

막분리 공정을 이용한 SIES 전처리설비 개념 설계

Conceptual Design of Pretreatment Process for SIES Using Membrane Process

이상진, 양호연, 신상운
한국수력원자력(주) 원자력환경기술원

요 약

고리 2호기 선택성 이온교환시스템(SIES)은 운영 과정에서 본 설비에 유입되는 방사성 폐액에 함유된 부유물질과 기름 성분들에 의해 선택성 이온교환설비의 활성탄과 이온교환수지가 쉽게 오염되어 이온 형태의 방사성 핵종과 부식성 입자성 방사성 핵종인 Ag-110m의 제거가 불가능한 문제점이 대두되었다. 본 연구에서는 SIES로 유입되는 수질을 개선하기 위한 실험을 수행하여 설계 기초 자료를 확보하였고, SIES 전처리 설비의 정밀여과분리막과 나노분리막에 대한 각각의 모듈 설계를 수행하였다.

Abstract

During operation process of SIES(Selective ion exchange system) at Kori Unit 2, it was impossible to remove radionuclides such as ion form and Ag-110m, etc., because activated carbon and ion exchange resin of this system are fouled easily by suspended solids and oils in liquid radwaste that was flowed in this system. In this study, an experiment to improve quality of water which was flowed in SIES was performed. and design data of Scale-up pretreatment process were secured. Also, each module design for Microfiltration and Nanofiltration unit of the pretreatment process for SIES was performed.

1. 서 론

국내 원자력발전소 고리 2호기에서는 액체 방사성 폐기물 처리시스템 운전과정에서 방사성 폐액에 함유된 부유물질과 기름성분들에 의해 선택성 이온교환설비의 활성탄과 이온교환수지가 쉽게 오염이 되는 등 운영상의 제반 문제가 대두되어, 선택성 이온교환설비의 정상적인 운전이 불가능하였을 뿐만 아니라 입자성 핵종인 Ag-110m의 제거가 불가능했기 때문에 보완 및 개선 방법이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 정밀여과분리막(MF)과 나노분리막(NF)을 조합한 실험실 규모 처리 장치와 고리 2호기 선택성 이온교환설비를 축소·모사한 소규모 선택성 이온교환장치를 제작하여 원전 운영중 발생된 방사성 폐액을 대상으로 현장실험을 수행하였다. 현장 실험을 통해 확보된 설계 입력 자료를 바탕으로 고리 2호기선택성 이온교환설비의 전처리 설비를 설계 및 제작하였다.

2. 본 론

2.1 고려 사항

본 연구에서 고려한 처리 대상 폐액은 표 1에 나타난 고리 1발 2호기에서 방사성 폐액을 수집해 놓은 WHT(Waste Holdup Tank)와 FDT(Floor Drain Tank)폐액이다. 처리 유량은 각 막 장치를 통과하여 얻고자하는 목표 유량으로 MF 장치는 2톤/hr으로, NF 장치는 1톤/hr이다.

표 1 대상 방사성 폐액의 수질

구 분	pH	탁도 (NTU)	SS (ppb)	총방사능($\mu\text{Ci}/\text{cc}$)
FDT	6.41	58.9	38,000	1.534E-03
WHT	5.98	42.6	23,100	2.499E-02

2.2 실험 및 결과[1, 2]

2.2.1 배열 결정 실험

FDT 폐액을 정밀여과분리막-나노분리막-소규모 선택성이온교환수지 공정으로 처리한 결과 탁도와 부유물질의 경우 정밀여과분리막에서 98.7%, 98.1 %, 나노분리막에서 93.5 %, 95.8%가 각각 제거되었으며, 정밀여과분리막 처리수를 나노분리막으로 처리한 결과 Ag-110m은 대부분 제거되었으며, 나노분리막 처리수를 소규모 선택성 이온교환장치로 처리한 결과 방사성 핵종을 모두 제거할 수 있어 나노분리막 처리수의 경우 선택성이온교환수지의 운전조건을 만족할 수 있었다.

정밀여과분리막-이온교환수지-나노분리막 공정으로 WHT 폐액을 처리한 경우 정밀여과분리막 처리수를 소규모 선택성 이온교환장치로 유입한 결과 처리수 0.06 m' 이상으로부터 방사성 핵종이 검출되었으며, 0.09 m'이상의 처리수부터는 Ag-110m이 검출되었다. 소규모 선택성 이온교환장치 처리수내 Ag-110m은 나노분리막에서 모두 제거가 가능하였으나, Co-58 등은 제거되지 못하는 결과를 얻어 선택성이온교환수지 후단에 나노분리막을 후처리 장치로 사용하는 것은 적절치 못한 것으로 판단된다.

상기 실험결과, 선택성 이온교환장치를 이용하여 방사성 폐액을 처리할 경우, 반드시 전처리 장치가 필요한 것으로 생각되며, 또한 나노분리막은 Ag-110m은 제거하는 반면, Co-58 등 핵종을 제거하지 못하고 있어 방사성 폐액의 처리 공정은 정밀여과분리막-나노분리막-이온교환수지라고 판단된다.

2.2.2 연속운전 결과

처리공정별 실험 결과를 근거로 정밀여과분리막-나노분리막-이온교환수지 공정으로 WHT 폐액을 연속 처리하였다. 각 장치별 처리수질과 시간대별 각장치의 특성을 각각 표 2에 나타내었다.

정밀여과분리막은 24시간 후에는약 3배의 차압이 상승하였으나, 처리유량은 약 25 %만이 감소하는 결과를 보였다. 정밀여과분리막은 대부분의 부유물질을 제거한 결과 처리수의 총유기탄소(TOC) 제거율이 75 % 이상으로 나타나 폐액의 총유기탄소는 대부분 입자성 물질에 기인하는 것으로 확인되었다. 정밀여과분리막 처리수를 나노분리막으로 공급한 결과 12 %의 회수율을 나타내었다. 실험기간 동안 처리수 중에 Ag-110m은 대부분 제거가 되었음을 확인하였다. 나노분리막 처리수를 이온교환수지 장치에 공급한 결과 대부분의 핵종의 제거가 이루어졌음을 확인하였다. 처리공정별 실험에서 FDT 폐액을 처리할 때 보다 핵종 농도가 높은 WHT 폐액을 처리하였음에도 핵종의 제거 효율은 우수하였다.

표 2 시간대별 각 장치 운전 특성

날짜 및 시간	MF 유량 (톤/시간)	MF 압력 (cmHg)	MF 총처리량(ℓ)	NF 압력 (kgf/cm ²)	NF 처리량(ℓ)	SIES 처리량(ℓ)	SIES 처리수 핵종
01.09 14:00	1	10	2,650	8	30		N/D
01.09 17:00	1	10	5,750	8	230		N/D
01.09 20:00	1	12	8,450	7.9	390		N/D
01.10 04:17	1	15	13,300	7.9	717		N/D
01.10 05:10	0.9	20	17,300	7.9	950		N/D
01.10 06:00	0.9	20	18,600	7.9	1,140	990	
01.10 09:00	0.8	22	21,000	8	1,260	1,170	
01.10 12:00	0.8	26	22,800	8	1,420	1,350	
01.10 13:15	0.7~0.8	30	23,700	가동중지	1,440	1,420	N/D 가동중지
01.10 14:00	0.7~0.8	30	23,900				

3. 개념 설계

3.1 MF 막 장치 모듈 설계

WHT 폐액을 대상으로 연속 운전 실험한 결과에 의하면 MF 모듈당 처리용량은 평균 24 m³/day이었고, 시간당 최하 처리 용량은 0.7 m³/hr이었다. 따라서 목표 MF 처리 유량이 2 m³/hr이므로 MF 모듈의 개수는 2.86[(2 m³/hr)/(0.7 m³/hr/모듈)]으로 약 3모듈로 2.1 m³/hr을 처리할 수 있는 유량이 된다. 그러나, 이러한 3 개의 모듈은 시간 가동율(가동시간)과 역세수의 소모에 의하여 목표 처리용량인 2 m³/hr를 확보할 수 없으므로 4개의 모듈(처리유량 2.8 m³/hr)을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 따라서, 막제조 회사에서 권고하는 표준 운전 모드에서 실제 가동 시간[55 min(0.92 hr)]을 고려한 MF 막 모듈당 처리 용량은 2.6 m³/hr(4모듈×0.7m³/hr/모듈×0.92hr/hr)이며, 표준 운전 모드에서 역세 시간에 대한 시간 당 모듈의 역세 유량은 0.0837 m³/hr(0.45 L/sec×m³/1,000L×60sec/min× 3.1 min/hr)이다[3]. 즉, 목표 처리 유량은 2 m³/hr이지만, 4 개의 MF 막모듈을 고려하면 실제 처리 유량은 2.5 m³/hr(2.6 m³/hr - 0.0837m³/hr)이 된다.

3.2 나노분리막 장치

3.2.1 나노분리막 장치 모듈 설계

나노분리막의 일반사항과 제작사에서 제공하는 표준운전 지침을 아래의 표 3에 나타내었으며, 이를 근거로 하여 나노분리막 모듈 소요개수를 처리 대상 용량 값에 대응하는 유량으로 도출하였다[4]. 막 제작사에서 제공하는 성능을 근거로 한 나노분리막 모듈 소요개수는 목표 처리 유량이 1 m³/hr이므로 표 3에 나타낸 NF 처리용량[2.6 m³/day(0.11 m³/hr)]을 기준으로 하면 약 10모듈[(1m³/hr)/(0.11 m³/hr/모듈)]로서, 나노분리막 제작사에서 제공되는 일반적 매뉴얼에 근거한 모듈 개수는 10개로 예측되었다. 이는 나노분리막 제작사에서 제공하는 매뉴얼에 의한 것으로 본 연구에서는 실제 현장 실험에서 도출된 결과인 표 2를 이용하여 분리막의 회수율 및 분리막 단위 면적당 플럭스를 구분하여 분리막의 소요개수를 도출하였다[표 4]. 표준운전지침과 실제 운전결과를 근거로 하여 예측한 분리막 소요개수는 약 1.7 배의 증가를 나타내었다. 이와 같은 결과는 표준운전과 달리 실제 실험에서 회수율이 낮게 나타난 결과이다. 설계에 반영되어질 실제실험 결과를 근거로 하여 NF 분리막 시스템의 효율적인 배치, 나노분리막 교체시 작업량 최소화, 유로의 간소화 및 처리용량의 안정성 등을 설계에 반영하고자 하였다. 따라서 나노분리막의 선정에 있어서 운영 및 성능 측면에서 동일하며, 분리막의 단위 처리능력이 큰 즉, 분리막의 면적이 높은 NF 90-4040을 선정하여 현장에 적용하고자 한다. NF 90-4040은 유효면적은 7.6 m²이며 처리용량은 6.4 m³/day인 제품이다. 또한 이 분리막으로 대상으로 실제 적용할 경우 회수율 및 플럭스의 차이를 극복할 수

있는 모의 테스트를 실시하였으며, 9 %의 회수율과 23.68 LMH(l/m²/hr)의 플럭스를 나타내었다. 표 4, 5에서 NF-90-2540 및 NF 90-4040의 적용수량을 예측하기 위한 계산 결과를 도시하였다. 또한 처리의 안정성을 확보하기 위하여 예측된 설계수량에 약 30%의 안전율을 적용하여 최종 나노분리막(NF 90-4040) 모듈의 소요개수는 8 모듈로 선정하였다.

표. 3 나노분리막의 사양 및 표준운전지침

Nano-filtration 일반사양	표준 운전 지침(설계지침/제조사 제공)
○ 모델 명 : NF 90 - 2540	○ 운전압력 : 15 kg/cm ² 이하
○ 형 태 : Spiral-Wound	○ 최대 허용 공급수 용량 : 1.2 m ³ /hr
○ 운전형태 : 가압식	○ 허용 탁도 범위 : 1 NTU 이하
○ Effective Area : 2.1 m ²	○ 투과수 대 농축수 비율 : 5 대 1
○ 처리용량 : 2.6 m ³ /day	○ 회수율 범위 : 15 % 이하
○ 운전압력 : 15 kg/cm ²	(평균 10 % 이내)
○ Dimension : 1,016 L(mm) × Φ 6.1(mm)	
○ Material : Polyamide Composite	
○ Bonding : Urethane & Epoxy resin	

3.2.2 나노분리막 배열 설계

분리막의 배열(Array)은 공급펌프, 투과수량 및 농축수 등을 고려하여 선정해야 하며, 설계에 근거하여 목표하는 회수율을 확보할 수 있는 배열을 선정해야 한다.

목표하는 투과수량 즉 회수율과 농축율을 최대로 하면서 안정된 수량을 확보할 수 있는 방안 그리고 공급펌프의 동력을 최소화 할 수 있는 배열을 선정함이 적절할 것이다. 따라서 본 설계에서는 안정된 회수율을 확보할 수 있는 병렬식과 농축율을 최대화하며 공급펌프의 동력을 절감 할 수 있는 직렬식을 조합하여 직·병렬식으로 선정하였다. 선정된 배열은 아래 그림 1과 같으며, 설계계산에서 선정되어진 8 개의 분리막을 4단 직렬과 2단 병렬로 하여 설계하였다. 본 배열에서 예상할 수 있는 것은 직렬배열에 따라 단수가 후단으로 갈수록 고농도의 농축수가 유입되어지므로 회수율은 감소하며 농축수량은 증가될 것으로 예상된다. 또한 처리수가 배출됨에 따라 공급펌프에서 보상하므로 극복할 수 있으며, 처리수 대 농축수의 비율을 회수율 범위 내에서 결정될 것이다.

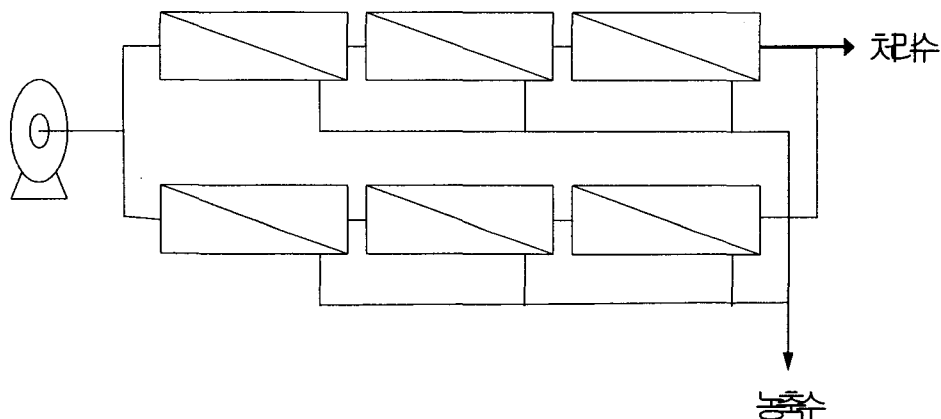


그림 1. NF 90-4040 배열

표 4. 회수율 및 플럭스에 따른 나노분리막(NF 90-2540) 모듈 소요개수

실험결과	<ul style="list-style-type: none"> - 공급유량(m³/hr) : 0.5 - 투과유량(m³/hr) : 0.06 - 회수율(%) : $(0.06/0.5) \times 100 = 12$
회수율에 따른 NF 모듈 개수	<ul style="list-style-type: none"> - 처리용량 : 1 m³/hr - 공급수 유량 : 1.2 m³/hr - 회수율 : 12 % - NF 모듈 처리용량 : 0.06 m³/hr $NF \text{ 모듈개수} = \frac{1 \text{ m}^3/\text{hr}}{0.06 \text{ m}^3/\text{hr}} = 16.67 \text{ 모듈} \approx 17 \text{ 모듈}$
플럭스에 의한 NF 모듈 개수	<ul style="list-style-type: none"> - 처리용량 : 1 m³/hr = 1,000 L/hr - 투과유량 : 0.06 m³/hr - 분리막 면적 : 2.1 m² - 플럭스 = $\frac{0.06 \text{ m}^3/\text{hr}}{2.1 \text{ m}^2} = 28.57 \text{ LMH}$ 요구분리막면적 = $\frac{1,000 \text{ L/hr}}{28.57 \text{ L/m}^2/\text{hr}} = 35 \text{ m}^2$ NF분리막개수 = $\frac{35 \text{ m}^2}{2.1 \text{ m}^2/\text{모듈}} = 16.67 \text{ 모듈} = 17 \text{ 모듈}$

표 5. 회수율 및 플럭스에 따른 나노분리막(NF 90-4040) 모듈 소요개수

회수율에 따른 NF 모듈 개수	<ul style="list-style-type: none"> - 처리용량 : 1 m³/hr - 공급수 유량 : 3 m³/hr - 회수율 : 9 % - NF 모듈 처리용량 : 0.18 m³/hr $NF \text{ 모듈개수} = \frac{1 \text{ m}^3/\text{hr}}{0.18 \text{ m}^3/\text{hr}} = 5.56 \text{ 모듈} \approx 6 \text{ 모듈}$
플럭스에 의한 NF 모듈 개수	<ul style="list-style-type: none"> - 처리용량 : 1 m³/hr = 1,000 L/hr - 투과유량 : 0.18 m³/hr - 분리막 면적 : 7.6 m² - 플럭스 = $\frac{0.18 \text{ m}^3/\text{hr}}{7.6 \text{ m}^2} = 23.68 \text{ LMH}$ 요구분리막면적 = $\frac{1,000 \text{ L/hr}}{23.68 \text{ L/m}^2/\text{hr}} = 42 \text{ m}^2$ NF분리막개수 = $\frac{42 \text{ m}^2}{7.6 \text{ m}^2/\text{모듈}} = 5.53 \text{ 모듈} \approx 6 \text{ 모듈}$

4. 결 론

고리 1발 2호기에서 발생된 방사성 폐액에 정밀여과분리막과 나노여과막을 조합한 공정을 적용한 실험을 수행한 결과, 선택성 이온교환설비에 여과막을 적용할 경우 공정 배열은 정밀여과분리막-나노분리막-선택성이온교환설비의 순서가 가장 최적 배열임을 확인하였다.

연속 운전 실험을 통해 얻어진 데이터를 이용하여 정밀여과분리막과 나노분리막의 모듈에 대한 개념 설계를 수행하여 각각 정밀여과분리막은 4개 모듈, 나노분리막은 8개의 모듈을 도출하였다. 이러한 결과는 막분리 공정을 이용한 SIES 전처리 설비 설계 및 제작에 활용될 것이다.

5. 참 고 문 헌

- [1] 신상운외, 액체방사성폐기물 처리계통 선택성 이온교환설비(SIES) 개선, 한국수력원자력(주), 원자력환경기술원, 기술보고서, 2003-환경-단15(2003).
- [2] 이상진외, 이온교환 보완 공정으로서의 막분리 공정의 적용, 2003년 춘계 대한방사선 방어학회 논문집, pp. 149-153, 2003.04.25. 원자력의학원.
- [3] (주) 이엔이 SuperMak 고인장강도 침지형 중공사 분리막.
- [4] <http://www.dow.com/liquidseps/pc/jump/filmtec/nf904040.htm>