

Membrane Characteristics for Removing Particulates in PFC Wastes

PFC 제염폐액 내의 미립자 제거를 위한 여과막의 특성 연구

**Gye-Nam Kim, Sung-Yeol Lee, Hui-Jun Won, Chong-Hun Jung,
Won-Zin Oh and Jin-Ho Park**

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

kimsum@kaeri.re.kr

김계남, 이성열, 원휘준, 정종현, 오원진, 박진호

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

(Received March 23, 2005 /Approved May 18, 2005)

Abstract

PFC(Perfluorocarbon) decontamination process is one of best methods to remove hot particulate adhered at inside surface of hot cell and surface of equipment in hot cell. It was necessary to develop a particulate filtration equipment to reuse PFC solution used on PFC decontamination due to its high cost and to minimize the volume of second wastewater. Contamination characteristics of hot particulate were investigated and then a filtration process was presented to remove hot particulate in PFC solution generated through PFC decontamination process. The removal efficiency of PVDF(Poly vinylidene fluoride), PP(Polypropylene), Ceramic(Al_2O_3) filter showed more than 95%. The removal efficiency of PVDF filter was a little lower than those of other filters at same pressure(3 psi). A ceramic filter showed a higher removal efficiency with other filters, while a little lower flux rate than other filters. Due to inorganic composition, a ceramic filter was highly stable against radionuclides in comparison with PVDF and PP membrane, which generate H_2 gas in α -radioactivity atmosphere. Therefore, the adoption of ceramic filter is estimated to be suitable for the real filtration process.

Key Words : PFC, hot particulate, removal efficiency, flux, ceramic(Al_2O_3) membrane

요약

원자력연구시설의 핫셀 내 바닥이나 장치표면에 부착된 고방사능분진의 제거를 위해서 PFC

제염기술을 적용한다. 고가인 PFC 용액의 재사용을 위해서는 여과장치의 개발이 필요하고 제염 종료 후 이차폐기물의 양을 최소화할 필요가 있다. PFC 제염폐액 내 방사성 입자를 제거하기 위해 핫셀 내의 고방사능분진의 오염 특성을 조사했다. 여과 막을 이용한 입자의 제거효율 측면에서 보면 세라믹, PVDF, PP 막 모두가 95% 이상의 높은 여과 성능을 보였다. 기공 크기가 같은 동일 여과 막에서는 입자가 크거나 가하는 압력이 높을수록 좀더 높은 제거효율을 나타내었고, 3 psi이하에서는 PVDF의 제거효율이 다른 막에 비해 작게 나타났다. 플럭스 성능은 PVDF 막이 가장 높은 수준을 나타냈고 세라믹과 PP 막에서는 다소 낮은 성능을 보였다. PVDF 막은 낮은 압력과 짧은 여과시간으로 최대(한계)플럭스에 도달함을 확인하였다. 세라믹 막은 모의입자의 제거효율은 높지만 다소 낮은 Flux 성능을 나타냈다. 또한, 막 자체의 비싼 가격과 쉽게 부서지는 성질의 단점을 지니고 있지만 무기화합물의 재질로 되어있기 때문에 알파방사능 환경에서 H₂ 가스를 발생하는 고분자 막인 PVDF, PP 막과 비교하여 훨씬 안정적이었다. 그리고 이들 소수성 여과막들의 특성 비교를 바탕으로 세라믹 막을 적용한 PFC 실증 여과장치의 공정도를 살펴보았다.

중심단어 : PFC, 고방사능분진, 제거효율, 플럭스, 세라믹 막

I. 서론

국내의 원자력시설 내 핫셀(Hot Cell)에서는 사용 후 핵연료의 산화환원 및 분쇄공정, 사용후 핵연료의 절단 및 분말화 공정, 균분리 공정, 사용후 핵연료 금속전환 공정 등을 수행하고 있으므로 핫셀 바닥면과 벽면 그리고 핫셀 내부에 있는 여러 장치표면들이 연구실험 과정에서 발생한 고방사능 분진(Hot Particulate)과 고방사능 핵연료의 조사 등에 의해 오염되어 핫셀 내의 방사능 준위가 높아지고 있다. 그러므로 핫셀 내에서의 핵종실험을 원활히 수행하기 위해서는 주기적으로 핫셀 내부 표면과 장치표면에 오염된 고방사능분진을 제거하여 핫셀 내의 방사능 준위를 낮추어야 한다. 한편, 표면에 단단히 고착된 고방사능분진은 CO₂ Blasting, 초음파 PFC 제염, 프라즈마 제염 등과 같은 건식제염기술을 사용하여 제거효율을 높일 수 있다[1,2,3]. 특히, PFC (Perfluorocarbon) 제염기술은 기존의 프레온제염과 유사한 방법으로 교체표면에서 작은 입자를 더욱 효과적으로 제거할 수 있는 건식제염공정의 하나이다. PFC 제염공정은 DuPont 이나 3M사에서 개발한 PFC계 세정제 (Vertel 2454, PF-5070)를 주된 세척제로 사용하고 여기에 PFC계 계면활성제를 소량 첨가하여 공정의 제

염성능을 증진시킨다[3,4]. 또한 금속표면의 고착성 오염물을 처리하기 위하여 PFC 공정과 초음파를 복합한 공정개발이 진행되고 있다. PFC 공정은 미국의 ESI(Entropic System, Inc.)에서 주도적으로 개발되고 있으며, 미국 DOE Savannah River Site에서 보관 중인 Pu-238로 오염된 TRU Waste를 제염하기 위한 Sonatol 공정에 적용되었다[5]. 막 오염을 방지하며, 높은 플럭스 등의 막의 효율을 증가시키기 위하여 최근 새로운 막의 재질[6,7]과 모듈의 디자인 개발[8,9] 그리고 Flow Pattern의 변화[10] 등의 많은 연구가 진행 중에 있다.

PFC 제염기술은 제염종료 후 막대한 양의 PFC 제염폐액이 발생한다. 이 제염폐액 내 방사성 오염입자를 제거한 후 고가인 PFC 제염용액 자체를 회수하여 재사용할 목적으로 PFC 여과장치를 개발할 필요가 있다. PFC 제염과정에서 제거된 오염입자가 PFC 매질 내에 존재하여 재 오염의 원인이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 PFC 제염폐액 내 방사성입자를 제거하기 위해 핫셀 내 오염된 입자의 크기를 조사한 후 실험실규모의 여과장치를 이용하여 여러 소수성 여과막에 대한 입자의 제거효율 및 플럭스 등의 성능 실험과 각각의 여과막에 있어 방사능에 대한 안정성 및 온도, 경제성 등을 비교 분석함으로써 이를 통한

PFC 여과장치의 공정도를 살펴보고자 하였다.

II. 실험방법

1. 오염입자의 특성조사 및 모의입자 선정

기초 여과실험 수행에 이용할 모의 입자들의 크기 선정을 위해서 핫셀 내의 오염 입자들을 채취하여 크기를 분석하였다. 즉, 한국원자력연구소 연구시설에 보관된 사용후 핵연료 Particulate의 크기를 광학현미경(OM)으로 측정하였고, DUPIC 산화환원공정과 사용후 핵연료 절단 및 파괴 공정 후의 고방사능분진의 크기를 전자현미경으로 측정하였다. 또한, 사용후 핵연료 피복관 주변 CRUD Particulate의 크기를 전자현미경으로 측정한 결과 Fig. 1과 같이 핫셀 내부의 오염입자들의 크기 분포는 0.1~10 μ m임을 알 수 있었다. 한편, 각 연구시설 Hot Cell에서 발생하는 고방사능분진 성분을 EDS로 분석결과 UO₂, U₃O₈, Cs-137, Cs-134, Ru-106, Ce-144, Eu-154 의 방사성핵종으로 구성되어 있음을 확인하였다. 여과실험에 사용할 모의입자는 0.3, 1, 2~3, 10 μ m 크기의 α -Al₂O₃와 5 μ m의 TiO₂ 입자로 선정하여 여과실험을 수행하였다.

2. 여과막 성능실험

PFC 매체가 소수성이므로 본 여과실험에 사용할 막으로 소수성 막을 선택하였고 미국 Sonatol 공정에서 사용한 세라믹(Al₂O₃) 막 외에도, PP (Polypropylene) 막, PVDF (Poly vinylidene fluoride) 막을 선택하여 각각의 막에 대해 입자의 제거효율과 플럭스의 영향을 파악하였다. 기초 여과실험을 위한 여과장치를 Stirred Cell Model 8050로 선정하였고 여과 실험장

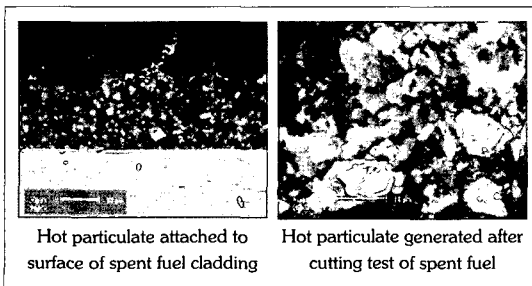


Fig. 1. SEM images of hot particulate distributed within hot cell

치의 공정도를 작성하였다(Fig. 2). 교반셀(Stirred Cell) 안에 장착하는 막의 직경은 44.5mm이고 교반셀이 견딜 수 있는 최대 압력은 75psi 이고 최대용량은 50mL이다. 여과 실험 시 교반함으로써 PFC 매질 내 현탁성 입자들의 분포를 골고루 할 수 있었다. 효과적인 여과를 위하여 N₂ 가스로 가압을 하였고 가압하는 경우 교반셀의 흔들림을 방지하기 위하여 교반셀 고정대(Retaining Stand Assembly)를 부착할 수 있다. PFC 여과 실험 공정은 PFC와 PFC 계면활성제 그리고 오염입자가 포함된 혼합 탱크로부터 여과막이 장착이 된 교반셀 안으로 PFC 제염 폐액이 투입되어 미립자가 제거된다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 입자 및 압력별의 제거효율

본 여과실험에서 입자의 제거효율은 비어있는 교반셀의 무게와 투입할 모의 입자의 정확한 양을 계산하여 여과실험 후 교반셀 안에 남아 있는 PFC 제염 용액을 건조기에서 100 $^{\circ}$ C의 온도로 10시간 이상 완전 건조 후에 교반셀의 무게를 측정하여 산정하였다.

Soantol 공정에서 PFC 제염공정 후 오염입자의 여과를 위해서 사용한 바 있는 세라믹 막을 이용하여 제거효율을 알아보려고 하였다. Fig. 3(A)에서 알 수 있듯이 일정한 압력 하에서 세라믹 막에서의 제거효율은 모의 입자의 크기와 무관하게 97% 이상을 나타내었다. Fig. 3(B)는 세라믹 막(0.2 μ m)을 이용하여 PFC 제염 용액 내 α -Al₂O₃ 입자(0.3 μ m)의 존재 시 압력별 제거효율을 산정하기 위해 5분 동안의 여과 실험 결과를 나타낸다. 97% 이상의 높은 제거효율을

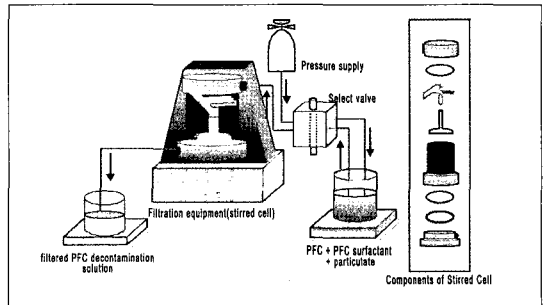


Fig. 2. Process diagram of PFC filtration experiment

보였지만 세라믹 막을 이용한 모의 입자 여과실험에 있어서 실험 준비과정이나 본 여과실험을 진행하는 과정에서 막 자체가 쉽게 깨지는 성질을 확인 할 수 있었다. 따라서 세라믹 막을 이용한 입자의 여과는 상당한 주의가 필요한 것으로 판단된다. 그러나 본 여과 실험은 최종적으로 핫셀 내 고방사능으로 오염된 입자의 여과가 주목적이다. 미국 DOE 보고서 DE-AC26-01NT41308[5]에 의하면 일반적인 고분자 재질의 여과 막은 알파방사능 분위기에서 H₂ gas를 발생시키지만, 세라믹 막은 구조적으로 H₂를 포함하고 있지 않기 때문에 H₂ gas를 발생하지 않고 안정적이므로 세라믹 막을 본 여과공정에 적용하기에 유리할 것으로 판단된다.

PP 막을 이용하여 모의 입자의 크기와 공급되는 압력의 변화에 따른 입자의 제거성능을 알아보았다 (Fig. 4). 공급되는 압력을 5psi로 일정하게 유지하면서 0.3 μ m의 α -Al₂O₃ 입자를 이용하여 기공크기가 0.2 μ m인 PP 막에서의 5분 동안의 여과실험 후 제거효율

을 조사하여 Fig. 4(A)에 나타내었다. PP 막에서는 대체적으로 PFC 제염폐액 내에 존재하는 입자의 크기가 클수록 입자의 제거효율이 증가함을 알 수 있었다. Fig. 4(B)는 PP 막을 이용하여 PFC 제염폐액 내에 α -Al₂O₃ 입자(0.3 μ m)의 존재 시 압력에 따른 제거효율의 변화를 나타낸다. 공급압력이 8psi 이하의 비교적 낮은 압력에서의 여과실험은 그 이상의 조건에서 보다 상대적으로 제거효율이 떨어짐을 알 수가 있었다. 이는 미세한 입자를 이용한 여과막의 실험에서 여과막을 통과하는 압력이 낮아수록 membrane blockage가 형성되기 때문으로 판단된다. 따라서 PP 막을 이용한 모의입자의 여과실험에서는 공급압력을 약 9psi 이상으로 가하였을 경우에 최대치의 제거효율을 나타냄을 확인하였다.

PVDF 막을 이용하여 모의 입자의 크기 및 압력에 대한 제거효율의 영향을 알아보고자 하였다. 공급압력을 5psi로 일정하게 하고 모의 입자의 크기에 따른 제거효율을 산정한 결과 여과실험에 사용된 모든 입

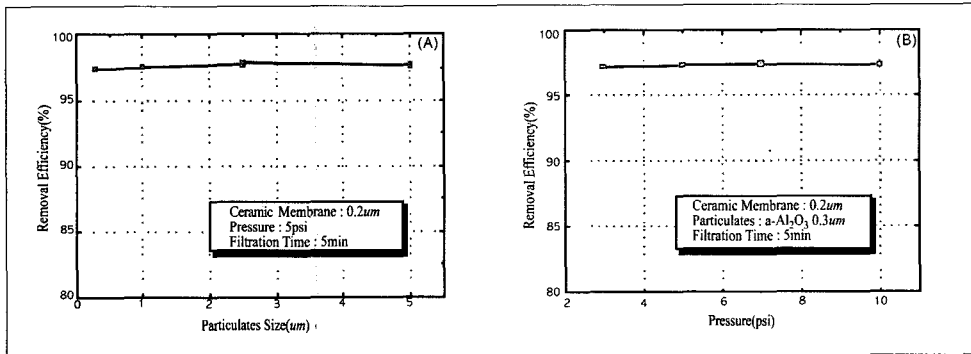


Fig. 3. Removal efficiency of particulate and pressure with ceramic membrane

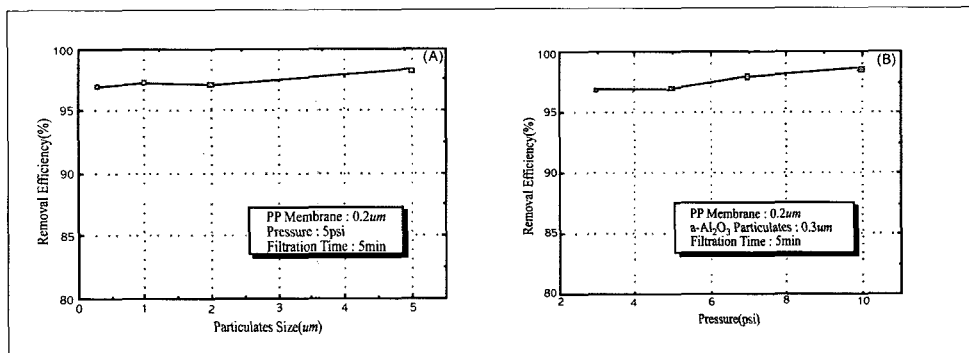


Fig. 4. Removal efficiency according to the particulate size with PP membrane

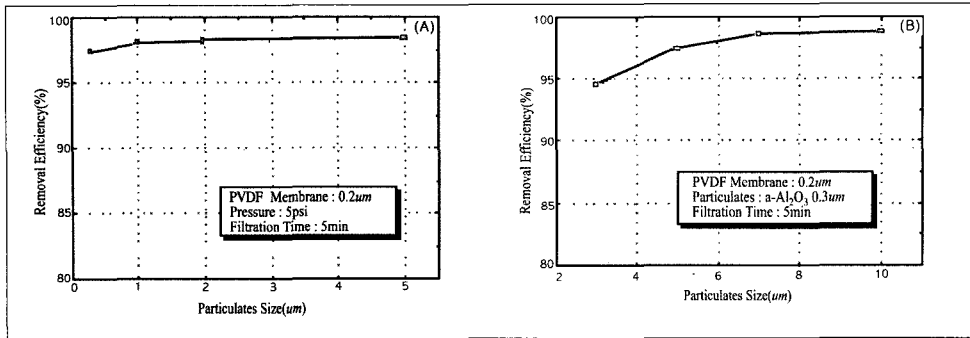


Fig. 5. Removal efficiency according to particulate size and pressure with PVDF membrane

자에서 97% 이상의 제거효율을 보였고 입자의 크기가 1.0 μm 이상의 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 입자를 사용한 경우에서 최대(한계) 제거효율을 나타내었다(Fig. 5(A)). 5분 동안의 여과실험으로 공급압력이 증가함에 따라 모의 입자의 제거효율이 증가함을 확인하였고, 3psi의 낮은 압력에서는 94.5%의 비교적 낮은 제거효율을 나타내었다. PVDF 막을 사용하여 여과실험을 할 경우는 최소한 공급압력을 7psi 이상으로 가하였을 경우에 최대의 제거효율을 나타냄을 알 수가 있었다(Fig. 5(B)).

2. 여과막의 flux 성능 실험

오염 입자의 여과를 위한 여과 막의 선정을 위해 각각의 막에 대한 제거효율 외에도 플럭스를 측정하여 제거효율과 견주어 고려함으로써 적절한 여과 막을 선정하고자 했다.

① 세라믹(Al_2O_3) 막

미국 DOE Savannah River Site에서 보관 중인 Pu-238로 오염된 TRU Waste를 제염하기 위한 Sonatol 공정에서는 PFC 오염폐액으로부터 Pu-238 입자를 분리 제거하기 위해 세라믹 여과막을 사용했다. 무기물로 된 세라믹 막은 일반적으로 사용되고 있는 유기 화합물로 된 고분자 막보다 알파방사능 환경에서 안정함을 보이기 때문이다. 따라서 본 여과실험은 세라믹 막을 이용하여 플럭스와 입자 크기와의 관계를 파악하여 여과실험의 최적 조건을 찾고자 하였다.

Fig. 6은 모의입자의 크기에 따라서 0.2 μm 세라믹 막의 플럭스 영향을 알아보기 위해 5psi로 일정한 압력을 주어 실험한 결과를 보여준다. 제염용액 내 존

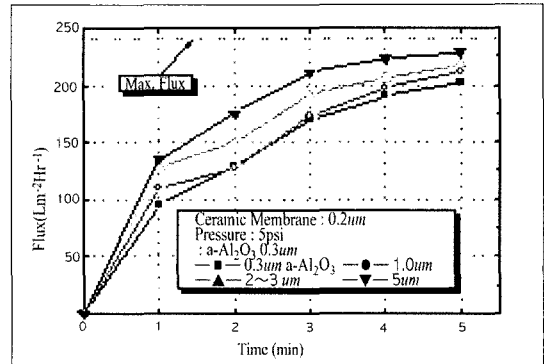


Fig. 6. Flux behavior according to the particulate size with Ceramic membrane

재하는 입자의 크기가 작을 경우는 입자가 큰 경우에 비해 플럭스가 낮게 나타났으며 실험 대상 입자의 크기 차이가 플럭스에 영향을 미친다는 것을 보여주고 있다. 즉, 2~3 μm 와 5 μm 입자에 대한 여과실험 결과가 보다 낮은 압력에서도 보다 나은 플럭스 성능을 나타내었다. 이것은 미세한 입자들이 막의 표면에 Cake를 형성하여 Filtration Resistance를 증가시키기 때문이다[11,12]. 세라믹 막을 사용하였을 경우 제거효율은 전반적으로 타 여과 막과 비슷한 성능을 보였지만 플럭스는 PVDF 막 보다 다소 작았다. 여기서 최초로 투입한 PFC 오염폐액이 모두 빠져 나오지 못한 이유는 Stirred Cell 안에 남아 있는 입자들 표면에 오염폐액이 묻어 있는 경우와 아주 미세한 입자들이 막의 기공 표면에 부착되어 Membrane Blockage가 형성되는 것으로 생각되고 이러한 현상은 또한 입자의 여과 시 제염용액의 여과 성능을 떨어뜨리는 것으로 판단된다.

미세한 입자의 제거를 위해서 기공크기가 0.2 μm 인

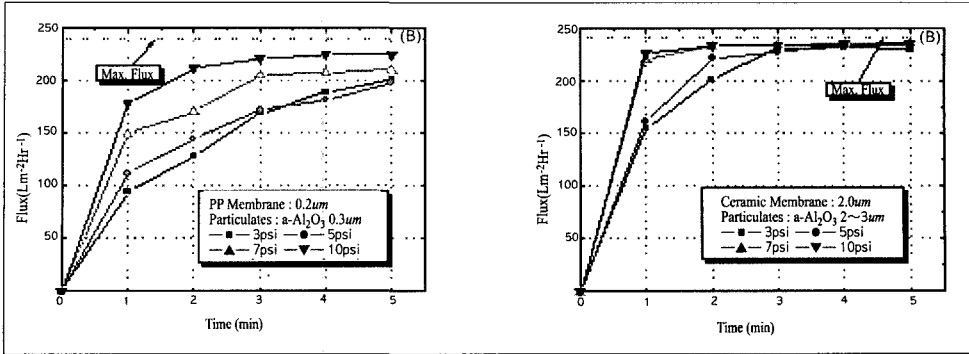


Fig. 7. Flux behavior according to the pressure with Ceramic membrane

세라믹 막을 사용하였을 경우 0.3µm의 모의입자의 여과를 위해 10psi 이상으로 가압을 해야 90% 이상의 플럭스 성능을 얻을 수 있었다(Fig. 7(A)). Fig. 7(B)은 Fig. 7(A)과 비교하여 막의 기공 크기가 2.0µm 이고 여과실험에 이용한 모의 입자 α-Al₂O₃의 크기 또한 2~3µm로 좀 더 굵은 입자 경우의 플럭스 성능을 알아보고자 했다. 0.2µm 세라믹 막을 사용했을 경우보다 플럭스 성능은 전체적으로 높았고 모의입자의 여과를 위해 5psi 이상으로 가압을 하면 90% 이상의 플럭스 성능을 얻을 수 있었다.

② PP(Polypropylene) 막

Fig. 8는 PFC 제염용액 내에 모의 입자로 α-Al₂O₃의 존재 시 PP 막(0.2µm)을 이용하여 여과시간의 경과에 따른 입자크기별(0.3~5µm) 플럭스를 측정된 결과를 나타냈다. 좀더 큰 입자의 여과 시 비교적 작은 입자의 여과실험과 비교해서 다소 빠른 시간에 최대(한계) 플럭스에 도달함을 보였다. 즉, 약 4분의 경과 후 모든 압력에서 더 이상의 여과되는 용액의 양이 증가되지 않았다. PP 막을 사용하였을 경우 제거효율은 PVDF 막과 비슷한 성능을 보였지만 플럭스는 PVDF 막 보다 작았다.

0.3µm의 모의입자의 여과를 위해 0.2µm 세라믹 막을 사용하였을 경우 10psi 이상으로 가압을 해야 90% 이상의 플럭스 성능을 얻을 수 있었다(Fig. 9(A)). 좀더 큰 입자에서의 영향을 알아보기 위해서 기공 크기가 2.0µm인 여과막을 사용하여 2~3µm 모의 입자에 대한 플럭스 성능을 측정했다. 0.2µm PP 막보다 플럭스 성능은 전체적으로 높았고 세라믹 막처

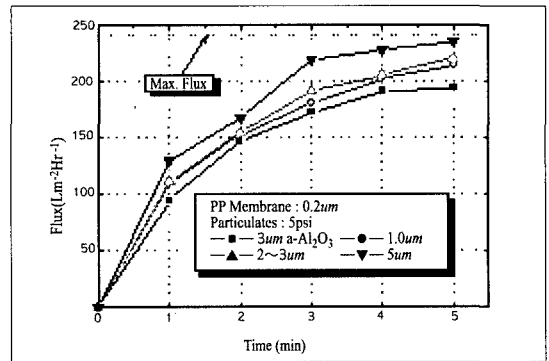


Fig. 8. Flux behavior according to the particulate size with PP membrane

럼 모의입자를 위해 5psi 이상으로 가압을 하면 90% 이상의 플럭스 성능을 얻을 수 있었다(Fig. 9(B)).

③ PVDF(Poly vinylidene fluoride) 막

PVDF 막에서 5psi의 일정한 압력 하에 모의입자의 크기를 변화시켜가며 시간에 따른 플럭스의 변화를 확인하였다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 시간이 증가함에 따라 전반적으로 플럭스도 함께 증가하고 있으며 PFC 오염폐액 내에 모의입자가 클수록 플럭스 성능은 높았다. 한편, 앞에서 실험한 세라믹 막이나 PP막 보다 동일 실험조건에서 플럭스의 값이 높았다.

PVDF(0.2µm) 막에서 여과시간의 경과에 따라 공급 압력별 PFC 제염용액의 플럭스를 측정된 결과 PFC 제염용액 내에 α-Al₂O₃ 입자(0.3µm)의 존재 시 여과 시간이 증가함에 따라 플럭스가 증가하였고 비교적 낮은 3psi로 압력을 가하였을 경우 최대(한계) 플럭스에 도달하는 시간이 5분 정도 걸렸으며 5psi 이상

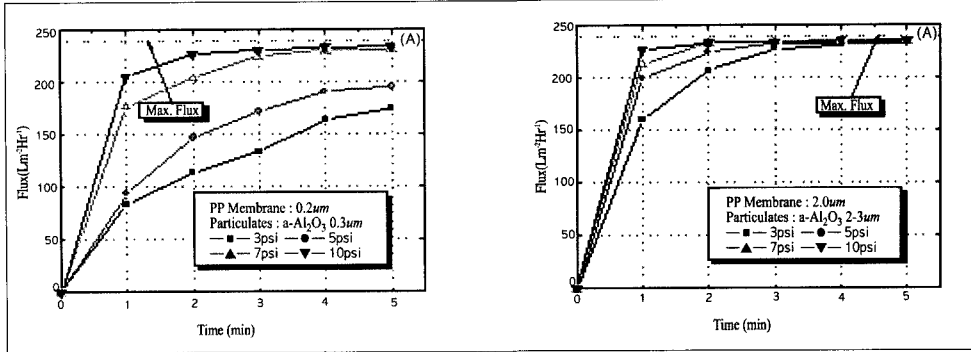


Fig. 9. Flux behavior according to the pressure with PP membrane

으로 압력을 가했을 경우에는 3분 정도 지나면서 최대(한계) 플럭스에 도달함을 확인하였다(Fig. 11(A)). 입자의 여과실험 수행에 있어서 100% 플럭스에 도달하지 못한 것은 막의 기공 표면에 미립자가 흡착이 되어 입자의 여과를 방해한 것으로 판단된다. 기공 크기가 2.0µm인 여과막을 사용하여 2~3µm 모의입자에 대한 플럭스 성능을 측정된 결과 0.2µm PVDF 막

보다 플럭스 성능은 약간 높았고 모의입자를 위해 3psi 이상으로만 3분 이상 가압하여도 90% 이상의 플럭스 성능을 얻을 수 있었다(Fig. 11(B)).

④ 여과막 비교 분석

앞에서 모의 입자가 함유된 PFC 제염용액의 여과

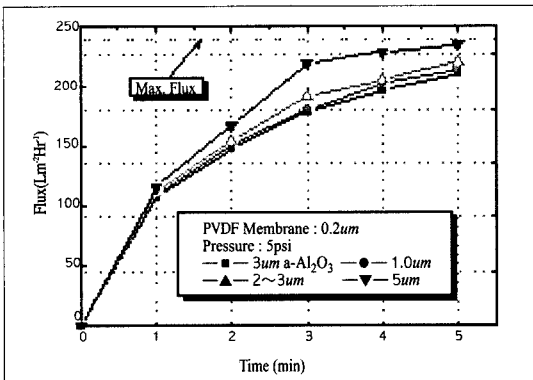


Fig. 10. Flux behavior according to the particulate size with PVDF membrane

Table 1. Comparative characteristic of tested membrane filters

Parameter	Membrane		
	Ceramic (Al ₂ O ₃)	PP (Polypropylene)	PVDF (Poly vinylidene fluoride)
Temp. (100 °C)	high	high	high
Removal Efficiency (%)	over 95%	over 97%	over 97%
Flux	middle	middle	high
Radioactivity	high	low	low
Fragility	high	low	low
Price	high	low	middle

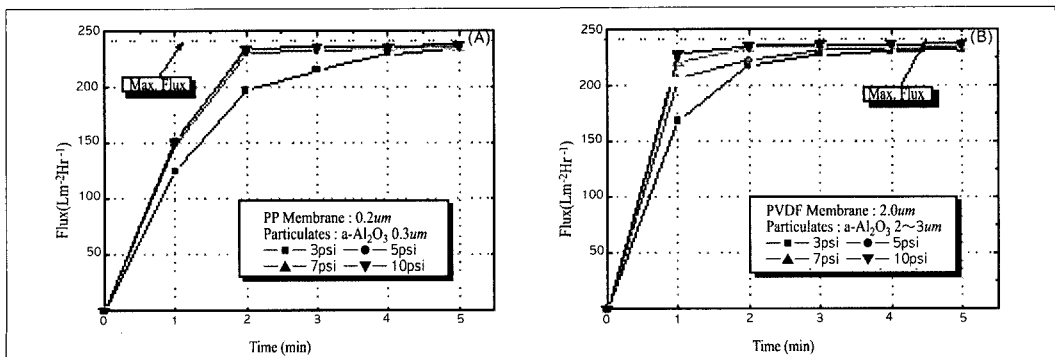


Fig. 11. Flux behavior according to the pressure with PVDF membrane

성능을 살펴보기 위하여 여과 막을 이용하여 제거효율 및 플럭스 실험을 수행하였다. 또한 온도 실험결과 PVDF, PP, 세라믹 막 모두 100℃에서 안정했다. 그러나 여과실험 과정 중 세라믹 막은 작은 압력에도 쉽게 깨어지는 경향을 알 수 있었다. 모의 입자에 대한 여과 막의 성능 실험 결과(제거효율 및 플럭스)와 고온에서의 적응성, 여과막의 가격, 여과막 자체의 부서지는 정도, 그리고 방사능에 대한 막 재질의 안정성에 관한 특성을 비교하여 Table 1과 같이 나타내었다.

우선 모의 입자의 제거효율 측면에서 보면 PVDF, PP, 세라믹 막 모두가 전반적으로 95~97%의 여과 성능을 보여 성공적임을 확인했다. 서로 같은 막의 기공 크기에서 모의 입자의 크기가 작은 것 보다 클수록 가하는 압력이 높을수록 좀더 효과적인 제거효율을 나타내었다. 이는 모의입자의 크기가 더욱 미세하고 낮은 압력으로 여과를 수행할 때 Membrane Blockage 가 형성이 되는 것으로 판단되어 필요시 보다 높은 고압으로 입자의 여과 실험이 바람직함을 알 수 있었다. 세라믹 막은 모의 입자의 제거효율은 높지만 다소 낮은 Flux 성능을 갖고, 쉽게 부서지며, 가격은 비싸다는 단점을 가지고 있지만 재질이 무기화합물이기 때문에 세라믹 막은 알파방사능 환경에서 불안정한 고분자 막인 PVDF, PP 막과 비교하여 훨씬 더 안정하다. PP막은 모의 입자의 제거효율은 높으며 가격이 가장 저렴하고, 다소 낮은 Flux 성능을 갖으며, 깨지는 성질은 없지만 폴리머 물질이기 때문에 알파방사능 환경에서 H₂ 가스가 발생되므로 [5] 여과막이 고방사능에 노출시 불안정하다. PVDF 막은 모의 입자의 제거효율은 높지만 다소 낮은 Flux 성능을 갖고, 가격은 중간이고, 깨지지 않지만 PP 막과 마찬가지로 알파방사능 환경에서 H₂ 가스가 발생되므로 고방사능 노출 시 불안정하다.

IV. 결 론

PFC 제염 시 발생하는 방사성 오염입자를 PFC 제염폐액으로부터 제거하기 위해 먼저 오염입자의 특성을 조사하고 실험실 규모의 여과공정을 도출하였

다. 실제 제염이 이루어질 핫셀 내의 오염입자를 전자현미경에 의하여 분석한 결과 그 크기 분포가 0.1~10μm임을 알 수 있었다. 여과실험 결과 모의 입자의 제거효율 측면에서 보면 PVDF, PP, 세라믹 막 모두가 전반적으로 95~97%의 여과 성능을 보였다. 서로 같은 막의 기공 크기에서 모의 입자의 크기가 작은 것 보다는 클수록 그리고 가하는 압력이 높을수록 좀더 효과적인 제거효율을 나타내었다 또한, 3 psi이하에서는 PVDF의 제거효율이 다른 막에 비해 작게 나타났다. 플럭스 성능은 PVDF 막에서 가장 높은 수준으로 나타났고 세라믹과 PP 막에서는 다소 낮은 성능을 보였다. PVDF 막은 낮은 압력과 짧은 여과시간으로 최대(한계)플럭스에 도달함을 확인하였다. 결국, 모의입자의 크기가 더욱 미세하고 낮은 압력으로 여과를 수행할 때 Membrane Blockage가 형성되기 때문에 경우에 따라서 보다 높은 고압으로 입자의 여과실험 수행이 요구된다. 이와 같이 세라믹 막은 모의입자의 제거효율은 높지만 다소 낮은 Flux 성능을 나타내었다. 그러나 재질이 무기화합물이기 때문에 알파방사능 환경에서 H₂ 가스를 발생하는 고분자 막인 PVDF, PP 막과 비교하면 고방사능에 노출 시 매우 안정한 것으로 나타났다. 따라서 기초 여과막의 성능 비교실험을 통하여 방사능 환경에 적응성이 뛰어난 세라믹 막을 적용한 PFC 실증 여과장치의 공정도를 도출하였다.

Reference

- [1] K.E. Archibald, "CO₂ Pellet Blasting Literature Search and Decontamination Scoping Tests Report," WINCO-1180 (1993)
- [2] K. Tatenuma, Y. Hishinuma and S. Tomatsuri, "Newly Developed Decontamination Technology Based on Gaseous Reactions Covering to Carbonyl and Fluoric Compounds," Nucl. Tech., Vol.124, pp.147-164 (1998)
- [3] R. Kaiser and O.K. Harling, "Enhanced Removal of Radioactive Particles by Fluorocarbon Surfactant Solutions," NUREG/CR-6081 (1993)

- [4] R. Kaiser and C.E. Benson, "Decontamination by Cleaning with by Fluorocarbon Surfactant Solutions," ORNL/TM-12444 (1994)
- [5] A.E. Desrosiers and R. Kaiser, "Separation and Extraction of Plutonium in Mixed Waste, Bartlett Services," Inc., Plymouth, MA, USA, DE-AC26-01NT41308 (2002)
- [6] P. Wang, K.L. Tan, E.T. Kang and K.G. Neoh, "Plasma-induced Immobilization of Poly (ethylene glycol) onto Poly(vinylidene fluoride) Microporous Membrane," J. Membr. Sci. Vol. 195, pp.103-114 (2002)
- [7] L.E.S. Brink, S.J.G. Elbers, T. Robbertsen and P. Both. "The Anti-fouling Action of Polymers Preadsorbed on Ultrafiltration and Microfiltration Membranes," J. Membr. Sci. Vol.76, pp.281-291 (1993)
- [8] R.B. Bai and H.L. Leow, "Microfiltration of Polydispersed Suspension by a Membrane Screen-hollow Fiber Composite Module," Desalination Vol. 140, pp.277-291 (2001)
- [9] R.B. Bai and H.L. Leow, "Modeling and Experimental Study of Microfiltration Using a Composite Module," J. Membr. Sci. Vol. 204, pp.359-377 (2002)
- [10] K. Yamamoto, M. Hiasa, T. Mahmood and T. Matsuo, "Direct Solid-liquid Separation Using Hollow Fiber Membrane in an Activated Sludge Aeration Tank," Water Sci. Technol. Vol. 21, pp.43-54 (1989)
- [11] V.T. Kuberkar and R.H. Davis, "Modeling of Fuling Reduction by Secondary Membranes," J. Membr. Sci. Vol. 168, pp.243-258 (2000)
- [12] I.S. Chang, P.L. Clech, B. Jefferson and S. Judd, "Membrane Fouling in Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment," J. Environ. Eng. Vol. 128, pp.1018-1029 (2002)