

體積制御탱크내 水素氣體의 分壓이 一次系統 冷却材의  
水素濃도에 미치는 影響에 關한 研究

A Study on Effects of Hydrogen Gas Pressure in Volume Control Tank  
on Hydrogen Concentration of Primary Coolant

서영남, 이상섭, 김은기  
한국전력기술주식회사  
대전광역시 유성구 덕진동 150  
강태원  
공주대학교  
충남 공주시 신관동 182

요 약

체적제어탱크내의 수소 압력, 유출유량, 입자의 크기 등이 원자로 냉각재의 수소 농도에 상당한 영향을 미치게 된다. 체적제어탱크 내에서 낙하하는 단일 물방울에 적용할 흡수기구를 제시하였고, 이러한 흡수기구에 의해 흡수되는 수소량을 낙하 시간과 낙하 거리에 대하여 계산하였다. 또한, 물방울이 낙하하는 초기 속도 및 물방울 크기가 수소 흡수량에 미치는 영향, 체적제어탱크내 수소 분압이 수소 흡수량에 미치는 영향, 원자로냉각재계통의 전체 냉각재량에 대한 화학 및 체적 제어 계통에 유입되는 냉각재량의 비가 원자로냉각재계통 내의 수소 농도에 미치는 영향 등을 고찰하였다.

Abstract

The hydrogen pressure and water drop size in the Volume Control Tank (VCT), and the letdown flowrate affect the dissolved hydrogen concentration of reactor coolant significantly. This paper introduces a hydrogen absorption mechanism using Henry's law and the two-film theory for a water drop. With this hydrogen absorption mechanism, the absorbed hydrogen concentration is a function of the dropping distance and dropping time. Also, the relations between the initial nozzle velocity, the size of the water drop, hydrogen pressure and the letdown flowrate and the dissolved hydrogen concentration of reactor coolant are studied.

I. 서 론

원자력 발전소 기기의 수명 및 건전성과 관련하여 부식을 최소화하기 위한 방법 중 하나는 냉각재 내에 포함되어있는 용존산소의 농도를 엄격하게 관리하는 것이다.

용존산소 또는 산화성 물질의 농도를 최소화하는 방법중 한가지는 원자로냉각재의 용존수소가 용존산소와 반응하여 용존산소를 제거하는 것이다. 원자로 냉각재의 평균 온도가 250 °F (121.1 °C) 이상과 정상 운전 시에 체적제어탱크 상부에 적절한 압력의 수소 기체를 공급하고 체적제어탱크의 상부에 설치된 노즐을 통하여 수소 기체 속으로 강제 분사된 물방울이 낙하하는 도중에 수소 기체를 충분히 흡수한다.<sup>1)2)3)</sup> 그러나, 과잉의 용존수소는 암모니아(NH<sub>3</sub>)를 생성하고 원자로 냉각재의 pH를 증가시켜 오히려 부식을 유발할 수 있다. 따라서, 원자로냉각재계통의 용존수소 농도를 적절한 범위 내로 조절하는 것이 대단히 중요하다.

원자로 냉각재 수소 농도 조절이 갖는 중요성에 비해 체적제어탱크 내의 수소 압력에 대한 설계 기준을 확립하기 위하여 체적제어탱크 내의 수소 압력에 대한 적절성 검토가 필요하다. 또한 적절한 수소 농도 제어를 위한 수소 흡수 기구의 구체적인 모델이 요구된다.

## II. 본 론

### 1. 단일 물방울 입자의 동력학적 특성

분사 노즐을 통하여 분사된 물방울이 수소를 흡수하는 기구를 이해하기 위하여 냉각수의 특성을 단일 물방울 입자로 단순화하였다. 단일 물방울 입자의 동력학적 거동을 이해할 경우 냉각수 전체의 흡수 특성 및 냉각재의 농도를 파악할 수 있다.

물방울은 구형이며, 물방울에 작용하는 힘은 Newton의 제 2 운동 법칙에 따르며, 물방울 표면에서는 물질 교환을 동반하는 일체의 열교환이 발생하지 않는다고 가정하였다. 이와 같은 가정 하에 물방울 입자에 작용하는 힘의 수식<sup>4)5)</sup>을 세워 보면 아래와 같다.

$$M_b \frac{dV}{dt} = F_g - F_b - F_d - F_i \quad (1)$$

여기서,  $M_b \frac{dV}{dt}$  : 물방울에 작용하는 가속력

$F_g$  : 물방울에 작용하는 중력

$F_d$  : 물방울에 작용하는 마찰력

$F_b$  : 물방울에 작용하는 부력

$F_i$  : 물방울에 작용하는 관성력

$M_b$  : 물방울의 질량 (g)

$V$  : 물방울의 낙하 속도 (cm/sec)

수소 기체의 밀도는 물의 밀도에 비해 상대적으로 작기 때문에 관성력  $F_i$ 는 무시할 수 있다. 식 (1)의 좌, 우변의 각 항을 물방울의 직경, 밀도, 마찰계수 등을 이용하면 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{dV}{dt} = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_b}\right)g - \frac{3}{4} \frac{C_D V^2}{d_b} \left(\frac{\rho}{\rho_b}\right) \quad (2)$$

여기서,  $d_b$  : 물방울의 직경 (cm)

$\rho_b$  : 물방울의 밀도 (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho$  : 수소 기체의 밀도 (g/cm<sup>3</sup>)

$g$  : 중력 가속도 (cm/sec<sup>2</sup>)

$C_D$  : 물방울에 작용하는 마찰계수

마찰계수는 Kaji 등이 제안한 직경 2.0mm 이하의 물방울에 대한 실험식<sup>6)</sup>을 사용하였다.

식(2)에 Kaji식 및 물성치<sup>7)</sup>를 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{dV}{dt} = 977.65 - 0.000194 \left(\frac{V}{d_b}\right)^{3/2} \quad (3)$$

### 2. 수소기체에 대한 흡수 속도식

물방울 입자가 낙하하는 동안에 흡수한 수소량을 계산하기 위한 흡수 속도식을 유도하였다.

수소 흡수량을 계산하는데 필요한 기본적인 변수 및 가정은 다음과 같다.

- (1) 물방울은 구형이며, 초기 속도를 갖고, 최대 지름이 2 mm이다.
- (2) 낙하하는 동안 물방울의 체적 변화는 없다.
- (3) 물방울의 기-액 경계면에서 기-액 평형은 Henry의 법칙<sup>8)</sup>이 적용된다.
- (4) 흡수는 이중경막 이론 (Two-Film Theory)<sup>9)</sup>에 따른다.
- (5) 체적저어탱크 내의 압력은 일정하다.
- (6) 물방울 내부에서의 화학 반응은 일어나지 않는다.
- (7) 물방울 온도는 120 °F로 일정하다.

이중격막 이론에 따르면, 물방울의 외부에 존재하는 수소 기체가 기체격막을 지나 기-액 경계면으로 전달된 다음, 기-액 경계면에 존재하는 농도차에 의해 액체격막을 통과하여 물방울의 내부로 흡수된다.

수소 기체가 기체격막을 통해 전달되는 기체 흡수 속도는 Frossling의 실험식<sup>10)11)12)</sup>을 적용하였으며, 기체격막 물질 전달 계수  $k_G$ 는 Sherwood Number 상관식<sup>10)11)12)</sup>을 사용하였다.

$$N_{AG} = k_G(P_A - P_{Ai}) \quad (4)$$

여기서,  $N_{AG}$  : 기체격막을 통한 수소기체 흡수속도

$$k_G : \text{기체격막 물질전달계수} \left\{ \left( \frac{cc(STP) H_2 / kg H_2O}{cm^2 sec} \right) \right\} \Big|_{psia}$$

$P_A$  : 물방울 주위의 수소 분압 (psia)

$P_{Ai}$  : 기-액 경계면의 수소 분압 (psia)

액체격막 물질 전달 계수는 물방울 내부에서 혼합이 잘 이루어진다고 가정하여 Handlos and Baron 식을<sup>13)14)15)</sup> 적용하였으며, 액체격막을 통과할 때 물방울이 흡수하는 수소 기체의 흡수 속도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$N_{AL} = k_L(C_{Ai} - C_b) \quad (5)$$

여기서,  $N_{AL}$  : 액체격막을 통한 수소 기체 흡수 속도

$k_L$  : 액체격막 물질 전달 계수 (cm/sec)

$C_{Ai}$  : 기-액 경계면에서의 수소 기체 농도 (cc(STP)  $H_2$  / kg  $H_2O$ )

$C_b$  : 물방울 내부에서의 수소 기체 농도 (cc(STP)  $H_2$  / kg  $H_2O$ )

기-액 경계면을 중심으로 기체격막을 통해 기-액 경계면으로 전달된 수소 흡수량은 액체격막을 통해 물방울 내부로 전달되는 수소 기체량과 같다.

$$N_A = k_G(P_A - P_{Ai}) = k_L(C_{Ai} - C_b) \quad (6)$$

한편, 물방울의 기-액 평형은 Henry의 법칙<sup>8)</sup>이 적용된다. 따라서, 기-액 경계면에서의 수소 농도,  $C_{Ai}$ 를 구하면 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$C_{Ai} = \frac{P_{Ai}}{H_m} = \frac{k_G P_A + k_L C_b}{k_L + H_m k_G} \quad (7)$$

여기서,  $C_{Ai}$  : 기-액 경계면에서의 수소 농도 (cc(STP)  $H_2$  / kg  $H_2O$ )

$P_{Ai}$  : 기-액 경계면에서의 수소 분압 (psia)

$H_m$  : Henry 상수  $\left( \frac{psia}{cc(STP) H_2 / kg H_2O} \right)$

식 (6)과 식 (7)로부터 물방울 내부로 전달되는 수소 기체의 흡수식을 구하면,

$$N_A = K_L \left( \frac{P_A}{H_m} - C_b \right) \quad (8)$$

여기서,  $K_L$  : 총괄 물질전달 계수 (cm/sec)  $K_L = \left( \frac{1}{k_L} + \frac{1}{k_G H_m} \right)^{-1}$

물방울이 흡수한 수소 기체의 평균 농도는 물방울 내의 수소 농도를 적분하여 구할 수 있다.

$$C_t = \frac{1}{V_p} \iint N_A da dt \quad (9)$$

여기서,  $C_t$  : 물방울 내부에서의 수소기체의 평균농도 (cc(STP)  $H_2$  / kg  $H_2O$ )

$V_p$  : 물방울의 체적 ( $cm^3$ )

$a$  : 물방울의 표면적 ( $cm^2$ )

시간에 대하여 물방울 내부에서의 평균 수소 농도를 미분하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dC_t}{dt} = \frac{a}{V_p} N_A \quad (10)$$

액체격막과 물방울 내부에서는 혼합이 잘 이루어진다고 가정하면 액체격막에서의 수소 농도는 물방울 내부에서의 수소 농도와 같다.

$$\frac{dC_b}{dt} = \frac{a}{V_p} N_A \quad (11)$$

물방울이 구형이라 가정하였으므로, 물방울의 체적에 대한 표면적의 비에 대한 관계식을 식 (8), (11)에 적용하면 낙하 시간의 변화에 따른 물방울 내부의 수소 농도 변화를 계산하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\ln \left( \frac{\left( \frac{P_A}{H_m} - C_{b0} \right)}{\left( \frac{P_A}{H_m} - C_b \right)} \right) = \left( \frac{6}{d_p} \right) \int_0^t \left( \frac{1}{6.16 \times 10^{-5} V} + \frac{1}{\left[ \frac{3.04}{d_p} + 0.903 \left( \frac{V}{d_p} \right)^{1/2} \right] H_m} \right) dt \quad (12)$$

여기서,  $C_{b0}$  : 물방울의 초기 평균 수소 농도 ( $cc(STP) H_2 / kg H_2O$ )

$C_b$  : 물방울의 평균 수소 농도 ( $cc(STP) H_2 / kg H_2O$ )

식 (10)을 이용하면, 낙하거리에 따른 물방울 내부 수소 농도의 변화량을 유도할 수 있고, 낙하 거리에 따른 물방울 내부 수소 농도의 변화량을 구할 수 있게 된다. 여기서 낙하하는 물방울의 낙하 속도  $V$ 는 낙하 거리의 함수이므로, 낙하 거리 변화 동안의 물방울의 수소 농도는 식 (13)으로 구할 수 있다.

$$\ln \left( \frac{\left( \frac{P_A}{H_m} - C_{b0} \right)}{\left( \frac{P_A}{H_m} - C_b \right)} \right) = \left( \frac{6}{d_p} \right) \int_0^z \frac{1}{V} \left( \frac{1}{6.16 \times 10^{-5} V} + \frac{1}{\left[ \frac{3.04}{d_p} + 0.903 \left( \frac{V}{d_p} \right)^{1/2} \right] H_m} \right) dz \quad (13)$$

### 3. 수소 기체 흡수에 의한 RCS의 수소 농도 계산

체적제어탱크를 통과하면서 수소 기체를 흡수한 냉각재는 다시 원자로냉각재계통으로 순환되므로, 냉각재의 수소 농도는 초기의 수소 농도에 비해 점차적으로 증가하게 된다. 이를 아래의 mass balance 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} M(C - C_o) &= \dot{m}(C_i - C_o)\Delta t \\ C &= C_o + \frac{\dot{m}\Delta t}{M} (C_i - C_o) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $\dot{m}$  : CVCS로의 유출량 (gal/min)

$C_o$  : 초기의 RCS의 수소 농도 ( $cc(STP) H_2 / kg H_2O$ )

$C_i$  : VCT에서 수소를 흡수한 후의 수소 농도 ( $cc(STP) H_2 / kg H_2O$ )

$C$  : RCS의 최종 수소 농도 ( $cc(STP) H_2 / kg H_2O$ )

식 (14)를 이용하여 일정한 시간이 지난 후 원자로냉각재계통 내 수소 농도가 얼마나 증가하는지를 알아볼 수 있다.

### 4. 수소 농도에 영향을 미치는 인자

#### 1) 수소 압력이 RCS 수소 농도에 미치는 영향

일정한 초기 속도를 가지고 분사된 물방울 입자가 수소를 흡수하면서 체적제어탱크내의 수면에 도달할 때의 수소 농도  $C_b(z)$  인 냉각수는 다시 원자로냉각재계통으로 유입된다. 따라서 원자로냉각재계통 내의 수소 농도는 체적제어탱크의 수소압에 영향을 받게된다.

원자로냉각재계통의 용존 수소 농도를 계산하는데 필요한 기본적인 변수 및 가정은 다음과 같다.

(1) 체적제어탱크내의 용존수소 농도는 물방울이 체적제어탱크를 낙하하면서 수소를 흡수한 수소 농도와 같다.

(2) 단일 물방울에 흡수되는 수소량은 물방울에 용해되어 있는 다른 기체의 분압에 의해서 영향을 받지 않는다.

### 2) 물방울 크기가 수소 흡수량에 미치는 영향

식 (13)에 의하면 물방울 직경이 증가할수록 체적제어탱크 내의 용존수소 농도가 낮아지는 단일 물방울의 용존수소 농도에 미치는 영향이 감소하는 것으로 나타난다. 물방울의 크기가 증가할수록 물방울 표면적 대 물방울 체적비가 감소하기 때문에 단위 시간당 단위 표면적을 통하여 수소를 흡수할 수 있는 양이 감소하기 때문이다.

또한 식 (6)에 의하여 물방울의 크기가 증가할수록 물방울의 낙하 속도는 증가하게 되며, 식 (12)과 식 (13)에 의하여 물방울의 낙하 속도가 증가할수록 단일 물방울의 용존수소 농도에 미치는 영향이 감소한다.

### 3) 분사량이 RCS 수소 농도에 미치는 영향

체적제어탱크로 유입되는 분사량이 증가하면 체적제어탱크 상부 노즐에서의 초기 분사 속도가 증가하게 되므로 식 (12)에 의해서 낮아지는 물방울의 수소 농도가 체적제어탱크 내의 수소 압력에 비하여 낮아질 가능성이 높아진다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 수소 기체 흡수 거동

한국표준형원전 체적제어탱크 공급자가 제공한 냉각재 물방울 입자의 분포도<sup>12)</sup>에 의하면, 1.6 mm 직경의 물방울 입자가 가장 많이 분포한다.

비교를 위하여 체적제어탱크의 분사 노즐에서 분사되는 물방울 크기에 따른 수소 기체의 흡수 거동을 고찰하였다. 노즐에서의 분사 속도는 냉각재가 원자로냉각재계통에서 유출되는 유출유량을 기준으로 계산하여 최소 약 1.0 m/sec로부터 최대 약 5 m/sec까지 바뀌는 것으로 가정한다.

Fig. 1 및 Fig. 2로부터 확인 가능한 결과는 동일한 물방울 크기, 동일한 초기 수소 농도, 동일한 압력 하에서는 물방울의 초기 속도로 인한 물방울의 수소 농도 차이는 크게 발생하지 않는다는 점이다. 초기 속도가 느리면 총괄물질전달계수는 감소하여 단위 시간당 흡수되는 수소량은 감소하나 속도가 늦기 때문에 물방울이 수소 기체에 노출되는 시간(기-액 접촉 시간)이 증가하여 수소 흡수량이 증가된다. 따라서 수면에 도달할 때에는 속도에 의한 농도 차이는 발생하지 않는 것이다.

Fig. 3 및 Fig. 4로부터는 수면에 도달하는 물방울의 수소 농도는 물방울의 크기와 압력에 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있다. 수면에 도달하는 물방울의 수소 농도는 직경 1 mm인 물방울은 직경 2 mm인 경우에 비해 약 1.5배 가까운 수소 흡수 능력을 보여주고 있다.

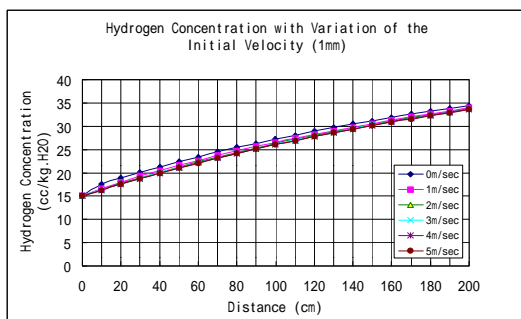


Fig. 1 Hydrogen concentration vs. distance with variation of the initial velocity ( $C_o = 15$  cc/kg  $H_2O$ ,  $P_A = 44.7$  psia) :  $d_p = 1$  mm

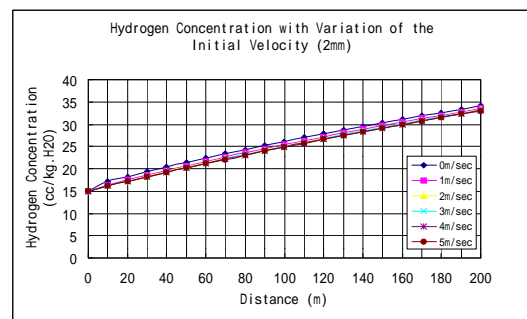


Fig. 2 Hydrogen concentration vs. distance with variation of the initial velocity ( $C_o = 15$  cc/kg  $H_2O$ ,  $P_A = 64.7$  psia) :  $d_p = 2$  mm

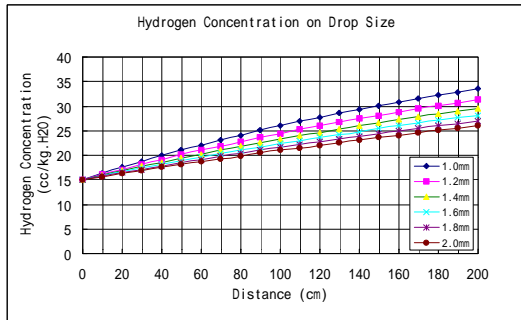


Fig. 3 Hydrogen concentration vs. distance with variation of the drop size ( $C_o = 15 \text{ cc/kg H}_2\text{O}$ ,  $P_A = 44.7 \text{ psia}$ )

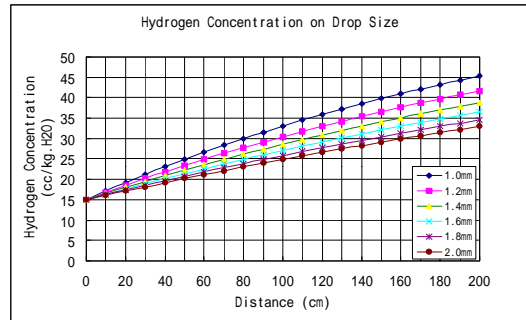


Fig. 4 Hydrogen concentration vs. distance with variation of the drop size ( $C_o = 15 \text{ cc/kg H}_2\text{O}$ ,  $P_A = 64.7 \text{ psia}$ )

## 2. RCS 수소 농도 변화

Fig. 5 및 Fig. 6의 초기 상태는 원자로냉각재계의 수소 농도가  $15 \text{ cc/kg H}_2\text{O}$ 이며, 수소 분압이  $44.7 \text{ psia}$ 인 경우이다. 물방울 직경이  $1 \text{ mm}$ 이고 유량이  $112 \text{ gpm}$ 인 경우 원자로냉각재계의 수소 농도가  $35 \text{ cc/kg H}_2\text{O}$ 에 도달하는데 약 하루가 소요되나, 직경이  $1.2 \text{ mm}$  이상이거나 유량이 최대 유량보다 작은 경우 하루가 지나도 원자로냉각재계의 수소 농도가  $35 \text{ cc/kg H}_2\text{O}$ 에는 도달하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 7로부터 Fig. 9 까지의 초기 상태는 원자로냉각재계의 수소 농도가  $15 \text{ cc/kg H}_2\text{O}$ 이며, 수소 분압이  $64.7 \text{ psia}$ 인 경우이다. 유량이  $84 \text{ gpm}$  이상 흐르면 거의 모든 물방울 직경에 대하여 원자로냉각재계의 수소 농도가  $35 \text{ cc/kg H}_2\text{O}$ 에 도달하는데 하루가 걸리지 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서 원자로냉각재계의 수소 농도를 보다 빠르게 증가시키기 위해서는 수소 분압을 높게 유지하고 물방울의 크기를 최대  $2 \text{ mm}$  이내가 되도록 하는 것이 필요하다.

Fig.10부터 Fig. 13 까지를 분석해보면 원자로냉각재계의 수소 농도를 증가시키는 효율적인 방법은 동일한 수소 분압인 경우 냉각수량을 증가시키는 것이다.

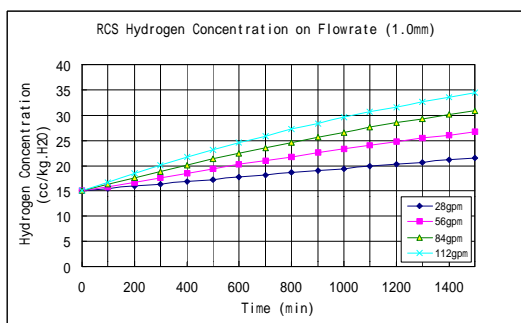


Fig. 5 RCS hydrogen concentration on flowrate ( $C_o = 15 \text{ cc/kg H}_2\text{O}$ ,  $P_A = 44.7 \text{ psia}$ ) :  $d_p = 1.0 \text{ mm}$

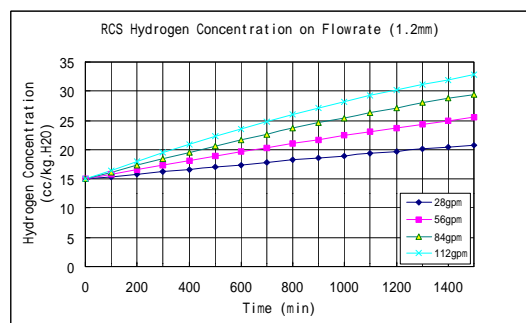


Fig. 6 RCS hydrogen concentration on flowrate ( $C_o = 15 \text{ cc/kg H}_2\text{O}$ ,  $P_A = 44.7 \text{ psia}$ ) :  $d_p = 1.2 \text{ mm}$

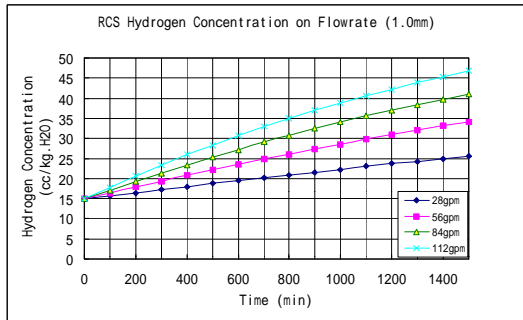


Fig. 7 RCS hydrogen concentration on flowrate  
( $C_o = 15 \text{ cc /kg H}_2\text{O}$ ,  $P_A = 64.7 \text{ psia}$ ) :  $d_p = 1.0 \text{ mm}$

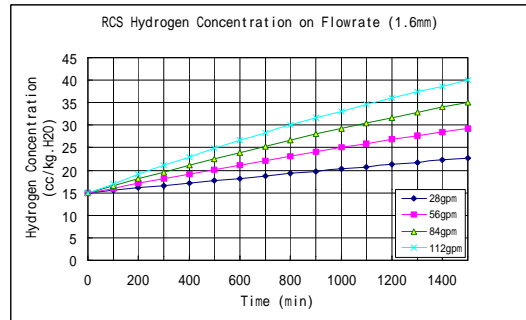


Fig. 8 RCS hydrogen concentration on flowrate  
( $C_o = 15 \text{ cc /kg H}_2\text{O}$ ,  $P_A = 64.7 \text{ psia}$ ) :  $d_p = 1.6 \text{ mm}$

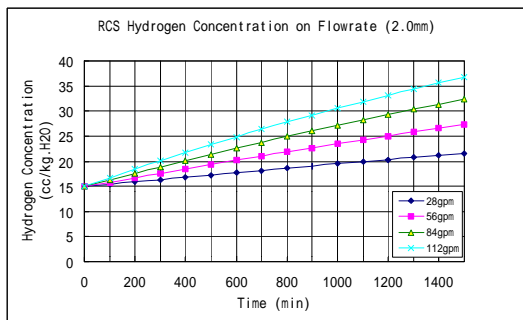


Fig. 9 RCS hydrogen concentration on flowrate  
( $C_o = 15 \text{ cc /kg H}_2\text{O}$ ,  $P_A = 64.7 \text{ psia}$ ) :  $d_p = 2.0 \text{ mm}$

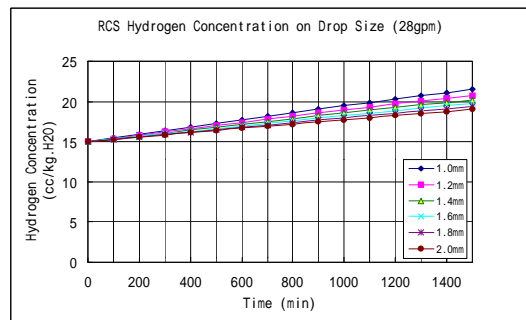


Fig. 10 RCS hydrogen concentration on drop size  
( $C_o = 15 \text{ cc /kg H}_2\text{O}$ ,  $P_A = 44.7 \text{ psia}$ ) :  $\dot{m}_i = 28 \text{ gpm}$

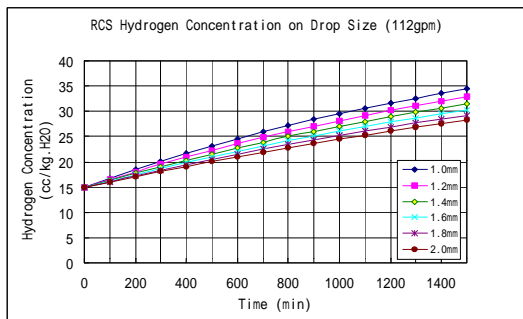


Fig. 11 RCS hydrogen concentration on drop size  
( $C_o = 15 \text{ cc /kg H}_2\text{O}$ ,  $P_A = 44.7 \text{ psia}$ ) :  
 $\dot{m}_i = 112 \text{ gpm}$

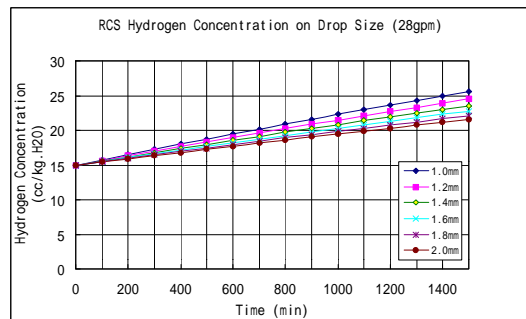


Fig. 12 RCS hydrogen concentration on drop size  
( $C_o = 15 \text{ cc /kg H}_2\text{O}$ ,  $P_A = 64.7 \text{ psia}$ ) :  
 $\dot{m}_i = 28 \text{ gpm}$

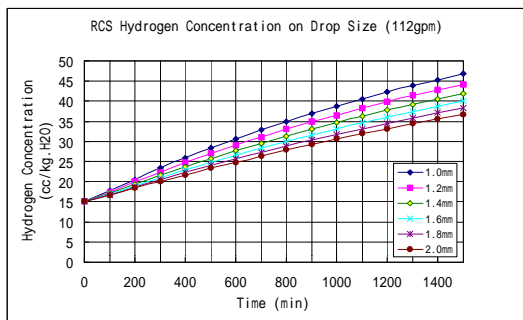


Fig. 13 RCS hydrogen concentration on drop size  
( $C_o = 15 \text{ cc /kg H}_2\text{O}$ ,  $P_A = 64.7 \text{ psia}$ ) :  $\dot{m}_i = 112 \text{ gpm}$

#### IV. 결 론

낙하하는 단일 물방울에 대하여 Henry의 법칙 및 이중격막 이론을 적용한 수소 흡수 모델을 이용하여 한국표준형원전 체적제어탱크 설계의 적절성 여부를 확인하였다. Henry의 법칙 및 이중격막 이론을 적용한 수소 흡수 모델에 대한 수식을 유도하여 이를 수치해석적으로 계산한 결과 평균 직경 1.6 mm의 물방울을 분사시키도록 설계된 체적제어탱크 상부 노즐의 설계는 적절하다는 것을 확인 할 수 있으며, 운전 범위의 분사량도 원자로냉각재계통의 수소 농도를 일정 운전 범위 (25 - 50 cc (STP)/kg H<sub>2</sub>O) 이내로 유지시키기에 충분하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 현재의 체적제어탱크 노즐 및 분사량의 설계는 적절하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 체적제어탱크의 높이도 물방울이 낙하하면서 수소를 흡수할 수 있는 충분한 거리를 제공한다는 것을 알 수 있었다.

원자로냉각재계통의 초기 수소 농도가 너무 낮은 경우는 체적제어탱크의 수소 분압 및 분사량의 조절만으로는 원자로냉각재계통의 수소 농도를 운전 범위 이내로 유지시키기에 불충분하다. 그러므로 기동운전 초기에 수소 농도를 15 cc (STP)/kg H<sub>2</sub>O 이상으로 유지한 후 체적제어탱크의 수소 분압 및 분사량을 조절하여 원자로냉각재계통의 수소 농도를 증가시키는 현재의 운전 방식은 적절하다고 판단된다.

원자로냉각재계통의 수소 농도를 효율적으로 증가시키기 위해서는 노즐의 설계를 적절하게 하여 가능하면 물방울의 크기를 작게(~1.2 mm)하는 방식이 효과적이며, 수소 분압을 증가시키는 방법도 있다. 또한 유출유량을 증가시키는 방법도 효율적이다. 현재 원자력 발전소의 유출유량은 본 논문에서 가정한 값보다 큰 유출유량을 적용하므로 타당한 설계가 이루어졌다고 판단된다.

#### V. 참고문헌

1. R. S. Pathania, A. R. McIlree, "The Effect of Hydrogen on Stress Corrosion Cracking of Alloy 600 in 360 °C Water." In Proceedings of the Thirds International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Traverse City, Michigan, August 30 - September 3, 1988.
2. W. G. Burns, "Suppression by Dissolved Hydrogen of Radiolysis of Water by Mixed Radiation Fields". AERE-M2702, 1975.
3. G. Economy, R. T. Jacko, J. A. Begly, and F. W. Pement, "Influence of Hydrogen Partial Pressure on IGSCC Behavior of Alloy 600 Tubing in 360 °C Water or 400 °C Steam", Paper no, NACE Corrosion 1987, San Francisco, California, March 9-13, 1987.
4. W. L. McCabe, J. C. Smith, "Unit Operation for Chemical Engineering", 3rd Edition, p150-158, McGraw-Hill, NewYork, 1976.
5. Pruppacher, H. R. and Klett, J. D., "Microphysics of Clouds and Precipitation", D. Reidel Publeshing Company, Boston, 1980.
6. Kaji R., Y. Hishinuma, and H. Kuroda, "SO<sub>2</sub> Absorption by Water Drops", J. Chem Eng. Japan, 18(2), 169, 1985.
7. Robert H. Perry and Cecil H. Chilton, "Chemical Engineers' Handbook", 5th Edition, McGraw-Hill, 1988.
8. Cohen, P., "Water Coolant Technology of Power Reactors", American Nuclear Society, p107-109, 1980 reprinting.
9. Danckwerts, P. V., "Gas-Liquid Reactions", McGraw Hill, NewYork, 1970.
10. Frossling N, "The Evaporation of Falling Drops", Gerlands Beite. Geophys. 52, 170, 1938.
11. Robert. F. Adamowice, "A Model for The Reversible Washout of Sulfur Dioxide, Ammonia and Carbon Dioxide from a Polluted Atmosphere and The Production of Sulfates in Raindrops", Atm. Environ., 13, 105, 1979.
12. Skelland A. H. P., "Diffusional Mass Transfer", p276, John Wiley, NewYork, 1974.
13. E. R. Altwicker, and C. E. Lindhjem, "Absorptions of Gases into Drops", A.I.Ch.E.J., 34, 1988.
14. Handlos, A. E., and T. Baron, "Mass and Heat Transfer from Drops in Liquid Extraction", A.I.Ch.E.J., 3, 127, 1957.
15. J. M. Pater and Robert M.Wellek, "Handlos and Baron Model : Short Contact Times", A.I.Ch.E.J., 13, 384, 1988.