

증기발생기 잠복방출시험 비교분석

Comparative Analysis of Steam Generator Hideout Return Test

송혜란, 김홍덕, 정한섭

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

증기발생기의 국부적인 틈새를 중성으로 유지하여 IGA/SCC에 의한 손상을 줄이기 위한 방법으로 몰비조절운전을 시행하고 있다. 발전정지중에 HZP 시간을 연장하여 증기발생기 2차측의 불순 화학 성분의 농도변화 추세를 분석함으로써 가동중 전열관 틈새의 화학 환경을 파악하고자 잠복방출시험을 수행한 결과를 분석하였다. Westing House 사의 모델 F 타입의 세 발전소와 ABB-CE 사의 모델 System 80 타입의 두 발전소에 대해서 수행한 결과를 비교하였다. 분석한 불순 화학 성분은 Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, NO₃, PO₄, silica이다. Na, K, Cl, silica가 일반적으로는 틈새에 용존성분으로 잠복되어 있다가 HZP에서 주로 방출되는 것으로 알려져 있으나, System 80 모델의 증기발생기의 경우는 출력감발 단계에서부터 방출되기 시작하는 특징을 보였다. 이같은 현상의 원인은 증기발생기의 관지지 구조가 eggcrate 구조로서 용존성분의 방출이 보다 용이하기 때문으로 보여진다. 잠복방출시험을 통하여 틈새 환경을 평가하여 MRC 운전의 근거 자료로 활용하고 증기발생기내의 화학환경을 평가하였다.

Abstract

To reduce Steam Generator (SG) tube degradation by IGA/SCC, many utilities have been used Molar Ratio Control (MRC) method. Maintaining the neutral crevice pH in the SG is the useful method for decreasing the rates of IGA/SCC. HOR test which is performed by the analysis of chemical impurities during the overhaul period can makes it possible to assess of crevice environment. HORT results from Model F type and Model System 80 type SG were evaluated and compared. Analysed chemical species were Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, NO₃, PO₄, and silica. Generally, Na, K, Cl, silica which are soluble phases in the crevice are known to be returned during Hot Zero Power(HZP) period. But, they were returned during power reduction period for Model System 80. It was shown that the eggcrate tube support structure of System 80 SG makes the soluble species could be returned easily. The crevice environments were assessed by the use of HORT results which were based of the MRC operation.

1. 서론

전열관 2차측 IGA/SCC (Inter Granular Attack/ Stress Corrosion Cracking)는 원전 증기발생기의 손상기구 중에서도 가장 중요한 손상으로 최근 많은 증기발생기의 교체사유이기도 하다. 전열관 2차측이 관판, 전열관 지지판, 또는 퇴적 슬러지와 접촉하여 형성하는 틈새에서 국부적인 비등이 발생하면서 불순물 농도가 증가하여 pH가 염기성 또는 산성으로 변화하는 것이 IGA/SCC를 유발하는 가장 중요한 요인의 하나이다. 따라서 틈새의 국부적인 pH를 중성으로 유지하는 것이 IGA/SCC를 억제하기 위한 중요한 처방의 하나이기 때문에 잠복(Hide)과 잠복방출(Hideout Return Test, HORT)에 대한 관심이 더욱 높아져가고 있다.

증기발생기 내의 불순물들이 취출수, 증기의 이동, 화학약품의 분해 등에 의해서 계통수로부터 제거되는 것을 잠복(hideout)이라 한다. 잠복이 일어나는 곳으로는 전열관 표면, 전열관 스케일의 하부, 슬러지, 금속산화물예의 흡착, 건조영역, 관판과 관지지판 사이의 틈새 등이다. 정상 가동 중에 화학종들이 급수를 통해 증기발생기내로 이동하고 어떤 경우에는 국부적인 비등으로 인해 틈새에 침전된다. 급수에 의해 증기발생기 전열관으로 이동된 철의 축적이나 증기발생기 내에서 유체의 흐름이 적은 곳에 생기는 슬러지가 바로 잠복의 흔한 예이다. 이전의 수화학 처리법에서는 급수로 인해 이동한 이온성의 불순물이 Ca, Mg 같은 경도 성분으로 잠복된다고 알려져 왔다. Phosphate의 잠복은 바로 이런 수화학 처리법을 전취발성 처리법으로 바꾸게 한 중요한 원인이다. 탄소강 관지지판을 가진 증기발생기에서 나타난 denting으로 틈새의 잠복은 증기발생기 화학 처리에서 중요한 문제로 대두되기 시작했다. 전열관 표면에서의 불순물의 농축은 증기발생기내의 계통수보다 100-10,00배 정도로 보여지며 스케일이나 슬러지에서는 더욱 높은 농도이다. Na나 K 같은 양이온은 비등에 있어서 휘발성의 특성으로 인해 Cl같은 음이온보다 더욱 쉽게 농축될 수 있으며, SO₄는 Cl보다는 휘발성이 약하다.

비등이 종료되면서 열유체의 흐름이 감소하면 잠복되었던 수용성의 불순물이 계통수와 직접 접촉하고 있지 않기 때문에 틈새 밖으로 확산되어 방출(return)되는데 이것이 잠복방출(HORT ; Hideout return)이다. 이 때의 확산속도는 축적된 밀도나 뒤들림 정도, 틈새의 온도, 틈새의 농도 등 발전소 특성에 따라 다르다. 출력감발 단계에서 유체의 흐름이 제한된 곳이나 건조영역에서 침전물의 용해, 계통수로의 확산 등으로 불순물의 농도가 주목할 만큼 증가한다. 퇴적물이 다공성이고 깊이가 제한되어 있으므로 용해된 물질이 전열관 표면의 스케일로부터 급격히 방출된다. 잠복방출은 이전의 출력 이력, 이전의 불순물 유입원과 이력, 전열관 부식성상과 퇴적 성상, 틈새의 환경, 냉각과 온도 유지 등의 정지 계획 등에 의해 영향을 받는다.

대부분의 원전에서는 틈새 화학환경을 중성으로 유지하기 위하여 증기발생기 2차 계통수의 양이온과 음이온의 비율을 조절하는 몰비조절(Molar Ratio Control, MRC) 개념을 적용하고 있다. 원전 발전정지중에 HZP (Hot Zero Power) 시간을 연장하여 SG 2차측의 불순 화학 성분의 농도 변화 추세를 분석함으로써 가동중 전열관 틈새의 화학 환경을 파악하고자 하는 잠복방출시험을 매주기 수행하여 틈새 환경을 평가한 결과를 바탕으로 MRC 운전을 실행한다. 이 시험을 통하여 틈새 환경을 평가하여 MRC 운전의 근거 자료로 활용하고 증기발생기내의 화학환경을 평가하기 위하여 수행된다. 틈새환경을 보다 신뢰성 있게 평가하기 위하여 틈새환경 감시장치를 운영하거나 전열관 발판시험을 수행하는 사례도 많으나 이는 부담이 크므로 매주기 실행할 수 있는 통상적인 방법으로는 HORT가 유일한 방안이다. 그러나 HORT로 틈새환경을 평가하는 것은 결코 용이한 일이 아니며, 신뢰성 있는 분석결과를 얻기 위해서는 시험, 분석 및 평가 과정에 각별한 주의와 노력을 기울여야 한다.

초창기에는 누적 방출량을 측정하여 MULTEQ 전산코드로 틈새의 pH를 분석하는 것이 주된

추세였으나 최근에는 몰비 지수 (Molar Ratio Index, MRI) 개념을 적용하는 것이 더욱 신뢰성 있는 HORT 분석 방안인 것으로 판단하여 EPRI 지침서[1,2]가 발간된 바가 있다. 용해도가 높은 양이온과 음이온의 몰비가 틸새 환경을 결정하는 가장 중요한 변수라고 가정하여 MRI가 1에 가까우면 틸새 pH가 중성(5~9)일 가능성이 매우 높고, MRI가 보다 매우 크거나 작으면 염기성 또는 산성으로 판단하며, MRI는 다음과 같이 정의할 수 있다. HORT 분석결과가 염기성인 경우에는 다음 MRC 운전 방안 중 하나를 실행하여 다음 주기 MRI를 1에 근접시킨다.

- 양이온 (주로 sodium)의 유입을 억제하여 2차 계통수에서 농도 저감
- 틸새환경에 영향이 적은 chloride 첨가
- 취출수 탈염기나 복수탈염기의 이온교환수지를 교체하여 양이온과 음이온의 몰비 조절

그리고 틸새 환경이 산성인 경우에는 음이온의 농도를 줄여 몰비를 조절한다.

2. 잠복방출시험 절차

정확한 HORT 데이터를 도출하기 위해서는 다음과 같은 사항이 철저히 준수되어야 한다.

· 시료 채취 주기 : 신뢰성이 높은 HORT 결과를 도출하기 위해서는 불순원소의 방출량보다 시간에 따른 방출거동이 더욱 중요하다. 특히 고온 영출력 (Hot Zero Power, HZP) 단계에서의 방출거동이 중요하므로 HZP 단계에서 가능한 한 충분한 시간을 유지해야 한다. HZP 시간을 최소한 8시간 이상 유지하는 것이 필요하다.

· 화학 분석 : 필수적으로 분석해야 할 항목은 양이온이 Na, K, Ca, Mg이고, 음이온은 Cl, SO₄, Si이다. 그 외에도 Acetate, Fluoride, Phosphate, Aluminium, Manganese, Boron 등 발전소의 가동특성에 의해서 급수와 취출수 화학조성 분석결과 높은 농도가 관찰되는 성분은 HORT 시료 분석에 포함시키는 것이 바람직하다. 낮은 ppb 단위의 미세 농도이므로 충분한 주의를 기울이지 못할 경우 상당한 오차가 발생할 요인이 있으므로 분석기기의 측정한계, 오차범위 등을 명확히 기록하고 검교정 상태를 확인해야 한다.

· 제반 시험 조건 : 시료 채취 시간, 출력 및 온도 변화, 2차측 온도, 취출수 유량, 수위등 제반 시험 조건이 정확하게 기술되어야 한다.

3. 잠복방출시험 데이터 분석 절차

최근 기술을 반영한 EPRI 지침서[3]를 근거로 한 데이터 분석절차는 다음과 같다. 먼저, 잠복방출시험을 위한 시료 채취후 농도를 분석한 값을 잠복방출량으로 환산한 후 누적 방출거동을 분석하고, MRI 값과 틸새 pH를 결정한다.

· **잠복 방출량으로 환산** : 취출수에서 시료를 채취하여 분석한 농도 데이터는 증기발생기 2차측 온도, 취출수 유속, 수위, 증기발생기 모델 등을 고려한 mass balance 계산을 수행하여 틸새에서 증기발생기로 방출되는 양으로 환산해야 한다. EPRI chemWORKs Hideout Return (HOR) Spreadsheet를 이용하면 각 성분의 방출량을 쉽게 구할 수 있다.

· **누적 방출 거동 분석** : 시험시간에 따른 누적방출량의 변화로부터 각 단계 (출력감발, HZP, 냉각)에서 각 성분의 방출 특성을 파악한다. 각 성분의 총 누적방출량 (total hideout return)을 구하여 증기발생기의 화학환경을 평가한다. 그리고 HZP 단계만의 누적방출량을 구한다.

· **MRI 해석** : MRI 해석은 틈새의 용존 양이온과 음이온의 비가 틈새 pH를 결정하는 가장 중요한 변수임을 가정하여 다음 식으로 정의되는 MRI가 1에 가까우면 틈새 pH가 중성(5~9)일 가능성이 매우 높다는 것을 기초로 이루어진다. 틈새에서는 불순물의 용해도가 제한되어 Ca, Mg, silica가 틈새 pH에 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나, Na, Cl같은 높은 용해도를 가진 불순물과 실제적인 평형에 도달하는 값을 얻는 것은 불확실하며 과잉의 SO₄는 CaSO₄로 침전되는 것으로 간주한다.

$$MRI = \frac{Na + K}{Cl + excess\ SO_4} \quad (1)$$

where $excess\ SO_4 = SO_4 - Ca$,

if $SO_4 \leq Ca$, $excess\ SO_4 = 0$

각 성분별로 누적 잠복방출량을 시간에 대하여 그려보면 HZP 단계의 누적 방출 거동은 두 가지로 나눌 수 있다. 먼저, HZP 영역의 누적 방출량 증가속도가 점점 감소하는 경우는 curve fitting하여 각 성분의 틈새 잠복량을 얻어 MRI를 구한다. 그러나, 데이터가 부족하거나 냉각 영역의 데이터가 없는 등 HZP 영역의 방출속도가 거의 일정하여 누적 방출량이 직선적으로 증가하는 경우는 HZP이후 누적방출량을 통한 MRI를 구하고 HZP 영역에서 거의 일정한 MRI를 나타내는 초기 영역의 평균이 semi-constant MRI가 된다. HOR Spreadsheet를 이용하면 두 경우의 MRI를 쉽게 결정할 수 있다.

· **틈새 pH 계산** : 초창기 HORT 분석에서는 HZP 누적 방출량 또는 시험중 총 방출량을 구한 후 MULTEQ 전산 코드를 활용하여 틈새 pH를 정량화 하였다. 그러나 이 방법은 잠복방출이 틈새에서만 일어난다고 가정한 것으로 전열관 표면이나 슬러지 퇴적물, 틈새 입구에서의 잠복방출을 고려할 수 없다. 그리고 pH 계산 결과는 Ca, Mg, silica와 같이 가동온도에서 용해도가 낮은 성분의 양에 크게 의존하지만 틈새의 방출과 다른 위치의 방출을 구분할 수 없다는 한계가 있다. 그래서 잠복방출시험 데이터 분석에서 MULTEQ 전산코드를 이용한 틈새 pH 결정은 MRI 해석에 포함되지 않는 농도 성분이 과다한 경우, MRI 값이 1에서 크게 벗어난 경우나 특정 성분에 대한 민감도 분석이 필요한 경우에서 선택적으로 활용한다.

4. 증기발생기별 잠복방출시험 특성분석

가. Westing House사의 모델 F 증기발생기

1) F1 원전

가) 누적 방출 거동 분석

(1) 누적 방출 특성 비교

HOR Spreadsheet를 이용하여 취출수의 불순물 농도 분석 데이터를 누적 방출량으로 환산한 후 시간에 따른 분포를 증기발생기 A에 대하여 그림 1에 나타내었다. 분석한 성분은 Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, NO₃, PO₄, silica이고, 50% 출력부터 HZP를 거쳐 냉각단계까지 나타내었다. 모든 증기발생기에서 각 성분들의 거동은 비슷한 경향을 보였으며, Na과 silica는 HZP부터 방출되기 시작하여 냉각단계를 거쳐 모두 방출되어 용존성분과 침전물 형태로 틈새에 농축되어 있음을 확인할 수 있었다. Cl은 틈새에 용존성분으로 잠복되어 있다가 주로 HZP에서 방출되는 것으로 알려져 있으나 냉각단계에서 주로 방출되는 거동을 보였다. Ca, Mg, SO₄는 냉각단계에

서 주로 방출되므로 틈새 침전물로 존재하거나 전열관 표면에 흡착되어 존재하며, NO₃는 일반적으로 냉각 단계에서 주로 방출되나 출력감발단계부터 지속적으로 방출되었다. PO₄는 대부분 냉각 단계 말기에 방출되었다. H2P 누적방출량과 총 누적방출량을 성분별로 비교해 본 결과 증기발생기 사이의 방출 거동의 차이는 거의 없었고, Na와 SO₄의 방출량이 많은 편이었다.

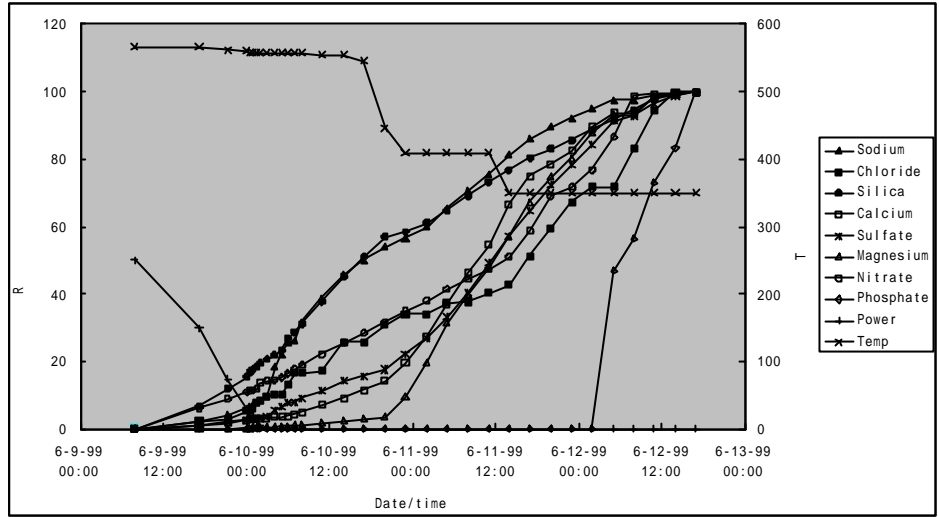


그림 1. SG A의 누적 방출 거동

(2) MRI 해석

SG	MRI rate-constant (semi-constant)	틈새환경	비 고
A	2.25 (2.21)	약염기성	중성에서 MRI = 1
B	(2.48)	약염기성	
C	(2.32)	약염기성	

MRI setup은 출력 10%와 500 °F에서 구한 것이며, 증기발생기 B와 C에서 excess SO₄에 대한 틈새잠복량을 구할 수 없기 때문에 rate constant MRI를 구할 수 없어 차선책으로 semi-constant MRI를 구하였다. 증기발생기 모두 비슷한 값의 약염기성으로 나타났다.

(3) MULTEQ 해석

SG	pH / neutral pH		틈새환경
	침전물 잔류	침전물 제거	
A	8.31 / 4.77	10.19 / 4.77	약염기성
B	8.20 / 4.74	10.07 / 4.77	약염기성
C	8.29 / 4.79	10.37 / 4.77	약염기성

침전물이 잔류하는 경우에 틈새화학환경은 중성이고 침전물 제거인 경우에 틈새 pH는 염기성 이므로 틈새화학환경은 약염기성으로 평가할 수 있으며, 틈새환경 평가결과가 염기성으로 나오는

원인을 살펴보기 위하여 양이온에 대한 민감도 해석을 한 결과, Ca과 Mg은 틈새 pH에 큰 영향을 미치지 않고, Na 방출량이 많기 때문에 염기성 결과가 나오는 것으로 나타났다. 틈새화학환경이 약염기성으로 나타났으나 이전 주기에서는 계속 강염기성이어서 SO₄ 조절로 상당히 개선된 것으로 볼 수 있다.

Na (g)	5	8	10	15	20	4,15
pH	0,09	1,15	9,48	10,23	10,05	10,19

2) F2 원전

가) 누적 방출 거동 분석

(1) 누적 방출 특성 비교

HOR Spreadsheet를 이용하여 취출수의 불순물 농도 분석 데이터를 누적 방출량으로 환산한 후 시간에 따른 분포를 그림 2에 나타내었다. 분석한 성분은 Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, NO₃, silica이고, 50% 출력부터 HZP를 거쳐 냉각단계까지 나타내었다. 두 증기발생기에서 각 성분들의 거동은 비슷한 경향을 보였으며, Na, K, silica는 출력 감발단계부터 다른 성분보다 더 많이 방출되기 시작하여 냉각단계를 거쳐 모두 방출되므로 주로 틈새에 농축되어 있음을 확인할 수 있다. 그 외의 Ca, Mg, SO₄, NO₃ 냉각단계에서 주로 방출되는 것으로 보아 틈새 침전되어 있거나 전열관 표면에 흡착되어 있었음을 알 수 있다. Cl은 일반적으로 틈새에 용존성분으로 잠복되어 있다가 HZP에서 주로 방출되는 것으로 알려져 있으나, HZP에 조금 방출되다가 냉각단계 초기에 급격한 증가를 보이는 특징을 나타냈다. HZP에서의 누적 방출량과 총 누적 방출량을 비교해 보면 방출량이 특히 많은 Ca, SO₄, NO₃는 냉각단계에서 주로 방출되었으므로 틈새 침전물로 또는 전열관 표면에 흡착되어 존재하여 틈새 pH에는 영향이 적다.

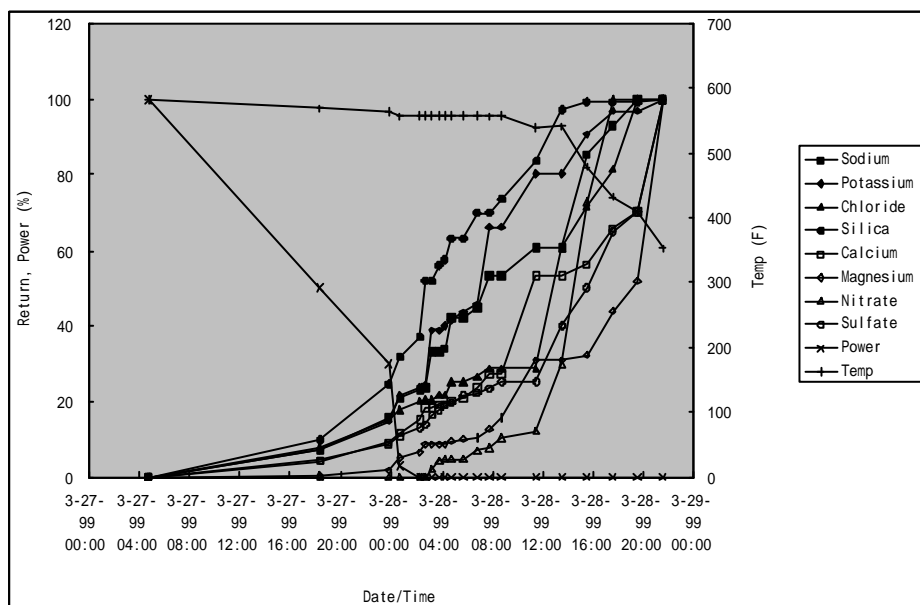


그림 2. SG A의 누적 방출 거동

(2) MRI 해석

SG	MFI	틈새환경	비 고
A	0.82	중성	semi-constant
B	0.37	중성	rate-constant

증기발생기 A는 Na와 Cl의 rate constant 차이가 너무 커서 rate constant MFI를 구할 수 없어 차선책으로 semi-constant MFI를 구하였다.

(3) MULTEQ 해석

SG	pH / neutral pH		틈새 환경
	without ppt removal	with ppt removal	
A	4.39 / 5.12	1.53 / 4.79	중성
B	6.31 / 4.80	9.95 / 4.81	중성

침전물을 제거한 경우를 기준으로 하면 틈새환경은 중성으로 볼 수 있으며, 증기발생기 A와 B의 차이를 검토하기 위하여 각 성분의 양을 변화시키는 민감도 해석을 한 결과 HZP에서 Ca의 방출량이 많아서 증기발생기 B가 악염기성에 가깝게 나타났다.

Ca (g)	1.0	1.5	2.0	2.41
pH / neutral pH	3.38 / 5.14	6.23 / 4.80	6.31 / 4.80	6.31 / 4.80

3) F3 원전

가) 누적 방출 거동 분석

(1) 누적 방출 특성 비교

HOR Spreadsheet를 이용하여 취출수의 불순물 농도 분석 데이터를 누적 방출량으로 환산한 후 시간에 따른 분포를 증기발생기 A에 대하여 그림 3에 나타내었다. 분석한 성분은 증기발생

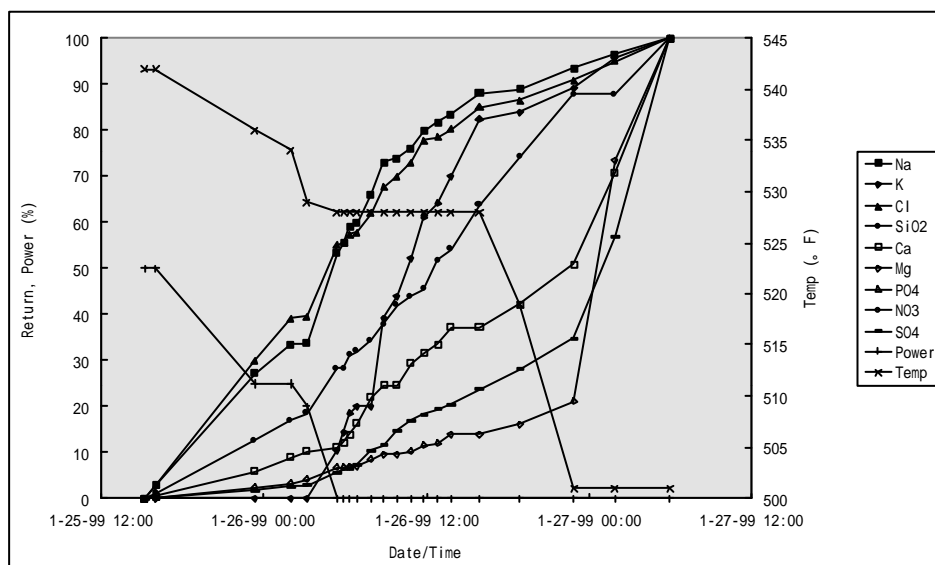


그림 3. SG A의 누적 방출 거동

기 A, B, C 모두 Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, silica이고, 출력 감발단계부터 HZP를 거쳐 냉각단계까지 나타내었다. 증기발생기 B에서 SO₄의 방출량이 A와 C보다 적은 것을 제외하고는 모든 증기발생기에서 각 성분들의 거동이 비슷한 경향을 보였으며, Na, Cl, K, silica는 출력 감발단계와 HZP에서 거의 방출되는 것으로 보아 틈새에 용존성분으로 농축되어 있었음을 알 수 있다. Ca, Mg, SO₄는 HZP에서 조금 방출되기 시작하여 냉각단계를 거쳐 모두 방출되어 침전물로 틈새에 있거나 전열관 표면에 흡착되어 있었던 것으로 보여진다.

(2) MRI 해석

SG	MRI rate-constant (semi-constant)	틈새환경 비교
A	4.30 (4.07)	염기성
B	3.67 (3.48)	염기성
C	(2.48)	염기성

MRI setup은 출력 10%와 500 °F에서 구한 것이며, 증기발생기 B와 C에서 excess SO₄에 대한 틈새잠복량을 구할 수 없기 때문에 rate constant MRI를 구할 수 없어 차선택적으로 semi-constant MRI를 구하였다. 증기발생기 모두 비슷한 값의 약염기성으로 나타났다.

(3) MULTEQ 해석

침전물을 제거하지 않은 경우를 기준으로 하면 틈새환경은 중성으로 볼 수 있으며, 증기발생기 A, B, C 모두 비슷한 환경을 나타냈다.

SG	pH / neutral pH		틈새환경
	침전물 잔류	침전물 제거	
A	6.30 / 4.77	10.03 / 4.77	중성
B	6.30 / 4.74	10.05 / 4.77	중성
C	6.38 / 4.79	9.34 / 4.77	중성

나. ABB-CE 사의 모델 System 80 증기발생기

1) S1 원전

가) 누적 방출 거동 분석

(1) 누적 방출 특성 비교

HOR Spreadsheet를 이용하여 취출수의 불순물 농도 분석 데이터를 누적 방출량으로 환산한 후 시간에 따른 분포를 증기발생기 A에 대하여 그림 4에 나타내었다. 분석한 성분은 Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, NO₃, PO₄, silica이고, A, B 증기발생기에서 각 성분들의 거동은 비슷한 경향을 보였으며, Na, K, Cl, SiO₂, NO₃는 출력감발단계에서 절반 정도 방출되었다. Na, K, Cl, SiO₂는 틈새에 용존성분으로 존재하다가 HZP에서 주로 방출되는 것이 일반적이거나 여기서는 출력 감발단계에서 틈새 용존성분의 방출이 많이 일어나는 특징을 보였는데, 이는 S1 원전의 증기발생기 관지 구조가 eggcrate로 용존성분의 방출이 보다 용이하기 때문이다. PO₄는 일반적으로 냉각 단계에서 주로 방출되나 여기서는 절반 가량이 HZP에서 방출되는 특징을 보였다. Ca, Mg, SO₄는 냉각

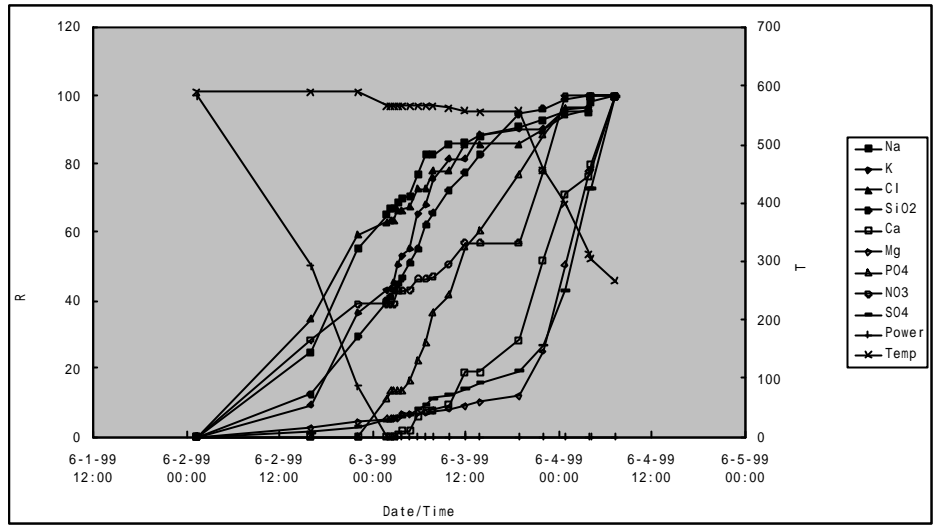


그림 4. SG A의 누적 방출 거동

단계에서 80% 방출되므로 틈새 침전물로 존재하거나 전열관 표면에 흡착되어 존재하는 것을 확인할 수 있다. 각 성분의 총 누적 방출량은 증기발생기 A, B에서 거의 차이가 나지 않았다.

(2) MRI 해석

틈새화학환경은 염기성으로 평가되고 Na과 K가 틈새의 염기성 환경에 상당한 기여를 하고 있다. MRI 증가요인으로는 HZP 중반부터 Ca이 방출됨에 따라 excess SO₄가 감소하기 때문으로 볼 수 있다.

	MRI rate constant (semi-constant)	틈새 환경	비 고
SG A	3.90 (2.79)	염기성	중성에서 MRI = 1
SG B	3.51 (1.32)	염기성	

(3) MULTEQ 해석

HZP 방출량을 input data로 사용하여 증기발생기 2차측 가동온도부터 1차측 고온관 온도까지 농축한다.

	pH		틈새 환경	비 고
	침전물 잔류	침전물 제거		
SG A	6.18	9.92	약염기성	중성 pH = 5~9
SG B	4.59	1.09	산성	

SG A는 침전물이 잔류하는 경우에 중성이고, 침전물 제거인 경우에는 염기성이므로 틈새 pH는 약염기성이며, SG B는 침전물 잔류와 침전물 제거 모두 산성이다. SG A과 SG B 사이의 MULTEQ 계산결과 차이의 원인을 살펴보기 위하여 민감도 해석을 수행한 결과 SG 사이의 MULTEQ 계산결과 차이는 주로 음이온 방출량의 차이 때문인 것으로 나타났다.

2) S2 원전

가) 누적 방출 거동 분석

(1) 누적 방출 특성 비교

HOR Spreadsheet를 이용하여 취출수의 농도 분석 데이터를 누적 방출량으로 환산한 결과를 백분율로 계산하여 시간에 대한 경향성을 그림 5에 나타내었다. Na, K, Cl, SiO₂는 출력감발단계에서 50%정도 방출된다. 이 성분들은 틈새에 용존성분으로 존재하다가 HZP에서 주로 방출되는 것이 일반적인 거동이나, 여기서 출력감발단계에서 틈새 용존성분의 방출이 많이 일어나는 것은 울진 3호기 증기발생기 관지지구조가 eggcrate이기 때문에 용존성분의 방출이 보다 용이한 것으로 판단된다. Mg, PO₄, SO₄는 냉각단계에서 대부분 방출되므로 틈새 침전물로 존재하거나 전열관 표면에 흡착되어 존재하다가 방출된다. NO₃는 일반적으로 냉각 단계에서 주로 방출되나 여기서는 출력감발 단계부터 지속적으로 방출되고 있다.

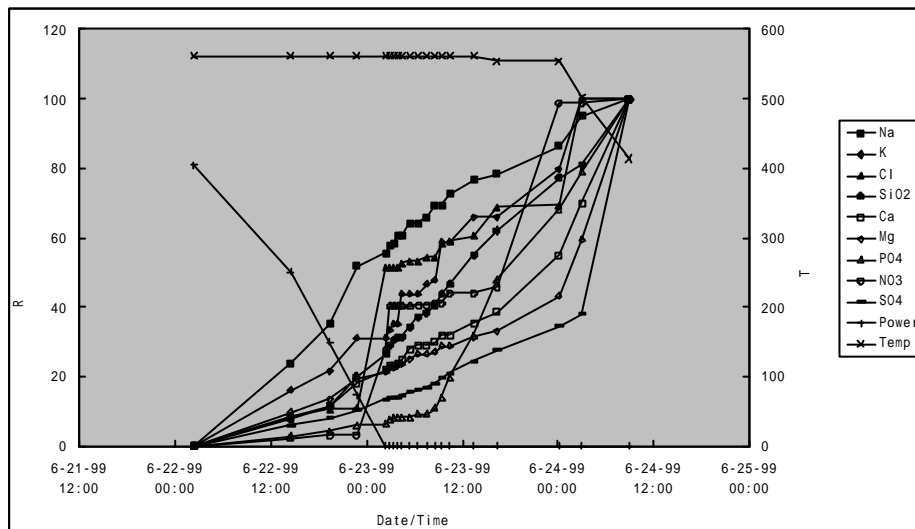


그림 5. SG A의 누적 방출 거동

(2) MRI 해석

SG B의 MRI가 SG A의 MRI보다 큰 것은 SG B는 출력 감발단계에서 K 성분이 많이 방출되고 HZP 초기에 Cl 성분은 적게 검출되었기 때문이다.

	MRI rate constant (semi-constant)	틈새환경	비 고
SG A	4.00 (3.19)	염기성	중성에서 MRI = 1
SG B	7.51 (6.99)	염기성	

(3) MULTEQ 해석

	pH		틈새환경	비 고
	침전물 잔류	침전물 제거		
SG A	2.84	1.40	산성	중성 pH = 5~9
SG B	3.00	1.64	산성	

MRI 결과는 염기성인데 MULTEQ 결과는 산성으로 나온 원인이 민감도 해석 결과 MRI 해석에서 고려되지 않는 PO₄의 과도한 방출 때문인 것으로 나타났다. 이것은 발전소 건설시 사용한 방청제의 성분으로서 가동시간이 지남에 따라서 점차 감소될 것이다.

한국표준형 원전 증기발생기(System 80)의 관지구조가 eggcrate 구조이기 때문에 관지판 구조보다 틈새 용존성분의 방출이 용이하기 때문이다. 틈새 용존성분의 초기 방출거동을 파악하고, 보다 정확한 MRI 값을 얻기 위해서는 다음 주기 HORT 수행시 출력 감발단계의 시료채취 수를 늘려야 한다.

3. 결론

원전 발전정지중에 HZP 시간을 연장하여 증기발생기 2차측의 불순 화학 성분의 농도변화 추세를 분석함으로써 가동중 전열관 틈새의 화학 환경을 파악하고자 하는 잠복방출시험을 수행한 결과를 분석하였다. Westing House 사의 모델 F 타입의 F1, F2, F3 발전소와 ABB-CE 사의 모델 System 80 타입의 S1, S2 발전소에 대해서 수행한 결과를 비교하였다. 분석한 불순 화학 성분은 Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, NO₃, PO₄, silica이다. Na, K, Cl, silica가 일반적으로 틈새에 용존성분으로 잠복되어 있다가 HZP에서 주로 방출되는 것으로 알려져 있으나, System 80 모델의 증기발생기의 경우는 출력감발 단계에서부터 방출되기 시작하는 특징을 보였다. 이같은 현상의 원인은 증기발생기의 관지 구조가 eggcrate 구조로서 용존성분의 방출이 보다 용이하기 때문으로 보여진다. 잠복방출시험을 통하여 틈새 환경을 평가하여 MRC 운전의 근거 자료로 활용하고 증기발생기 내의 화학환경을 평가하였다.

참 고 문 헌

1. EPRI TR-102134-R3, PWR Secondary Water Chemistry Guidelines - Revision 3, 1993
2. EPRI TR-102134-R4, PWR Secondary Water Chemistry Guidelines - Revision 4, 1996
3. EPRI TR-104811, PWR Molar Ratio Control Application Guidelines, 1995
Volume 1: Summary
Volume 2: Secondary Chemistry Control
Volume 3: Hideout Return Evaluation Guidelines
Volume 4: Methods of Determining Effectiveness of MRC
Volume 5: Westinghouse Evaluation of Effectiveness of Molar Ratio Control