

# 부직포 제조의 하이테크 기술과 차별화 제품의 개발동향

주 창 환

충남대학교 섬유공학과

## 1. 머리말

미래예측이 불확실한 21세기 급변하는 지식정보 사회에 중추산업으로 대두되는 정보(IT), 바이오(BT), 나노(NT), 환경(ET), 우주항공(ST) 등의 신산업과 기존 전통산업의 첨단화에 따라 앞으로 부직포는 이들 산업의 핵심소재 및 부품으로 그 수요는 더욱 증가할 것으로 예상된다. 구체적으로 Figure 1에 나타낸 것과 같이 지난 5년간 부직포제품은 물량면에서 연평균 5~10%의 고성장률을 보이며 앞으로 그 성장은 계속적으로 지속될 것으로 섬유전문가들은 전망하고 있다.

최근 부직포산업의 선진국인 일본, 미국 및 유럽에서의 기술개발은 생산라인의 고속화에 의한 원가 절감과 제품의 부가가치 창출 및 용도 다변화를 위한 기존 제조공법의 복합화에 초점을 두고 있다. 따라서, 본고에서는 현재 다양한 부직포 제조공법 중에서 제품의 용도전개가 큰 스펀본드, 멜트블로운, 스펀레이스 및 초음파 접착 기술에 한정하여 개발

동향을 살펴보고자 한다. 아울러 이들 공법의 복합화 기술로 개발된 차세대 부직포제품으로 관심을 끄는 세계적인 선두그룹 회사들의 새로운 차별화제품의 특성을 소개하고자 한다.

## 2. 스펀본드공법의 제조기술

스펀본드부직포 제조공법의 개발은 고속생산에 의한 원가절감과 제품의 고급화를 위한 섬유의 극세화 기술과 다성분 방사기술에 초점을 두고 하드웨어 측면에서 이루어지고 있다. 대표적인 혁신개발은 아손(Ason)과 코벨코(Kobelco)사의 극세화 및 고속생산기술, 라이펜하우저(Reifenhauser)사의 이성분 방사기술과 더불어 리터퍼포젯(Rieter Perfojet)사의 원료와 공정에서 유연성을 가지는 다변화기술 등이 있다.

### 2.1. 극세화 및 고속생산 기술

일반적인 섬유방사에서 와인더 속도에 의존하는 연신과정과 달리, 스펀본드부직포에서 필라멘트의 연신력은 공기기류에 의해 형성된다. 아손(Ason)사의 스펀본드부직포의 극세화 기술의 핵심은 방사과정에서 연신력을 최대화하기 위하여 방사거리를 감소하고, 방사라인에서 공기기류를 조절하는 특수한 장치를 부착한 것이 특징이다. 스펀본드부직포에서 섬유의 연신력은 공기기류와 섬유사이에 상호작용에 의해 생성된다. Figure 2와 같이 섬유

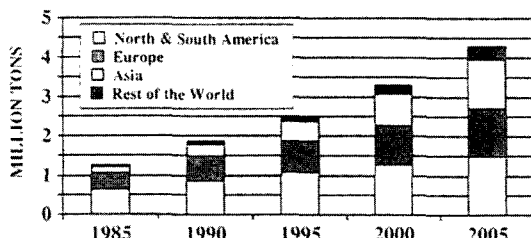


Figure 1. 세계 부직포시장의 성장현황.

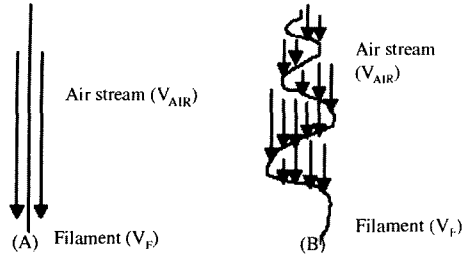


Figure 2. 공기기류와 필라멘트사이 에 작용하는 힘. (A) 점성마찰, (B) 섬유굴곡저항.

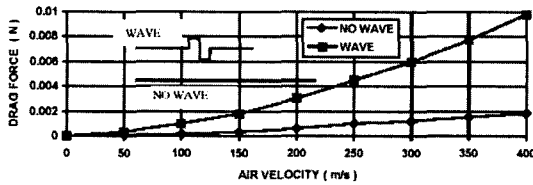


Figure 3. 공기 공급형태에 따른 필라멘트에 작용하는 저항력.

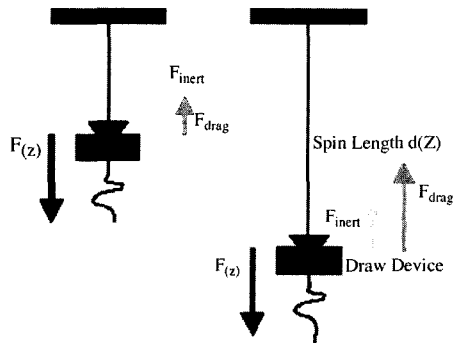


Figure 4. 방사거리에 따른 섬유에 작용하는 힘.

방사과정에서 공기와 필라멘트사이에는 점도마찰과 섬유굴곡에 의한 공기저항력이 발생한다. 이런 경우에 공기공급을 주기적으로 변화시키면 섬유에 굴곡이 형성되어 공기저항력은 급격히 증가된다 (Figure 3).

이러한 기본개념으로 방사라인에 공기공급을 반복적으로 변화시키는 연신 스톱트(drawing slot)를 부착하고, 방사거리를 감소시키면 필라멘트의 굴곡에 의한 파형운동으로 Figure 4와 같이 공기저항력은 감소되고 관성력은 증가한다. 이로부터 새로이

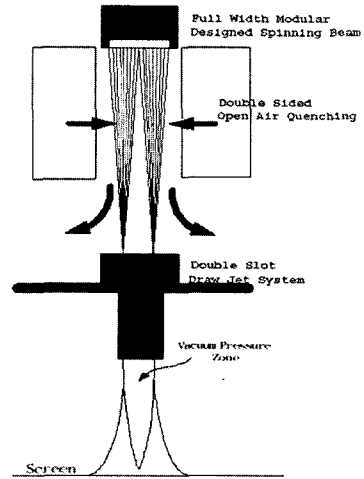


Figure 5. 코벨코사의 스펀본드시스템의 개략도.

개발된 연신 스톱트 출구에서 섬유는 고속연신이 가능하여 섬유직경을 감소시킬 수 있다.

한편, 일반적으로 극세섬유의 스펀본드부직포는 생산성이 40~70kg/hr로 매우 낮아 일본의 코벨코사는 새로운 스펀본드 시스템을 개발하여 1데니어 이하로 고배향된 극세섬유 제조의 생산성을 기존 시스템보다 2배 이상인 150kg/hr로 증가시켰다. 기본적인 개념은 Figure 5에 나타난 것과 같이 광폭의 단일방사구를 이용하여 양면이 개방형인 냉각장치를 부착하고 두 개의 입구를 갖는 연신 제트시스템을 사용한 것이 특징이다. 이로부터 제조된 스펀본드부직포는 웹균제성이 아주 양호한 극세섬유의 집합체 구조로 나타난다.

## 2.2. 이성분 방사기술(BiCo 기술)

점차적으로 부직포 소비자의 요구조건이 다양화되고 고성능화에 따라 스펀본드부직포의 기능과 성능향상을 목적으로 이성분 섬유방사기술에 대한 개발이 활발히 진행되고 있다. 이성분 섬유를 가진 스펀본드부직포는 단성분으로 제조된 부직포보다 표면, 촉감, 가공성 등의 다양한 기능으로 용도전개가 더욱더 용이하다.

기술개발 측면에서 이성분 방사에 사용되는 원료

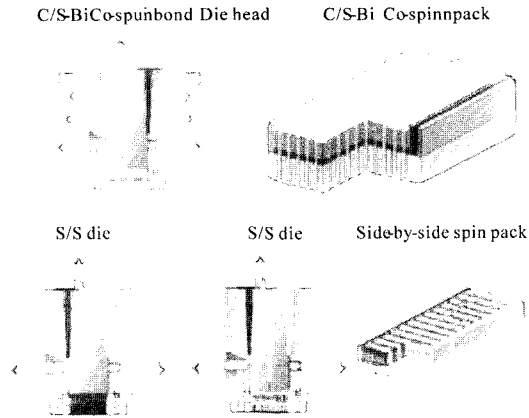


Figure 6. 이성분방사 스펠본드시스템의 방사다이와 방사팩.

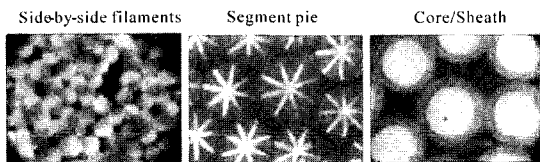


Figure 7. 이성분방사 스펠본드부직포의 다양한 단면구조.

의 주요한 특성은 수지의 저점도, 용융안정성, 고순도 및 좁은 분자량분포를 가져야 한다. 또한, 이성분 방사시스템의 요구사항은 수지의 정량공급을 위해 방사기, 용융필터, 방사펌프 및 방사파이프의 최적화가 필요하며, 개발핵심은 방사시스템 내에서 사용수지를 균일하고 완전한 용융물로 정확하게 분배하는 기능이다.

최근 개발한 라이펜하우저사의 이성분 방사시스템을 보면, 이러한 요구특성을 고려하여 다단계 방사펌프를 사용하여 원형 방사헤드(spining head)로 동심원 형태로 용융수지를 공급하는 방법으로 해도형(core/sheath), 분리형(side by side), 분할형(segmented pie) 등의 다양하고 새로운 스펠본드부직포의 제조시스템을 소개하고 있다. Figure 6은 라이펜하우저사에서 개발한 이성분방사의 헤드와 방사팩(pack)을 나타낸 것이고, Figure 7은 이들로부터 제조된 스펠본드부직포의 다양한 섬유단면의 구조형상을 보여준다.

한편, 이성분방사 스펠본드시스템의 방사라인에서 연신장치는 크게 개방형과 폐쇄형으로 구분할 수 있으며, 개방형은 방사라인에서 냉각, 연신 및 적층영역의 공정조건을 독립적으로 조절이 가능하여 맞춤형 제품생산이 가능하다. 그러나, 폐쇄형은 섬유의 냉각과 연신영역이 상호 연결되어 이들의 조절방법은 섬유의 최종적인 생산속도에 의존하여 범위가 비교적 넓은 속도만 조절이 가능하다.

### 2.3. 원료와 공정의 다변화 기술

리터퍼포젯사는 최근에 기존의 스펠본드 시스템보다 생산속도가 빠르고, 원료의 선택과 공정의 다변화에 유연성을 가지는 새로운 Perfobond 시스템을 개발하였다. 기존 기계와 차이점은 완전 자동화되고 전공정이 독립적인 제어시스템으로 장치, 공정 및 제품의 변화에 쉽게 대응할 수 있는 고품질의 스펠본드부직포 생산이 가능하다.

Figure 8은 Perfobond 시스템의 제조라인을 개략적으로 나타낸 것으로 핵심요소는 냉각, 연기제거, 연신, 섬유분리, 적층단계로 구분되며, 이들은 완전히 독립된 시스템으로 개별적으로 제어가 가능한 것이 가장 큰 특징이다. 이러한 제조라인의 독립적인 제어기술로 수지변경, 점도변경 및 생산량 변동에 따라 공정조건이 최적화가 항상 가능하다. 이들의 구체적인 개발내용은 방사법, 냉각, 연신 및 적층시스템 등의 주요 공정라인의 혁신적인 개선기술이다.

- ① 냉각시스템: 방사공정의 가장 주요한 요소로 세계의 독립된 수직존(zone)에서 공급되는 공기의 온도와 속도를 제어하는 독립기능을 부여하였다. 이는 0.2°C, 0.02m/s까지의 정밀한 공기의 온도와 속도를 제어하여 방사조건 변화에 상관없이 냉각공기의 최적조건이 설정이 가능하다.
- ② 방사법: 다수의 분배관을 갖는 용융고분자수지의 분배시스템을 채택한 것이 주요한 특징이며 ±0.5°C 허용오차의 정밀한 가열시스템으로 방사구 통로에서 수지의 균일한 유동속

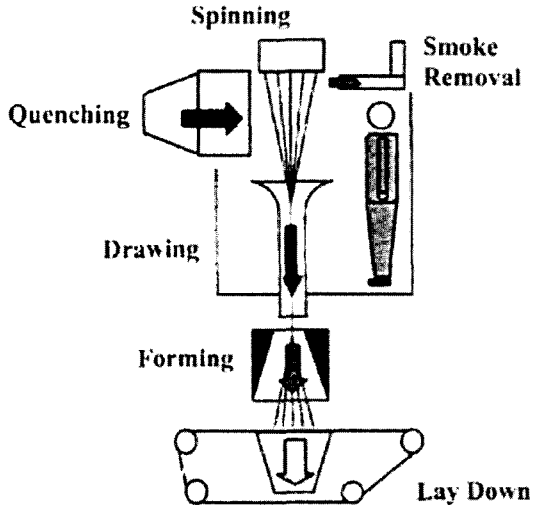


Figure 8. 리터퍼포벙트의 스펠본드시스템.

도를 가지고 있다.

- ③ 연신시스템: 특수한 설계로 개발된 십자형 공기주입기(slot)는 필라멘트의 연신위치를 가변할 수 있는 자동설계시스템을 사용하여 균일성이  $\pm 2\sim 3\%$ 인 필라멘트의 연신조절이 가능하다.
- ④ 섬유분리시스템: 종합적인 공기역학과 정전기 원리를 응용시킨 특허기술을 활용하여 슬롯 밖으로 나가는 공기제트의 제어를 통해 웹형성판 위에 필라멘트가 뭉치기 전에 필라멘트 다발이 완전히 분리되게 하였다.

한편, 기존의 일반적인 스펠본드시스템은 연신비가 항상 일정하여 섬유직경과 토출량은 직선적인 비례관계로 섬유직경을 변화시키려면 단지 토출량을 변화시켜야 한다. 그러나 새로이 개발된 Perfobond 시스템은 Figure 9에 나타낸 것과 같이 방사구에서 토출량은 항상 일정하고 섬유직경은 이미 설정된 최대와 최소범위에서 연신력을 변화시킬 수 있다. 구체적으로 주어진 토출량에서 섬유직경과 연신력 변화는 Figure 10에 나타낸 것과 같이 다양하다. 따라서, Perfobond 시스템은 기술적이고 경제적인 면에서 토출량의 변화없이 섬유직경을 최적화할 수 있는 특징이 있다.

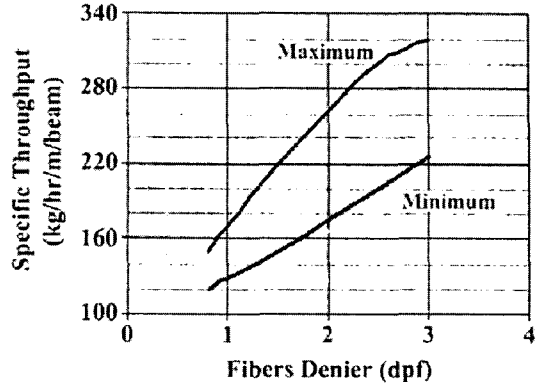


Figure 9. 토출량과 섬유직경 관계.

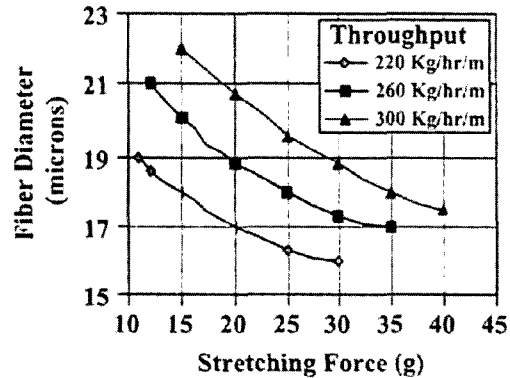


Figure 10. 섬유직경과 연신력 관계.

또한, 연신력과 토출량을 모두 고정시켜도 방사라인에서 냉각장치에 공정조건의 변경으로 요구되는 섬유직경의 변화가 가능하다. 즉, Perfobond 시스템의 냉각장치는 세 개의 분리구역으로 공기의 온도와 속도가 별개로 제어가 가능하여 Table 1에 제시된 조건으로 공기온도와 공기속도로 조절하면 Figure 11과 같이 섬유직경을 변화시킬 수 있다. 이는 방사과정에서 용융섬유의 연신위치를 결정화점을 임의로 조절할 수 있는 유연성을 가지고 있기 때문이다.

### 3. 멜트블로운공법의 제조기술

방사형 부직포 제조법에서 가장 극세한 섬유집합체인 멜트블로운부직포의 최근 개발동향은 기능

Table 1. 냉각영역의 공급공기의 온도와 속도

	F1		F2		F3	
	T(°C)	V(m/s)	T(°C)	V(m/s)	T(°C)	V(m/s)
Top	24	1.3	28	1.2	26	1.2
Middle	20	1.4	22	1.3	20	1.4
Bottom	16	1.5	16	1.5	12	1.6

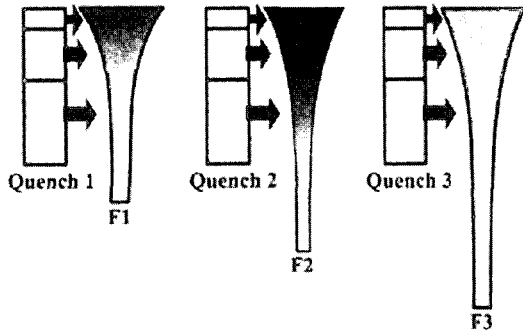


Figure 11. 냉각조건에 따른 섬유거동.

성 향상을 위한 이성분 극세방사기술, 멜트블로운 제조원리를 이용한 3차원 입체 섬유집합체 형성기술 및 환경친화적인 목적을 위한 셀룰로스 멜트블로운 제조기술이 주로 선진국에서 이루어지고 있다. 이에 대한 구체적인 내용을 살펴보면 아래와 같다.

### 3.1. 이성분 극세방사기술

멜트블로운 시스템은 일반적인 용융방사장치에 방사구 출구에 뜨거운 공기를 주입시키는 방법이 기본개념이다. 최근 일반 섬유의 방사시스템에서 기능성 향상을 위해 널리 이용되는 이성분 방사기술이 멜트블로운 시스템에 적용하는 기술이 계속적으로 개발되고 있다.

대표적인 기술은 미국 3M사로 이성분 멜트블로운 부직포 제조에 있어 극세단면을 갖는 섬유제조에서 고분자의 점도에 주안점을 두고 개발하였다. 두성분 점도가 동일한 고분자로 안정적으로 제조된 극세섬유는 두 개의 동일한 상을 갖는 층을 이룬다. 반면에 점도가 다른 두성분 고분자로 방사하면 시스/코어(sheath/core) 형태의 불안정한 구조가 발생

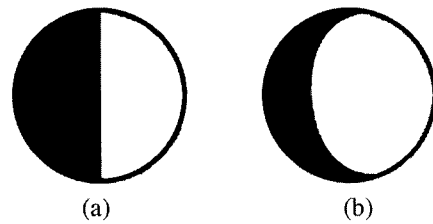
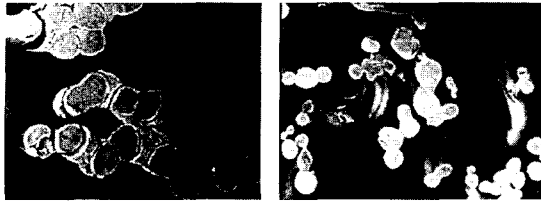


Figure 12. 이성분 멜트블로운부직포의 단면구조.

하여 층분리에 의해 멜트블로운 공정에서 좋지 못한 결과가 나타난다. 동일한 특성을 갖는 두 성분의 고분자로 제조된 섬유는 Figure 12(a)에서 보여 주듯이 두 고분자는 섬유단면을 반절씩 차지하고 동일한 형태를 가질 것이다. 그러나 이질고분자의 계면형태는 Figure 12(b)와 같이 고점도의 용융물은 저점도의 용융물을 밀어내어 감싸지는 형태로 이러한 현상은 점도의 차이가 크면 클수록 확연하고 나타날 것이다.

한편, 멜트블로운 시스템을 이용한 이성분 방사에서 제조된 섬유단면은 방사거리와 공급 공기 속도변화에 따라 신장유동은 영향을 받는다. Figure 13은 공급된 공기의 속도변화에 따른 PP/PE 섬유의 단면구조를 나타낸 것이다. 사용된 PE(0.95 g/cm<sup>3</sup>)는 PP(0.91 g/cm<sup>3</sup>)보다 고밀도이기 때문에 PE 섬유는 PP 섬유보다 더 어렵게 관찰된다. 섬유의 단면형태는 두 성분의 고분자밀도와 점도에 의존하여 섬유는 분리(side by side)형보다 좀더 해도형으로 나타난다. 구체적으로 PE는 단면형태에서 좀더 원형이고, PP는 PE를 둘러싼 초승달 형태를 보인다. 또한, 멜트블로운 시스템에서 방사구와 수집체 사이의 공기속도는 두 성분의 단면형태에 큰 영향을 미치므로 고속기류에서 섬유단면은 방사거리가 길수록 PE 주위를 둘러싼 PP가 더 넓게 분포



(a) 저속공기 (b) 고속공기

Figure 13. PP/PE 멜트블로운 부직포의 단면형상.

하게 된다.

### 3.2. 3차원 입체부직포 제조기술

최근 노스캐롤라이나주립대의 부직포연구소(NCRC)에서는 멜트블로운 기술을 응용한 로봇에 의한 섬유집합체 제어시스템(Robotics Fiber Assembly and Control System: RFACS)으로 3차원 입체구조의 부직포제조기술을 개발하였다. RFACS 기술은 멜트블로운 공법을 이용하여 종이와 같은 얇은 섬유시트 제조에 섬유이동을 로봇을 사용한 것이 특징이다. 기본원리는 용융된 고분자를 미세한 방사구를 통해 방사하고, 직경을 500 μm에서 0.1 μm까지 극세한 섬유형성을 위해 공기기류로 연신시켜, 연신된 섬유는 드럼 또는 요구되는 형태의 적층기구에 수집되어 3차원 구조의 부직포 제품이 형성된다. 이 기술개발의 목적은 3차원 구조형태의 부직포를 봉제공정이 필요없이 화학적, 생물학적 및 방사능 물질로부터 보호하는 의복과 같은 특수제품을 제조하는 것이다. 멜트블로운 기술과 로봇기술의 합

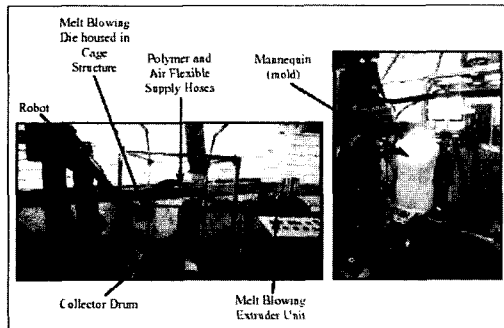


Figure 14. 멜트블로운/로봇제어시스템.

성(fusion)으로 3차원 입체형 부직포 의복을 제조하기 위한 RFACS 시스템을 Figure 14에 구체적으로 나타냈다. 개발된 시스템의 구성요소는 멜트블로운 기계와 요구되는 3차원 구조 몰드(mold)를 비롯하여, 구금의 위치와 섬유 배향을 조절하는 종·횡축을 가진 로봇으로 구성되어 있다.

### 3.3. 용액블로운(Solution Blown) 부직포 제조기술

일반적으로 폴리올레핀과 폴리에스터 부직포는 주로 멜트블로운과 스펀본드 공정에 의해 제조되고 있다. 그러나 자연친화성과 생체적합성을 갖는 셀룰로스는 섬유고분자임에도 불구하고 방사형 부직포제조에는 거의 활용되지 못했다. 이러한 원인은 용도제한성, 다단계 생산공정, 별도의 접착제 사용에 의한 높은 가격에 기인한다. 그러나, 앞으로 최종 소비자가 요구하는 셀룰로스 부직포의 특수한 기능을 위해서는 새로운 방사형 셀룰로스 부직포 제조기술의 개발이 필요하며 아래와 같은 핵심적인 기술이 선형되어야 할 것으로 판단된다.

- ① 셀룰로스 용액을 낮은 비용의 펄프로 개질하는 기술
- ② 극세한 셀룰로스 섬유웹의 자체적으로 결합 가능한 부직포 형성기술
- ③ 환경친화성, 가격 효율성 및 안정적 공급을 갖는 셀룰로스 원료개발기술

한편, 현재 상품화된 라이오셀(lyocell) 공정은 단 섬유와 필라멘트섬유는 제조 가능하지만 스펀본드와 멜트블로운 공법을 적용한 부직포 제조기술은 초기적이며 앞으로 계속적인 개발이 이루어질 것으로 판단된다. 이에 최근 실험실적으로 위예하우저(Weyerhaeuser)사에서 개발한 라이오셀 공정을 응용한 멜트블로운부직포를 소개하고자 한다.

라이오셀 공정은 환경친화적 용매인 N-methyl morpholine N-oxide(NMMO)를 사용하여 직접 셀룰로스를 용해한다. 위예하우저사는 라이오셀 공정으로 NMMO/셀룰로스 용액을 제조하고 멜트블로운 기술로는 기존의 엑손(Exxon) 공정을 사용하였

Table 2. 방사법에 따른 라이오셀 공정조건의 비교

Basic condition	DJW process	Weyerhaeuser meltblown process	Meltblown for polypropylene
Nozzle diameter(micron)	75~100	460	410
Dope throughput(g/m/h)	<0.4	~0.3-2	~1
Nozzle temperature(°C)	<110	<130	~300
Air temperature(°C)	20	<130	~300
Air pressure	None	low	High
Coagulation	Yes	Yes	No

Table 3. Weyerhaeuser사 라이오셀 멜트블로우의 공정조건

Sample	A	B	C	D
Nozzle temperature(°C)	Low	Low	High	High
Throughput/hole(g/m)	0.42	0.25	0.63	0.63
Average diameter(micron)	9.4	7.2	5.0	4.8

다. 셀룰로스 방사액은 모세관 노즐을 통해 압출되고 뜨거운 고속기류에 의해 미세직경의 섬유로 형성되고, 기존의 멜트블로우 공법과 달리 응고용액과 함께 재생 셀룰로스 섬유로 분사된다.

NMMO 방사용액으로 제조된 라이오셀부직포의 특성은 펄프의 중합도, 분자량 분포, 방사액의 유동성, 공기온도, 노즐의 형태, 섬유가공, 응고제 등에 의존한다. Table 2에 나타냈듯이 라이오셀 멜트블로우공정은 방사액이 응고욕으로 떨어지는 기계적 힘에 의해 가늘어지는 상업적인 건습식(DJW) 라이오셀 방사공정과 구분할 수 있다. 라이오셀 멜트블로우공정은 기존의 멜트블로우공정과 다른 차이점은 용액의 응고단계와 낮은 공기온도, 낮은 노즐 온도 등의 특성이 나타난다.

Table 3에 보이듯이 표백된 펄프에서 제조된 멜트블로우 라이오셀섬유의 직경은 공급량이 감소할수록, 방사액의 온도가 높을수록 직경이 가늘게 나타나며, 노즐직경과 공기압, 온도, 노즐 온도 등의 공정인자를 변화시키면 멜트블로우 라이오셀섬유의 직경을 다양하게 할 수 있는 특징을 가진다.

Figure 15는 개질된 펄프에서 제조된 멜트블로우 라이오셀섬유의 제조조건별 직경분포를 나타낸 것이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 멜트블로우 라이오셀섬유는 비교적 넓은 직경분포를 보이며, 특히 제

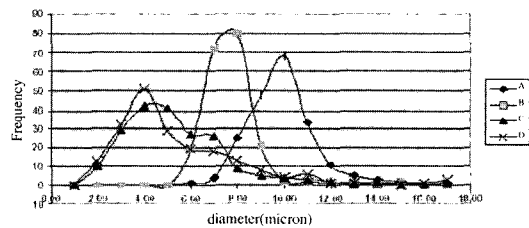


Figure 15. 라이오셀 부직포의 조건별 직경분포.

조조건 C와 D는 같은 조건에서 제조되었지만 직경분포가 다소 차이를 보인다. 이는 라이오셀 멜트블로우공정에서 방사용액과 공정조건의 불안정성에 기인하는 것으로 생각할 수 있다.

Table 4는 라이오셀섬유, 레이온섬유 및 개질된 펄프에서 제조된 멜트블로우 라이오셀섬유의 기계적 성질을 나타낸 것이다. 멜트블로우 라이오셀섬유는 상업적인 라이오셀섬유와 레이온 섬유의 중간 정도의 기계적 특성을 갖는 것으로 나타났다. 멜트블로우섬유의 기계적 특성은 공정조건과 해미셀룰로스의 함량에 의존한다. 이는 섬유가 공기기류에 의해 가늘어질 때, 완전한 섬유구조가 형성되지 않아 섬유특성은 폴리노직과 비슷하게 나타난다. 또한 멜트블로우 라이오셀섬유가 레이온 섬유에 비해 높은 습윤강도를 가지고, 라이오셀보다 높은 유연성을 나타내므로, 멜트블로우섬유가 라이오셀과 레

Table 4. 셀룰로스섬유의 특성비교

	Commercial lyocell	Meltblown lyocell	Rayon
Hemicellulose(%)	~2	~12	~2
Tenacity(cN/tex, dry)	40	20~28	20~24
Tenacity(cN/tex, wet)	33	14~24	10~15
Initial modulus(cN/tex)	800	300~700	~400
Elongation(%, dry)	14	7~20	17~25



Figure 16. 라이오셀 멜트블로우부직포의 표면구조.

이온섬유의 단점을 보완할 것으로 판단된다.

Figure 16은 멜트블로우 공정에 의해 제조된 라이오셀섬유의 구조를 나타낸 것이다. 멜트블로우 라이오셀섬유가 멜트블로우 합성섬유에 비해 높은 강도를 갖기 때문에 극세한 멜트블로우 라이오셀섬유로 구성된 부직포는 높은 밀도의 네트워크 형식으로 용도다변성, 기공선택성, 저중량을 갖는다. 상업적인 라이오셀섬유의 특성 중에서 습윤 마모조건에서 섬유의 연축이 발생하므로 라이오셀섬유의 이러한 현상은 라이오셀 부직포의 강도와 위킹(wicking)성을 증가시킨다.

Figure 17은 라이오셀 멜트블로우부직포의 특이한 구조형태를 보여준다. 부직포는 균일한 구조를 갖고, 교차점에서 섬유의 자체결합이 나타나며 부직포가 매우 기공이 많은 것으로 보인다. Table 5는 다양한 멜트블로우 공정에 의해 제조된 부직포의 기계적 특성을 종합적으로 요약한 것이다. 멜트블로우 라이오셀웹은 폴리프로필렌(PP), 폴리비닐알코올(PVA), 셀룰로스 아세테이트(CA)와 같은 일반적인 합성고분자에서 제조되는 대부분의 멜트블로우웹보다 높은 건조강도를 갖는다. 또한 습윤강도는 상업적으로 사용되는 기저귀 커버스톡의 습윤강

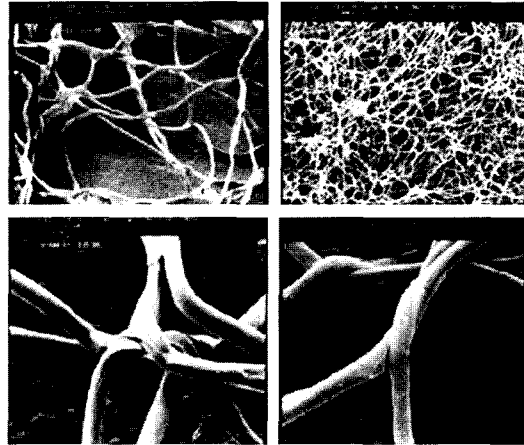


Figure 17. 라이오셀 멜트블로우부직포의 자체결합형태.

도보다 높게 나타난다. 자체 결합된 라이오셀 멜트블로우부직포는 합성고분자로 제조된 멜트블로우부직포에 비해 높은 흡수성, 염색성, 생분해성을 가지며, 린트(lint)를 발생하지 않는다.

결과적으로 위예하우저사에서 개발한 NMMO/셀룰로스 용액을 이용한 라이오셀 멜트블로우부직포의 특성은 다음과 같다.

(a) 구성섬유는 2~30  $\mu\text{m}$ 의 직경을 갖으며, 면과 비슷한 구조로 거친 표면, 크림프 형성, 불균일한 단면을 갖는다.

(b) 헤미셀룰로스 멜트블로우섬유의 전형적인 배향된 결정구조로 기계적 성질은 상업적인 라이오셀과 레이온섬유의 중간정도로 나타난다.

(d) 라이오셀 멜트블로우부직포는 높은 강도, 흡수성, 위킹(wicking), 섬유의 꼬임, 염색성을 가지며 린트가 발생하지 않으며, 중량과 강도범위가 넓게 나타난다.

#### 4. 스펀레이스공법의 제조기술

스펀레이스의 기본 원리는 워터제트를 사용하여 웹을 결합하는 방법으로 최근의 기술동향은 생산성 향상을 위해 시스템의 고성능화와 고속화 생산라인 개발하여 스펀레이스의 제조원가를 절감시키는데 초



Table 5. 멜트블로우부직포 특성에 있어 제조방법의 차이

	Weyerhaeuser nonwoven	Diaper cover stock	Asahi Nonwoven	PVA (19)	CA (19)
Materials	cellulose	PP	cellulose	PVA	CA
Bonding	Self	Self	Self	Self	Self
Basis weight(g/m <sup>2</sup> )	67.5	71.3	75.1	42.5	51.0
Strength (KN/m), dry	3.67	1.16	6.13	0.10	0.49
Strength(KN/m), wet	1.2	0.92	3.9		
Elongation(%), dry	16.3	24.5	49.9	15.8	5.5
Elongation(%), wet	43.1	25.7	55.3		
TEA(J/m <sup>2</sup> )	733.2	331.7	3179.0		

점을 두고 있다. 첨가제없이 순수한 물의 분사제트로 섬유를 결합시키는 스펀레이스부직포는 축감과 드레이프성이 직물에 가장 유사한 특징으로 부직포 업계에서는 차세대 부직포 제조기술로 상당한 관심을 갖고 있다. 특히 고압수류를 이용하기 때문에 시스템에서 에너지 비용이 크게 작용한다. 실험적으로 얻어진 스펀레이스 시스템에서 섬유웹에 작용하는 에너지는 다음 식과 같다.

$$E = 1.11 C_d D^2 N P^{1.5} / UW$$

여기서,  $E$ 는 섬유웹 작용하는 에너지,  $C_d$ 는 저항계수,  $D$ 는 제트직경,  $N$ 은 노즐밀도,  $P$ 는 공급되는 물 압력,  $U$ 는 적층 컨베이어 속도,  $W$ 는 웹의 기본중량이다. 이러한 기본적인 개념에서 스펀레이스 공법에서 생산성 향상에 근본을 둔 원가절감으로는 에너지비용을 가장 크게 고려하고, 또한 물 여과비용 및 유지비용의 최소화와 전체 공정라인의 효율성 개선으로 개발이 이루어지고 있다.

이러한 관점에서 시스템의 고성능화 기술개발로 퍼포젯(Perfojet)사는 새로운 혁신적인 스펀레이스기계를 최근에 상품화하였다. 이에 대한 핵심기술을 살펴보면 다음과 같다. 스펀레이스 시스템에서 에너지비용은 인젝터(injector)에 의해 사용된 물을 분사시키는 에너지와 관련되어 인젝터내에 작용압력을 감소시키는 것이 매우 중요하다. 실험적인 결과를 인용하면, 인젝터 내부에서 작용압력에 따른 투자비용은 인젝터, 고압력펌프, 전기모터, 변환장치, 고압력파이프 등과 관련된 장비가 포함되어 있다.

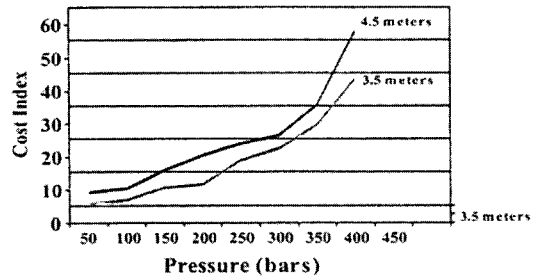


Figure 18. 스펀레이스공법에서 투자비용과 압력.

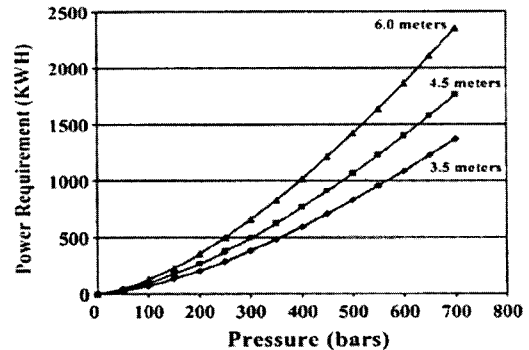


Figure 19. 스펀레이스공법에서 압력, 작업폭과 전기력 관계.

Figure 18에 나타낸 것과 같이, 투자비용은 인젝터의 압력이 증가함에 따라 2배로 증가되며, 또한, 인젝터내에 작용하는 압력증가에 비례하여 전기에너지 비용이 직접적으로 증가한다. 실례를 들면, 3.5 m 폭의 인젝터의 전력소비는 200 bar에서 155 kWh이고, 600 bar에서는 1088 kWh로 크게 변화된다 (Figure 19).

이를 개선하기 위해 퍼포젯사에서 개발된 시스템

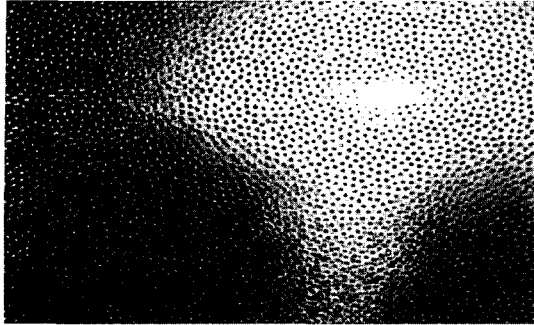


Figure 20. 미세기공 슬리브(sleeve).

은 인젝터내에 압력을 감소하고 섬유웹의 결합력을 증가시키기 위해 인젝터에서 분사된 제트의 효율성을 극대화하였다. 기존의 스펀레이스 시스템에서는 분사된 제트가 섬유웹을 통과하여 웹지지체를 때리고 바로 배수되지만, 개발된 시스템은 분사된 제트가 웹지지체에 충돌한 후 다시 뒤어 올라 웹내부에 교란작용을 발생시켜 재결합이 되도록 웹지지체의 구조를 새롭게 디자인한 것이 핵심기술이다. 새로이 개발된 퍼포젯시스템의 웹지지체는 Figure 20에 나타낸 것과 같이 전형적인 메쉬직물 대신에 미세한 구멍이 뚫린 슬리브(sleeve)를 채택하였다. 이 슬리브는 부직포 제조과정에서 발생하는 줄무늬 형성을 피하기 위해 250~300 μm의 미세구멍을 랜덤방향으로 배열하였으며, 세리그래픽(serigraphic) 니켈 실린더로 설계제작하였다.

한편, 웹지지체 실린더의 오픈면적은 95%이며 정밀하게 설계된 흡입박스가 허니콤 내부에 설치되어 있으며 이러한 구조는 흡입박스와 실린더, 그리고 슬리브 사이에 공기와 물의 누출을 막아주고, 웹의 완전한 탈수가 이루어지도록 설계된 것이 특징이다. 기존의 메쉬직물이 아닌 미세구멍을 가지는 슬리브형 지지체로 제조된 스펀레이스부직포의 강도특성은 Figure 21에 나타낸 것과 같이 기본중량 30 gsm의 폴리에스테르부직포의 경우 기존보다 인장강도가 5배정도 더 높게 나타났다.

또한, 개발된 퍼포젯시스템에서는 공정효율을 증가시키기 위해 새로운 인젝터를 도입하였으며, 기존

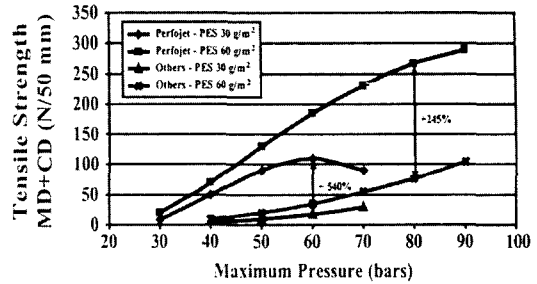


Figure 21. 퍼포젯과 기존의 스펀레이스부직포 강도.

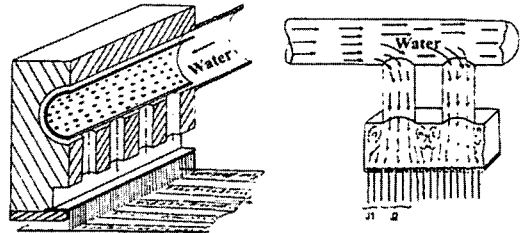


Figure 22. 드릴형(drill) 인젝터.

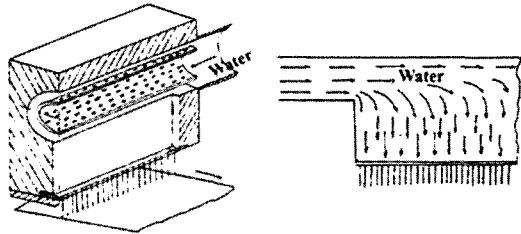


Figure 23. 슬롯(slot)형 인젝터.

인젝터와의 차이는 인젝터에서 수력에 의한 물 이동과 분배통로에 관한 기하학적인 구조이다. Figure 22에 나타낸 것과 같이 유체이동 시뮬레이션의 이론적인 결과를 보면, 인젝터 본체 부분에 구멍이 뚫여 있는 드릴(drill)형 경우 완벽한 수침을 얻기가 어렵다는 것을 보여주고 있다. 재분배 장치가 챔버내부에 설치되더라도, 구멍 뚫린 스트립 상에 물의 이동에 방해가 받아 노즐간에 압력변동이 발생된다. 예를 들어 250 bar 이상 고압에서는 침의 형태가 아니고 스프레이 형태로 분사되며 이것은 분사에너지의 일부가 주변공기에 의해 손실되는 것을 의미한다.

다.

따라서 새로이 개발된 인젝터는 Figure 23에서 보여 주듯이 구멍을 뚫지 않고 내부 본체의 폭을 따라 연속적인 미세 슬롯형으로 구성되어 있다. 또한, 인젝터 내부에 재분배 필터가 설치되고, 이는 본체내부에서 물 분배를 완전히 균일하게 하는 매우 중요한 기술로 슬롯형 인젝터의 핵심이다. 슬롯의 폭은 구멍뚫린 스트립상에 결점 발생을 최소화하기 위해 가능한 작아야 한다.

### 5. 초음파 접착시스템 기술

최근 환경적인 측면과 에너지적인 측면에서 순수한 부직포 제조와 열가소성 섬유집합체의 코팅과 라미네이팅(laminating) 가공에 초음파 기술이 널리 응용되고 있다. 초음파를 응용한 접착메카니즘은 일반적으로 전기에너지를 진동에너지로 변환시키는 컨버터에서 주파수가 높은 진동이 혼(horn)을 통해 섬유집합체 전달되면 섬유 상호간의 진동에 의한 마찰열을 발생시켜 열가소성 고분자를 접착시키는 것이다.

일반적인 초음파 접착시스템은 Figure 24에서 나타낸 것과 같이 웹이 회전하는 앤빌(anvil) 롤러에 공급되고 고정된 혼 바로 밑에서 통과하는 프런지(plunge) 방식으로 구성되어 있으며, 앤빌의 표면에는 다양한 패턴으로 디자인되어 있다. 이 방식은 앤빌의 표면속도와 웹의 이동속도가 동일할 경우 유용하며, 공급속도와 접착품질에 한계점을 가지고 있다. 구체적으로 회전하는 앤빌과 고정된 혼에 의해

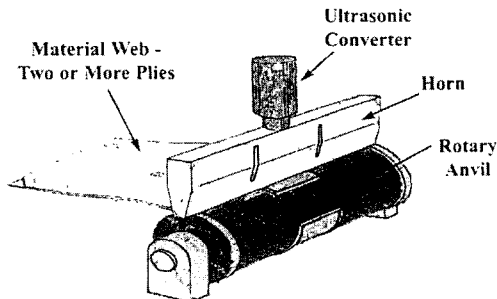


Figure 24. 전형적인 고정형 혼 시스템.

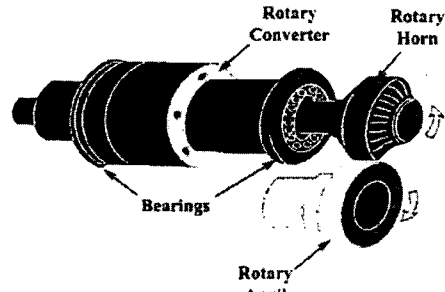


Figure 25. 회전형 혼 시스템.

형성된 좁은 틈새에서 이동웹은 주기적으로 스틱스립(stick/slip) 현상이 발생하며, 또한 고정형 혼을 사용하는 경우 웹이 혼을 통과할 때 감기는 현상(dragging)으로 고품질의 균일한 부직포 제조에 문제점이 있다.

이러한 고정형 혼의 문제점을 개선하여 새로운 회전형 혼을 미국의 소닉솔루션(Sonic Solution)사가 개발하였으며 개략적인 도식도는 Figure 25에 나타내었다. 축에 의해 회전하는 균형 잡힌 등근 혼과 회전식의 앤빌롤러의 결합구조로 구성되어있다. 기본개념은 앤빌과 혼의 표면속도를 동일하게 하여 이 속도로 웹이 이동하여 웹접착 부분에서의 스틱스립과 웹의 말리는 현상을 제거할 수 있다. 웹은 님(nip) 롤러처럼 미리 정해진 표면속도로 회전하는 원통형 표면사이로 통과한다.

개발된 회전형 혼의 속도는 웹무게와 웹의 층수(두께) 등의 재료특성에 의존하며 700~900 ft/min까지 변화시킬 수 있으며, 회전형 혼의 속도는 섬유 웹이 용융에 필요한 에너지 관계로 아래 식에 의해 표현될 수 있다.

$$E = C \times N \times I \times F$$

여기서,  $E$ 는 용융물질의 에너지흡수,  $C$ 는 비례상수,  $N$ 은 회전수,  $I$ 는 진폭,  $F$ 는 결합력이다.

구체적인 초음파시스템에서 웹의 이동거동을 살펴보면, Figure 26(a)은 고정형 혼과 앤빌의 틈새에서 웹의 압축현상을 나타낸 것으로 웹으로부터 끌

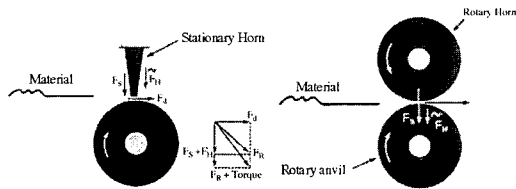


Figure 26. 고정형 혼과 회전형 혼의 기하학적 구조.

림(drag) 현상을 보여준다. 이것은 높은 생산속도에서 접착품질을 저하시키는 바람직하지 못한 slip/stick 요인을 발생시킨다. 한편, 회전형 혼에서 생산속도를 높이기 위해 개발된 핵심기술은 첫번째로, Figure 26(b)에서 보는 것처럼 회전형 혼과 앤빌의 닢(nip) 설정으로 끌림현상을 제거하는 것이다. 두번째로, 웹이 닢점을 통과하여 접착구간에서 용융과정에서 갑작스런 압축이 발생하지 않는 것이다.

또한, 생산공정에 회전형 혼시스템의 설치는 공정라인에 보조 구동장치가 설치되면 매우 용이하지만 회전식 혼은 앤빌롤러와 함께 같은 속도로 작동되기 때문에, 일반적으로 PLC로부터 각각의 모터로 구동되어야 한다. 회전형 혼장치는 수직면으로부터 외팔보 걸이와 수평면이나 지지대 위에서 수평적으로 설치되어야 하며 종래의 플런지 방식과 유사하지 않고, 회전형 혼시스템은 기계방향에 수직으로 위치해서 공정에서 웹의 이동과 같은 방향으로 회전한다.

## 6. 복합화기술의 차별화제품

부직포제품의 부가가치 창출과 최종용도의 다기능성을 위한 개발동향은 기존 부직포공법의 복합화 기술개발로 진행되고 있다. 대표적인 개발제품으로는 스펀본드, 멜트블로운, 스펀레이스 및 초음파 접착공법을 응용한 S/M/S, Evolon, Miratec 부직포를 열거할 수 있다. 또한, 제조된 부직포제품의 부가가치의 창출을 위해 부가적인 기능부여가 가능한 코팅기술과 라미네이팅 기술이 큰 비중을 두고 개발되고 있다. 대표적인 기술은 색상변화재료, 열감지

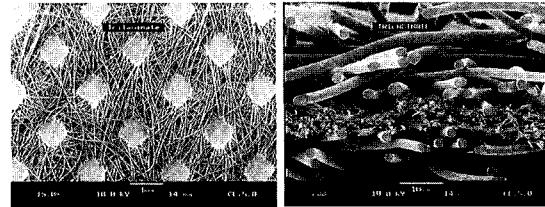


Figure 27. S/M/S 삼층부직포의 표면과 단면구조.

재료, 상변화재료, 형상기억재료 등의 특수기능을 가진 고분자층을 직물에 코팅하는 지능형(smart) 섬유제품의 개발기술이 확대되고 있다. 한편, 선진국에서는 직물표면에 기능세라믹 코팅과 생분해수지 코팅은 현재 널리 사용되는 기술이다.

### 6.1. S/M/S(UlotraFlo®)

폴리프로필렌섬유를 사용하여 삼층구조의 여과부직포(UlotraFlo®) 제품은 액체와 기체의 뛰어난 여과효율을 가진다. Figure 27에서 보여 주듯이 UlotraFlo는 표면층은 스펀본드공법으로 내부층은 멜트블로운공법으로 제조된 삼층구조의 복합부직포이다. 이 부직포의 특성으로 표면층인 스펀본드는 강도와 형태안정성을 부여하며, 내부층의 멜트블로운은 여과 특성을 향상시키는 부분이다. 또한, 폴리프로필렌으로 구성된 표면층은 절단에 의한 울 끌림현상을 최소화하여 변부 안정성을 갖고, 다층구조로 뛰어난 부직포의 균일성을 갖는다.

### 6.2. 자동차용 차별화 부직포

자동차산업은 에너지 절감을 위한 몸체의 경량화와 수요자의 생활수준 향상으로 더욱더 쾌적한 실내환경 요구로 이에 대한 고기능성의 부직포제품의 수요는 계속 증가되는 추세이다. 현재 자동차의 부품 및 소재로 부직포가 사용되는 분야는 천정재, 선바이저, 트림, 카시트, 카펫트, 헤드라이어, 백킹시스템, 트렁크, 엔진 후드라이너, 내열장벽, 강화도어패널 등으로 광범위하다.

세계 선두그룹의 부직포 제조회사는 자동차 시장에 부직포 용도전개를 위해 많은 연구비를 투자하

Table 6. 자동차용 차별화된 부직포제품

개발회사	Miratec® Polymer Group	Evolon® Freudenberg	Panotex® Lantor
원천기술	3차원 입체디자인 Apex기술	극세섬유방사기술 특수공정 저중량부직포 웹균제도 조절	산화아크릴섬유
부직포 특성	고내구성 자동차 표면직물에 적합 제편성물과 동일성능 제트염색 가능	고강도/고신도, 저중량 Barrier성 자동차 표면직물에 적합 전형적인 염색공정가능	내화염성과 열반사성 용융, 수축 및 재가 없음 저중량 열차단성 다른섬유와 혼섬성
부직포 핵심기술	카딩기술, 스핀레이스공법 레이저본딩기술	이성분 용융방사기술, 스핀레이스공법	니들펀칭, 스핀레이스, 습식법

Table 7. 단섬유와 스펠본드부직포의 물성비교

특 성	단섬유(Staple fiber)	스핀본드(Spunbond)
섬유장	38~96 mm	필라멘트
섬유형상	크립프형성	직선형
포에서의 섬유배향	이방성(기계방향)	등방성(랜덤)
생산가능한 섬도	0.8~50 dtex	0.5~10 dtex
섬유형성고분자	대부분가능	열가소성고분자

여 집중적으로 기술개발을 수행하고 있다. 최근에 기존의 부직포제조 공법을 복합화하여 차세대 부직포로 직편물 대체까지 가능한 상품을 자동차 용도로 소개하고자 한다.

Table 6은 현재 세계시장에서 자동차 부품으로 사용되는 첨단부직포의 특성을 나타내었다. 대표적인 제품은 미국 피지이(PGI)사의 미라텍(Miratec)과 독일 플로이텐베르그(Freudenberg)사의 에블론(Evolon)이다. 이들의 제조공법은 스펠본드와 스펠레이스를 복합하는 기술을 기본으로 하여 후가공으로 기능과 성능을 향상시킨 것이다. 미라텍 제품은 에펙스(Apex)의 생산라인에 레이저(laser) 접착기술과 잉크젯(ink-jet) 염색기술을 접목시킨 것으로 입체형 구조로 소비자 요구에 따라 맞춤형의 제품생산이 가능하여 자동차 뿐만 아니라 모든 분야에 용도전개가 예상된다. 제품소개 책자에 의하면 앞으로 군사용, 병원용, 방사능 물질취급자 등의 특수용도의 의복에 상품화를 준비하고 있다.

한편, 에블론 제품은 앞에서 언급한 초극세가 가능한 분할형 스펠본드공법으로 웹을 제조하여 고압의 스펠레이스공법으로 섬유분할 및 결합시킨 것으로 축감이 탁월하고 초고밀도의 부직포제품이다. 구체적인 에블론의 특성과 용도전개는 아래와 같다.

### 6.3. 차세대 부직포(Evolon) 제품

차세대 부직포로 독일의 플로이텐베르그사에서 개발한 에블론부직포는 0.09~0.13dtex의 섬도를 갖는 초극세 필라멘트로 용융방사법으로 제조된다. 단일방사법을 이용한 초극세 섬유의 제조는 기술상의 제한점이 있으나, 스펠본드공법에서는 1 dtex 이상의 섬도를 갖는 복합사와 해도사를 용매와 알카리가공 또는 고수압젯을 이용한 분할형 초극세섬유의 제조는 가능하다.

한편, 단섬유부직포와 스펠본드부직포의 구조상의 주요 차이점을 Table 7에 나타내었다. 이를 살펴보면, 단섬유부직포는 소면되고, 꼬임이 부여되어,

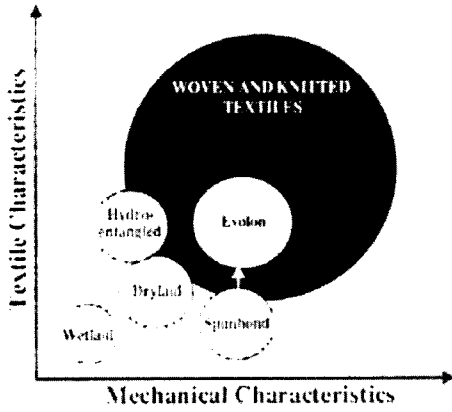


Figure 28. 부직포와 직물의 특성비교

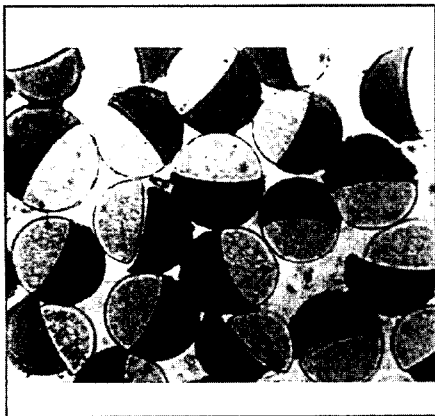


Figure 29. 이성분 섬유구조(분리형).



16-Segment Pie Fiers      Hollow Pie Fibers

Figure 30. 이성분 섬유구조(분할형).

기계방향으로 배열된 이방성질을 갖는다. 반면에 스펀본드부직포는 꼬임이 없는 필라멘트가 다소 등방성질을 갖는 섬유배열을 나타낸다. 이에 따른 이들

부직포의 특성은 스펀본드부직포가 전반적으로 단섬유부직포보다 강도가 우수하게 나타난다.

Figure 28은 에블론부직포와 단일공법으로 제조된 부직포의 기계적 특성과 직물특성을 비교하여 나타낸 것으로 에블론부직포가 직물과 니트에 유사한 특성을 나타내고 있다. 에블론부직포의 직물과 유사한 특성은 열적인 후처리 공정으로 급냉과 공기력에 의한 연신과정에서 꼬임이 형성되며, 부직포 구성섬유의 극세화 때문에 발현가능하다. 이러한 특성을 나타내기 위해 나선형의 꼬임은 분리형 복합섬유(Figure 29) 또는 시스코어 구조를 갖는 섬유에서 형성되고, 초극세섬유는 다중분할시스템을 사용하여 제조된다. Figure 30에 나타낸 16 분할하는 중공섬유보다 뛰어난 방사성을 가지며, 중공섬유는 수압에 의한 분할성이 뛰어난 특성을 갖는다.

한편, 에블론부직포는 기능성 첨가제를 사용하여 친수성, 대전방지성을 부여하며, 기계적 강도는 고분자의 종류, 복합섬유의 결합력, 분할수에 의존한다. Figure 31은 부직포의 고압유체로 분할된 후 인장강도와 인열강도를 나타낸 것으로, 처리된 시험조건 중 8 분할섬유가 가장 큰 인장강도와 인열강도를 나타냈다. 만약, 일반 폴리에스테르 섬유가 저필링 형태로 대체된다면 인장강도는 급격히 감소되고 인열강도는 다소 감소된다.

또한, 염색에 따른 분할섬유로 제조된 부직포의 인장강도를 Figure 32에 염색농도에 따라 세부적으로 나타내었다. 2~4% 농도의 청색염료에 의해 염색된 부직포는 고압유체로 분할 후의 강도변화는 미약하였다. 그러나, 검정염료(4%)로 염색한 후 인장강도는 청색염료보다 심한 감소를 보인다. 대체적으로 인장강도에 염색농도의 영향은 매우 미약하였다. 한편, 니들펀칭 분할부직포와 스펀레이스 분할부직포의 염색농도의 영향을 나타내었다. 스펀레이스 분할에 의한 에블론부직포는 모든 조건에서 인장강도의 변화는 그리 크지 않다.

에블론부직포의 개발단계의 용도는 내구성과 반

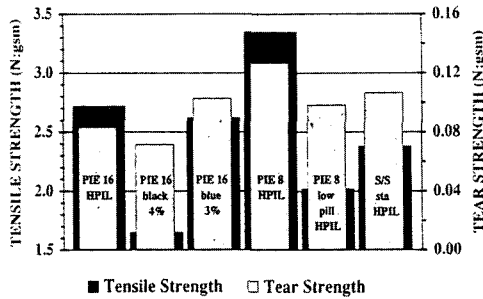


Figure 31. 인장과 인열강도.

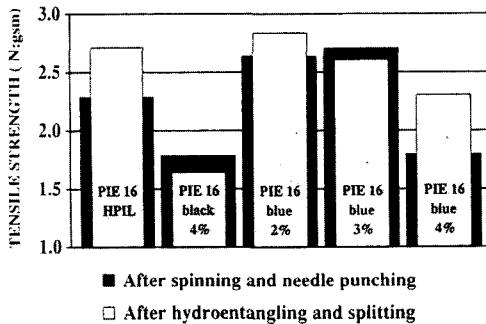


Figure 32. 도프(dope)염색후 인장강도.

내구성을 가지는 고중량 부직포의 최종용도에 초점을 두었지만 현재는 위생산업과 의료산업에 적용을 위한 생산에 중점을 두고 있다. 앞으로 활용분야를 세부적으로 살펴보면 의료용 석고와 상처용 붕대를 위한 단단한 성질의 기질과 신장과 점성특성을 가지는 기질로 사용되고, 위생용품의 저중량의 공극이 아주 큰 탑시트(top sheet)에 사용될 것이다.

### 7. 맺음말

이상과 같이 부직포기술의 선진국 개발동향을 살펴본 결과, 부직포 제조공법의 하드웨어는 제품의 원가절감과 시스템의 성능 향상을 위해 고속화와 정밀자동화 방향으로 기술이 꾸준히 개발되고 있다. 한편, 부가가치 창출과 용도 다변화를 위해 앞으로 부직포 제품의 생산은 기존에 제조공법의 장점을 극대화하여 이들의 복합화 기술로 전개될 것으로 판단된다. 이와 더불어 보다 부직포 제품의 다기능

성을 부여하기 위해서는 색변화재료, 열감지재료, 상변화재료, 형상기억재료 등의 특수기능을 가진 고분자층의 코팅 및 라미네이팅의 후가공기술의 개발이 확대될 것이다. 끝으로 국내 부직포 산업이 수출경쟁력이 있는 고부가가치 제품개발을 위한 앞으로의 방향은 최종제품의 다기능성에 초점을 맞추어 기술혁신이 이루어져야 할 것으로 생각한다. 이는 현재 보유한 부직포기술의 복합화와 신산업에서 파생된 신기술의 융합화에 덧붙여 코팅 및 라미네이팅 등의 후가공 기술이 접목되는 기술의 합성화(integration)시스템이 필요할 것이다. 정부차원의 재정적인 지원과 산업체, 학계, 연구소의 긴밀한 협조체제로 이러한 시스템이 구축되면, 부직포는 앞으로 전개될 신산업에 핵심부품소재로 잠재력이 매우 큰 산업으로 무한히 성장할 것으로 생각된다.

### 참고문헌

1. V. Bansal and R. L. Shambaugh, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **37**(5), pp.1799-1806(1998).
2. V. Bansal and R. L. Shambaugh, *Tappi Journal*, **81**(3), pp.199-201(1998).
3. R. L. Shambaugh and R. Chhabra, "Tappi Nonwovens Conference", pp.107-113, 1998.
4. R. Chhabra and R. L. Shambaugh, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35**(11), pp.4366-4374(1996).
5. R. R. Bresee and Z. Yan, *J. Text. Inst.*, **89**(1), pp.304-319(1998).
6. B. C. Goswami "Manufactured Fiber Technology"(V. B. Gupta and V. K. Kothari Eds.), Chapman & Hall, London, 1997.
7. Q. Sun and D. Zhang, *J. Appl. Polym. Sci.*, **67**, pp.193-200(1998).
8. Y. D. Ju and R. L. Shambaugh, *Polym. Eng. & Sci.*, **34**(12), pp.958-964(1994).
9. R. O. S. Prasad and P. W. Runstadler, "Proceeding of the INTC Conference", pp. 13-16, TX, USA, pp.13-16, 2000.
10. S. R. Mathur and J. Y. Murthy, *Numerical Heat Transfer*, **31**, pp.195-216(1997).
11. H. Yin, Z. Yan, W. Ko, and R. Bresee, *International Nonwovens Journal*, **9**, pp.25-28(2000).
12. Z. Mao and B. C. Goswami, *International Nonwovens Journal*, **10**(3), pp.38-47(2001).
13. R. Farer, Ph. D. Thesis, NC State University, 1999.

14. B. Pourdeyhimi and R. Ramanathan, *Textile Res. J.*, **66**(11), pp.713-722(1996).
15. O. Jirsak, T. G. Sadikoglu, B. Ozipek, and N. Pan, *Textile Res. J.*, **70**(2), pp.121-128(2000).
16. M. W. Milligan, *U.S. Patent*, 6,099,282(2000).
17. P. P. Tsai, *International Nonwovens Journal*, **8**(4), pp.36-40(1999).
18. J. S. Canaday and K. D. Brown, Presented at the Polyurethanes Technical Conference, Boston, MA, October 8-11, 2000.
19. J. P. Ersparmer, S. C. Baer, and L. Li, Index 99 Congress Papers, Geneva, 1999.
20. C. T. J. Dodson and W. W. Sampson, *Simulation J.*, **74**(6), pp.351-358(2000).
21. J. Meng, A. M. Seyam, and S. K. Batra, *Text. Res. J.*, **69**(2), pp.90-96(1999).
22. A. M. Seyam, A. El-Sheik, and J. Meng, *Text. Res. J.*, **69**(3), pp.155-161(1999).

약 력



주 창 환

한양대학교 공과대학 섬유공학과 졸업  
University of Massachusetts (MS)  
North Carolina State University(Ph.D)  
1994. 7-현재. 한국부직포연구회(KONORA)  
회장  
1989. 4-현재. 산업자원부 공업기반기술개발  
평가위원(산자부)  
현재. 충남대학교 섬유공학과 교수  
(305-764) 대전시 유성구 궁동 220번지  
전화: (042)821-6619, Fax: (042)822-0822  
e-mail: changjoo@cnu.ac.kr