

산업용 필터의 설계 기술 개발 동향

김주용 · 김기태

승실대학교 섬유공학과

1. 서 론

필터(filter)란 한 물질을 다른 물질로부터 분리하는 장치로서 일반적으로 고체 - 기체 분리, 고체 - 액체 분리, 액체 - 액체 분리, 고체 - 고체 분리 등에 사용된다. 산업용 필터는 원자력 발전소의 여과응용, 생의학 분야에서 박테리아 분리, 식품공학 분야에서 제품에 필요치 않은 효모(yeast)나 미세 유기물 제거 부문, 반도체나 전자산업 관련분야와 광학, 정밀기기, 의료·의약, 생물공학·식품관련 등의 첨단 기술에 있어 클린룸 같은 청정화부문, 반도체 및 액정 세조 장치등 전판 산업분야에 있어서 불순물이 없는 순수(純粹, pure) 부품 제조부문, 반도체 분야에서 세척을 위해 그리고 전자 산업과 관련해서는 칼라 액정을 대형화 하는데 필요한 초순수(超純水)¹⁾ 제조 부문, HDTV와 OA기기 등에서 요구하는 박막화(薄膜化) 대형화(大型化) 경향을 만족시키기 위한 정밀여과 부문, 바이오테크놀로지 분야에서는 한외여과(限外濾過, ultrafiltration)²⁾ 등에서 그 용도가 확대되고 있다.

또한 무분별한 산업화의 진행으로 인해 발생하는 환경오염을 줄이기 위해 기후변화협약, 교토의정서 등 점차 환경정책이 점차 강화되어감에 따라 제조과정 뿐만 아니라 제조 중 발생하는 환경오염 물질에 대한 여과 및 수집 부문이 발생하였으며, 유출된 석유의 처리, 해수담수화장치, 화학무기에 대한 방

독대책 등 환경오염 예방 및 환경오염으로부터의 보호 등의 분야에서도 산업용 필터의 용도가 확대되고 있다.

과거에 필터의 재료는 고분자와 섬유가 주를 이루어 입자포집이나 여과 기능만 가능했다. 근래에는 고내열성 부여를 위해 세라믹이나 금속과 함께 복합화 하거나 유해성분 제거를 수행하기 위해 촉매를 고착시키는 등 다양한 기술을 이용하여 소비자의 요구인 고도화, 다양화에 대응하여 적극적으로 진행되고 있다.

본고에서는 산업용 필터제조방법 및 종류와 특성, 그리고 국내외 활용 현황을 중심으로 간략하게 정리함으로써 관련 산업에 종사하거나 이 분야를 연구하는 연구자들에게 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 필터의 분류

필터는 여과 방법에 따라 건식 여과와 습식 여과로 분류하고, 용도에 따라 크게 백 필터(bag filter), 에어 필터(air filter), 액체 필터로 나누며, 여과효율에 따라서는 Prefilter, Medium Filter, HEPA(High Efficiency Particulate Arrestance) Filter, ULPA(Ultra Low Penetration Air) Filter로 나뉜다.

건식 여과의 대상 유체(流體)는 기체이고 습식여과는 액체로 Table 1에 여과방법에 의한 분류, Table 2에 여과효율에 따른 분류, Table 3에 필터 형태에 따른 분류를 보였으며, Fig. 1에 필터 유니트의 상호 연관성을 보였다.

필터의 여과재로 널리 사용되는 부직포의 생산기술은 Barb needle로 섬유를 교차시켜 부직포를 제조하는 Needle Punching, 방사과정에서 곧장 부직포를 제조하는 Spun Bonding, Needle Punching과 같은 원리이지만 Barb needle 대신

1) 불순물이 거의 없이 순수한 H₂O에 가까운 물로 전기저항이 18MΩ/cm인 물이다. 역침투, 이온교환수지 등을 이용하여 제조. 전기적 극성이 없는 초순수로 세척하면 반도체의 표면 정전기를 방지할 수 있다.

2) 0.1~1MPa의 저압에서 기공사이즈가 10-1000 Å의 기공크기를 갖는 분리 막이 300-500,000dalton 정도의 분자량을 갖는 매크로분자나 미세한 콜로이드 현탁액(colloidal suspension) 등의 어떠한 상변화나 질량 이동 없이 정화하거나 농도 조절 또는 분류하는 공정으로서, 식품, 제약, 낙농, 그리고 의학 산업 분야에서 이용되고 있다.

물을 사용하는 Spunlace, 방사 중 고온, 고압, 고속의 공기를 이용해 세섬유(細纖維)를 뿌려 부직포를 만드는 Melt Blown, Binder를 사용해 섬유를 결합시키는 Chemical Bonding, 고온, 고압의 롤러로 합성섬유 웹을 처리하여 부직포를 제조하는 Thermal Bonding(열융착법)등이 있다. 그러나 모든 생산 방법이 필터의 여과재로 사용할 수 있는 여과효율이 좋은 부직포를 생산할 수는 없으며, 주로 Needle Punching, Spun Bonding, Spunlace, Melt Blown이 사용된다.

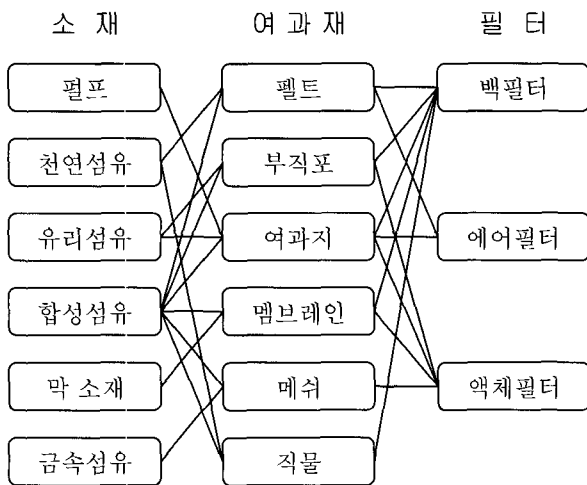


Fig. 1. Filter unit의 상호 연관성.

Table 1. Filter의 여과방법에 의한 분류

건식 여과	공조용 air filter	
	HEPA/ULPA filter	
	가전용 air filter	
	가스크 (방진, 의료용, 크린룸용)	
습식 건식 여과	자동차용 filter	엔진 순환 (air cleaner, oil filter)
		차 실내 filter (공기 청정기)
습식 여과	카트리지 filter	표면 여과 타입
		심층 여과 타입
	Filter bag	

Table 2. 여과효율에 따른 필터 분류

	Prefilter	Medium Filter	HEPA Filter	ULPA Filter
Range of Particle Size(μm)	≥ 5	≥ 1	≥ 0.3	≥ 0.1
Pressure Drop (mmH ₂ O)	5~15	10~20	12.5 ~ 25.4	19~35
Efficiency* (%)	40~80	30~80	≥ 99.97	≥ 99.999
Operating Air Velocity (cm/sec)	100~250	lower than prefilter	1~6	1~6

* prefilter, Medium Filter, HEPA Filter : 직경이 0.3μm인 미립자에 대한 포집효율
 ULPA Filter : 직경이 0.1μm인 미립자에 대한 포집효율
 percentage는 중량법에 의한 값

Table 3. 필터 형태에 따른 분류

종류	특징
Pad Filter	Frame이나 Panel에 사용 후 폐기하는 필터 ex) 직물 필터, 부직포 필터 등
Panel Filter	사용 후 폐기나 세정 가능한 필터 ex) 발포폴리우레탄, 강철 mesh 등
Viscous Panel Filter	스크린, 기름먹인 여재, 겔(gel)을 입힌 섬유 등으로 제작한 필터
Roll Filter	자동적으로 "Clean Roll"에서 "Dirty Roll"로 공급되는 섬유여재를 갖는 필터
Bag Filter	통상 높은 먼지 보유능력과 고효율 포집을 위해 여과 표면과 여과 깊이를 확장 해 Bag이나 Pocket형태로 제조한 필터
Electrical dust collector	건식이나 주기적으로 세정하는 집진판(集塵版)을 갖는 필터

2.2. 필터 생산기술

2.2.1 Needle Punching

Needle Punching은 웹을 기계적으로 결합하는 방법의 하나로써 부직포가 생기기 이전부터 펄트의 제조에 사용되었던 방법이다. Needle Punching 부직포는 카드기(Carding machine) 또는 에어레이(Air-Laid)법에 의해 형성된 웹(web)을 Needle Loom을 통과시킬 때 Barb needle이 붙은 침판을 상하 반복운동시켜 2차원적인 랜덤한 섬유배열의 일부를 3차원적인 랜덤구조로 결합시키는 것이다. Needle Loom을 통과하는 웹은 니들(Needle)에 붙어있는 바브(Barb)에 걸려 이동하게 된다. 니들이 한번 왕복하는 사이에 웹은 스트리퍼 플레이트(Stripper Plate)와 베드 플레이트(Bed Plate) 사이에 끼어 정지된다. 니들의 편칭속도가 빠르므로 한편으로 보기에는 웹은 연속해서 흘러가고 있는 것 같지만 실제로 니들의 관통 시 정지해 있다. 니들편치의 동작도 상, 하 또는 상하양방향, 타원방향 등 여러 종류가 있다.

Needle Punching은 국내에서 업체 수와 생산규모 그리고 용도의 다양성면에서 가장 범위가 넓고 큰 실적을 갖고 있다. 최근 시설합리화를 통해서 다양한 섬유 원료를 활용할 수 있으며, 정밀하고 높은 생산성을 지닌 고속편칭기의 도입을 통해서 산업자재용 부직포를 생산하고 있다. Needle Punching 부직포는 주로 자동차 내장재와 토목용으로 사용되어 왔다. 그러나 최근 들어 카페트(Carpet), 필터(Filter) 분야 등으로 용도를 넓혀가고 있다. 미국에는 Needle Punching 부직포를 생산하는 업체가 250여 개 정도이며, 일본은 30여개에 달한다. 미국의 주요한 생산업자는 Amoco®, Exxon®, Du-Pont®, Foss®, Philips®, Hoechst Celanese® 등을 들 수 있다.

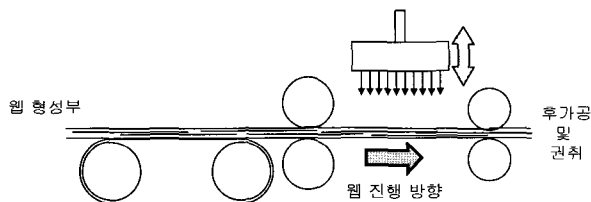


Fig. 2. Needle punching의 개요.

2.2.2 Spun Bonding

Spun Bonding법은 방사되는 Filament를 곧바로 사용하기 때문에 장섬유 부직포라고 한다.

Spun Bonding법의 특징은 방사공정 - 연신공정 -

개섬공정 - 포집공정으로 이어지는 연속 공정을 통해 섬유의 형성, 웹의 형성 그리고 웹의 결합이 동시에 일어나는 것이다. 방사공정에서는 용융된 고분자를 노즐을 통해 대기 중에 방출하여 Filament를 만든다. 연신공정에서는 방사된 Filament를 속도가 다른 롤러나 기류(氣流)를 통해 최소 4배의 연신을 가하여 Spun Bonding 부직포에 적합하도록 Filament를 가공한다. 개섬공정에서는 정전기대전법, 충돌판법, 기류확산법 등을 이용해 필라멘트를 분산시킨다. 포집과정에서는 흡입기(Suction)를 이용하여 공기 투과성 Screen Conveyer Belt 위 또는 Screen Drum 위에 개섬한 필라멘트를 포집함으로써 랜덤하고 넓은 Sheet 상의 웹을 형성한다.

스펀본드법은 국내외적으로 성장률이 높고 또 관심이 집중되고 있는 부직포 제조분야로서 대량생산이 가능하고 산업 및 의류분야에 걸쳐 폭넓은 활용범위를 가진 것은 스펀본드 제조방식이라고 해도 과언이 아니다. 다만 제조 방법의 특성상 대규모 시설비가 투입되기 때문에 주로 자본과 영업망을 구축하기 쉬운 대기업들이 스펀본드 부직포 생산분야에 참여하고 있다. 국내의 스펀본드 관련 설비는 총 13개의 생산라인이 도입되어 있으며 생산량도 상승세를 유지하고 있다.

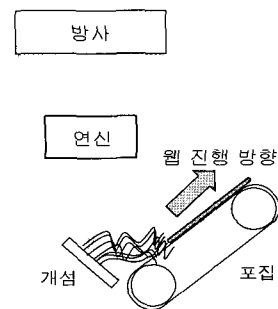


Fig. 3. Spunbond의 개요.

2.2.3 Spunlace

Spunlace법의 원리는 Needle Punching과 같으나 Barb Needle 대신 제트수류(Jet 水流)를 웹에 분사하여 섬유를 결합하는 방식이다. 이 방법은 설비투자액에 따른 부담이 크지만 대량생산이 가능하고, 접착제를 사용하지 않기 때문에 제품의 드레이프성, 흡수성, 벌키성(Bulky) 등이 우수하다는 장점을 갖는다. 반면에 제트수류로 사용되는 물에 오염물질이 첨가되지 않도록 수질관리에 많은 주의를 기울여야 한다는 단점을 갖고 있다.

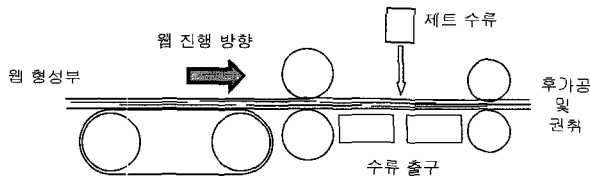


Fig. 4. Spunlace의 개요.

2.2.4 Melt Blown

Melt Blown법은 최근 필터 제조에 가장 각광을 받는 방법으로 열가소성수지를 용융하여 필라멘트 섬유를 제조 할 때 고속, 고압(음속 0.5~0.8) 고온(204~371℃)의 공기로 필라멘트에 충격을 주어 분해(Fig. 5 ①)하고 실온의 공기를 주입(Fig. 5 ③)하여 직경이 0.1~500μm인 다양한 굵기의 섬유를 얻을 수 있으며, 고압의 공기가 일으키는 난기류(亂氣流)가 섬유의 배향을 랜덤하게 할 뿐 아니라 교차도 시키기 때문에 효과적으로 등방성(Isotropic Formation)의 웹을 구성할 수 있다.

또한, Melt Blown은 공정변수에 변화를 주는 것이 용이하고 공정 조작성이 용이하나 Melt Blown 부직포가 공정변수에 영향을 많이 받으므로 훈련된 작업자가 필요하다. 공정변수는 크게 제조공정인자, 방사기의 구조인자, 원료변수로 분류할 수 있다. 제조공정인자는 공급고분자량, 방사온도, 공기량과 속도, 공기온도, 노즐과 수집체간의 거리 및 냉각부분의 설계 등이다. 방사기의 구조인자는 노즐 직경과 기하학적 구조, 열풍이 흐르는 관의 직경과 각도, 웹의 수집형태 등이 있으며, 대부분 방사기의 구조인자는 일정하다. 원료변수는 고분자 형태, 분자량, 분자량 분포, 첨가제 등이 있다.

Melt Blown 부직포는 연간 10~12% 정도의 성장을 보였으며 대부분의 용도는 부직포 내의 섬유표면적이 크기 때문에 여과재, 절연재 및 오일 흡착재 등으로 많이 사용된다. 특히 섬유의 표면적이 큰 미세섬유 구조특성으로 고도의 필터성능과 촉감과 보온성이 요구되는데 널리 이용된다. 특히 수많은 초극세 섬유로 이루어진 Melt Blown 부직포는 공기 유동의 차단효과를 갖는다. 이는 공기의 대류현상에 의한 열전달을 방지하고, 이를 이용해 만든 제품이 3M®의 Thinsulate™이다.

Kimberly-clark®가 세계수요량의 반을 생산하며 나머지 부분은 세계 60개 정도의 회사에서 생산하고 있다. 대표적인 기업은 일본의 육화성(旭化成)®, 도레이®, 가네보®, 동연®, 유니티카®, 쿠라

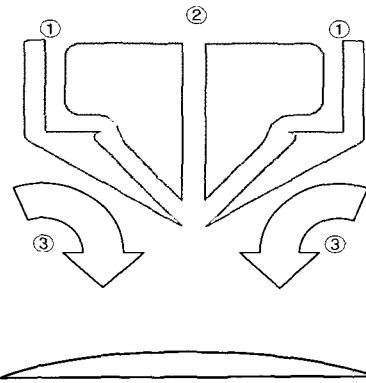


Fig. 6. Melt Blown의 개요.
① Hot air, ② Melten polymer, ③ Cool air

레이® 등이 있다.

2.3. 특수용도 필터

2.3.1 활성탄 필터(Active Carbon Filter)

활성탄필터는 흠(Fume)³⁾이나 냄새 제거용으로 설계되었다. 공기층의 유해한 흠은 0.1~10μm의 크기를 갖으며, 호흡기계, 신장과 비뇨기계암, 생식장애, 심혈 및 위장 등에 치명적인 영향을 미친다. 이러한 흠 가스를 처리하기 위한 가장 일반적인 응용에는 사무실, 공항, 병원 및 극장 등이며 솔벤트 증기, 유독 오염물질이나 여러 산업분야, 화학 및 상업적 환경에서 위법의 원인이 되는 냄새를 제거하기 위해 응용된다. 활성탄 패널은 최후의 점의 형태인 "Carbon Biscuit"로 접착, 고정된 탄소 알갱이나 필터 하우징 내에 패널이나 유니트가 있는 금속프레임에 싸여진 형태로 구성된다. 이 하우징은 활성탄 패널 필터를 보호하기 위한 전처리 필터와 함께 전면이나 측면보호용으로 설계될 수 있다. 느슨하게 채운 입자화된 활성탄은 주로 여재길이가 1m에 이르도록 요구되는 큰 여과두께를 갖는 필터에 가장 적절하다. 낮은 여과두께와 느슨히 채운 필터는 활성탄 여재를 우회통과 하거나 소재 내에 머무르는 경향과 활성탄 그 자체가 탄소분진 형태로 되거나 공기흐름 속으로 날라가는 경향으로 인해 낮은 효율을 발휘함을 알 수 있다. 느슨히 채워진 필터시스템은 거의 항상 여과두께가 큰 필터가 요구되는 공업 프로세스와 같은 높은 오염상태의 기기에 사용하도록 규정되어 있다. 중요한 진전은 아황산가

3) 용접시 발생하는 금속증기가 공기 중에서 냉각, 고화되어 공기 중에 부유하고 있는 금속산화물 입자

스나 황화수소와 같은 특수한 무기성 분자를 중화하거나 여과하도록 화학적으로 주입된 미립형 활성탄의 개발이다. 작업환경에서의 휘발성 유기물(VOC)에 대한 관심이 증가하고 있어 활성탄 필터 시장이 크게 확대될 것으로 예상된다.

2.3.2 해염제거 필터(海鹽除去 Filter)

해염입자의 발생은 해수가 파도나 바람의 접촉이나 방파제와의 충돌 그리고 해수 중의 기포가 파열되어 해수입자가 되며 그중 입경이 $100\mu\text{m}$ 이상인 것은 낙하되고 이하인 것은 부유 중 건조되어 크기가 $0.2\sim 30\mu\text{m}$ 인 해염입자가 된다. 해염입자를 포함한 공기를 그대로 도입하면 공조용 기기인 덕트(Duct)나 챔버(Chamber) 등을 부식시키는 물론 공장 등에서는 생산품의 품질 저하나 신뢰성, 생산성 저하 등 문제가 발생한다. 일반적인 Medium Filter를 사용하여 일반 건물에서는 해염입자를 포집할 수 있으나, 습도가 높아지면 녹아서 액체로 된다. Glass Fiber와 같은 치밀한 여재는 이러한 액체가 침투하여 유출 측으로 이동되며 습도가 내려갔을 때 건조되어 다시 해염입자가 되어 재비산되는데 Glass Fiber를 2중구조의 필터로 제작하여 재비산을 방지한다.

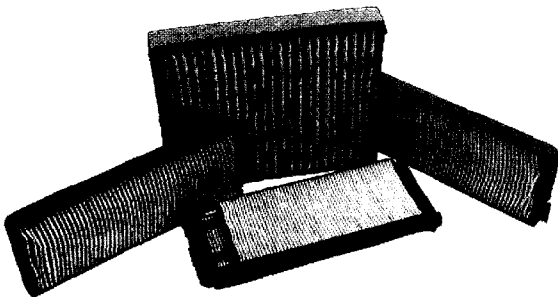


Fig. 6. 활성탄 필터.

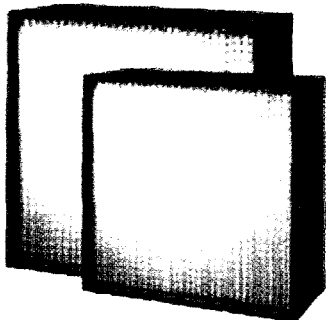


Fig. 7. 해염제거필터(한국캠브리지필터).

2.3.3 자동재생 필터

분진농도가 높거나 처리 풍량이 대단히 커서 필터의 개수가 많을 경우는 보수 관리의 인원과 시간 및 재료의 비용이 상상 이상으로 많아지고 더럽혀진 여과재의 폐기처리도 특수소각 해야 하는 등의 문제가 대두되어 보수 관리의 경제화가 매우 필요하게 되었다. 자동재생필터는 패널필터에 진공청소기를 조합하여 분진을 진공청소기로 자동적으로 흡입 재생하는 새로운 타입의 에어필터이며 이 시스템은 주로 지하철 역사 내/외기 도입부에 설치하여 공조기나 각종 장비에 청정공기를 공급하는 역할을 한다.

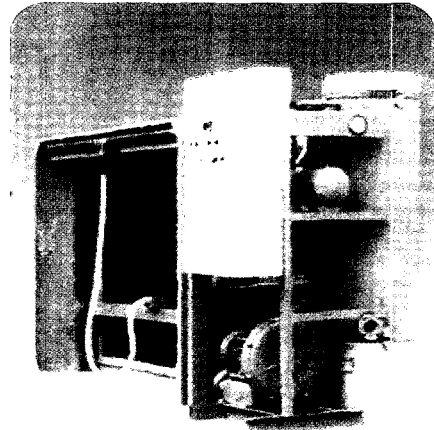


Fig. 8. 자동재생 필터(한국캠브리지필터).

2.3.4 정전필터

기계적 포집원리를 이용해 포집할 경우 섬유를 가늘게 하고 sheet는 두껍게 균일성을 향상 시키는 등의 방법이 있으나 압력손실을 상승시키게 된다. 정전필터는 지금까지의 기계적 포집에 전기적 포집을 가하여 이 문제를 해결한 것이다. 대전된 섬유는 전기장이 없는 상태에서도 영구적으로 전기분극을 유지하여 주위에 대해 전장을 만들기 때문에 전하를 갖는 입자에는 Coulomb력, 또는 전하가 없는 입자도 섬유표면에 입자를 부착시킬 수 있다. 또한 동일포집효율에서 대전필터는 HEPA필터에 비해 압력손실이 $1/2\sim 1/3$ 정도이다. 이와 같이 대전필터는 포집효율이 높고 압력손실이 작으므로 마스크, 공기청정기필터, 기기필터 등에 사용된다.

2.3.5 기타

중공사를 이용하여 필터에 역삼투작용을 부여할 수 있으며, 한외여과도 가능하게 할 수 있어 의학용,

식품공학용으로 사용되며, 기체용중공사 필터는 가스분리에 사용된다.

필터에 제1철 화합물을 부여해 제1철 화합물의 2가철 반응활성을 이용하여 암모니아를 제거하는 탈취필터도 사용되고 있다. 비슷한 원리로 필터 표면에 항균제를 도포하여 세균이나 박테리아를 제거하는 항균필터가 사용된다.

Polystyrene계 이온교환수지는 화학적으로 안정하고 큰 교환능력을 갖고 있어 이를 섬유상으로 제조해 이온교환필터를 개발했다.

수혈 후 부작용을 방지하기 위하여 수혈용 혈액으로부터 백혈구를 제거할 필요가 있다. 이를 Polyester로 극세섬유를 만들어 필터로 만들고 HEMA(Hydroxy Ethyl Methacrylate)와 DEAEMA(Diethyl Amino Ethyl Methacrylate)의 공중합체를 코팅하여 필터로 제조하면 백혈구를 선택적으로 흡수한다.

2.4. 구조 해석 및 설계 이론

2.4.1 필터 설계 원리

필터는 주로 고체/액체, 고체/기체의 분리에 주로 사용되는데 이때 가장 중요한 것은 미립자 포집 능력(Particle-trapping capacity)을 결정하는 기공구조(Pore-structure)와 기공 크기(Pore-size)를 조절하는 방법이다. 이는 부직포 제조공정의 기본적인 웹 형성 공정, 섬유의 결합방법, 가공 및 성형 조건에 따라 변형이 가능하며 현재 고효율 필터제조에 이용되는 공학적인 흐름도는 Fig. 9에 구체적으로 묘사되었다. 따라서 최종 용도에 적절한 필터를 제조할 경우에는 이러한 부직포 방법의 선택이 가장 중요하며 여과 효율 증가를 위하여는 만들어진 부직포의 성형방법도 고려되어야 한다. 한편, 이와 아울러 필터를 설계할 때 고려되어야 할 구체적인 사항은 다음과 같다.

- (1) 제조방법에 영향 인자 : 단위 면적당 부직포 중량, 인열강도, 인장강도, 표면구조, 섬유장과 섬유도, 섬유의 강연도, 부직포의 기공도(Porosity)
 - (2) 여과 공정상에 인자 : 화학적 안정도, 내열성, 내항균성, 방염성, 미립자의 크기와 접착성능
- 부직포 기공구조 설계에서 가장 먼저 고려되어야 할 사항은 섬유 웹 형성으로 필터의 효율을 높이기 위해서는 섬유를 완전 random 방향으로 배열하는 것이 이상적이다. 이러한 random 배열 방법에는

에어적층(Air-lay), 습식 적층(water-lay), 정전기 적층(electrostatic-lay), 원심력 적층(centrifugal force-lay) 등이 있다.

웹 형성에 있어서 섬유의 배향성 외에 중요한 인자로 대두되는 것은 균일한 웹 구조를 만드는 방법이다. 만일 부직포 필터가 불균일하다면 여과공정 중에 여과체가 결점이 있는 곳으로 집중되는 현상이 발생하여 여과체가 파열되거나 여과효율이 저하되는 경향이 있다.

섬유 자체의 여과효율 증가를 위하여는 섬유간의 정전기 발생에 의한 방법이 가장 좋은 결과를 보여주는 것으로 알려져 있다. 따라서 부직포 필터용 웹을 형성하는 방법으로 정전기법이 섬유의 임의 배열 적층과 균일한 구조 형성능력이 우수하므로 이를 기공 구조의 조절방법으로 택할 수 있다는 것으로 생각된다.

정전기 적층법은 다음과 같다. 섬유는 전기저항이 매우 커서 전기전도도가 거의 없으므로 외부로부터의 마찰이나 방전 장치로부터 음전하를 잃거나 받아서 대전되면 대전된 전하는 이동하지 않고 그대로 잔존하여 같은 전하를 가지는 주위의 섬유와 서로 반발하게 된다. 이러한 정전기적 반발력에 의해 뭉쳐진 곳의 섬유들은 분리되어 균일한 분포를 이루게 된다. 섬유에 전기를 띄게 하는 방법으로는 마찰 전기와 코로나 방전(corona 放電)이 널리 이용된다.

코로나 방전을 이용하는 방법을 간단히 소개하자면, 섬유가 웹 형성 영역에 들어가 전에 섬유다발을 target-electrode에 갖다 놓고 전압을 높여 방전시키면 양전하가 섬유에 전달되어 섬유는 음전하로 대전된다. 그 다음에는 웹 형성 영역으로 들어가 균일한 웹이 만들어진다. 요구되는 웹이 얻어지며 이후 니들펀칭, chemical bonding, thermal bonding, spunlace 등의 방법으로 필터용 여과체로 제조한다.

고효율과 고부가가치 여과포를 만들기 위해서 이종(異種)의 섬유 집합체를 상호 접합하여 복합포를 성형하는데 최근 기술을 소개하면 고주파(high-frequency system), 초음파(ultrasonic), 펄스(pulse), 고온 열풍(Hot air system) 등의 시스템이 있으며 구체적인 장치는 Fig. 10~14에 나타내었다.

여과 효율 증진을 위해 특수 가공이 널리 이용되는데 대표적으로 현재 이용되는 특수가공을 열거하면 다음과 같다.

- (1) 섬유 집합체의 거품처리로 기공구조의 강화
- (2) 고온 여과 기능을 위하여 부직포의 침전면에 탄소섬유 적층판 부착
- (3) 자외선 조사에 의한 미세 미립자 제거 효율 강화
- (4) 기공 라멜라 네트워크(lamella network) 형성을 위한 섬유에 특수 코팅
- (5) 여과포의 팽윤 방지 및 내마모성 증진과 water/oil 발수효과를 위한 microporous 가공 등

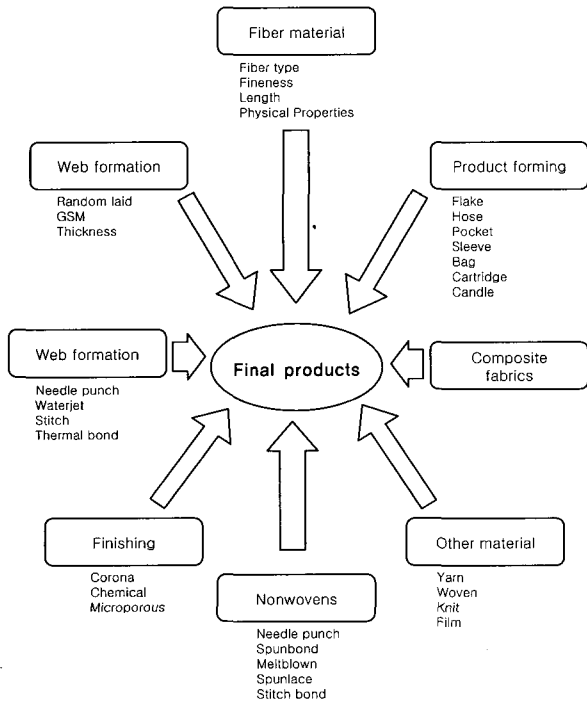


Fig. 9. 필터제조를 위한 공학적 설계 흐름도.

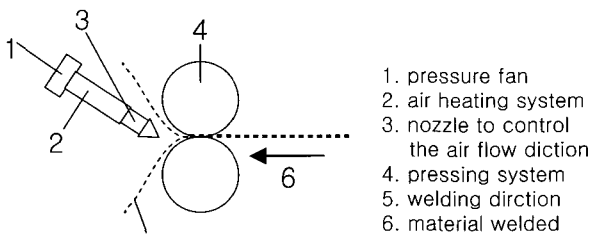


Fig. 10. Hot air system.

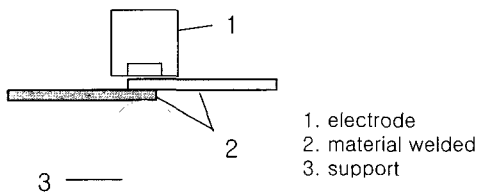


Fig. 11. Pulse system.

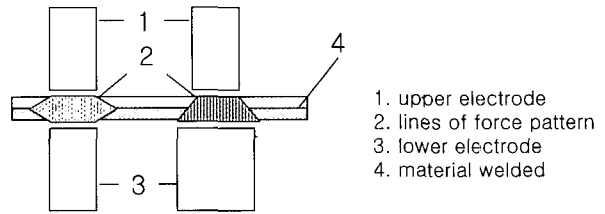


Fig. 12. High frequency system.

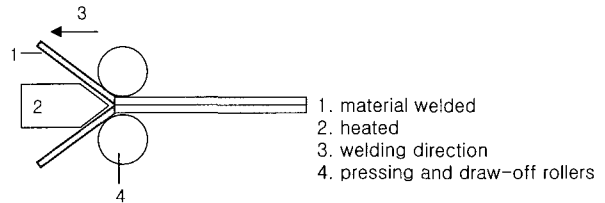


Fig. 13. Heat wedge contact system

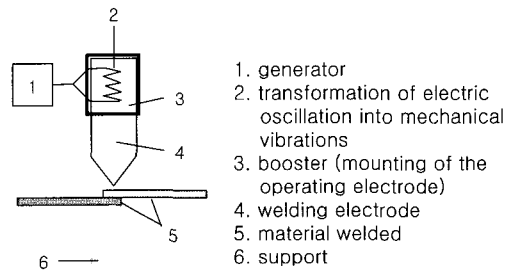


Fig. 14. Ultrasonic system.

2.4.2 설계형태 별 특성

앞서 다양한 방법으로 낱장의 부직포를 결합하여 필터를 제조하는 방법을 보인 것처럼 대부분의 필터는 부직포 간 혹은 부직포 외 직물이나 금속 메쉬 등의 재료와의 복합화를 거쳐 제조 된다. 복합화 형태에 따라 필터의 기능향상, 기능부여 등을 기대할 수 있다.

기본적인 형태의 필터는 prefilter와 medium filter를 접합한 형태이다. 기본형 필터(P+M)는 유입되는 먼지입자를 필터 여재의 물리적인 작용인 중력, 차단, 관성 효과 등에 의해 포집한다. 효율은 Medium filter의 효율을 따르게 되고 고차압 발생이 불가피하다. 기능적인 측면에서 호기성 유기 물질 중 분진에 국한된다. 기본형 필터의 장점은 초기 투자비용이 적다는 것과 관리자의 기술력에 무관하게 유지보수가 가능하다는 것이다. 단점은 여재의 정압체크가 어려우며, 잦은 교체로 인한 비용이 발생하게 되며, 소모품 처리가 쉽지 않고 관리자는 3D 업종에 속하므로 회피대상이 된다. 가장 큰 단

점은 교체시기 초과 시 필터 파열로 인한 여과공정에 불량을 일으킨다는 것이다.

기본형 필터의 형태와 여과원리에 정전효과를 부여하여 포집효율을 높이고 설치에 필요한 공간을 줄인 방법이 정전식이다. 이 설계방식의 장점은 유지관리비가 적은 것과 설치 면적을 최소화 할 수 있다는 것이다. 단점은 정전이 수명을 갖고 있어 수명을 다한 필터는 교체를 해주어야 한다는 것이다.

기본형 필터에 대전미립자 중성화장치(NTR)를 추가하여 여과효율을 높이는 설계 방법도 있다. 기본형 필터를 통과한 미립자에 DC 25kV의 정전하와 AC 550V, 150kHz의 고주파를 대전시킨 미세분진은 중성화되어 다른 분진과 응집이 잘 되어 분진을 응집시킬 수 있다. 응집된 분진은 필터 내에 남아있다 환기류를 타고 Prefilter와 medium filter에 쉽게 부착되어 제거할 수 있다. 대전미립자중성화장치를 도입한 필터는 일반 필터로 제거할 수 없는 미세분진의 입자를 포집할 수 있다. 하지만 호기성 유해 물질에 대한 효율은 객관적 증빙이 이루어 지지 않았다. 대전미립자중성화 장치를 도입한 필터의 장점은 미세 분진 제어가 가능하며, 대전미립자중성화장치가 반영구적이라는 것과 시스템 구성의 메커니즘이 간단하다 것이다. 단점은 Prefilter와 Medium filter에 걸리는 차압을 측정할 수 있는 게이지가 필요하다는 것과 소모품 교체시기가 늦어 필터에 파열이 일어나면 대전미립자중성화장치에서 방전이 일어난다는 것, 대전미립자중성화 장치 때문에 초기 가격이 높으며 Prefilter와 Medium filter의 교체로 인해 유지비 역시 높다는 것이다.

Prefilter, 전기집진기, Bag filter(medium filter)로 설계하는 방식이 있다. 이 설계의 원리는 공기의 입구측 이온화부에서 DC 12kV(+)방전으로 공기 중의 오염물질이 (+)로 하전된 후 집진부인 (-)극판에 집진되는 것이다. 집진된 오염물질은 점차 커져 비산되며 비산되는 입자를 Bag filter가 포집하여 제거한다. 각종 호기성 유기물질 제어 효율이 인정되지만 유지관리에 어려움이 있다. 본 설계법의 장점은 효율에 있다. 현재까지 개발된 어떤 필터설계법보다도 효율이 높으며 전기집진기에서 걸리는 차압도 4mmAq로 낮으며, 미세 분진 제어에 탁월한 성능을 보인다. 미세분진 외에도 박테리아나 세균도 제거가 가능하며 대용량도 처리할 수 있다. 단점은 전기집진기에 존재하는 Electrocell 세척이 어렵다는

것과 세척이 불량할 경우 방전이 일어날 수 있다는 것, 전기식이므로 폭발성 가스가 사용되는 공정에서는 사용할 수 없으며, 무엇보다도 유지관리비가 비싸다는 것이 큰 단점으로 작용한다.

전기집진식을 보완하여 자동세정형 전기집진식이 개발되었다. 전기집진식과 거의 같은 형태이나 Bag filter 대신 자동세정시스템을 도입하여 초기의 집진효율을 유지시킨다. 본 설계방식의 장점은 유지관리가 적다는 것, 차압이 매우 적어 전기에너지 절감 및 송풍장치의 크기 절감이 가능하다는 것이다. 또한 정기적 교체 물품이 없어 물자 절감 및 인건비 물품비도 절감되며 간편하고 위생적이고, 특수 폐기물 발생도 없다. 그러나 따로 기계실이 있어야 한다는 것을 비롯하여 초기 투자비가 높고 유지를 위한 시스템을 구성해야 한다는 것이 단점이다.

Table 4. 설계형태 별 성능

	P+M	P+M (정전식)	P+M +NTR	P+E+M	SWElect
운전차압 (mmAq)	28.9	18.2	30	29.7	11
말기차압 (mmAq)	42.7	26	42.8	42.4	15
효 율 (%)	65~90	60	65~90	80~100	80~100

P : Prefilter, M : Medium filter, E : Electronic(전기집진식),
SWElect : Self washing electronic(자동세정형)
사용 시 풍속 : 2.5m/s
P+M의 경우 초급 : 1.5m/s, 중급 : 2.5m/s
효율평가는 비색법 이용

Table 5. 설계형태 별 유해물질 제거능력

		P+M	P+M (정전식)	P+M +NTR	P+E+M	SWElect
입 자 상	분진	○	○	○	○	○
	매연입자	△	△	△	◎	◎
	세균	×	×	△	◎	◎
가 스 상	냄새	×	×	×	△	△
	유해가스	-	-	-	-	-

◎ : 매우 우수, ○ : 우수, △ : 보통, × : 나쁨, - : 불가능

2.4.3 필터 모사 시스템

국내/외적으로 경제적 부담을 줄이기 위해 실제로 부직포를 생산하지 않고 컴퓨터를 이용해 가상 부직포를 만들어 필터의 성능을 예측할 수 있는 필터 모사 시스템(Filter simulation system)이 점차

요구되어지고 있고, 몇몇 기업은 대표적인 CFD(Computational fluid dynamics) 프로그램인 Fluent사의 Fluent[®] 혹은 Ansys사의 Ansys[®]를 이용하여 필터 모사 시스템을 개발하여 사용하는 추세이다. 그러나 이러한 프로그램으로 필터 모사를 할 경우 필터의 특징을 반영하기 어렵고 프로그램에서 제공하는 porous-jump나 porous-media 등의 형태를 이용하여야 하기 때문에 독립된 필터의 성능을 예측하기는 어렵고, 필터를 장착한 전체 시스템 내에서의 성능을 예측할 수 있다. 그러나 2005년 독일의 Andreas L. Wiegmann 박사가 개발한 Geodict[®]와 Filterdict[®]라는 필터 모사 시스템은 가상의 부직포를 설계할 수 있고, 그에 대한 필터 성능을 예측할 수 있어 기존의 CFD 등을 이용하는 것보다 훨씬 전문적이며 필터 업계에 필요한 정보와 결과를 도출할 수 있다.

Geodict[®]에 대한 간단한 소개를 하면 다음과 같다. Geodict[®]는 미세구조 설계(microstructure generator), 부직포 속성 모사(property simulator)와 가상 부직포 설계(virtual material designer)기능을 갖고 있다. Geodict[®]는 모사하고자 하는 부직포의 전체 부피에 대한 섬유 부피의 비(fiber volume fraction), 섬유길이(fiber length), 섬유 단면형태(fiber cross section) 혹은 섬유의 반지름(fiber radius)을 입력받아 그 평균값을 이용해 random한 3차원 구조물(three-dimensional form)이나 섬유 구조체(fiber geometries)를 만들 수 있다.

Table 6에 보인 섬유의 속성 관련 인자들을 입력한 후 식(1)을 이용해 부직포를 제작한다. φ, ν, γ 는 사용자가 입력하거나 랜덤하게 부여할 수 있다.

Geodict[®]를 이용해 만들어진 가상의 구조물은 3차원과 2차원 두 가지 형태로 관찰이 가능하며, 제작한 구조물의 단면관찰, 회전, 확대/축소 등을 실시간으로 관찰할 수 있다. Geodict[®]로 3차원 미세구조물을 설계하는 데 제한이 없어, crimp가 존재하는 섬유, 중공사(中空絲), 직물, 편물, 박막(membrane), 폼(foam)등 필터로 사용되는 모든 여과재의 형태를 설계할 수 있으며 복합화를 모사하는 것 또한 가능하다. 뿐만 아니라 Geodict[®]가 인식할 수 있는 3차원 이미지(AutoCAD[®], Ansys[®], Fluent[®] 등을 이용해 제작한 이미지)를 불러오거나 처리할 수도 있다. 제작한 구조체 혹은 Geodict[®]가 인식할 수 있는 3차원 이미지는 수학적 모사를 통해 flow property와 elastic property를 계산할 수

있다. Geodict[®]는 Ansys[®]나 Fluent[®]같이 이미 범용화된 FEM(Finite element method)을 이용한 소프트웨어와의 호환성이 좋아 Ansys[®]나 Fluent[®]를 이용하여 제작한 구조체 정보를 인식할 수 있으며, 그러한 소프트웨어가 인식할 수 있도록 정보를 가공하여 출력할 수 있다.

Filterdict[®]는 Geodict[®]로 제조한 혹은 Geodict[®]가 인식할 수 있는 형태의 이미지를 이용해 미세구조체의 여과 성능을 평가하고 가시화하는 데 사용한다. 모사시 대부분의 정보는 Geodict[®]에서 받으며, 새로이 입력하는 인자는 Table 7에 나타내었다.

Table 6. 모사에 사용되는 섬유 구조인자

인 자	정 의
Fiber index	1~4까지의 값을 가지며 다종의 섬유를 이용하여 부직포를 제작할 경우 섬유를 구별하는 코드
Desired SVF	필터 전체 부피에 대한 섬유간의 비율
Anisotropy a	X나 Y 좌표에 대한 평행한 정도 부여 b가 1보다 클 경우 $a=1/b$ 라고 하면 X축에 평행한 섬유를 제조 a가 1보다 크고 $b=1/a$ 이면 y축에 평행한 섬유를 제조
Anisotropy b	이 값이 0에서 1사이의 값이면 z축에 평행한 섬유를 얻을 수 있다.
NX, NY, NZ	섬유의 x, y, z 값 정의
Percent	다종의 섬유를 사용할 경우 각 섬유의 비율
Dtex	사용한 섬유의 섬도(1g/1000m)
fiber color	섬유의 색
fiber short	단섬유인지 장섬유인지 구별 이를 체크하지 않으면 섬유는 장섬유가 되어 길이가 무한대까지 주어진다.
fiber round unit	섬유의 단면이 둥근지 이형인지 구별
fiber length	섬유 길이의 단위 정의
spec. weight	섬유의 비중
Radius	섬유의 반지름이며 Dtex값에 의해 계산되어 입력될 수 있고, 사용자가 지정할 수 있다.

Table 7. 모사에 사용되는 부직포 구조인자

인 자	정 의
Fluid viscosity	필터를 통과해 흐를 유체의 점도
Pressure difference	실험에 사용하는 압력
Fluid density	20℃에서 공기의 밀도를 기본값으로 함
Electrostatic charge	정전기용량

$$\begin{pmatrix} \cos\varphi\cos\vartheta - \cos\gamma\sin\varphi\sin\vartheta & -\sin\varphi\cos\vartheta - \cos\gamma\cos\varphi\sin\vartheta & \sin\gamma\sin\vartheta \\ \cos\varphi\sin\vartheta + \cos\gamma\sin\varphi\cos\vartheta & -\sin\varphi\sin\vartheta + \cos\gamma\cos\varphi\cos\vartheta & -\sin\gamma\sin\vartheta \\ \sin\gamma\sin\varphi & \sin\gamma\cos\varphi & \cos\gamma \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} NX \\ NY \\ NZ \end{pmatrix} \quad (1)$$

위의 인자를 이용해 Filterdict®에 내장된 solver가 달시의 법칙(Darcy's law), 여과 메커니즘을 이용해 압력의 변화와 여과 효율 등을 계산해 내 여러 가지 결과를 보인다. 특히 애니메이션(animation)기능이 지원되어 여과과정을 눈으로 직접 확인할 수 있어 명확히 가시적인 결과를 보여준다. 또한 Filterdict®는 다양한 분진의 정보를 갖고 있어 여과 모사를 수행할 경우 원하는 분진을 선택하여 이용할 수 있다. 그리고 모사 결과로 구한 필터 성능에 관한 모든 데이터는 Microsoft Excel™이 인식할 수 있는 형태의 데이터로 변환이 가능하여 데이터 가공이 매우 편리하다. 즉, 차압(pressure drop), 필터의 여과효율, 실험에 사용한 분진의 크기별 여과효율, 필터 수명, 필터의 기공분포, 필터 내 각 층(layer)에 포집된 분진의 량(量) 등 학계를 비롯해 필터 업계에서 요구하는 필터의 정보를 손쉽게 얻을 수 있고, 가공할

수 있다. 간단하게 Geodict®와 Filterdict®를 정의하자면, Geodict®는 가상의 부직포를 설계하고 모사하기 위한 소프트웨어이며, Filterdict®는 제작된 구조체를 이용해 필터로서의 성능을 평가하고 이를 가시화하여 보여주는 소프트웨어이다.

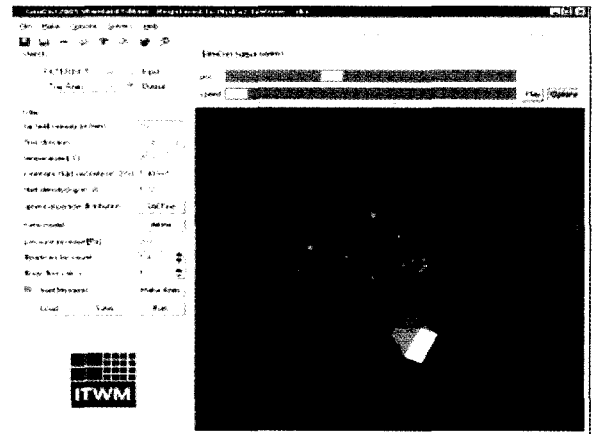


Fig. 17. 필터 내 분진의 이동형태 모사

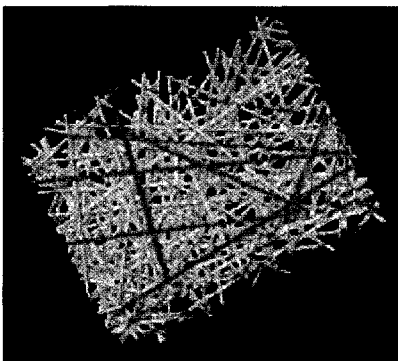


Fig. 15. Filterdict® 가상 부직포 모사

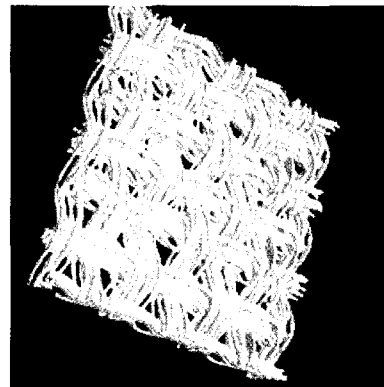


Fig. 18. 직물형 모사

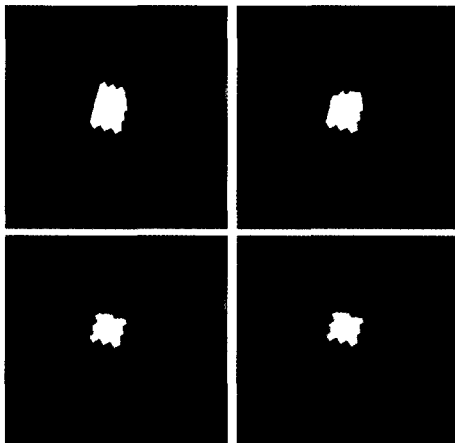


Fig. 16. Filterdict® 여과 메커니즘 모사

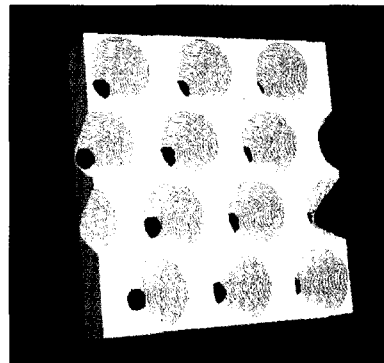


Fig. 19. 멤브레인형 모사

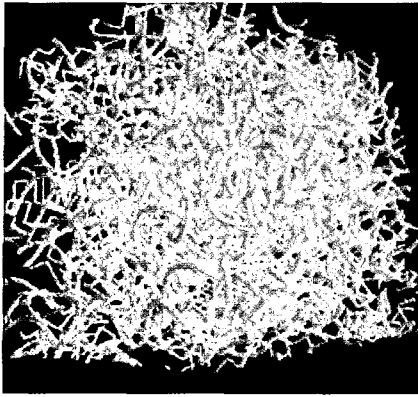


Fig. 20. 크림프 섬유로 만든 필터.

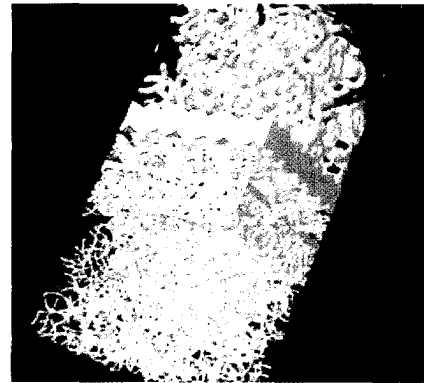


Fig. 21. 다층구조 필터 설계

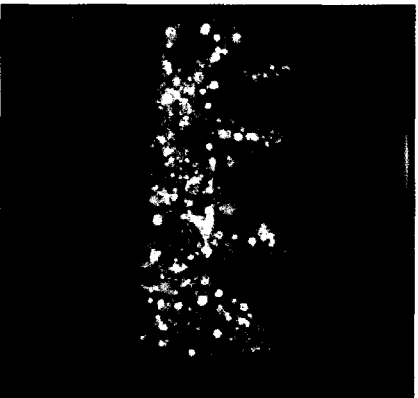
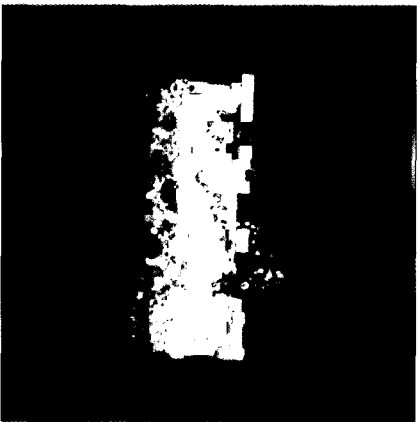


Fig. 22. 여과 모사 애니메이션 및 포집된 형태

3. 결 언

국내 필터시장은 1980년부터 시작하여 지금까지 성장 중에 있으며 산업용 섬유산업 분야에서 매우 큰 비중을 차지하고 있다. 지금까지의 필터 설계는 기업의 경험과 노하우를 기반으로 이루어 졌다. 그러나 국내의 필터 산업이 지금보다 한 단계 더 전진하기 위해서는 선진국의 경우에서와 같이 경험과 노하우뿐만 아니라 필터에 대한 정확한 이해를 비롯해 필터에 필요한 이론 정립도 함께 발전시켜 보다 체계적인 연구 개발이 요구된다.

참고문헌

1. D. F. Durso, "The Technical : Nonwoven", Tappi Press, 1986.
2. "첨단부직포 제조기술", 특허청, 2001.
3. 태경웅, "공조시스템의 성능향상과 안전을 위한 필터의 시험", 대한설비공학회, 1998.
4. S. Rief and A. L. Wiegmann, "Geodict User Guide", ITWM, 2005.
5. 서석청, "HEPA, ULPA 필터 특성에 대하여", 공기정화 냉동공학회, 1998.
6. C. H. Joo, *J. Korea Fiber Soc.*, **28**, 908(1991).
7. C. H. Joo and T. Y. Park, *J. Korean Fiber Soc.*, **29**, 765(1992).
8. C. H. Joo, *J. Korea Fiber Soc.*, **30**, 335(1993).
9. H. S. Park, Y. O. Park, *Korean J. Chem. Eng.*, **22**, 165(2005).
10. B. Y. H. Liu and K. L. Rubow, "Efficiency, Pressure Drop and Figure of Merit of High Efficiency Fibrous and Membrane Filter

- Media", Proceedings of the 5th World Filtration Congress, Nice, Societe Francaise de Filtration, Paris, 1990.
11. Kanaoka, C. and Kiragi, S., "Pressure Drop of Air Filter with Dust Load", *J. Aerosol Science*, **21**, 127(1990).
 12. J. L. Park, "Preparation of Inorganic Porous Environmental Material and Application", Korean Geo-Environmental Soc., National Conference in Commernoration of Foundation.
 13. 양성원, "산업환기용 에어필터의 특성비교 및 시험방법 소개", *설비저널*, **31**, 19(2002).
 14. 임대영, 최영옥, "에어필터용 섬유 소재", *Fiber Technology and Industry*, **8**, 365(2004).
 15. S. H. Lee, S. K. Cheong and H. Noguchi, "On the Development of Hybrid Composites with Non-Woven Tissue", *Korean Hybrid Composite Soc.*, **19**, 20(2006).
 16. J.C. Lee, "부직포를 이용한 공기여과 및 개발 동향", *J. Korean Fiber Soc.*, **30**, 271(1993).

저자소개



김 주 용

1990 서울대학교 섬유공학과(학사)
 1992 서울대학교 섬유공학과(석사)
 1998 노스캐롤라이나주립대학교
 섬유고분자과학과(박사)
 1999 UCLA 기계-항공공학과 연구원
 1999~현재 숭실대학교 섬유공학과 교수

Tel. & Fax : 02-820-0631; E-mail : jykim@ssu.ac.kr



김 기 태

2005 숭실대학교 섬유공학과(학사)
 2005~현재 숭실대학교
 섬유공학과(석사과정)
 2006 일본신슈대학교 나노파이버
 연수과정 수료

Tel. : 02-820-0620; E-mail : thetai@ssu.ac.kr