

Development and Performance Evaluation of a Filtration Equipment to Reuse PFC Waste Solution Generated on PFC Decontamination

PFC 제염 시 발생된 PFC 폐액의 재사용을 위한 여과장치 개발 및 성능평가

Gye-Nam Kim, Cheol-Jin Jeong, Hui-Jun Won, Wang-Kyu Choi, Chong-Hun Jung,
Won-zin Oh and Jin-Ho Park

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

kimsum@kaeri.re.kr

김계남, 정철진, 원휘준, 최왕규, 정종현, 오원진, 박진호
한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

(Received March 17, 2006 / Approved May 8, 2006)

Abstract

PFC(Perfluorocarbon) decontamination process is one of best methods to remove hot particulate adhered on the inner surface of hot cell and surface of equipment in hot cell. It was necessary to develop a filtration equipment to reuse the PFC waste solution generated on PFC decontamination due to the high cost of PFC solution and for minimization of the volume of second waste solution. The filtration equipment was developed to remove hot particulate in PFC waste solution. It was made suitable size and weight in consideration of hot cell gate and crane. And it has wheels for easy movement. Flux of the filtration equipment decreased with particulate concentration increase. It consists of pre-filter(1.4 μm) and final-filter(0.2 μm) for protection of the flux decrease along filtration time. Its treatment capacity of waste solution is 0.2 L/min.

Key words : PFC, filtration equipment, hot particulate, removal efficiency, flux

요 약

PFC 제염기술은 원자력연구시설 핫셀 내부의 바닥이나 장치표면에 부착된 고방사능분진을 제거하기 위한 방법 중의 하나이다. 고가의 PFC 제염용액을 회수·정제후 재사용하고, 2차폐기 물발생을 획기적으로 줄일 수 있는 여과장치를 개발하였다. PFC 매질 내 현탁성 방사성입자를 제거하기 위해 오염특성에 적합한 여과장치를 개발하고 입자제거 성능평가시험을 수행하였다. 개발된 PFC 여과장치는 핫셀 내부로 들어갈 수 있게 알맞은 크기와 무게로 제작되었으며 바퀴와

고리를 부착하여 이동이 용이하다. PFC 여과장치의 성능평가결과 모의입자의 농도 증가 시 flux가 감소하였고, Pre-filter(1.4 μm)와 final-filter(0.2 μm) 두개를 장착하여 여과시간에 따른 flux의 감소를 개선하였다. 개발된 PFC 여과장치는 분당 약 0.2L의 PFC 폐액을 처리 할 수 있다.

중심단어 : PFC, 여과장치, 고방사능분진, 제거효율, 유출량

I. 서론

한국원자력연구소 조사재시험시설(Irradiated Material Examination Facility)과 조사후시험시설(Post-Irradiation Examination Facility)의 핫셀(Hot Cell)에서는 사용후핵연료의 산화환원 및 분쇄, 사용후핵연료의 절단 및 분말화, 균분리, 사용후핵연료 금속전환 실험 등이 수행되고 있다. 이들 실험과정에서 핫셀 바닥과 벽면 그리고 핫셀 내부의 여러 장치 표면들은 고방사능 분진과 고방사능 핵연료의 조사에 의해 오염되고 이로 인하여 핫셀내의 방사능 준위가 높아지고 있다. 그러므로 핫셀 내 핵종 실험을 원활히 수행하기 위해서는 주기적으로 핫셀 내부 표면과 장치표면에 오염된 고방사능 분진을 제거하여 핫셀 내의 방사능 준위를 낮추어야 한다. 핫셀 표면에 단단히 고착된 고방사능 분진은 CO₂ Blasting, 초음파 PFC 제염, 플라즈마 제염 등과 같은 건식제염기술을 사용하여 제거효율을 높일 수 있다¹⁻³⁾. 특히, PFC(PerFluoroCarbon) 제염기술은 기존의 프레온제염과 유사한 방법으로 고체표면의 작은 입자를 더욱 효과적으로 제거할 수 있는 건식제염공정의 하나이다. PFC 제염공정은 DuPont이나 3M사에서 개발한 PFC계 세정제(Vertel 2454, PF-5070)를 주 세척제로 사용하고 여기에 PFC계 계면활성제를 소량 첨가하여 제염성능을 향상시킬 수 있는 공정으로 알려져 있다.^{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 ²³⁸Pu로 오염된 TRU Waste를 제염하기위한 Sonatol 공정에 적용되었다⁵⁾.

원자력연구시설의 핫셀 내의 방사성 오염 입자의 제염을 위하여 PFC 제염기술 적용할 때, 제염종료 후 이차폐기물의 발생을 최소화시키며, 고가의 PFC용액 자체를 회수하여 재사용할 목적으로 PFC 여과장치를 개발할 필요가 있다. 폐쇄공정으로 운영되는 PFC 제염공정은 PFC 용액을 연속 순환하여 사용하게 되며, 제염과정에서 제거된 오염입자가 PFC 용액 내에 존재하여 재 오염의 원인이 된다. 그러므로 적합한 여과 막을 사용하여 PFC 용액내의 오염입자를 제거해야 한다. 여과 막에는 여러 종류가 있으며, 여과 막 오염과 높은 플럭스를 방지하며, 여과 막의 효율을 증가시키기 위하여 최근 새로운 막의 재질^{6,7)}과 모듈의 디자인 개발^{8,9,10)} 그리고 Flow Pattern의 변화¹¹⁾ 등의 많은 연구가 진행 중에 있다.

본 연구에서는 PFC 매질내 현탁성 방사성입자를 제거하기 위해 Hot Particulate 오염특성을 조사한 후 오염특성에 적합한 여과막을 선정하고 및 여과장치를 개발하였다. 또한, 개발된 장치를 원자력연구소 핫셀내에서 사용하기 위해 핫셀 출입구와 핫셀 연결문의 크기를 조사하였고 핫셀에 투입된 장치의 작동은 Manipulator에 의해 수행되어야 하므로 Manipulator의 작업범위도 함께 조사하였다.

II. 실험방법

가. Hot Particulate 크기 측정 및 핫셀 구조 조사

기초 여과실험 수행에 이용할 모의 입자들의 크기 선정과 여과장치에 사용할 적당한 여과막 선정을 위해서 핫셀 내의 오염 입자들을 채취하여 그 크기를 분석하였다. 즉, 한국원자력연구소 연구시설에 보관된 사용 후 핵연료 소결립의 크기를 광학현미경(OM)

으로 측정하였고, DUPIC 산화환원실험과 사용후핵연료 절단 및 파괴 실험 후의 Hot Particulate의 크기를 SEM으로 측정하였다.

개발된 장치를 원자력연구소 핫셀 내에서 사용하기 위해 핫셀 출입구와 핫셀 연결문의 크기를 조사했다. 핫셀에 투입된 장치의 작동은 Manipulator에 의해 수행되어야 하므로 Manipulator의 작업범위도 조사했다.

나. PFC 제염폐액 여과장치개발

1) 여과막 성능 실험 및 안정성 평가

여과 장치에 사용될 최적 여과막의 선정을 위해서 여러 가지(세라믹(Al_2O_3), PP(Polypropylene), PVDF(Poly vinylidene fluoride)) 여과막의 flux 및 제거 효율을 측정하였고 α -방사능조건에서 안정성 실험을 하였다¹²⁾. 핫셀 내의 높은 α -방사능조건에서 필터의 안정성을 실험하기 위해 위의 3가지 필터를 PIEF 핫셀 안에 10개월간 넣어 방사능피폭 후 꺼내어 SEM 촬영을 통해 전후의 여과 막 변화를 관찰하였다.

2) 실증여과장치 크기 및 구조 결정

최종적인 여과장치는 핫셀 구조 및 Manipulator의 수행에 적합하고, 여과막 선정 실험으로 결정된 효율이 좋은 여과막중 방사선 조건에 안정한 ceramic filter를 사용하여 제작하였다. 또한 핫셀 내부로 들어가기 위해서 그 크기가 제한된다. 즉 IMEF M4셀에서의 실증실험을 위해 제작된 여과장치는 M1셀의 뒷문($1m \times 1m$)을 통과한 후 크레인을 이용하여 셀과 셀의 연결문($1m \times 0.8m$)을 통과해야 하므로 장치의 크기가 $1m \times 0.8m$ 보다 작아야 한다(Table 1).

PFC 제염시 발생하는 폐액용량이 분당 0.2 L이므로 제염과 동시에 PFC를 회수하기 위해서는 여과 장치내의 순환용액 부피가 0.2L가 넘어야 한다. 저장용기는 10L로 하여 약 50분간의 제염폐액을 모을 수 있도록 설계하였다. 여과장치의 펌프용량은 제염폐액 발생부피를 충분히 순환시킬 수 있는 0.2 kw의 1.7-2.4 L/min 펌프를 사용하였다.

3) 여과막 용량 및 개수 결정

여과막은 여과 막 선정 실험에서 선정된 ceramic

filter를 사용하였으며, 입자를 모으는 것이 아니라 폐액이 장치내부를 순환하면서 여과된 PFC 만을 분리해낼 수 있는 원통형 filter를 사용하였다. filter는 기초 실험에서 오염입자들의 크기가 $0.2 \sim 10 \mu m$ 이므로 공극이 작은 filter 하나를 사용하여도 되지만 하나의 filter만을 사용하게 되면 filter의 수명도 짧아지고 filter에 무리를 주며, flux 또한 감소될 것으로 예상된다. 그러므로 pre-filter로 공극크기 $1.4 \mu m$ 의 원통형 filter를, finer filter로 $0.2 \mu m$ 의 원통형 filter를 사용하도록 설계하였다. 이 장치는 각 filter 하나만을 통과하는 경우와 두개 filter를 통과하는 경우를 합쳐 모두 세 가지 경우에 대한 여과실험을 할 수 있도록 설계 및 제작하였다.

다. PFC 제염폐액 여과장치 성능평가

PFC 제염폐액 여과장치의 성능을 평가하기 위하여 각각의 경우에 대한 flux를 압력에 따라 측정하였다. 세 가지 경우 즉, $1.4 \mu m$ filter만을 통과하는 경우, $0.2 \mu m$ filter만 통과하는 경우 그리고 두 filter를 모두 통과하는 경우에 대하여 압력에 따른 변화를 시간에 따라 실험하였다. flux는 단위 시간당, filter의 면적분에 투과된 PFC의 부피로 계산하였다.

III. 실험결과 및 고찰

가. 실증여과장치 설계의 제한조건

핫셀내부에서 실험중에 발생하는 Hot Particulate는 Fig. 1과 같이 사용 후 핵연료 피복 판 주변 CRUD Particulate, DUPIC 산화공정후 Particulate, 그리고 SF 절단시험후 Particulate 등이며, Particulate의 크기를 SEM으로 측정된 결과 $0.2 \sim 10 \mu m$ 이었다. 한편, 각 연구시설 Hot Cell에서 발생하는 Hot Particulate 성분을 EDS로 분석결과 UO_2 , U_3O_8 , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{106}Ru , ^{144}Ce , ^{154}Eu 의 방사성핵종으로 구성되어 있었다. 또한, PFC 제염폐액에 대한 여과공정은 $1.4 \mu m$ 이상의 입자들은 pre-filter를 통해 먼저 제거한 후 다음 final-filter에서 $0.2 \mu m$ 이상의 작은 미세한 입자들을 제거하는 공정으로 필터 모양은 실린더형이고, 가압을 위해 펌프를 후미에 부착시킨 형태이다.

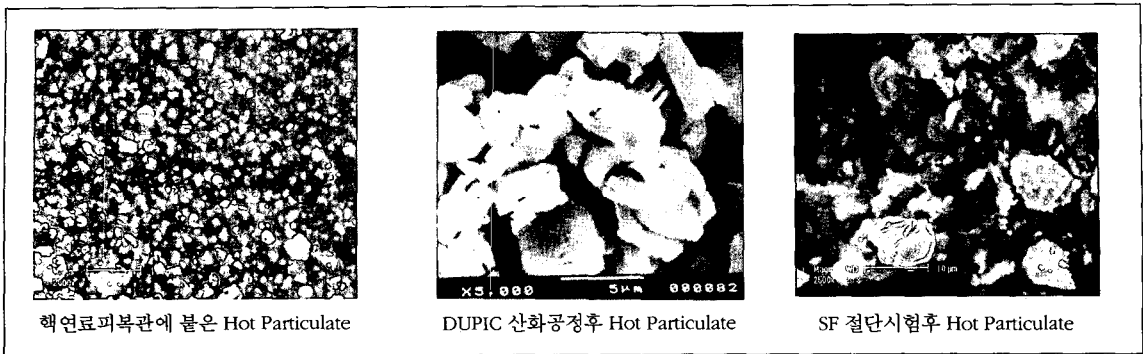


Figure 1. SEM images of Hot Particulates

조사제시험시설(IMEF)의 M4셀은 많은 핵연료시험장비가 보관되어 있어 방사능이 가장 높은 곳으로 고방사능분진을 제거해야 할 지역 중의 하나이다. Fig. 2는 IMEF M4셀의 구조를 나타낸 것이다. 고방사능 분진제거장치를 개발한 후 이 장치를 M4셀에 투입시키기 위해서는 앞에서 기술했듯이 셀과 셀의 연결문을 통과해야 하므로 장치의 크기가 1m × 0.8m 보다 작아야 한다. 장치의 이동은 핫셀상부에 부착된 크레인을 사용하며 운반가능 하중은 3톤이다. 또한 개발된 장치를 이용하여 핫셀 내의 제염작업을 수행할 때 Manipulator만을 이용해야 한다.

Manipulator가 들 수 있는 무게는 20kg이고, 잡아당길 수 있는 힘은 8 kg이며, 로버트 손은 두 손가락으로 구성되어 있기 때문에 장치의 세부부품의 설계는 이 작업조건에 적합해야 한다. Table 1에 장치의 필요제원을 나타내었다.

나. 여과막 안정성 평가

여과막의 성능을 살펴보기 위하여 여과 막을 이용하여 제거효율 및 플럭스 실험을 수행하였다. 또한 온도 실험결과 PVDF, PP, 세라믹 막 모두 100℃에서 안정했다. 모의 입자에 대한 여과막의 성능 실험 결

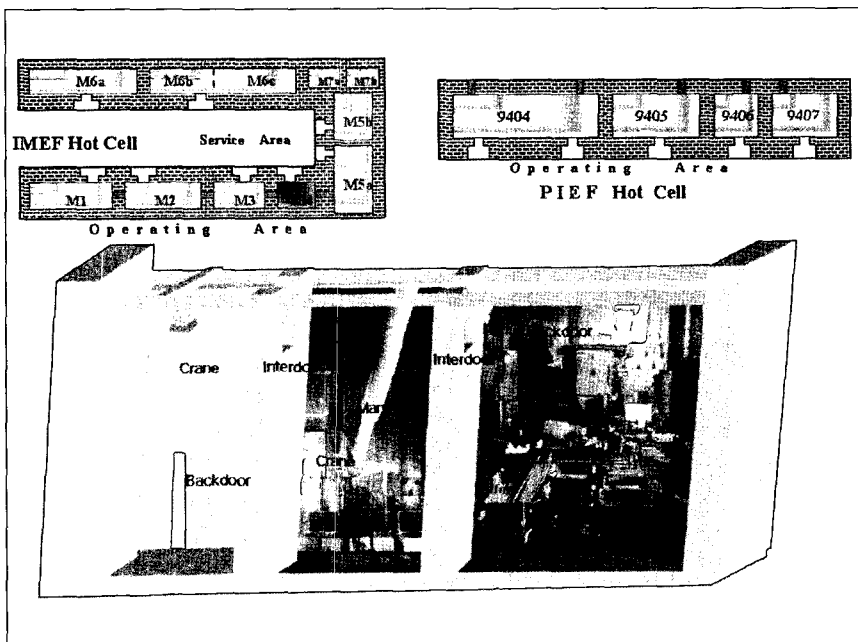


Figure 2. Layout and inside structure of hot cell

과와 고온에서의 적용성, 여과막의 가격, 여과막 자체의 부서지는 정도, 그리고 방사능에 대한 막 재질의 안정성에 관한 특성을 비교하여 Table 2에 나타내었다.

여과막 실험결과 모의 입자 제거효율 측면에서 PVDF, PP, 세라믹 막 모두가 전반적으로 95-99%의 여과 성능을 보였다. Flux 성능은 PVDF 막이 가장 우수했고, 세라믹과 PP막은 다소 낮은 성능을 보였다.¹²⁾

한편, Fig. 3은 여과막들을 원자력연구소 핫셀내부에 투입하여 알파방사능에 10개월 동안 노출시킨 후 핫셀에서 꺼내어 SEM으로 관찰한 것을 원형의 여과막과 비교한 것이다. 이것들을 살펴보면 세라믹 막의 공극구조는 거의 원형 그대로 보존되었지만 PP와 PVDF막의 공극은 알파방사능에 의해 파괴되어 공극이 커진 것으로 나타났다. 이것은 PP막과 PVDF막은

폴리머 물질이기 때문에 알파방사능 환경에서 H₂ 가스가 발생되어 여과막이 파괴되었기 때문으로 사료된다⁵⁾. 따라서 기초 여과막의 성능 비교실험을 통하여 방사능 환경에 적용성이 뛰어난 세라믹 막을 적용한 PFC제염폐액에 대한 실증여과장치를 개발하였다.

다. 실증규모 PFC 제염폐액 여과장치 개발 및 성능 평가

1) PFC 제염폐액 여과장치개발

본 연구에서 개발한 여과장치는 중량 60kg, 가로 85cm, 세로 55cm, 높이 75cm이며 핫셀 내부로 들어갈 수 있는 알맞은 크기로 제작되었다. 또한 1.4 μ m와 0.2 μ m의 두 가지 세라믹 원통형 filter를 장착했으며, 밸브제어를 통해 3가지 경우를 가질 수 있다. PFC 폐액 저장 용기의 용량은 10L이며 최대 압력은 2 MPa 이다. Figure 4는 개발된 여과장치를 보여준다. 세라믹 filter의 직경은 0.7cm, 길이 25cm 이며 표면적은 55cm²이며, Manipulator로 탈·부착이 용이하도록 제작되었다. 압력조절은 밸브 개폐제어를 통해 이루어진다.

Figure 5에서 볼 수 있듯이 각각의 밸브를 제어하여 filter를 선택적으로 사용할 수 있게 설계되어 세 가지 경우를 가진다. 이는 기존의 장치에서 하나의 filter만을 사용하는 것과 비교하여 두개의 filter를 사용하여 얻을 수 있는 효과를 알아보기 위함이다. 첫 번째 filter는 1.4 μ m 세라믹 filter로 비교적 큰 입자들을 제거할 수 있고 두 번째 filter는 0.2 μ m 세라믹

Table 1. Minimum requirements for equipment design

Design element	Requirements
여과막 Housing	Manipulator로 교체용이
장치이동	바퀴와 고리 부착
PFC 제염폐액 저장통	발생폐액저장(10L)
Flux	발생폐액 처리 가능량
장치크기	0.85 × 0.75 × 0.55m (1 × 0.8m이하)
여과시스템	Pre-filter와 Final filter
입자제거효율	97% 이상

Table 2. Comparative characteristics of each membrane used.

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

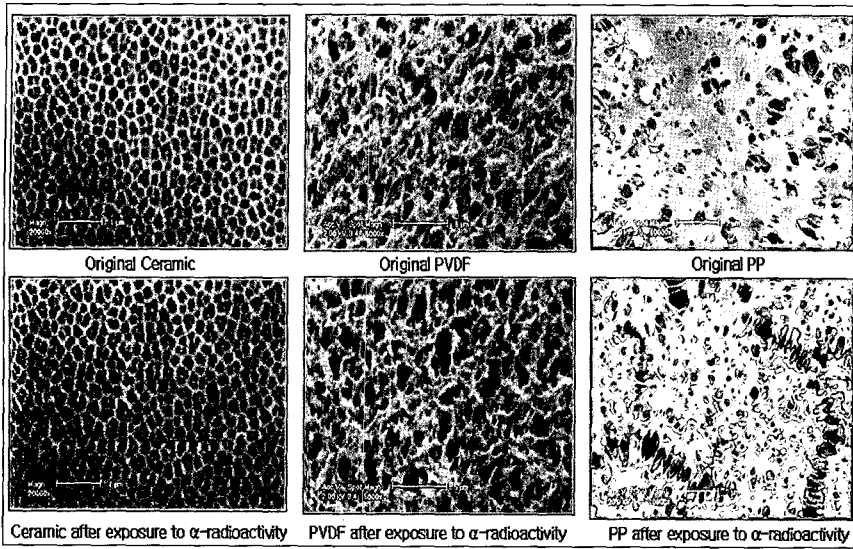


Figure 3. Changes of filter pore structure after exposure in α-radioactivity environment

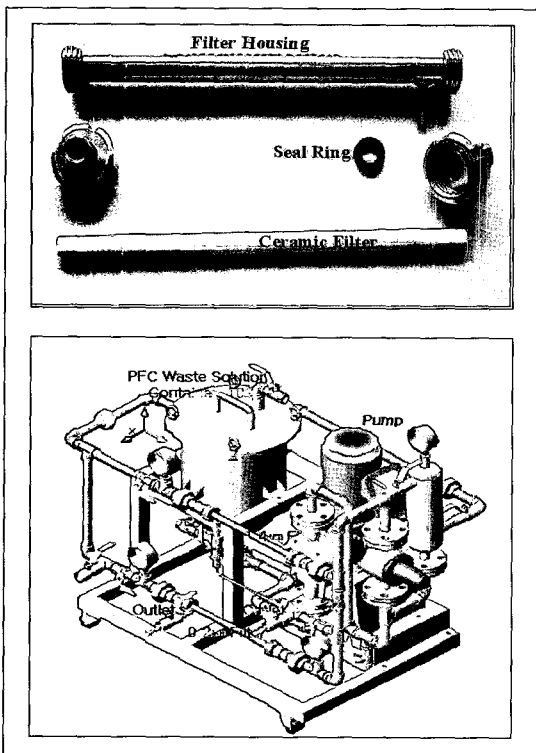


Figure 4. Filtration process scheme for purification of PFC decontamination waste solution

filter로 미세 입자를 제거하게 된다. 두 번째 0.2 μ m 세라믹 filter만을 사용하는 것은 장치에 filter에 많은 무리를 주어 flux 효율을 떨어뜨릴 것으로 생각되어

두개의 filter를 장착하도록 설계하였다.

2) PFC 제염폐액 여과장치 성능 평가

본 여과 장치는 1.4 μ m와 0.2 μ m의 두 가지 세라믹 filter를 장착하여 밸브조절로 세 가지 경우를 가지게 되는데, 1.4 μ m filter 통과경우, 0.2 μ m filter 통과경우 그리고 1.4 μ m와 0.2 μ m filter 모두를 통과하는 경우이다. 두 filter를 모두 통과하게 될 경우 1.4 μ m 세라믹 filter를 먼저 통과 하게 되는데 이것은 큰 입자를 먼저 제거하고 나머지 작은 입자를 0.2 μ m에서 제거하기 위함이다. 개발된 여과장치의 성능을 알아보기 위하여 PFC의 flux를 각각의 경우와 압력에서 시간에 따라 측정하였다. 또한 pre-filter의 부착효과를 알아보기 위해 pre-filter가 있을 때와 없을 때의 flux를 측정하여 비교하였다. Flux는 단위 시간당 여과되는 PFC의 부피를 filter의 표면적으로 나누어 계산하였다. 먼저 순수한 PFC의 Flux를 각각의 경우에 대하여 측정하고 figure 6에 그 결과를 나타내었다.

순수한 PFC의 Flux는 1.4 μ m filter만을 통과하는 경우 300kPa에서 약 7600 L/m²hr이지만 0.2 μ m filter만을 통과할 경우 1300 L/m²hr으로 공극크기가 감소함에 따라 Flux도 상당히 감소함을 알 수 있다. 두 filter를 모두 통과할 경우는 Figure 6(c)와 같이 0.2 μ m filter만을 통과할 경우와 비슷한 결과를 보였다. 또한, 세 가지 경우 모두 압력의 증가에 따라 flux

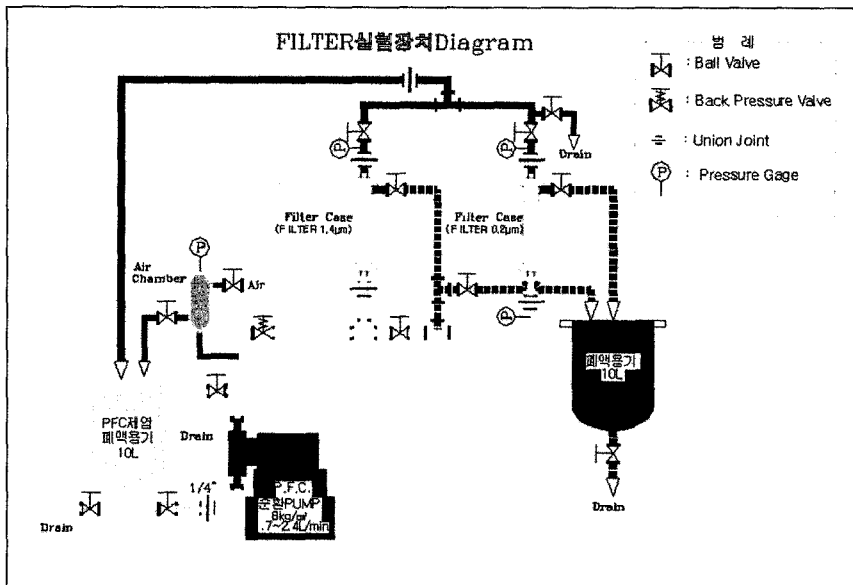


Figure 5. P & ID of filtration process for purification of PFC decontamination waste solution

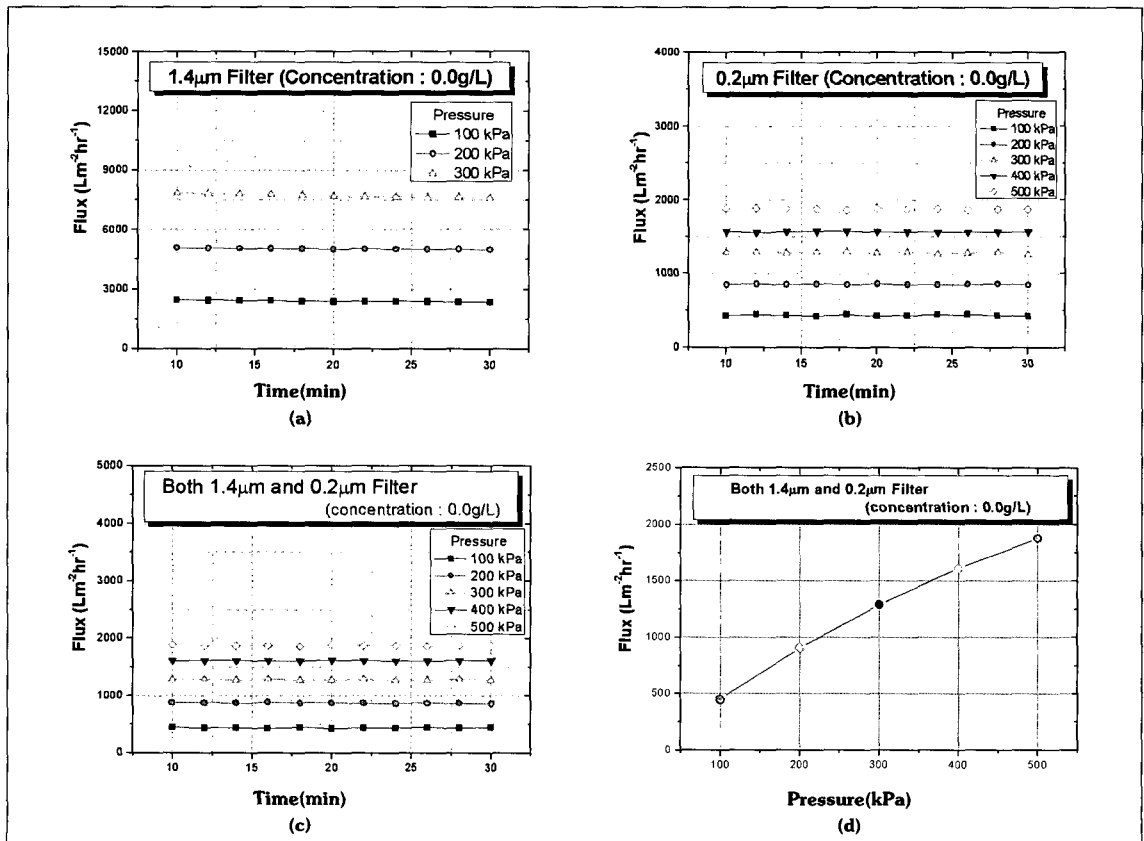


Figure 6. Flux of PFC solvent by (a) 1.4µm, (b) 0.2µm, (c) and (d) 1.4µm and 0.2µm filter

또한 증가함을 알 수 있다. 이것은 압력증가에 따라 필터의 유입용액의 양이 증가하기 때문에 Flux가 증가하는 것으로 사료된다. 그러나 Figure 6(d)에서 보는 바와 같이 정확히 비례하는 것은 아니며 압력증가폭에 비해 Flux 증가폭은 약간씩 감소함을 알 수 있다. 압력이 증가하면 flux 또한 증가하며 시스템 내부에서 흐르는 PFC의 유속 또한 증가한다. 유속이 증가함에 따라 저항 또한 증가하기 때문에 압력 대 Flux가 정확히 비례하지 않고 flux 증가폭이 약간씩 줄어드는 것으로 판단된다.

Figure 7은 0.2 μ m filter만을 통과하는 경우에서 폐액의 농도가 각각 (a)0.3g/L, (b)0.6g/L일 때의 flux를 나타낸 것이다. Figure 6(b)의 순수한 용매의

flux에 비교하여 초기 flux가 상당히 감소하였고 또한 시간에 따른 flux도 급격히 감소함을 보여준다. 이것은 여과 기간중 미립자가 여과공극사이에 끼여 Flux가 감소하는 것으로 사료된다. 폐액의 농도가 커질수록 flux 감소가 커지며, 여과가 진행되면서 감소하는 flux의 비율도 더 커짐을 볼 수 있다. 그러나 Figure 8에서와 같이 1.4 μ m filter를 pre-filter로 사용하여 여과한 경우, pre-filter가 없는 경우보다 flux도 약간 증가하며 여과시간에 따른 flux 감소 비율도 줄어 효과적인 flux를 지속하는 것을 알 수 있다. Figure 8(b)에서 400kPa과 500kPa에 대한 데이터가 없는 것은 pre-filter에 걸리는 압력이 너무 커 실험을 할 수 없었다. 그러나 실제 제염폐액의 농도

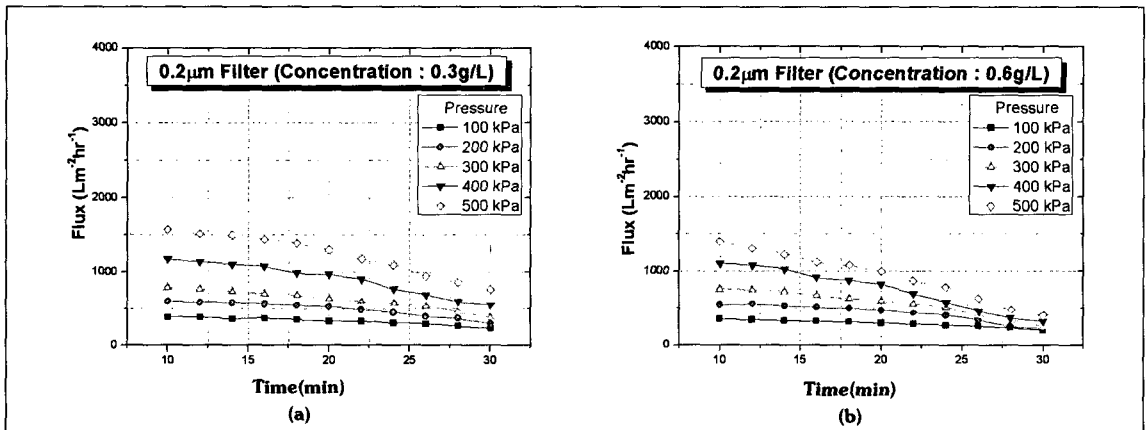


Figure 7. Changes of the permeate flux as a function of time under different pressure and concentrations for final-filter(0.2 μ m filter)

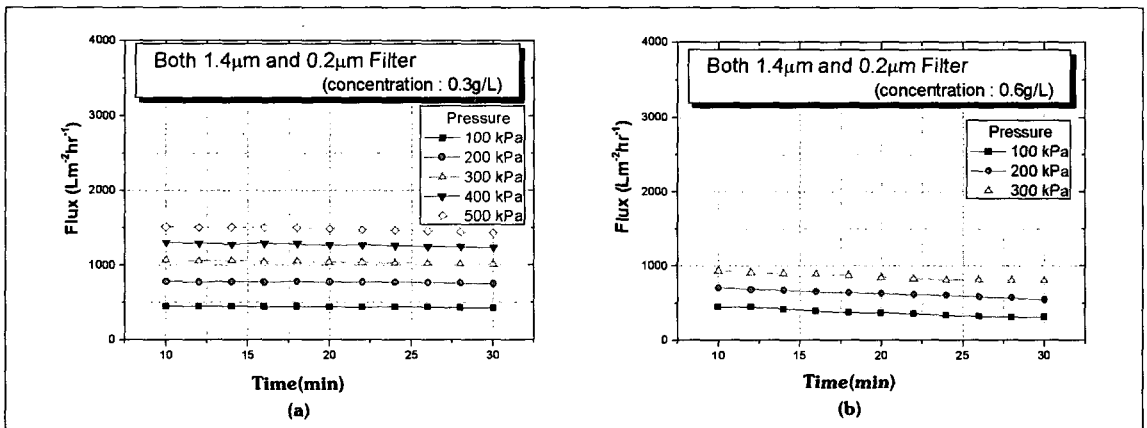


Figure 8. Changes of the permeate flux as a function of time under different pressure and concentrations for full path(1.4 μ m and 0.2 μ m filter)

는 0.3g/L 정도로 펌프에 무리가 갈 정도로 크지는 않았다. 이 여과장치의 모의 폐액 여과실험에서는 모두 99% 이상의 제거효율을 보였으며, 펌프의 높은 압력뿐만 아니라 하나의 filter에 걸리는 압력을 두개의 filter로 분산시킴으로서 보다 안정적인 flux를 얻을 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

IV. 결론

원자력 시설의 핫셀(Hot Cell) 내부표면에 부착된 고방사능분진을 PFC용액을 사용하여 제염 할 때, 제염 후 발생하는 이차폐기물의 양을 줄이고 고가의 PFC 제염 용액을 재활용하기 위해 실증규모 여과장치를 개발하였다. 핫셀 내의 오염입자를 전자 현미경으로 분석한 결과 입자 크기 분포가 0.2~10 μ m임을 알 수 있었다. 여과막 선정 실험결과 모의 입자 제거 효율 측면에서 PVDF, PP, 세라믹 막 모두가 전반적으로 우수했지만 원자력 핫셀내에서 α 방사능에 대한 안정성 실험 결과, PVDF와 PP막은 공극이 커지는 등의 변형으로 인해 불안정했지만 세라믹 막은 안정했다. 세라믹 막을 사용하여 개발한 PFC 여과장치는 핫셀 내부로 들어갈 수 있는 크기와 무게로 설계되었다. 또한 제거 효율과 flux를 향상시키기 위해 여과장치에 pre-filter(1.4 μ m)를 첨가했다. 실증규모 여과장치의 용매에 대한 Flux는 1,800~2,000 L/m²hr이다. 순수한 PFC용액의 Flux는 여과막의 공극크기에 크게 의존하여 공극이 작을수록 감소하며 또한 압력이 높을수록 보다 높은 Flux를 얻을 수 있었다. 제염폐액의 오염입자 농도가 증가하면 flux가 감소하게 되는데, 시간에 따라 그 감소 비율은 더욱 커진다. 그러나 pre-filter를 사용하여 두 개의 filter를 사용하게 되면 오랜 시간 초기 flux가 유지됨을 확인하였다. 오염입자의 농도가 0.3g/L이고 500kPa의 압력에서 그 flux는 약 1500 L/m²hr이다. 또한 개발된 PFC 여과장치는 분당 약 0.2L의 PFC 폐액을 처리할 수 있다.

Reference

[1] Archibald, K.E. : "CO₂ Pellet Blasting Literature

Search and Decontamination Scoping Tests Report" WINCO-1180 (1993)

- [2] Tatenuma, K., Hishinuma, Y. and Tomatsuri, S. : Newly Developed Decontamination Technology Based on Gaseous Reactions Coverting to Carbonyl and Fluoric Compounds, Nucl. Tech., Vol.124, pp.147-164 (1998)
- [3] Kaiser. R. and Harling. O. K. : Enhanced Removal of Radioactive Particles by Fluorocarbon Surfactant Solutions, NUREG/CR-6081 (1993)
- [4] Kaiser. R. and Benson. C. E. : Decontamination by Cleaning with by Fluorocarbon Surfactant Solutions, ORNL/ TM -12444 (1994)
- [5] Desrosiers, A. E. and Kaiser, R. : Separation and Extraction of Plutonium in Mixed Waste, Bartlett Services, Inc., Plymouth, MA, USA, DE-AC26-01NT41308 (2002)
- [6] Wang, P., Tan, K.L., Kang, E.T., and Neoh, K. G. : Plasma-induced Immobilization of Poly (ethylene glycol) onto Poly(vinylidene fluoride) Microporous Membrane, J. Membr. Sci. Vol. 195, pp. 103-114 (2002)
- [7] Brink, L.E.S., Elbers, S.J.G., Robbertsen, T., and Both, P. : The Anti-fouling Action of Polymers Preadsorbed on Ultrafiltration and Microfiltration Membranes, J. Membr. Sci. Vol. 76, pp.281-291 (1993)
- [8] Bai, R.B. and Leow, H.L. : Microfiltration of Polydispersed Suspension by a Membrane Screen-hollow Fiber Composite Module, Desalination Vol. 140, pp. 277-291 (2001)
- [9] Leow, H.L. and Bai, R.B. : Nylon Screen Incorporated into Hollow Fiber Microfiltration System for Wastewater Treatment, Water Sci. Technol. (Wat. Supply) Vol. 1, pp.131-146 (2001)
- [10] Bai, R.B. and Leow, H.L. : Modeling and Experimental Study of Microfiltration Using a Composite Module, J. Membr. Sci. Vol. 204,

pp.359-377 (2002)

- [11] Yamamoto, K., Hiasa, M., Mahmood, T., and Matsuo, T. : Direct Solid-liquid Separation Using Hollow Fiber Membrane in an Activated Sludge Aeration Tank, *Water Sci. Technol.* Vol. 21, pp. 43-54 (1989)
- [12] G.N. Kim, S.Y. LEE, H.J. Won, C.H. J, W.Z. Oh and J.H. Park : Membrane Characteristics for Removing Particulates in PFC Wastes, *J. Kor. Rad. Waste Soc*, Vol. 3(2), pp. 149-157 (2005)