

실험실 방사성핵종 오염도 측정에 있어 Fluor 함침 폴리설폰 막의 이용

한 명 진

경일대학교 공과대학 화학공학과
(1998년 12월 28일 접수, 1999년 4월 16일 채택)

Use of Fluor-Impregnated Polysulfone Membranes for Measuring Radioactive Contamination in Laboratories

Myeong-Jin Han

Department of Chemical Engineering, Kyungil University, 33 Buhori, Kyungsangbuk-do 712-701, Korea
(Received December 28 1998, Accepted April 16, 1999)

요 약 : 무기 fluor로서 방사능 물질과 반응하여 섬광을 일으키는 cerium activated yttrium silicate를 폴리설폰 고분자 구조 내에 함침시킨 측정막을 제조하고, 이를 이용하여 방사성핵종인 ^3H -cortisol로 오염된 실험실 바닥의 방사능 오염도를 측정하였다. 제조된 측정막을 이용하여 오염지역을 문지르고, 막에 함침된 fluor와 오염지역으로부터 막으로 옮겨진 방사능 물질과의 직접 반응에 의해 나타난 섬광을 측정하여 방사성핵종의 양을 결정하였다. 유기 fluor가 용해되어 있는 섬광보조용액 (scintillation cocktail)의 도움을 필요로 하는 기존의 방사성핵종 측정 방법에 비해, 측정막을 이용할 경우 오염도의 측정 효율을 유지하면서 전체적인 방사능 폐기물의 양산을 제어할 수 있는 효과를 거두었다. 한편, 탐지 효과의 증대를 위해 시도된 디메틸포름아마이드를 이용한 측정막의 용매 처리는, 막 표면의 형상변화를 유도할 수 있었으나, 방사성핵종에 대한 측정 효율의 증대로는 귀결되지 않았다.

Abstract : Solid scintillation proximity membranes were prepared for measuring the amount of radioactivity in laboratories contaminated by the radionuclide of ^3H -cortisol. The membranes, consisting of polysulfone as a polymer matrix and cerium activated yttrium silicate as a fluor, were used to monitor the amount of radioactivity without the aid of a scintillation cocktail required for the conventional wipe test. The test results of the cocktail-free wipe test showed that the prepared membranes were efficient to monitor radionuclide-contaminated areas with the good counting ability as well as with the decrease of overall production of radioactive waste. On the other hand, solvent treatment of the prepared membranes could induce a significant variation of membrane morphology, but the counting efficiency of the solvent-treated membranes was not improved than that of the untreated one.

1. 서 론

인체 내부에 투여되는 약제 또는 특정 물질의 동역학적 및 생화학적 특성을 측정함에 있어, 방사성핵종 (radionuclide)을 이용하여 이들의 경로 또는 변화 과정을 추적하는 방법이 실험실에서 널리 사용되고 있

다. 특히, ^{14}C , ^3H 및 ^{35}S 와 같은 베타선 방출체 (β -emitters) 들은 연구에 사용되는 대표적인 방사성핵종으로서, 이들의 경로 및 농도는 전류, 음영 정도, 또는 전자 펄스 숫자 등을 측정함으로써 확인할 수 있다[1]. 이처럼 방사능 표시된 방출체를 사용하여 물질을 정량화하는 방법은 측정하고자 하는 물질을 파괴

하지 않고 아주 섬세하고 미세한 부분까지 추적할 수 있는 장점을 지니고 있다. 그러나, 방사성핵종을 장기간 사용할 경우, 실험실에서 이들의 누적 가능성은 증대될 것이며, 적절히 제어되지 않을 경우 연구 수행자들의 건강을 위협할 수 있는 수준에까지 도달할 수 있게 된다. 따라서, 연구원들의 안전을 위해서는 이들 방사능 물질의 오염도를 정기적으로 측정하여 누적 가능성을 방지하는 것이 필요하다. 미국의 핵규제위원회 (Nuclear Regulatory Commission)의 규정에 따르면, 방사성핵종을 사용하는 모든 실험실에서는 방사능 오염도에 대한 정기적인 점검을 통해, 실험실의 상태를 감시하도록 의무화하고 있다[2].

실험실에서 방사성동위원소로 사용되는 방사성핵종은 대부분 베타선 방출체로서, 이들은 γ -동위원소에 비해 상대적으로 낮은 방사능 에너지를 보유하므로 기존의 방사능 측정기로서는 효율적으로 감지하기 어렵다. 이러한 비교적 낮은 에너지를 지닌 방사성 동위원소에 의한 오염도를 측정하는 방법으로는, 미국 핵규제위원회에서 규정한 wipe test가 가장 일반적으로 적용되고 있다. 핵규제위원회의 지침에 따르면, 방사성핵종을 사용하는 연구실에서는 정기적으로 wipe test를 수행하여 실험실 바닥이나 실험 테이블의 방사능 오염도를 측정함으로써, 이들 지역의 세척 또는 교환 여부를 파악해야 한다고 규정짓고 있다. Wipe test를 수행함에 있어 어떤 특정 매체나 적용 방법에 대한 정확한 언급은 없으며, 단지 오염이 예상되는 표면을 일정하게 감시할 수 있는 방법이면 가능하다고 규정하고 있다. 시험 방법의 예로서는, 오염 예상 지역으로부터 방사성동위원소인 방사성핵종을 매체를 이용하여 걷어 내고 이들 방사성 물질을 기기를 통하여 정량화하는 것을 권장하고 있다. 현재, 가장 보편적으로 이용되고 있는 방법은 wiping 매체로서 유리 섬유필터나 종이필터를 사용하여 오염 예상지역을 문지르고 이를 방사성핵종과 반응하여 섬광을 일으키는 물질 (fluor)이 함유되어 있는 섬광보조용액 (scintillation cocktail)에 집어넣어 방사성핵종과 보조용액에 있는 유기 fluor와의 반응에 의해 생성된 섬광의 양을 측정기기 (scintillation counter)를 통해 정량화하는 것이다[3]. 하지만, 이러한 방법은 wiping 매체에 붙어있는 방사성핵종이 보조용액으로 확산되는 것을 전제로 하며, 결과적으로 측정 과정에서 많은 양의 방사능 폐기물의 생성을 초래하게 된다.

이러한 방사능 폐기물의 양산을 제어하기 위한 시도로서, wiping에 의해 매체로 옮겨진 방사능물질을 섬광보조용액의 도움 없이 매체와의 직접 반응에 의해 탐지할 수 있는 wiping 매체, 즉 측정막, 제조에

대한 연구가 활발히 진행되고 있다[4-7]. 이러한 wiping 매체 또는 측정막은 합성고분자로 이루어진 구조에 방사능 측정용 반응체인 fluor를 함침시켜 제조하는 것이 일반적이다. 이와 같이, 고분자 막 내부에 반응제나 약제를 함침시켜 어느 특정 물질의 검출 또는 확인에 이용하거나, 함침된 물질을 일정한 속도로 배출시켜 치료 또는 예방의 지속적인 효과를 유도하는 방법이 최근 화학 또는 의학 분야에서 다양하게 연구되고 있다[8]. 특히, 생분해성 고분자를 이용한 제어방출 약제의 제조에 대한 연구는 상당한 발전을 이루었다. 예를 들어, 제어방출용 약진을 사용하는 방법은 특정인에 대한 약제의 반복 투여가 어려운 제3세계에서 한번의 약제 투여로 여러번의 약제 투여를 생략하면서도 높은 면역 효과를 거두고 있다. 한편, 함침된 반응제와 특정물질의 검출 또는 확인을 위한 측정막 제조에 관한 연구는 국내에서도 활발히 진행되고 있다[9]. 이러한 측정막의 효율성을 제고하기 위해서는 검출 대상 물질과 반응제와의 상호작용이 원활히 이루어지도록 반응제가 막 내부에 고루 분포되어야 하며, 특히 막 표면에서의 반응이 가장 중요하므로, 측정막 표면에서의 반응제 용집도가 중요한 요소로 작용한다. 즉, 반응제의 함침 특성과 이의 산포도는 측정막의 효율에 결정적인 요소로 작용하게 된다.

앞서 보고된 바와 같이, 흡습성 및 고비점의 특성을 지니는 용매를 포함하는 폴리설편 용액으로부터 측정막을 제조하였을 때, 고형화된 측정막에서의 무기 fluor의 함침 특성 및 막의 기능성은 제막용액의 침지 특성에 따라 뚜렷하게 다른 차이를 나타내었다[10, 11]. 본 연구에서는 폴리설편에 무기 fluor가 함침된 방사능 측정막을 제조함에 있어, 비흡습성 및 저비점의 용매를 포함하는 폴리설편 용액을 제막하고 이로부터 용매 증발을 통해 폴리설편의 유리화를 유도함으로써, 용액의 상분리 현상에 의해 야기될 수 있는 막의 기공 또는 불균일한 밀도의 고분자 구조 형성을 억제하도록 연구를 추진하였다. 이를 통해 제조된 폴리설편 측정막을 이용하여, 실험실에서 널리 이용되고 있는 방사성핵종 (^3H -cortisol)에 의한 오염도를 탐지하기 위한 매체로 사용하고 이들의 효과를 분석하였다. 아울러, 제조된 막의 표면을 용매로 처리하여 표면의 형상 변화를 유도하고, 이에 따른 방사능 탐지 효과의 변화도 조사하였다.

2. 실험

2.1. 막의 제조

용매로서 메틸렌클로라이드 (MC) 20 ml 와 2.5 g

또는 4.5 g의 폴리설펜 (PSF) 을 혼합하여 균일한 용액을 만들고, 이에 10 g의 cerium activated yttrium silicate (CAYS, Sylvania Co., Towanda, PA)를 첨가하여 2시간 동안 분산시킨 후 준비된 용액을 유리판 위에 Doctor Blade를 사용하여 0.4 mm의 두께로 도포하였다. 제막된 용액 필름은 21°C, 50 % 상대습도의 조건에서 하루 동안 방치한 후 유리판 위에 고정화된 필름을 조심스럽게 떼어내어 2 주일 동안 대기에서 추가로 건조시켰다.

제조된 측정막의 용매 처리는 4.5 g의 폴리설펜을 포함하는 용액으로부터 제조된 막에 한해서 적용되었으며, 측정막을 디메틸포름아마이드 (DMF)에 1초 간 담근 후 꺼내어 물욕조에 24 시간 침지시켜 용매를 제거한 다음 대기에서 건조시켰다.

2.2. SEM

제조된 측정막의 형상은 전자주사현미경 (SEM, Hitachi S-800)을 이용하여 분석되었다. 샘플들은 액체질소를 사용한 심냉 조건 아래에서 준비되어지고, 대기에서 건조되었다. 모든 시편들은 촬영 전에 금-팔라듐 (6:4) 합금을 사용해 도포 되어졌다.

2.3 Wipe test

제조된 고체막의 방사성핵종에 대한 탐지 특성은 wipe test를 통해 측정하였다. Wipe 과정에서 측정막에 옮겨진 방사성핵종을 섬광보조용액의 도움없이 직접 측정기기를 통해 정량화하고, 이 결과를 유리섬유필터를 wiping 매체로 하고 섬광보조용액 (EcoLite, ICN Pharmaceuticals, Costa Mesa, CA, USA)을 사용하여 얻어진 결과와 비교하였다. Wipe test를 실행하기 위해, 실험실의 바닥재로 널리 이용되는 플라스틱 타일에 2.5 cm × 2.5 cm의 격자 무늬들을 표시하고 각 격자 무늬 내부에 에틸알콜에 희석된 방사성핵종 (^3H -cortisol, Amersham International, Melville, NY; 21,000 CPM)의 일정량 (20 μl)을 표면에 도포시키고 하루 동안 말린 다음, 기 도포된 지역을 제조된 고분자막 또는 유리섬유필터 (Whatman International, Maidstone, England)를 이용하여 문질러 방사성핵종을 매체로 옮기고 이를 방사성 동위원소 측정기기 (Packard 2200 CA)를 이용해 측정하였다. 제조된 측정막과 유리섬유필터는 wipe test를 실행하기에 앞서 이들의 가운데 부분으로부터 2.5 cm 직경의 디스켓을 떼어내어 이를 wiping 매체로 사용하였다. 한편, 측정 매체로 문질러기에 앞서 타일로부터 방사성핵종의 탈착이 용이하도록, 측정막의 경우 20 μl 그리고 유리섬유필터의 경우 40 μl 의 증류수

를 방사성핵종이 도포된 타일 위에 떨어뜨리고 wipe를 실행하였다. 방사능 오염지역으로부터 매체로 옮겨진 방사성핵종의 정량화를 위해 측정막과 유리섬유필터는 측정용 유리병에 집어넣어 젖으며, 유리섬유필터의 경우는 5 ml의 섬광 보조용액이 측정 전에 주입되었다. 유리병 자체에 의한 섬광 특성을 보정하기 위해, wiping 샘플을 측정하기에 앞서 빈 유리병을 사용하여 공시험을 시행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1에서 보여지는 바와 같이, 제조된 측정막의 형상은 내부에 CAYS 입자들이 폴리설펜에 둘러싸여 균일하게 분포되어있는 모습을 나타낸다. 이때, 폴리설펜은 CAYS 입자들을 서로 연결시키는 결합재로 작용하게 된다. 물론, 용액 상태의 고분자용액이 고체화 과정에서 용매와 비용매의 상호교환에 의한 상전환 공정을 포함하며 고체화할 경우, 막의 형상 및 CAYS의 함침 특성은 막 내부에 기공을 형성하는 비균일성을 초래하며 다양하게 나타날 수 있다[7]. 그러나, 본 실험에서 사용되어진 메틸렌클로라이드의 비흡습성 및 낮은 비점을 고려할 때, 대기에 방치된 제막 용액의 증발과정에서 상전환에 의한 고형화의 가능성은 배제될 수 있으므로, 무정형 고분자인 폴리설펜의

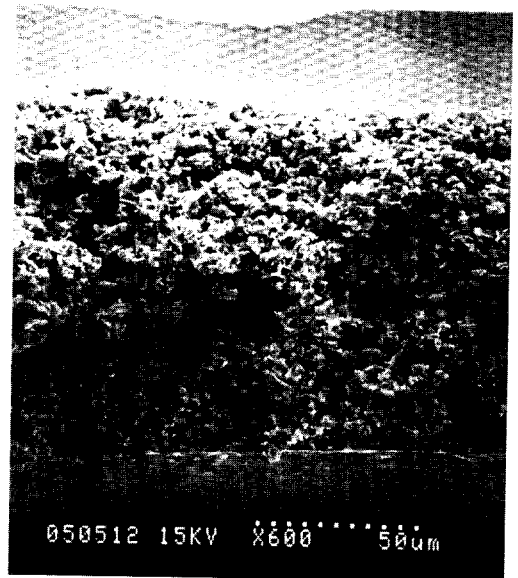


Fig. 1. Scanning electron micrograph of cross section of a membrane prepared from a solution of 4.5 g PSF/20 ml MC.

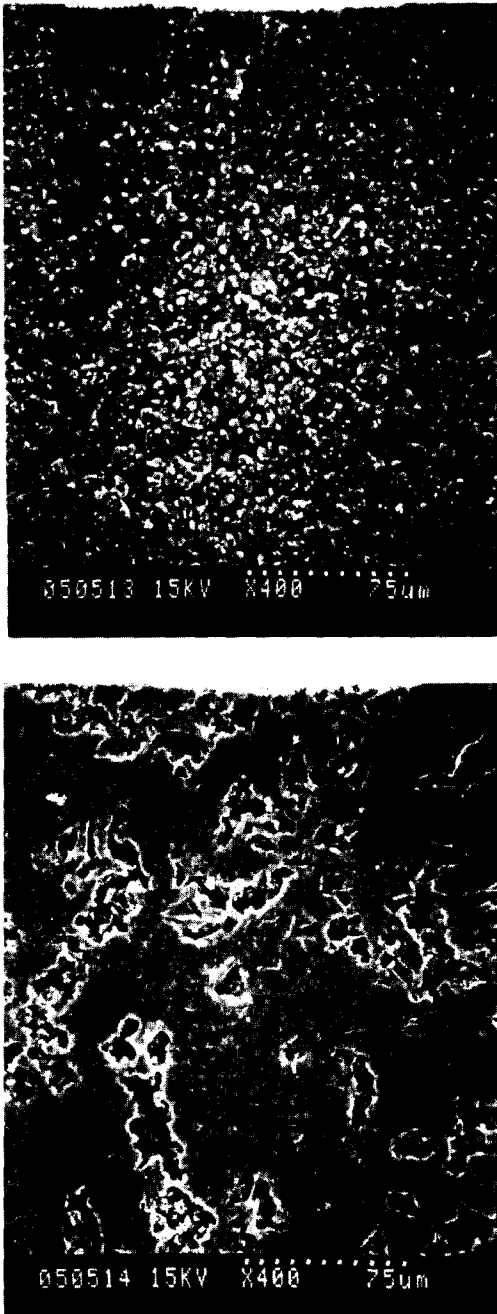


Fig. 2. Scanning electron micrographs of the surfaces of a membrane prepared from a solution of 4.5 g PSF/20 ml MC; top photograph for the air side and bottom photograph for the glass side.

유리화에 의한 응고화만이 가능하게 된다. 제조된 측정막의 표면은, Fig. 2에 보여지듯이, 제막과정에서 공기를 접했던 부분은 비교적 고른 분포의 균일한 형상을 지녔으며, 이에 비해 유리를 접했던 지역은 상대적으로 매끄러운 지역과 불균일하게 형성된 틈새 지역으로 분리될 수 있다.

제조된 막을 이용하여 방사성핵종이 도포된 타일의 표면을 문질렀을 때, 원래 도포된 방사성핵종의 모두가 막으로 옮겨질 수는 없다. 이는 타일의 표면에 강하게 흡착되어 타일로부터 쉽게 유리되지 않는 방사성핵종에 의해 야기되며, 이와 같은 매체에 의한 탈착능력의 감소는 wipe test의 효율을 저하시키는 주요 요소 중의 하나로 작용한다. 이와 아울러, 측정막을 이용하는 wipe test에서 측정 효율(counting efficiency)의 저하를 유발하는 두 가지 요인이 존재한다. 하나는, 반응제인 fluor를 둘러싸고 있는 고분자에 의해 야기되는 것으로, 반응제를 감싸고 있는 고분자의 두께가 두터울수록 fluor와 막에 부착된 방사성핵종과의 반응도는 떨어지게 된다. 다른 하나는, 섬광 소멸 효과에 의한 것으로, 반응제와 방사성핵종과의 상호 반응에 의해 생성된 섬광이 측정기에 도달하기 위해 지나쳐야 할 경로가 복잡할 경우, 이 또한 전반적인 탐지 능력의 저하로 나타나게 된다. 이러한 현상은 매체의 형상에 의해 크게 좌우되며, 측정막 내부에 형성된 기공이 클수록 영향을 많이 받게된다. 이러한 효율 저감 요소들에 의해, wipe test를 통해 측정된 방사능 오염도는 타일에 존재하는 방사성핵종의 일부를 탐지 과정에서 누락하게 된다.

오염 지역에 대한 wipe test에 앞서 막의 측정 효율을 결정하기 위해, 타일에 투여된 양과 같은 양의 방사성핵종을 제조된 측정막의 표면에 직접 떨어뜨리고 (spot test) 방사능 양을 측정하였다. 한편, 기준되는 방사성핵종의 고유 방사능도를 결정하기 위해, 막에 투여한 양과 같은 양의 방사성핵종을 섬광보조용액에 직접 투여하고 이를 측정한 결과를 기준값으로 하였다. Fig. 3에서 보여지는 바와 같이, 측정막에 투여되어 측정된 값은 기준값의 50~70% 정도에 머무르는 것으로 나타났다. 즉, 막에 부착된 방사성핵종의 상당한 부분은 측정 과정에서 손실됨을 보여주고 있다. 이러한 현상은 위에서 언급한 바와 같이, 두 가지 효율 저감 요소에 의해 발생된 것으로 분석된다. 첫째로 막에 흡착된 방사성핵종과 무기 fluor와의 반응은 fluor를 감싸고 있는 폴리설폰을 통과해야 하므로 이에 따른 자연발생적인 감소 요인에 의한 것이며, 다른 하나는 ^3H -cortisol이 막 내부로 확산됨에 의해 발생하는 섬광소멸효과 (quenching effect)에 의한 가능성

이다. 손실 정도에서 2.5 g의 고분자를 포함하는 용액으로부터 제조된 측정막이 4.5 g의 고분자 용액으로부터 형성된 측정막에 비해 상대적으로 적은 손실율을 보여주었는데, 이는 fluor를 감싸고 있는 고분자의 양 또는 두께가 상대적으로 얇은데 기인한 것으로 분석된다. 한편, 이미 보고된 바와 같이, 다공성을 지니는 측정막의 경우 이러한 침광소멸효과는 증대하는 것으로 나타났다[10].

제조된 막을 이용하여 wipe 시험을 수행하여 측정된 결과는 Fig. 4에 보여진다. Wiping 매체로 유리섬유필터를 사용하고 이를 침광보조용액에 집어넣어 측정하는 기존의 wipe test와 비교하였을 때 커다란 차

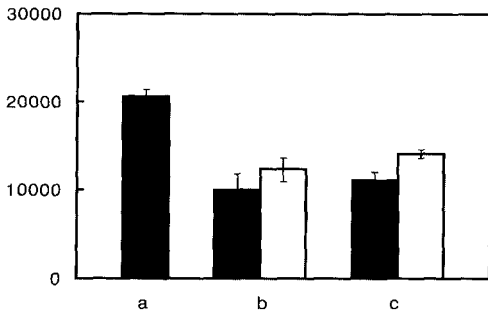


Fig. 3. Radioactive counts per minute (CPM) of ³H-cortisol detected following spot test on the prepared membranes; original activity of the radionuclide (a), membranes prepared with 4.5 g PSF (b), and with 2.5 g PSF (c). The original activity of ³H-cortisol was obtained by measuring with a scintillation counter after direct spotting of the emitter in a cocktail-containing vial. In the membrane spot test, ■ represents the air side, and □ represents the glass side during cast.

이를 보여주지 않았다. 한편, 제막용액의 고분자 함량에 관계 없이 wipe test 결과는 유사한 경향을 보여준다. 즉, 제막 과정에서 공기를 집혔던 부분의 탐지 효율성은 제막시 유리를 집혔던 부분에 비해 상대적으로 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 제막 후 용매 증발 과정에서 제막 용액과 공기와의 계면에 고분자들이 농축되어 고형화됨으로써, 제조된 측정막의 표면 형상은 상대적으로 균일한 구조를 지니게되며, 이러한 형상은 wipe 과정에서 측정막과 타일과의 마찰을 줄이는 역할을 하게 되고, 결과적으로 타일 표면에 부착된 방사성핵종을 떼어내는데 결점으로 작용될 가능성에 기인한 것으로 보인다. Table 1에서 보여지듯이, wipe 측정막을 포함하는 유리병에 침광보조용액을 넣고 다시 한번 측정할 결과, 상당한 양의 방사성핵종이 보조용액이 첨가되었을 때 추가로 확인되었다. 이는 wipe 과정에서 막으로 옮겨진 방사성핵종의 상당한

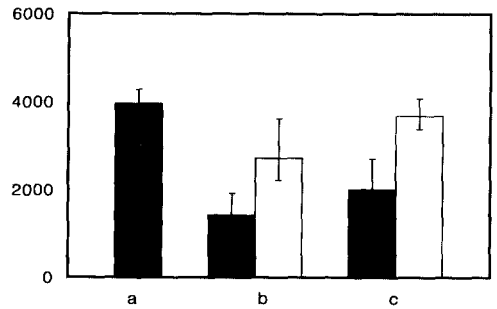


Fig. 4. Radioactive counts per minute (CPM) detected following wipe test: glass fiber filter in the cocktail (a), membrane prepared with 4.5 g PSF (b), and membrane prepared with 2.5 g PSF(c). The membranes were assayed in the absence of cocktail, and ■ represents the air side during cast, and □ the glass side.

Table 1. Comparison of radioactive counts per minute (CPM) of ³H-Cortisol detected following spot test on the prepared membranes between before and after the addition of scintillation cocktail

PSF wt. in casting solution	Exposing surface during cast	In the absence of scintillation cocktail (A)	In the presence of scintillation cocktail (B)	A/B *100
4.5 g	air side	1,400	1,900	73
	glass side	2,700	3,100	87
2.5 g	air side	2,000	2,400	83
	glass side	3,600	3,800	95

부분이 섬광보조용액으로 확산되어 용액에 존재하는 fluor와 직접 반응함으로써, 전체적인 반응성을 향상 시키는데 기인한다. 한편, 제막용액의 폴리설편 함량이 4.5 g인 경우 보조용액에 의한 첨가 전·후의 측정값이 폴리설편 함량이 2.5 g인 경우에 비해 상대적으로 크게 차이가 나타났다. 이는 보조용액이 없는 상태에서, 4.5 g의 폴리설편이 포함된 용액으로부터 제조된 측정막의 경우 반응제인 fluor를 둘러싸는 고분자 두께의 증가에 의해 fluor와 흡착된 방사성핵종과의 반응도가 상대적으로 낮은데 기인한 것으로 분석된다.

폴리설편 막의 표면 형상을 변형시키기 위해 용매 처리를 실시하였으며, 이는 디메틸포름아마이드를 포함하는 욕조에 제조된 막을 1초간 담근 후 꺼내어 물 욕조에 침지시킴으로써 이루어졌다. 제조된 측정막의 처리에 앞서, fluor를 포함하지 않는 투명한 폴리설편 막을 디메틸포름아마이드를 이용해 용매 처리한 경우, Fig. 5에 보여지는 바와 같이, 많은 알갱이 형태의 폴리설편이 막표면에 생성되어 표면 형상의 불균일을 초래하였다. 이미 보고한 바와 같이, 이를 wiping 매체로 사용했을 때 타일로부터 방사성핵종의 탈착을 증대시키는 효율의 향상을 가져왔다[10]. Fluor를 포함하는 측정막의 용매처리를 위해, 2.5 g의 고분자를 포함하는 용액으로부터 제조된 측정막을 디메틸포름아마이드 용액에 침지시키는 순간 형체가 흐트러지며 용매 욕조에 용해되었다. 따라서, 폴리설편 함량 4.5 g의 고분자 용액으로부터 제조된 측정막 만이 용매 처리에 적용되었다. 이러한, 용매 처리 과정에서 나타나는 현상은 고분자 함량이 2.5g의 용액으로부터 제조된 측정막에 있어 fluor를 감싸고 있는 고분자의 두께가 얇은 것을 입증한다. Fig. 6에 보여지는 것처럼, 측정막의 비교적 균일하였던 표면은 용매 처리 후 뚜렷하게 비균일성이 증가함을 보였다. 그러나, 용매 처리된 측정막을 wipe test에 적용하였을 때, Fig. 7에서 보여지듯이, 측정 효율의 증대 효과를 얻지 못하였다. 이는 측정막의 표면에서 fluor를 감싸고 있던 폴리설편 중 상당한 양이 처리 과정에서 용해되어 fluor와 함께 막으로부터 분리되었음을 나타낸다. 이는 용매 처리 후 막을 침지시켰던 물욕조에 침전된 폴리설편과 CAYS 입자들을 확인함으로써 입증할 수 있었다.

4. 결 론

방사성 동위원소인 방사성핵종에 의해 오염된 실험실에서의 방사능 오염도 측정 및 감시에 이용될 수 있는 폴리설편 측정막이 제조되었다. 측정막의 형성은

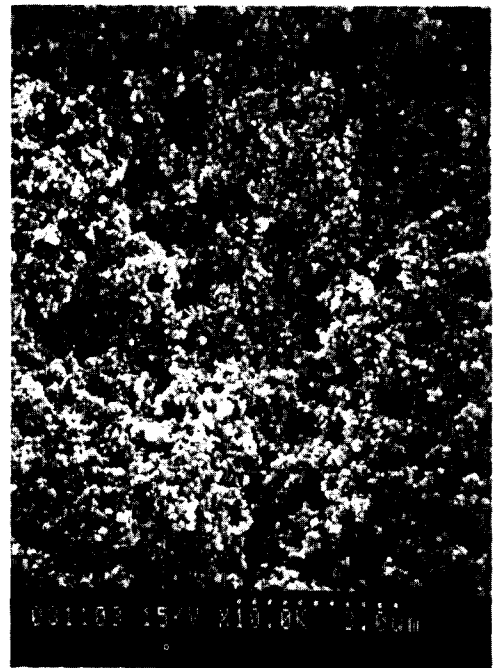
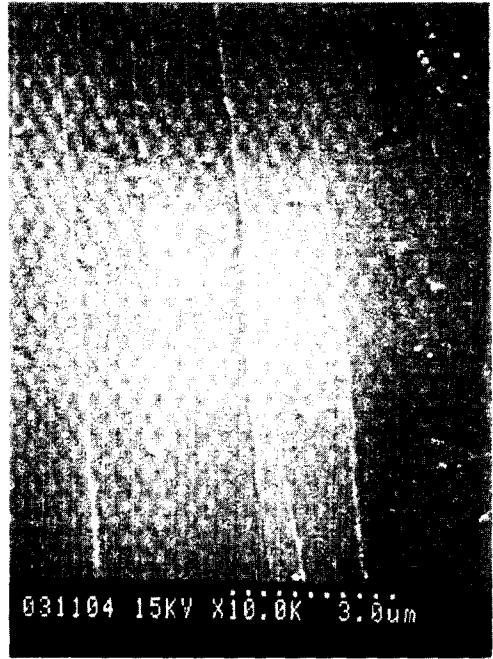


Fig. 5. Surface morphology of a PSF film prepared by vitrification of a PSF/MC binary solution before (top) and after (bottom) DMF solvent treatment [10].

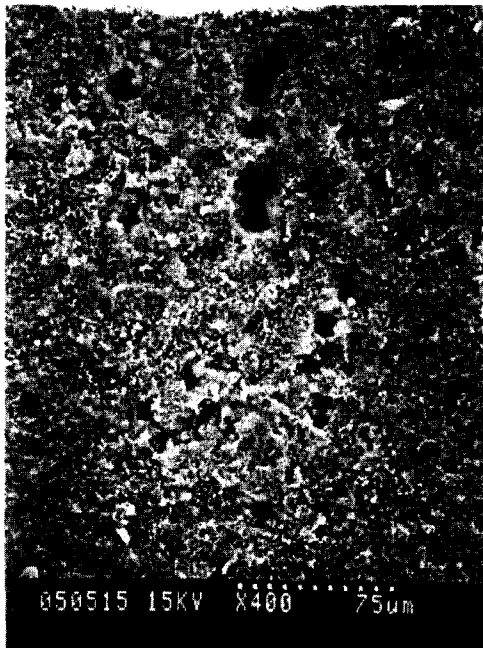


Fig. 6. Surface morphology of a PSF membrane prepared from a solution of 4.5 g PSF/20 ml MC with the fluor before (top) and after (bottom) DMF solvent treatment.

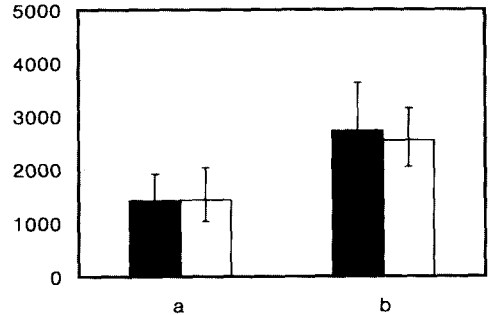


Fig. 7. Radioactive counts per minute (CPM) of ^3H -cortisol detected from the air and glass sides of fluor-containing membranes before and after DMF solvent treatment. ■ represents the air side during cast, and □ the glass side.

CAYS가 분산된 폴리설폰 용액으로부터 용매 증발을 통해 고분자를 유리화시킴으로써 이루어졌다. 이러한 측정막은 방사능 탐지 능력에 있어 설파보조용액을 필요로 하는 기존의 방사능핵종 탐지 방법에 비급가는 탐지 능력을 유지하면서 방사능 폐기물의 양산을 제어할 수 있는 효과가 있는 것으로 나타났다. 한편, 용매를 이용하여 측정막을 처리하였을 때, 막 표면 형상의 비균일성을 증대시키는 효과는 있었으나, 방사능 핵종 탐지 능력의 개선으로 귀결되지는 않았다.

참고 문헌

1. M. Muramatsu, *Surface and Colloid Sci.*, **6**, 101 (1973).
2. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Radiation Safety Surveys at Medical Institutions", Washington DC, NRC Regulatory Guide 8. 23, Revision 1, January 1981.
3. R. C. Klein, L. Linins, and E. L. Gershey, *Health Phys. Soc.*, **62**, 186 (1992).
4. K. A. Schellenberg, US Patent 4,562,158 (1985).
5. L. F. Costa, D. C. Harrington, and R. S. Miller, US Patent 4,692,266 (1987).
6. C. G. Potter and G. T. Warner, "Scintillation counting of harvested biological samples with low energy beta emitters, using solid scintillant filters", In H. Ross, J. E. Noakes, and J. D. Spaulding (Eds.), *Liquid Scintillating Counting*

- and Organic Scintillators, Chelsea, Michigan, Lewis Publishers, 1991.
7. M. J. Han, P. M. Bummer, and M. Jay, *J. Membrane Sci.*, **140**, 235 (1998).
 8. R. Langer, *Science*, **249**, 1527, Sep. (1990).
 9. S. Kwon and S. Eum, *Membrane J. (Korea)*, **8**, 22 (1998).
 10. M. J. Han, P. M. Bummer, and M. Jay, *J. Membrane Sci.*, **148**, 223 (1998).
 11. M. J. Han, and M. Jay, *Korea Polymer J.*, **6(4)**, 341 (1998).