

SPEEK/PWA/Silica 복합막의 전기화학적 특성에 관한 연구

오세중^{1*}

¹선문대학교 생명화학공학과

A Study on the Electrochemical Properties of SPEEK/PWA/Silica Composite Membranes

Sae-Joong Oh^{1*}

¹Department of Chemical and Biochemical Engineering, Sun-Moon University

요 약 SPEEK/PWA/silica 전해질 복합막을 제조하기 위하여 졸-겔 방법을 이용하였다. 졸-겔반응의 전구체로는 TEOS를 사용하였으며 첨가제 겸 촉매로는 phosphotungstic acid(PWA)를 사용하였다. FE-SEM 분석을 통하여 PWA 및 silica 나노입자들은 고분자속으로 균일하게 분산되는 것을 확인할 수 있었다. SPEEK/PWA/silica 복합막의 함수율은 TEOS의 비율이 낮은 경우에는 TEOS의 증가에 따라 함수율이 감소하였지만 TEOS의 비율이 높은 경우에는 TEOS의 영향을 적게 받았다. SPEEK/PWA/silica 복합막의 이온전도도는 함수율의 변화와 유사한 경향을 나타내었으며 TEOS의 비율이 증가함에 따라 처음에는 이온전도도가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타내었다. SPEEK/PWA/silica 복합막의 메탄올 투과도는 TEOS의 농도가 증가함에 따라 투과도가 감소하는 경향을 나타내었다.

Abstract Sol-gel method was utilized to prepare SPEEK/PWA electrolyte composite membranes. TEOS was used as a precursor and phosphotungstic acid(PWA) as a catalyst for the sol-gel reaction. It was observed through FE-SEM analysis that the PWA and silica nanoparticles were uniformly dispersed into the polymer matrix. The water uptake of SPEEK/PWA/silica composite membranes was less affected by TEOS concentration at higher TEOS contents, while the water uptake decreased as TEOS concentration increased at lower TEOS contents. The proton conductivity of the composite membranes showed similar trend as the water uptake of the composite membranes. The methanol permeability of SPEEK/PWA/silica composite membranes decreased as TEOS concentration increased.

Key Words : Composite membrane, Electrolyte, PWA, Silica, Sol-gel

1. 서론

이온전도성 고분자막은 연료전지의 고체 전해질로 많이 사용되어 왔으며 최근에는 태양전지, 리튬배터리 등의 전해질막으로 사용이 확대되고 있다. 특히 최근에 청정, 대체에너지 개발의 중요성과 함께 전해질막의 개발도 활기를 띠고 있는데, 고체전해질은 액체전해질에 비하여 이온전도도는 낮지만 휘발성이 없으며 안정성, 내구성 등에서 탁월한 장점을 지니고 있다[1]. 대표적인 고분자 전해질막으로는 Nafion을 들 수 있다. Nafion은 불소계 고분

자로서 불소로 이루어진 주사슬은 소수성(hydrophobicity)을 나타내지만 Nafion 분자내의 설펡산(SO₃H) 작용기는 친수성을 가지는 고분자이다. Nafion은 가격은 비싸지만 열적, 화학적 안정성이 뛰어나고 수소이온전도도(proton conductivity)가 우수하기 때문에 고분자전해질 연료전지(PEMFC)의 전해질막으로 많이 이용되어 왔다[2]. 그러나 Nafion은 물 및 메탄올에 대한 투과도가 크기 때문에 이막을 메탄올을 연료로 사용하는 직접메탄올 연료전지(DMFC)에 이용할 경우 메탄올의 crossover에 의한 전지의 성능을 떨어뜨리는 문제를 일으키게 된다. 또한 최근

*Corresponding Author : Sae-Joong Oh(Sun-Moon Univ.)

Tel: +82-41-530-2374 email: sjoh@sunmoon.ac.kr

Received February 5, 2013

Revised March 13, 2013

Accepted May 9, 2013

의 연료전지는 일산화탄소에 의한 전극 촉매의 피독을 방지하기 위하여 80℃ 이상의 온도에서 조업이 요구되는데 고온에서 Nafion의 수소이온 전도도가 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 일반적으로 이온전도도는 전해질막의 수분함수율에 비례하기 때문에 Nafion이 함유하고 있는 수분의 증발로 인하여 이온전도도가 감소하게 되는 것으로 알려져 있다[3].

이러한 문제점들을 해결하고 가격이 비싼 Nafion을 대체하기 위하여 비교적 화학적 안정성이 우수한 polystyrene, Polyetheretherketone (PEEK), Polysulfone, Polyimide 등의 방향족 탄화수소계 고분자를 설폰화(sulfonation)시켜 전해질막으로 이용하고자 하는 연구가 이루어져 왔다. 그런데 대부분의 탄화수소계 고분자는 메탄올의 투과저항성은 Nafion 보다 우수한 특성을 나타내었지만 이온전도도가 낮고 기계적강도와 내구성이 떨어지는 경향을 나타내었다[4]. 탄화수소계 고분자의 이러한 단점을 극복하기 위하여 고분자에 가교제를 첨가하고 가교결합을 유도하여 기계적 강도를 증대시키거나 고분자에 SiO₂, TiO₂, ZrO₂ 등의 무기물을 혼합한 복합막을 제조하여 전해질막으로 사용하는 연구가 많이 이루어지고 있다. 그러나 가교결합은 고분자막을 지나치게 brittle 하게 만들어 실제적 적용을 어렵게 만드는 경우가 많이 발생하였다[5-7]. 고분자/무기물 복합막의 제조에는 졸-겔(sol-gel)방법이 많이 사용된다. 졸-겔(sol-gel)반응에서는 유기금속알콕사이드를 상온에서 반응시키면 가수분해(hydrolysis)와 응축(condensation)이 차례로 일어나면서 나노크기의 금속산화물이 형성된다. 이 방법을 이용하면 무기물 나노입자를 고분자속으로 쉽게 분산시켜 복합막을 제조할 수 있다. 졸-겔반응의 전구체(precursor)로는 Tetraethoxysilane(TEOS)와 phenyltri-ethoxysilane(PEOS) 등이 많이 사용된다. 최근까지 Polyethyleneglycol/silica[8], PEEK/silica [9], Polyvinylalcohol/silica[10] 복합막 등에 대한 연구가 보고 되어 왔으며 이들 복합막은 열적 기계적 특성은 크게 향상되었으나 이온전도도는 아직까지 만족스러운 결과를 보여주지 못하고 있다.

본 연구에서는 sulfonated polyetherether-ketone(SPEEK)/무기물 복합막을 제조하기 위하여 phosphotungstic acid(PWA)를 첨가제로 사용하고 TEOS를 이용한 졸-겔반응을 수행하여 SPEEK/silica 복합막 및 SEEK/PWA/silica 복합막을 제조하였으며, 복합막의 구조를 분석하고 수분흡수율, 이온전도도, 메탄올 투과도 등을 분석하여 고분자 전해질막으로서의 이용가능성을 조사하였다.

2. 실험

2.1 실험재료

본 연구를 수행하기 위하여 PEEK 450PF (Victrex, 분자량 39,200), PWA(H₃PO₄ · 12WO₃ · nH₂O, 99%, Aldrich), TEOS(Si(OC₂H₅)₄, 99%, Junsei), 황산(H₂SO₄, 98%, 대정화학) 등을 사용하였으며 용매로는 dimethylsulfoxide(DMSO, (CH₃)₂SO, 99.5%, 대정화학)를 사용하였다. PWA는 졸-겔 반응에서 촉매 역할을 하기 때문에 별도의 촉매는 사용하지 않았다.

2.2 PEEK의 설폰화

PEEK에 양이온(수소이온) 전도성을 부여하기 위해서는 설폰화(sulfonation)를 시켜야 한다. 설폰화는 고분자에 SO₃H 작용기를 부여하는 것으로서 다음과 같이 설폰화반응을 진행하였다. 먼저 PEEK를 100℃에서 12시간동안 건조시킨 다음 황산에 첨가하여 2-3% 용액을 만들고 상온에서 일정시간 동안 설폰화반응을 수행하였다. 다음에 탈이온수를 이용하여 반응물을 침전(precipitation)시키고 여과과정을 거친 다음 탈이온수를 이용하여 PH가 7이 될 때까지 세척하였다. 설폰화시킨 PEEK는 진공오븐을 이용하여 60℃에서 24시간 동안 건조시킨 다음 상온에서 보관하였다. SPEEK의 설폰화도(DS, degree of sulfonation)는 적정(titration)을 이용하여 측정하였다. 먼저 SPEEK를 0.5M 수산화나트륨(NaOH) 용액에 24시간 동안 녹인 다음 0.5M 염산(HCl) 용액을 이용하여 적정을 수행하였다.

2.3 복합막의 제조

SPEEK/silica 복합막을 제조하기 위하여 졸-겔 방법을 사용하였다. 먼저 SPEEK와 TEOS를 각각 DMSO에 용해시켜 5-10%의 용액을 만들고 두 용액을 일정시간 동안 혼합시킨 다음 이 용액을 유리판(5×5cm) 위에 일정량도 포시켰다. 그리고 상온에서 1-2시간 유지시켜 졸-겔반응을 수행하였다. 그리고 진공오븐에서 온도를 50℃부터 150℃까지 가열하면서 건조시켜 복합막을 제조하였다. SPEEK/PWA/silica 복합막의 제조는 SPEEK와 PWA, TEOS를 각각 DMSO에 용해시킨 다음 혼합하여 같은 방법을 이용하여 복합막을 제조하였다.

2.4 복합막의 구조분석

복합막의 표면형상(morphology)은 FE-SEM (field emission scanning electron microscopy, JEOLJSE-6700F)을 이용하여 조사하였다. 그리고 복합막의 구조를 조사하기 위하여 X-선 회절분석기(X-ray diffractometer)를 이용하여 회절각을 0에서 50℃사이에서 변화시키면서 구조변

화를 조사하였다.

2.5 함수율

복합막의 수분흡수능력을 조사하기 위하여 복합막을 50℃에서 24시간 동안 증류수에 넣고 유지시킨 다음 꺼내어 형질으로 막의 표면 수분을 제거한 다음 곧바로 무게(W_{wet})를 측정하였다. 그리고 복합막을 오븐에서 24시간 건조시킨 다음 막의 무게(W_{dry})를 측정하였다. 그리고 무게변화로부터 다음과 같이 함수율(water uptake), W 를 계산하였다.

$$W = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}}$$

단, W_{dry} 및 W_{wet} 는 각각 건조시킨 막 및 물로 포화된 막의 무게를 나타낸다.

2.6 이온전도도

복합막의 이온전도도는 fuel cell test station (Model P1004, P&P Energy Tech, Korea)을 이용하여 측정하였다. 이온전도도 셀(cell)은 모두 백금으로 제작된 외부전극 2개와 내부전극 2개로 이루어져 있으며 전극사이에 복합막 시료를 장착하여 측정하였다. AC 임피던스 측정은 10Hz-6MHz 범위에서 수행(amplitude of 1V)하여 막의 저항을 측정하였다. 그리고 복합막의 이온전도도는 다음 식을 이용하여 계산하였다.

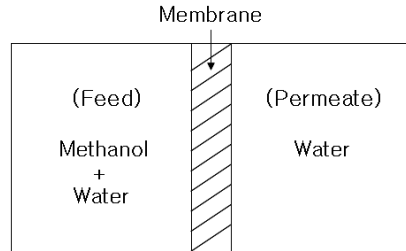
$$\sigma = \frac{L}{rA} \quad (1)$$

단, σ 는 막의 이온전도도, L 은 막의 두께, r 은 막의 저항, A 는 막의 단면적을 나타낸다.

2.7 메탄올 투과도

복합막을 통한 메탄올의 투과도는 Fig. 1과 같은 간단한 확산셀(diffusion cell)을 이용하여 측정하였다. 막은 cell의 공급부(feed side)와 투과부(permeation side)사이에 설치하여 클램프로 고정시켰으며, 막의 투과면적은 3.19cm²이고 투과부의 부피는 약 40cm³로 하였다. 실험 방법은 cell에 막을 설치한 다음 공급부에는 30℃로 유지시킨 2M 농도의 메탄올 수용액을 채우고 투과부에는 순수한 증류수를 채운다. 그리고 확산셀을 항온조에 설치하여 30℃로 일정하게 유지시킨 다음 투과실험을 시작하였다. 투과과정에서 투과부의 메탄올 농도변화는

PORAPAK Q 컬럼 및 TCD (thermal conductivity)가 장착된 GC(gas chromatography)를 이용하여 주기적으로 측정하였으며 메탄올의 투과도(permeability)는 측정된 메탄올의 농도기울기로부터 다음 식에 의하여 계산하였다.



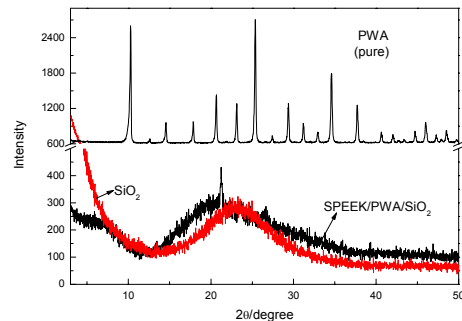
[Fig. 1] Schematic diagram of the methanol permeation system

$$P = \frac{1}{A} \frac{C_2(t)}{C_1(t-t_0)} V_2 l \quad (2)$$

단, A 는 단면적, C_1 은 공급부의 농도, V_2 는 투과부의 부피, l 은 막의 두께이며, $C_2(t)/(t-t_0)$ 는 농도기울기를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

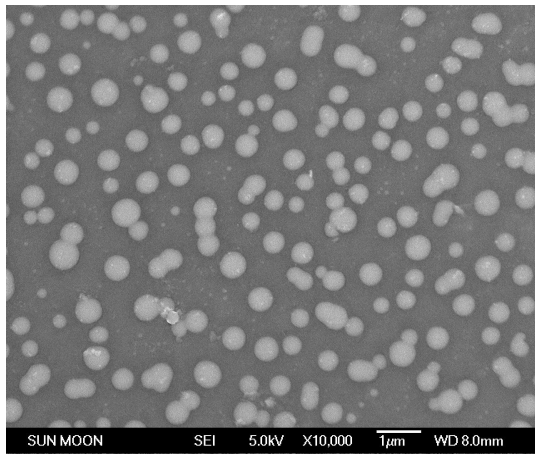
고분자-무기물 복합막에서 무기물 입자들은 고분자 내부로 분산, 침투하게 된다. TEOS의 졸-겔 반응에 의해서 생성되는 silica도 고분자 내부로 분산되며 이 과정에서 복합막의 미세구조 또는 나노구조를 변화시키게 된다. 이때 silica 나노입자의 균일한 분산을 유지하고 입자들의 응집(agglomeration) 현상을 방지하는 것이 복합막의 물리화학적 특성을 향상시키는데 중요한 역할을 한다[10].



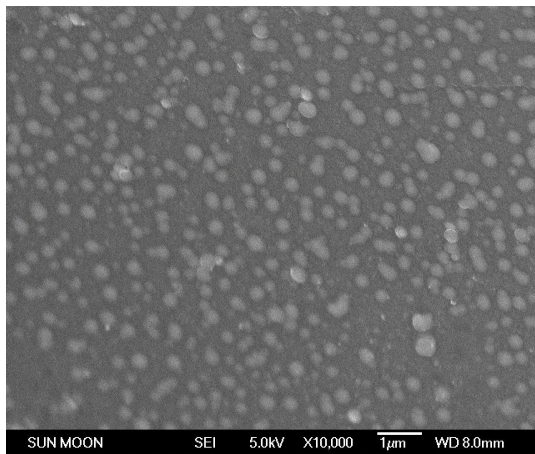
[Fig. 2] Comparison of XRD results for PWA, SiO₂ and SPEEK/PWA/SiO₂ composite membrane

Fig. 2는 PWA, SiO₂ 및 SPEEK/PWA/SiO₂ 복합막의 XRD 결과를 나타낸 것이다. PWA (H₃PO₄ · 12WO₃ · nH₂O)는 heteropolyacid의 일종으로서 결정성을 가진 무기화합물이고 구조식에서 보는 바와 같이 물분자를 포함하고 있는 친수성 물질이며 무기물 중에서 이온전도도가 높은 물질로 알려져 있다. 그림에서 보는 바와 같이 PWA는 전형적인 결정구조를 나타내었다. Fig. 2에서 SiO₂는 완만한 피크를 보여주는데 이것은 silica가 무정형(amorphous)임을 나타낸다. 그림에서 SPEEK/PWA/SiO₂ 복합막은 SiO₂의 피크를 포함하고 있으나 PWA의 결정성 피크들은 나타나지 않았다.

Fig. 3은 SPEEK/PWA 및 SPEEK/PWA/SiO₂ 복합막의 FE-SEM 결과를 나타낸 것이다.



(a)

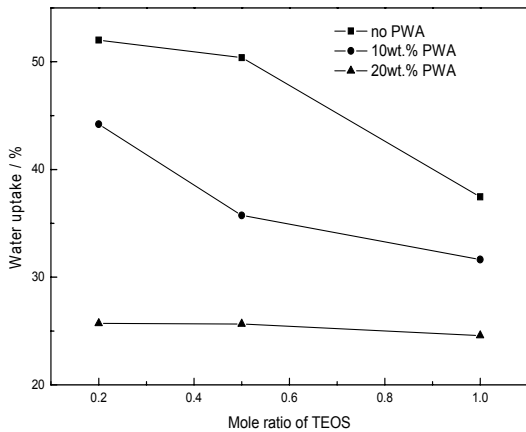


(b)

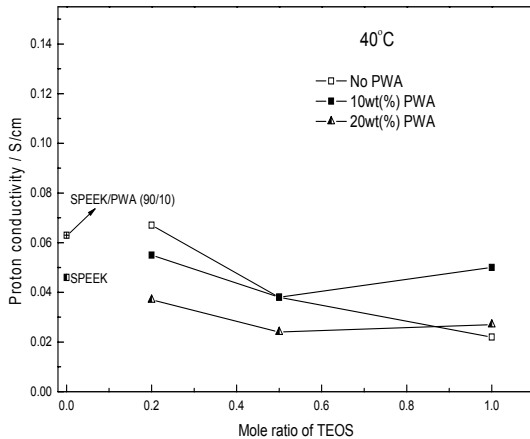
[Fig. 3] FE-SEM images of composite membranes (a)SPEEK/PWA composite membrane (b) SPEEK/ PWA/SiO₂ composite membrane

Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 PWA 입자들은 SPEEK 고분자 내부에 균일하게 분산되어 있는 것을 볼 수 있으며 입자들의 응집(agglomeration) 현상은 거의 존재하지 않음을 알 수 있었다. Fig. 3(b)에서 SPEEK/PWA/SiO₂ 복합막의 경우에도 PWA입자 및 SiO₂ 입자들이 고분자 내부에 균일하게 분산되어 있는 것을 볼 수 있으며 PWA입자와 SiO₂ 입자는 사진으로는 명확하게 구분이 가지 않으나 원형에 더 가깝고 입자크기가 큰 것이 PWA 입자이고 입자 크기가 작은 것이 SiO₂ 입자이다.

고분자막의 함수율은 수분의 확산계수, 고분자내 무정형 영역의 relaxation rate, 고분자의 결정화도(crystallinity) 등에 따라 달라지며 고분자의 이온전도도에 큰 영향을 미친다[4]. Fig. 4는 SPEEK/silica 및 SPEEK/PWA/silica 복합막의 함수율의 변화를 줄-겔반응의 전구체로 사용한 TEOS의 비율의 함수로 나타낸 것이다. 여기서 TEOS의 mol ratio는 SPEEK의 SO₃H와 TEOS사이의 몰비를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 PWA를 포함하고 있지 않는 SPEEK/silica 복합막의 경우 TEOS의 농도가 증가할수록 복합막의 함수율이 감소하는 경향을 나타내었다. 그 이유는 TEOS의 농도가 증가할수록 줄-겔 반응에 의하여 생성되는 silica의 비율이 증가하게 되는데 생성된 silica와 SPEEK 사이의 가교결합이 증대되어 복합막이 견고한 구조를 이루기 때문에 수분 함수율이 감소하게 되는 것으로 생각된다. 부연 설명하면, TEOS의 줄-겔 반응에서는 가수분해에 의해 silanol (Si-OH) 그룹이 먼저 생성되고 응축과정에서 H₂O가 제거되면서 silica 입자가 생성된다. 이 과정에서 silanol 그룹과 SPEEK의 SO₃H 그룹 사이에 수소결합이나 공유결합(또는 이온결합)에 의한 가교결합이 이루어지게 된다[10]. 가교결합은 복합막의 구조를 견고하게 만드는 역할을 하기 때문에 함수율은 감소시키지만 막의 팽윤(swelling)을 방지할 수 있으며 따라서 막의 기계적 강도를 증대시킨다. Fig. 4에서 SPEEK/PWA/silica 복합막의 경우 PWA의 농도가 증가할수록 함수율은 감소하였지만 TEOS 비율의 증가에 따른 함수율 감소는 크게 억제되는 것을 볼 수 있었다. PWA가 첨가된 복합막의 경우 PWA가 SPEEK 및 silica와 상호결합(interaction)을 이루기 때문에 PWA의 비율이 증가하면 함수율이 감소하게 된다[11]. 그런데 SPEEK/PWA/silica 복합막의 경우에 TEOS의 농도가 증가하면 SPEEK와 가교결합에 참여하지 않는 silica의 비율이 증가하게 되는 것으로 생각된다. silica는 친수성이기 때문에 SPEEK나 PWA와 결합되지 않은 silica 성분들이 함수율의 감소를 억제하게 되는 것으로 생각된다. Fig. 4에서 PWA의 비율이 높을수록 TEOS 농도 증가에 따른 함수율의 감소비율이 현저히 낮아지는 것을 알 수 있었다. 막의 함수율은



[Fig. 4] Water uptakes for SPEEK/SiO₂ and SPEEK/PWA/SiO₂ composite membranes



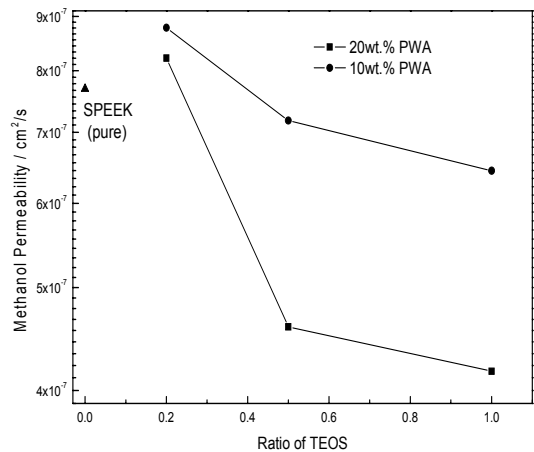
[Fig. 5] Ion conductivities for SPEEK/SiO₂ and SPEEK/PWA/SiO₂ composite membranes

이온전도도와 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 연료전지의 전해질 연구에서 매우 중요한 부분을 차지한다.

Fig. 5는 복합막의 이온전도도의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 SPEEK/PWA 복합막은 순수한 SPEEK막보다 높은 이온전도도를 나타내었는데 이것은 PWA의 이온전도도가 높기 때문으로 생각된다. 그림에서 SPEEK/PWA/silica 복합막의 이온전도도는 PWA의 농도가 낮고 (0-10%) TEOS의 몰비가 낮은 영역에서는 순수한 SPEEK의 이온전도도보다 높은 값을 나타내었으며, PWA의 농도가 10%인 복합막의 경우 TEOS의 비율에 관계없이 SPEEK보다 높은 이온전도도 값을 나타내었다. 그리고 PWA를 첨가하지 않은 SPEEK/silica 복합막은 TEOS의 농도가 증가할수록 이온전도도가 감소하는 경향을 나타내었는데 이것은 Fig. 4의 흡수율의 변화와 유사

한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 즉 SPEEK와 silica 사이의 가교결합으로 인하여 복합막을 통한 이온의 이동이 방해받기 때문으로 생각된다. Fig. 5에서 SPEEK/PWA/silica 복합막은 TEOS의 농도가 증가할수록 처음에는 이온전도도가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 TEOS의 비율이 증가하면 가교결합에 참여하지 않은 silica 분자들이 친수성을 유지하기 때문에 이온전도도가 증가하게 되는 것으로 생각된다. 이 결과는 Fig. 4에서 TEOS의 비율이 증가할수록 SPEEK/PWA/silica 복합막의 흡수율 감소가 억제되는 것으로도 증명될 수 있다.

고분자막을 통한 투과도는 보통 용해-확산 메커니즘 (solution diffusion mechanism)으로 해석된다. 막을 통한 투과성분의 용해도는 고분자와 투과성분 사이의 친화력 (affinity)에 의존하며 확산계수는 고분자의 자유부피 (free volume)에 비례하는 경향을 나타낸다. Fig. 6은 복합막의 메탄올 투과도를 나타낸 것이다. SPEEK/PWA /SiO₂ 복합막의 메탄올 투과도는 TEOS의 농도가 낮은 경우에는 순수한 SPEEK 보다 높은 값을 나타내었으며 TEOS 농도가 증가할수록 메탄올 투과도가 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 PWA의 농도가 높을수록 메탄올 투과도가 감소하였다. TEOS의 농도가 낮은 경우에는 줄-겔 반응에 의해 생성된 silica 입자들이 고분자 사슬사이에 침투하여 막의 자유부피 (free volume)를 증대시키기 때문에 메탄올 투과도가 증대되는 것으로 생각된다 [10]. 그러나 silica의 농도가 증대될수록 silica와 SPEEK 및 PWA 사이의 가교결합이 증대되어 복합막을 통한 메탄올의 투과를 방해하기 때문에 메탄올의 투과도가 감소하게 되는 것으로 생각된다.



[Fig. 6] Methanol permeabilities for SPEEK/PWA /SiO₂ composite membranes

4. 결론

본 연구에서는 졸-겔 방법을 이용하여 SPEEK/silica 및 SPEEK/PWA/silica 복합막을 제조하고 이 막들의 전기화학적 특성을 조사하였다. XRD 및 FE-SEM 분석 결과로부터 PWA 및 silica는 SPEEK에 균일하게 분산되는 것을 확인할 수 있었으며 입자들의 응집현상은 발생하지 않았다. SPEEK/silica 복합막의 함수율은 TEOS의 비율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었으나, SPEEK/PWA/silica 복합막의 함수율은 TEOS의 비율이 증가함에 따라 처음에는 감소하다가 TEOS의 몰비가 0.5 이상에서는 함수율의 감소가 크게 억제되는 것을 알 수 있었다. TEOS의 비율이 증가하면 SPEEK 및 PWA와의 가교결합에 참여하지 않는 silica의 비율이 증대되어 함수율 감소를 억제하는 것으로 생각된다. 복합막의 이온전도도는 복합막의 함수율과 유사한 경향을 나타내었다. 즉, SPEEK/silica 복합막의 이온전도도는 TEOS의 비율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었으며 SPEEK/PWA/silica 복합막의 이온전도도는 TEOS의 비율이 증가함에 따라 처음에는 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타내었다. SPEEK/PWA/silica 복합막의 메탄올 투과도는 TEOS의 비율이 낮은 경우에는 순수한 SPEEK의 투과도보다 큰 값을 나타내었으나 TEOS의 비율이 증가할수록 메탄올 투과도가 감소하는 경향을 나타내었다. 그 이유는 TEOS의 비율이 증가할수록 silica와 SPEEK 및 PWA 사이의 가교결합이 증대되어 메탄올 투과도가 감소하기 때문이다. 이상의 결과를 종합하면 복합막의 기계적 특성을 유지하면서 이온전도도와 메탄올의 투과저항을 동시에 높게 유지시키기 위해서는 PWA의 비율을 10% 미만으로 유지하고 졸-겔반응의 전구체인 TEOS의 비율을 높게 유지시키는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

References

[1] B. Smitha, S. Sridhar and A.A. Kim, "Solid Polymer Electrolyte Membranes for Fuel Cell Applications", *J. Membr. Sci.*, 259, p.10, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2005.01.035>

[2] J. Lin, H. Wang and K. Chan, "Nafion- Polyfurfuryl Alcohol Nanocomposite Membranes for Direct Methanol Fuel Cells", *J. Membr. Sci.*, 246, p.95-101, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2004.08.016>

[3] Z.Q. Ma, P. Cheng and T.S. Zhao, "A Palladium-Alloy

Deposited Nafion Membrane for Direct Methanol Fuel Cells", *J. Membr. Sci.*, 215, p.327-336, 2003.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0376-7388\(03\)00026-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0376-7388(03)00026-7)

[4] Hongying Hou, Maria Luisa Di Vona and Philippe Knauth, "Building Bridges: Cross-linking of Sulfonated Aromatic Polymers-A Review", *J. Membr. Sci.*, 423, p.113, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2012.07.038>

[5] Nguyen Thi Que Chi, Dinh Xuan Luu and Dukjoon Kim, "Sulfonated Poly(etheretherketone) Electrolyte Membranes Cross-Linked with 4,4-diaminodiphenyl Ether", *Solid State Ionics*, 187, p.78, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssi.2011.02.002>

[6] Dinh Xuan Luu and Dukjoon Kim, "Strontium Cross-Linked sPEEK Proton Exchange Membranes for Fuel Cell", *Solid State Ionics*, 192, p.627, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssi.2010.05.007>

[7] S.D. mikhailenko, et. al., "Proton Conducting Membranes Based on Cross-Linked Sulfonated Poly(etheretherketone) (SPEEK)", *J. Membr. Sci.*, 233, p.93, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2004.01.004>

[8] C.W. Lin, and P.H. Chang, "PWA-Doped PEG/SiO2 Proton-Conducting Hybrid Membranes for Fuel Cell Applications", *J. Membr. Sci.*, 254, p.197, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2005.01.007>

[9] Satheesh Sambandam and Vijay Ramani, "SPEEK/functionalized Silica Composite Membranes for Polymer Electrolyte Fuel Cells", *J. Power Source*, 170, p.259, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.04.026>

[10] Zongli Xie, Manh Hoang, Tuan Duong, Derrick Ng, Buu Dao and Stephen Gray, "Sol-Gel Derived Poly(vinylalcohol)/Maleic Acid/Silica Hybrid Membrane for Desalination by Pervaporation", *J. Membr. Sci.*, 383, p.96, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2011.08.036>

[11] M. Aparicio, Y. Castro and A. Duran, "Synthesis and Characterisation of Proton Conducting Styrene-Co-Methacrylate-Silica Sol-Gel Membranes Containing Tungsto-phosphoric Acid", *Solid State Ionics*, 176, p.333, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssi.2004.07.021>

오 세 중(Sae-Joong Oh)

[정회원]



- 1984년 2월 : 서울대학교 대학원 화학공학과 (공학석사)
- 1993년 5월 : Polytechnic Univ. (미) 화학공학과 (공학박사)
- 1985년 5월 ~ 1988년 7월 : KIST 반응공학 연구실 연구원
- 1994년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 생명화학공학과 교수

<관심분야>

분리공정, 연료전지