

상전이-압출 알루미늄 분리막 제조 공정에서 혼합 고분자 바인더 적용에 따른 성능 및 특성 평가

민 소 진* · 박아름이* · 권 용 성* · 김 대 훈* · 박 유 인** · 김 성 중***,† · 남 승 은*,††

*한국화학연구원 화학공정연구본부 그린탄소연구센터, **한국화학연구원 LCP융합연구단,

***한국세라믹기술원 바이오융합소재연구단 바이오헬스소재센터

(2023년 12월 5일 접수, 2023년 12월 19일 수정, 2023년 12월 19일 채택)

Performance and Characterization of Ceramic Membrane by Phase Inversion-Extrusion Process with Polymer Binder Mixing

Sojin Min*, Ahrumi Park*, Yongsung Kwon*, Daehun Kim*, You-In Park**, Seong-Joong Kim***,†, and Seung-Eun Nam*,††

*Green Carbon Research Center, Chemical & Process Technology Division, Korea Institute of Chemical Technology, Daejeon 34114, Republic of Korea

**Center for Low-Carbon Chemical Process, Korea Institute of Chemical Technology, Daejeon 34114, Republic of Korea

***Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Cheongju 28160, Republic of Korea

(Received December 5, 2023, Revised December 19, 2023, Accepted December 19, 2023)

요 약: 세라믹 분리막은 높은 열적, 화학적 안정성을 갖기 때문에 극한의 조건에서 운전되는 다양한 산업 공정에 적용할 수 있다. 그러나 투과도와 기계적 강도의 trade-off 현상에 의한 세라믹 분리막 활용에 제약이 있어, 고투과성-고강도 분리막의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 상전이-압출법으로 알루미늄 증공사 분리막을 제조하고, 고분자 바인더의 종류와 그 혼합비에 따른 분리막의 특성 변화를 관찰하였다. 용매인 DMAc (Dimethylacetamide)와 고분자 바인더의 한센 용해도 인자를 비교하면, PSf (polysulfone)가 DMAc와 높은 용해도 특성을 갖기 때문에 도프 용액의 점도와 토출압력이 높게 나타나 분리막 내부가 치밀한 구조로 형성되기 때문에 높은 기계적 강도를 갖으나 수투과도가 감소하는 것으로 확인되었다. 그에 반해, PES (polyethersulfone)를 이용하여 분리막을 제조하면 기계적 강도가 다소 감소하고 수투과도가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 분리막 성능과 물성을 최적화하기 위해 PSf와 PES를 혼합하여 분리막을 제조하였으며, 9:1로 혼합하여 제조된 분리막에서 최적화된 수투과도와 기계적 강도를 얻을 수 있었다.

Abstract: Ceramic membranes are generally used for various industrial processes operating under extreme conditions because of its high thermal and chemical stability. However, due to the trade-off phenomenon of permeability and mechanical strength, preparation of high permeability-high strength membrane is necessary. In this study, the change in characteristics and performances of ceramic membranes was analyzed depending on the type of polymer binder and its mixing ratio. Because the solubility between solvent and polymer binder was higher in PSf (polysulfone) than in PES (polyethersulfone), the viscosity and discharge pressure of the PSf-based dope solution were higher than those of PES-based dope solution. When PSf was used as a polymer binder, ceramic membrane showed high mechanical strength and low water permeability due to the dense structure. On the other hand, in case of PES, the mechanical strength was slightly reduced and the water permeability was increased. It was confirmed that the optimum mixing ratio of the PSf and PES with high water permeability and mechanical strength was 9:1.

Keywords: alumina hollow fiber membrane, phase inversion-extrusion, polymer binder, permeability, mechanical strength

† Corresponding author(e-mail: sjkim@kicet.re.kr; <http://orcid.org/0000-0001-9096-8362>)

†† Corresponding author(e-mail: senam@kricet.re.kr; <http://orcid.org/0000-0003-0090-5056>)

1. 서 론

세라믹 분리막은 기존에 널리 사용되어 온 고분자 분리막에 비해 강염기, 강산, 고온, 고압 등 극한 운전 조건에서 우수한 내구성을 가짐으로써 분리막 형태나 기공 구조의 손상 없이 장시간 안정적으로 운전이 가능하여 분리막의 수명이 길다는 장점을 갖는다[1-3]. 따라서 세라믹 분리막은 가혹한 운전조건을 갖는 정수, 하폐수 처리, 석유/정밀화학, 바이오화학 등의 다양한 산업 분야의 분리 정제 공정에서 유용하게 활용 가능하다[4,5]. 그러나 세라믹 분리막은 제조 공정이 까다롭고 대량생산이 어려워 제조단가가 높아 상업적 활용에 어려움이 있으며, 특히 취성을 가지고 있어 중공사 형태와 같은 세라믹 분리막의 기계적 강도가 낮으면 파손위험이 높아 취급 용이성이 낮은 단점이 있다[6-8]. 이를 해결하기 위해, 세라믹 분리막을 제조할 때 소결조제를 첨가하거나 소결온도를 높여 기계적 강도를 강화할 수 있으나, 기계적 강도를 강화하면 투과도가 감소하는 trade-off 현상이 있어, 높은 투과도와 기계적 강도를 동시에 갖는 분리막의 개발을 위한 연구가 필요하다[9-12].

세라믹 분리막의 주 재료는 알루미늄(알루미나, Al_2O_3), 지르코니아(zirconium oxide, ZrO_2), 타이타니아(titania, TiO_2), 제올라이트(zeolite) 등이 사용되고 있으며, 그 중 가장 저렴한 알루미늄이 널리 사용되고 있다[13-17]. 또한 기공형성제로 다양한 분자량의 polyethylene glycol (PEG), poly(vinyl pyrrolidone) (PVP), calcium carbonate ($CaCO_3$) 등이 사용되고 있으며[18], 기계적 강도의 강화를 위해 magnesium hydroxide ($Mg(OH)_2$), magnesium oxide (MgO), Molybdenum oxide (MoO_3) 등의 소결조제를 첨가하여 제조할 수 있다[19,20].

세라믹 분리막의 제조법으로는 압출법이 주로 사용되어 왔으나, 생산 속도가 매우 느려 생산단가가 높고 분리막의 구조 제어가 어려운 한계가 있다[18,21,22]. 또한 압출법을 통한 알루미늄 분리막 제조과정에서 고분자 바인더는 분리막 형태를 유지시키고, 도프 용액이 압출에 적합하도록 이동성과 안정성을 향상시키고 결합 및 균열이 발생하는 것을 최소화하는 역할을 하며 [18,23], polyethersulfone (PES), polysulfone (PSf), polyvinyl alcohol (PVA) 등이 주로 사용되고 있다[21,24].

본 연구에서는 기존 세라믹 분리막 제조 과정에서의 문제점을 보완하고, 생산 속도를 향상시킬 뿐만 아니라 높은 기계적 강도를 갖는 분리막을 제조하기 위해 상

전이-압출 제조법을 도입하였다. 이때, 고분자 바인더의 종류 및 혼합비에 따른 분리막의 수투과도 성능 및 기공 크기, 기계적 강도 등 특성 평가를 진행하였다. 고분자 바인더의 분자량과 용매와의 친화도에 따라 도프 용액의 점도에 영향을 끼치며, 분리막 제조 과정에서 내부 구조나 기공의 크기가 다르게 형성되므로, 최적 혼합비의 고분자 바인더를 사용함으로써, 높은 투과도와 기계적 강도를 동시에 갖는 분리막을 개발하고자 하였다.

2. 실 험

2.1. 재료

분리막의 주재료인 알루미늄 파우더는 Sumitomo사 (Tokyo, Japan)의 AES-23 ($2.2 \mu m$), AES-11H ($0.54 \mu m$)를 구매하여 사용하였다. 고분자 바인더로 PES (MW 72,000 g/mol, Ultrason E6020, BASF, Ludwigshafen, Germany)와 PSf (MW 62,000 g/mol, Ultrason S6010, BASF, Ludwigshafen, Germany)를 사용하였다. 용매 및 첨가제로 DMAc (Dimethylacetamide, Samchun Chemical), PEG (MW 200 g/mol, Samchun Chemical), $Mg(OH)_2$ (99.9%, Samchun Chemical)를 사용하였으며, 분산제로 Disperbyk-200 (BYK, Wesel, Germany)를 사용하였다.

2.2. 세라믹 중공사막 제조

알루미늄 중공사 분리막의 제조방법은 Fig. 1과 같다. 알루미늄 파우더를 제외한 DMAc, 고분자 바인더, 첨가

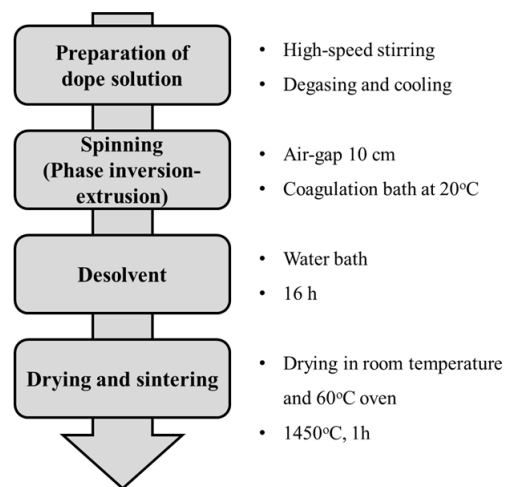


Fig. 1. The fabrication process of the alumina hollow-fiber membrane

Table 1. Composition of Dope Solution (wt%)

PSf:PES	Alumina	Polymer		PEG 200	Mg(OH) ₂	BYK	DMAc	Total
		PSf	PES					
0:10	70	0	6.70	3	1	0.5	17.8	100
5:5	70	3.35	3.35	3	1	0.5	17.8	100
8:2	70	5.36	1.34	3	1	0.5	17.8	100
9:1	70	6.03	0.67	3	1	0.5	17.8	100
10:0	70	6.70	0	3	1	0.5	17.8	100

제(PEG, Mg(OH)₂, Disperbyk-200)를 6시간 동안 60°C에서 60 rpm의 속도로 교반하고, 이후 알루미늄나 파우더를 추가하여 12시간동안 1000 rpm으로 혼합하여 도프 용액을 제조하였다. 도프 용액을 3시간동안 10 rpm으로 저속 교반하여 냉각 및 탈포하였고, 도프 용액의 최종 조성은 Table 1과 같다. 제조된 도프 용액은 압출 장비(Kneading vacuum extrusion molding machine, FM-P20, Miyazaki Iron Works Co., Ltd., Osaka, Japan)를 이용하여 이중 노즐을 통해 토출시켜 방사하였다. 이때 도프 용액의 토출량은 61.2 g/min으로 일정하게 유지하였고, 내부 응고액으로 증류수를 21 mL/min속도로 주입하였다. 방사된 도프 용액은 수도물(tap water)이 담긴 응고조에서 상전이 및 고형화 과정을 거친 후 수조에 16시간 이상 침지시켜 용매를 완전히 제거하였다. 제조된 분리막을 60°C 오븐에서 건조한 후, 3°C/min의 속도로 승온시켜 1450°C에서 1시간 소결하여 알루미늄나 증공사 분리막을 제조하였다.

2.3. 도프용액의 점도 및 토출압 측정

점도계(DV2T, Brookfield Engineering, MA, USA)를 사용하여 도프용액의 점도를 25°C에서 측정하였으며, 알루미늄나 증공사 분리막을 방사하면서 이중 노즐 전단부에 압력계를 설치하여 토출압력을 측정하였다.

2.4. 분리막 특성 및 성능평가

FE-SEM (field emission scanning electron microscopy, QuattroS, Thermo Fisher, MA, USA)을 이용하여 분리막의 형태 및 디멘전 등을 분석을 하였다. 분리막의 단면 및 표면 등을 샘플링하여 백금 코팅 후 가속 전압 20 kV에서 다양한 배율로 샘플을 촬영하였다.

분리막의 기계적 강도는 만능재료시험기(MINOS-020, MTDI Inc., Daejeon, Republic of Korea)를 사용하여 3

점 굽힘 강도를 확인했다. 이때, 시편에 증공사 분리막을 위치시키고 spun의 길이를 3 cm로 하여 3회 반복 측정하여 평균 내어 계산했다.

분리막의 기공 크기를 측정하기 위해 GLP (gas liquid porometry) 방법을 사용하였으며, 샘플링한 분리막을 15.95 ± 0.03 mN/n의 표면장력을 가지는 Porefil™ 용액에 완전히 침지시켜 5분간 적신 후 질소가스를 주입하여 Porolux™ 1000 (Porometer NV, USA) 시스템으로 wet curve와 dry curve를 측정하였다. 기공 크기의 계산을 위해 아래의 식 (1) Washburn 방정식을 사용하였다[25,26].

$$D = \frac{4 \times Sh \times St \times \cos\theta}{P} \quad (1)$$

D : pore diameter [μm]

Sh : shape factor

St : surface tension [dyn/cm]

θ : contact angle between the wetting liquid and substrate

P : pressure [bar]

분리막의 flux는 유효 막면적이 6.56 cm²인 투과셀에 증공사 분리막을 체결하고 상온에서 증류수를 투과하여 측정하였으며, back pressure regulator를 이용하여 1 bar를 유지하였다. 분리막의 water permeability는 아래 식 (2)를 사용하여 3회 반복 측정하여 평균값을 계산하였다. 이때, 전자 저울(UX4200H, Shimadzu, Kyoto, Japan)과 자동 계측 소프트웨어 프로그램을 이용하여 1분 단위로 증류수의 무게를 자동 측정하였다.

$$P = \frac{J}{\Delta P} = \frac{V}{A \cdot t \cdot \Delta P} \quad (2)$$

P : water permeability [L/(m² · h · bar)]

J : water flux [L/(m² · h)]

V : volume of permeated water [L/h]

A : membrane area [m²]

t : time [h]

ΔP : pressure [bar]

3. 결과 및 고찰

3.1. 고분자 바인더의 종류 및 혼합비에 따른 도프 용액의 점도 및 토출압력에 대한 영향

고분자 바인더로서 PSf와 PES의 혼합비를 달리하여 제조한 도프 용액의 점도를 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 2a에 나타났다. 고분자 바인더로 100% PES를 사용하면(Psf:PES = 0:10) 점도가 84,000 cps로 가장 낮았으며, PSf를 혼합하여 도프 용액 내 PSf의 비율이 증가할수록 점도도 증가하였다. 100% PSf를 사용하면(Psf:PES = 10:0) 점도가 159,000 cps로 가장 높게 나타났다. PSf의 분자량이 PES의 분자량보다 낮음에도 불구하고 PSf를 혼합한 도프 용액의 점도가 더 높았다. 고분자에 따른 점도 차이를 설명하기 위해, 고분자(Psf, PES)와 용매인 DMAc의 한센 용해도 인자(Hansen solubility parameter, HSP)를 계산하였다. HSP는 분산력(δ_d), 극성력(δ_p), 수소결합(δ_h)으로 구성되며, 각각의 parameter는 결합 에너지(cohesion energy)와 몰 부피에 대한 개별 작용기의 기여도에 기초하여 계산된다. 총 용해도(δ_t)는 아래의 식 (3)를 이용하여 계산하였다 [27,28].

$$\delta_t^2 = \delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2 \quad (3)$$

HSP를 이용하여 계산된 고분자와 용매 간의 용해도 특성을 Table 2에 나타났다. 고분자와 용매 간의 HSP 수치가 가까울수록 좋은 용매라고 할 수 있으며, 더 쉽게 비교하기 위해 총 용해도를 활용할 수 있다. DMAc 용매와 PSf의 총 용해도가 0.1 차이로 거의 유사한 것을 알 수 있으며, PES와의 총 용해도 차이는 1.4이다. 즉, DMAc와 PSf의 용해도 특성이 더 좋다고 할 수 있다. 용해도 특성이 좋을수록 고분자 사슬이 더 많이 풀어지게 되고 그 사슬이 주변과 상호작용하여 용액의 점도를 증가시킬 수 있다. 또한 고분자 사슬 풀림이 커짐에 따라 유체역학적 부피가 커져 고유 점도 또한 증가

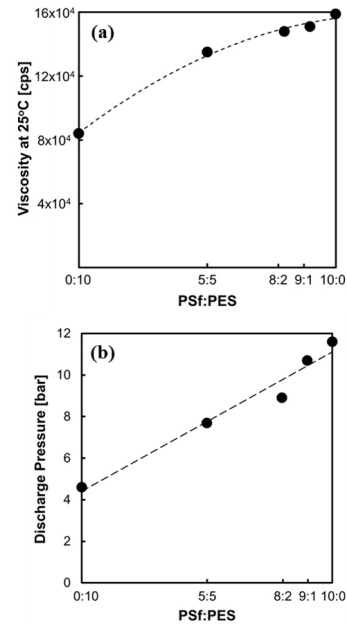


Fig. 2. (a) Viscosity and (b) discharge pressure of dope solution in various mixing ratio of polymer binder.

Table 2. HSP of PSf, PES, and DMAc

	δ_d	δ_p	δ_h	δ_t
DMAc	16.8	11.5	10.2	22.8
PSf	19.7	8.3	8.3	22.9
PES	19.6	10.8	9.2	24.2

할 수 있다. 따라서 용해도 특성이 더 높은 PSf가 낮은 PES보다 더 높은 점도를 가지는 것으로 판단된다.

균일하게 제조된 도프 용액을 방사 장비에 주입하고 이중 노즐에서 도프 용액이 나올 때 토출압력을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 2b에 나타났다. 토출량은 61.2 g/min로 일정하였으며, 100% PES를 사용했을 때(Psf:PES = 0:10) 토출압력이 가장 낮았고, PSf의 비율이 증가할수록 토출압력이 일정하게 증가한 것을 볼 수 있다. 토출압력 증가는 용매인 DMAc와 용해도 특성이 우수한 PSf가 첨가될수록 도프 용액의 점도 증가에 따른 것으로 판단된다. 결과적으로 도프 용액 내 PSf 함량 증가는 점도를 증가시키고, 방사 과정에서 토출압력 증가에 영향을 준다고 할 수 있다.

3.2. 알루미늄 증공사 분리막 구조 분석

Fig. 3은 제조된 알루미늄 증공사 분리막의 단면 및 표면의 SEM 이미지이다. 단면 SEM 이미지에서 증공

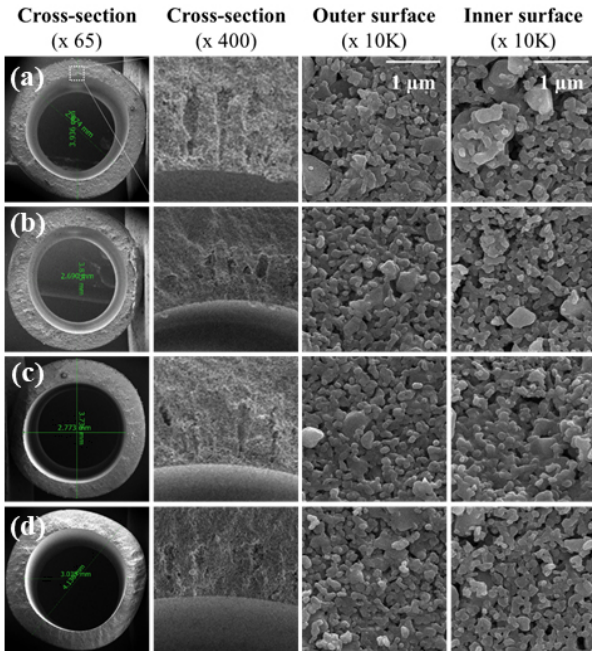


Fig. 3. SEM images of alumina membranes prepared with polymer binder of PSf:PES mixture in the ratio of (a) 0:10, (b) 5:5, (c) 9:1, and (d) 10:0.

Table 3. Outer/Inner Diameter and Thickness of Alumina Hollow-Fiber Membranes

PSf:PES	OD [mm]	ID [mm]	T [mm]
0:10	3.92	2.84	0.540
5:5	4.02	2.91	0.555
8:2	3.83	2.74	0.549
9:1	3.77	2.78	0.500
10:0	4.11	3.00	0.560

사 분리막 외경 및 내경은 각각 4.0 mm, 2.8 mm로 나타났으며, 두께는 약 0.5 mm로 큰 차이가 관찰되지 않았다(Table 3). 도프 용액 내 고분자 바인더의 종류 및 혼합비를 달리하였음에도 불구하고, 토출량(61.2 g/min)과 소결 온도(1450°C)를 일정하게 유지하였기 때문에 분리막의 외, 내경 및 두께가 유사한 것으로 판단된다. 고분자 바인더로 PES만 사용하는 경우(PSf:PES = 0:10), finger 구조가 더 많이 관찰되었고, PSf 함량이 증가함에 따라 finger 구조가 감소하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 분리막이 방사된 후 응고액과 만나면 상전이가 진행되면서 물이 침투하여 finger 구조를 형성하게 된다. 하지만 앞서 언급하였듯이 PSf를 포함한

Table 4. Mean and Max Pore Size of Alumina Hollow-Fiber Membranes

PSf:PES	Mean pore size [nm]	Max pore size [nm]
0:10	123	348
5:5	113	297
8:2	107	281
9:1	110	276
10:0	99	232

도프 용액은 점도 및 토출압력이 높기 때문에 더 치밀하고 단단한 형태의 분리막이 방사되게 되는데, 상전이 과정에서 응고액의 침투가 어려워 finger 형태의 구조가 감소하는 것으로 판단된다.

알루미나 파우더의 경우 2.2 μm 의 크기를 갖는 AES-23과 540 nm의 크기를 갖는 AES-11H를 혼합하여 분리막을 제조하였고, outer surface와 inner surface SEM 이미지를 보면, 알루미나 파우더가 고르게 분산되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 파우더 사이에 고분자 바인더 및 기공 형성제가 소결되어 기공이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다.

3.3. 분리막 기공 크기 분석

제조된 분리막의 평균 기공 크기와 최대 기공 크기를 Table 4에 나타내었다. 알루미나 중공사 분리막의 평균 기공 크기는 99~123 nm, 최대 기공 크기는 232~348 nm의 범위를 갖는다. 평균 기공 크기는 100% PES를 사용했을 때 123 nm로 가장 크게 관찰되었고, 100% PSf를 사용하면 99 nm로 가장 작게 나타났다. 고분자 바인더를 혼합할 경우 110 nm 내외의 평균 기공 크기를 갖는다. 최대 기공 크기는 100% PES를 사용했을 때 가장 크게 나타났고, 도프 용액의 PSf의 함량이 증가할수록 기공 크기가 감소하였다. 특히, 10% PES 첨가에도 불구하고 평균 및 최대 기공 크기가 급격하게 증가하였으며, 이후 첨가량 증가에 따라서는 기공 크기가 일정하게 증가하였다. 10%의 PES첨가만으로도 상당한 기공 크기 변화에 따른 성능 및 물성 변화를 기대할 수 있다.

분리막의 기공 분포도를 Fig. 4에 나타냈으며, 전체적으로 도프 용액의 PSf 함량이 증가할수록 기공 크기가 작아지고, 분포도가 좁게 나타났다. 이는 PSf가 첨가된 도프 용액의 높은 점도가 토출압력을 증가시켰고, 더 단단하고 치밀한 구조의 분리막을 제조함으로써 기공

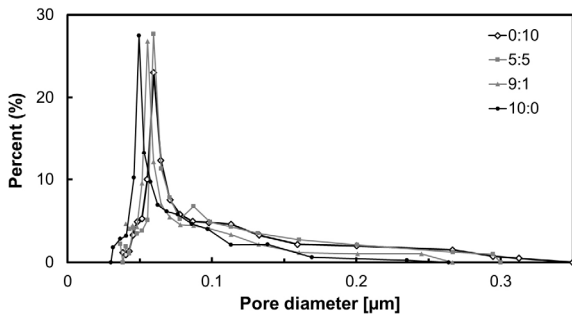


Fig. 4. Pore size distribution of alumina membranes prepared with different ratio of polymer binder (PSf:PES).

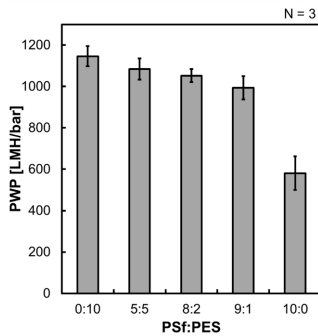


Fig. 5. Pure water permeability of alumina membranes prepared with different ratio of polymer binder (PSf:PES).

크기가 감소하고 기공 분포도도 더 균일해진다고 할 수 있다.

3.4. 분리막의 수투과도 및 기계적 강도

제조된 분리막의 수투과도는 Fig. 5에 나타내었다. 도프 용액의 PES 함량이 증가할수록 분리막의 수투과도가 증가하였으며, 100% PES로 제조된 분리막의 수투과도는 1160 LMH/bar로 매우 높게 나타났다. PSf 함량이 증가할수록 수투과도가 크게 감소하였고, 100% PSf를 이용하여 제조된 분리막의 수투과도가 581 LMH/bar까지 감소하였다. 이는 PSf 기반 분리막이 더 치밀하게 제조됨에 따라, Table 4에서와 같이 평균 및 최대 기공 크기가 상당히 감소되었기 때문으로 판단된다.

1450°C에서 소결하여 제조된 중공사 분리막의 기계적 강도를 Fig. 6에 나타내었다. PSf의 함량이 증가하고 PES의 함량이 감소할수록 기계적 강도가 증가하는 경향을 보인다. 100% PES와 PSf 기반 분리막의 기계적 강도는 각각 47, 89 MPa이었으며, PSf를 사용했을 때 기계적 강도가 2배 이상 증가하였다. 이는 앞서 언급되

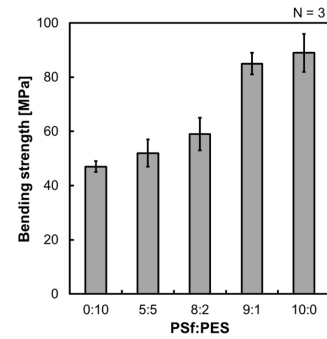


Fig. 6. Bending strength of alumina membranes prepared with different ratio of polymer binder (PSf:PES).

었던 더 작고 치밀한 기공 크기 및 구조를 가지는 PSf 기반 분리막의 분석 결과와 일치한다(Table 3, Fig. 3 and 4).

분리막의 수투과도는 100% PSf를 제외한 모든 분리막에서 1000 LMH/bar 내외의 수투과도를 갖으며, PES를 10%만 첨가하여도(PSf:PES = 9:1) 수투과도가 크게 증가하였다. 분리막의 기계적 강도는 PSf:PES가 9:1, 10:0일 때 각각 85 MPa, 89 MPa이다. PES가 10% 첨가되어도(PSf:PES = 9:1) 분리막의 기계적 강도 감소가 크지 않았으며, 8:2로 PSf 함량이 감소하면서, 기계적 강도 감소가 매우 큰 것으로 나타났다(Fig. 5). 따라서 PSf:PES가 9:1 분리막이 993 LMH/bar의 높은 수투과도와 85 MPa의 높은 기계적 강도를 동시에 갖는 최적의 고분자 혼합비로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 한외여과막 수준의 알루미늄 중공사 분리막을 제조하였고, 고분자 바인더의 종류 및 혼합비에 따른 분리막의 특성 및 성능을 분석하였다. 100% PES를 사용할 경우 도프 용액의 점도와 토출압력이 낮게 나타났으며, 분리막의 수투과도는 높았으나 기계적 강도가 낮았다. 고분자 바인더로써 PSf와 PES를 혼합하는 경우 PSf 함량이 증가할수록 도프 용액의 점도와 토출압력이 증가하였고, 분리막 구조가 조밀해지면서 평균 및 최대 기공 크기가 감소하였다. 이로 인해 수투과도가 감소하고 기계적 강도는 증가하는 분리막을 제조할 수 있다. 결과적으로 분리막의 수투과도가 증가하면 기계적 강도가 감소하는 trade-off 현상이 본 연구에서도 관찰되었다. 분리막의 수투과도 측면에서는 PES

를 사용하는 것이 유리하였고, 기계적 강도를 고려하면 PSf 기반 분리막이 더 적합하였다. PSf와 PES를 혼합하여 수투과도와 기계적 강도를 제어하였고, 9:1 비율로 제조된 분리막에서 993 LMH/bar 의 높은 수투과도와 85 MPa의 높은 기계적 강도를 동시에 가지는 최적화 조건을 확보할 수 있었다. 본 연구는 분리막 공정에 알루미늄 분리막을 활용할 때, 요구되는 성능 및 특성에 따라 고분자 바인더를 선택하여 알루미늄 분리막을 제조하는 데 활용할 수 있다.

감 사

이 논문은 2023년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 융합연구단사업(No. CRC220 42-300)의 지원을 받아 수행된 연구임.

Reference

1. Y. Wang, B. Ma, M. Ulbricht, Y. Dong, and X. Zhao, "Progress in alumina ceramic membranes for water purification: Status and prospects", *Water Res.*, **226**, 119173 (2022).
2. M. B. Asif and Z. Zhang, "Ceramic membrane technology for water and wastewater treatment: A critical review of performance, full-scale applications, membrane fouling and prospects", *Chem. Eng. J.*, **418**, 129481 (2021).
3. H. J. Lee, M. K. Kim, J. H. Park, and E. Magnone, "Temperature and pressure dependence of the CO₂ absorption through a ceramic hollow fiber membrane contactor module", *Chem. Eng. Process*, **150**, 107871 (2020).
4. K. M. Majewska-Nowak, "Application of ceramic membranes for the separation of dye particles", *Desalination*, **254**, 185-191 (2010).
5. S. G. Lehman and L. Liu, "Application of ceramic membranes with pre-ozonation for treatment of secondary wastewater effluent", *Water Res.*, **43**, 2020-2028 (2009).
6. T. Tsuru, "Inorganic porous membranes for liquid phase separation", *Sep. Purif. Methods*, **30**, 191-220 (2001).
7. P. de Wit, F. S. van Daalen, and N. E. Benes, "The mechanical strength of a ceramic porous hollow fiber", *J. Membr. Sci.*, **524**, 721-728 (2017).
8. S. K. Amin, M. H. Roushdy, and C. A. El-Sherbiny, "An overview of production and development of ceramic membranes", *Engineering at BUE Scholar*, **11**, 7708-7721 (2016).
9. J. Mo, X. Li, and Z. Yang, "Elucidating the role of interlayer structure in the permeance-selectivity trade-off of ceramic nanofiltration membrane", *Sep. Purif. Technol.*, **319**, 124056 (2023).
10. Q. Gu, M. Kotobuki, C. H. Kirk, M. He, G. J. Lim, T. C. A. Ng, L. Zhang, H. Y. Ng, and J. Wang, "Overcoming the trade-off between water permeation and mechanical strength of ceramic membrane supports by interfacial engineering", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 29199-29211 (2021).
11. H. B. Park, J. Kamcev, L. M. Robeson, M. Elimelech, and B. D. Freeman, "Maximizing the right stuff: The trade-off between membrane permeability and selectivity", *Science*, **356**, eaab0530 (2017).
12. W. Zhu, Y. Liu, K. Guan, C. Peng, and J. Wu, "Design and optimization of ceramic membrane structure: from the perspective of flux matching between support and membrane", *Ceram. Int.*, **47**, 12357-12365 (2021).
13. B. Van der Bruggen, C. Vandecasteele, T. Van Gestel, W. Doyen, and R. Leysen, "A review of pressure-driven membrane processes in wastewater treatment and drinking water production", *Environ. Prog. Sustain. Energy*, **22**, 46-56 (2003).
14. T. Kuzniatsova, M. Mottern, K. Shqau, D. Yu, and H. Verweij, "Micro-structural optimization of supported γ -alumina membranes", *J. Membr. Sci.*, **316**, 80-88 (2008).
15. M. Nomura, K. Ono, S. Gopalakrishnan, T. Sugawara, and S.-I. Nakao, "Preparation of a stable silica membrane by a counter diffusion chemical vapor deposition method", *J. Membr. Sci.*,

- 251, 151-158 (2005).
16. H. Qi, G. Zhu, L. Li, and N. Xu, "Fabrication of a sol-gel derived microporous zirconia membrane for nanofiltration", *J. Solgel Sci. Technol.*, **62**, 208-216 (2012).
 17. J. Sekulić, J. E. ten Elshof, and D. A. Blank, "A microporous titania membrane for nanofiltration and pervaporation", *Adv. Mater.*, **16**, 1546-1550 (2004).
 18. D. Liang, J. Huang, H. Zhang, H. Fu, Y. Zhang, and H. Chen, "Influencing factors on the performance of tubular ceramic membrane supports prepared by extrusion", *Ceram. Int.*, **47**, 10464-10477 (2021).
 19. Y.-B. Kim, M.-Z. Kim, D. Arepalli, and C.-H. Cho, "Improvement in mechanical strength of α -alumina hollow fiber membrane by introducing nanosize γ -alumina particle as sintering agent", *Membr. J.*, **32**, 150-162 (2022).
 20. P. Monash, G. Pugazhenth, and P. Saravanan, "Various fabrication methods of porous ceramic supports for membrane applications", *Rev. Chem. Eng.*, **29**, 357-383 (2013).
 21. P. Fan, K. Zhen, Z. Zan, Z. Chao, Z. Jian, and J. Yun, "Preparation and development of porous ceramic membrane supports fabricated by extrusion technique", *Chem. Eng. Trans.*, **55**, 277-282 (2016).
 22. M.-M. Lorente-Ayza, S. Mestre, M. Menéndez, and E. Sánchez, "Comparison of extruded and pressed low cost ceramic supports for micro-filtration membranes", *J. Eur. Ceram. Soc.*, **35**, 3681-3691 (2015).
 23. K. P. Goswami and G. Pugazhenth, "Effect of binder concentration on properties of low-cost fly ash-based tubular ceramic membrane and its application in separation of glycerol from biodiesel", *J. Clean. Prod.*, **319**, 128679 (2021).
 24. K. Hemra, D. Atong, and P. Aungkavattana, "Preparation of micro-porous alumina sheet support for ceramic membrane by extrusion", *J. Solid Mech. Mater. Eng.*, **1**, 547-555 (2007).
 25. Q. Liu, Y. F. Hu, and Q. L. Wang, "Researches on fractal features of graphite porous materials", *Adv Mat Res*, **507**, 25-29 (2012).
 26. M. Brugnara, E. Degasper, C. Della Volpe, D. Maniglio, A. Penati, and S. Siboni, "Wettability of porous materials, II: Can we obtain the contact angle from the Washburn equation", *Contact Angle, Wettability and Adhesion*, **4**, 143-164 (2006).
 27. K. Baruah, S. Hazarika, S. Borthakur, and N. N. Dutta, "Preparation and characterization of poly-sulfone-cyclodextrin composite nanofiltration membrane: Solvent effect", *J. Appl. Polym. Sci.*, **125**, 3888-3898 (2012).
 28. Y.-M. Wei, Z.-L. Xu, X.-T. Yang, and H.-L. Liu, "Mathematical calculation of binodal curves of a polymer/solvent/nonsolvent system in the phase inversion process", *Desalination*, **192**, 91-104 (2006).