

원전 증기발생기 취출탈염기 교체기준 및 이온교환수지 혼합비율 재평가  
Reevaluation of Ion Exchanger Performance and Mixing ratio  
on SGBD demineralizers of NPP

성기방\*, 안용수, 김성환, 김주택  
한국수력원자력(주) 원자력환경기술원

박종일, 이재원, 이상학  
한국수력원자력(주) 고리원자력본부 2발전소

요약

국내 원전의 방사성폐기물 분야의 주기적 안전성평가(PSR)과정에서 현장실사 및 고체폐기물 발생량 추이를 분석한 결과, SG 취출계통 탈염기로부터 발생하는 폐수지가 발전소 전체 폐수지의 65% 이상을 차지하고 있어 이의 개선이 필요한 것으로 나타났다. 개선방안 도출을 위해 SG 취출계통이 급수계통의 화학약품 주입 및 응축수 정화계통과 연계하여 급수 및 증기발생기의 수화학 환경 조절과 비휘발성 고형물(슬러지)을 제거하는 등의 고유기능을 유지하면서 취출탈염기의 사용기간을 연장할 수 있는 방안을 검토하였다. 현장실험 및 분석을 통한 검토결과, 탈염기의 성능저하 원인이 되는 Na 누출현상은 탈염기 수지자체에 불순물로 존재하는 오염된 Na 성분임이 밝혀졌으며, 2차측 수질내에 존재하는 Na로 인한 영향은 무시할 수 있는 수준임을 알 수 있었다. 이를 근거로 개선된 취출탈염기의 성능판정기준을 설정하였으며, 원전 2차계통 불순물의 부하에 비례한 취출탈염기내에 충전되는 이온교환수지 혼합비를 도출하였다.

Abstract

In PSR on the typical Korean PWR NPP, there is increasing the trend of low level soild radwaste output which has been caused by the SGBD demineralizer spent resin. To minimize the low level soild radwaste, the SGBD demineralizer system design and technical specifications were reviewed with basic and the several experiments were done. One of the dramatical result is Na leakages are from resins with contaminated Na, not from exhausted resins. It means the possibility of saturated amines that are pH agent in the secondary water system. So, We recommended the criteria of discarding SGBD demineralizer resins and the cation/anion resin ratio of ion exchanger newly.

## 1. 서 론

국내 원전 2차측 냉각수 pH조절은 운영 초기부터 암모니아-AVT로 이용하였다. 도중에 암모니아보다 더 좋은 것으로 알려진 ETA로 변경함에 따라 SGBD 양이온 부하는 약 2~3배 정도 증가하였고, 이에 비례하여 폐수지 발생량도 증가하였다. 원전 취출탈염기 발생 폐수지는 2차측 수질을 정화한 것이기 때문에 오염되지 않았을 경우, 자체처분 대상이다. 그런데 원자로에서 확산된 중성자로 인한 2차측 방사화 물질 또는 SG 1차측에서 2차측으로의 미확인 누설로 인한 방사능물질 오염으로 인해 취출탈염기의 발생 수지는 자연 준위보다 약간 높은 것으로 알려져 있다. SG 취출수를 처리한 후 교체된 수지는 대부분 자체처분 대상 방사성폐기물이지만 환경법 처리기준에 따라 폐수지를 소각했을 경우 방사능물질이 농축되어 소각재의 처리가 용이하지 않다. 이런 문제점을 안고 있는 발전소별 취출탈염기 폐수지 발생량이 암모니아 처리당시에만 매년 전체 방사성폐수지의 65%인 약 15톤에 이르렀으나 2차측 pH 조절제를 ETA-AVT 로 변경하면서, 관리해야할 폐기물량은 더욱 증가되었다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 완화시키고자 국내외 가압경수로형 원전의 증기발생기 취출탈염기 운영상황을 분석한 후, 탈염기의 부하로 작용하는 pH 조절제인 ETA의 포화운전 가능성 실험과 불순물 제거능 모델 평가후, 포화운전이 가능함을 확인하고, 이런 새로운 사실을 근거로 탈염기의 수지교체 기준과 최적의 배합비를 도출하고자 하였다.

## 2. 원전의 SG취출탈염기 수지교체 현황

### 가. 국내 경수로 원전

SG 탈염기 수지교체는 취출수중의 불순물을 제거할 수 없어서, 증기발생기 수질이 개선되지 않는 시점을 기준으로 한다. SG 탈염기 수지가 제거능력을 상실했다는 징후는 경험적으로  $\text{Na}^+$  누설로서 판단하여 왔다.  $\text{Na}^+$  누설 이외의 교체기준은 발전소별로 다양한데 이는 수지의 성능저하에 대한 구체적인 평가 자료가 없어 발전소별 경험을 반영하여 자체적으로 설정하거나 타 발전소의 기준을 참고한 것으로 나타났다.

### 나. 미국 원전

미국에서 운전중인 가압경수로 원전형 원전중 총 73개 원전의 SG 취출탈염기에 대한 수지 교체기준을 검토한 결과, 22개 원전은  $\text{Na}^+$ 이온이 탈염기 성능판정기준에서 제외되었으며, 대신 전도도 등을 교체기준으로 적용하는 것으로 파악되었다. 그리고,  $\text{Na}^+$  이온이 교체기준인 원전도 다음과 같이 대부분 국내원전보다 매우 완화된 기준을 적용하고 있으며, 낮은 경우는 CPP에서 발생하는 수지와 유사하게 수지를 재생 사용하는 것으로 파악되었다.

- $\text{Na}^+ \geq 100$  ppb : 4개 원전
- $\text{Na}^+ \geq 20$  ppb : 4개 원전
- $\text{Na}^+ \geq 10$  ppb : 4개 원전
- $\text{Na}^+ \text{ DF} \leq 1$  : 2개 원전

## 3. 수지성능 평가 실험결과

본 수지성능평가를 위한 모의 실험에서는 수지량을 줄이고, 농도를 높여 실험시간을 수백배 단축하기 위하여 원전 증기발생기 취출탈염기 양이온수지 충전량인  $2.5 \text{ m}^3$  의 약 8만분의 1에

상당하는 수지량 30ml에다 2차계통에 첨가된 화학물질 농도를 30배 이상으로 하여 수지에 대한 파과실험을 수행하였다. 그 결과, 수지에 대한 이온의 선택도는  $Cs^+ > Na^+ > ETA^+ \geq NH_4^+ > H^+$  였으며, 파과 그래프는 그림 1 및 그림 2 와 같이 얻어졌다.

이상과 같이 원전 2차계통에서 고려할 수 있는 4가지 이온들에 대한 선택도 및 파과곡선 실험을 통하여 ETA 포화운전이 타당하다는 실험 결과를 얻을 수 있었다.

표 1. 고농도실험시 이온농도조건

이온명	분자량	이온농도		계통농도 (ppm)	실제농도와의 비율
		(ppm)	(meq/l)		
$ETA^+$	61.08	122.16	2	3.5	35
$NH_3^+$	17	34	2	0.2	170
$Na^+$	23	46	2	0.001	46000
$Cs^+$	133	266	2	0	$\infty$
전체 합	101.08	202.16	8	3.701	

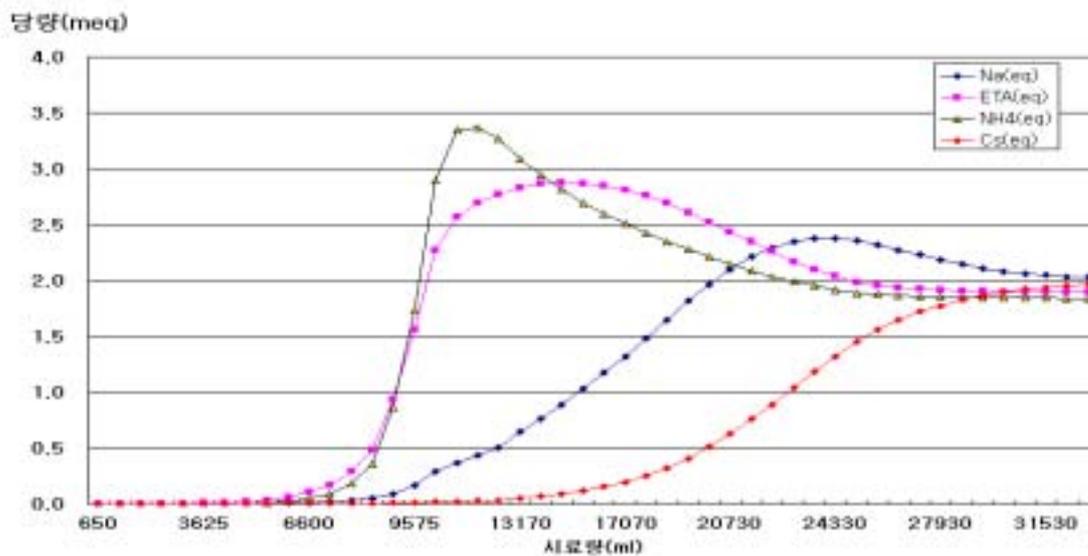


그림 1. H-형 수지의 이온별 선택특성 실험

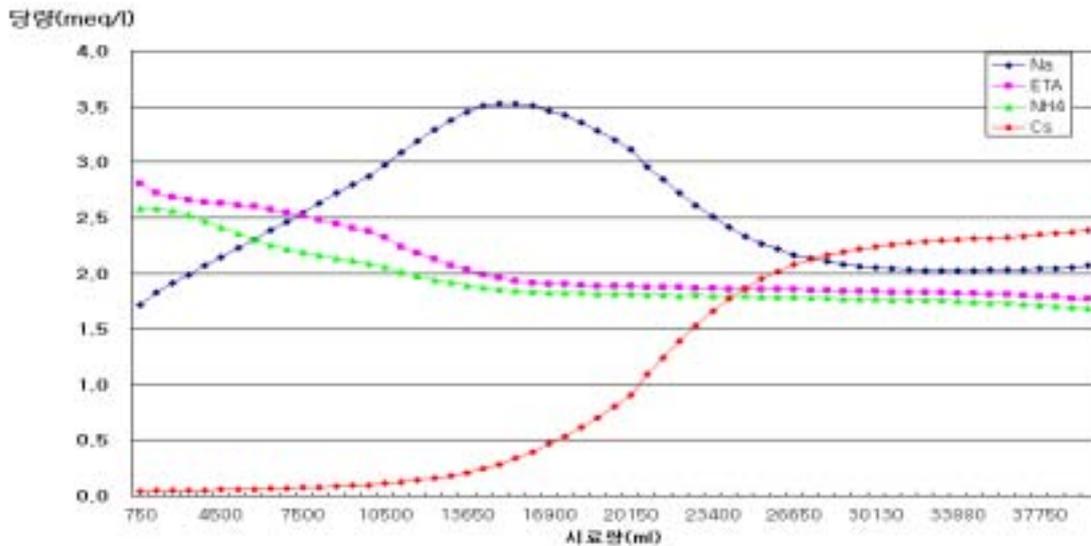


그림 2. ETA, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Na 포화수지의 Cs 교환반응 실험결과

#### 4. ETA포화 운전시 계통 수질영향 및 제염능력

증기발생기 수질과 관련된 인허가 대상문서는 FSAR(10.3.5, 10.4.8)과 EPRI 2차측 수화학 지침이다. 취출 탈염기 교체기준과 혼합비율 변경으로 인한 계통의 수질영향 평가는 관련된 인허가 요건을 만족하면서, 수질관리의 ALARA를 달성할 수 있어야 한다.

관련문서의 주요 내용은 첫째, 정상 및 예상과도상태 운전시 SG 2차측 기준수질을 만족하여야 하고, 둘째, 증기발생기가 누설될 때를 대비하여, 탈염기가 방사능물질을 충분히 제거할 수 있도록 제염계수 능력을 확보하고 있어야 한다. 여기서는 증기발생기 취출 탈염기가 ETA로 포화된 상태에서도 계속 운전할 경우, 위 두 요건에 대한 영향성을 평가하였다.

표 2. 원전 SG Steam side and Feedwater AVT Chemistry Guidelines (FSAR )

Chemistry Parameters	Cold/Hydro/ Cold wet Layup	Hot Functional Shutdown/ Standby	Startup From Hot Standby		Normal Power Operation	
	Blowdown	Blowdown	Feedwater	Blowdown	Feedwater	Blowdown
pH at 25°C	> 9.8	>9.0	9.0-10.0	9.0-10.0	9.0-9.6	9.2-9.8
양이온 전도도, µmhos/cm	NA	<2.0	NA	< 7	NA	< 2.0
Na, ppb	< 100	< 100	NA	< 100	< 100	< 20
Cl, ,ppb	< 100	< 100	NA	< 100	< 100	< 20
SO <sub>4</sub> , ppb	< 100	< 100	NA	< 100	< 100	< 20
ETA, NH <sub>3</sub> , ppm	As pH requires	NA	1-5	> 1.5	NA	> 1.5
Hydrazine, ppm	75~500	NA	> 8 [O <sub>2</sub> ]	NA	> 8 [O <sub>2</sub> ]	NA
Dissolved Oxygen , ppb	< 5	NA	< 5	NA	< 5	NA

표 3. 2차계통 방사능평형농도 계산 인자

Parameters	Design Basis
Condensate demineralizer DF	
Anions	10
Cs, Rb	2
Other nuclides	10
Blowdown demineralizer DF	
Anions	100(10)*
Cs, Rb	10(10)*
Other nuclides	100(10)*
Tritium balance parameters, 1b mass/h	
Main steam leaks	1,700
Condenser leakage	0
Condenser evacuation system and gland seal losses	0

주) ( ) 는 후단탈염기의 제염계수성능

평가대상 원전 2차계통 수질관리는 초기의 암모니아-AVT에서 2002년부터 ETA-AVT로 전환되었다. 변경전후 수질관리 결과는 다음 표 4 과 같다. 수질항목의 변화내용은 증기발생기내 pH는 9.2에서 9.6으로 증가하였고, 암모니아농도는 1/3로 낮아진 대신 ETA가 약 3,500ppb 로 유지되고 있다. 그 외 대부분의 불순물 농도는 수질관리 변화 전후로 유사한 수준이다.

표 4. 평가대상원전 2차측 수질기준 및 ETA 처리 전후 수질 변화값

Chemistry Parameters	정상운전시 수질기준		B 호기 운전 (NH <sub>3</sub> Cycle ) 평균값		B 호기 운전(ETA+NH <sub>3</sub> Cycle) 평균값	
	FW	BD	FW	BD	FW	BD
pH at 25°C	9.0-9.6	9.2-9.8	9.4	9.2	9.4	9.6
양이온 전도도, µmhos/cm	NA	< 2.0	0.1	0.1	0.09	0.1
Na, ppb	< 100	< 20	0.2	0.3	0.1	0.2
Cl, ppb	< 100	< 20	0.8	0.7	-	0.3
SO <sub>4</sub> , ppb	< 100	< 20	-	0.3	-	0.2
NH <sub>3</sub> , ppm	NA	NA	0.420	0.665	0.221	0.250
ETA, ppm	NA	> 1.5	-	-	1.800	3.485
Hydrazine, ppm	> 8 [O <sub>2</sub> ]	NA	60	36	67	38
Dissolved Oxygen, ppb	< 5	NA	0.4	0.0	0.4	0.0

취출탈염기의 ETA 포화운전을 위해서는 이로 인한 주요 수질인자들에 대한 수질영향 평가가 필요하고, 그 평가결과가 Chemistry Guidelines을 만족하면서, 수질의 ALARA를 달성할 수 있어야 한다. 이를 위해 Na에 대한 검토내용은 다음과 같다.

원전 2차측 Na는 증기발생기 내부틈새에서 잠복 농축되어 강알카리(pH 10 이상) 환경을 조성하는데, 증기발생기튜브 부식실험 결과에 의하면, 고온에서 강알카리 성분인 NaOH는 입계간(Inter-Granular Attack)부식을 일으킨다. IGA 부식조건은 pH가 10이상으로 높아야 하는데, 이

조건의 Na 최소농도는 표 5의 NaOH와 pH와의 관계에 의하면 2,300ppb 정도이다. 그러나, SG 수질기준치는 20ppb 이하이며, B 호기 SG 취출수 운전실적에 따르면 Na 농도는 0.2ppb 정도로 제한치보다 100분의 1 정도이다. 이는 SG 틈새에서 11만배(2300ppb÷0.2ppb)로 농축되지 않으면 pH 10을 넘지 않으므로 알카리 부식 우려는 없다고 보여진다. 그리고, 틈새에서는 Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 유기산등이 공존하므로 Na<sup>+</sup>의 알카리 영향을 중화시킨다. ETA를 포화운전할 경우 수지에 오염된 Na<sup>+</sup>로 인해 SG 취출탈염기 출구쪽 Na<sup>+</sup> 농도가 약간 증가하는데, 누설된 Na는 콘텐서의 응축수와 합쳐져서 희석되며, 이후 CPP 탈염기를 통과할 때 제거된다. 만약 CPP를 부분운전하여 일부 Na도 우회될 경우, 증기발생기에 유입되었지만 결국에는 다시 취출탈염기에서 잡히게 된다.

표 5. NaOH 농도와 pH와의 관계

NaOH 농도 (ppb as Na)	pH @ 25	비고
0.1	7.01	탈염기 출수농도 수준
1.0	7.09	운전중 증기발생기 취출수 농도 수준
5	7.40	EPRI 2차수질 지침서(R 5)의 2단계 수준
20	7.94	조치개시 1단계 수준
50	8.33	EPRI 2차수질 지침서(R 5)의 2단계 수준
100	8.63	조치개시 2단계 수준
250	9.03	EPRI 2차수질 지침서(R 5)의 2단계 수준
500	9.33	조치개시 3단계 수준
2300	10.00	알카리 영역

## 5. 원전 SG 취출탈염기 수지 교체기준

SG 탈염기 수지의 성능저하 기준 또는 교체기준 설정 근거는 취출수중의 불순물을 제거할 수 없어서, 증기발생기 수질이 개선되지 않을 때이다. 이온교환 수지가 제거능을 상실했다는 징후를 이전에는 대부분 Na 누설로 판정하였다. 그러나 위의 평가결과에 의하면, 탈염기 사용초기의 Na 누설은 수지내 불순물로 존재하는 Na누설로 인해 발생한 것이므로, 탈염기가 수질내에 포함된 Na로 포화된 것과 분명히 다르다. 따라서 실질적으로 적용가능한 교체기준을 새로이 재설정하여야 된다.

### 가. 양이온 수지 교체기준

양이온 수지에서 제거되어야 하는 2차계통 불순물중 가장 제거가 어려운 이온은 Na이기 때문에 Na에 의한 교체기준은 양이온 수지의 성능저하에 의한 교체기준을 포괄하는 것이다. Na에 의한 교체기준 설정 배경은 다음과 같다. 계통에서 Na의 농도가 증가하는 경우, 특히 SG 수질중 Na 증가는 해수 누설, ETA 등 약품의 불순물, Na 함량이 높은 오염된 수지로부터 누출, 잠복된 SG 세관틈새의 누출(Hideout & Return), 수지의 제염계수 저하 등이 원인이 될 수 있다. 이런 이유들로 인해, SG 취출탈염기의 제염계수 선정결과는 매우 다양하다.

그런데, 증기발생기 취출수 Na누출은 오염된 Na 때문이었으므로, 탈염기 수지의 고유 제거능력이 상실되지 않았는데, 기준을 잘못 정하여 교체한다는 것은 교체된 새수지가 ETA 약품을 소모하여, 화학약품 주입량을 증가시키게 되고, 약품중 불순물들이 증기발생기로 더욱 유입을 촉진하는 것이 된다.

ETA 포화시 출구에서 Na 농도가 약간 증가한다더라도, 누설된 Na는 CPP에서 제거된다.

SG 탈염기 수지 성능 저하시 그 영향이 급격하게 나타나지 않으며, 급수계통에도 CPP가 설치

되어 있어 2차적인 방어 역할을 한다. 이로 인해, SG 취출 탈염기 수지교체 기준의 접근은 수질 관리 측면의 ALARA 로 접근하기 때문에 보는 이의 관점에 따라 다양한 결과가 나타날 수 있다. 그러나, 새로이 밝혀진 양이온수지가 ETA 보다 Na를 잘 포획하며, ETA 누설시 출구의 Na는 이전에 탈염기 입구로 유입된 Na가 아닌, 오염된 Na로부터 유래하고, 양이온 불순물은 ETA 또는 오염된 Na를 밀어내기 때문에 탈염기 수지교체 기준은 이러한 현상을 고려하여 설정되어야 하며, 다음과 같이 교체기준 개선원칙을 제시하였다.

- 2차계통수중의 ETA는 탈염기에서 제거하지 않고 순환시킨다.
- 새수지에 불순물로 존재하는 Na 누출은 통제할 필요가 없으므로 이로 인한 누설영향부분은 탈염기 교체기준에서 배제한다.
- 불순물 제거과정은 자연스럽게 능동적이어야 한다. 외부 유입으로 인해 계통내 불순물 유입이 갑자기 증가하더라도 시간이 경과되면 계통수 순환량에 비례하여, 불순물의 농도는 감소되어야 한다.

이러한 원칙하에 발전소 기동시 불순물 제거, 해수 누설시 SG 유입방지, SGTR시 방사능물질 제거, 발전소 정지시 Hide-out Return 되는 불순물들의 제거능력이 확보되어야 한다. 따라서 30% 이상 출력운전에서는 불순물로 인한 누설 Na의 영향이 크므로, 제염계수 10은 부정확하다. 따라서 30% 출력모드를 제외한 모든 운전 상태에서는 SG 취출 탈염기의 Na 제염계수가 10이내를 만족하도록 정한다.

**표 6. 발전소 상태별 증기발생기 취출수 수질 기준**

발전소상태	운전모드	Na 기준 (ppb)	Cl 기준 (ppb)
정지시	출력운전→고온대기(모드 1-3)	≤ 100	≤ 100
	고온정지→재장전시(모드 3-6)	≤ 1000	≤ 500
기동시	재장전→상온정지시(모드 6-5)	≤ 100	≤ 100
	고온정지시(모드 4)	≤ 100	≤ 100
	고온대기시(모드 3)	≤ 100	≤ 100
	기동시(모드 2)	≤ 100	≤ 100
출력운전시	출력 (5~30%)	≤ 100	≤ 100
	출력 (30% 이상)	≤ 20	≤ 20

위 조건을 바탕으로 SG 취출탈염기의 양이온수지 교체기준 개선안은 다음과 같은 방법으로 정하는 것이 적절하다.

- 수질기준이 가장 높은 기동 또는 정지시 SG 취출수 수질 기준인 Na 농도 100ppb 이하조건과 정상 운전시 조치개시 2단계 농도 제한값인 Na 100 ppb 이하조건에서 Na의 제염계수 10을 고려한 농도는 10ppb 이하를 만족하여야 하며,
- 출력 30% 이상 운전조건에서는 Na 제한치인 20ppb의 제염계수 10을 만족하는 값 2ppb 에다가 Na 누설로 인한 농도치는 ETA 포화시 누설되는 Na 최대농도 예상치를 3 ppb로 계산한 합인 5ppb 이하로 정한다.

위 두 방법중 엄격한 수질기준은 Na 농도가 5 ppb 이하이므로 양이온수지 교체 개선안은 SG 취출탈염기의 출구 Na 농도 ≥ 5 ppb 로 선정하는 것이 타당하다.

**나. 음이온 수지 교체기준**

음이온 수지에도 양이온 수지와 같이  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  등의 불순물이 포함되어 있는데, 음이온수지의 교체기준도 원전 2차측 음이온 관리항목중 가장 선택도가 떨어지는 항목을 출구에서 감시하는 것이 타당하다.

여러 음이온 중 원전 2차측 관리항목에서 가장 선택도가 떨어지는  $\text{Cl}^-$ 의 탈염기 출구농도를 선정하는 것이 타당하다. 교체 기준은 계통수의 존재비가 양이온인 Na와 비례하도록  $\text{Cl}^-$ 의 수지탑 출구농도를 5 ppb 이상으로 하는 것이 두 이온으로 인한 계통수의 pH 변화가 가장 적기 때문에 타당하다.

또 대부분 원전의 증기발생기 수질에서 검출되는  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 음이온수지에 대한 선택도가 다른 음이온들에 비해 커서 제거되지만 파쇄 양이온수지가 SG에 유입후 분해되어 SG 취출수에서 검출되거나, CPP 수지의 재생제가 황산이어서 양이온수지의 미량부분이 Na로 오염되는 것처럼 음이온 수지도 황산이온으로 오염되는 것으로 판단된다. 따라서 황산이온을 탈염기의 교체기준으로 판단하는 것은  $\text{Cl}^-$  이온에 비해 타당성이 떨어진다.

그러나, 대부분의 원전에서 수지유입으로 인한 증기발생기 수질저하를 염려하여  $\text{SO}_4$  농도를 관리하므로, 탈염기에서의 제염 기준을 설정하는 곳이 많다. 그럼에도 불구하고 수지 교체기준으로 설정한다면, 다른 이온농도 제한치와 같이 취출탈염기 출구의  $\text{SO}_4^{2-}$  농도를 5 ppb 이상으로 하는 것이 타당하다.

그 밖의 음이온 농도를 감시할 수 있는 수질인자가 양이온 전도도(C.C)이다. C.C는 음이온 불순물인  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{HSiO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , 유기산 등의 총 농도 변화를 보여 주는데, 예전에는 양이온 전도도 값이 수중불순물 변화를 감시하는데 좋은 지표였다. 그러나, 미량불순물을 정확하게 분석할 수 있는 최근에는 음이온수지의 성능 판정을 탈염기 전,후단 농도를 직접 측정하여 판단하는 것이 타당하므로, C.C는 온라인 감시를 위해 수질변화 추이를 판단하는 데 활용하고, 수지판정기준은 참고만 하는 것이 합리적이라 판단된다. 만약 SG 취출수의 수지교체기준으로 선정한다면, 복수 계통의 수질 제한치인 0.3uS/cm 값 이상이 타당하다. 이 값의 근거는 2차 계통내에 존재할 수 있는 각종 불순물 농도가 5ppb 정도일때 이론적으로 계산된 전도도이다.

## 6. SG 취출 탈염 수지 배합비율

탈염기의 이온교환수지는 양이온을 제거하는 수지와 음이온을 제거하는 수지가 혼합되어 있다. 사용 기간은 통과하는 계통수의 이온농도에 반비례하는데, 계통수중의 양이온과 음이온의 비율이 차이나는 경우에는 이온교환능력이 먼저 포화되는 수지의 용량 즉, 계통수중에 많이 포함된 이온 농도에 의해 결정된다. 그래서 계통수중의 양이온 농도와 음이온 농도비에 따라 수지를 충전하므로서 포화시점이 거의 동시에 도달하도록 하여 이용율을 최대화하고 있다.

예전에는 취출탈염기의 수지배합비를 pH 조절제인 ETA와 암모니아를 양이온 부하로 여겨 수지 배합비를 결정하였는데, 이들 ETA와 암모니아를 이온부하로 여기지 않을 경우, 새로이 혼합비율이 설정되어야 하며, ETA 환경에서 분해생성물인 유기산에 의한 영향까지 고려된 최적 수지배합비를 계산하여 제시하고자 하였다.

발전소에서는 수질기준치를 준수하므로, 관련 기준치 또는 제한치를 사용한다. 기준치가 없는 경우에는 측정결과보다 보수적인 최대값 또는 5배정도 보수적인 값으로 가정하였다. 계산결과, ETA 부하를 고려하면 양이온 총 부하는  $115 \times 10^{-9} \text{ eq}/\ell$  정도이며, 고려하지 않을 때는  $3.78 \times 10^{-9} \text{ eq}/\ell$  정도이다. 음이온 부하는 강도 ETA 와 상관없이  $3.67 \times 10^{-9} \text{ eq}/\ell$ 이다. 유기산의 농도를 보수적으로 5배로 하면,  $7.80 \times 10^{-9} \text{ eq}/\ell$  정도이다.

이런 조건에서 ETA 부하 고려시 양이온 수지와 음이온 수지의 필요한 비율은 30 : 1 이며, ETA를 고려하지 않으면, 1 : 2 정도 된다.

ETA를 무시한 이온강도에 의한 수지배합 비율은 양이온수지 : 음이온수지 = 1 : 2 이다. 그러나, 실제 운전환경에서는 양이온 물질의 이온강도를 다소 보수적으로 고려하여야 한다. 이는 ETA와 암모니아는 순수한 물의 H이온 보다 이온강도와 수지선택성이 강하고, Na나 금속성이온 보다 수지선택도가 약하더라도 양이온 수지에 포집된 이온들을 밀어내는 용리작용(elution)을 갖기 때문이다. 그리고 유기산은 다른 불순물과 달리 휘발성이 강해서, 증기와 함께 복수기를 거쳐 CPP에서 제거되는 비율이 크다. 이런 현상을 고려하게 되면, 계산값보다 실제 양이온의 수지 비율은 더 높아져야 한다. 이러한 ETA의 용리현상을 고려하여, 용리 인자를 2~6 배로 할 경우에는 반대로 양이온수지가 음이온수지보다 1~3배 필요하다. 따라서 다음과 같이 SG 취출 탈염기의 수지배합비율은 양이온 수지 대 음이온 수지 = 1~3 : 1 이 타당하다.

표 7. 계통수 수질에 대한 이온부하

이온종류	항목	최대농도 (ppb)	분자량 (g./mol)	이온부하 ( x 10 <sup>-9</sup> eq/ℓ )	
				ETA 고려	ETA 미고려
양이온					
ETA		5000	61.08	81.86	NA
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		500	17.00	29.41	NA
N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		50	32.00	1.56	1.56
Na <sup>+</sup>		20	23.00	0.87	0.87
Fe <sup>+2</sup>		20	55.85	0.72	0.72
Cu <sup>+2</sup>		20	63.55	0.63	0.63
총합				115.05	3.78
음이온					
				유기산 최대 x 1 배	유기산 최대 x 5 배
Cl <sup>-</sup>		20	35.50	0.56	0.56
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>		20	96.06	0.42	0.42
SiO <sub>2</sub> <sup>-</sup>		100	60.08	1.66	1.66
Acetic acid		20	60.05	0.333	1.67
Glycolic acid		20	76.05	0.263	1.31
Formic acid		20	46.02	0.435	2.17
총합				3.67	7.80

## 7. 결 론

### ○ SG 취출탈염기 수지 교체기준

양이온 수지의 교체 인자인 Na는 수지자체에 포함된 불순물로 인해 출구농도가 높게 나타난 것으로 밝혀졌다. 따라서 기존 교체기준인 Na DF ≤ 1 은 부적절하며 불필요하게 다량의 폐수지를 발생시키는 문제점을 안고 있다. 이런 문제점을 해결하기 위하여는 탈염수지 자체에 불순물로 존재하는 Na로 인하여 탈염기 후단에 나타나는 Na 농도를 Base로 하되, 실제 탈염기가 불순물로 거의 포화되었다고 판정할 수 있는 기준으로서 [탈염기 출구 Na 농도 ≥ 5 ppb]를 양이온수지 교체기준 개선안으로 설정하는 것이 타당하다.

음이온 수지의 경우는 원전 2차측 수질관리항목중 가장 선택도가 떨어지는 Cl 로 선정하는 것이 타당하며, 계통수의 이온 존재비가 비례하도록 Na와 같이 [탈염기 출구 Cl 농도 ≥ 5 ppb]로 설정하는 것이 타당하다.

Cl 농도 이외의 지표로서 양이온 전도도(C.C)와 황산이온(SO<sub>4</sub>)가 음이온수지 교체기준으로 추가 선정될 수 있으나, C.C 는 여러 음이온의 혼합된 전기 전도도이므로 음이온수지의 정확한 성능저하 판정기준으로 보기에는 불합리하므로 참고적으로 음이온수지의 성능이 떨어지고 있다는 추이를 확인하는 것으로 사용하는 것이 좋다.

SO<sub>4</sub> 농도를 관리하므로, 음이온 수지의 보조적인 교체기준으로 설정하고자 한다면, Cl 이온 농도와 같은 [탈염기 출구 SO<sub>4</sub> 농도  $\geq$  5 ppb] 이어도 증기발생기 수질은 충분히 만족된다.

따라서, 원전의 전, 후단 취출탈염기 교체기준 개선안은 다음과 같이 설정하는 것이 바람직하다.

혼상수지탑 교체 판정기준 : [탈염기 출구이온 Na, Cl 농도  $\geq$  5 ppb ]

참고 교체 기준 : [탈염기 출구 SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> 농도  $\geq$  5 ppb, C.C  $\geq$  0.3 $\mu$ s/cm ]

## ○ SG 취출탈염기 수지 혼합비

ETA 부하 고려시 양이온 수지와 음이온 수지의 필요한 비율은 10 : 1 이며, ETA를 고려하지 않으면, 1 : 3 정도 되었다.

그러나, 양이온 물질의 이온강도는 ETA의 용리작용으로 인해 밀려난 영향과 유기산 휘발성에 의한 음이온 부하감소 등을 추가로 고려하여야 하므로 원전 SG 탈염기의 양이온 대 음이온의 수지혼합 비율은 1~3 : 1 로 개선하는 것이 타당하다.

## 참고 문헌

1. PWR Secondary water chemistry Guidelines Rev. 5 EPRI
2. 고리 1호기 에탄올아민(ETA) 적용 연구(최종보고서) KERPI TR.97CS13.S999.754
3. PWR Advanced Amine Application Guidelines Rev. 2 EPRI TR-102952-R2. 1997
4. Sodium Leakage From condensate Polishers Under Alternate Amine Chemistry EPRI TR-104299. 1994
5. Sodium Chloride Hideout in a simulated Steam Generator Tube and Tube Support Plate Crevice EPRI TR-110803(Interim Report) 1998
6. PWR Molar Ratio Control Application Guidelines V1. EPRI TR-104811-V1,V2,V5 1995