

## 전조사법에 의한 PVBC-*g*-ETFE 필름 제조 시 용매의 영향 평가

이선영 · 송주명 · 손준용 · 노영창 · 신준화<sup>†</sup>

한국원자력연구원 정읍방사선과학연구소 방사선공업환경연구부  
(2011년 7월 5일 접수, 2011년 7월 26일 수정, 2011년 7월 29일 채택)

### Evaluation of the Effect of Solvent on the Preparation of PVBC-*g*-ETFE Film by a Pre-irradiation Method

Sun-Young Lee, Ju-Myung Song, Joon-Yong Sohn, Young-Chang Nho, and Junhwa Shin<sup>†</sup>

Radiation Research Division for Industry and Environment Advanced Radiation Technology Institute,  
Korea Atomic Energy Research Institute, 1266 Sinjeong-dong, Jeongeup-si, Jeollabuk-do 580-185, Korea  
(Received July 5, 2011; Revised July 26, 2011; Accepted July 29, 2011)

**초록:** 본 연구에서는 방사선 전조사법으로 ETFE(polyethylene-co-tetrafluoroethylene) 불소고분자 필름에 VBC(vinylbenzyl chloride) 단량체를 그래프트할 경우 사용되는 용매의 영향을 평가하였다. ETFE 필름을 전자선을 조사하여 필름에 라디칼을 형성시킨 후 톨루엔, 헵탄, 이소프로판올 등 다양한 용매로 희석된 VBC 단량체 혼합물에 넣어 그래프트 반응을 진행시켜 그래프트율을 측정하였다. VBC-*g*-ETFE 필름은 FTIR 기기를 사용하여 성공적으로 그래프트 되었음을 확인하였다. 여러 용매에서 제조된 필름의 기계적 강도와 필름 단면에 그래프트된 VBC 고분자의 분포도를 측정하여 용매의 영향을 평가하였다.

**Abstract:** In this study, the effect of solvent on the pre-irradiation grafting of VBC(vinylbenzyl chloride) onto a ETFE(polyethylene-co-tetrafluoroethylene) was evaluated. ETFE film was irradiated to generate radical species onto its backbone chain. Each irradiated film was immersed into VBC monomer mixtures diluted with various solvents such as toluene, heptane, and isopropanol etc. for grafting process and then the degree of grafting of each film was measured. FTIR analysis confirmed that the VBC-*g*-ETFE film was successful prepared. For the films prepared in the various solvents, the mechanical strength and the distribution pattern of the graft polymer over the cross-section of the films were measured and the effect of solvent was evaluated.

**Keywords:** radiation, grafting, ETFE, VBC, film.

## 서 론

방사선 그래프팅<sup>1-3</sup> 기술은 감마선 또는 전자선 등 높은 에너지와 물질 투과력을 지닌 방사선을 이용하여 서로 다른 고분자를 접목(그래프트)시키는 기술로서 UV나 플라즈마를 이용한 그래프팅 기술과 비교하여 물질 표면뿐 아니라 내부까지 손쉽게 원하는 고분자를 그래프트할 수 있는 장점을 지니고 있다. 이러한 장점들로 인하여 방사선 그래프팅 기술은 연료 전지막,<sup>4-10</sup> 배터리 분리막,<sup>11-13</sup> 유해물질 흡착제<sup>14,15</sup> 등 기능성 물질을 제조하는데 유용하게 사용되어 왔다.

방사선 그래프팅은 방사선을 고분자에 조사하여 고분자 사슬에 라디칼을 형성시키는 단계와 라디칼이 형성된 고분자와 단량체를 혼합하여 그래프트 고분자를 형성시키는 단계로 나누어진다. 이 단계를 각각 따로 진행하는 경우를 전조사(pre-irradiation)법이라고 하고 고분자를 단량체 용액에 넣어 방사선에 의한 라디칼 형성과 그래프팅 단계를 동시에 진행

하는 경우를 동시조사(simultaneous irradiation)법이라고 한다.<sup>3,5</sup> 동시조사법은 감마선을 주로 사용하고 낮은 온도에서 편리하고 신속하게 그래프트된 고분자를 제조할 수 있는 장점이 있는 반면 조사과정에서 과량의 단일중합체가 형성되어 단량체의 소비가 많은 단점이 있다. 반면 전조사는 주로 전자선을 사용하며 그래프팅시 높은 온도가 필요하고 조사와 그래프트 단계가 분리되어 복잡한 단점이 있지만, 고분자를 단량체 없이 조사하기 때문에 방사선에 의한 직접적인 호모폴리머의 형성이 없는 장점이 있고 큰 규모로 방사선 조사가 가능하여 대량 생산이 가능한 장점이 있다.

염화비닐벤질(VBC) 단량체는 비닐기와 염화메틸 작용기를 가진 단량체로서 라디칼 중합으로 인한 고분자 형성과 다른 작용기로 변환이 쉬운 염화메틸 작용기를 가지고 있어 기능성 물질을 제조하는데 유용하게 사용되어 왔다. 방사선을 이용한 그래프팅에서도 VBC는 불소고분자를 비롯한 다양한 고분자에 전조사법과 동시조사법으로 그래프트되었고 그래프트된 고분자는 이민과의 반응으로 음이온교환체를 만들거나 술폰화 또는 인산화반응을 통하여 양이온교환체 등을 제조하는데 유용하게 사용되고 있다.<sup>6,16-22</sup>

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: shinj@kaeri.re.kr

방사선을 이용한 연료전지막 제조에서는 주로 ETFE와 같은 내화학성, 내열성, 기계적 특성이 우수한 불소고분자 필름을 골격고분자로 사용하고 있고, 이온 전도성을 부여하기 위해서는 스티렌 또는 VBC와 같은 단량체를 그래프트시킨 후 술폰화 또는 이민화 반응을 통하여 PEMFC (polymer electrolyte membrane fuel cell)/DMFC (direct methanol fuel cell) 용 수소이온 전도성 고분자막을 제조하거나 AFC (alkaline fuel cell) 용 수산화이온 전도성 고분자막을 제조할 수 있다.<sup>45</sup>

연료전지막과 같은 기능성 물질을 방사선 그래프트를 이용하여 제조할 경우 전조사와 동시조사 방법이 모두 사용될 수 있는데 두 경우 모두 단량체의 희석제로 사용하는 용매의 역할이 매우 중요한 것으로 알려져 있다.<sup>16,23-25</sup> 용매는 단량체의 소모를 줄이는 희석제로서의 역할뿐만 아니라 단량체의 그래프트 성장 반응 속도와 골격필름의 팽윤도 차이에 의한 단량체의 필름 내부로의 확산 속도 등에 큰 영향을 주기 때문이다. 또한 호모폴리머 생성에 의한 단량체 용액의 점도 증가와 석출물 생성에도 용매의 역할이 크게 작용하는 것으로 알려져 있다. 이전 연구에 따르면 VBC 단량체를 불소고분자에 동시조사법으로 그래프트를 진행할 경우는 디클로로메탄(CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>)이나 크로로폼(CHCl<sub>3</sub>)이 다른 용매보다 매우 우수한 것으로 보고되었다.<sup>6,16,17</sup> 하지만 VBC 단량체를 불소고분자에 전조사법으로 그래프트를 진행한 이전 연구를 검토한 결과, 용매의 역할이 매우 중요함에도 불구하고 스티렌 단량체 그래프팅에 유용한 것으로 알려져 있는 톨루엔만을 사용하여 그래프트하였고 다른 용매에 대한 비교 연구는 보고되지 않았다.<sup>18,22</sup>

본 연구에서는 톨루엔을 포함한 다양한 용매를 사용하여 전조사 조건에서 VBC 고분자가 그래프트된 ETFE 필름 제조시 용매에 의한 그래프트율의 변화와 그래프트된 필름의 특성 및 물성 변화를 관찰하여 최적의 용매를 구하고자 한다.

## 실 험

**시료.** 100 μm 두께의 ETFE 필름은 Asahi Glass Co., Ltd에서 구입을 하였고, 헥산(96%), 메탄올(99.8%), 톨루엔(99.5%), 헤파탄(99%), 디클로로에탄(99.5%), 이소프로판올(99.5%)은 Showa에서 구입하였고, 1,4-다이옥산(99.5%)은 Daejung Chemical & Metals Co., Ltd에서 구입하였다. Thiourea(99%)는 Acros Chemical Co., 에탄올(99%)은 Samchun Chemical Co., Ltd.에서 구입을 하였고 THF와 세척 용매는 일반 시약회사에서 구입하였다. 본 실험에서 사용한 시약과 용매는 추가적인 정제과정 없이 사용하였다.

**전자선 조사와 그래프팅.** ETFE 필름은 5 cm×10 cm 크기로 자른 후 유리용기(vial)에 넣고 고무마개로 막은 후 비늘을 통하여 15분간 질소를 불어넣어 전자선 조사 후 ETFE에 형성된 라디칼과 반응할 수 있는 산소를 제거하였다. ETFE 필름을 담은 유리용기는 한국원자력연구원 정읍방사선과학연구소에 구비된 전자선 가속기를 이용하여 100 kGy의 선량으로 전자선 조사를 진행하였다. 전자선이 조사된 ETFE 필름과 혼합하여 그래프트를 진행할 VBC 단량체는 유리용기(vial)에서 다양한 용매와 1:1 비율로 섞은 후 고무마개로 막고 비늘을 통하여 15분간 질소를 주입(기포화; bubbling)시켜 용액 안에 녹아있는 산소를 제거하였다. 질소로 충전된 유리용기에 담긴 ETFE 필름을 전자선으로 조사한 직후 산소를 제거한 VBC 단량체 용액을 질소 분위기하에서 비늘을 이용하여 옮긴 후 60 °C 항온조에 넣어 주어진 시간 동안 그래프트 반응을

진행시켰다. 그래프트 반응 종료된 후, 반응 중에 형성된 단일중합체와 반응에 참여하지 않은 과량의 단량체를 제거하기 위하여 그래프트된 필름을 디클로로메탄에 담가 24시간 동안 3차례 용매를 갈아주면서 세척하였다. 세척된 용매는 진공오븐에 넣어 12시간 동안 건조하였다.

그래프트율은 식 (1)로 계산하였다.  $W_g$ 는 그래프트된 ETFE 필름의 건조 후 무게이며,  $W_0$ 는 그래프트 이전의 ETFE 필름의 무게이다.

$$\text{DOG}(\%) = [(W_g - W_0) / W_0] \times 100 \quad (1)$$

**IR 분석.** ETFE 필름과 VBC 고분자가 그래프트된 ETFE 필름(ETFE-g-PVBC)의 적외선 스펙트럼은 FTIR spectrometer (Bruker, Tensor-37) 분석 장비를 이용하여 측정하였다. 스펙트럼은 32번의 스캔과 1 cm<sup>-1</sup>의 분해능으로 3500~650 cm<sup>-1</sup> 범위에서 측정되었다.

**SEM-EDX 측정.** 그래프트된 VBC 고분자의 ETFE 필름 내부 분포 경향을 명확하게 관찰하기 위하여 제조된 ETFE-g-PVBC 필름은 thiourea와 반응시킨 후 파단시켜 필름 단면의 황(sulfur)과 염소(chloride)의 상대적 분포를 SEM-EDX (Sirion, Fei Company)로 측정하였다.<sup>17</sup> SEM-EDX 측정용 시료를 준비하기 위하여 그래프트된 막은 액체질소에 담가 얼린 후 파단시키고 이후 탄소 테이프를 이용하여 지지대에 부착시키고 오스늄으로 코팅 처리하였다.

**기계적 물성 측정.** 그래프트된 필름의 기계적물성은 INSTRON series IX (Instron Co., Universal Testing System Model 4400)을 이용하여 측정하였다. 필름 시편은 ASTM 규격에 따른 비율(5.3 mm×31mm)로 준비하였다. 실험은 상온에서 실시하였으며 변형속도는 50 mm/min으로 설정하여 인장강도(tensile strength), 파단 연신율(break elongation), 모듈러스(modulus)를 구하였다.

## 결과 및 토론

전자선으로 ETFE 필름을 조사하여 생성된 라디칼은 조사 직후 또는 저온에서 보관하여 필요 시 꺼내어 그래프트 반응을 진행할 수 있을 정도의 수명을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. Nasef의 연구결과에서는<sup>26</sup> ETFE 필름을 전자선으로 조사한 후 -60 °C에서 240일까지 보관 후 꺼내어 스티렌 단량체와 반응시켜 얻어진 그래프트율의 변화를 보면 240일까지도 라디칼이 거의 죽지 않고 살아있는 것을 확인할 수 있다. 본 실험에서는 ETFE 필름을 저온 냉장고에 저장하지 않고 조사 직후 VBC 단량체 용액과 혼합하여 그래프트 반응을 진행하였다.

Figure 1은 전자선으로 처리한 ETFE 필름을 다양한 용매와 1:1 비율로 혼합된 VBC 단량체 용액에 넣어 24시간 동안 반응시켜 얻은 그래프트율을 보여준다. 용매를 제외한 같은 조건에서 전자선으로 조사한 후 그래프트된 시료를 분석한 결과, 용매에 따른 그래프트율의 증가는 메탄올<디클로로에탄<THF<1,4-다이옥산<톨루엔<헥산<헤파탄<이소프로판올 순으로 점점 증가하고 있음을 관찰할 수 있다. 이 실험 결과 이소프로판올에서 가장 높은 그래프트율을 얻는 것을 확인하였다. 이전 문헌에서도 스티렌 단량체를 ETFE 필름에 전조사법으로 그래프팅할 경우 톨루엔 등 다른 용매보다 이소프로판올에서 가장 높은 그래프트율이 얻어지는 것이 보고되었고 이러한 결과는 이소프로판올 용매에서 라디칼의 수명이 다른 용매에서 보다 상대적으로 길기 때문이라고 설명되었다.<sup>24</sup> 한편 헥산 및 헤파탄과 같은 선형 탄화수소계 용매는 이전 연구에서 그래

프트 용매로 사용이 되지 않았는데, 본 실험에서 이 두 용매를 적용한 결과, 스티렌을 전조사 방법으로 그래프트할 경우 가장 널리 사용되는 용매인 톨루엔 보다 더 높은 그래프트율을 보여주는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 2는 Figure 1의 결과에서 상대적으로 높은 그래프트율을 보이는 이소프로판올, 헵탄 및 톨루엔을 이용하여 반응시간에 따른 그래프트율 변화를 보여주고 있다. 그 결과를 자세히 보면 이소프로판올이 가장 높은 그래프트율을 보이고 헵탄과 톨루엔 순으로 그래프트율이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 용매와 시간에 따른 그래프트율의 변화는 Table 1에 숫자로 표기하였다. 그래프트 반응은 초기 4시간 동안 그래프트율이 급격하게 증가하다가 8시간 이후에는 그래프트율의 증가가 크지 않는데 이는 그래프트가 진행되면서 라디칼이 정지반응(termination)

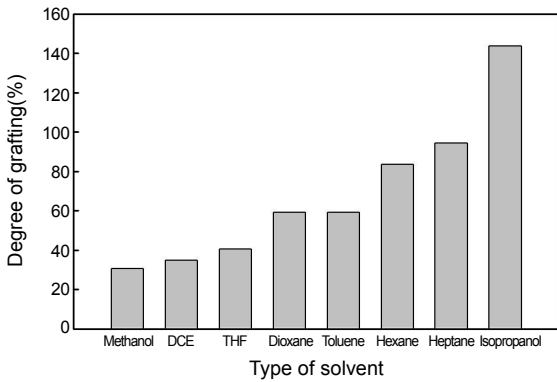


Figure 1. Effect of solvent on the pre-irradiation grafting of VBC monomer onto ETFE films.

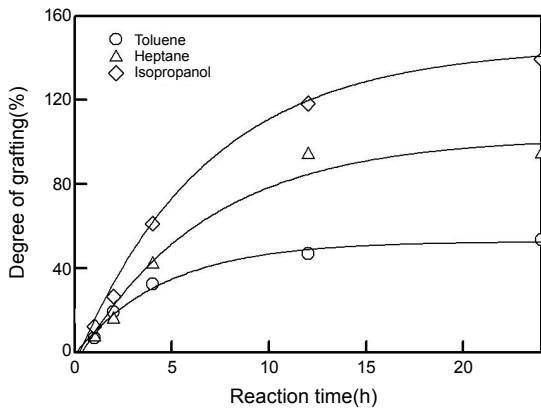


Figure 2. Grafting kinetics of VBC monomer in the different solvents (toluene, heptane, and isopropanol).

Table 1. Degree of Grafting Shown in Figure 2

Reaction time (h)	Degree of grafting (%)		
	Toluene	Heptane	Isopropanol
0	0	0	0
1	6.8	7.2	12.3
2	19.2	15.5	26.5
4	32.3	41.8	61.2
8	42.7	72.0	106.2
12	47.0	93.9	118.3
24	53.6	94.0	139.3

과 연쇄이동(chain transfer)으로 인해 소모되기 때문이다. 3가지 용매 중 이소프로판올에서 초기 그래프트 속도가 높은 것과 8시간 이후에서도 그래프트율이 서서히 증가하는 것은 이 용매에서 그래프트 중합 속도가 빠르고 라디칼의 수명이 길다는 것을 의미한다.

전조사 조건하에서 VBC 단량체가 ETFE 필름에 성공적으로 그래프트된 것은 FTIR 스펙트럼으로 확인할 수 있다. Figure 3은 순수한 ETFE 필름과 톨루엔, 헵탄 그리고 이소프로판올을 용매로 사용하여 제조된 VBC 고분자가 그래프트된 ETFE 필름의 FTIR 스펙트럼을 보여주고 있다. 순수한 ETFE 필름의 IR 스펙트럼을 관찰해 보면 1250~960  $\text{cm}^{-1}$ 에서 불소고분자의 -C-F 결합에 의해서 나타나는 강한 IR 피크를 확인할 수 있다. VBC 고분자로 그래프트된 ETFE 필름의 IR 결과를 보면 3020  $\text{cm}^{-1}$  및 1600~1450  $\text{cm}^{-1}$ 에서 각각 VBC의 벤젠 고리에 의한 =C-H 결합과 C=C 결합에 의해 새로운 피크들이 생성되었음을 확인할 수 있었다. 한편 VBC의 고분자 주사슬의 -C-H 결합에 의해서 2900~2800  $\text{cm}^{-1}$ 에 존재하는 IR 피크가 상대적으로 크게 증가하였음을 관찰할 수 있었다. 또한 VBC 단량체에 존재하는 -C-Cl 결합에 의한 특성 피크가 840  $\text{cm}^{-1}$ 에서 관찰되었다. 3가지의 다른 용매에서 비슷한 그래프트율로 제조된 필름들의 IR 스펙트럼을 비교한 결과, 용매에 따른 차이가 없음을 확인하였다.

Figure 4는 순수한 ETFE 필름과 헵탄을 용매로 사용하여 제조된

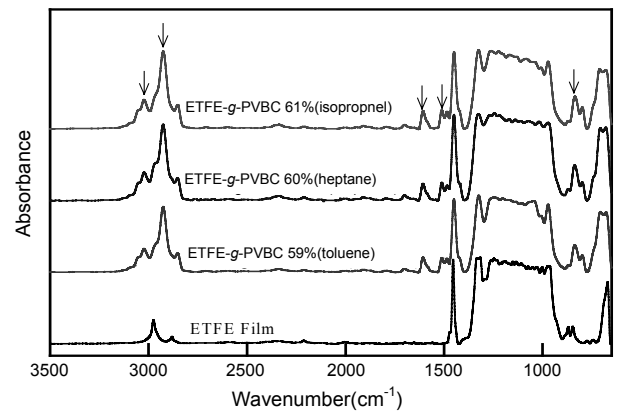


Figure 3. FTIR spectra of pure ETFE film and ETFE-g-PVBC films (about 60% DOG) prepared in different solvents.

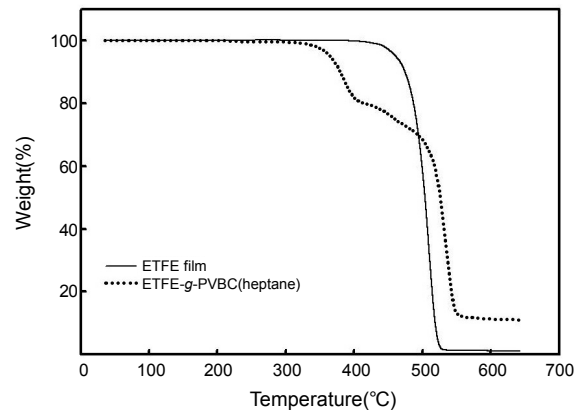
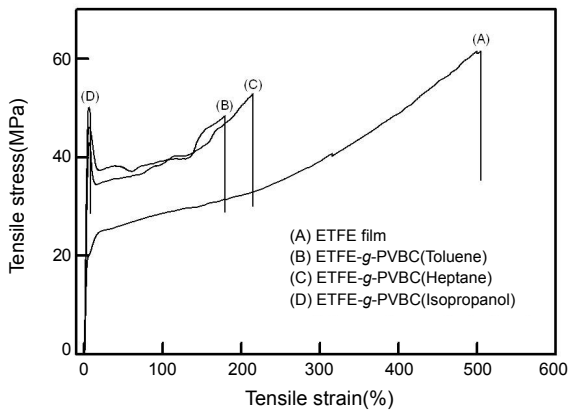


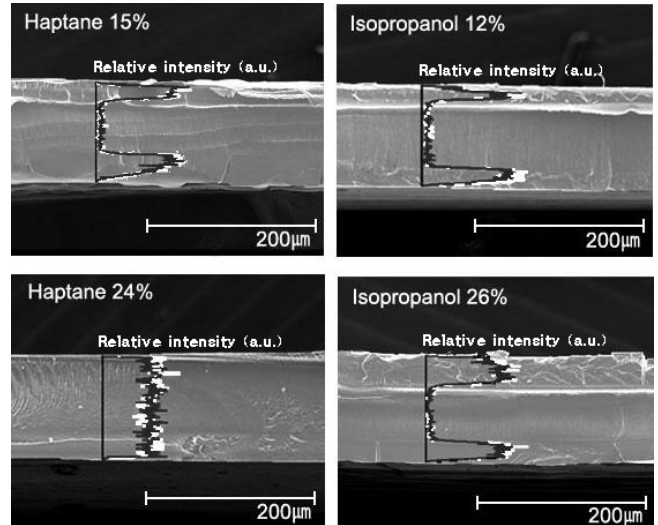
Figure 4. TGA curves of pure ETFE and ETFE-g-PVBC films (about 60% DOG) prepared in heptane.



**Figure 5.** Stress-strain curves of pure ETFE and ETFE-g-PVBC films (about 60% DOG) prepared in different solvents.

VBC 고분자가 그래프트된 ETFE 필름의 온도에 따른 무게 변화를 나타낸 TGA 결과이다. 순수한 ETFE 필름의 결과를 보면 약 430 °C에서부터 ETFE 주사슬의 분해로 인한 필름의 무게 변화를 관찰할 수 있다. 한편 VBC 고분자로 그래프트된 ETFE 필름의 TGA 곡선을 보면 두 단계로 분해가 일어나고 있음을 확인할 수 있다. 첫 번째 무게 변화는, 약 330 °C에서부터 일어나고 있으며, 이들은 VBC 고분자 사슬들의 분해 때문에 일어나는 결과이다. 두 번째 무게 변화는, 약 430 °C에서부터 시작되고 이는 ETFE 주사슬의 분해 때문에 나타나는 결과이다. 이 결과를 통해 VBC 고분자가 ETFE 필름에 성공적으로 그래프트된 것을 확인할 수 있다. 또한 VBC 고분자로 그래프트된 ETFE 필름은 약 330 °C 이상까지 열적 안정성을 가지고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

여러 용매에서 제조된 필름들 중 이소프로판올에서 제조된 필름의 그래프트율이 가장 높은 반면 필름이 딱딱해지고 잘 부러지는 성질을 있는 것이 관찰되었다. 따라서 사용된 용매에 의한 그래프트된 필름의 기계적 물성을 측정하였다. Figure 5는 순수한 ETFE 필름과 톨루엔, 헵탄 그리고 이소프로판올을 용매로 사용하여 제조된 VBC 고분자가 그래프트된 ETFE 필름의 인장응력에 대한 필름의 변형률을 나타낸 결과이다. 순수한 ETFE 필름의 경우 전형적인 결정성 고분자의 점탄성 성질을 보여주는데, 인장응력이 증가함에 따라 24.5 MPa 정도에서 항복 응력점을 지난 뒤 약 220% 인장률까지 무정형 사슬들간의 배향이 일어난 후 약 500%까지 연신되어 사슬들의 파괴되는 것을 보여주고 있다. 한편 VBC 고분자로 그래프트된 ETFE 필름의 인장강도 측정 결과, 제조된 필름의 기계적 물성이 사용된 용매의 종류에 따라 크게 영향을 받고 있음을 관찰할 수 있었다. 특히 그래프트율이 높은 이소프로판올을 사용한 경우 50.1 MPa에서 항복 응력점을 가진 후 바로 사슬의 파괴가 일어나고 있음을 확인할 수 있다. 헵탄을 사용하여 VBC 고분자를 그래프트한 필름의 기계적 강도를 측정하는 결과, 41.4 MPa에서 항복 응력점을 가진 후 순수한 ETFE 필름과 같이 인장률이 약 150% 정도까지 사슬들간의 배향이 일어난 후 210% 정도에 사슬의 파괴가 일어나고 있음을 관찰할 수 있었다. 톨루엔에서 제조된 필름은 헵탄에서 제조된 필름보다 항복 응력은 45.2 MPa로 약간 높아졌지만 인장률은 175%로 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과로부터 이소프로판올을 사용하여 VBC가 그래프트된 필름을 제조할 경우 높은 그래프트율을 얻을 수 있지만 기계적 강도가 현저히 감소하기 때문에 연료전지막과 같이 높은 기계적 물성



**Figure 6.** SEM images and cross-sectional distribution of sulfur (black line) and chlorine (white line) over the ETFE-g-PVBC films prepared in different solvents.

을 요구하는 물질을 제조하는데 적합하지 않은 것을 알 수 있다. 따라서 기계적 특성을 측정하는 결과, 헵탄에서 제조된 필름이 가장 우수한 기계적 강도를 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

방사선 그래프팅 메커니즘에 의하면 ETFE 필름과 같이 팽윤도가 낮은 불소고분자에 단량체를 그래프트할 경우, 표면에서부터 그래프트 반응이 시작되고, 그래프트된 부분의 팽윤도가 증가함에 따라 점차적으로 단량체가 필름 내부로 침투하게 되어 균일하게 그래프트된 필름을 제조할 수 있게 되는 것으로 알려져 있다.<sup>25</sup> 따라서 불소고분자 및 그래프트된 부분의 용매에서의 팽윤도는 그래프트 고분자의 내부 분포도에 큰 영향을 미칠 수 있게 된다. 본 실험에서 사용된 이소프로판올은 헵탄과 비교하여 매우 극성인 용매로서 불소고분자 필름 및 그래프트된 부분의 팽윤도를 감소시켜 불균일하게 그래프트된 필름이 제조될 것으로 예측되었다. 이러한 불균일성은 연료전지막과 같이 이온의 투과도가 중요한 요인으로 작용하는 경우 단점으로 작용할 수 있다. 그러므로 헵탄과 이소프로판올에서 그래프트된 VBC 고분자의 ETFE 필름 내부로의 분포도를 SEM-EDX를 이용하여 관찰하였다.

Figure 6은 두 용매에서 비슷한 그래프트율로 제조된 필름의 단면에서 존재하고 그래프트 고분자의 분포도를 보여주고 있다. 그래프트 고분자의 분포도를 SEM-EDX 기기로 명확하게 관찰하기 위하여 ETFE-g-PVBC 필름을 thiourea와 반응시켜 thiuronium 염을 형성시킨 후 황과 염소의 상대적 분포를 측정하였다.<sup>17</sup> 약 10% 정도의 그래프트율로 제조된 필름 단면의 황과 염소의 분포도를 보면 헵탄과 이소프로판올에서 제조된 필름 모두 그래프트 고분자가 표면에 주로 분포하고 내부에는 그래프트되지 않음을 알 수 있다. 그래프트율이 20% 이상으로 증가되었을 경우 헵탄에서 그래프트된 필름은 표면뿐만 아니라 내부까지 그래프트 고분자가 고르게 분포되어 있는 반면 이소프로판올에서 그래프트된 필름은 내부까지 그래프트 고분자가 균일하게 분포되지 않았음을 확인할 수 있었다.

## 결 론

본 실험에서는 전조사 조건에서 VBC 고분자가 그래프트된 ETFE-g-PVBC 필름을 다양한 용매에서 제조한 후 필름들의 그래프트율, 기계적 물성, 그래프트 분포도를 비교하여 용매에 따른 영향을 규명하고자 하였다. 그래프트율을 비교한 결과, 메탄올 < 디클로로 에탄 < 테트라하이드로 퓨란 < 1,4-다이옥산 < 톨루엔 < 헥산 < 헵탄 < 이소프로판올 순으로 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 한편 인장 강도 및 SEM-EDX 실험을 통하여 헵탄에서 제조한 필름이 톨루엔이나 이소프로판올에서 제조한 필름과 비교하여 우수한 기계적 강도를 가지고 있고 낮은 그래프트율에서도 그래프트 고분자의 분포가 균일한 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과로부터 VBC 단량체를 ETFE 불소고분자에 전조사 방법으로 그래프트할 경우 헵탄이 매우 적합한 용매로 여겨진다.

**감사의 글:** 본 연구는 교육과학기술부 재원으로 원자력연구개발사업의 지원을 받아 수행되었고, SEM-EDX 분석은 기초과학연구원 전주분소에 도움을 받아 측정되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- A. Bhattacharya and B. N. Misra, *Prog. Polym. Sci.*, **29**, 767 (2004).
- T. R. Dargaville, G. A. George, D. J. T. Hill, and A. K. Whittaker, *Prog. Polym. Sci.*, **28**, 1355 (2003).
- M. M. Nasef and E.-S. A. Hegazy, *Prog. Polym. Sci.*, **29**, 449 (2004).
- R. Souzy and B. Ameduri, *Prog. Polym. Sci.*, **30**, 644 (2005).
- L. Gubler, S. A. Gürsel, and G. G. Scherer, *Fuel Cells*, **5**, 317 (2005).
- G. Fei, J. Shin, S.-A. Kang, B.-S. Ko, P.-H. Kang, and Y. C. Nho, *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.*, **48**, 563 (2010).
- B.-S. Ko, S.-A. Kang, G. Fei, J.-P. Jeun, Y.-C. Nho, P.-H. Kang, C.-Y. Kim, and J. Shin, *Polymer(Korea)*, **34**, 20 (2010).
- J. Chen, M. Asano, Y. Maekawa, and M. Yoshida, *J. Membr. Sci.*, **277**, 249 (2006).
- L. Gubler, N. Prost, S. A. Gürsel, and G. G. Scherer, *Solid State Ionics*, **176**, 2849 (2005).
- M. M. Nasef and H. Saidi, *J. Membr. Sci.*, **216**, 27 (2003).
- J.-S. Im, J.-Y. Sohn, J. Shin, Y.-M. Lim, J.-H. Choi, J.-S. Kim, and Y.-C. Nho, *Polymer(Korea)*, **34**, 74 (2010).
- J.-Y. Sohn, J.-H. Choi, J. Shin, and Y.-C. Nho, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B*, **266**, 4994 (2008).
- J.-Y. Sohn, J.-S. Im, S.-J. Gwon, J. Shin, J.-H. Choi, and Y.-C. Nho, *Polymer(Korea)*, **32**, 598 (2008).
- N. Seko, M. Tamada, and F. Yoshii, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B*, **236**, 21 (2005).
- M. Tamada, N. Seko, and F. Yoshii, *Radiat. Phys. Chem.*, **71**, 221 (2004).
- J. Shin, G. Fei, S.-A. Kang, B.-S. Ko, P.-H. Kang, and Y. C. Nho, *J. Appl. Polym. Sci.*, **113**, 2858 (2009).
- G. Fei, S.-A. Kang, B.-S. Ko, Y.-S. Lee, Y. C. Nho, and J. Shin, *J. Appl. Polym. Sci.*, **117**, 2380 (2010).
- T. N. Danks, R. C. T. Slade, and J. R. Varcoe, *J. Mater. Chem.*, **13**, 712 (2003).
- S. D. Alexandratos and X. Zhu, *Macromolecules*, **36**, 3436 (2003).
- T. N. Danks, R. C. T. Slade, and J. R. Varcoe, *J. Mater. Chem.*, **12**, 3371 (2002).
- G. Schmidt-Naake, M. Bohme, and A. Cabrera, *Chem. Eng. Technol.*, **28**, 720 (2005).
- H. Herman, R. C. T. Slade, and J. R. Varcoe, *J. Membr. Sci.*, **218**, 147 (2003).
- M. M. Nasef, *Polym. Int.*, **50**, 338 (2001).
- Y. Kimura, M. Asano, J. Chen, Y. Maekawa, R. Katakai, and M. Yoshida, *Radiat. Phys. Chem.*, **77**, 864 (2008).
- H. P. Brack, H. G. Bührer, L. Bonorand, and G. G. Scherer, *J. Mater. Chem.*, **10**, 1795 (2000).
- R. Rohani, M. M. Nasef, H. Saidi, and K. Z. M. Dahlan, *Chem. Eng. J.*, **132**, 27 (2007).