

분리막 하우징용 복합소재의 연구개발 동향

김 득 주 · 남 상 용[†]

경상대학교 나노·신소재융합공학과, 공학연구원
(2016년 2월 25일 접수, 2016년 2월 26일 수정, 2016년 2월 27일 채택)

Development Trend of Composite Materials for Membrane Housing

Deuk Ju Kim and Sang Yong Nam[†]

Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

(Received February 25, 2016, Revised February 26, 2016, Accepted February 27, 2016)

요 약: 분리막 시스템은 기존의 분리공정과 비교하여 우수한 효율과 낮은 가격으로 인하여 빠르게 성장하고 있다. 분리막 공정은 분리막, 모듈, 그리고 기계적 요소로 구성되어 있으며 향상된 효율을 얻기 위하여 분리막 공정에 사용되는 소재의 요구사항 또한 증가가 되고 있다. 분리막 모듈은 분리막 시스템의 핵심 요소 중 하나로써 최근 들어 복합 소재들이 스테인레스 강 모듈과 비교하여 우수한 물성과 낮은 가격으로 인해 분리막 하우징에 적용되어 왔다. 본 리뷰에서는 다양한 종류의 유리 섬유와 이를 이용한 복합소재들에 대하여 정리하였으며 분리막 시스템에 적용을 위한 잠재성에 대하여 논의하였다.

Abstract: The membrane separation process is growing very fast because of the high efficiency and low cost compared with other traditional process. The membrane process consists of various components such as membrane, module and mechanical part. The requirements for materials used in the membrane separation are becoming more and more demanding for achievement of high efficiency. Membrane module is also considered as the one of the key component in the membrane system. Recently composite materials have been considered as the membrane housing due to their excellent property and low cost compared with stainless module. In this review, a various types of glass fiber and composite material are summarized and their potential for the application of membrane system is discussed.

Keywords: Fiber-reinforced polymer, Module, Glass fiber, Mechanical property

1. 서 론

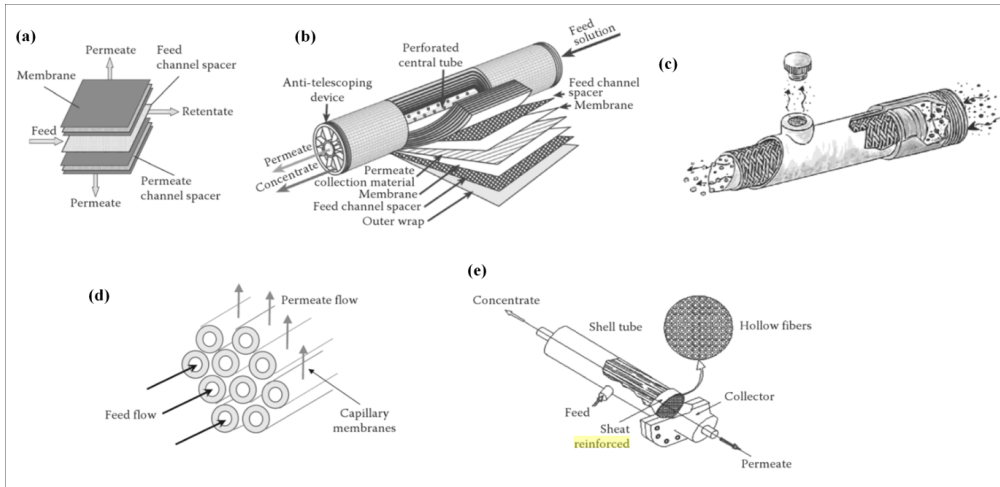
막분리 기술은 분리막의 선택적 투과성을 이용한 다양한 분리공정을 포괄적으로 의미한다. 분리막 분야는 분리 성능에 따라 크게 정밀여과막(MF; Microfiltration Membrane), 한외여과막(UF; Ultrafiltration Membrane), 나노여과막(NF; Nanofiltration Membrane), 역삼투막(RO; Reverse Osmosis Membrane)으로 분류되고, 소재의 종류에 따라 고분자, 세라믹, 금속으로 구분될 수 있다. 이외에도 분리막의 설계 및 제조 기술, 분리막 제어

기술, 시공 및 유지·관리기술 등 화학, 기계, 물리학 분야와 같이 다양한 분야의 기술이 접목되어 있다. 막분리 기술은 산업화와, 지구온난화와 같은 환경문제로 최근 들어 에너지 저감 및 환경 개선에 대한 수요증가로 인하여 미래의 에너지 고갈문제와 기후변화에 대응하기 위하여 환경관련 산업에서 분리막을 활용한 시스템 수요가 지속적으로 증가가 될 것으로 기대되고 있다 [1-3]. 이미 언급하였듯이 분리막 기술은 다양한 분야의 기술이 접목되어 운용이 되고 있으나, 그중 핵심 요소인 분리막 및 분리막을 이용한 모듈의 경우 시스템 전

[†]Corresponding author(e-mail: walden@gnu.ac.kr, <http://orcid.org/0000-0002-6056-2318>)

Table 1. Characteristics of Different Membrane Modules[4]

Module type	Area of standard module (m ²)	Cost (us\$/m ²)	Fouling	Characteristics	Application
Hollow fiber	300-600	Low	Low	Low cost per square meter of membrane, only suitable for clean fluids	Gas separation
Capillary fiber	50-150	Low	Low	Limited to low-pressure application (< 200 psi), good fouling resistance can be backflushed	Water treatment
Spiral wound	20-40	Intermediate	Intermediate	Important in UF and MF application	Water treatment, Desalination, Gas separation
Tubular	5-10	High	High	High Cost limits application	Water treatment
Plate	5-10	High	High	High Cost limits application	

**Fig. 1.** A schematic representation of (a) plate (b) spiral wound (c) tubular (d) capillary and (e) hollow fiber membrane module[5].

체의 성능에 영향을 끼치므로 현시점에서 개발의 중요성이 가장 부각되고 있으며 이로 인해 많은 연구기관, 대학, 기업에서 시스템 개발 이외에 소재 및 모듈에 대한 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 그동안 분리막 공정에 적용되어온 분리막 모듈의 종류와 소재에 대한 자료에 대하여 정리하였고, 특히 최근에 많이 사용되고 있는 유리섬유 강화 고분자 모듈에 대한 연구개발 동향에 대하여 정리하였다.

2. 분리막 하우스 개요

분리막 모듈은 실제 분리막이 배치가 되어 분리막이 손상되지 않도록 보관하는 용도와 다양한 형상과 배치를 통하여 분리막의 성능을 최적화할 수 있도록 하는

핵심 부품으로써 크게 하우스와 분리막을 하우스에 고정하고 밀폐시키는 포팅, 그리고 공급부와 배출부의 손실을 방지하며, 외부 영향, 특히 압력에 대한 안정성을 향상시키는 sealing 부분으로 구분할 수 있다.

2.1. 분리막 하우스

일반적으로 모듈 하우스에 사용되는 물질로는 금속, 세라믹, 고분자 소재가 있으며 하우스의 측면부, 공급부, 배출부의 종류 및 사용목적과 운영방식에 따라 모듈의 종류가 구분되어질 수 있다. 대표적인 분리막 모듈의 형태에 따른 종류를 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다[4,5]. 분리막 하우스에 사용되는 스테인리스 강 소재의 경우 물리적, 화학적, 열적 안정성이 고루 우수한 장점을 가지고 있지만 상대적으로 면적대비 무거운 중량

Table 2. Polymeric Housing Materials

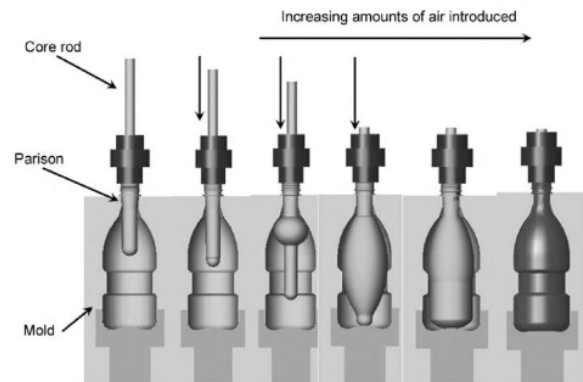
Material	Characteristics
ABS	Applied to the seawater desalination system
Delrin (POM)	Reduced physical properties at low pH environment
PE	Excellent chemical stability, lower thermal stability
PP	Excellent chemical stability, thermal stability, and low creep resistance
PSO	High thermal stability in various pH conditions.
PVC	Low cost, Widely used in the pipe in low-pressure conditions, low thermal stability
C-PVC	Chlorinated PVC has a better thermal stability than PVC
PVDF	High thermal and chemical stability. High cost
FRP	Glass-fiber reinforced polyester housing is widely used for membrane housing Excellent corrosion resistance, Low cost, FRP has been applied to the field of desalination.

**Fig. 2.** Photograph of CeraMEM module of Veolia water technologies[6].

을 가지는 문제점을 안고 있으며 말단부 cap의 제거가 용이하지 않으며 전기절삭공정에 의해 자를 수 있으므로 모듈제조 이후 제어가 용이하지 않은 문제가 있는 것으로 알려져 있다. 대표적인 스테인리스강 모듈을 Fig. 2에 나타내었으며 해당 모듈의 경우 세라믹 소재의 멤브레인 Cross flow 타입으로 제작한 모듈로 수처리 분야에 사용되고 있다[6].

고분자 소재는 상대적으로 저렴한 가격, 소재에 따른 우수한 내화학성, 화학적 안정성을 가지나, 단일소재의 분리막 모듈의 경우 분리막이 일반적으로 구동되는 일정 이상의 압력과 온도에서는 적용하기가 어려운 단점을 가지고 있다. 또한 공급부와 배출부의 압력 유지 및 손실되는 매체를 보호하기 위한 실링 소재가 반드시 필요하다. Table 2는 현재 상용화되어 판매되고 있는 분리막 모듈 소재의 종류와 특징에 대하여 정리하였으며, Polypropylene, Polyvinylchloride 소재 모듈이 저렴한 단가와 가공성이 우수하여 가장 광범위하게 이용되고 있다.

대부분의 분리막 하우징의 경우 블로우 성형(blow molding)을 통해 제조가 된다(Fig. 3). 블로우 성형은

**Fig. 3.** Schematic of the stretch blow molding process[7].

압출 또는 사출에 의해 튜브상으로 예비 성형을 진행한 후 제조를 원하는 모양을 가지는 금형에 끼워 내부로 공기를 불어 넣어 부풀게 한 후 냉각 고형화 시키는 방법으로 크게 압출, 인젝션, 스트레치 블로우 성형, 세가지로 구분될 수 있다[7].

블로우 성형은 장비와 금형의 단가가 상대적으로 저렴하고, 생산속도가 매우 빠르며, 부분적인 몰딩 성형이 가능하여 현재 분리막용 하우징 제조에 사용되고 있는 방법이다. 대부분의 열가소성 고분자 소재[Acrylonitrile (AN), polystyrene (PS), polyvinyl alcohol (PVA), polycarbonate (PC), polysulfone (PSf), polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET) 등]가 블로우 성형에 의해 제조되고 있으며 대표적으로 Porex社의 37module의 경우 PCV와 CPVC소재로 하우징을, Pall社의 Microza UF 모듈은 polysulfone 하우징을 이용하여 모듈을 제조하였다. High-density polyethylene (HDPE)와 PP의 경우 가벼운 무게, 저렴한 가격, 우수한 내크

Table 3. Glass Transition Temperature of Sample[8]

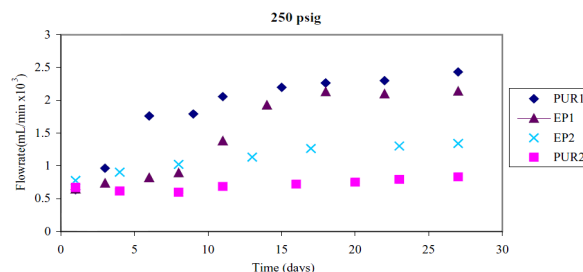
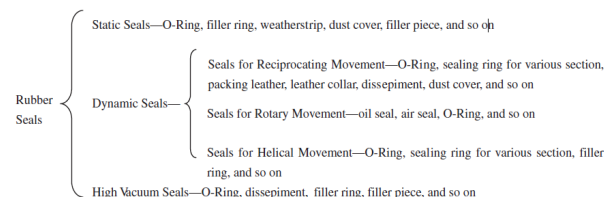
Sample	Abbreviation	T _g (°C)
UREOL 6414A/5117B	PUR1	48
U-10FL	PUR2	-20
Araldite 2011 A/B	EP1	40
E-30CL	EP2	70

택성, 내충격성 등의 우수한 물성을 가지고 있으나, 낮은 내용매성, 상대적으로 낮은 열안정성으로 인해 최종 사용처에 대한 제한성을 가지고 있다. 이를 해결하기 위하여 불화반응을 통한 개질을 진행한 고분자의 경우 다양한 용매조건하에서 저항성이 향상됨을 확인할 수 있다. 불화처리된 PE와 PP의 경우도 인젝션 성형에 의해 생산이 가능하여 하우징 뿐만 아니라 기어부품, 와이어 등 다양한 분야에 활용되고 있다.

FRP모듈은 유리섬유와 고분자 소재의 복합화를 통해 제조되는 모듈로서 우수한 화학적, 열적, 물리적 안정성과 더불어 생산성의 향상을 통해 낮은 가격으로 모듈을 공급함으로써 최근 들어 많이 이용되고 있으며 2.5, 4, 8인치 크기의 모듈이 표준화되어 통용되고 있다.

2.2. 분리막 포팅 소재

분리막을 하우징에 고정하기 위해 분리막의 말단 부분을 처리하는 일련의 공정을 포팅이라 한다. 개발된 모듈의 규격과 소재 및 적용 분야의 종류가 다르기 때문에 각각 다른 하우징에 적용이 가능한 다양한 소재의 포팅 소재들이 개발되어 있다. 대표적으로 폴리우레탄계, 에폭시계 등의 포팅 소재들이 광범위하게 이용되고 있는데, 이는 상기 소재들의 경우 포팅제와 하우징 사이의 접착력이 우수하며, 작업이 용이한 경화시간을 갖는다는 장점으로 많이 이용되어 왔다. 또한 포팅 공정은 각 연구개발 기관만의 노하우로 제조되고 있지만 공통적으로 포팅 시 발열에 의한 분리막의 손상이 없어야 하며, 포팅 시스템이 완성된 이후의 물성, 특히 경직도에 의한 막의 손상이 없어야 한다는 요구사항이 있다. 동일한 분리막 소재를 사용하더라도 포팅소재의 종류와 공정제어를 통해 분리막의 성능이 변할 수 있음을 A.F. Ismail 그룹의 연구를 통하여 확인할 수 있었다[8]. 본 연구에서는 4종의 포팅제(폴리우레탄계 PUR1 (UREOL [6414A/5117B])), PUR-2 [U-10FL], 에폭시계 EP1 (Araldite [2011A/B]), EP2 [E-30CL])를 사용하여 동일한 프로세스로 포팅과정을 거친 후 개발된 폴리설폰 중

**Fig. 4.** Effects of permeate flow rate vs. time using different potting resin at feed pressure of 250 psig[8].**Fig. 5.** The categories of rubber seals[9].

공사형 분리막의 성능평가를 진행하였다. 사용된 포팅 소재의 경우 Table 3에 나타내었듯이 동일한 계통의 소재를 사용하였지만 기본적인 물성의 영향을 알아보고자 T_g 값의 차이가 많이 나는 소재를 선택하여 기체 투과도 테스트를 진행하였다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 낮은 T_g 값을 가지는 포팅소재의 경우 CO₂ 기체에 대한 가소화 현상이 나타남을 확인할 수 있었으며 포팅소재의 종류와 물성에 따라 투과 안정성이 상이한 것을 확인할 수 있었다.

2.3. 분리막 모듈 sealing 소재

모듈에 사용되는 sealing 소재의 경우 공급부와 배출부의 결합방지와 모듈의 안정성 확보를 목적으로 사용되며 일반적으로 모듈의 종류에 따라 소재가 구분된다. 사용되는 용도와 sealing 소재의 종류에 따라 Fig. 5와 같이 다양한 형태의 sealing 소재가 구분될 수 있다[9]. 분리막 하우징의 경우 대부분 공급부와 투과부의 말단부분에 오링과 가스켓이 결합되는 형태로 고무, 실리콘, 폴리테트라플루오로에틸렌, 폴리비닐릴로라이드와 같은 소재들이 주로 사용되고 있다. 해당 분야 기술의 경우 sealing 소재, sealing 구조, sealing 기술 세가지 카테고리로 연구분야가 구분되어 있으며 이 중 소재 측면에서 요구가 되는 기본 특성들은 다음과 같다.

1) 물리적 강도, 2) 경도 - IRHD (International Rubber Hardness Degrees) 3) 압축변형률, 4) 내마모 테스트, 5)

Table 4. O-RING Seal of TORAY for Membrane System[10]

Model	Short description	Seal Type	Cord Thickness (mm)	Nominal Diameter (mm)	Material	Temperature (°C)
O-Ring Toray SU / SC 4 inch NBR	O-Ring Toray SU / SC 4 inch NBR	O-Ring	2.4	21.3	NBR	80
O-Ring Toray SU / SC 4 inch PU	O-Ring Toray SU / SC 4 inch PU	O-Ring	2.4	21.3	Polyurethane	100
O-Ring Toray TM 4 inch NBR	O-Ring Toray TM 4 inch NBR	O-Ring	2.62	18.62	NBR	80
O-Ring Ropur TR 4 zoll / 2.5 zoll EPDM	O-Ring Ropur TR 4 inch / 2.5 inch EPDM	O-Ring	3.53	18.62	EPDM	80
O-Ring Toray SU / SC 4 inch EPDM	O-Ring Toray SU / SC 4 inch EPDM	O-Ring	2.4	21.3	EPDM	80
O-Ring Toray TM 4 inch EPDM	O-Ring Toray TM 4 inch EPDM	O-Ring	2.62	18.62	EPDM	80

Table 5. Properties of Selected Commercial Reinforcing Fibers[19]

Fiber	Typical Diameter (μm)	Density (g/cm ³)	Tensile modulus Gpa (Msi)	Tensile strength GPA (ksi)	Strain-to-Failure
E-glass	10	2.54	72.4	3.45	4.8
S-glass	10	2.49	86.9	4.3	5
PAN carbon					
T-300 (Amoco)	7	1.67	231	3.65	1.4
AS-1(Hercules)	8	1.8	228	3.1	1.32
T40 (BASF)	5.1	1.81	290	5.65	1.8
IM-7 (Dupont)	5	1.78	301	5.31	1.81
Aramid					
Kevlar 49 (dupont)	11.9	1.45	131	3.62	2.8
Technora (teijin)		1.39	70	3	4.6
Extended chain polyethylene					
Spectra 900 (Honeywell)	38	0.97	117	2.59	3.5
	27	0.97	172	3	2.7
Boron					
	140	2.7	393	3.1	0.97
SiC					
Monofilament	140	3.08	400	3.44	0.86
Al ₂ O ₃					
Nextel 610	10-12	3.9	380	3.1	

기체투과도(고압에서 사용되는 소재), 6) 내화학성

최근 들어 기존 단일 소재가 가지는 부족한 물성의 보완을 위해 고무 소재에 클레이, 실리카, 카본블랙, 강화섬유 등의 첨가제를 이용하여 복합화시킨 소재의 개발이 진행되고 있다. 현재 일본 Toray社의 판매되고 있는 대표적인 4인치 모듈용 제품에 사용되는 오링에 대한 정보를 Table 4에 정리하였으며 테이블에 나타내었듯이 NBR, Polyurethane, EPDM 등 다양한 고무소재가

개발되어 sealing 소재로 사용되고 있다[10].

3. Fiber Glass Reinforced Polymer (FRP) 연구 동향

FRP는 최근 들어 우수한 내압성, 내화학성, 물리적 강도 등 전 분야에 있어 우수한 성능을 가지고 있어 분리막 모듈에 많이 사용되고 있다. FRP는 복합재료의

Table 6. Glass Fiber and Stainless Steel Pressure Vessels[20]

	FRB	Stainless steel
Pressure	200 bar	80 bar
Temperature	< 70 °C	< 100 °C
Side port entry	difficult / rare	easy / standard
End cap entry	standard	non-standard
Sanitary	no	yes (possible)
Price	100%	150-200%

한 분야로써 입자 강화 재료, 섬유 강화 재료, 구조 복합재료 나누어지는 분야 중에서도 가장 미래지향적인 소재로써 각광을 받고 있다[11,12]. 복합재료는 각기 다른 2상의 매개가 가지는 장점들을 혼화시켜줌으로 인해 각각의 장점을 이용하여 극대화된 시너지 효과를 낼 수 있다는 장점으로 최근 들어 많은 연구가 되어 왔다. 섬유 강화 플라스틱의 경우 탄소섬유[13,14] 유리섬유[15,16] 케플러[17,18] 등으로 대표되는 섬유 등과 플라스틱을 복합화 시키는 것으로써 다양한 소재들이 이용되어 왔으며 대표적인 복합재료용 섬유소재에 대하여 Table 5에 정리하였다[19]. Table 6에 나타내었듯이, 내압성, 강도 분야에서 스테인리스 강과 비교해도 손색이 없을 정도로 우수한 물성을 가지고 상대적으로 저렴한 가격을 가짐으로써 보트, 낚시대 등의 생활용품 이외에 항공기용 부품, 자동차용 소재 등 광범위한 분야에 이용되고 있다[20]. 강화섬유 복합소재의 경우 소재의 종류와 무관하게 1상의 매트릭스에 첨가가 됨으로 인해 계면접착력의 향상과 방향성에 따른 물리적 강도의 부여를 통하여 다양하게 활용되어 왔다. 분리막 모듈의 경우 단일 폴리프로필렌, 폴리비닐클로라이드 등 저렴한 가격으로 고압이 요구가 되지 않는 기체분리막, 배수관용 하우징에 많이 사용되어 왔으나, 상대적으로 취약한 안정성을 가짐으로 인해 제한적으로 사용되어 왔다. 그러나 최근 들어 분리막 시장의 발전과, 시스템 설계간 물리적, 기계적 요소의 증가를 통하여 분리막 시스템의 적용을 위한 하우징 및 하우징용 부속품에 대한 요구 물성들이 증가가 됨으로 인해 자연스럽게 복합 소재에 대한 응용이 이루어지게 되었다. 본 리뷰에서는 최근 들어 분리막용 하우징에 많이 이용되고 있는 유리섬유강화 플라스틱 소재에 대한 연구개발 동향에 대하여 정리하였다.

3.1. 분리막 하우징 연구동향

Ahmet Çavdar 연구팀은 다양한 종류(Polypropylene (PP), carbon (CF), glass (GF) and polyvinyl alcohol

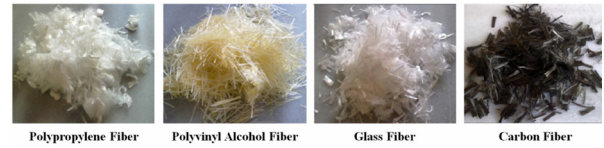


Fig. 6. The fibers used for the composite materials[21].



Fig. 7. Overview pictures for types of composites glass fiber and composite materials[22].

(PVA))의 fiber (Fig. 6)를 첨가한 복합체 소재에 대한 연구를 진행하였으며 온도변화에 따른 물리적 강도변화에 대한 연구를 진행하였다[21]. Muhsin J. Jweeg 그룹은 유리섬유의 형태에 따른 복합소재의 물성에 관한 연구를 진행하였으며 개발된 소재의 본 연구에서는 총 5가지 타입(Fig. 7)의 소재를 사용하여 평가를 진행하였다[22]. Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 long, woven composite materials 이 섬유의 배열과 방향에 따른 구분없이 polyester resin에 대하여 가장 우수한 물성을 나타내었으며 파우더, 입자형, 짧은 섬유형의 경우 복합화된 소재의 등방성에 의한 영향, 즉 섬유배열에 대한 영향을 많이 받았으며 고분자 매트릭스의 고유 물성에 대한 영향을 상대적으로 많이 받음을 확인할 수 있었다. Woven 타입의 경우 배열의 상태에 따라 3가지(Fig. 9)로 구분 지을 수 있으며 그림과 같은 형태로 다양하게 존재하고 있다[23]. A. Shakeri 연구팀은 유리섬유와

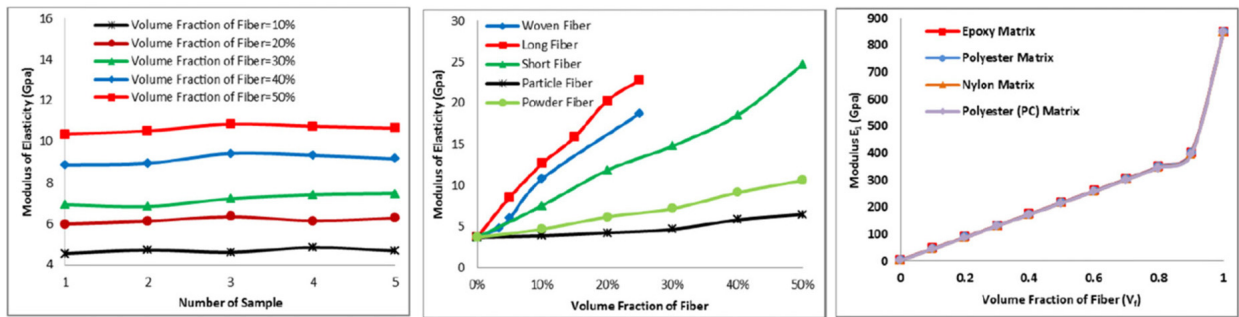


Fig. 8. Experimental testing result of the composite materials[22].

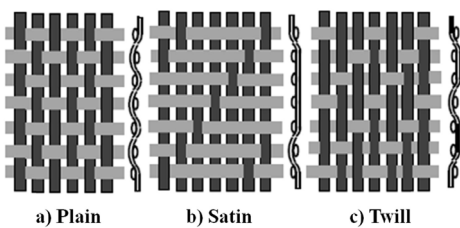


Fig. 9. Forms of woven fabrics[23].

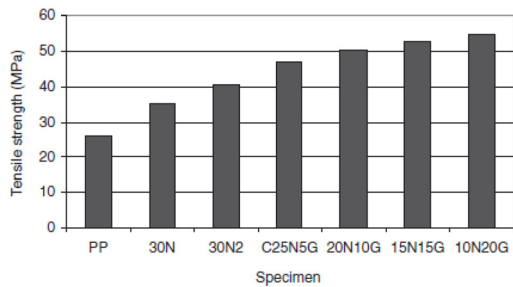


Fig. 10. Effect of glass fiber content on the tensile strength of NP/glass fiber hybrid polypropylene composites[24].

polypropylene 고분자 매트릭스를 복합화시킨 소재를 개발하였으며 첨가된 유리섬유의 함량이 증가됨에 따라 물리적 강도 및 탄성율이 증가가 됨을 확인하였으며 (Fig. 10) maleic anhydride (MA)를 커플링제로 사용하였을 때는 물성저하가 초래됨을 확인할 수 있었다 [24]. Pusz 연구팀의 경우 폴리아미드 매트릭스에 유리섬유를 첨가하여 Fig. 11과 같은 공정을 통해 샘플을 제조하였으며 Aging 온도에 따른 복합 소재의 물성변화를 관찰하였다. 복합화된 소재의 경우 높은 온도에서 우수한 물성을 나타냄을 확인하였으며 또한 열화칼슘, 염화포타슘 등 다양한 종류의 화학 물질 속에 담근 상태에서 물성의 감소 없이 유연한 상태를 유지하는 것을 확인할 수 있었다[25].

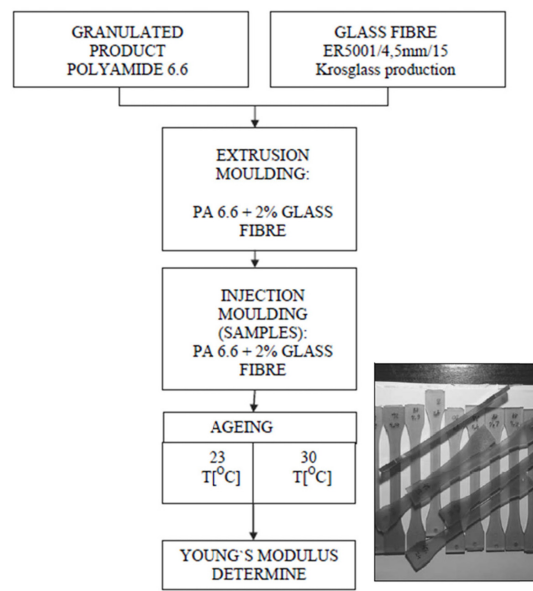


Fig. 11. Flow diagram of examinations and Samples for examinations[25].

3.2. 상용화 FRB module

위 내용에서 언급하였듯이 유리강화 폴리에스테르 (Glass reinforced polyester)는 가장 저렴하고 가장 널리 사용되는 복합재로써 실제 분리막 모듈에 사용되어 온 대표적인 소재 중 하나이다. 유리섬유는 이미 오래 전부터 복합소재 시스템에 접목되어 이미 축적된 성형기술로의 적용을 통해 대량생산이 가능하여 기본적으로 분리막 공정에 필요한 분리막 하우징의 원활한 공급을 위해 유리강화 플라스틱 소재가 주로 이용되어 왔다. 기본 제조공정으로는 resin infusion으로 금형에 수지를 주입하는 공법으로 매우 간편한 방법으로 요구가 되는 물성 조건에 맞추어 적층된 섬유를 넣어주는 형태로 제조가 가능하다. 폴리에스테르 수지 이외에 최근에는 초고속 경화형 epoxy 수지를 이용한 복합 소재의 개발이

Table 7. The Hybrid Fiber Reinforced Polymer Composites Preparation Methods[26]

Hybrid/Fiber	Resin	Curing Agent Catalyst	Accelerator	Manufacturing Methods	References
Pineapple/Sisal/Glass		MEKP	Cobalt naphthenate	Hydraulic Press	[27]
Sisal/Silk				Hand lay-up technique	[28]
Kenaf/Glass				Hand lay-up and Cold press	[29]
Woven Jute/Glass				Hand lay-up	[30]
Banana/Kenaf	Polyester			Hydraulic Compression moulding process	[31]
Banana/Sisal				Hand lay-up method followed by compression moulding	[32]
Glass/Palmyra				Hydraulic compression moulding process	[33]
Jute/Glass				Hand lay-up	[34]
Roselle/Sisal				Hand lay-up technique	[35]
Silk/Sisal				Hand lay-up technique	[36]
Banana/Sisal				Hydraulic Compression	[37]
Glass/Glass		Hy951 Hardener		Hand lay-up technique	[38]
Carbon/Glass	Epoxy	Hy225 Hardener		Hand lay-up technique	[39]
Oil Palm/Jute		Hardener		Compression moulding process	[40]
Chicken Feather/Glass		n-tert-butyl peroxybenzoate		Hot press	[41]
Basalt/Hemp				Hot pressing	[42]
Flax, Hemp and Jute				Hydraulic press	[43]
Bamboo/Glass	Polypropylene			Injection moulding	[44]
Cordenka/Jute				Injection moulding	[45]
Banana/Glass				Twin screw extrusion	[46]
Cork/coconut	HDPE			Screw extrusion and Compression moulding	[47]
Kenaf/Pineapple				Mixing and Compression moulding	[48]
Bamboo/Cellulose	poly lacctic acid			Injection moulding	[49]
OPEFB/Glass	Vinyl ester			Resin transfer moulding	[50]
Aramid/Sisal	Phenolic			Stirring, Drying, Compression	[51]

진행되는 등, 최근 들어 강화복합소재의 적용을 위한 섬유뿐만 아니라 고강도 고분자 매트릭스 소재에 대한 연구도 활발히 진행 중이다. 대표적인 유리섬유 적층 방법의 모식도를 Fig. 12에 나타내었으며, 대표적인 고분자/강화섬유 복합체의 개발 사례 및 개발소재를 가공하는 기술에 대한 내용을 Table 7에 정리하였다.

실제 강화섬유가 고분자 매트릭스 내에 첨가되어 제조 되었을 시 순수 고분자 매트릭스에 비교하여 물리적 강도는 10배 이상, 압축강도의 경우 20배 이상 향상되어 실제 분리막 모듈의 사용에 있어 단일 소재보다는 FRP 소재가 주목을 받고 있다(Table 8)[52]. 실제 현재

시장에 진출한 분리막 하우징의 경우 대부분이 유리섬유 강화 복합플라스틱 소재를 이용한 것으로서, Applied Membranes, Inc., Eden Equipment Company, Inc. 외에 다수의 기업에서 분리막용 FRB 하우징을 출시하여 판매 중이며 일부 기업의 판매제품에 대한 사진을 Fig. 13에 정리하였다. 이와 달리 최근 들어 유리섬유를 대체할 자원으로 탄소섬유, 아라미드 섬유 등이 각광을 받고 있지만, 상대적으로 비싼 가격으로 인해 고부가가치 소재부품 분야에 적용이 이루어지고 있으나, 탄소소재와 아라미드 소재의 단가 절감과 공정적 개선을 통해 분리막 하우징 시장에서도 다양한 복합소재가 활용

Table 8. Mechanical Properties of Composite Materials[52]

		S-glass/epoxy	Kevlar/epoxy	Hm Graphite/epoxy	Pine
Elastic property	E1,Gpa	55	80	230	13.4
	E2,Gpa	16	5.5	6.6	0.55
	G12,Gpa	7.6	2.1	4.8	0.83
	γ 12	0.26	0.31	0.25	0.3
Tensile Strength	σ 1,MPa	1800	2000	1100	78
	σ 2,MPa	40	20	21	2.1
	σ 12,MPa	80	40	65	6.2
Compressive Strength	σ 1,MPa	690	280	620	33
	σ 2,MPa	140	140	170	3
Physical Properties	α 1, 10-6/°C	2.1	-4	-0.7	
	α 2, 10-6/°C	6.3	60	28	
	Volume fraction	0.7	0.54	0.7	
	Thickness,mm	0.15	0.13	0.13	
	Density, Mg/m ³	2	1.38	1.63	0.55

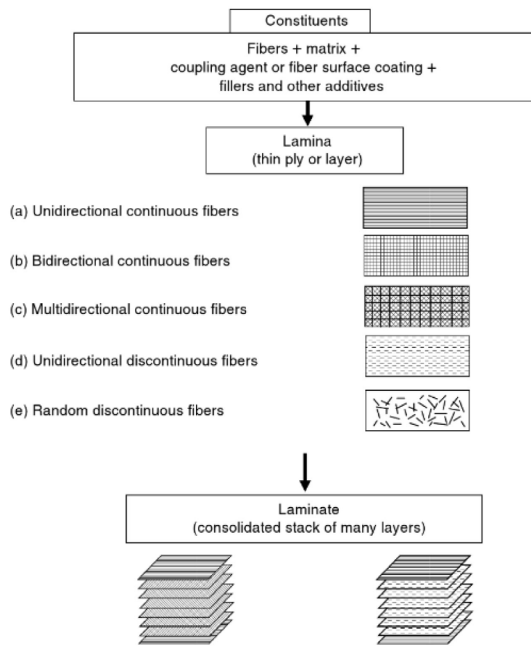


Fig. 12. Basic building blocks in fiber-reinforced composite[18].

될 수 있을 것으로 기대되고 있다.

4. 맺음말

분리막 하우징용 섬유강화 플라스틱은 현재 유리섬유를 사용한 폴리에스터와 에폭시 수지를 이용한 복합

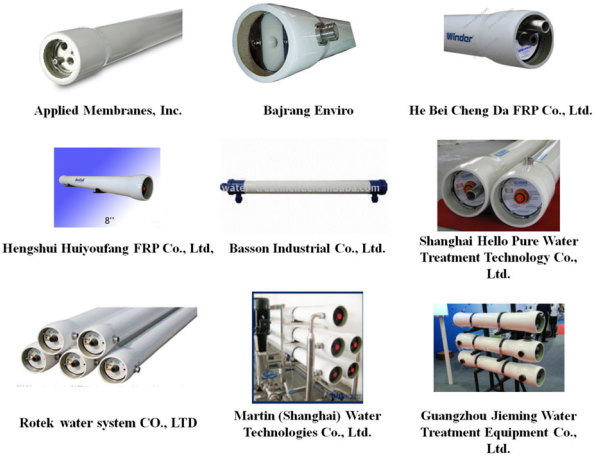


Fig. 13. Commercialized FRP membrane modules.

체를 이용하고 있다. 이는 탄소섬유, 아라미드 섬유 등의 가격이 상대적으로 고가이며, 가격의 변동성이 심하여 지속적인 수요에 대하여 문제점이 있기 때문이다. 산업의 발전과 더불어 분리막 시스템의 수요가 증가하고 있는 시점에서 더욱 컴팩트한 시스템의 구성을 위해서는 분리막 자체 성능의 향상과 더불어 실제 모듈이 구성되기 위한 요소들의 발전 또한 지속적으로 병행해야 된다. 본 리뷰에서는 분리막 하우징에 사용될 수 있는 여러 후보 소재들에 대한 개발동향에 대하여 정리하였으며, 지속적인 연구개발을 통해 유리섬유 이외에 상대적으로 저렴한 천연섬유 등을 활용한 연구들을 토대

로 기존 하우스징이 가지고 있는 물성보다 더 향상될 수 있는 분리막 하우스징의 개발을 이룰 수 있을 것으로 기대한다.

감 사

본 연구는 산업통상자원부 WPM (World Premier Materials)사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

Reference

1. Y. S. Jeon and J. W. Rhim, "Composite membrane preparation for low pressure using salting-out method and its", *Membr. J.*, **25**, 440 (2015).
2. S. Kwon and Y. T. Lee, "Improvement of fouling resistance with reverse osmosis membrane using multi-layer silane-epoxy surface modification", *Membr. J.*, **25**, 332 (2015).
3. K. M. Kyung and J. Y. Park, "Effect of pH in hybrid water treatment process of PVdF nanofibers spiral wound microfiltration and granular activated carbon", *Membr. J.*, **25**, 358 (2015).
4. P. K. Tewari, "Nanocomposite membrane technology: Fundamentals and applications", pp. 49, CRC Press, Boca Raton, FL (2015).
5. T. Varzakas and C. Tzia, "Food engineering handbook: Food engineering fundamentals", CRC Press, Boca Raton, FL (2014).
6. A. Basile, A. Cassano, and N. K. Rastogi, "Advances in membrane technologies for water treatment: Materials, processes and applications", pp. 61, Woodhead Publishing (Elsevier), Amsterdam, Netherlands (2015).
7. L. W. McKeen, "Permeability properties of plastics and elastomers, third edition (Plastics Design Library) 3rd edition", Elsevier, Amsterdam, Netherlands (2011).
8. A. F. Ismail and S. N. Kumari, "Potential effect of potting resin on the performance of hollow fibre membrane modules in a CO₂/CH₄ gas separation system", *J. Membr. Sci.*, **236**, 183 (2004).
9. H. Guan, F. Yang, and Q. Wang, "Study on evaluation index system of rubber materials for sealing", *Mater. Design*, **32**, 2404 (2011).
10. http://www.toraywater.com/products/parts/o_ring/index.html February 10 (2015).
11. J. Holbery and D. Houston, "Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications", *Jom*, **58**, 80 (2006).
12. H. El Kadi, "Modeling the mechanical behavior of fiber-reinforced polymeric composite materials using artificial neural networks-review", *Compos. Struct.*, **73**, 1 (2006).
13. E. Barjasteh, E. J. Bosze, Y. I. Tsai, and S. R. Nutt, "Thermal aging of fiberglass/carbon-fiber hybrid composites", *Compos. Pt. A-Appl. Sci. Manuf.*, **40**, 2038 (2009).
14. E. C. Botelho, R. A. Silva, L. C. Pardini, and M. C. Rezende, "A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures", *Materials Research*, **9**, 247 (2006).
15. J. Zhu, A. Imam, R. Crane, K. Lozano, V. N. Khabashesku, and E. V. Barrera, "Processing a glass fiber reinforced vinyl ester composite with nanotube enhancement of interlaminar shear strength", *Compos. Sci. and Technol.*, **67**, 1509 (2007).
16. K. Palanikumar, L. Karunamoorthy, and R. Karthikeyan, "Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fiber-reinforced polymer composites", *Mater. Design*, **27**, 862 (2006).
17. A. Salehi-Khojin, R. Bashirzadeh, M. Mahinfalah, and R. Nakhaei-Jazar, "The role of temperature on impact properties of Kevlar/fiberglass composite laminates", *Compos. Pt. B-Eng.*, **37**, 593 (2006).
18. P. K. Mallick, "Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design, third edition (Mechanical Engineering)" pp. 32, CRC Press, Boca Raton, FL (2007).
19. P. K. Mallick, "Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design", pp. 34, CRC

- press, CRC Press, Boca Raton, FL (2007).
20. <http://www.massey.ac.nz/~ychisti/MHandbook.pdf>.
 21. A. Cavdar, "A study on the effects of high temperature on mechanical properties of fiber reinforced cementitious composites", *Compos. Pt. B-Eng.*, **43**, 2452 (2012).
 22. M. J. Jweeg, A. P. D. A. S. Hammood, and M. Al-Waily, "Experimental and theoretical studies of mechanical properties for reinforcement fiber types of composite materials", *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, **12**, 62 (2012).
 23. D. Gay, "Composite materials: design and applications", CRC Press, Boca Raton, FL (2014).
 24. A. Shakeri and M. Raghimi, "Studies on mechanical performance and water absorption of recycled newspaper/glass fiber reinforced polypropylene hybrid composites", *J. Reinf. Plast. Comp.*, **00**, 1 (2009).
 25. A. Pusz, M. Szymiczek, and K. Michalik, "Ageing process influence on mechanical properties of polyamide-glass composites applied in dentistry", *Journal of Achievements in materials and manufacturing engineering*, **38**, 49 (2009).
 26. T. P. Sathishkumar, J. Naveen, and S. Satheeshkumar, "Characterization of natural fiber and composites - a review", *J. Reinf. Plast. Comp.*, **32**, 1446 (2013).
 27. S. Mishra, A. K. Mohanty, L. T. Drzal, M. Misra, S. Parija, S. K. Nayak, and S. S. Tripathy, "Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites", *Compos. Sci. Technol.*, **63**, 1377 (2003).
 28. P. N. Khanam, M. M. Reddy, K. Raghu, K. John, and S. V. Naidu, "Tensile, flexural and compressive properties of sisal/silk hybrid composites", *J. Reinf. Plast. Comp.*, **26**, 1065 (2007).
 29. M. A. A. Ghani, Z. Salleh, K. M. Hyie, M. N. Berhan, Y. M. D. Taib, and M. A. I. Bakri, "Mechanical properties of kenaf/fiberglass polyester hybrid composite", *Procedia Engineering*, **41**, 1654 (2012).
 30. K. S. Ahmed, S. Vijayarangan, and A. Kumar, "Low Velocity Impact Damage Characterization of Woven Jute-glass Fabric Reinforced Isothalic Polyester Hybrid Composites", *J. Reinf. Plast. Comp.*, **26**, 959 (2007).
 31. M. Thiruchitrabalam, A. Alavudeen, A. Athijayamani, N. Venkateshwaran, and A. E. Perumal, "Improving mechanical properties of banana/kenaf polyester hybrid composites using sodium laulryl sulfate treatment", *Mater. Phys. Mech.*, **8**, 165 (2009).
 32. M. Idicula, S. K. Malhotra, K. Joseph, and S. Thomas, "Dynamic mechanical analysis of randomly oriented intimately mixed short banana/sisal hybrid fibre reinforced polyester composites", *Compos. Sci. Technol.*, **65**, 1077 (2005).
 33. R. Velmurugan and V. Manikandan, "Mechanical properties of glass/palmyra fiber waste sandwich composites" *Indian. J. Eng. Mater. S.*, **12**, 563 (2005).
 34. K. S. Ahmed and S. Vijayaragan, "Elastic property evaluation of jute-glass fibre hybrid composite using experimental and CLT approach", *Indian. J. Eng. Mater. S.*, **13**, 435 (2006).
 35. A. Athijayamani, M. Thiruchitrabalam, U. Natarajan, and B. Pazhanivel, "Effect of moisture absorption on the mechanical properties of randomly oriented natural fibers/polyester hybrid composite", *Mater. Sci. Eng. A-Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process.*, **517**, 344 (2009).
 36. K. Raghu, P. N. Khanam, and S. V. Naidu, "Chemical resistance studies of silk/sisal fiber-reinforced unsaturated polyester-based hybrid composites", *J. Reinf. Plast. Comp.*, **0**, 1 (2008).
 37. N. Venkateshwaran, A. ElayaPerumal, A. Alavudeen, and M. Thiruchitrabalam, "Mechanical and water absorption behaviour of banana/sisal reinforced hybrid composites", *Mater. Design*, **32**, 4017 (2011).
 38. A. I. Selmy, A. R. Elsesi, N. A. Azab, and M. A. A. El-baky, "Monotonic properties of unidirectional glass fiber (U)/random glass fiber (R)/epoxy hybrid

- composites”, *Mater. Design*, **32**, 743 (2011).
39. M. Sayer, N. B. Bektas, E. Demir, and H. Callioglu, “The effect of temperatures on hybrid composite laminates under impact loading”, *Compos. Pt. B-Eng.*, **43**, 2152 (2012).
 40. M. Jawaid, H. P. S. A. Khalil, A. A. Bakar, and P. N. Khanam, “Chemical resistance, void content and tensile properties of oil palm/jute fibre reinforced polymer hybrid composites”, *Mater. Design*, **32**, 1014 (2011).
 41. M. Zhan, R. P. Wool, and J. Q. Xiao, “Electrical properties of chicken feather fiber reinforced epoxy composites”, *Compos. Pt. A-Appl. Sci. Manuf.*, **42**, 229 (2011).
 42. T. Czigany, “Special manufacturing and characteristics of basalt fiber reinforced hybrid polypropylene composites: mechanical properties and acoustic emission study”, *Compos. Sci. Technol.*, **66**, 3210 (2006).
 43. P. Wambua, B. Vangrimde, S. Lomov, and I. Verpoest, “The response of natural fibre composites to ballistic impact by fragment simulating projectiles”, *Compos. Struct.*, **77**, 232 (2007).
 44. M. M. Thwe and K. Liao, “Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites”, *Compos. Sci. Technol.*, **63**, 375 (2003).
 45. M. A. Khan, J. Ganster, and H.-P. Fink, “Hybrid composites of jute and man-made cellulose fibers with polypropylene by injection moulding”, *Compos. Pt. A-Appl. Sci. Manuf.*, **40**, 846 (2009).
 46. S. K. Nayak, “Degradation and flammability behavior of PP/banana and glass fiber-based hybrid composites”, *International Journal of Plastics Technology*, **13**, 47 (2009).
 47. E. M. Fernandes, V. M. Correlo, J. F. Mano, and R. L. Reis, “Novel cork-polymer composites reinforced with short natural coconut fibres: effect of fibre loading and coupling agent addition”, *Compos. Sci. Technol.*, **78**, 56 (2013).
 48. I. S. Aji, E. S. Zainudin, A. Khalina, S. M. Sapuan, and M. D. Khairul, “Studying the effect of fiber size and fiber loading on the mechanical properties of hybridized kenaf/PALF-reinforced HDPE composite”, *J. Reinf. Plast. Comp.*, **30**, 546 (2011).
 49. K. Okubo, T. Fujii, and E. T. Thostenson, “Multi-scale hybrid biocomposite: processing and mechanical characterization of bamboo fiber reinforced PLA with microfibrillated cellulose”, *Compos. Pt. A-Appl. Sci. Manuf.*, **40**, 469 (2009).
 50. H. P. S. A. Khalil, C. W. Kang, and T. O. Adawi, “The effect of different laminations on mechanical and physical properties of hybrid composites”, *J. Reinf. Plast. Comp.*, **0**, 1 (2008).
 51. L. X. Zhong, S. Y. Fu, X. S. Zhou, and H. Y. Zhan, “Effect of surface microfibrillation of sisal fibre on the mechanical properties of sisal/aramid fibre hybrid composites”, *Compos. Pt. A-Appl. Sci. Manuf.*, **2**, 244 (2011).
 52. F. P. Gerstle, “Composites,” *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, Wiley, New York (1991).