

## IPA 수용액으로부터 수분제거를 위한 침지형 모듈 제조와 투과증발 특성

우 승 문 · 박 윤 환 · 남 상 용<sup>†</sup>

경상대학교 나노신소재융합공학과 공학연구원  
(2018년 8월 23일 접수, 2018년 8월 28일 수정, 2018년 8월 28일 채택)

### Pervaporation Performance of Submerged Type Membrane for the Separation of Water from Aqueous Isopropanol Solution

Seung Moon Woo, Yun Hwan Park, and Sang Yong Nam<sup>†</sup>

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

(Received August 23, 2018, Revised August 28, 2018, Accepted August 28, 2018)

**요 약:** 이소프로필알코올/물 혼합물은 가교된 폴리비닐알코올 복합막을 이용하여 투과특성평을 알아보았다. 검화도가 다른 3종 PVA를 이용하여 고분자의 농도와 GA 농도에 따라서 투과특성을 확인하였다. 복합막은 PVA 용액을 PAN 지지체 위에 캐스팅한 후, 열가교를 통해 제조하였다. PVA 농도가 증가할수록 투과도는 감소하지만 선택도는 증가하는 것을 확인하였다. PVA-3이 7 wt% 농도로 코팅된 복합막에서 209 g/m<sup>2</sup>h의 투과도를 가지고, 100 이상의 선택도를 가지는 것을 확인하였다. 침지형 분리막을 제조하여 feed tank 온도와 feed 용액의 IPA 농도에 따라서 투과실험을 확인하였다. 또한 IPA 수용액에 농축실험을 지속적으로 한 결과, 60시간 후에 IPA의 농도가 99%까지 증가하는 것을 확인하였다.

**Abstract:** The pervaporation separation of isopropanol/water mixture was carried out on a series of chemically cross-linked poly(vinyl alcohol)(PVA) composite membranes. The membranes were prepared by casting three kinds of PVA solutions with varying concentrations of PVA and GA onto polyacrylonitrile (PAN) support followed by thermal cross linking. As the PVA concentration increased, the flux decreased but separation factor was increased. It was confirmed that the composite membrane coated with PVA-3 (98~99% hydrolyzed) at a concentration of 7 wt% PVA and 20 wt% glutaraldehyde (GA) exhibited a flux of 209 g/m<sup>2</sup>h and a separation factor of more than 100. The submerged module test was carried out with controlled feed tank temperature and IPA concentration of the feed solution. The continuous concentration of IPA solution was increased from 90% to 99% after 60 h.

**Keywords:** Submerged membrane module, poly(vinyl alcohol), dehydration, pervaporation, glutaraldehyde (GA)

#### 1. 서 론

최근 산업의 고도화 및 다변화로 인한 고순도, 고품위의 제품이 요구됨에 따라 분리막 공정은 대단히 중요한 공정으로 인식되고 있어 화학공업, 식품공업, 약품공업 등의 공업 분야뿐만 아니라 의료, 생화학 및 환경 분야에 이르기까지 중요한 기술로 부각되고 있다. 특히 분리막 기술을 이용한 분리 공정은 상변화가 없고, 에

너지 소모가 적은 장점 때문에 해수담수화를 비롯한 공업용수 처리, 폐수 재활용 등의 수처리 분야에서 상업화된 이후 분리막 소재의 개발에 의해 식품공업의 분리 농축, 화학공업의 분리, 정제, 산소부화 등의 기체분리 및 인공신장에 의한 혈액투석에 이르기까지 광범위하게 응용되고 있다. 또한 분리막을 이용한 청정기술은 공정 내에서 재사용하거나 유가물질을 회수 또는 타 산업에서 재활용이 가능하여 환경오염에 대한 부하를 저

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

**Table 1.** Composition of PVA Composite Membranes with Hydrolysis and Concentration

Polymer	Hydrolysis	wt%	Solubility
PVA-1	80%	1	○
		3	○
		5	○
		7	○
		10	○
PVA-2	86~90%	1	○
		3	○
		5	○
		7	○
		10	×
PVA-3	98~99%	1	○
		3	○
		5	○
		7	○
		10	×

감시할 수 있는 기술로서 각광을 받고 있으며 자원 수명연장과 재자원화 역할을 수행하고 있다.

다양한 분리공정 중에서 투과증발은 분리하고자 하는 대상의 물질을 각 성분에 대해 비다공성 선택투과막을 이용하면서 투과측에는 감압에 따른 증기 상으로의 전환과 응축을 통해 혼합물에서 한 성분을 분리하는 공정이다[1]. 투과증발은 액체 혼합물의 분자 크기의 차이를 이용하여 분리하는 공정이다. 가열로 인해 침투된 vapor는 고분자 사슬 사이의 공간을 통하여 이동하게 된다. 투과증발막에서 일어나는 투과현상은 2가지의 기본적인 모델인 solution-diffusion model로 설명될 수 있다[2-3]. Solution-diffusion model은 가스 투과거동을 설명하기 위해 Graham에 의해 밝혀졌으며 이 모델은 실험과 일치가 잘 되었기 때문에 많은 연구자들이 이 연구에 관해 많은 관심을 가지게 하는 계기가 되었다. 먼저, 막의 feed side로 혼합물의 선택적인 sorption, 두 번째로 막을 통한 선택적인 diffusion, 마지막으로 막으로부터 기화된 혼합물의 desorption이 3단계 메커니즘을 이용하여 투과증발거동을 설명되어진다[4].

Rim 그룹에서는 PDMS와 PVA과 같은 소수성, 친수성 물질을 이용하여 알코올 탈수공정을 발표하였으며, 투과도는 각각 116, 1,870 g/m<sup>2</sup>h로 나타났으며, 또한 PEI, PVDF 등 다양한 지지체를 이용하여 코팅하여 탈

수공정에 우수한 결과를 발표하였다[5-8]. Chung 그룹에서는 폴리이미드를 thermally rearrangement 시킨 고분자를 이용하여 IPA 수용액에서 탈수공정이 개발되었다[9]. 그리고 최근에는 실리카, 제올라이트 그리고 그래핀 등과 같은 나노입자를 첨가하여 분리막의 투과분리 성능을 높인 연구도 다양하게 발표되고 있다[10-13].

일반적인 투과증발을 이용한 탈수 공정은 유기용매의 수분을 제거하여 고농도로 만드는 것을 목적으로 하고 있으나, 본 연구에서는 수분제거용 침지형 투과증발 멤브레인 및 모듈을 개발하고자 검화도가 다른 PVA를 이용하여 최적의 복합막을 제조하고, 고분자의 농도와 GA의 농도에 따라서 투과실험을 진행하고, 최적화된 분리막을 이용하여 침지형 모듈을 제조하여 공급용액의 온도와 조성에 따라서 실험을 진행하고 최종적으로 IPA 수용액에서의 IPA의 농도를 일정하게 유지하기 위해서 침지형 모듈 및 시스템에 적용하여 실험을 진행하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 시약 및 재료

PAN (polyacrylonitrile) 지지체 분리막은 nanostone 으로부터 구매하여 사용하였다. 막의 순수투과도는 700 LMH/bar이며, MWCO (molecular weight cut off)는 150,000인 PAN 350을 이용하였다. 코팅 고분자로 PVA (poly vinyl alcohol, JVP Co.Ltd., 검화도 80, 86-90, 98-99%)를 검화도에 따라서 3종을 구매하여 사용하였고, 가교제인 GA (glutaldehyd, JINSEI chemical Co.Ltd.)를 구입하여 사용하였다. 투과증발의 feed 용액 제조를 위하여 IPA (isopropyl alcohol, Deajung chemicals & methals Co.Ltd.)와 증류수(Yonglin pure water system)를 사용하였다.

### 2.2. 분리막 제조

PVA는 진공오븐에서 수분을 제거하여 사용하였으며, 80°C의 증류수에 8시간 동안 교반시켜 고분자 농도별로 용액을 제조하였다(Table 1). 제조된 고분자 용액에 GA를 PVA 함량을 기준으로 10, 20, 30, 40 wt% 첨가 후, 4시간 동안 교반하여 캐스팅 용액을 제조하였다. 제조된 캐스팅 용액은 PAN 지지체 위에 캐스팅 나이프로 제막 후, 상온에서 24시간 건조하고, 120°C 오븐에서 열처리를 통해 가교반응을 진행하였고, 최종적으로

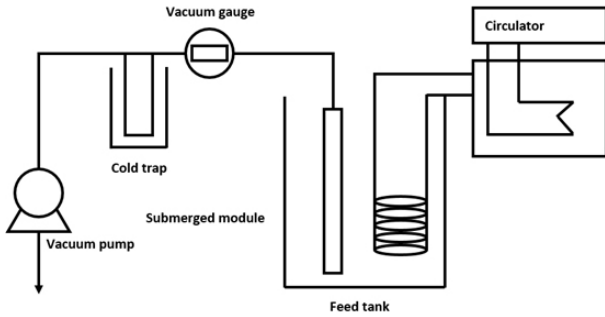


Fig. 1. Schematic diagram of the pervaporation test apparatus.

PVA 복합막을 제조하였다. 제조된 PVA 복합막은 ATR-FTIR (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared, iS5, Thermo scientific, USA)을 이용하여 가교가 된 것을 확인하였다.

### 2.3. 분리막 모듈 제조

본 실험에서 사용된 모듈은 침지형 모듈로서, PP 소재의 타공판을 모듈 사이에 넣어 중앙으로 투과된 용액이 모이도록 하였고, PP 부직포를 타공판과 분리막 사이에 넣어 타공판에 의해 분리막 표면이 손상되는 것을 방지하였다. 모듈과 분리막은 PVC 접착제를 이용하여 고정시키고, 2형 에폭시를 이용하여 분리막과 모듈 사이에 leak 없이 마감하여 사용하였다. 제조된 침지형 복합막 모듈의 유효면적은 0.76 m<sup>2</sup>이며, 실험 전에 분리막 모듈에 진공을 걸어 leak test를 진행 후, 투과증발 실험을 실시하였다.

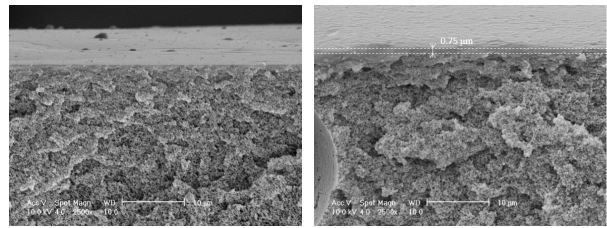
### 2.4. 투과증발 실험

본 실험에 사용된 Lab. sacle의 투과증발 장치를 사용하였으며, Fig. 1에 장비의 모식도를 나타내었다. feed tank의 농도는 IPA/water = 90/10 wt%이며, feed tank의 온도는 항온 장비를 이용하여 30°C로 유지하였다. 투과압력은 진공펌프에 의해서 일정하게 유지되었다. 30분 동안 안정화 후, 운전시간 10분 동안 막을 통과한 투과 용액은 액체질소가 담겨져 있는 트랩에 일정 시간 동안 포집된 무게를 측정하여 투과도를 계산하였다. 투과도(F)와 선택도( $\alpha$ )는 아래의 식 (1)과 (2)를 이용하여 계산하였다.

$$F \left( \frac{g}{m^2 \cdot hr} \right) = \frac{Q}{A \cdot T} \quad (1)$$



Fig. 2. Submerged type pervaporation system and module.



(a) support membrane

(b) PVA composite membrane

Fig. 3. Cross sectional morphologies of (a) support membrane and (b) PVA composite membrane.

$$\alpha = \frac{Y_i / Y_j}{X_i / X_j} \quad (2)$$

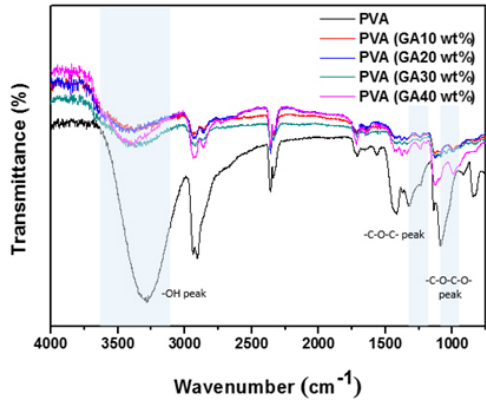
여기서, 식 (1)의 F는 투과도(flux), Q는 투과된 양(g), A는 분리막의 면적(m<sup>2</sup>), 그리고 T는 투과시간(h)를 나타내며, 식 (2)에서는  $\alpha$ 는 선택도를, X는 공급용액의 조성(feed composition), Y는 투과용액의 조성(permeate composition)을 나타내며, i와 j는 각각의 성분의 조성을 나타낸다[5].

Fig. 2에는 침지형의 모듈과 이를 이용한 투과증발 시스템을 나타내었다. feed tank의 온도, 조성에 따라서 투과특성을 확인하였다. 그리고 IPA 수용액으로 구성되어 있는 feed tank의 IPA의 장기 농축실험을 진행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 분리막 제조

Fig. 3에는 지지체의 단면 모폴로지와 PVA 복합막의 모폴로지를 나타내었다. PVA 복합막에는 지지체에서 나타나지 않은 선택층이 생성된 것을 확인하였다. 제조된 PVA 복합막의 가교 유무는 아래의 Fig. 4의



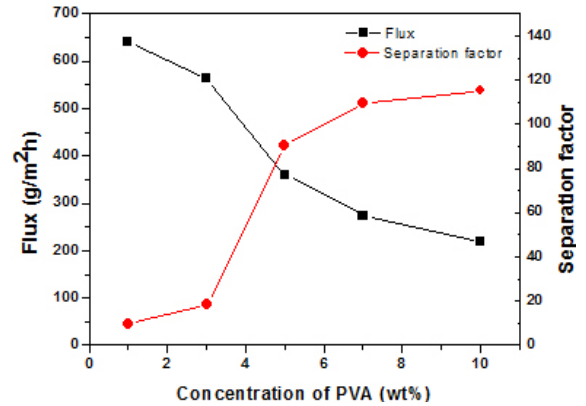
**Fig. 4.** ATR-FTIR spectra of PVA and cross-linked composite membranes.

ATR-FTIR을 통해서 확인하였다. 가교되지 않은 PVA 복합막과 가교된 PVA 복합막을 비교하여 보면 3,000-3,400  $\text{cm}^{-1}$ 에서 peak가 감소된 것을 확인할 수 있었다. 이는 PVA의 hydroxyl group (-OH)과 GA의 aldehyde group (-CH=O) 사이에서 반응이 일어났기 때문에 감소하였다고 사료된다. 또한, 997, 1,240  $\text{cm}^{-1}$ 에 두 개의 흡수 peak는 고분자 네트워크에서 각각 acetal group (-C-O-C-O-)와 ether group (-C-O-C-)이 GA의 함량에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 결과적으로 PVA로 코팅된 복합막은 GA로 인해 가교반응이 진행된 것을 확인하였다.

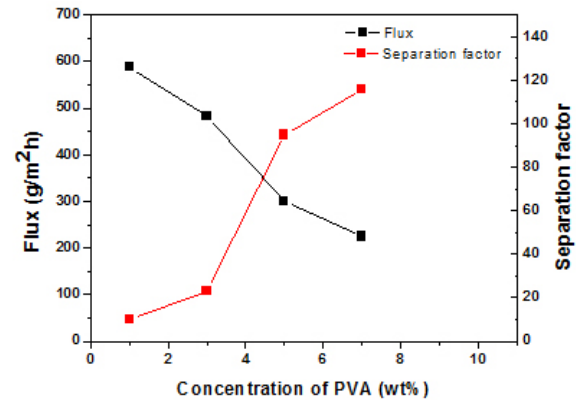
3.2. 투과증발 실험

PVA 3종에 대해 고분자의 농도에 따라서 투과도와 선택도를 Fig. 5에 나타내었다. PVA 코팅용액은 PVA 함량에 대비하여 GA 20 wt% 혼합하였으며, PAN 지지체 위에 코팅 및 가교한 복합막을 사용하였으며, 공급용액은 90 wt% IPA 수용액을 사용하여 투과증발 실험을 진행하였다. Table 1에 나타나듯이 PVA-2과 PVA-3은 10 wt%의 용액이 제조되지 않아 복합막을 제조할 수 없었다.

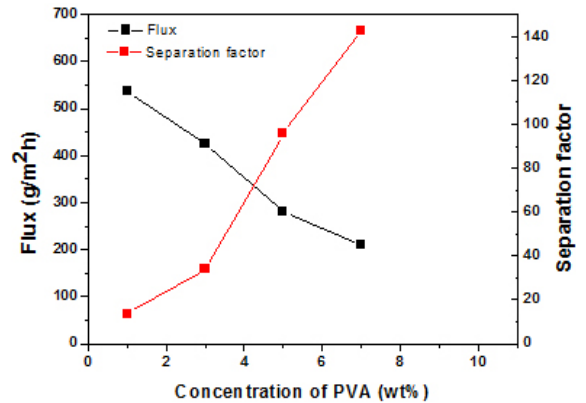
PVA 3종에 대해서 PVA의 농도가 증가할수록 flux는 감소하며, 선택도는 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 PVA에서 검화도가 높을수록 투과도는 낮으나, 선택도는 증가하는 것을 확인하였다. Fig. 5과 Fig. 6를 보게 되면 5 wt% 이상에서 선택도가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있으며, PVA-3의 경우에는 7 wt%까지 급격하게 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 skin layer의 구조가 농도가 증가할수록 치밀해



(a) PVA-1



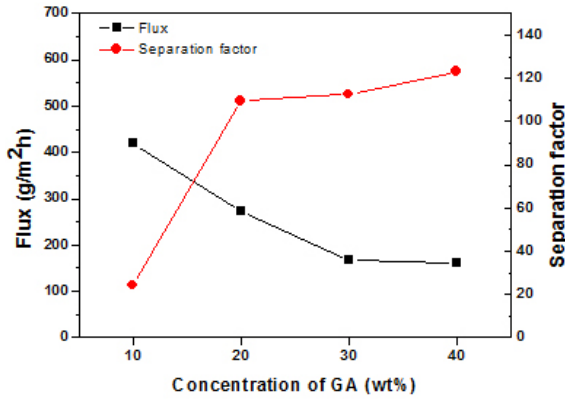
(b) PVA-2



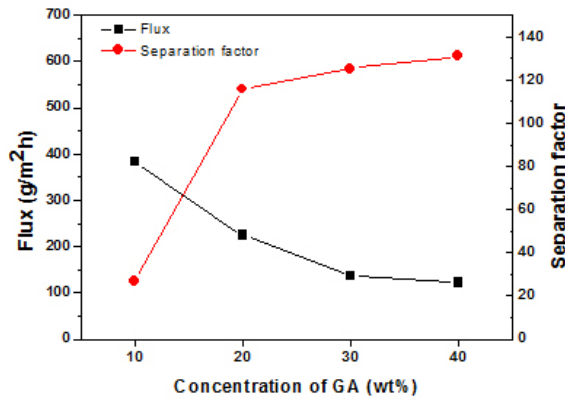
(c) PVA-3

**Fig. 5.** Effect of the PVA concentration on flux and separation factor of (a) PVA-1, (b) PVA-2, (c) PVA-3 composite membranes.

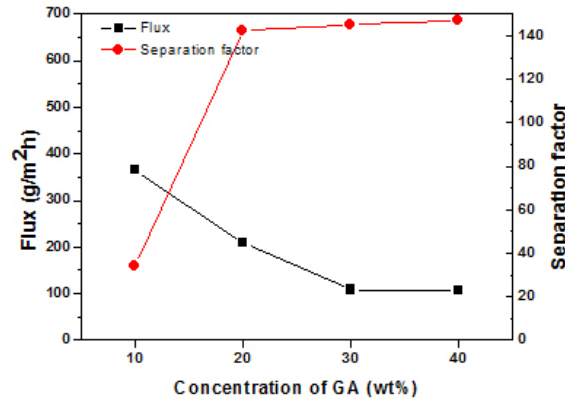
지기 때문에 투과도는 감소하게 되고, 상대적인 확산속도 차이에 의해 선택도는 증가하는 것으로 보인다[14]. PVA 농도가 7 wt%에서 검화도와 상관없이 선택도가 100 이상인 것을 확인하였으며, PVA-3에서 142로 가



(a) PVA-1



(b) PVA-2

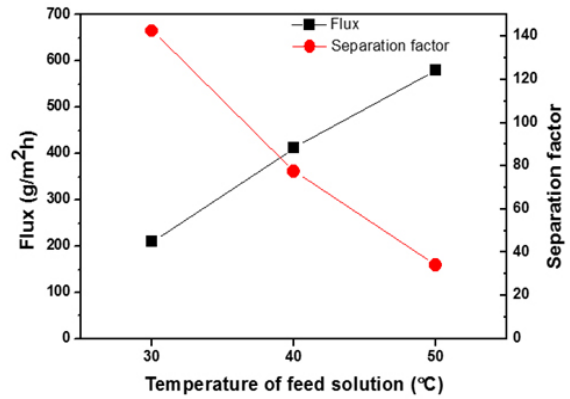


(c) PVA-3

**Fig. 6.** Effect of GA concentration on flux and separation facot of (a) PVA-1, (b) PVA-2, (c) PVA-3 composite membranes.

장 높게 나타난 것을 확인하였다. Flux는 PVA-1에서 273 g/m<sup>2</sup>h로 가장 높게 나타내었다.

GA의 함량에 대한 차이를 확인하기 위해서, PVA 농도를 7 wt%로 고정하고, GA의 함량을 10, 20, 30, 40



**Fig. 7.** Effect of temperature of feed solution on the submerged module.

wt%로 조절한 용액을 이용하여 복합막을 제조하였다. 분리막 성능을 평가하기 위해 feed 온도를 30°C로 고정하고, 공급용액의 조성을 IPA/water = 90/10 wt%로 실험을 진행하였다. Fig. 6는 GA 함량에 대한 투과증발 분리특성을 알아보기 위한 테스트 결과이다. GA 함량이 20 wt%로 증가하면서 선택도가 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 20 wt% 이상에서 크게 증가하지 않는 것을 확인하였다. 투과도 또한 GA 함량에 따라 감소하는 것을 확인하였고, 30 wt%까지 급격히 감소하는 것을 확인되나, 40 wt%는 일정하게 유지되는 것을 확인하였다. GA 농도가 증가할수록 가교로 인해 분리막 내의 가교밀도가 증가하여 투과도가 감소하고, 선택도는 증가하는 것으로 사료된다[15].

앞의 실험 결과를 바탕으로 PVA-3 고분자를 이용하여 7 wt% 복합막을 침지형 투과증발 시스템에 적용하였다. 공급용액의 온도와 농도에 따른 투과증발 실험을 각각 진행하였다. 공급용액의 온도에 따른 투과특성 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 30°C에서 투과도는 209 g/m<sup>2</sup>h, 142.5의 선택도를 가지고 있으며, 온도가 증가할수록 투과도는 증가하고, 선택도는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 공급용액의 온도가 증가함에 따른 자유부피가 증가하여 투과도는 증가하고, 분리성능은 감소한다고 볼 수 있다[16].

Fig. 8은 공급용액의 조성에 따라서 투과특성을 나타내었다. 공급용액의 조성을 IPA의 농도에 따라 85, 90, 95 wt%로 조절하여 실험을 진행하였다. 그결과 IPA 농도가 증가할수록 투과도는 감소하고 선택도는 증가하는 것을 확인하였다, IPA/water (85/15 wt%)에서는 투과도 248 g/m<sup>2</sup>h, 130의 선택도를 가지고 있으며 가장



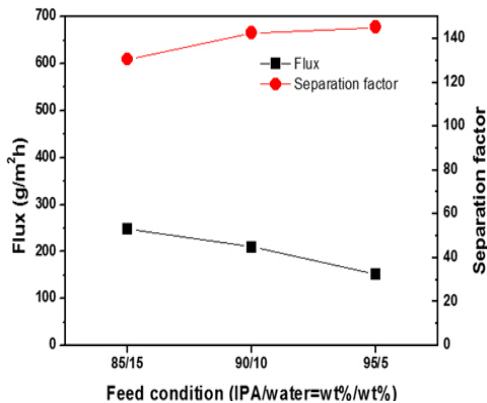


Fig. 8. Effect of feed condition on performance of submerged module.

높은 투과도를 나타낸다. 하지만 IPA 농도가 높은 경우, 투과도는 151 g/m<sup>2</sup>h로 감소하였고, 선택도는 145로 상승하는 것을 확인하였다[17].

장기 농축실험을 진행하기 위해서, 60 L feed tank 내에 침지형 모듈을 이용하여 IPA 농축 실험을 진행하였다. 공급용액의 농도는 IPA/water (90/10 wt%)로 하였으며, 5시간 간격으로 공급용액의 농도를 측정하여 IPA 농도 변화를 확인하였다. Fig. 9을 보면, 시간이 진행될수록 공급용액의 IPA 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, IPA 농도를 90%에서 최종 99%까지 농축되는 것을 확인하였다. 본 실험의 결과를 바탕으로 50 L의 coagulation bath에 10 g/mim의 물이 유입되는 경우, 약 9시간 후, IPA의 농도가 90%로 떨어지게 되고, 이를 분리막 면적을 3.6 m인 5개의 모듈을 사용하여 8시간 가동하면 coagulation bath의 IPA 농도가 97% 이상으로 농축할 수 있을 것으로 예상되어진다. 지속적으로 coagulation bath의 물의 농도를 3% 이하로 유지하고자 하는 경우에는 분리막 면적을 2.88 m<sup>2</sup>인 4개의 모듈을 사용하여 운전하게 되면 coagulation bath 내의 IPA의 농도를 일정하게 유지할 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 막의 분리특성을 알아보기 위해 투과 증발 공정을 이용하여 PVA 복합막과 침지형 모듈을 제조하여 IPA 수용액으로부터 농축 실험을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) PVA 농도가 증가할수록 투과도는 감소하는 경향

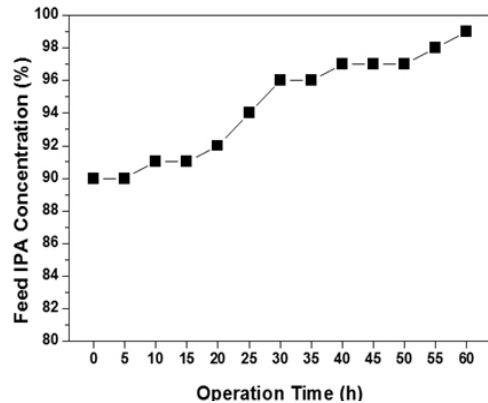


Fig. 9. Effect of operation time on IPA concentration in feed tank.

을 나타내었으며, 선택도는 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 PVA의 검화도가 증가할수록 투과도는 감소하나 선택도가 증가하는 경향을 나타내었다. 가교제로 사용된 GA의 함량이 증가할수록 투과도는 감소하나, 선택도는 증가하는 경향을 나타내었다. 그 결과 PVA-3, 7 wt% GA의 함량이 20 wt%의 복합막에서 투과도는 209 g/m<sup>2</sup>h, 선택도는 142로 우수한 결과를 나타내었다.

2) 침지형 모듈을 제조하여 투과도 실험 결과, 온도가 30°C일 때 가장 우수한 결과가 나타났으며, 온도가 높을수록 투과도는 급격하게 증가하나, 선택도는 급격히 감소하는 것을 확인하였다. 30°C에서 가장 우수한 선택도를 가지는 것을 확인하였다.

3) IPA 수용액에 침지형 모듈을 이용하여 농축 실험을 진행한 결과, 약 60시간 후 50 L의 공급용액 IPA 농도가 90 wt%에서 99 wt%까지 농축되는 것을 확인하였으며, 모듈의 갯수를 증가시키면 농축시간이 감소되는 것으로 사료된다.

#### 감 사

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구결과입니다.

#### Reference

1. A. Baudot and M. Marin, "Dairy aroma compounds recovery by pervaporation", *J. Membr. Sci.*,

- 120**, 207 (1996).
2. E. Carretier, Ph. Moulin, M. Beaujean, and F. Charbit, "Purification and dehydration of methylal by pervaporation", *J. Membr. Sci.*, **217**, 159 (2003).
  3. R. Y. M. Huang and C. K. Yeom, "Pervaporation separation of aqueous mixtures using crosslinked poly(vinyl alcohol)(PVA). II. Permeation of ethanol-water mixture", *J. Membr. Sci.*, **51**, 273 (1990).
  4. R. Y. M. Huang and X. Feng, "Dehydration of isopropanol by pervaporation using aromatic polyetherimide membranes", *Sep. Sci. Technol.*, **28**, 2035 (1993).
  5. J. S. Kim, E. H. Cho, S. Y. Kang, S. I. Cheong, H. W. Park, C. H. Seo, and J. W. Rhim, "Pervaporation separation of water-isopropyl alcohol mixtures using PVA/PAN hollow fiber composite membranes", *Membr. J.*, **23**, 170 (2013).
  6. J. S. Kim, C. S. Lee, E. H. Cho, and J. W. Rhim, "Pervaporation separation of isopropyl alcohol-water mixtures using poly(dimethyl siloxane) membrane", *Membr. J.*, **23**, 245 (2013).
  7. J. S. Kim, C. Y. Park, H. W. Park, C. H. Seo, and J. W. Rhim, "Preparation of composite membranes via PVA/PAM solution coating onto hydrophilized PVDF hollow fiber membrane and their pervaporation separation of water-ethanol mixture", *Membr. J.*, **23**, 312 (2013).
  8. B. S. Cheon, S. I. Cheong, and J. W. Rhim, "Pilot test with pervaporation separation of aqueous IPA using a composite PEI/PDMS membrane module", *Membr. J.*, **25**, 385 (2015).
  9. Y. M. Xu, N. L. Le, J. Zuo, and T. S. Chung, "Aromatic polyimide and crosslinked thermally rearranged poly(benzoxazole-co-imide) membranes for isopropanol dehydration via pervaporation", *J. Membr. Sci.*, **499**, 317 (2016).
  10. N. Jullok, R. V. Hooghten, P. Luis, A. Volodin, C. V. Haesendonck, J. Vermant, and B. V. Bruggen, "Effect of silica nanoparticles in mixed matrix membranes for pervaporation dehydration of acetic acid aqueous solution: plant-inspired dewatering system", *J. Clean. Prod.*, **112**, 4879 (2016).
  11. J. Zhao, Y. Zhu, F. Pan, G. He, C. Fang, K. Cao, R. Xing, and Z. Jiang, "Fabricating graphene oxide-based ultrathin hybrid membrane for pervaporation dehydration via layer-by-layer self-assembly driven by multiple interactions", *J. Membr. Sci.*, **487**, 162 (2015).
  12. D. Hua, Y. K. Ong, Y. Wang, T. Yang, and T. S. Chung, "ZIF-90/P84 mixed matrix membranes for pervaporation dehydration of isopropanol", *J. Membr. Sci.*, **453**, 155 (2014).
  13. M. Cho, C. Kong, and Y. Lee, "Pervaporation on n-butanol/water mixture through organophilic ZSM-5 zeolite membrane", *Membr. J.*, **21**, 336 (2011).
  14. J. S. Kim, H. W. Park, C. H. Seo, and J. W. Rhim, "Pervaporation separation characteristics for water-ethanol mixtures using porous hollow fiber PVA composite membranes", *Membr. J.*, **23**, 306 (2013).
  15. S. Y. Kang, J. S. Kim, E. H. Cho, and J. W. Rhim, "Effect of cross-linking agent on the acetic acid dehydration behaviors of PVA-PAN composite hollow fiber membranes", *Membr. J.*, **24**, 311 (2014).
  16. B. S. Cheon, C. S. Lee, S. Y. Ha, and J. W. Rhim, "Study on the pervaporation separation of aqueous 1-butanol mixture using composite PEI/PDMS membrane", *Membr. J.*, **25**, 352 (2015).
  17. D. W. Mangindaan, N. M. Woon, G. M. Shi, and T. S. Chung, "P84 polyimide membrane modified by a tripodal amine for enhanced pervaporation dehydration of acetone", *Chem. Eng. Sci.*, **122**, 14 (2015).