# 컨테이너형 이동식 농축폐액 증발건조 기술개발 및 실증

**조항래***, 이지훈, 김천우
한수원㈜ 중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70
*hrcho6795@khnp.co.kr

## 1. 서론

원자력발전소 운영 중 비정상 상황에서 발생할 수 있는 방사성폐액을 처리하기 위한 이동식 액체방사성폐기물 처리기술을 개발하였다. 침지식 중공사 한외여과막과 고압역삼투막을 전처리 공정과 주처리 공정으로 각각 채택하였다. 이러한 막분리 공정에서 주로 발생하는 농축폐액을 대폭 감용하고 고화시켜 안전하게 저장 또는 처분하기 위해 이동식 농축폐액 증발건조기술도 함께 개발 하였다[1]. 증발과 건조 기술은 원전을 포함한 일반 산업계에 널리 이용되고 있는 기술이지만, 제한된 공간과 유틸리티를 이용하여 이동성과 다양한 운영환경에 적용성이 용이하도록 컨테이너 탑재 형태로 개발된 이동식 증발건조기는 국·내외적으로 찾아보기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 요소기술 분석, 다양한 실험과 시행착오 및 아이디어 창안을 통하여 개발된 이동식 농축폐액 증발건조기술의 주요 특징을 소개하고, 파일럿 설비를 이용한 실증 운전 결과에 대해 논하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 기술의 주요 특징

2.1.1 증발과 건조의 가열방식 이원화

증발건조기의 주요기능은 주어진 열원을 이용하여 농축폐액을 증발시켜 감용 처리하고 증발잔류물을 적절한 고화상태까지 건조하는 것이다. 이를 위해서는 증발과정에서 내부 농축액의 유동을 활발하게 하여 농축도가 증가해도 캐리오버나 돌비현상 없이 안정적인 운전이 가능하도록 하고, 이동식 설비로서 제한된 열원의 열전달 효율을 극대화함으로써 처리용량을 최대화하는 것이 중요하다. 따라서 Fig. 1과 같이 증발 운전에는 가열물질에 직접 열을 전달하는 투입식 전기히터를 이용한 강제 순환식 가열방식을 적용하여 안정성과 효율성을 높이고, 건조운전에는 증발건조용기의 하부와 바닥에 밴드히터를 적용하여 증발잔류물의 건조가 용이하도록 하였다[2].

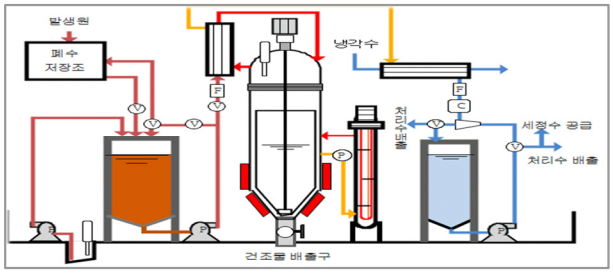


Fig. 1. Schematic Diagram of Mobile Evaporation & Dryer.

2.1.2 내면 밀착형 교반 및 교반부하 연속측정

증발운전 시에는 강제순환에 의한 유동이 활발하므로 교반이 필요 없다. 반면에 건조운전 시에는 하부와 바닥의 밴드히터가 200℃ 이상의 고온으로 용기 외부를 가열하므로 용기 내면의 고열부위에 증발잔류물이 고착되어 열전달 효율이 저하될 수 있다.따라서 Fig. 2의 (a)와 같이 측면과 바닥에 비고정식 스크래퍼가 밀착되는 특수 교반장치를 고안하여 적용하였다. 또한 건조잔류물의 점성 변화를 관찰하여 건조완료 시점을 인지하기 위해 Fig. 2의 (b)와 같이 교반부하를 연속적으로 측정하는 토크측정기를 설치하였다.

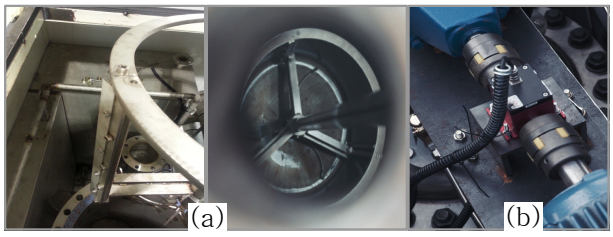


Fig. 2. View of Special Scrapper(a) and Torque Meter(b).

2.1.3 저진공 감압 증발 및 건조

증발건조기는 저진공 감압운전이 가능하도록 설계하였다. 컨테이너형 이동식 증발건조기는 열원과 공간이 매우 제한적이므로 열효율을 높이면서 증발건조용기를 포함한 주요 기기를 콤팩트하고 경량으로 구성하며 유지보수가 용이해야 한다. 따라서 70~80℃에서 증발이 일어나는 저진공(300~400 torr) 감압운전 방식을 채택함으로써 열효율을 높이면서 재질의 부식과 건조물의 탄화를 억제할 수 있도록 하였다. 처리대상 농축폐액이 산성(pH 4~5) 또는 알칼리성(pH 9~10)이 될 수 있으므로 운전온도는

가능한 한 낮게 유지하는 것이 재질의 부식관리 측면에서 유리하다.

2.1.4 공랭식 냉각기 및 공기정화기

이동식 증발건조기는 열원과 더불어 증기를 응축시킬 수 있는 냉각수 공급 기능과 컨테이너 내부의 밀폐된 공간에서 발생되는 공기의 환기 및 정화 기능이 중요하다. Fig. 3과 같이 컨테이너의 한 쪽에 냉각기실과 공기정화기실을 갖추고, 공랭식 냉각기와 정화기의 냉각과 환기에 필요한 공기가 원활하게 순환되게 하였다. 개폐가 용이한 루버(Louver)를 적용하여 운전 시에는 최대한 열고 장기 보관 시에는 완전히 닫아 설비의 보호가 용이하다. 공기정화기에는 송풍기와 프리필터, HEPA필터 및 활성탄필터를 구비하여 오염 가능성이 높은 내부 공기를 연속적으로 배출함으로써 컨테이너 내부가 항상 부압 상태를 유지하도록 하였다.

Fig. 3. General view of Pilot Mobile Evaporation & Dryer.

## 2.2 실증운전 결과 및 고찰

해수와 계통수 모의 폐액을 이용한 폐액 처리설비의 실증운전에서 발생된 농축폐액 중 종류별로 각각 약 3톤을 이용하여 실증운전을 수행하였다.

2.2.1 증발처리 용량 및 제염성능

모의 농축폐액을 증발처리한 결과 처리용량은 1.6~1.7 L/min(96~102 L/hr) 수준으로 설계치(100 L/hr)를 만족시켰다. 증발운전 중 캐리오버나 돌비현상이 발생하지 않아 응축수의 전도도가 20 μS/cm 이하로 유지되었다. 건조운전 시에는 강제순환식 가열기 운전이 중지되어 하부와 바닥의 밴드히터 열원에만 의존하고 고형물이 차지하는 비중이 증가하면서 응축수 발생량이 증발운전 대비 약 1/10 수준으로 낮아졌으며 건조운전에 약 24 시간이 소요되었다. 전도도는 증발운전 대비 소폭 증가하였으나 30 μS/cm 이하로 유지되었다. 주요 핵종(Cs, Sr, Co, I)에 대한 제염계수는 각각 2.6E+04, 2.1E+05, 6.0E+05, ∞로 정화율이 매우 높은 것으로 나타났다. 응축수는 환경으로 방출하지 않고, 역삼투(RO)공정으로 회수하여 처리하거나 자체 세정수로 재이용한다.

2.2.2 건조완료 시점 인지 및 건조잔류물 배출

증발잔류물의 건조완료 시점을 정확하게 인지하는 것은 건조물의 배출과 고화 관점에서 매우 중요하다. 인산염과 붕산염 및 탄산염 등의 건조잔류물은 용해도가 낮아 약 80℃의 건조온도에서는 묽은 반죽 형태를 유지하지만 내부에서 과도하게 건조되거나 배출 후 상온으로 냉각되면 수화물 형태로 고화된다. 따라서 건조완료 시점을 인지하지 못하면 내부에서 고화되어 교반 및 배출이 불가능하게 된다. Fig. 4의 (a)와 같이 교반기 토크 추이를 주요변수로 관찰하고, 보조적으로 Fig. 4의 (b)와 같이 밴드히터 온도변화를 관찰하여 건조완료 시점을 인지할 수 있었다. 건조온도에서 배출한 건조잔류물은 배출 후 냉각되면서 Fig. 4의 (c)와 같이 수화물 형태로 고화되었다.

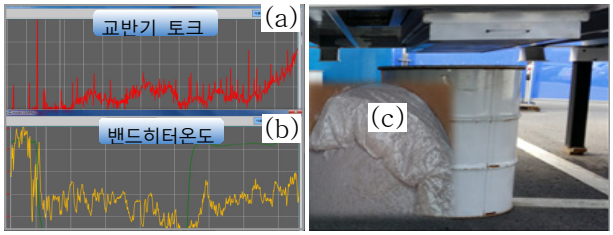


Fig. 4. Parameters Trend during Drying & View of Residue Discharged.

## 3. 결론

원전의 비정상적인 상황에서 발생할 수 있는 방사성 폐액을 효과적으로 처리하기 위한 이동식 액체방사성 폐기물 처리 기술개발의 일환으로 개발된 컨테이너형 이동식 농축폐액 증발건조기술을 평가하고 실증운전 결과를 분석하였다. 증발과 건조의 가열방식 이원화, 내면 밀착식 특수교반 및 토크 측정, 저진공 감압운전, 공랭식 냉각과 공기정화 기능들이 적절한 성능을 발휘하였다. 또한 처리용량과 성능이 설계치를 만족하고, 건조완료 시점의 적절한 인지와 최종 건조물의 배출 및 고화가 적절하게 이루어지는 것을 확인하였다. 실증운전 과정에서 개선 또는 보완이 필요한 사항들이 도출되었으나, 엔지니어링 단계에서 쉽게 극복될 수 있을 것으로 보인다.

## 4. 참고문헌

[1] 한수원㈜ 중앙연구원, "모듈형 이동식 액체방사성 폐기물처리기술 개발 최종보고서", 2016.

[2] 한국방사성폐기물학회, 추계학술발표회 포스터 P0379, 2015.