

용융전기방사와 멜트블론

조경제, 김한성 · 부산대학교 유기소재시스템공학과

1. 서론

전기방사법은 고분자용액 또는 용융물에 전기적인 힘을 가해 나노섬유를 생성하는 방법이다. 1934년에 Formhals에 의해 처음 정전기적 힘을 이용한 섬유 방사방법을 고안하였고, 이것을 전기방사법이라 부르게 되었다[1]. 전기방사의 기본적인 메커니즘은 한쪽 전극에 해당하는 노즐끝으로 토출된 고분자 용액에 강한 전기장이 가해진다. 그리고 드롭은 전하에 의해 하전되면서 젓이 발생하고 젓은 반대쪽 극으로 가속화되면서 섬유가 생성되는 것이다[2].

전기방사법은 공정조건에 따라 웹의 구조와 웹을 구성하는 섬유가 다양한 형태를 가지며 많은 연구가 수행되고 있다. 용액전기방사의 경우 다양한 고분자와 다양한 용매를 적용하는 것이 가능하기 때문에 이를 통한 많은 연구가 이루어져 왔다 [3-5]. 기본적인 형성 메커니즘에 관한 연구는 Taylor의 전기장에 따른 다양한 drop의 형태의 분석 연구를 필두[2]로 전기방사의 주요 거동인 instability를 jet의 촬영을 통해 분석한 연구[6,7], 전기방사를 통한 섬유와 bead의 생성 메커니즘에 관한 연구[8,9] 등이 지속적으로 수행되고 있다. 사용되는 고분자의 점도와 분자량 등 물성과 구조에 따른 영향에 관한 연구도 상당히 많이 수행되고 있는데, 점도와 분자량, 고분자의 entanglement, 분자쇄의 구조 등은 전기방사 나노섬유의 형성에 매우 중요한 인자인 것으로 널리 알려졌다[10,11]. 이 밖에도 전기방사 공정시 습도나 공기 등의 분위기 조건에 따른 영향을 분석한 연구도 있으며[12,13], 교류방식의 고전압 발생장치를 이용하여[14,15] 전기장의 설계를 통해 포집되는 섬유의 형태를 컨트롤 하는 연구[16,17] 등도 활발히 진행되고 있다.

이 밖에도 용액전기방사가 아닌 용융전기방사에 관한 관심이 증가하고 있다[18-21]. 용융전기방사법에 의해 생성되는 섬유는 일반적으로 용액전기방사에 비해 생성되는 섬유의 직경이 굵다. 그러나 용융전기방사는 기존의 용액전기방사법이 가지는 독성용매 사용에 동반하는 여러 가지 단점을 극복할 수 있기 때문에 현재 많은 연구가 진행 되어지고 있다.

2. 용융전기방사

2.1. 용융전기방사연구의 최근 동향

Jason Lyons[22] 등의 연구내용을 살펴보면 polypropylene의 tacticity와 분자량에 따른 물성을 변수로 두고, TCD는 2~5 cm로 고정, 전압은 6~15Kv/cm로 설정하여 Figure 1과 같은 장치에서 실험을 수행하였다.

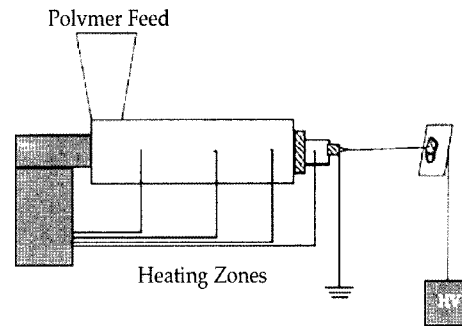


Figure 1. 본실험의 모식도.

Table 1. 실험에 사용된 고분자

Polymer	Mw	Mn
Isotactic propylene	580,000	165,700
Isotactic propylene	190,000	50,000
Isotactic propylene	106,000	21,000
Isotactic propylene	12,000	5000
Atactic propylene	19,600	5400
Atactic propylene	14,000	3700

이 연구를 통하여 Table 1에서 보는 바와 같이 분자량이 가장 큰 (Mw 580,000)고분자의 경우 가장 큰 직경의 섬유가 생성되었다. isotactic, 12,000 Mw의 경우 1 μ m 미만의 섬유가 생성되기도 하나 대부분은 1 μ m 이상이며 분포가 매우 컸다 (std 50%) 전기장의 세기를 10, 12.5, 15KV/cm으로 하고 TCD를 2 cm로 설정한 경우 전기장의 세기가 증가함에 따라 직경은 감소하는 경향을 나타내었다. 분자량과 tacticity의 영향

을 살펴보면 분자량이 감소함에 따라 직경은 어느 정도 감소하는 경향을 나타내었다. atatic의 경우 분자 구조적으로 입체 장애의 효과로 인해 isotatic보다 조밀하게 packing 되기 어렵기 때문에 비슷한 분자량에서도 직경이 상대적으로 크게 나타났음을 알 수 있다. 토출된 고분자에 충분한 전기장이 가해질 경우 side chain이 발생되기도 하였다(Figure 2). 또한 실험 시 pump 등을 사용하지 않았기 때문에 일정한 유량조건이 도입되지 않았다. 따라서 방사시간이 지날수록 토출되는 고분자의 양이 상대적으로 줄어들었기 때문에 적은량의 고분자가 동일한 전기장을 받아 직경이 감소되는 경향을 나타내었다(Figure 3).

Paul D. Dalton 등의 연구내용을 살펴보면[23] 고분자의 중합방법에 따라 여러 가지 분자량의 고분자를 사용하여 연구를 수행하였다. 사용된 고분자의 용점은 55~59°C이며, 펌프를 통해 공급되는 고분자의 유량 (0.02~5 ml/h)과 전기장의 세기(20~30KV)를 변수로 설정하고 TCD는 30 cm로 고정하였다.

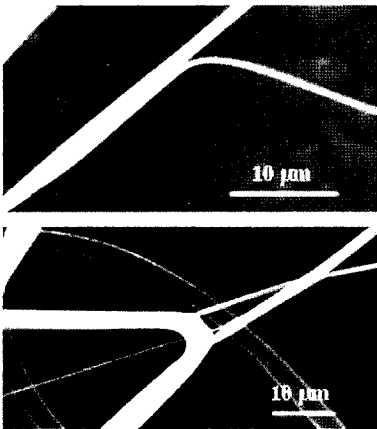


Figure 2. side chain.

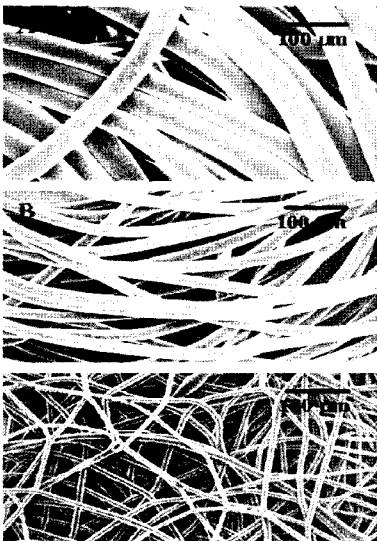


Figure 3. 방사시간의 증가에 따른 경향.

이 연구에서 용융전기방사를 통해 얻어지는 생성물의 종류는, 분자량이 낮은 고분자를 사용했을 때 얻어지는 구형의 electrosprayed particle, 직경이 50 μm 이상이며 포집판 표면에 납작한 형태로 붙어 있는 molten fiber, 충분히 냉각 및 고화되어 1 μm 이하의 균일한 직경을 보이는 solid type fiber의 세 가지 형태임을 보고하였다 분자량은 electrospinning이 되느냐 electro spray가 되느냐에 있어 중요한 인자이다. 가장 낮은 분

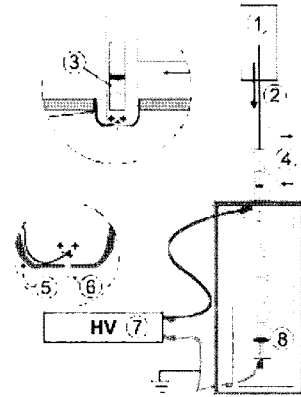


Figure 4. 실험 모식도.

자량의 고분자를 사용하였을 때 생성물은 거의가 입자 형태이며 약간은 molten fiber가 존재하기도 했다. 흥미로운 사실은 용융물의 점도가 용액 전기방사에서는 방사가 가능한 수준의 점도 임에도 불구하고 용융전기방사에서 방사가 원활하게 일어나지 않았다는 점이다. 분자량이 좀더 높은 고분자를 실험에 사용하였을 때 molten 또는 solid 형태의 섬유가 주를 이루었으며, particle은 매우 적은양만 관찰되었다. 낮은 온도에서 섬유로 방사가 가능한 분자량의 고분자도 용융온도를 증가시키면 따라 particle 형태의 생성물이 많아진 경우도 있었다. 온도에 대한 경향성이 일반적으로 나타나지는 않았으나, 상대적으로 높은 분자량을 가진 고분자를 사용한 경우에 최적수준의 solid fiber가 나타나는 온도 조건에서 낮은 분자량의 고분자는 molten fiber가 많거나 상대적으로 질이 좋지 않았다(Figure 5).

노즐에서의 토출량이 섬유의 형태 및 질을 결정하는 가장 큰 요소였으며(Figure 6), 토출량이 작을 경우에는 particle들이 포집되기도 하였으나, 토출량을 증가시키면 이런 입자들은 나타나지 않았다. 0.05와 0.1 ml/h의 토출량에서 높은 퀄리티의 solid fiber가 생성 되었다. 그러나 molten fiber도 역시

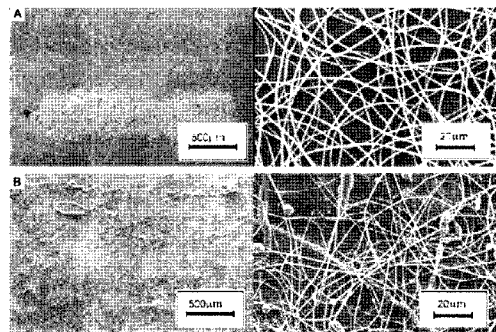


Figure 5. 온도 조건에 따른 섬유의 형태.

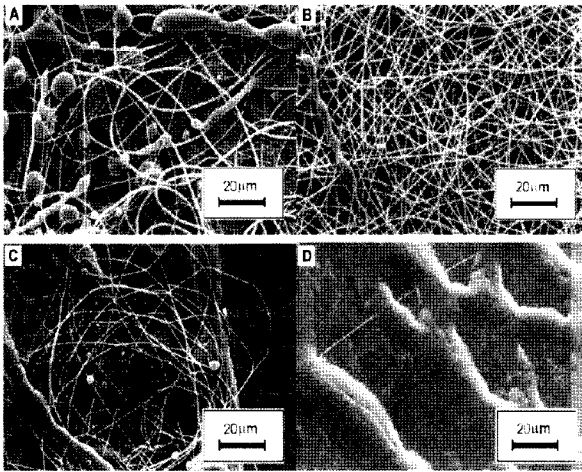


Figure 6. 토출량에 따른 섬유 형태.

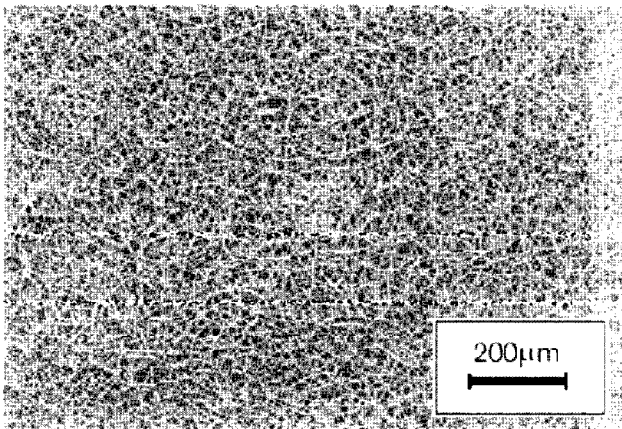


Figure 7. 최적조건에서 얻어진 섬유(직경 $1.25 \pm 0.07 \mu\text{m}$).

토출량의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 가장 높은 품질의 solid fiber가 나오는 영역이 존재하였다 (Figure 7). 최적의 전압은 20KV이며, 전압의 상승에 의한 효과는 없었다. 점도가 1.8(Pa.S) 이하의 경우 particle이 발생되었으며 1.4~88의 범위 안에서 molten fiber가 생성되었다. 따라서 molten fiber는 어느 영역에서든 발생이 가능했다. 특정 온도 조건에서 28.1~39.4 Pa.S의 점도 범위에서 높은 품질의 solid fiber를 얻을 수 있었으나 여전히 molten fiber가 존재하며, 이것을 제거하고 줄이는 방향의 연구가 더욱 진행되어야 할 것이다.

Seungsin Lee 등의 연구[24]에서는 MI 35, Mw195,100의 PP 고분자 사용하여 친수성과 소수성의 물질을 오염물질로 사용하여 필터링 성능을 분석하고 방사 실린더, 노즐, 방사라인, 콜렉터의 4부분의 온도조건을 설정하였다. 방사전압은 10~20KV, 토출량 0.002~0.008 ml/min, TCD 5~7 cm로 설정

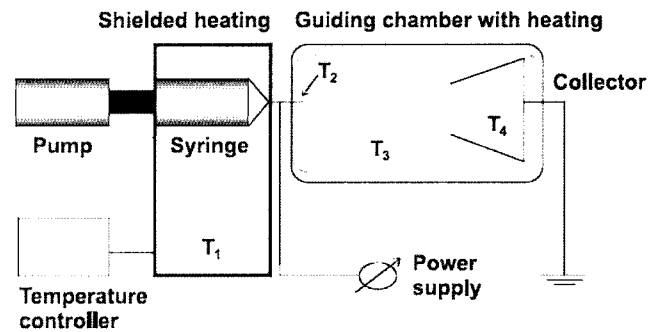


Figure 8. 실험 모식도.

하였다.

용액전기방사 시스템과 비교했을 때 용매의 휘발 등 제반 문제 때문에 용융 전기방사의 경우에 섬유직경의 감소는 한계가 있다. 대부분 마이크로 레벨의 섬유가 생성되었으며 간혹 가지달린 형태의 나노 레벨의 섬유가 관찰되기도 했다. 토출량의 증가에 따라 일반적으로 섬유직경이 증가하는 경향을 나타내었으나, 전기장의 세기에 의한 영향은 관찰되지 않았다.

결과적으로 용융 전기방사를 스펀본드 부직포 소재 위에 방사할 경우 공기투과성은 어느 정도 유지되면서 필터링 성능이 우수한 소재를 얻을 수 있었음을 보였다.

Huajun Zhou 등은 poly lactic acid melt(T_g 55, T_m 165)를 이용한 용융전기방사 연구를 하였다[25]. 실린더, 노즐, 방사라인의 세부분 온도 변화를 주고, 240 부근의 PLA 점도는 용액전기방사에서 용액의 점도와 비슷하다는 것에 착안하여, 열분해 실험 등을 통해 열에 의한 화학적 변성이 가장 적을

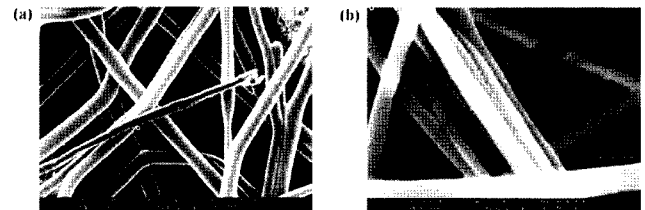


Figure 9. 용융전기방사 된 PP 섬유.

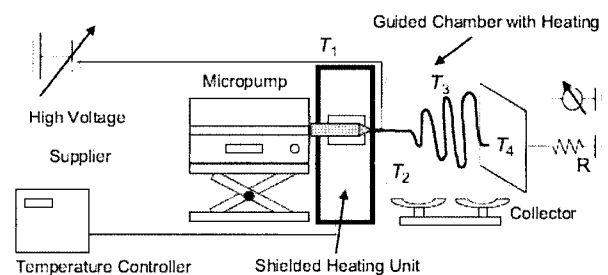


Figure 10. 실험 모식도.

특 집

● 조경제, 김한성

수 있는 온도 조건에서 실험을 진행하였다. 방사라인 온도는 25, 80 °C로 설정하고 토출량은 0.05, 0.02 ml/min, 전압조건은 5~20KV로 설정하였다.

고분자는 온도에 따라 점도가 달라지고 특정온도에서 열분해가 진행되는데, 본 실험의 PLA는 240 °C 부근에서 점도가 117Pa.S으로 앞선 다른 연구에서 사용되었던 용액전기방사에서의 고분자 용액의 점도와 비슷한 수준이며, 열에 의한 화학적 분해를 최소화시키기 위해 주사기의 온도를 255 °C, 노즐의 온도를 200 °C로 설정하였다. 방사라인의 온도는 25 °C와 80 °C로 설정하고 토출량은 0.05 ml/min과 0.02 ml/min, 전압은 5~20KV로 변화를 주었을 때 일반적으로 전압을 상승시키고 토출량은 적고, 방사라인의 온도가 증가하면 whipping motion이 크게 나타났음을 알 수 있었다. 격렬한 whipping motion은 섬유 직경감소를 유발하였다.

노즐의 온도가 증가할수록 섬유의 평균직경은 감소하고 분포 또한 좁아지는 경향을 나타내었고 노즐의 직경감소 또한 섬유의 극세화에 기여를 하였다. 방사라인의 온도가 증가할수록 whipping이 상승하여 더욱 불안정해진다(Figure 11). 평균섬유의 직경은 대체로 감소하는 경향을 나타내지만 직경의 분포는 더욱더 커지는 경향을 띤다. 전기장의 세기가 증가할수록 평균 섬유 직경은 감소하는 경향을 나타내었다.

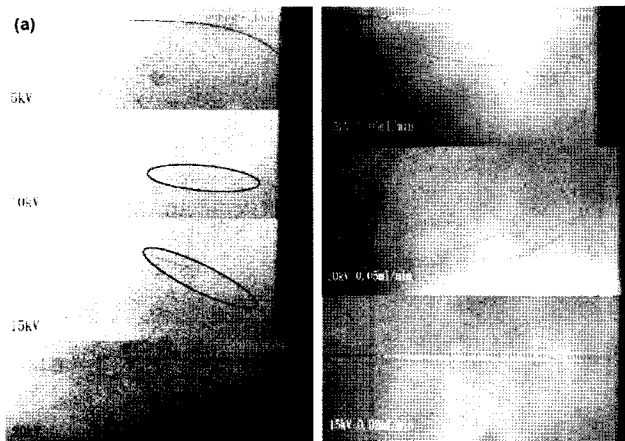


Figure 11. whipping motion.

최적조건(T1: 200 °C, T2: 225 °C, T3: 80 °C, T4: 25 °C, 토출량 0.01 ml/min, 20 KV, TCD 10 cm, 노즐직경: 0.16 mm)에서 평균직경이 800 nm의 섬유가 생성되었다(Figure 12).

NObuo Ogata 등은 CO₂ 레이저를 이용한 급속 용융시스템을 이용한 연구를 하기도 하였다[26]. 먼저 원료인 고분자칩을 rod형태의 시료로 만들고 레이저로 용융 전기방사를 하였

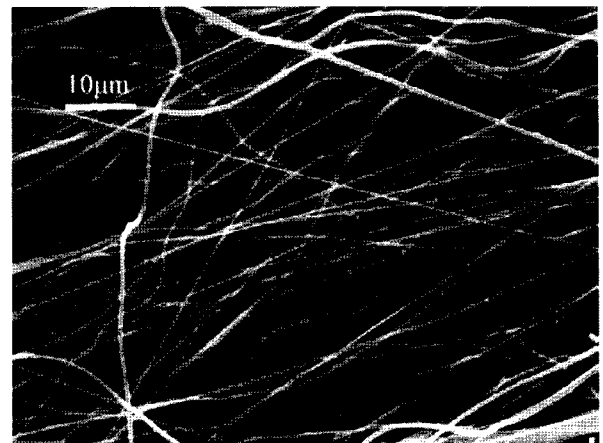


Figure 12. 최적조건에서 방사된 섬유.

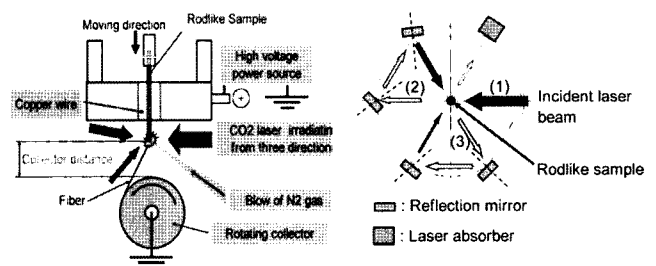


Figure 13. 실험 모식도.

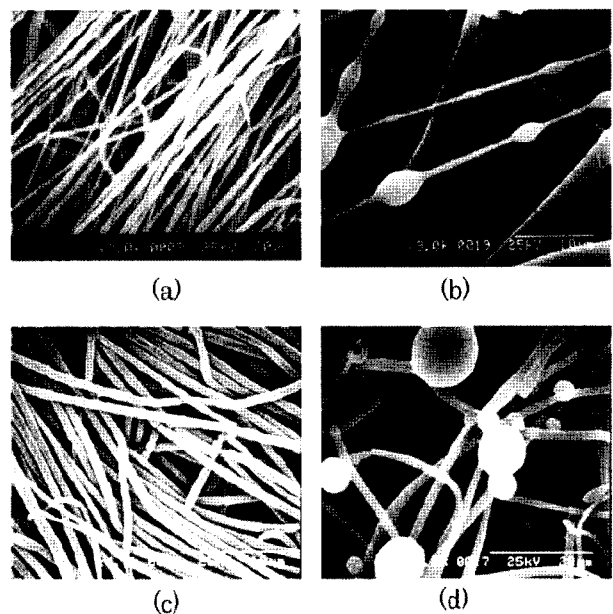


Figure 14. 레이저의 세기에 따른 섬유의 형태.

는데, MFR이 다른 두 가지의 시료를 사용하고, 레이저의 세기, TCD, 고분자의 종류 등을 변수로 설정하였다.

레이저의 강도를 15 W까지 증가시킴에 따라 좀더 가는 직경의 섬유가 생성되었고 나노 단위(800 nm)의 섬유가 생성되기도 하였다. 그러나 레이저의 강도가 지나치게 세지면, 일반 용액 전기방사에서 농도나 점도가 낮은 경우와 마찬가지로 비드와 입자형태가 많이 나타났다

또한, MFR 값이 큰 섬유의 경우 낮은 경우보다 좀더 가는 직경의 섬유가 생성되었다(Figure 14). 레이저의 세기가 증가함에 따라 분자간의 절단이 일어나고 이로 따라 분자량과 직경이 감소되었으며 결정의 크기가 감소되므로 Tm도 감소하는 경향이 일어난다. 결정구조의 분석결과 배향된 형태가 아닌 무배향의 등방성 결정이 생성되었다.

2.2. 분위기 온도와 용융전기방사의 상관성[27]

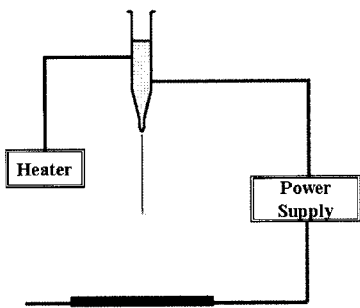


Figure 15. 실험의 모식도.

세가지의 용융지수(MI 800, MI1500, MI1900)의 polypropylene 시료를 사용하여 방사 시 방사 라인의 분위기 온도의 변화에 따른 생성섬유의 구조를 분석하였다. 방사 거리(TCD)는 16 cm, 방사전압은 35KV로 고정하였으며, 용융온도는 300

°C로 설정하였다.

방사 시 분위기 온도에 따라 섬유의 포집상은 본 연구실에서 자체 제작한 fractal dimension laser 측정장치를 이용해 3차원 구조를 분석하였다. 본 장치는 컴퓨터로 동기화가 가능하며 객관적인 데이터를 수집하기 위해 도입되었다(Figure 16). 그리고, DSC를 이용한 결정 구조 및 열적 성질을 분석하고 전자주사 현미경(SEM)을 이용하여 미세구조를 분석하였다.

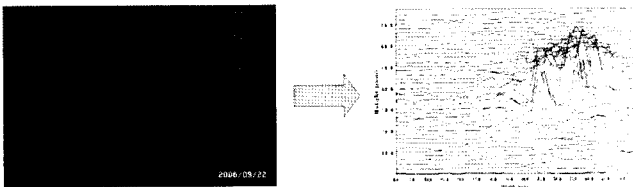


Figure 16. Fractal dimension laser 측정장치에 의한 분석.

3차원 laser 분석 결과 방사 시에 분위기 온도에 따라 포집되는 섬유의 형태 차이가 존재했다. 용융방사선 상에서 고화가 상당히 빨리 진행됨을 알수 있었으며 분위기 온도에 따라 고화가 되는 시점의 차이가 존재함이 확인되었다. 분위기 온

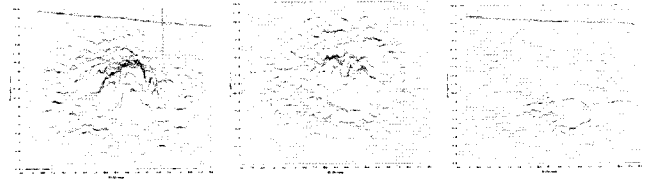


Figure 17. 방사라인의 온도에 따른 섬유 포집의 형태.

도가 높을수록 3차원 구조를 형성하지 못하고 납작한 구조형 성하고 높은 온도 일수록 섬유의 고화가 늦어졌다.

DSC 분석결과 방사된 섬유의 peak와 시료의 peak가 어느 정도의 차이를 보였다. 특정 조건에서 Tg peak가 관찰되기도 하였으며, 분위기 온도에 따라 고화시점과 냉각조건의 차이가 있음을 시사하는 증거이다.

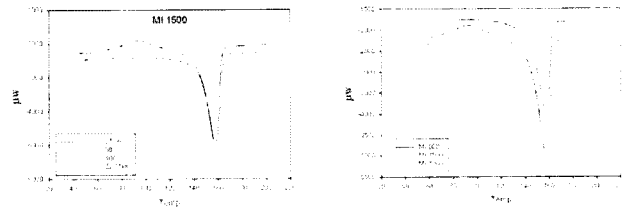


Figure 18. DSC 분석.

분위기 온도와 MI 값에 따라서도 peak의 차이를 보였다. 높은 값의 MI를 가진 시료의 경우 방사된 섬유의 양이 상대적으로 많고 bulk 한 구조를 나타내었다. SEM 분석결과 간헐적으로 더 작은 직경의 섬유가 관찰되기도 하였으며 고화 속도의 차이는 MI 의존성보다 온도 의존성이 더 크다는 점을 알게 되었다. SEM 분석결과 생성되는 섬유는 직경의 분포가 매우 넓고 불규칙적인 구조였으며, 내부분위기 온도에 따라 포집상의 형태 또한 다르다는 것을 알게 되었다.



Figure 19. SEM 분석.

3. 멜트블론

멜트블론은 열가소성 섬유의 용융방사 원리를 이용하여 고분자 용액을 고온의 열풍으로 분사 시켜 연신하여 섬유 형태

의 웹을 제조하는 방법이다. 멜트블론은 1950년대 미국 정부의 지원 아래 Naval 연구소에서 대기 중의 방사성 입자를 포집하기 위한 용도로 처음 연구가 시작되었고 1960년대에 이르러 Exxon사가 최초로 상용화에 성공하였다. 이후에 3M, Kimberly-Clark 등에 의해 다양한 형태의 시스템이 도입되고 현재 여러 상품들이 상용화되어 있다. 멜트블론 공정은 난류에 의한 영향이 있기 때문에 메커니즘을 규명하는 것은 상당히 복잡하며, 균제도를 향상시키는 것도 매우 어렵다. 멜트블론 공정에서 한계점은 난류에 의해 연신되어 날라 가던 섬유가 서로 뭉쳐지는 rope 현상과 고온 또는 고분자의 분자량이 낮을 경우 섬유로 형성되지 못하고 입자상이 되는 shot현상이 있다. 이 부분은 앞으로도 추가적인 연구로 개선이 되어야 할 부분이다. 멜트블론은 전기방사법에 비해 상대적으로 직경이 굵은 편이며 일반적으로 생성되는 섬유의 직경은 0.1 μm 부터 15 μm 까지 다양하나 평균적으로 2~4 μm 의 직경을 가지고 있다. 최근 멜트블론 기법을 이용해 800 nm 직경의 나노섬유를 실험적으로 방사에 성공했다는 내용이 보고되어 지고 있다. 향후 500 nm 급 제품도 양산예정이라는 보도도 있었다[28]. 또한 최근 500 nm 급의 직경을 가지는 멜트블론 섬유 제조에 관한 논문이 보고되어 지고 있다. 이에 2007년 보고된 논문의 내용을 살펴보면 다음과 같다[29].

PBT, PP, PE 등의 고분자를 이용하여, 상업적으로 적용 가능한 공정조건에서 single orifice를 사용하여 멜트블론 섬유를 얻었다. 섬유의 용융온도와 점도, 토출량, 열풍의 세기 등의 공정인자는 섬유 극세화에 매우 큰 영향을 미쳤으며, 평균직경이 500 nm 미만인 섬유가 생성되었다.

Table 2. 실험의 요약

RUN I.D	T_p, T_a ($^{\circ}\text{C}$)	η^* at 1s^{-1} (Pa s)	m_p (g/min)	ϕ (SCFM)	τ	d_{av} (μm)
PS-1	180	23	0.053	8	9	1.61
PS-2	260	1.6	0.07	7.5	6.4	0.62
PS-3	280	1.1	0.07	8	6.8	0.38
PP-1	180	35	0.35	6	0.5	1.23
PP-2	180	35	0.035	8	13.6	0.45
PP-3	220	15	0.035	8	13.6	0.30
PBT-1	265	137	0.35	4.5	0.4	1.22
PBT-2	265	137	0.035	10	17	0.44

공급되는 열풍의 세기를 증가시키는 것은 섬유의 토출량을 감소시키는 것과 비슷한 효과를 발휘한다. 즉, 같은 힘의 drag force가 상대적으로 적은 양의 고분자에 가해질 때 더욱더 연신되고 극세화 되는 것이다. PP와 PS의 경우 온도를 증가시키면 따라서 직경이 좀더 가늘어 지는 경향을 나타내었다. 이

것은 높은 온도에서 섬유가 고화되는 것을 지연시켜 좀더 연신될 수 있는 기회를 제공하고, 점도를 많이 낮추어 주기 때문이다. 그리고 SEM 이미지 분석결과 부분적으로 멜트블론의 단점인 shot과 비슷한 형태의 원형 입자상이 관찰되었는데, 이것은 방사과정에서 표면장력에 의해 유도된 fiber breakup instability에 의한 것으로 생각된다. 일반적으로 newtonian 유체에서 이처럼 표면장력에 의해 유도되는 불안정한 현상을 rayleigh instability라고 한다. 이러한 현상은 섬유의 형성 시 표면장력이 necking 현상을 촉진시켜서 발생하는 것이다. PBT를 사용한 경우에는 이러한 현상이 발생하지 않았으나, PP나 PS의 경우에는 용융점도와 탄성이 PBT에 비해 낮기 때문에 이러한 현상이 발생한다. 온도 뿐 아니라 유입 열풍의 속도를 증가시키는 경우도 마찬가지이다.

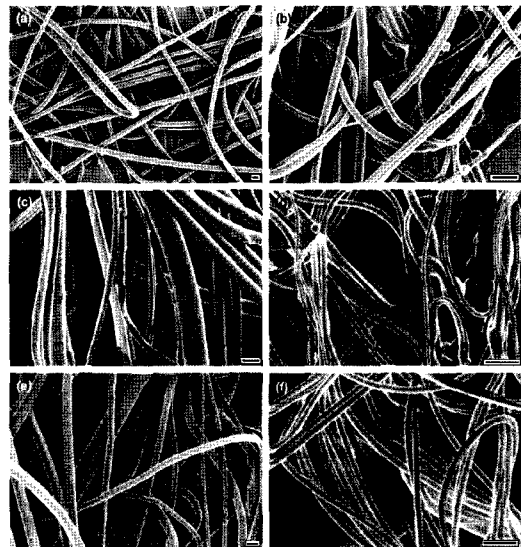


Figure 20. 방사된 섬유의 SEM 이미지.

4. 결론

용융전기방사 시스템은 최근에 그 연구사례가 조금씩 발표되고 있으나 기존의 용액 전기방사에 관한 연구보다 극히 드문 실정이다. 하지만 용액전기방사 시스템은 용융전기방사 시스템과 비교하였을 때 몇 가지의 한계점을 가지고 있다.

첫째, 공정상 한계점을 몇가지 가지고 있는데, 용매를 사용하는 점을 들 수 있다. 이것은 생산공정에서 용매를 회수해야 되는 공정이 추가로 필요하다는 것을 보여주며, 생산설비의 비용을 증가시키는 요인이 된다. 또한 생산성의 측면에서도 방사과정 중에 용매의 휘발로 인해 실제 생산되는 섬유의



양은 용융형 시스템보다 적다는 단점이 있다.

둘째, 응용분야에 관하여 살펴보면 독성용매를 사용한 경우 생성되는 섬유에 포함되어 있는 용매를 100% 제거하기가 어렵기 때문에 환경 및 사람의 건강에 문제를 일으킬 수 있으며, 의료용이나 인체에 직접 적용하는 용도에 사용하기는 어렵다. 수용성인 고분자를 사용하는 경우에도 포집체가 액상의 조직이나 용액, 물인 경우에 전기방사 시스템을 이용한 응용은 어렵다. 또한 특정 용매에 상온에서 용해되지 않는 고분자(PE, PP, PET) 등은 일반적인 전기방사 시스템에서는 응용하기 어려우나 용융시스템에 접목하면 전기방사에 의한 섬유의 제조가 가능하다.

셋째, 본 보고에서 언급한 바와 같이 멜트블론을 통한 나노섬유의 제조가 최근 많이 연구 되어지고 있다. 용융전기방사 보다 멜트블론을 사용한 경우 고압의 압축공기를 사용하기 때문에 생산성에서 유리한 위치를 점할 수 있다. 그러나 사용목적에 따라서 전기방사가 가지는 장점을 최대한 살리는 연구도 진행되어 지고 있다. 예를 들면, 멜트블론의 경우는 난류를 사용하기에 적층구조의 설계는 불리한 형태로 진행되어 지나, 용융전기방사의 경우 전기장 설계에 따른 웹의 구조설계 가능성이 좀 더 열려 있다고 볼 수 있다. 또한 멜트블론의 경우 압축공기의 압력을 지나치게 높이면 포집된 웹은 flying 현상에 의한 생산 한계 상황에 직면할 수 있다. 용융전기방사에서 낮은 생산성의 한계는 멀티노즐의 사용 등 다양한 방향에서 극복되어 질 가능성이 열려 있다.

참고문헌

1. A. Formhals, "Process and Apparatus for Preparing Artificial Threads", U. S. Patent, 1, 975, 504, (1934).
2. G. I. Taylor, "Electrically Driven Jets", *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A, Meth. and Phys. Sci.*, **313**, pp.453-475, (1969).
3. C. Kim and K. S. Yang, "Preparation and Characterization of PAN-based Web of Carbon Nanofibers by Electrostatic Spinning", *Carbon Science*, **3**, pp.210-218, (2002).
4. J. M. Deitzel, W. Kosik, S. H. Mcknight, N. C. Beck Tan, J. M. Desimone, and S. Crette, "Electrospinning of Polymer Nanofibers with Specific Chemistry", *Polymer*, **43**, pp.1025-1029, (2002).
5. P. K Baumgarten "Electrostatic Spinning of Acrylic Microfibers.", *J. Colloid Interface Sci.*, **36**, p.71, (1971).
6. D. H Reneker, W. Kataphinan "Nanofiber garlands of polycaprolactone by electrospinning" *Polymer*, **43**, pp.6785-6794, (2002).
7. Y. M. Shin, M. M. Hohman "Experimental characterization of electrospinning : the electrically forced jet and instabilities" *Polymer*, **42**, pp.9955-9967 (2001).
8. D. H. Reneker and I. Chun, *Nanotechnology*, **7**, pp.216-223, (1996).
9. H. Fong, I. Chun and D. H. Reneker, "Beaded nanofibers formed during electrospinning", *Polymer*, **40**, pp.4585-4592, (1999).
10. Mattew G. McKee, Garth L. Wilkes "Correlations of Solution Rheology with Electrospun Fiber Formation of Linear and Branched Polyesters" *Macromolecules*, **37**, pp.1760-1767, (2004).
11. Suresh L. Shenoy, W. Douglas Bates, Harry L. Frisch, Gary E. Wnek "Role of chain entanglements of Fiber formation during electrospinning of polymer solutions : good solvent, non-specific polymer-polymer interaction limit" *Polymer*, **46**, pp.3372-3384, (2005).
12. H. J. Kim, Y. H. Jung, Myung-seob Khil "A study on Characterization of Nonwoven Mats via Electrospinning under Vacuum" *Journal of Korean Fiber Society*, **41**(6), (2004).
13. Sureeporn Tripatanasuwan, Zhenxin Zhong, D. H Reneker "Effect of evaporation and solidification of the Charged jet in Electrospinning of poly(ethylene oxide) Aqueous solution" *Polymer*, (2007).
14. Soumayajit Sarkar, Seetharama Deevi "Biased AC Electrospinning of Aligned Polymer Nanofibers" *Macromolecular. Rapid commun.*, **28**, pp.1034-1039, (2007).
15. Royal Kessick, John Fenn, Gary Tepper "The use of AC potentials in electro spraying and electrospinning process" *Polymer*, **45**, pp.2981-2984, (2004)
16. Dan Li, Younan Xia "Electrospinning of Nanofibers : Reinventing the wheel" *Adv. Mater.*, **16**, 14, July 19, (2004).
17. J. M. Deitzel, J. D Kleinmeyer, J. K. Hirvonen "Controlled deposition of electrospun poly(ethylene oxide)fibers" *Polymer*, **42**, pp.8163-8170, (2001).
18. J. S. Kim, D. S. Lee "Thermal Properties of Electrospun Polyesters" *Polymer Journal*, **32**(7) pp.616-618, (2000).
19. L. Larrondo, R. ST. john Manley "Electrostatic Fiber Spinning from Polymer melts. Experimental Observation on Fiber Formation and Properties" *Journal of Polymer science : Polymer physics Edition*, **19**, pp.909-920, (1981).
20. L. Larrondo, R. ST. john Manley "Electrostatic Fiber Spinning from Polymer melts. Examination of the flow field in an Electrically Driven Jet" *Journal of Polymer Science : Polymer physics Edition*, **19**, pp.921-932, (1981).
21. L. Larrondo, R. ST. john Manley "Electrostatic Fiber Spinning from Polymer melts. Electrostatic Deformation of a Pendant Drop of Polymer Melt" *Journal of Polymer science : Polymer physics Edition*, **19**, pp.909-920, (1981).
22. Jason Lyons, Christopher Li, Frank Ko "Meltelectrospinning part1 : processing parameters and domestic properties" *polymer*, **45**, pp.7597-7603, (2004).
23. Paul D. Dalton, Julia Lleiex Calvet, Ahmed Mourran "Melt-electrospinning of Poly-(ethylene glycol-block-ε caprolactone)" *Biotechnology Journal* **2006**. **6**.
24. Seungsin Lee, S. Kay Obendorf "Developing Protective Textile Materials as Barriers to Liquid Penetration Using Melt-Electrospinning" *JAPS* **102**, pp.3430-3437, (2006).
25. Huajun Zhou, Thomas B. Green, Yong Lak Joo "Thermal effects on electrospinning of polylactic acid melts" *Polymer*, **47**, pp.7497-7505, (2006).
26. NObuo Ogata, Shinji Yamaguchi, Takashi Ogihara "Poly(lactide) Nanofibers produced by a Melt-Electrospinning system with a Laser

특 집

-
-
-
- 조경제, 김한성

Melting Device” Polymer, 104, pp.1640-1645, (2007).

27. 조경제, 김한성 “폴리프로필렌의 용융전기방사” 한국섬유공학회 학술 발표회 논문집, 39(2) p.97, (2006).
28. 전자신문, 2005. 12. 6.

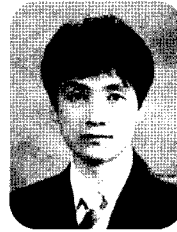
29. Christpher. J, Alhad Phatak, David W. Giles “Melt blown nanofibers : Fiber diameter distributions and onset of fiber breaup” Polymer, 48, pp.3306-3316, 2007.



김 한 성

부산대학교 유기소재시스템공학과

- 1992. 부산대학교 섬유공학과 졸업
- 1994. 부산대학교 섬유공학(석사)
- 1997. 동경공대 유기재료공학(박사)
- 1998-1999. Georgia Institute of Technology(USA), Post-doc.
- 1999-2002. North Carolina State University (USA) 부직포연구소, Post-doc.
- 2002-현재. 한국섬유공학회 부산경남지부 학술이사(총무)
- 2003-현재. 한국섬유공학회 섬유기술과산업(편집위원)
- 2004-현재. 부산대학교 유기소재시스템공학과 교수



조 경 제

부산대학교 유기소재시스템공학과

- 2006. 부산대학교 섬유공학과 졸업
- 2006-현재. 부산대학교 섬유공학과 석사과정