

'98 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

## 몰비지수에 의한 증기발생기 틈새수화학 특성평가

나정원 · 성기웅 · 조영현 · 김우철

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

증기발생기에서 부식에 의한 전열관 손상은 전열관과 관판사이의 틈새에서 대부분 발생되고 이 틈새에서의 수질환경에 좌우된다. 틈새에서는 과열도가 높아 미량의 불순물이 농축되면서 틈새수화학 (crevice chemistry)은 증기발생기 내부수 수화학과는 달라진다. 전열관 손상을 억제하기 위해서는 틈새수질을 적절히 제어하여야 하는 데 이는 틈새수화학을 정확히 분석평가할 수 있는 기술을 기반으로 하여야 한다. .

기존의 틈새수질을 계산하는 방법으로는 증기발생기 내부수에 비해 틈새에서 화학종들이 얼마나 농축되는지를 가정하는 농축도 (concentration factor) 방법이 있으나 가정에 의한 불확실성으로 인해 틈새수질을 정확히 해석할 수 없었다. 그러나 원전 증기발생기의 잠복불순물 방출시험 자료로부터 틈새수질을 보다 정확히 평가할 수 있는 새로운 개념의 몰비지수(molar ratio index) 방법이 최근 EPRI에서 제시되었고 EPRI 산하의 많은 발전소에서 적용중이다.

본 연구에서는 PWR 원전 증기발생기의 틈새수화학을 평가할 수 있는 기술을 개발하기 위해 잠복불순물 방출시험 자료로 부터 틈새에서의 몰비지수를 계산할 수 있는 CRAP (CRevice-chemistry Analysis Program) 전산프로그램을 작성하였다. CRAP를 국내원전에 적용하여 증기발생기 및 그 틈새에서의 수화학을 평가하였다.

### 1. 이 론

증기발생기 틈새에서 주로 일어나는 전열관 부식손상의 원인은 대부분 2차측 IGA와 IGSCC로 알려져 있다. IGA와 IGSCC는 pH에 크게 의존하는 데 pH가 중성에 가까울 때 최소가 된다. 따라서 전열관 부식손상이 최소화되려면 틈새에서의 pH가 중성영역에 있어야 하고 이 때 양이온과 음이온의 비는 1이 되어야 한다. 몰비지수 (MRI, Molar Ratio Index)로 pH를 평가하는 방법은 용해도가 큰 양이온과 음이온의 비가 1에 가까울

때 pH가 중성에 가깝게 된다는 이론에 근거한다. 물비지수는 다음 식과 같이 정의된다.

$$\text{MRI} = \frac{[\text{Na}] + [\text{K}]}{[\text{Cl}] + [\text{excess SO}_4]} \quad (1)$$

위 물비지수 계산식에 입력되는 값들은 잠복불순물 방출시험결과로부터 각 화학종의 틸새재고량을 계산해 얻어진다. 틸새재고량 및 방출속도 상수를 계산하기 위한 방출모델을 Fig. 1에 간략히 나타내었다. 화학종 B가 틸새에서 증기발생기 내부수로 확산될 때의 물질수지식은 다음과 1차미분방정식으로 표현된다.

$$\frac{dA_B}{dt} = -\alpha_B A_B \quad (2)$$

위 식의 해는 다음과 같이 주어진다.

$$A_B = A_{Bo} e^{-\alpha_B t} \quad (3)$$

여기서  $A_B$  = 화학종 B의 틸새재고량 (g)

$t$  = 방출시간 (hour)

$\alpha_B$  = 화학종 B의 잠복방출 속도상수 ( $\text{hour}^{-1}$ )

$A_{Bo}$  = 화학종 B의 초기재고량

이다. 증기발생기 내부수에서 화학종 B의 농도에 관한 물질수지식은

$$M \frac{dC_B}{dt} = 10^6 \alpha_B A_B - Q_b C_B \quad (4)$$

이다. Eq. (3)식의  $A_B$ 를 Eq. (4)에 대입하고 풀면 그 해는 다음 식과 같이 주어진다.

$$C_B = \frac{10^6 \alpha_B \frac{A_{Bo}}{M}}{\frac{Q_b}{M} - \alpha_B} \left[ e^{-\alpha_B t} - e^{-\left(\frac{Q_b}{M}\right)t} \right] + C_{Bo} e^{-\left(\frac{Q_b}{M}\right)t} \quad (5)$$

여기서  $C_B$  = 증기발생기 내부에서의 B의 농도 (g/kg or ppb)

$C_{Bo}$  = 증기발생기 내부에서의 B의 초기농도 (g/kg or ppb)

$M$  = 증기발생기 내부수량 (kg)

$Q_b$  = 취출수유량 (kg/hr)

Eq. (3)식을 적분하면 시험기간동안 방출되는 화학종의 시간에 따른 누적방출량,  $R$ 을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$R = A_{Bo} [1 - e^{-\alpha_B t}] \quad (6)$$

출력 0% 일 때 틸새에서 증기발생기 내부수로 화학종의 확산이 일어나기 시작하는 데 위식은 누적방출량이 지수함수적 증가하는 것을 나타낸다. Fig. 2에 전형적인 방출 예를 보였다. 누적방출량자료에 대해 짧은 특정기간에서의 잠복불순물 방출속도상수,  $\alpha$ 는 다음 식과 같이 계산된다.

$$\alpha = \frac{-\ln \left[ 1 - \frac{(R_t - R_o)}{A_{Bo}} \right]}{\Delta t} \quad (7)$$

화학종의 잠복방출 속도상수는 화학종마다 다르다.

## 2. 결 과

PWR 원전의 정상운전시 급수를 통해 2차냉각재계통으로 미량의 불순물이 유입된다. 수류가 제한된 장소인 증기발생기내 틈새(crevice) 에서는 과열도가 높아 유입된 불순물의 잠복 (hideout)현상이 일어나고 불순물 농축도가 심해져 장기적으로 부식분위기를 형성해 전열관손상을 유발하게 된다. 잠복불순물은 출력감발 및 계획예방 정지운전에는 증기발생기 내부수의 냉각에 따라 불순물의 용해도차로 인해 잠복불순물은 재방출 (hideout return)된다. 이러한 방출특성을 이용하여 증기발생기 내부로 유입된 불순물의 종류 및 개략적 양을 분석하고 증기발생기 내부 수질환경을 파악하기 위해 잠복불순물 방출시험을 한다.

Eq. (3)식의 물비지수를 계산하기 위해서는 잠복불순물 방출자료를 database화하고 계산처리하여 누적방출량 등을 계산하는 과정이 필요하다. CRAP 전산프로그램에서 Database 입력항목은 시험변수, 운전변수와 농도변수의 3 가지로 크게 나누어 진다. 시험변수에는 발전소명, 시험일자와 시험시간의 항목이 포함된다. 운전변수에 포함되는 항목은 노출력, 냉각재 온도, 증기발생기 수위와 압력, 취출수유량 및 급수유량 등이다. 농도변수는 발전소 각 증기발생기별로 입력되어야 하며 Na, K, Cl, SO<sub>4</sub> 과 Mg, F, SO<sub>4</sub> 와 SiO<sub>2</sub> 등의 농도 분석치가 입력된다.

각 성분의 누적방출량은 어느 시점에서의 증기발생기내에 존재하는 양과 그 시점까지 증기발생기에서 외부로 방출된 총량 (방출량)을 더하여 계산한다. 방출시험 시간별 증기발생기 내부수 용적, 밀도 및 중량, B/D 질량유량 등의 입력자료를 처리하여 누적방출량을 계산한다. Fig. 3 - Fig. 6에 Na, K, Cl과 SO<sub>4</sub>의 시간에 따른 누적방출량을 CRAP 전산프로그램으로 계산한 결과를 나타내었다.

위 누적방출량을 방출속도 지수형 모델인 Eq. (6)식에 적용하여 최소자승법에 의해 각 화학종의 틈새재고량과 방출속도상수를 구하여 증기발생기 틈새수화학을 평가하였다. 또 이 모델에 근거하여 잠복불순물 방출시험 분석주기를 노출력 단계와 냉각재 냉각단계별로 결정하였다.

## 3. 결 론

1. 물비지수에 의해 증기발생기 틈새수화학을 보다 정확히 평가할 수 있는 CRAP (CRevice-chemistry Analysis Program) 전산프로그램을 작성하였다.
2. 국내 PWR원전의 잠복불순물 방출시험 자료를 CRAP으로 처리하여 틈새에서의 물비지수를 계산하고 증기발생기 틈새수화학을 평가하였다.

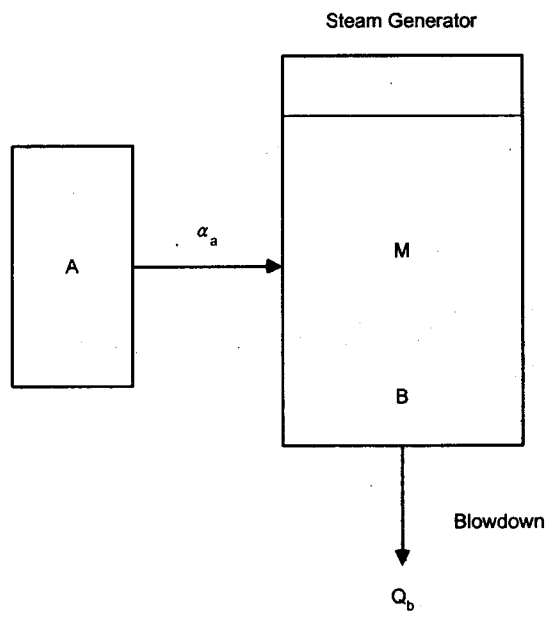


Fig. 1. Schematic diagram for material balance in steam generator

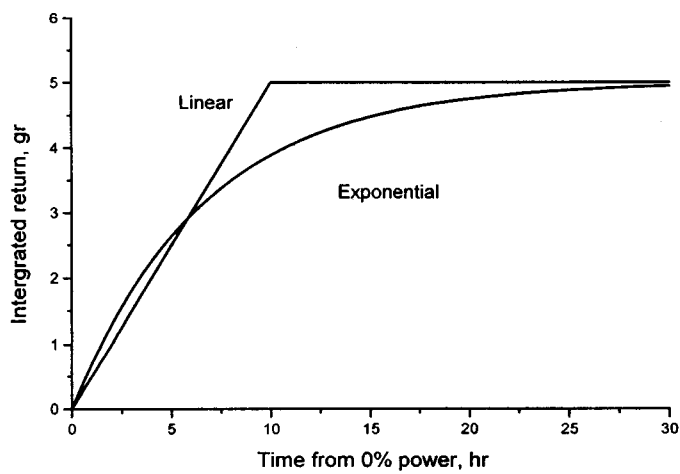


Fig. 2. Rate constant approach for determining crevice inventory

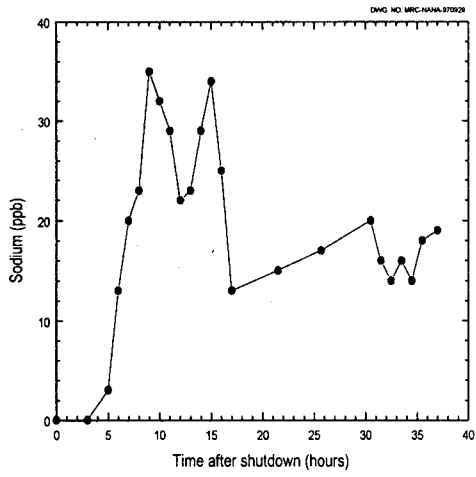


Fig. 3. Cumulative sodium hideout return

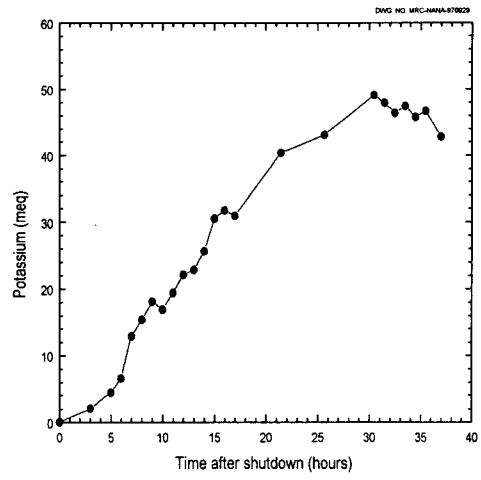


Fig. 4. Cumulative potassium hideout return

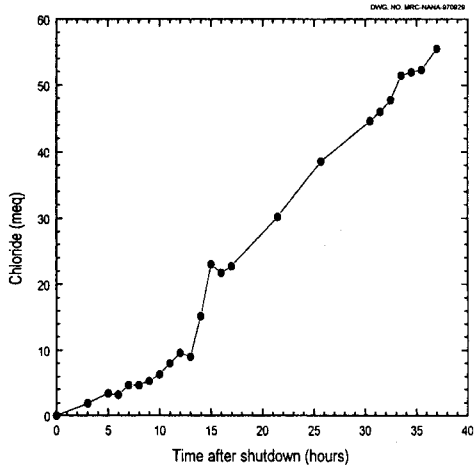


Fig. 5. Cumulative chloride hideout return

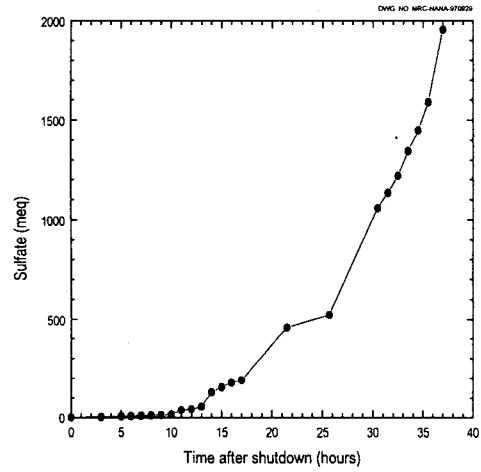


Fig. 6. Cumulative sulfate hideout return