

가압경수로원전(PWR)의 증기발생기 취출수탈염기(SGBD) 운전현황 및 최적 운전방법 도출

The Operation Experience of SG Blowdown Demineralizers System in Korea's NPP
and The Best Operating Method in PWR

성기방, 홍영완, 이의중, 장영진

한국전력공사
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

원자력발전소의 증기발생기 취출계통은 급수계통 및 복수탈염계통에 포함된 불순물이 증기발생기 내에서 농축되므로 이 불순물을 제거하고, 10 CFR 20의 규정에 따라 환경으로의 방사성물질의 방출을 방지하거나 최소화하며, 10 CFR 50의 부록 I의 ALARA 기준을 따르는데 있다. 현재 국내 원전의 증기발생기 취출수 탈염계통 운전은 동일 목적을 수행함에도 불구하고 운전방식은 탈염기 용량, 배열방식, 수지혼합비등에서 많은 차이점이 있다. 그러나 다양한 운전 방법중에서 가장 뛰어난 운전방식이 있을 것이고 이를 위해 현재 운전중인 원전의 2대 설치된 취출수 탈염기를 모델로 하여 최적 운전방법을 도출하고자 하였다. 탈염기가 2대 설치된 경우, 취출수 탈염기의 운전법은 취출수의 불순물 이온부하에 따라 각 탈염기에 이온교환수지 배합비를 결정하며, 직렬 배열로 연결한후 사용중이던 수지탑을 전단에 배치하고 새수지가 충전된 탈염기는 후단에 배치하므로써 탈염기를 오래 가동(수지소모량 감소)할 수있고, 증기발생기의 세관누설시 방사성물질이 환경으로 방출될 수 있는 확률이 가장 적은 것으로 나타났다.

Abstract

The steam generator blowdown system(SGBDS)'s are installed to remove the concentrated impurities that are entered with the feedwater or the condensate polishing demineralizer's leakages, to minimize the effluent of radioactive materials in case of the SG's tube rupture and to maintain the level of ALARA's guideline in the 10CFR50 App.I. In Korea's NPPs, the SGBDS's design structure and operating procedures are various types although the installing purposes are same. The different designs are the each vessel volume, in series or not, and the resins(cation/anion) mixing ratio, etc. By the analysis results, the best method is the resins mixing ratio is determined by the impurities ratio and the new resin vessel is located after the other vessel to increase the chemical or radioactive material's decontamination factor.

1. 서론

가압경수로의 원자력발전소 증기발생기(재순환형)는 터빈-발전기를 회전시키기 위한 증기를 생산하는데, 증기발생기로 유입되는 급수중에는 다양한 불순물들이 포함되어 있다. 유입된 불순물은 증기발생기 하부에 침적되거나 세관틈새에 농축되어 많은 부식문제를 야기하므로 제거해야 한다. 증기발생기의 부식문제를 줄이기 위한 방법으로는 화학제를 첨가하여 수화학환경을 좋게 하거나, 급수 또는 복수로 공급되는 냉각수중의 불순물을 가능한 낮게유지하기 위해 복수탈염설비를 설치하여 운영하기도 한다. 그러나 아무리 작은 불순물이라도 비휘발성 물질이라면 증기발생기내에서 계속 농축될 것이다.

이런 불순물들을 제거하기 위해 증기발생기 하부에는 농축된 불순물과 슬러지를 계속적으로 배출하기 위한 취출수 계통(Steam Generator Blowdown System)이 구성되어 있다. 이전의 취출수 계통은 증기발생기 수질을 관리하고자 하는 목표값에 만족할만한 수준으로 유지하기 위하여 급수의 0.5 ~1 %유량으로 빼내는 수준(설비개선이전의 고리 1호기와 월성 1~4호기)이었다.

그러나, 대기중으로 버리는 취출수 배출수량과 열량이 적지않고, 증기발생기 세관의 누설시 환경으로 방출되는 방사성물질(기체방사성물질은 고려하지 않음)의 누출가능성을 낮추고, 취출수 기화현상 때문에 원전에서 항상 하얀 증기가 피어나는 이미지를 개선을 위해 증기발생기 취출수계통은 설치되었다. 불순물이 농축된 취출수중에는 불순물이 급수보다 수백배 높기 때문에 급수로 사용하기 위해서는 수질정화장치인 취출수 탈염기를 설치하였지만 증기발생기와 2차계통 전체의 수화학환경 개선을 위해 주입된 암모니아같은 높은 농도의 pH조절제 때문에 탈염기의 효율적 운전에 많은 지장을 받고 있다.

취출수 탈염기의 효과적인 운전을 위해서는 수지교체기준 개선 즉, 예를 들면 취출수 탈염기에서 불순물로 포화되는 것이 문제이지, pH 조절제인 암모니아로 포화된 것은 문제될 것이 없으므로 수지교체기준을 재설정할 수도 있을 것이다. 그러나 이번 검토에서는 국내원전에서 운전중인 방식을 상호간에 비교한 후 주어진 조건, 즉, 수지규격, 수질기준, 설계된 탈염기연결 배관 등을 종합한후 가장 합리적인 운전방법을 도출하고자 하였다.

2. 증기발생기 취출수 탈염기 계통

가. 영광 3,4,5,6 울진3,4,5,6)의 SGBD 기능 및 설계기준 (혼상 IX 1대+ Stdbby 1대)

증기발생기 취출수 탈염계통은 급수계통의 화학약품 주입설비 및 복수탈염설비와 연계하여 급수의 화학적 성분을 조절하고, 불순물을 제거하는데 사용된다. 수화학 측면의 설계고려에서는 취출수(배출수)의 화학적 순도를 2차계통 수질제한치 이내로 유지할 수 있도록 설계하며, 증기발생기 2차측 수질요건을 유지하기 위해서 발전소 정상운전중에 각각의 증기발생기로부터 연속취출운전을 한다. 복수기 누수 사고시에는 취출유량을 증대시켜 2차측 급수내에 용해된 나트륨의 농도를 감소시킨다. 또한 방사성물질의 환경방출 억제 측면에서는 설계기준 핵연료 손상과 동시에 증기발생기의 1차측에서 2차측으로의 설계기준 전열관 파단누설이 발생했을 때 증기발생기 2차측 용수의 방사선 준위 90%를 낮출수 있도록(즉, 제염계수 10 이상) 설계한다. Combustion Engineering 사 설계를 참조한 한국형 원전과 Westinghouse 사에서 설계한 국내 원전의 취출수 탈염기에서 가장 큰 차이점은 CE 형에는 2대인 탈염기가운데 1대를 운영하며 나머지 1대는 대기상태로 활용한다. 그리고 1차측으로부터 2차측으로의 전열관 파단누설 사고시, 손상이 안된 증기발생기는 정상운전범주로 취출량을 유지하며, 반면에 손상된 증기발생기는 2차측 방사능 준위를

운영기술지침서 제한치 이하로 유지하기 위해 취출량이 증가되도록 설계된다. 취출량을 증대시켜 물리적으로 증기발생기 관관에 축적된 찌꺼기를 제거하도록 주기적인 고유량취출운전도 가능하다. 발전소 정지중에는 증기발생기 습식 및 건식 휴관시(Layup) 증기발생기의 재순환, 정화, 배수, 재충전, 질소공급, 화학첨가제 추가 및 혼합 등을 할수 있게 설계되었다.

< 표 1 > 대표적인 복수탈염계통(+취출수탈염수) 수화학 설계기준

수질 항목	Na	Cl	SiO ₂	Cation Cond.	Fe	S.S	pH	SO ₄
단위	ppb	ppb	ppb	μs/cm	ppb	ppb	-	ppb
제한치	≤ 1.0	≤ 0.15	≤ 1.0	≤ 0.1	≤ 1.0	≤ 1.0	6.8-7.2	≤ 0.2

< 표 2 > 증기발생기 2차 계통수에 대한 운전중 화학조건 제한치

수질 항목	Na	Cl	SiO ₂	Cation Cond.	pH	SO ₄	
단위	ppb	ppb	ppb	μs/cm	-	ppb	
정상 제한치	≤ 20	≤ 20	<300	≤ 0.8	≥ 9.0	≤ 20	
조치 준위	1	> 20	> 20	--	> 0.8	< 9.0	> 20
	2	>100	>100	--	> 2	--	>100
	3	--	--	--	> 7	--	

나. 고리 1,2,3,4 및 영광 1,2호기의 SGBD 기능 및 설계기준 (혼상 IX + 혼상 1대)

Westinghouse 사에서 설계한 국내원전의 증기발생기 취출수탈염기 설계는 CE형과 같이 취출량을 증대시켜 물리적으로 증기발생기 관관에 축적된 찌꺼기를 제거하도록 주기적인 고유량취출운전도 가능하고, 발전소 정지중에는 증기발생기 습식 및 건식 휴관시(Layup) 증기발생기의 재순환, 정화, 배수, 재충전, 질소공급, 화학첨가제 추가 및 혼합 등을 할수 있게 설계되었다. CE형과 달리 증기발생기 취출수 탈염기 설계는 몇가지 측면에서 차이가 난다. 수질정화와 방사성물질의 환경 방출을 최대한 억제하도록 설치하기 위해 설치된 탈염기는 CE형과 2대로 동일하지만 수지 교체 기간을 제외하고는 탈염기 2대를 직렬로 상시 운전한다. 이러한 탈염기 운전방식은 1대의 탈염기에서 불순물을 제거하는 능력이 동일할 때 2대를 연속 통과함으로써 매우 제거효율이 증가하게 된다. 이런 방식의 운전법에서는 취출수중의 화학제 농도를 고려하지 않으면, 서론에서 언급한 것처럼 2차계통 수질관리를 위해 주입되는 암모니아같은 아민류 화학제로 인해 수지의 교체주기가 짧아진다. 그러나 이러한 문제점은 취출수중의 불순물 강도를 분석한 다음, 양이온수지와 음이온수지의 배합비를 조절함으로써 해결이 가능한데도 혼상탈염기내에 충전하여야 하는 수지는 항상 1:1의 혼합비여야 한다는 그릇된 고정관념 때문에, 언제부터인가 1대의 탈염기를 양이온탈염기로 바꾸어 운전함으로써 기존의 효율높은 직렬운전방식의 장점을 살리지 못한다고 본다. 이러한 제 3의 방식은 다음절에서 살펴보았다.

다. 울진 1,2 및 SYS 80+ 형의 SGBD 기능 및 설계기준 (양이온IX +혼상 IX)

2대의 탈염기가 연속운전이 가능하게 설계되어, WH설계와 동일하지만 앞쪽에 위치하는 탈염기에다 혼상탈염기대신 양이온수지만을 채운 양이온탈염기로 일부 변형한 것이 다르다. 이러한 설계에서도 취출수 탈염기가 설치된 사명을 완수하기 위해 복수기의 해수누설로 인한 비휘발성물

질의 제거 또는 증기발생기 세관누설로 인한 방사성물질을 제거하여 증기발생기내의 부식을 방지하고 환경으로 방출되는 방사성물질을 제거하는 기능을 수행한다. 그러나, 운전효과는 다르게 나타난다.

라. 규제관련 증기발생기 취출계통 설계기준

원자력발전소를 운영하고 설계하는데 있어서 법규 등과 같은 행정기관 또는 규제기관의 지침을 따라야 한다. 그래야 제시되는 증기발생기 탈염기계통의 운전 개선안도 규제기준을 만족하여야 타당한 주장이 될 것이다. 증기발생기 취출수 탈염기에 관한 법제화된 국내 기준은 없지만, 한국원자력안전기술원에서 원전 운영자가 건설과 운영허가 심사시 기준인 심사지침서에 기술된 SGBD 설계허용을 위한 검토내용들은 다음과 같다.

○ 증기발생기 이차측으로부터 입자화되고 용존된 불순물의 제거능력에 대한 설계근거를 검토하여 예상운전과도(주북수기 내부누수 및 일차측에서 이차측으로의 누설)를 포함한 정상운전중 증기발생기의 이차측에 최적의 수질화학 조건을 유지할 수 있는가 하는 점이다.

○ SG 세관 손상시 일차측으로부터 이차측으로 누설된 방사능 물질이 탈염기에서 포집되므로 이러한 경우에 필요한 방사성 폐기물 분야의 액체, 기체 및 고체폐기물처리에 관한 검토와 액체 및 기체 공정 그리고 유출물의 방사능 감시분야 지침에 따라 검토된다.

○ 설계허용 기준으로서 증기발생기 전열관들은 원자로냉각내 압력경계의 일부분이며, 이차측의 역화학적 조건에 의해 품질이 저하될 수 있다. 취출계통의 일차적인 기능은 증기발생기 이차측의 불순물을 제거하기 위한 것이므로 증기발생기 이차측에 허용가능한 수질을 유지하도록 설계되어야 한다. 동 요건을 만족시키는데 필요한 세부기준으로서 첫째, 예상운전과도를 포함하여 정상운전 기간동안 이차냉각수의 화학조건을 유지하기 위하여 필요한 설계 취출유량을 수용할 수 있는 용량이어야 하고, 열에 민감한 공정(수지의 열화방지를 위해)에 대한 온도제한치를 초과하지 않는 용량을 규정하고 있다.

○ 특히 검토분야에서는 증기발생기 취출계통 설계가 정상운전 및 예상운전과도(예를 들면 주북수기 내부누수 혹은 일차측에서 이차측으로의 누설)의 영향을 반영하고 있는지 결정하기 위하여 압력, 온도, 유량, 2차 냉각수의 화학조건 등이 검토된다. 또한 설계변수들이 적합성이 검토되고, 만약 제안된 계통이 열에 민감한 물질(예를 들면, 탈염, 역삼투)이 있는 공정을 포함한다면, 설계가 온도에 민감한 요소들을 보호하기 위한 계측제어를 포함하고 있는지 확인한다. 적절한 기기를 이용하여 예상된 방사능 준위로 제염, 액체수위 및 계통유량을 제어할 수 있는 계측 및 공정제어 계통이 설치되어 있는지의 여부이다.

그러므로 위 조건이 만족되게 설계하고 운전할수 있는 운전법이 있다면 실제 적용하는데 전혀 무리가 없을 것이다.

3. 국내 원전 탈염기 운전 현황

가. 영광 3,4,5,6 울진3,4,5,6 증기발생기 취출탈염기 : 혼상탈염기 1대

설계기준에서 언급한 바와 같이 동일한 기능으로 설계된 2대의 탈염기가 설치되어있다. 각각의 용량은 150ft³ 이며, 취출수중의 양이온과 음이온의 부하(Load)를 고려하여 양이온수지와 음이온 수지비가 3 : 1 로 배합되어 있다. 정상운전중에는 1대가 서비스되며, 수지교체기준 도달시에는

대기중인 나머지 1대가 즉시 서비스되고 운전중이던 탈염기는 수지교체 절차를 거친후 대기상태로 유지된다. 그러나, 이러한 탈염기 운전방식은 탈염기의 이온교환반응시 고유특성 즉, 이온교환반응시 파과곡선(Breakthrough Curve) 특성 때문에 수지의 교환능력이 남아있어도 조기에 교체해야 하는 단점이 있다. 탈염기 특성중 파과곡선은 정격교환용량의 70% 정도에서 나타나는 것으로 알려졌기 때문에 수지의 30% 정도는 이용하지 못한다고 볼수 있다.

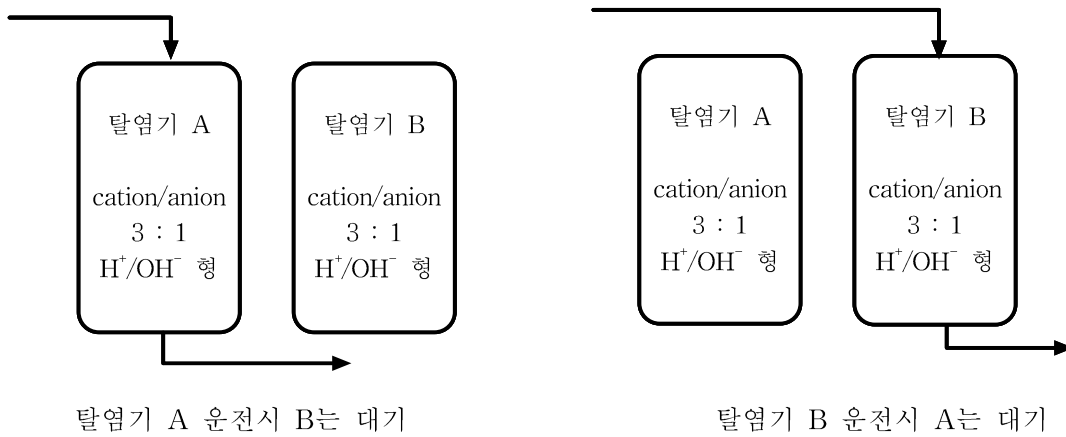


그림 1. CE형 원전의 SGBD탈염기 배열 및 수지충전 사양

나. 고리 1,2,3,4 및 영광 1,2호기 증기발생기 취출탈염기

동일한 기능의 탈염기가 2대 설치되어있고, 탈염기 용량은 90ft³ 로 CE형보다 작다. 다만 탈염기를 직렬로 배열할 수 있어서 탈염기 배열시 유로변경이 약간 복잡하게 보이지만 수지교체시에 수행하는 복잡한 밸브 정렬작업보다는 간단하다. 탈염기에 주입되는 수지 사양은 혼상수지이며, 취출수의 이온부하에 적응하는 수지배합을 할 수 있지만, 예전부터 수지배합을 1 대 1로 혼합된 이온교환수지를 사용하여왔다. 그러다가 일정기간동안 울진 1,2호기의 증기발생기 탈염기 운전 방식과 동일한 방식인 탈염기 1대를 양이온수지만 충전하여 사용하고 후단의 탈염기는 혼상탈염기로 이용하던중 당초 설계내용과 다르므로, 방사능 물질방출 영향에 대한 재검토요청에 따라 일단 원래 운영하던 방식인 직렬연결의 혼상탈염기 방식으로 회귀한 상황이다.

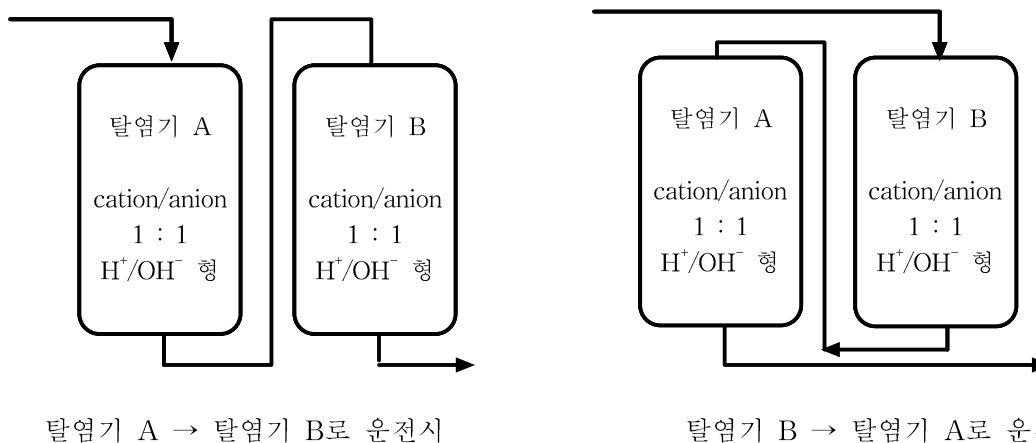


그림 2. WH형 원전의 SGBD탈염기 배열 및 수지충전 사양

위와 같은 탈염방식은 여러 가지면에서 좋은점이 많다. 탈염기 1대를 운영할때보다 이론적으로 탈염기의 교환반응이 일어나는 높이가 2배로 늘어나서 제염계수가 매우 크게 된다. 간단히 설명하자면 일반적으로 양이온 탈염기의 제염계수가 10이상이므로 불순물이나 방사성물질의 방출이 10분의 1로 줄어들게 된다. 또한 탈염기 1 대 운전일 경우 Breakthrough Curve 특성 때문에 수지의 낭비가 30% 정도 일어나지만 2대를 직렬로 연결할 경우에는 배출되는 수지중에는 미사용된 수지가 거의 없게 된다. 또한 항상 새로 충전된 탈염기가 후단에 위치되도록 배열이 가능함으로서 먼저 사용중이던 탈염기에서 Breakthrough 되는 불순물과 이물질의 여과기 역할도 겸할수 있게 되므로 제거효율이 매우 좋게 된다. 그러나 현재 국내 원전에서는 탈염기 B → 탈염기 A 로의 유로 형성이 가능함에도 불구하고 탈염기 A → 탈염기 B 로의 유로로만 운전함으로서 탈염기의 직렬운전의 좋은 효과를 발휘하지 못하고 있는 실정이다. 즉, 이러한 운전법으로는 대부분 탈염기 A만 자주 포화되기 때문에 탈염기 A만 주로 교체하게 될 것이다.

다. 울진 1,2호기, System 80+ 및 KNGR의 증기발생기 취출탈염기

울진 1,2호기에서 운영중이며, System 80+에서 설계에 반영된 양이온 탈염기 → 혼상탈염기 방식은 앞에서 설명한 혼상탈염기 2대를 직렬로 연결하여 운전하는 방식을 변형한 것이다. 이러한 방식을 선택하게 된 것은 2차계통의 첨가약품인 암모니아 때문에 양이온수지가 빨리 포화되고 상대적으로 음이온 불순물농도가 매우 낮으므로 대부분의 음이온수지는 사용되지도 않은 상태로 배출된다고 판단하여 변경하게 것이다. 그러나 이러한 운전방식은 불합리한 점이 매우 많다. 첫째, 양이온탈염기는 음이온들을 제거하지 못하기 때문에 불순물중의 염소이온, 황상이온 등의 부식을 유발하는 화학종 제거능력이 이론적으로 10배 이상 떨어진다. 그리고, 증기발생기 누설시에 냉각재중의 대표적인 음이온성 방사성물질인 요오드핵종의 제거능력도 화학종과 같은 비율로 떨어진다. 그리고, 양이온수지를 교체하는 기간(약 수일간)에는 탈염기가 1대만 운전되는 상황이며, 반대로 혼상탈염기가 포화되어 교체중일 때는 음이온성 불순물은 전혀 제거하지 못하게 된다. 만약 이 기간중 증기발생기 세관의 손상이 발생한다면, 취출수 탈염기에서 요오드 같은 음이온성 핵종의 제거는 불가능하게 될것이다. 그러므로 이러한 운전방법이 가장 최선의 방법이 아님이 확실하다. 그러나 이러한 문제점들은 쉽게 해결될수 있는 것들이며 다음절의 최적 운전방안에서 다루고자 한다.

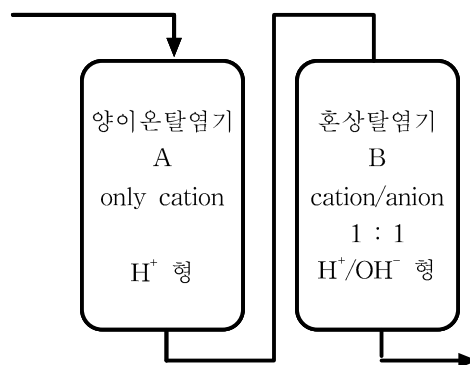


그림 3. 울진 1,2호기 및 System80+형 원전의 SGBD탈염기 배열 및 수지충전 사양

4. 증기발생기 수질 부하 분석

가. 취출수중 화학물질 농도분석

먼저 증기발생기의 탈염기에 부담을 주는 취출수중의 화학제 또는 불순물의 농도와 비중을 살펴보면 고리 1호기의 운전중 수질농도는 다음의 표 3과 같다.

< 표 3 > 고리 1호기 운전중 수질농도(1999. 2월 기준)

이온종 계통	양이온				음이온	
	ETA(ppm)	NH ₃ (ppb)	N ₂ H ₄ (ppb)	Na(ppb)	Cl(ppb)	SO ₄ (ppb)
S/G-A	4.50	196	200	0.50	0.60	3.0
S/G-B	3.50	227	200	0.40	0.50	2.5
AVG.	4.0	211.5	200	0.45	0.55	2.75

- 증기발생기 배출수량 : A, B 합계 30m³/hr

나. SG내 비휘발성 물질의 물질 수지식

위 표의 항목중에서 복수탈염기에서 제거되지 않은 Na와 Cl 및 SO₄같은 다양한 불순물들은 급수와 함께 증기발생기로 유입된다. 유입된 불순물 농도로부터 복수탈염설비의 불순물 유출농도를 유추해 볼수도 있다. 용해성 불순물들은 물에만 균질 상태로 녹아 있기 때문에 수지식을 다음과 같이 수립할 수 있다.

$$C_{BD}W_{BD} = C_{FW}W_{FW}$$

양변을 취출유량인 W_{BD} 로 나누면 다음 등식을 얻으며, 급수중의 불순물 농도는 취출 유량에 반비례한다.

$$C_{BD} = C_{FW} \frac{W_{FW}}{W_{BD}}$$

즉, 급수유량과 취출유량은 잘 알려져있으므로, 취출수의 화학 성분 분석값으로부터 급수에 있는 매우 낮은 농도의 화학 성분 농도를 계산할 수 있고, 낮은 농도여서 분석신뢰도가 떨어지는 급수의 화학분석값의 정밀도와 정확도를 평가할 수 있다.

다. 불순물 부하량 계산

○ 양이온 부하량 계산

운전중 양이온교환수지 부하량 계산에 필요한 양이온들의 부하량 계산결과들은 다음과 같다.

- ETA(ethanol amine) : 분자식 C₂H₇NO (61g)

$$4000\mu\text{g}/\ell \times 30\text{m}^3/\text{hr} \times 10^3 \times 24\text{hr} \times 10^{-6} = 2880\text{g}/\text{day as ETA}$$

$$2880\text{g} \div 61 = 47.21\text{eq}$$

- NH₃(17g)

$$211.5\mu\text{g}/\ell \times 30\text{m}^3/\text{hr} \times 10^3 \times 24\text{hr} \times 10^{-6} = 152.3\text{g}/\text{day as NH}_3$$

$$152.3\text{g} \div 17 = 8.96\text{eq}$$

- N_2H_4 (32g)

$$200\mu\text{g}/\ell \times 30\text{m}^3/\text{hr} \times 10^3 \times 24\text{hr} \times 10^{-6} = 144.0\text{g}/\text{day} = 4.5 \text{ eq}$$

- Na (23g)

$$0.45\mu\text{g}/\ell \times 30\text{m}^3/\text{hr} \times 10^3 \times 24\text{hr} \times 10^{-6} = 0.324\text{g}/\text{day}$$

$$0.324\text{g} \div 23 = 0.014\text{eq}$$

위의 모든 양이온 당량은 56.185 eq/day 이다.

○ 음이온 부하량 계산

운전중 음이온교환수지 부하량 계산에 필요한 음이온들의 부하량 계산결과들은 다음과 같다.

- Cl (35.5g)

$$0.55\mu\text{g}/\ell \times 30\text{m}^3/\text{hr} \times 10^3 \times 24\text{hr} \times 10^{-6} = 0.396\text{g}/\text{day as Cl}$$

$$0.396\text{g} \div 35.5 = 0.011\text{eq}$$

- SO_4 (1당량 49g)

$$2.75\text{ppb SO}_4 \times \text{배출수량 } 30\text{m}^3/\text{hr} \times 24\text{hr} = 1.98\text{g}/\text{day} = 0.040\text{eq SO}_4$$

위의 모든 음이온 당량은 0.041eq 이다.

○ 당량기준 양이온, 음이온 부하량 비교

양이온 부하량 56.18 eq \Rightarrow 점유율 99.91%

음이온 부하량 0.051 eq \Rightarrow 점유율 0.09%

위의 결과로 볼때 증기발생기 배출수중에는 양이온이 대부분을 점유하므로, 탈염기의 총이온 교환용량에도 마찬가지로 비슷한 영향을 미친다.

○ 양이온교환수지 사양

- Grade : AMBERLITE IRN-77 동등품 기준

- Ionic Form : H^+

- 총교환능 : 1.8 meq/ml

- 증기발생기 양이온 탈염기 배출수기준 총제거량을 계산하면

$$\text{Resin Volume (2120L)} \times 1.8 = 3816\text{eq}$$

이론적인 음이온 교환수지 사용가능 일수 계산

$$3816 \text{ eq} / 56.18\text{eq}/\text{day} = 68 \text{ day}$$

○ 음이온 사양

- Grade : AMBERLITE IRN-78 동등품

- Ionic Form : OH⁻
- 총교환능 : 1.1 meq/ml
 - 증기발생기 No.2(혼상)탈염기중 OH 기의 배출수기준 총제거량을 계산하면
Resin Volume 1060L(resin양)×1.1 = 1166eq

이론적인 음이온 교환수지 사용가능 일수 계산

$$1166 \text{ eq} / 0.051 \text{ eq/day} = 22862 \text{ day} = 762 \text{ month} = 63 \text{년}$$

위와 같이 양이온수지는 2~3개월정도 사용이 가능하지만 음이온교환수지는 발전소 수명기간동안 사용하여도 이론적으로는 포화되지 않는다. 따라서 실제로 음이온수지의 용량이 충분하므로 음이온 수지를 줄이고 양이온 수지를 증대함으로써 수질기준도 만족시키고 방사성물질 및 음이온성 불순물을 충분히 제거할 수 있게 수지배합비를 조절해야 한다. 더 나아가 양이온수지가 제거하는 화학종이 대부분 화학 조절제인 아민류이므로 탈염기의 교체기준을 방사성물질, 또는 나트륨, 염소이온 혹은 황산이온등의 제염계수로 정할수 있도록 개정된다면 매우 폐기물 발생량과 수지교체작업량이 대폭 감소될 것이다.

5. 원전 증기발생기 탈염기 최적 운전 방안 검토

1) 탈염기 배열

앞에서 언급한바와 같이 원전 증기발생기의 취출수 탈염기 배열은 2대를 동시에 연속운전하는 방법이 가장 우수하며, 특히 새 수지가 충전된 탈염기는 항상 뒤에 놓임으로서 제염계수를 가장 높게 할수 있도록 하고, 사용중이던 탈염기는 전단에 놓임으로서 부분적으로 미포화된 수지가 모두 포화될수 있도록 한다.

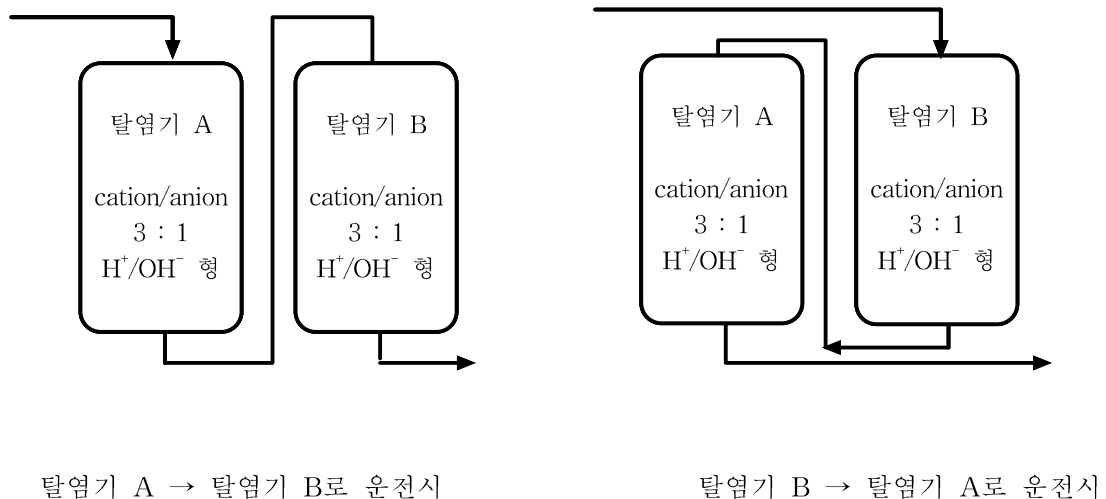


그림 4. 현재기준 최적 탈염기 운전배열 및 수지충전 사양

나. 탈염기 수지 배합비

이온교환 탈염기의 수지배합비율은 일반적으로 제거해야 할 양이온과 음이온 농도로부터 구해지는 것이다. 그러므로 원전 탈염기의 수지배합비는 앞에서 얻은 이온부하량을 기준으로 할 때 양이온수지 99.9%, 음이온수지 0.1%를 혼합하여 운전하면 모든 이온교환수지를 알뜰하게 사용할 수 있다. 그러나, 음이온수지를 적게 주입하면 상대적으로 음이온교환이 불순물과 이온수지간의 반응 확률이 낮아져서 제염계수값이 요구조건인 10미만으로 나타날 수 있다. 그러나, 1대의 혼상 탈염기를 운영중인 영광 3,4호기의 한국형 원전에서의 양/음이온 수지주입비율일 3대 1이므로 이 수지배합비로 충전하여 그림 4에서와 같이 운전하더라도 현재 관련 규제요건들을 모두 만족시키므로 시행하는 데는 문제없을 것이다. 그러면서 점차 양이온수지의 비율을 늘려가며 양이온과 음이온을 동시에 효과적으로 제거하는 비율을 찾아내어 운전한다면 가장 최선의 방안이 될 것이다.

다. 아민(Amine) 포화된 탈염기 운전방안

앞에서 살펴본 바와 같이 증기발생기 취출수 탈염기의 사용기간을 단축시키는 가장 큰 물질은 원전 2차계통의 부식방지를 위해 주입하는 pH조절제, 즉 암모니아, 몰포린 또는 ETA 등의 아민류이다. 부식방지를 위해 주입이 꼭 필요하지만 취출수 탈염기에서 제거해야 할 필요는 없다. 왜냐하면, 대부분의 취출계통에서 탈염된 취출수는 급수로 제공급되지 않고 복수기로 들어가며, 복수중에는 증기발생기에서 증기와 함께 휘발되었던 암모니아같은 아민류가 많이 존재하며, 2차계통 전체 순환수중 취출수는 1~2% 미만으로 영향이 미약하기 때문이다. 아민을 포화상태로 운전하기 위해서는 가장 중요한 선결조건이 해결되어야 한다. 이는 탈염기의 교체조건이 2차계통내에서 불순물로서 나트륨, 염소, 황산이온 및 방사성 물질처럼 제거해야 하는 물질들의 제염계수가 선정됨으로서 탈염기의 수지 교체가 꼭 필요한 경우에만 수행되어야 한다. 이 방안이 가능하게 되면 이온교환수지의 배합비율이 아민류의 부하를 고려하지 않아도 되므로 새로이 설정되어야 한다. 이러한 경우, 몇 년식 탈염기를 운전해도 취출수중의 불순물을 우수한 제거능력을 보이므로 현재 2~3개월보다 많은 수년씩 사용하게 될 것이다.

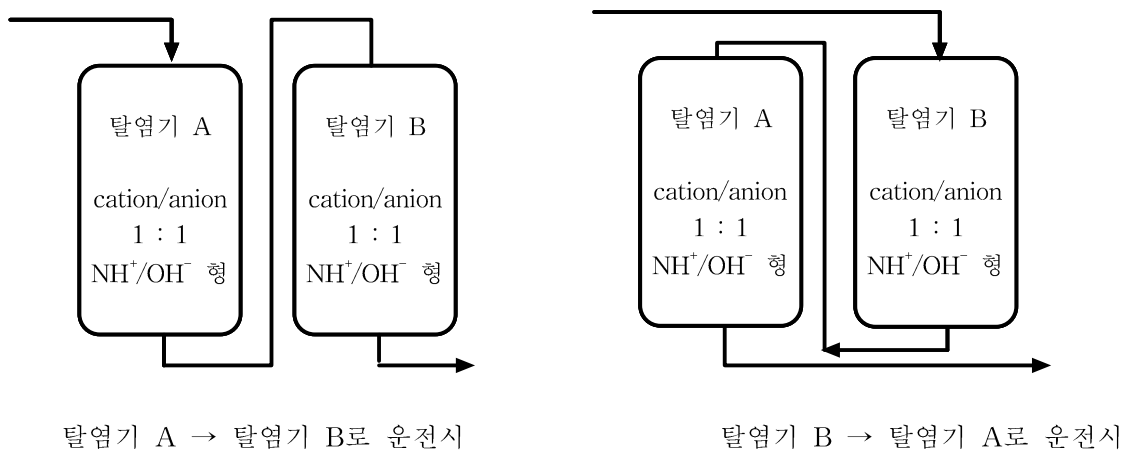


그림 5. 아민포화된 최적 탈염기 운전배열 및 수지충전 사양 (미래형)

6. 결 론

국내 원자력발전소의 취출수 계통중 수질정화와 증기발생기 세관누설시 방사능물질의 환경방출을 억제하는 탈염기의 설계기준, 기능 및 최적인전방안을 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 탈염기의 설계 또는 운전을 위한 배열방식은 2대를 직렬로 연결하여 운전하는 것이 가장 효과적이다.
- 탈염기의 수지교체후에는 제염계수를 향상시킬수 있도록 새수지탑이 후단에 놓이도록 배치하여야 한다.
- 양/음이온 수지배합비는 pH 조절제인 아민류의 부하를 고려하여 가능한한 양이온수지 비율을 높이도록 최적값을 도출하여야 하지만, 현재 기준으로 인정된 값인 최소 3 대 1 비율을 따라야 한다.
- 앞으로는 수지교체기준을 아민류의 제염계수 또는 전도도 대신 불순물의 제염능력 상실 시 수지의 교체시점으로 선정할 수 있도록 하여야 원전 수화학의 ALARA 개념을 성취할 수있을 것이다.

참고 자료

1. 국내원전 최종안전성 분석보고서중 제10.4.8절
2. KINS G-01, 경수로형원전 안전심사 지침서 제 10.4.8 절