 형성된 압력에 의해 반대로 밀려드는 유체의 양을 나타낸 것이다. 부호 "마이너스"는 역방향을 의미한다. F_D와 F_F는 screw channel의 밑변과 높이의 비인 H/W에 의해 변하는 값으로 일반적으로 용융방사 공정에 많이 쓰이는 screw의 경우 이 값이 1에 근사한 값이 되므로 간단한 계산에서는 1로 가정하여 사용하기도 한다. 이 식은 아래와 같이 단순화시켜 screw 회전수 및 압력에 따른 압출기의 용량을 쉽게 구하여 사용할 수 있다.

$$\text{토출량} = AN - C \cdot \frac{\Delta P}{\mu} \qquad (2)$$

여기서 N은 압출기 screw의 회전수를 말하며 A와 C는 screw의 구조에 따른 상수이다. 위 식에서 알 수 있는 것처럼 토출량은 점도가 증가할수록, ΔP가 감소할수록 증가한다. 또한 토출량이 가장 크게 되는 screw 조건에서는 아래와 같은 식이 성립되어 토출량은 screw지름의 3승에 비례함을 알 수 있다.[14,15] 하지만 실제 사용시는 고분자의 용융 등이 고려되어 많은 경우 이 계산치의 약 50% 정도만이 증가되는 것으로 알려져 있다.

$$\text{Screw 1회전당 토출량} = 14.86 \times D^3 \times \sqrt{\frac{\mu N}{\Delta P}} \qquad (3)$$

계량부내에서 유체의 흐름에 대하여 한가지 짚고 넘어갈 것은 유체의 흐름 방향이다. 전단응력에 의하여 앞으

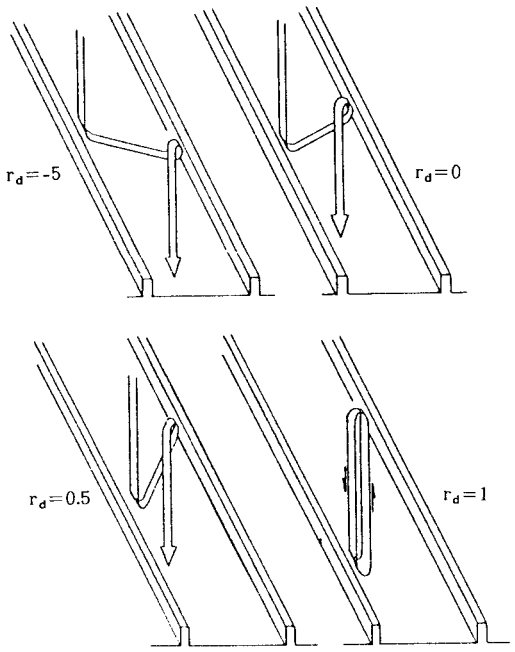


그림 5. R_d에 따른 유체의 흐름변화.
R_d=Pressure flow/Drag flow.

로 이동되는 screw상부의 유체와는 달리 screw 아래부분은 역방향으로 작용하는 압력에 의해 뒤로 밀려난다. 뒤로 밀려난 유체는 screw의 channel에 걸려 screw 상부로 올라와 다시 전단응력에 의해 앞으로 이송되며 screw channel을 만나는 지점에서 screw 하부로 내려가 앞의 공정을 되풀이 한다. 즉 screw의 측면에서 보게 되면 유체는 2개의 screw flight와 barrel 그리고 screw 밑면으로 이루어진 사각형을 회전하며 앞으로 전진하게 된다. **그림 5**는 channel내 유체의 흐름을 간략하게 표시한 것이다.

압출기를 거친 고분자 용융물은 균일한 성분 및 온도분포를 가져야 이어지는 방사구금에 의한 방사과정에서 균일한 굵기 및 물성을 갖는 섬유를 제조할 수 있게 된다. 이러한 균일성 향상을 위해 특수하게 설계된 screw를 사용하기도 하는데, Maddock type, Pineapple mixing head 등이 그것들이다. Maddock type은 screw 끝부분에 길이방향으로 barrier flight를 설치한 것으로 고분자 용융물이 barrel과 barrier flight 사이의 틈을 통과 하여 나가게 만든 screw type이다. 압출기를 통과하며 생긴 gel이나 첨가제의 덩어리들이 부수어져 용융물의 균질도를 높이게 된다. 이 tpye의 문제는 용융물이 좁은 틈새를 통과하기 때문에 높은 압력이 형성되어 토출량이 줄어들게 된다. Maddock type은 원래 UC(union carbide) tpye 으로 LeRoy에 의해 발명이 되었으나[16] 우리나라에서는 압출기를 공급하는 회사들의 영향 때문인지

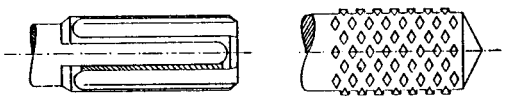


그림 6. (a) UC mixing screw, (b) Pineapple mixing section.

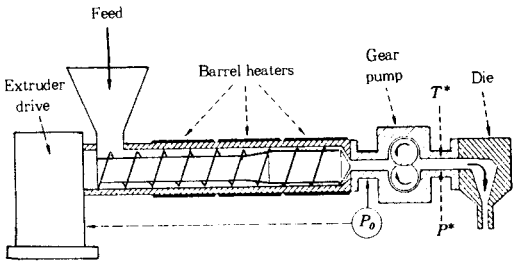


그림 7. Gear pump가 부착된 extruder.

이 UC type을 처음 문헌에 소개한 Maddock의[17] 이름을 사용하고 있다.

Pineapple mixing head type은 작은 마름모꼴 핀을 screw head부분에 일정구역에 붙여 놓아 용융물이 이곳을 통과하며 서로 섞여 균질도를 높이게 만든 것으로 일반적으로 부분별 점도 차이가 많은 고점도 고분자의 경우 유용한 것으로 알려져 있다. 이경우 앞의 Maddock type처럼 강력하게 gel 등을 파괴해 주지는 못하지만 토출량저하 등의 문제가 적은 것이 특징이다. **그림 6**은 Maddock type과 Pineapple mixing head type을 나타낸 것이다.[34]

3. 기어 펌프(Gear Pump)

섬유 용융방사의 경우, 원사의 단면을 형성하여 주는 방사구금 직전 용융물내의 불순물등을 걸러주는 filtering 장치가 있어 시간이 지날수록 불순물이 쌓여 이부분의 압력이 높아진다. 압력이 일정 이상으로 높아질 경우 filter를 교환하여 용융물의 불순물 제거효과를 높이고 이송을 용이하게 하여주어야 한다. 이렇게 주기적으로 달라지는 방사구금 근처의 압력에 토출량이 영향을 받지 않도록 하기위하여 기어펌프를 사용하게 된다. **그림 7**은 용융방사의 과정중 압출기와 기어펌프 위치를 간략히 소개한 것이다.

3.1 기어펌프의 원리

압출기의 경우는 앞절에서 검토하여 본 것과 같이 압출기 끝부분의 압력이 달라지면 screw 회전수가 같더라도 토출량이 달라지게 되나, 기어펌프는 이와는 달리 일정량을 강제적으로 이송하는 방식으로 원리적으로는 펌프 전후의 압력에 관계없이 일정한 토출량을 유지시켜 주는 기

구이다.

기어펌프는 **그림 8**과 같이 서로 맞물려 있는 한쌍의 기어와 이것을 둘러싸는 집(housing)으로 이루어져 있다. 한쪽 기어가 돌면 상대편 기어는 따라 돌게 되어있다. 펌프안쪽에 있는 유체는(**그림 8**의 P_o 부분) 기어펌프 wheel의 이(tooth) 사이의 홈(골)에 채워져서 압력이 높은 바깥쪽(P^*)으로 나가게 되며, 이 사이의 홈은 2개의 wheel이 맞닿는 지점에서 다른 한쪽 wheel의 톱니에 의해 채워지면서 안쪽으로 돌아와 바깥쪽으로 옮겨졌던 유체가 안쪽으로 되돌아가지 못하게 한다.

기어펌프의 토출량을 계산할 때는 폭이 W이고 높이가 H인 직사각형 단면의 통을 평균속도 V로 통과하는 plug flow로 가정하면 편리하다. 그림에서 보는 것같이 토출량은 다음과 같이 구해진다.

$$\text{토출량} = 2 \times V \times W \times H \tag{4}$$

이때 평균속도 V및 H는 다음과 같이 계산된다.

$$V = \pi \times \left(\frac{D + D_0}{2}\right) \times N \tag{5}$$

$$H = \frac{D}{2} \times \left(1 - \frac{D_0}{D}\right) \tag{6}$$

앞 (4)−(6)식을 정리하면 다음과 같이 간단한 관계가 나온다.

$$\text{토출량} = \alpha \times N \tag{7}$$

여기서, $\alpha = \dfrac{\pi \times D^2 \times W}{2} \cdot \left[1 - \left(\dfrac{D_0}{D}\right)^2\right]$

식 (7)에 의해 1회전시 토출량은 이론적으로 유체의 점도, 압력, 펌프의 속도 등에 무관하다는 것을 알 수 있다. 그러나 실제적으로는 토출량은 유체의 점도, 압력, 펌프의 속도 등에 영향을 받는데 이에 관한 것은 다음절에서 다루기로 한다.

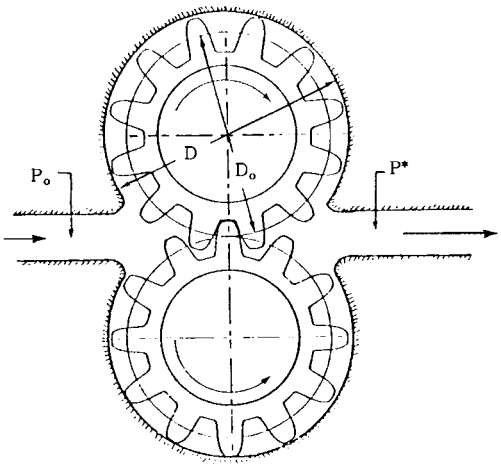


그림 8. Gear pump의 유체수송 원리.

3.2 실제 토출량

앞절 토출량에 대한 식(7)은 운전중 leakage가 전혀 없다는 가정에서 계산된 것이다. 이식에 의하면, 토출량은 회전수에 비례하고 또한 회전수만 증가시켜 줄 수 있으면 토출량은 계속 증가할 것이다. 그러나 실제는 기계 제작시 움직이는 부품간에 반드시 공차를 주어야 하므로 leakage가 발생하여 회전수에 따른 토출량 변화를 가져오고 고분자 용융물의 점성 때문에 회전수의 한계를 갖게된다.

이 회전수 한계의 원인은 첫째, gear wheel의 홈(골) 사이로 고분자 용융물이 충분히 채워지는데 걸리는 시간이 있기 때문에 회전수를 어느 이상 높이면 예상하는 토출량보다 상당히 적어지는 "기아상태"가 된다. 물론 이때 기어펌프로 들어갈 때의 압력을 높여주면 (cavitation 방지압) 해결되지만 이 압력을 높이는데에는 한계가 있기 때문에 역시 회전수의 제한이 생긴다. 둘째, 일정값 이상의 높은 회전수로 운전을 하면 펌프내 마찰에 의해 손실되는 energy가 너무 커져 열효율이 형편없이 되어 비경제적으로 된다. 그래서 기어펌프는 일반적으로 토출량의 범위를 갖고 있으며 토출량이 클수록 이와 이사이의 골이 커지게 된다.

기어펌프에서 leakage가 생길 확율이 가장 높은 부분은 **그림 9**의 점선으로 표시된 gear wheel의 측면과

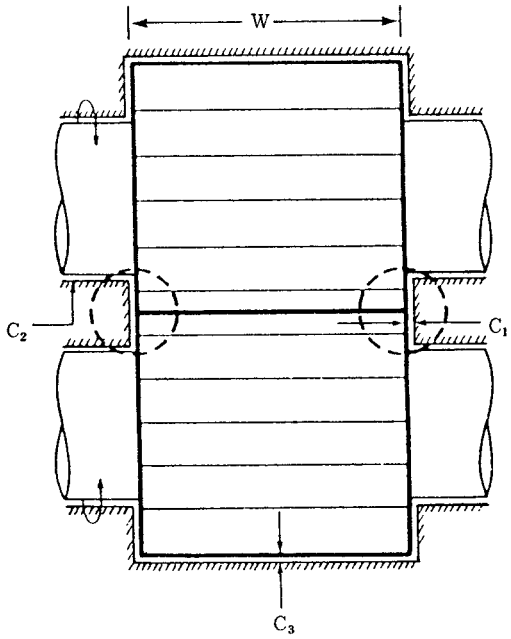


그림 9. Gear pump에서 leakage가 발생할 수 있는 부분.

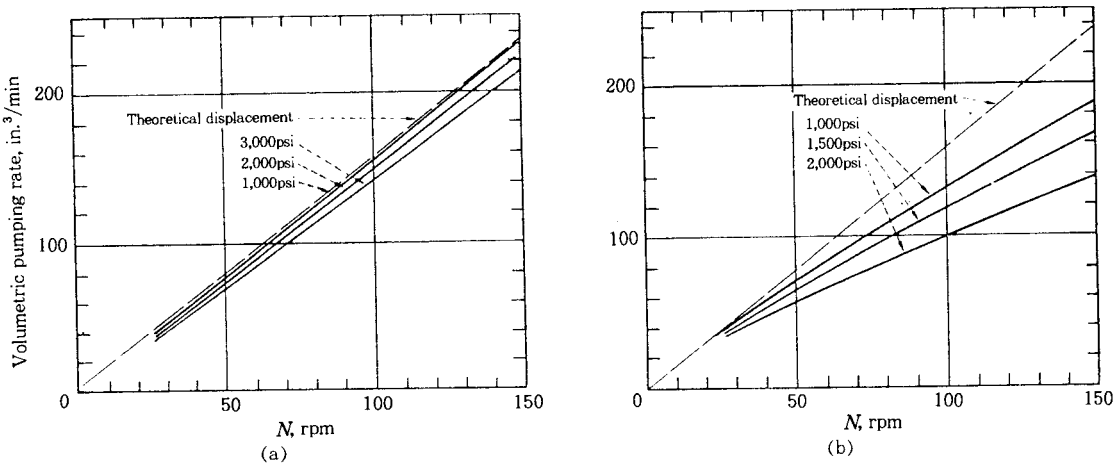


그림 10. 점도 및 압력에 따른 토출량 변화. (a) ABS, (b) PS.

gear집 사이의 공간이다. Leakage flow는 기어펌프 전, 후의 압력차에 의해 일어나는 유동으로 유체의 점도에 영향을 받는다. 즉 점도가 높을수록, 전, 후 압력차가 적을수록 leakage가 적게 일어나며 이론값에 근접하게 된다. **그림 10**은 이러한 영향에 의한 실제예로 직경 36 mm, 폭 36 mm의 기어펌프를 사용하였다.[15] 점도가 높을수록 (PS 보다 ABS의 점도가 높다), 압력차가 적을수록 이론 토출량에 근접함을 보이고 있다.

4. 용융방사(Melt Spinning)

PET, Nylon 등 합성섬유는 섬유내부에 섬유길이 방향으로 고분자쇄가 나란히 배열되는 정도(분자쇄의 배향도)가 일반적으로 높아야 섬유용으로 유용하게 사용되어지는 물성을 갖게 된다. 이 분자쇄의 배향도를 높이기위해 섬유를 방사한 후 연신을 하는 2단계 섬유제조법이 합성섬유가 처음 발명되었을 때인 1940년대부터 사용되어져 왔다. **그림 11**은 2단계 섬유제조법의 간단한 설명이다. 이 2단계 섬유 제조공정중 섬유물성에 가장 크게 영향을 미치는 요소로는 미연신사의 방사속도, 연신 배율, 연신 온도 등을 들수 있다. 이중 방사속도는 생산성과 직접 관련이 있어 합성섬유의 생산 초기인 1950년대부터 방사속도를 높이려는 연구가[18] 활발히 이루어져 왔다.

4.1 방사속도 증가

섬유의 강도는 방사속도가 증가할수록 증가하는 것으로 알려져 있으며 이에 대한 연구는 합성섬유 생산초기부터 현재까지 계속되어지고 있다. PET 및 Nylon이 연신공정없이 적정한 강력을 갖으려면 최소 6,000 m/min 이상의 방사속도를 가져야 하는 것으로 알려져 있다.[19] 방사속도를 높이려는 노력의 가장 큰 장애는 방사권취기 제조기술의 한계에 있었는데 50년대 초의 500-1000 m/min의 권취속도는 60년대초 1,000-2,000 m/min로 70년대초는 3,000-4,000 m/min로 80년대초는 5,000-6,000m/min로 향상되어 왔다. 그리고 90년대 초인 최근에는 많은 권취기 제조업체에서 7,000-8,000 m/min 정도의 고속방사 권취기를 상업화시켰다.

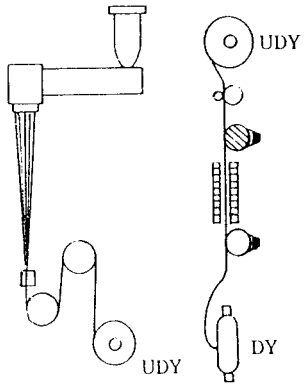


그림 11. 보통의 2단계 섬유 제조법.

이러한 권취속도의 증가로 기존의 방사와 연신이 나뉘어진 2단계 섬유제조 방법에서 방사만으로 섬유제조가 끝나는 1단계 섬유제조 방법으로 최근 섬유 제조의 흐름이 바뀌었다. 이러한 생산방법의 변경으로 섬유의 물성도 다소 바뀌었는데, PET의 경우를 보면 1단계 제조방법이 2단계 제조방법에 비해 염료의 흡착이 높아지고 열수 수축율(boiling water shringkage)이 떨어지는 것으로 알려져 있다. 이것은 일반적으로 1단계 방법에 의한 PET 섬유가 2단계 방법에 의한 것보다 amorphous size가 크기 때문인 것으로 알려져 있다.[19,20] 즉, 1단계 방법이 2단계 방법보다 crystallite의 크기는 큰데 반해 crystallinity 자체는 유사하거나 오히려 적어, crystallite 사이의 amorphous영역 크기가 상대적으로 크고 이에따라 염

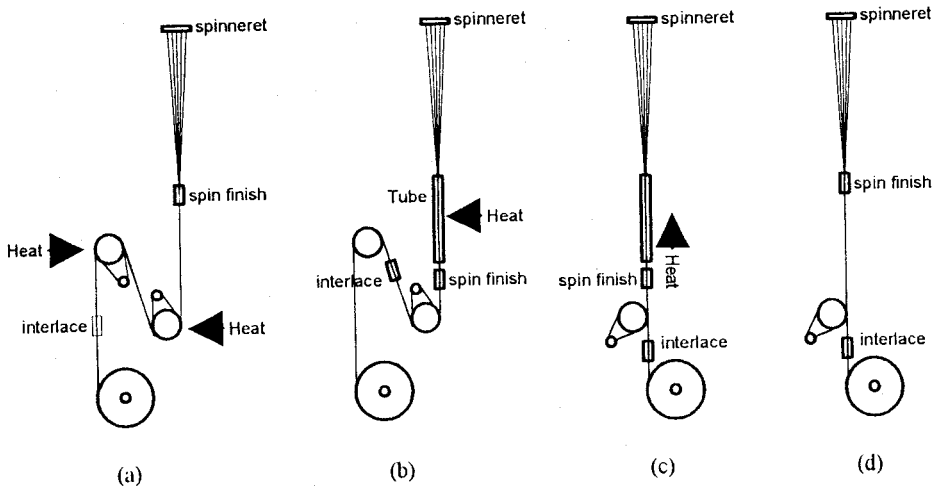


그림 12. 방사 type별 제조방법 : (a) heated godet roller 사용, (b) heated tube와 code godet roller 사용, (c) hot air와 cold godet roller 사용, (d) cold godet roller 사용.

료등을 통과시킬 수 있는 통로가 커져 낮은 온도에서의 염착성이 높아진다. 열수 수축율에 대한 직접적인 보고는 많지 않지만 이 역시 amorphous size의 증가로 인한 crystallite 사이의 taut tie molecules의 상대적 개수 감소 및 큰 crystallite의 수축방해에 의한 것으로 알려져 있다.

4.2 여러가지의 1단계 섬유 제조 방법

1단계 섬유 제조 방법은 중간 열처리 방법 및 권취기 속도에 따라 대략 4가지 정도로 나눌 수 있는데 그 원리와 장점을 들면 다음과 같다(**그림 12** 참조).

(1) Heated Godet Roller 사용 방법 :

일반적으로 spin draw라 알려진 방법으로 그림에서와 같이 1번째 godet roller속도를 1,000-3,500 m/min 수준으로 방사를 하고 2번째 godet roller속도를 3,500-5,000 m/min 수준으로 높여 연신효과를 주는 방법이다. 이때 2번째 godet roller의 온도를 150-220 ℃ 로 하여 열연신 효과를 함께 준다.

(2) Heated Tube와 Cold Godet Roller 사용방법 :

최근 개발된 방법으로 속도 3,500-5,500 m/min의 godet roller를 1개만 사용하고 godet roller에 열을 주지 않는 cold godet방법을 사용한다. 또 방사구금과 godet roller 사이에 heated tube를 사용하여 섬유에 열고정 효과를 준다. 이방법은 godet roller에 heater를 사용하지 않아 투자비가 저렴한 반면 방속에 제한을 받아 다양한 물성의 제품을 낼 수 없는 것이 단점으로 알려져 있다.

(3) Hot Aair와 Cold Godet Roller 사용방법 :

앞의 (2)번 방법의 개량된 형태로 heated tube 대신 hot air를 tube 아래쪽에서 위로 불어주어 고른 열고정 효과를 장점으로 한다.[21] 제작자에 의하면 생산할 수 있는 물성의 범위가 넓고 제작비가 저렴하다고 하나 godet roller의 속도가 5,000-6,500 m/min으로 미루어 (2)에 비해 커다란 장점은 없을 것으로 추정된다.

(4) Cold Godet Roller 사용방법 :

최초의 고속방사개념이 적용되어 개발된 방법으로 보통 1개의 godet roller를 사용하며 방사속도는 6,000-8,000 m/min의 고속으로 생산된다. PET의 경우 염착이 쉬운 이염효과와 boiling water shringkage가 낮은 특이한 물성이 발현된다. 일반적으로 투자비가 많이 드는 것으로 알려져 있다.

국내의 최근 설치한 설비의 경우 많은 설비가 (1)의 SDY에 해당되고 (4)의 고속방사 설비와 (2)의 heated tube 방식들은 준조업 및 pilot plant 수준으로 운전되고 있는 실정이다. **그림 12**는 앞 4가지 방사 type의 간략한 그림이다.

5. 특수 방사법 (Special Spinning)

5.1 분사 방사 (Melt Blown Spinning)

분사 방사는 용융된 열가소성 폴리머를 고온 고압의 기체를 사용하여 분사, 적층시켜 랜덤(random)하게 배열된 부직포 웹(web)을 제조하는 방사법이다(**그림 13**). 원래는 극세 Aerosol의 filter media로서 필요한 1μ 이하의 섬유를 얻기위해 1951년 미국 Naval Research Lab에서 PP를 소재로 개발되었으나, 이를 Exxon이 1967년에 상업화하여, 이때부터 분사 방사법(melt blown spimmimg)이라 명명하게 되었다.[22]

제조되는 섬유의 섬도 및 물성, 섬유長 등은 분사되는 공기의 압, 온도, 분사 노즐(nozzle)의 각도 등에 영향을 받으며, 원하는 용도에 따라 적정 조건을 설정해 주어야

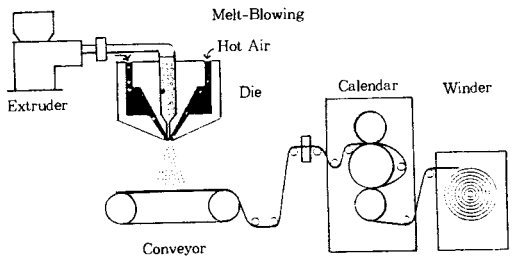
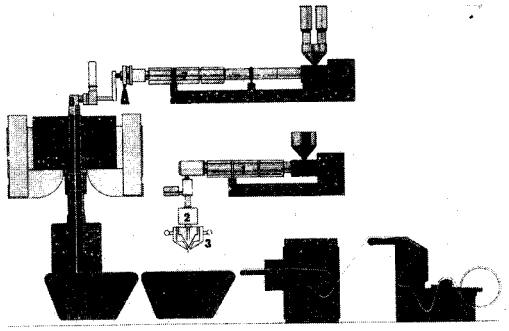


그림 13. 분사 방사 공정 개략도.

표 1. 분사 방사 부직포의 용도

분류	용도	소재
분사 방사 부직포	유 흡수재, wiper, 기저귀, 생리대, band 인공피혁	PP, PET, PU
분사 방사 부직포/ Spun bond 부직포	surgical accesory (mask, cap shoes cover, 수술복 wrap) tent, 방수포	PP, PET
분사 방사 부직포/ 타 섬유 복합	filter, 열절연재, 침대 sheet	PP, PET/Rayon
Compact 분사 방사 부직포	cable wrapping, battery separator, transformer paper	PP, PET



1. 분사 방사 Extruder
2. Polymer 계량 pump
3. 방사 Die
4. Collector Machine
5. Sliting and winding
6. Hear embossing 장치
7. Spun bond extruder
8. Polymer 계량 pump

그림 14. 스펀 본드 및 분사 방사가 혼합된 방사 장치 개략도.

한다. 이렇게 제조된 부직포 웹은 많은 미세공에 의한 높은 흡수 능력, 극세 섬유(평균 직경 5μ)가 얻어짐에 따른 우수한 여과 능력, 그리고 부드럽고 벌키니스(bulkyness)가 우수해 필터 여재, 1회용 의류 및 각종 와이퍼(wiper) 등의 용도에 사용되고 있다(**표 1**).

분사방사법으로 제조된 부직포는 별도의 3차원 교락을 부여하지 않으며 이에따라 타 부직포 제조법에 비해 그 강력이 낮다는 단점이 있다, 이를 보완하기위해 Kimberly Clark, 3M 등은 spun bond 방사법 및 타 섬유와의 복합화를 성공하였으며(**그림 14**)[23] 웹 포집 screen 대신 진공 roller를 사용하여 포집과 함께 압축

표 2. 제조공법별 부직포 생산량(%, 미국)

	Dry laid	Air laid	Wet laid	Spun bond	Spun lace	Melt blown
1984	30	20	10	29	6	5
1988	28	18	10	29	7	8
1992	26	14	9	33	8	10

표 3. 스펀본드 부직포의 용도

주요 용도	세 부 용 도	소 재
Cover stock	기저귀, 생리대, 양복 cover	PP
Disposable	1회용 물수건, wiper	PP
농업용	보온 덮개, 내부 커텐	PP, PET
산자용	기계 packing, 연마제, 공업용, 유 흡착재	PET
Filter	clean room용	PET
자동차 내장용	Floor cover, Seat cushion	PP, PET
Medical 용	수술용 gown, 환자복, 침대 Sheet	PP
토목용	배수, 보온, 연약 지반 보강용	PET
Air craft용	Brake lining, seat cover	PP, PET
기타	전선 피복용, 가구용	PP, PET

효과를 동시에 부여하는 방법도 개발되어 있다.[24]

5.2 스펀 본드(Spun bond)

열가소성 폴리머를 용융하여 방사 구금 하부의 air jet 장치를 사용하여 방사및 연신을 행하고, 이를 conveyer belt에 포집, 웹(web)을 형성하고, 형성된 웹은 열을 가하거나, emulsion접착, stitch bond 등의 방법을 통해 3차원 교락을 형성시켜 준다(**그림 14**).

1965년 DuPont사에 의해 Reemay라는 상표로 상업화 되었으며, 현재는 부직포 제조공법중 가장 많은 생산량을 보이고 있다(**표 2**). 스펀본드법은 일관공정 구축이 가능하여, 생산성이 높으며, 단섬유 부직포에 비해 강도 및 내구성이 좋다. 열가소성 폴리머는 소재에 관계없이 사용가능하며, 최근엔 방사 nozzle의 회전, conveyer belt의 속도 조절 및 열융착 롤러의 온도 및 압력을 조절하여 표면 결합 상태를 조절하는 방법 등이 다양하게 적용되고 있다. 아울러 서로 방향을 달리하여 제조된 웹을 crosslapping하여, 각 방향별 강력 향상을 도모하는 방법도 상용화되고 있다. 주 용도는 **표 3**과 같다.

5.3 플래시 방사 (Flash Spinning)

섬유 형성 폴리머를 그 용제와 함께 용제의 비점(沸點) 이상으로 승온하여 대기중으로 폭발적으로 분출시켜 고도의 분자 배향을 갖는 망상의 극세 섬유를 얻는 방사법이다(**그림 15**).[25]

미국 DuPont사에 의해 polyethylene을 이용하여 Tyvek이라는 상품명으로 최초로 상품화되었으며, 일본의 Asahi Kasei가 유사한 방법으로 상품화하고 있다. 분출된 용제가 증발하고 나면 약 0.5-10 μ 정도의 극세사가 웹을 형성하게 되고, 방사후 적정한 열과 압력으로 3차원 교락을 부여하게 된다(**그림 16**).

화학적인 저항성이 크고, 내구성이 있으며, 특히 종이

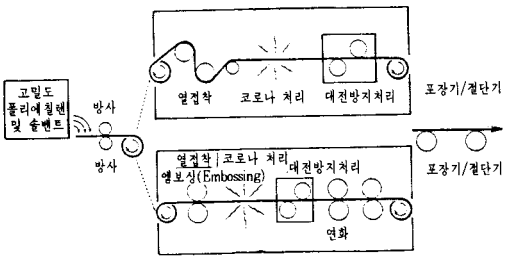


그림 15. 플래시 방사 공정 개략도.

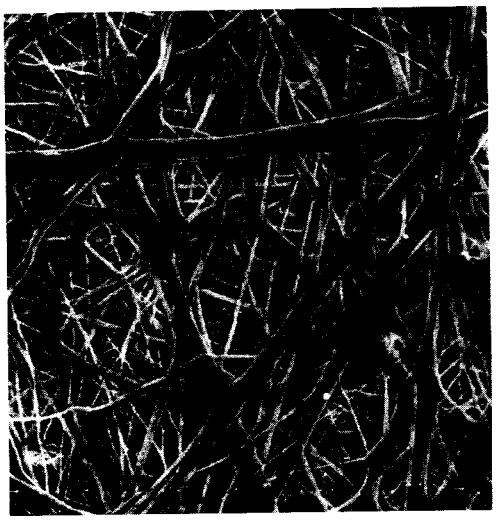


그림 16. 플래시 방사에 의해 제조된 부직포 표면 사진.

표 4. 플래시 방사 부직포의 용도

주요 용도	세 부 용 도
종이 대체	Floppy disk Cover, 항공 우편 봉투
Disposable	1회용 의류(보호복)
산자용	기계 packing, 각종 포장재
가정용	벽지
Medical 용	수술용 gown, 환자복, 침대 Sheet
의류용	Down baffle 원단

에서와 같은 린트(lint)발생이 없어 전자 재료등의 포장지 등에 광범위하게 사용되고 있다(**표 4**).

5.4 스펀 레이스(Spun Lace)

천연섬유 또는 합섬섬유 단섬유를 카딩하여 웹을 만들고 이 3차원 부직포를 워터 제트(Water jet)를 사용하여 3차원 교락을 주는 방법으로서 타 부직포 제조법에 비해 가장 위생적으로 부직포 웹을 제조할 수 있다(**그림 17**).[26] 1959년 DuPont에 의해 개발, 상업화되었으며, 수류를 사용하기 때문에 섬유 손상을 극소화시킬 수 있고, 첨가제를 사용하지 않아 부드럽고 유연하며, 어떤 종류의 섬유라도 적용가능하다는 장점을 지니고 있다. 주용도는 **표 5**와 같다.

6. 가연 가공(Texturing)[27,28,29,30,31,32]

6.1 가공사의 제조

일반적으로 합성섬유는 액상 또는 용융상태에서 미세한 구멍을 통하여 방사되어져 만들어지는데 그 형태는 매끄럽고 균일한 연속적인 복수개의 mono filament들의 집합체로 이루어져 있다.

반면 천연섬유는 형태가 irregular하고 rustic하면서 섬유자체가 갖고 있는 crimp나 꼬임 등에 의해 반발성과 부품성을 가지고 있다. 하지만 합성섬유 자체로는 상기의 특징을 나타낼 수 없어 이것을 극복하기 위하여 여러 가지로 연구가 진행되었다. 먼저 합섬섬유를 천연방적사와 같이 짧은 길이로 잘라 staple-fiber로 만드는 방법이 공

표 5. 스펀레이스 부직포의 용도

주요 용도	세부 용도	소재
Disposable	1회용 물수건, 보호복	Rayon, Pulp
산자용	filter 여재, 청정룸 wiper	PET, Aramid
Medical 용	수술용 gown, 수술용 거즈, 환자복, 침대 sheet	PET/Pulp Blend
의류용	심지, 인공피혁	PET

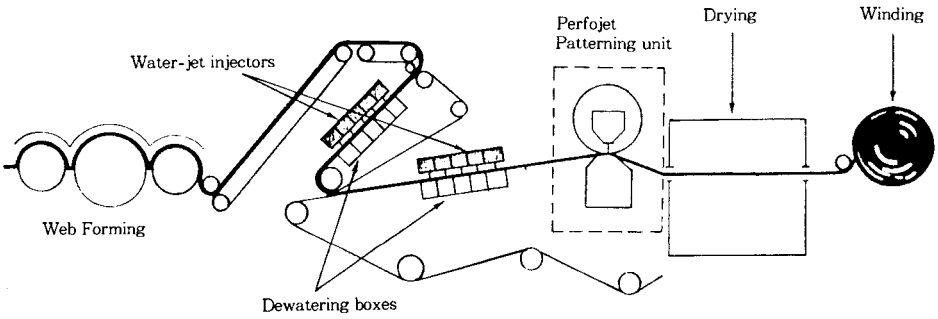


그림 17. 스펀레이스 공정 개략도.

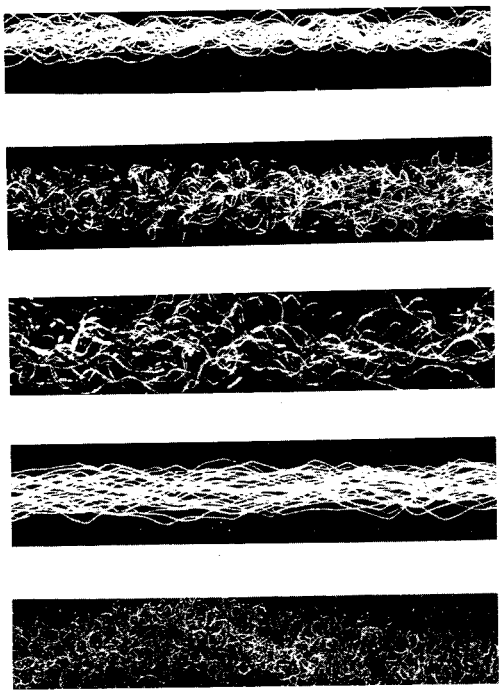


그림 18. 다양한 타입의 textured yarn형태.

업적으로 상용화되었다. 이후 자연적으로 가지고 있는 crimped fiber로 된 사의 성질 및 특징들과 연속필라멘트의 문제를 해결하기 위한 연구가 시작되면서 texture 혁명이 일어났다. 합성섬유는 열가소성이며 이는 열에 의해 그 자신의 성질이 변할 수 있음에 착안하여 학자들은 사의 길이방향으로 twist나 crimp를 부여함으로써 그 형태가 위의 사진과 같이 변하게 되고 또 이것은 열을 부여함으로써 영구히 고정된다는 사실을 알아냈다. **그림 18**은 여러 가지 textrured yarn의 측면을 촬영한 것이다. flat한 연속필라멘트로 texture가공하는 대표적인 방법들을 간단히 소개하면 다음과 같다.

<1>. 假撚법(False-Twist)

加撚 → 열Set → 解撚이 한 기계내에서 연속적으로 이루어짐.

가장 상용화되고 생산성이 높은 방법.

<2>. Stuffer box방법

Heat box내 絲 공급 → Crimp부여 (구김발생) → 열set

<3>. Knit-de-Knit방법

Knited → 열set → unraveled

<4>. Edge-crimp방법

Hot roller → knife edge → curl형성

<5>. Air-jet방법

air jet에 사 공급 → random loop형성

<6>. Gear crimp방법

회전하는 가열된 gear에 사 공급 → Crimp형성

상기의 textured 가공 방법중 假撚(false-twist)법이 현재 가장 보편화되어있고 생산성이 우수한 방법으로 알려져 있다.

6.2 假撚의 원리

假撚은 3단계의 process를 거친다. 사에 외력을 가할 수 있는 기구를 이용하여 加撚(사에 꼬임을 부여함)을 한 후 다시 반대방향의 꼬임을 주어 먼저 주어진 꼬임이 풀어지게끔 解撚을 한다. 이때 加撚이 이루어지는 영역에서 가열장치를 이용, 꼬여있는 상태를 heat-setting시킴으로써 사는 crimp를 갖게 된다. 이러한 crimp는 3차원적 입체구조형상을 하고 있으며 flat한 구조의 일반 합성섬유와는 달리 벌키성이 우수한 특징을 갖게 된다.

假撚가공에 있어서 중요한 것은 원하는 좋은 품질(볼륨감과 warm감 등)이 얻어질 수 있도록 조건을 설정하고 가능한한 균일하고 공정상의 trouble없이 생산해야 한다는 것이다. 구체적으로 말하면 좋은 품질의 가연사를 얻기위해선 가연시의 꼬임수, 열처리 온도, 시간 그리고 장력을 주의깊게 조절해야 한다.

假撚이란 기본적으로 필라멘트에 撚을 가한 후 풀어버리는 즉, 加撚과 解撚이 假撚장치에서 동시에 이루어짐으로써 crimp를 부여하는 방법이므로 加撚정도를 어느수준까지 할 것인가가 중요한 요인이 된다. 사의 벌크성은 실을 나선형으로 꼬아주어 열처리할 때의 나선형구조에 가장 큰 영향을 받는다. 결국 helix각이 크고 helix반경이 작을수록 strecth에 의한 curvatrue의 변화가 크므로 일반적으로 임계점까지는 加撚수가 증가할수록 crimp가 섬세해지고 snarl이 적어진다. 가연기구 type별로 사에 주어지는 가연수의 slip정도가 달라지는데 일반적으로 핀가연방식이 정확한 꼬임전달이 이루어지는 반면에 디스크방식은 絲와 가연기구에서 일어나는 slip율이 크다. 이를 해결하기 위해서 디스크의 재질 및 두께변경, 축간격 조절 등 개선된 것들이 나오고 있다. 또 가연기구회전에 의해 모양이 비틀려진 絲는 열에너지를 받음에 의해 그 변형된 상태가 급속히 안정화된다. 즉 변형을 일으킨 stress가 유지된 상태에서 높은 열을 가할 경우 응력완화가 일어나 strain energy가 높고 불안정한 상태에서 낮은 상태로 감소된다.

이때 가해진 온도가 높을수록 안정화되는 정도는 커지게 되고 해연후에 사가 보유하는 crimp는 증가하게 된다. 또 이러한 응력완화는 열이 부여된 시간이 길수록 급속히 이루어진다. 고속생산방식으로 갈수록 heater長이 길어지는 이유가 바로 이 때문이다. 가연시 발생하는 加撚장력과 解撚장력은 사의 품질과 깊은 관계가 있으며 적정한 장력으로 운전해야 좋은 품질의 균일한 가연사를 얻을수 있다. 결론적으로 말하면 두 장력비가 적정한 수준일 때 균일하고 공정상의 trouble이 적은 가연사를 생산

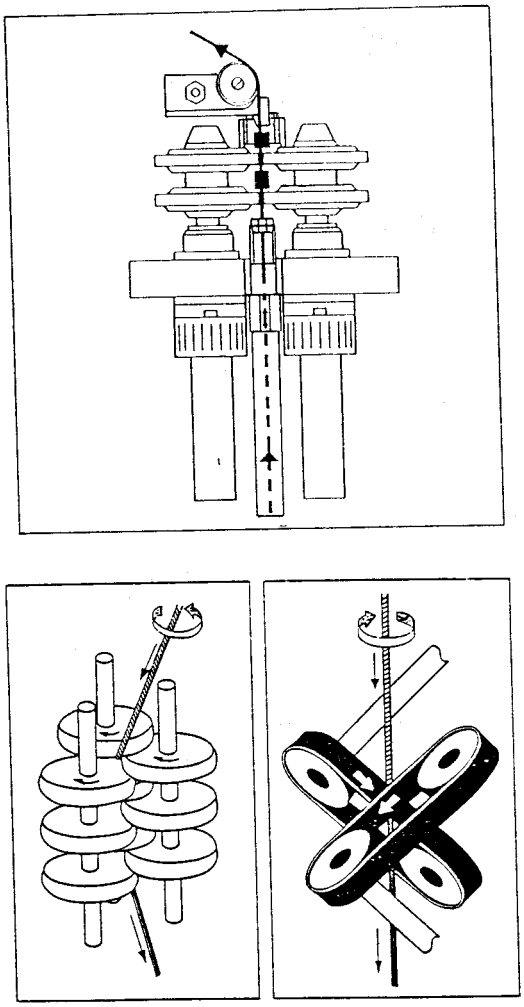


그림 19. 대표적 가연기구 System.

할 수 있다.

加撚장력과 解撚장력비를 K値라고 하는데 K値가 지나치게 클 경우 모우가 발생하게 되며 반대로 지나치게 적을 경우 꼬임이 제대로 풀리지 않아 미해연이 발생하게 된다. K値는 사용하는 소재사에 따라 다르며 일반사에 비해 특수사의 경우 K치를 낮게 설정하는 편이다.

6.3 DTY機

가연 type별로 나눠보면 크게 pin type, friction type, nip belt type이 있으며(**그림 19** 참조) 현재 pin type은 상업적인 merit가 없기 때문에 점차 감소되는 추세이며 고속생산이 가능한 friction disc type과 belt type이 주류를 이루고 있다. Disc type은 회전하는 회전체와 주행하는 사가 접촉함으로써 생기는 마찰에 의해 회전력이 사에 부여됨으로써 加撚이 이루어진다. 재질은 주로 ceramic coating, polyurethane 등이 이용된다. Ceramic에 비해 PU재질이 사손상이 적고 slip양이 적은 반면 수명이 짧고 유제등의 영향을 쉽게 받는다. 근래들어 이런 것들을 해결하기위한 복합주물형태의 것들도 개발되고 있다. Friction type의 공통점은 slip이 많고 정확한 조건control이 않되는 것이다.

반면 belt type은 disc type에 비해 slip이 적고 사손상이 적으며 belt間 각도 조절등에 의해 세심한 조건 설정이 가능하다. 하지만 이 type도 단점이 있다. Belt간의 접압이상 및 불균일은 바로 絲품질 이상을 초래하기 때문에 세심하고 정기적인 관리가 필요하다. 업체별로 보면 영국의 Scragg社, 독일의 Bamarg社, ICBT社 등은 friction disc type으로 제조하고 일본의 Murata社만이 belt type으로 제조하고 있다. 각社들은 상기의 문제점을 해결하기위해서 연구개발을 해오고 있으며 이에따라 많은 개선이 이루어졌다. 축간거리를 변경,연수를 조절하는 SCRAGG社의 POSITORQ5, belt간 접압이상을 computer로 균일제어하는 Murata社의 TCS가 바로 그것이다.

각 가연기 제조회사에서는 새로 개선, 개발된 新기계를 꾸준히 선보이고 있으며 근래들어 그방향은 크게 고속생산화, 무인자동화로 축약할 수 있다. 무인자동화에 있어서는 robot 방식과 individual방식이 대두, 자동doffing, 자동creel투입이 이루어지며 고속생산화 측면에서는 비접촉식 H/T, straight사도, inverter 등을 채택 고속생산이 가능하도록 하고 있다.

7. 결 론

섬유의 형성가공은 아직도 천연섬유의 형성과정에서 그 원리를 배운다. 특히 약 4,500년 전부터 쓰여 오는 silk 섬유를 만들어내는 누에의 섬유형성 원리는 아직도 합성섬유 공정을 연구하는 사람들에게는 공부하고 모방해야 할 커다란 과제로 남아있다. 우리는 아직도 조그만 누에(silk worm)에게서 습식방사, 액정방사, 고속방사, gel-sol 전이 방사 등과 같은 첨단 섬유형성의 원리를 배우며 모방하려고 애를 쓰고 있다.[33] 자연의 섬유 형성에 대한 원리를 모방하고 그것을 인공적인 기술에 접목하여 자연을 뛰어넘는 기술의 창조를 과학도로서 기대해 본다.

참 고 문 헌

1. J. F. Ingen Housz, in "Fortschritte beim Extrudieren", Carl Hanser Verlag, Munich, 1976.
2. James L. White, "Twin screw Extruder, Hanser", Munich, 1991.
3. B. H. Maddock, SPC ANTEC, New York, 383 (1959).

4. Z. Tadmor, I. Duvdevani, and I. Klein, *Polym. Eng. Sci.*, 7, 198 (1967).
5. G. Menges and P. Klenk, *Kunststoffe*, 57, 590 (1967).
6. P. Klenk, *Rheologica Acta.*, 7, 75 (1968).
7. J. Dekker, *Kunstoffe*, 66, 130 (1976).
8. D. W. Sunstrom and C. C. Young, *Polym. Eng. Sci.*, 12, 59 (1972).
9. C. Maillefer, Swiess Patent 363,149 (1961).
10. R. Barr, U. S. Patent 3,698,541 (1972).
11. R. F. Dray and D. L. Rawrence, U. S. Patent 3,650,652 (1972).
12. H. T. Kim, U. S. Patent 3,897,938 (1975).
13. H. S. Rowell and D. Finlayson, *Engineering*, 126, 249 (1928).
14. J. M. Mckelvey, *Polym. Eng. Sci.*, 24, 398 (1984).
15. J. M. Mckelvey and W. T. Rice, *Chem. Eng.*, Jan., 24 (1983).
16. G. LeRoy, U. S. Patent 3,486,192.
17. B. H. Maddock, SPE J., Julyu, 23 (1967).
18. DuPont, U. S. Patent 2,604,667 (1952).
19. J. Shimizu, N. Okui, and T. Kikutani, "High Speed Fiber Spinning", chap. 15, John Wiley and Sons, New York, 1985.
20. H. M. Heuvel and R. Huisman, "High Speed Fiber Spinning", Chap. 11, John Wiley and Sons, New York, 1985.
21. John Brown Deutsche Engineering, *Int. Fiber. J.*, Feb. 44 (1996).
22. Van a. Wente, *Ind. Eng. Chem.*, 48 (1956).
23. U. S. Patent, 4,429,001.
24. U. S. Patent, 4,100,324.
25. 岡本三宣, 화섬월보. 7, (1977).
26. 緒方知親, 부직포정보, 4, (1988).
27. Monsanto Co., Textured Yarn Technology, vol. 1, 1967.
28. S. Tone, 4th Textile Engineers' Meeting, Kanazawa, Nov. 16, 1995.
29. 손길수, 폴리에스터 필라멘트 제조기술의 이론과 실제, 교학연구사, 1989.
30. 樂師 弘, Trouble shooting, 村田機械. 合繊機械 技術部, 1994.
31. JIN, Mar., (1966).
32. 김상용, 섬유형성 공학, 서울대학교출판부, 1995.
33. 차세대 섬유과학의 조사연구회(일본), 신섬유 과학, 5장, 1995.
34. C. Rauwendaal, "Polymer Extrusion", Hanser, Munich, 1990.