

2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

용존산소 제거용 폴리프로필렌 중공사막의 물성에 미치는 방사선의 영향

Effects of Radiation on the Physical Properties of PP Membrane for the Removal of Dissolved Oxygen

강덕원, 송영욱, 김문수, 지준화
김승일

한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

(주)한소닉테크
인천광역시 남동구 남촌동 618-4

요 약

폴리프로필렌 중공사막의 물성과 탈기 효율에 미치는 방사선의 영향에 관한 연구를 수행하였다. 방사선장하에서 노출되는 조건을 예상하여 그에 상응한 선량을 폴리프로필렌 중공사막에 조사시킨 후에 DSC, TGA, FT-IR, 및 Contact angle을 이용하여 중공사막 재질의 물성변화를 측정하고 중공사막의 용존산소 제거효율을 측정하였다. 방사선에 의해서 조사된 중공사막과 방사선에 영향을 받지 않은 중공사막의 물성을 비교한 결과는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 본 연구를 통하여 방사선장하에서 노출되는 폴리프로필렌 중공사막의 안전성을 확인하였다.

Abstract

The physical properties of polypropylene (PP) hollow fiber membranes and its deoxygenation efficiency were investigated. We supposed the conditions of PP hollow fiber membrane under radiation field and irradiated the PP membranes with same radiation dose conditions. Then, we analyzed physical properties of the PP membranes using differential scanning calorimetry (DSC), thermal gravimetric analyzer (TGA), Fourier transform infrared (FT-IR), and Contact

angle. In addition, the deoxygenation efficiency of the exposed PP membranes was estimated by using a oxygen removal test kit. From the results, we found that the physical properties and deoxygenation efficiency of PP membrane was still keep good condition under the simulated radiation field.

1. 서 론

용존산소는 냉각수를 사용하는 많은 공장과 배관계통의 부식에 직접적인 원인으로 제공되고 있기에 효과적으로 용존산소를 제거하는 것은 발전소와 플랜트에 있어서 매우 중요한 문제이다. 특히, 원자력발전소의 경우에는 계통내의 용존산소로 인한 부식은 심각한 위험을 초래하기 때문에 용존산소의 효과적인 처리기술의 개발은 더욱 중요한 문제이다. 이러한 요구에 따라 수중에 있는 용존산소의 제거기술은 날로 발전해 오고 있으며, 특히 선진 각국의 원자력발전소에서는 계통수중의 용존산소 제거를 위해 환원제와 같은 화학약품을 사용되는 대신에 촉매수지나 탈기막을 사용하여 용존산소를 제거하고 있다. 국내에는 최초로 월성 원자력발전소 양단차폐계통에 탈기막식 용존산소 제거장치를 설치, 운영하였으며, PWR 원전인 고리원전은 원자로보충수 탱크수의 용존산소 관리를 위해 탈기막 장치를 설치하여 운영해 본 결과 성능이 매우 좋은 것으로 나타나 현재 고리1호기에 설치, 운영 중에 있다. 그 결과, 탈기막의 고유 특성상 수중에 존재하는 모든 기체는 탈기되었으며 원자력 발전소의 경우 계통에 용존되어 있는 방사성기체까지 일부 탈기됨을 확인하였다.

탈기막을 이용한 용존산소 제거기술은 장치의 단순성과 경제성 면에서 월등하기 때문에 날이 갈수록 그 수요가 확대될 전망이다. 기체 탈기막 기술은 원자력발전소 1차계통수 중의 방사성기체 제거 시에도 폭 넓게 응용될 수 있을 것으로 판단되어 본 연구를 통해 탈기 모듈이 방사선장에 장시간 노출되어도 탈기 효율에 이상이 없다는 것과 용존 방사성기체의 제거 효율이 뛰어나다고 증명되어지면 원자력발전소 정지화학 처리시 방사성기체의 탈기처리로 인해 장시간 소요되는 수처리 시간을 대폭 단축할 수 있기 때문에 이로 인한 정기보수 기간을 단축시켜 경제적 이득을 가져올 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 예기치 않은 1차 계통 오염 등이 발생할 경우 방사성기체도 동시에 제거할 수 있기 때문에 발전소 비상시에도 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

국내의 경우, 일반 수처리용 중공사 분리막의 제조에는 상당한 노하우가 축적되어 있고, 학계에서도 이에 대한 연구는 끊임없이 진행되어 왔으나 대용량의 수처리가 가능한 기액분리용 탈기막 제조기술과 탈기막을 이용한 용존 방사성기체의 처리기술 분야는 아직까지 초보적인 단계이다. 탈기막의 용도는 상술한 바와 같이 원자력 발전소의 냉각수중의 용존산소 제거 및 방사성기체의 제거시에도 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 판단되기 때문에 본 연구를 통한 탈기모듈의 방사선장하에서의 성능 확인 시험은 향후 원전 활용시 매우 유용

한 자료로 제공될 것이다

다른 한편으로 탈기막을 이용한 원자로 냉각재 계통내의 방사성기체 제거는 정지화학 처리등의 다양한 이점 때문에 활용 가능성이 매우 높을 것으로 기대된다. 아직까지 계통에 실 적용해 본 경험은 없지만 탈기막을 이용한 방사선 기체의 제거 가능성이 제시되어 진다면 원자력발전소의 정기보수를 위한 정지화학 처리기간의 단축으로 인한 보수기간 단축으로 발전 이득을 가져올 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 전 세계적으로 탈기막의 수요가 급증하고 있는 시점에서 방사성 기체 처리기술에 대한 선두주자로서의 기술 경쟁력을 갖추어서 탈기기술의 해외 수출을 통한 외화획득에도 큰 기여를 할 것으로 기대되어진다.

또한 순수 국내기술에 의해 탈기막을 이용한 응용기술의 교두보를 만들어서 탈기막 시장의 세계적 주도권을 갖고 있는 미국 및 일본과 응용기술에 대한 경쟁 기반을 마련할 수 있으며, 나아가 본 기술을 바탕으로 수증의 이산화탄소 및 유해 기체를 취급하는 산업체에 보다 광범위하게 활용될 수 있는 계기를 마련할 수 있을 것으로 본다. 또한 국내에서는 최초로 시도되는 본 기술의 평가과정에 참여하는 연구원들의 수준을 크게 향상시킴으로써 본 기술과 관련된 국내전문가를 양산하여 기술적으로 선진국에 전혀 뒤떨어지지 않는 연구기반을 구축 할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 이론적 배경

중공사막을 이용한 용존산소 제거에 있어서의 추진력은 막 사이의 농도차이(혹은 부분압력 차이)에 의해서 생긴다. 근본적인 원리는 이상기체의 법칙으로부터 이해할 수 있다. Dalton의 법칙에 의하면 일정온도에서 혼합기체의 전체압력(P)은 그 기체를 구성하고 있는 개개 성분이 나타내는 부분압력의 합과 같다.

$$P = P_t = P_1 + P_2 + P_3 + \dots \dots \dots (1)$$

혼합기체의 상태방정식과 혼합기체중의 기체 i의 방정식은 아래와 같다.

$$PV = n_t RT \dots \dots \dots (2)$$

$$P_i = n_i RT/V \dots \dots \dots (3)$$

여기서, n_t 는 부피 V속에 있는 모든 기체의 몰수의 합이고 n_i 는 기체 i의 몰수이다. 식 (3)을 식 (2)로 나누면 식 (4)가 얻어진다.

$$P_i = (n_i/n_t)P = x_i P \dots \dots \dots (4)$$

여기서, P_i 는 혼합기체 속에서 몰분율이 x_i 인 기체 i 의 부분압력이다. 또한, 헨리의 법칙에 의해서 P_i 는 다음과 같이 얻어진다.

$$P_i = H_i X_i \quad \dots\dots\dots(5)$$

여기서, H 는 헨리의 상수로서 온도에 의존한다. 온도를 낮추면 더 많은 기체가 용해될 수 있다. 기체의 용해도는 일반적으로 식 (6)에 나타낸 것처럼 ppm(mg gas/kg solution) 단위로 표현된다.

$$C_{ppm} = 5.55 \times 10^{-4} M_G P_i / H \quad \dots\dots\dots(6)$$

여기서, M_G 는 기체의 분자량이다. 25°C, 1 atm 하에서 물 속에는 산소기체가 8.5 ppm, 질소기체가 14.5 ppm, 그리고 미량의 이산화탄소 등이 용해되어 있다. 헨리의 법칙에 의하면 물 속에 녹을 수 있는 기체의 량(C_{ppm})은 기체상에서 부분압력(P_i)을 낮추어 감소시킬 수 있다. 그러므로 수용액 속으로부터 제거하고자 하는 기체의 부분압력을 중공사막을 통해 접하고 있는 기체상에서 낮추면 수용액 속에 있는 그 기체는 평형에 도달할 때까지 수용액상 밖으로 나오게 된다. 기체상에서 i 기체의 부분압력은 두 가지 방법으로 낮출 수 있다. 첫 번째 방법은 식 (4)에 나타낸 것처럼 기체상의 전체 압력(P)을 진공을 가하여 낮추어 줌으로써 부분압력(P_i)을 낮출 수 있고, 두 번째는 수용액 으로부터 제거하고자 하는 기체성분을 포함하지 않는 기체(용존산소 제거시 질소기체)를 중공사막의 기체상에 흘려주어 i 성분의 몰분율(X_i)을 작게 하여 i 성분의 부분압력(P_i)을 낮추는 방법이 있다. 반대원리에 의해 기체상의 부분압력을 수용액상보다 높게 하여 그 기체를 수용액에 용해시킬 수도 있다.

모듈의 용존산소 제거성능은 일반적으로 이 모듈이 물로부터 용존산소를 제거할 수 있는 효율로서 표시된다. 백분율 제거효율을 식 (7)에 나타내었고, 유입수 용존산소 농도와 출구수 용존산소 농도의 관계를 식 (8)에 나타내었다.

$$\text{Efficiency}(\%) = [(DO_{in} - DO_{out}) / DO_{in}] \times 100 \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$DO_{out} / DO_{in} = \exp(-kAL/v) = f(T, v, P_o) \quad \dots\dots(8)$$

여기서, DO_{in} 은 중공사막 모듈로 유입되는 물 속의 용존산소 농도, DO_{out} 은 중공사막 모듈을 통과한 후의 용존산소 농도, k 는 물질이동계수, A 는 물이 접하는 부분의 막의 표면적, L 은 물이 통과하는 막의 길이, v 는 물의 유속, P_o 는 기체상의 압력이다. 수용액 상에 있는 산소기체가 기체상 쪽으로 이동하기 위해서는, 1) 산소기체가 수용액 속(k_l : 수용액상의 물질이동계수)에서 물분자 사이를 가로질러 이동을 해야 하고 2) 막(k_m : 막

에서의 물질이동계수)을 통과해야 하며 3) 기체상에서 이동(k_g : 기체상의 물질이동계수)을 해야 한다. 전체 물질이동계수(k_{ov})와 각 상에서의 계수와의 관계는 식 (9)와 같다.

$$1/k_{ov} = 1/k_\ell + 1/k_m + 1/k_g \approx 1/k_\ell \dots\dots\dots(9)$$

문헌에 의하면, 기체가 수용액상에서 이동할 때가 막이나 기체상을 이동할 때 보다 훨씬 어렵다고($1/k_\ell \gg 1/k_m, 1/k_g$) 밝혀진 바 있으며, 따라서 전체 물질이동계수는 수용액상에서의 물질이동계수로서 근사할 수 있다. 물이 중공사관의 외부에서 흐를 경우 수용액상에서 물질이동계수(k_ℓ)는 식 (10)에서 보는 바와 같이 막의 외경(d), 물질의 확산계수(D), 물의 유속(v)과 관련이 있다.

$$k_\ell d/D = 1.4(dv/D)^{1/3} \dots\dots\dots(10)$$

그러므로 (8)~(10)의 식에 나타난 중공사막의 용존산소 제거 성능은 모듈을 통과하는 물의 유속, 막의 표면적, 막의 직경 및 수용액상에서 물질의 확산도에 의존한다. 일반적으로 규격이 정해진 중공사막 모듈의 용존산소 제거효율은 모듈을 통과시키는 물의 유속과 기체상의 부분압력의 함수로서 나타내어진다.

3. 실험

3-1. 재료

본 실험에 사용된 폴리프로필렌 중공사막은 미국의 Membrana 사에서 제조한 것을 사용하였다. 폴리프로필렌 중공사막의 scanning electron microscopy (SEM) 사진을 Fig. 1에 나타내었다. 중공사막의 내경은 200 μm 이고 외경은 300 μm 이며 기체가 통과할 수 있는 표면의 구멍 크기는 약 0.03 μm 이다. 이 중공사막을 직조하여 천 배열을 만들고, 이 천을 지지체에 감아서 최종적으로 하나의 모듈을 만든다. 모듈 제작의 전 과정과 Membrana 사가 제작한 상품명 Liqui-Cel[®] Extra-Flow Membrane Contactor의 구조를 Fig. 2에 나타내었으며, 상품화된 중공사막 모듈의 특성은 Table 1에 요약해 놓았다. 본 실험에 사용한 모듈의 규격은 80×280 mm이며, 중공사막(hollow fiber), fabric, cartridge, 모듈을 방사선 조사량을 달리하여 방사선을 조사하였다.

3-1. 방사선 조사량

중공사막에 방사선을 조사하기 위해 현장에서 용존산소 제거장치를 설치 할 수 있는 계통의 방사선 농도를 측정하였다. 고리 2발전소와 울진 1발전소의 원자로 냉각재 계통(Reactor Coolant System)의 기체와 액체상에 존재하는 방사선 농도를 3개월간 측정하여

조사 단위인 Rad로 환산하였다. 용존산소 제거장치의 수명을 최대 3년으로 가정하고 현장의 가동 일수를 조사한 결과 약 60일 정도가 운전 중 방사선장하에서 놓이는 것으로 평가되었다. 3개월간의 방사선 농도는 24.97×10^{-6} Ci/cc (7.04 MRad) 였고, 약 60일간의 조사량은 0.7 MRad 였다. 따라서 방사선의 조사 범위는 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1 MRad로 결정하였고, 방사선 조사는 Co^{60} v-ray를 이용하여 100 kRad 선량률로 조사하였다.

3-3. 시차주사열량 분석(DSC)

시차주사열량분석은 TA 사의 differential scanning calorimeter(DSC, model. 2910)를 사용하여 질소 분위기에서 0°C로 평형을 유지하여 300°C까지 가열, 다시 냉각 시켜 10°C/min의 승온속도로 같은 온도범위에서 측정하였다.

3-4. 열중량 분석(TGA)

열중량 분석은 TA 사의 thermo gravimetric analyzer(TGA, model. 2950)를 사용하여 질소분위기에서 10°C/min의 승온속도로 측정하였다. 방사선 조사에 따른 중공사막의 분해정도를 조사선량에 따라 비교, 분석하기 위하여 상온에서 500°C까지 가열하면서 측정하였다.

3-5. 적외선 분광 분석법(FT-IR)

적외선 분광분석은 Nicolet 사의 Fourier transform infrared spectrometer(FT-IR, model. Magna 560)를 사용하여 방사선 조사에 따른 중공사막의 화학성분 변화를 비교 측정하였다. 중공사막이 다공성이며 모세혈관처럼 이루어져 있으므로 attenuated total reflectance(ATR) 방법을 사용하였다.

3-6. 접촉각 측정(Contact angle)

방사선 조사량에 따른 중공사막의 소수성 성질 변화 정도를 측정하기 위하여 dynamic contact angle analyzers를 이용해 전진각과 후진각을 측정하였다.

3-7. 탈기효율 측정(Deoxygenation efficiency)

하우징을 하지 않은 카트리지에 방사선 조사량을 달리하여 조사한 후 미국 Membrana 사에서 하우징을 하여 모듈로 만든 후 탈기 효율을 측정하였다. 각각의 효율 측정은 온도 20°C, 물의 흐름 속도 3.0 gal/min, 압력은 40 psig 등으로 모든 조건을 동일 시하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 시차주사열량 분석(DSC)

방사선 조사에 따른 중공사막의 물리적 변화를 알아보기 위하여 시차주사열량 분석을 하여 녹는점(T_m)과 흡열량을 측정하였다. 먼저 Fig. 3에서와 같이 방사선을 조사하지 않은 중공사막과 조사량을 달리한 중공사막 사이에 시차주사열량 분석곡선이 비슷한 거동을 가짐을 알 수 있다. 이러한 거동의 결과들을 Table 2에 정리하였다. 여기에서 모든 시료들은 녹는 온도가 약 164°C 로 소수점 이하에서의 변화만 존재함을 알 수 있었으며, 초기 용해가 거의 비슷한 온도에서 시작함을 알 수 있다. 이를 통하여 폴리프로필렌 중공사막에 대한 주어진 조사량의 방사선은 결정도, 가교, 사슬의 절단, 녹는 온도, 유리전이온도 등에 미치는 영향이 미미하다고 할 수 있다. 또한 1차 상전이가 발생하는데 필요한 흡열량인 엔탈피(Δh)가 서로 방사선 조사 유무와 조사량과 관계없이 비슷한 열량값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

4-2. 열중량 분석(TGA)

Fig. 4는 방사선을 조사하지 않은 경우와 조사량을 달리하여 조사한 중공사막의 TGA 분석곡선을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이, 먼저 조사량과 주사 유무에 관련 없이 모든 중공사막은 비슷한 거동을 보이고 있다. 온도가 증가할수록 중량감소가 일어나고, 350°C 이후엔 더욱 급격한 감소가 일어나며 500°C 전·후로 중량의 99% 이상이 분해됨을 알 수 있다. 이러한 거동에서 얻은 결과들을 Table 3에 정리하였다. 중공사막의 처음 중량의 99% 이상의 손실이 일어났을 경우의 온도를 나타낸 것인데 그에 대한 차이는 별로 없는 것으로 나타났다. 즉, 본 실험에서 조사한 1 MRad까지의 방사선 선량은 물성에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 여겨진다.

4-3. 적외선 분광 분석법(FT-IR)

방사선 조사에 따른 화학적 영향성을 조사하기 위하여 적외선 분광분석법을 이용하였다. 중공사막이 다공성이며 필름의 형태가 아니므로 ATR 방법을 이용하여 측정하였다. Fig. 5는 방사선을 조사하지 않은 중공사막과 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1 MRad로 각각 조사량이 다른 중공사막의 적외선 분광거동을 나타낸 것이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 각각의 화학적 성분의 변화는 크게 나타나지 않았다.

4-4. 접촉각 측정(Contact angle)

방사선 조사량이 다른 중공사막과 조사를 시키지 않은 중공사막으로 물을 이용하여 전진각과 후진각을 측정하여 실험 데이터를 Table 4에 나타내었다. 조사량과 조사하지 않은 중공사막의 전진각은 일정한 일관성이 관찰되지 않고 있지만, 후진각은 방사선 조사량이 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 즉, 이번에 실험한 중공사막은 소수성의 성질을 가지고 있는데, 각이 감

소함에 따라 조사된 중공사막은 소수성의 성질을 점차적으로 잃어버리고 친수성으로 바뀌어 갈 수 있다. 즉 소수성기가 친수성기로 바뀌는 것이다. 그러나 감소하는 각의 차이가 아주 작다고 할 수 있고 탈기효율 실험에서도 큰 탈기효율 차이가 없는 것으로 볼 때 방사선의 1 MRad는 중공사막의 소수성에 영향성이 크지 않을 것으로 여겨진다.

4-5. 용존산소 제거효율 측정(Deoxygenation efficiency)

중공사막 카트리지(지지체에 중공사막을 감아 놓은 것)를 방사선에 조사량을 달리하여 조사한 후, 미국 Membrana 회사에서 카트리지를 하우징(housing)하여 중공사막 모듈(module)을 만들어 탈기효율을 측정하였다. 이에 대한 데이터들은 Table 5에 정리하였다. 각각의 효율측정은 온도 20℃, 물의 흐름속도 3.0 gal/min, 압력은 40 psig 등으로 모든 조건을 통일하였다. 2002년도 Membrana에서 제작한 중공사막 모듈의 초기 평균 효율인 72.7 %를 방사선 조사를 하지 않은 모듈의 탈기 효율로 가정하였을 때, 방사선을 조사한 양이 보통 의료용 고분자의 멸균정도의 양과 비슷하기 때문에 탈기효율에 특별히 주목할 만한 영향성이 발견되지 않았다.

5. 결 론

방사선장하에서 노출될 수 있는 폴리프로필렌 중공사막에 대한 방사선 조사의 영향평가를 위하여 여러 선량의 방사선 조사를 행한 후의 물성을 DSC, TGA, FT-IR, Contact angle을 이용하여 분석하였다. DSC와 TGA의 열분석을 한 결과를 통하여 방사선장하에서의 폴리프로필렌 중공사막의 재료특성이 방사선에 큰 영향을 받지 않으며 제거효율 및 재질의 견전성에도 별반 영향을 끼치지 않음을 확인하였고, FT-IR을 통한 화학적 특성변화 역시 큰 차이가 없음을 확인하였다. 접촉각 특성을 확인해 본 표면특성은 일부분의 영역이 소수성에서 친수성으로 바뀐 것을 확인하였다. 마지막으로, 탈기효율의 결과 값을 비교했을 때 큰 차이가 없었기에 큰 영향성은 없는 것으로 확인되었다. 이상의 결과들을 종합해 볼 때, 본 연구에서 사용된 폴리프로필렌 중공사막은 현재 사용 용도의 방사선장 조건하에서는 크게 영향을 받지 않는 것으로 확인되었으며, 재질의 견정성 측면에서도 양호함을 확인하였다.

참고문헌

1. 강덕원외 1인, 월성 원자로 차폐체 냉각재 계통내 용존산소 제거 연구, TR.97NS08.S2000.39, pp.30-36
2. 강덕원외 1인, 고리1호기 원자로 보충수탱크 용존산소 제거장치 개발, TR 2001.11, p.10-16

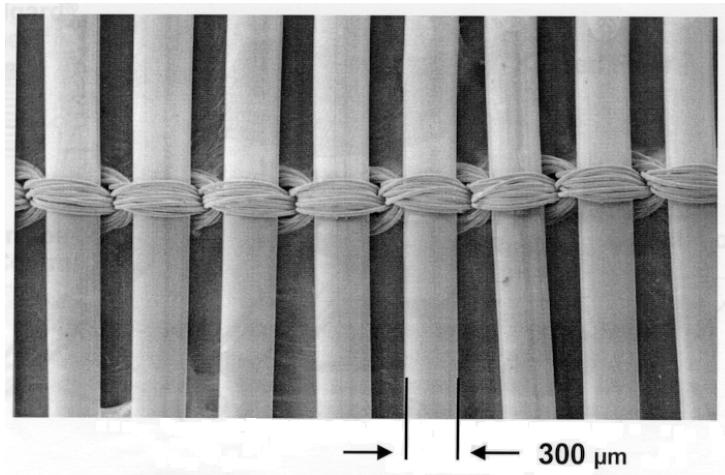
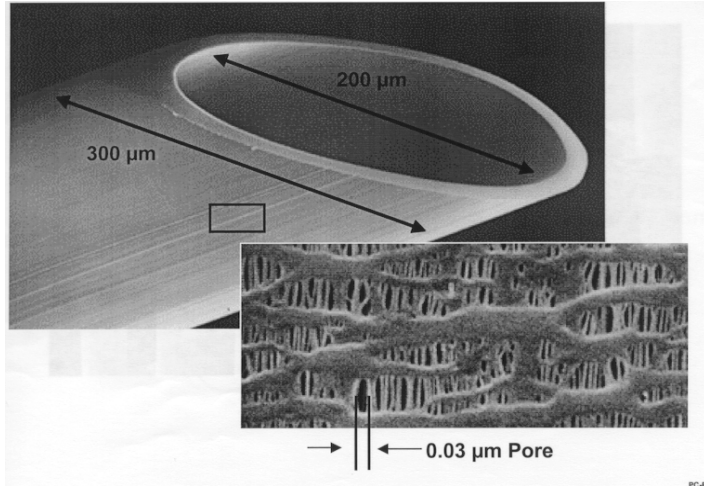


Fig. 1. 중공사막의 SEM 사진과 이 막의 천 배열

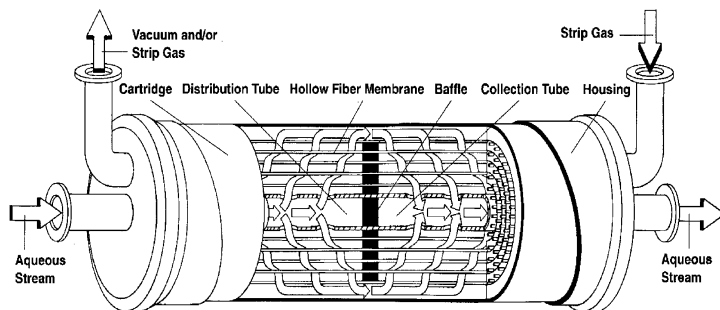
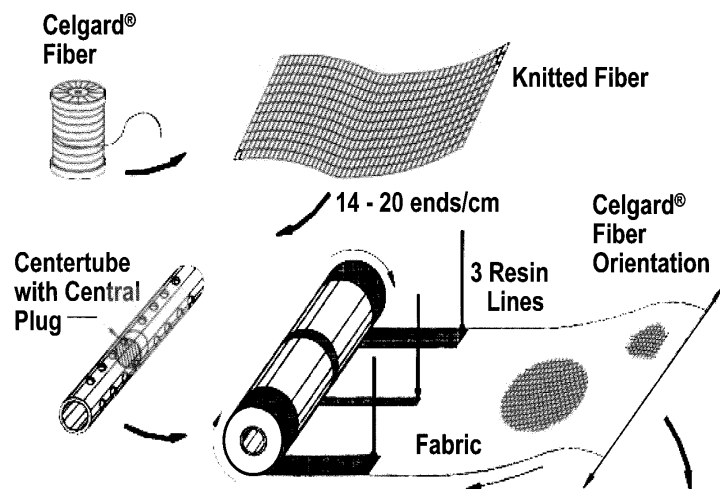


Fig. 2. 탈기막 모듈의 제작과정과 완성된 Liqui-Cel[®] Extra-flow Membrane Contactor의 구조.

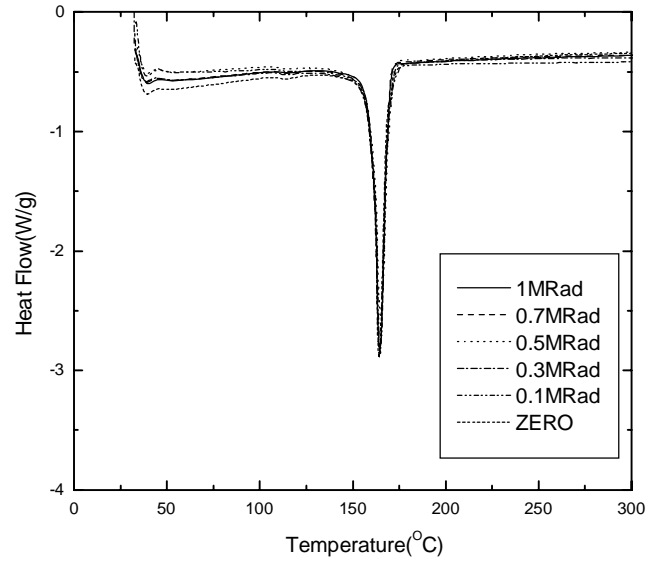


Fig. 3. 방사선 조사된 중공사막의 DSC 곡선.

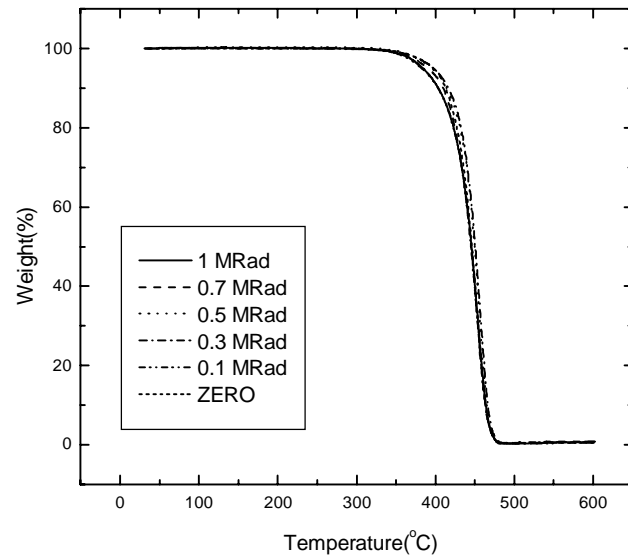


Fig. 4. 방사선 조사된 중공사막의 TGA 곡선

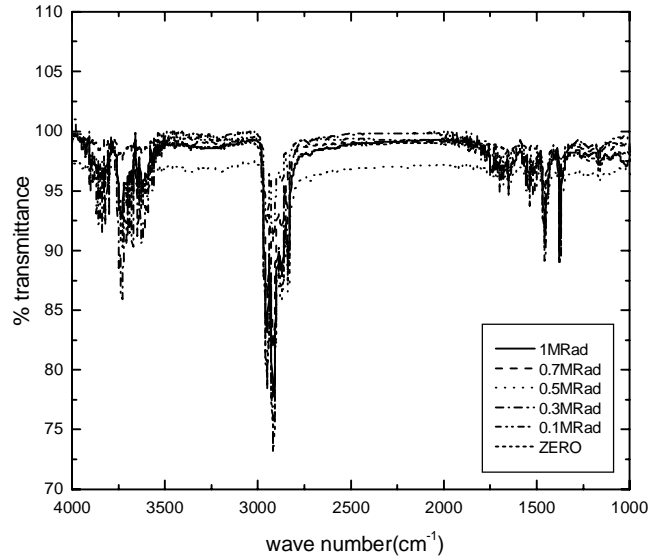


Fig. 5. 방사선 조사된 중공사막의 FT-IR 곡선.

Table 1. 상품화 되어 있는 Liqui-Cel[®] 탈기막 모듈의 특성.

모 델 명	Liqui-Cel [®] 2.5×8-X40	Liqui-Cel [®] 4×28-X40 EPOXY	Liqui-Cel [®] 10×28-X40 EPOXY
규 격(D×L)	80×280 mm	100×710 mm	250×710 mm
설계용량	0.1~0.7 m ³ /hr	1.1~6.8 m ³ /hr	11.1~47.7 m ³ /hr
표준설계유량	0.23 m ³ /hr	5.7 m ³ /hr	34.1 m ³ /hr
사용 온도	1~70℃	1~70℃	1~70℃
하우징 재질	PP	SS316L	SS316L
최고 압력	105 psig	150 psig	150 psig
중공사 재질	폴리프로필렌	폴리프로필렌	폴리프로필렌
용존산소 제거효율	>95%	>95%	>95%

Table 2. 방사선 조사된 중공사막의 녹는점(T_m)과 엔탈피(Δh).

Sample	Initial T_m (°C)	Δh (J/g)	T_m (°C)
ZERO	160.81	98.72	164.11
0.1 MRad	161.17	101.3	164.64
0.3 MRad	160.58	104.8	164.56
0.5 MRad	160.70	101.3	164.98
0.7 MRad	160.60	101.3	164.37
1 MRad	160.63	98.67	164.52

Table 3. 방사선 조사된 중공사막의 열분해 온도와 이 때의 열중량 감소율.

Sample	열분해 온도(°C)	열분해 온도에서의 열중량 감소율(%)
ZERO	488.04	99.65
0.1 MRad	488.04	99.79
0.3 MRad	490.31	99.68
0.5 MRad	488.04	99.58
0.7 MRad	486.90	99.53
1 MRad	491.45	99.77

Table 4. 방사선 조사된 중공사막의 화학적 특성

Sample	Advancing contact angle(°)	receding contact angle(°)
Zero	104.55	77.19
0.1 MRad	106.19	88.46
0.3 MRad	99.86	77.63
0.5 MRad	102.80	77.41
0.7 MRad	106.43	76.22
1 MRad	99.96	68.77

Table 5. 방사선 조사된 중공사막 모듈의 탈기 효율

방사선 조사량	표 준 조 건						탈기효율	초기 평균효율
	수온 (°C)	물의 유량		N ₂ 유량	모듈 입구 압력			
		gal /min	L/min		psig	bar		
1.0	20	3.0	11.4	1	40	28	69.7%	72.7%
0.7							66.3%	
0.5							71.5%	
0.3							58.7%	
0.1							70.4%	