

## A Study on the Collection Efficiency of A Tritium Bubbler

### 삼중수소 버블리의 포집효율에 대한 고찰

Jae-sin Shin, Seung-Ho Lee and Kwang-Ryeol Park\*

Korea Hydro & Nuclear Power Co. Wolsong Plant II Naa 260, Yangnam, Gyeongju, Gyeongbuk

\* Korea Nuclear Engineering Co. Yangnam 260, Gyeongju, Gyeongbuk

신재신, 이승호, 박광렬\*

한국수력원자력(주) 월성 제2발전소 경북 경주시 양남면 나아리 260

\* 한국원자력 엔지니어링(주) 경북 경주시 양남면 나아리 260

#### Abstract

Collection Efficiency of a tritium bubbler being used at domestic nuclear power plants was studied. Equilibrium is attained while tritium vapour in air passes through the bubbler. When a lot of gas sample passes through the bubbler, the tritium concentration of water is raised and volume of water is decreased or increased. These phenomena give effect to the collection efficiency. Estimation of the tritium concentration of the water agreed with our experiments. If relative humidity is higher than 0.5, the efficiency becomes lower than 1 and if relative humidity is lower than 0.5, the efficiency becomes higher than 1, provided collected tritium is evaluated with original volume of the water. Though the relative humidity is not 0.5, the efficiency can be maintained near 1 by making

$$\frac{\text{saturated water vapour (cm}^3\text{/cm}^3\text{)} \times \text{volume of gas sample (cm}^3\text{)}}{\text{volume of water (cm}^3\text{)}} \text{ small.}$$

**Key word** : collection Efficiency, tritium concentration, tritium bubbler

#### 요약

국내 원전에서 공기 중 삼중수소 농도를 평가하기 위해 사용하는 삼중수소 버블리의 포집효율에 대하여 고찰하였다. 수증기 형태인 공기 중 삼중수소는 기포가 물을 통과하는 동안 평형농도에 도달하게 된다. 많은 양의 기체시료를 통과시킬 경우 포집수의 삼중수소 농도가 높아지고 포집수가 감소하거나 증가하는 현상이 발생하여 포집효율에 영향을 미치게 된다. 이러한 영향을 고려한 포집수의 예측농도는 실측값과 잘 맞았다. 통상적인 방식과 같이 초기 포집수량을 이용하여 삼중수소 포집량을 평가할 경우 기체시료의 상대습도가 0.5보다 높으면 포집효율은 1보다 낮아지고 상대습도가 0.5보다 낮으면 포집효율은 1보다 높아진다. 상대습도가 0.5가 아니더라도  $\frac{\text{포화수증기량} \times \text{기체통과량}}{\text{포집수량}}$  을 작게 하면 포집효율을 1에 가깝게 유지할 수 있다.

**중심단어** : 포집효율, 삼중수소 농도, 삼중수소 버블리

## 서론

국내 원전에서는 공기 중 삼중수소 농도를 평가하기 위해 물을 포집용액으로 하는 버블러(또는 Gas Washing Bottle)를 이용하고 있다. 수증기 형태인 삼중수소는 기포가 버블러를 통과하는 동안 물에 포집되고 삼중수소가 포집된 물은 액체섬광계수기(LSC)를 이용하여 분석된다.

버블러의 삼중수소 포집효율은 효율보정이 필요 없을 정도로 충분히 높다는 것이 경험적으로 알려져 있었다. 그러나 버블러의 포집효율은 기체 시료의 유량에 영향을 받는 듯 했으며 포집수가 증발하는 효과가 포집효율에 미치는 영향도 불분명하였다.

이 연구에서는 버블러의 삼중수소 포집효율을 실험을 통해 확인하였고 포집효율에 영향을 미치는 인자들을 이론적으로 고찰하였다.

### 기포 경계면의 농도 평형과 포집용액 농도

버블러의 기체 포집효율은 기체물질의 확산 속도와 관련이 있다. 기포가 용액을 통과하는 시간에 비해서 기체 물질의 확산 속도가 충분히 빠라 대부분 경계면에 도달할 수 있으며 경계면에 닿는 즉시 용액에 포집된다면 포집효율은 높을 것이다.

확산을 통해 단위 시간에 단위 면적을 통과하는 물질의 양은 Fick의 법칙으로 표현할 수 있다.

$$N = -D \frac{\partial C}{\partial x} \left( \frac{\text{mole}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right) \quad (1)$$

$$N = \text{분자 flux (cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

$$C = \text{물질 농도 (mol/cm}^3\text{)}$$

$$D = \text{확산계수 (cm}^2\text{/s)}$$

$$= \frac{1}{3} \ell v$$

$$\ell = \text{기체 분자의 평균 자유 행정 (cm)}$$

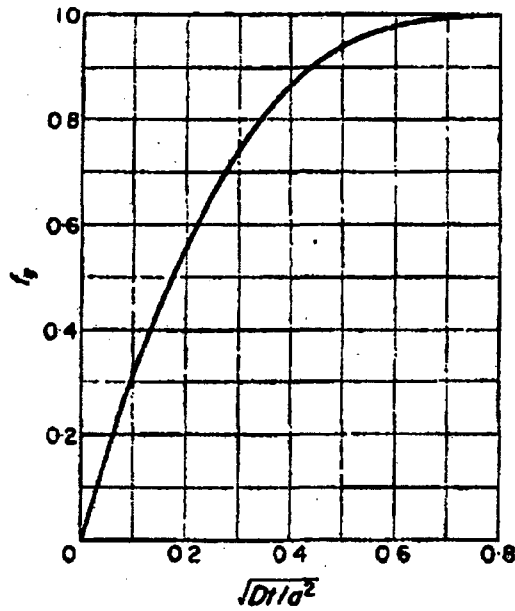
$$v = \text{기체 분자의 평균 운동 속도 (cm/s)}$$

N과 C의 단위에서 mol은 물질의 양을 나타내는 다른 단위로 바꾸어도 무방하다. 구형의 기포에서 확산되어 용액에 포집되는 기체 물질의 농도는 다음의 편미분 방정식과 적절한 경계조건을 만족하는 해를 구하여 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial C(r,t)}{\partial t} - D \nabla^2 C(r,t) = 0 \quad (2)$$

포집하려는 물질이 액체에 매우 잘 녹는 물질일 경우 포집율은 기체 영역에서의 확산에 의해 결정되므로 Seymour Calvert와 Walter Workman의 gas phase controlling case 계산 방법을 따를 수 있다.

<그림 1>은 gas phase controlling case일 때 gas phase 농도와 liquid phase 농도가 평형에 도달하게 되는 정도를 나타낸 그래프이다. D(cm<sup>2</sup>/s)는 확산계수, t(s)는 기포의 통과시간, a(cm)는 기포의 반지름이다. 이 그래프는 초기의 gas phase 농도가 균일하고 liquid phase 농도가 상수인 구형 경계면에서의 확산에 관한 미분방정식의 해를 표현한 것이다.



<그림 1>

기체시료가 버블러를 통과하는 동안에 농도 평형에 도달하는 정도가 결정되면 기체 물질의 포집효율은 다음과 같이 정해진다.

$$F = f_g \left( \frac{p_1 - HC}{p_1} \right) \quad (3)$$

$F$  = 포집효율

$f_g$  = 평형 도달율

$$= \frac{p_1 - p_2}{p_1 - HC}$$

$p_1$  = 버블러 통과 전 기체물질의 분압 (atm)

$p_2$  = 버블러 통과 후 기체물질의 분압 (atm)

$H$  = 헨리상수 ( $\frac{\text{atm}}{\text{mol/cm}^3}$ )

$C$  = liquid phase 농도 ( $\text{mol/cm}^3$ )

HC는 평형에 도달했을 때 gas phase의 분압이다. 포집할 물질을 포함하고 있지 않은 순수한 용액이 사용될 경우 초기에는 C는 0이므로 포집효율(F)은 평형 도달율( $f_g$ )과 같다. 이 때  $f_g$ 가 1이라면 포집효율은 100%가 된다. 그러나 시료의 포집기간이 길어지고 용액에 포집된 기체물질이 계속 축적되어 농도(C)가 높아지게 되면 포집효율은 포집 용액의 농도(C)에 따라 달라지게 된다.

평형 도달율이 1인 버블러의 liquid phase 농도는 버블러에 유입되는 기체시료 중 포집될 물질의 분압이 일정하다고 가정할 때 다음과 같이 구해진다.

$$dn = -\frac{Hn}{RTV_l} dx + \frac{p_1}{RT} dx \quad (4)$$

$$n = \left(n_o - \frac{p_1 V_l}{H}\right) e^{-\frac{H}{RTV_l}x} + \frac{p_1 V_l}{H} \quad (5)$$

$$C = \left(C_o - \frac{p_1}{H}\right) e^{-\frac{H}{RTV_l}x} + \frac{p_1}{H} \quad (6)$$

$n$  = 포집량 (mol)

$R$  = 기체 상수 ( $\frac{\text{atm} \cdot \text{cm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ )

$T$  = 기체 온도 (K)

$V_l$  = 용액 체적 ( $\text{cm}^3$ )

$x$  = 기체 시료 체적 ( $\text{cm}^3$ )

$n_o$  = 초기 포집량 (mol)

$C_o$  = 초기 농도 ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )

용액의 농도  $C$ 는 포화농도를 향해 가는 전형적인 지수함수를 그리게 된다. 시료 포집을 계속해서 용액의 농도가 기체시료의 분압  $p_1$ 과 평형을 이루는  $\frac{p_1}{H}$ 에 도달하게 되면 포집효율은 0이 된다.

용액이 증발하거나 조금씩 보충되어서  $V_l$ 이 상수가 아닐 경우에는 문제가 좀 더 복잡해진다. 기체가 버블러를 통과하는 동안 수증기 형태의 삼중수소가 평형 농도에 도달하게 된다면 그것은 포집용액이 물일 경우 버블러를 통과하는 동안 기포 속의 수증기량이 포화수증기량에 도달하게 될 것을 뜻하기도 하다. 버블러를 통과하기 전에 기체의 수증기량이 포화수증기량이 아니었다면 물은 일정한 속도로 증발하면서 감소하게 될 것이다. 용액의 온도가 유입되는 기체시료의 온도보다 낮게 유지되고 있을 경우에는 버블러를 통과한 기체시료의 포화수증기량이 버블러를 통과하기 전의 수증기량보다 오히려 적을 수도 있다. 이런 경우에는 일정한 속도로 물이 증가될 것이다. 어느 경우든 물의 양은 (7)식과 같이 통과하는 기체의 체적에 따라 선형적으로 감소하거나 증가한다.

$$V_l = \frac{M}{\rho_l RT} (p_{h1} - p_{h2})x + V_{lo} \quad (7)$$

$M$  = 분자량 (g/mol)

$\rho_l$  = 액체 밀도 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$p_{h1}$  = 버블러 통과 전 수증기 분압 (atm)

$p_{h2}$  = 버블러 통과 후 수증기 분압 (atm)

이 경우 (4)식은 (8)식과 같이 변경되어야 한다.

$$dn = - \frac{Hn}{RT \left\{ \frac{M}{\rho_l RT} (p_{h1} - p_{h2})x + V_{lo} \right\}} dx + \frac{p_1}{RT} dx \quad (8)$$

$$n = \frac{\frac{p_1 M}{RT \rho_l} (p_{h1} - p_{h2})x + p_1 V_{lo}}{H + \frac{M}{\rho_l} (p_{h1} - p_{h2})}$$

$$+ \left( n_o - \frac{p_1 V_{lo}}{H + \frac{M}{\rho_l} (p_{h1} - p_{h2})} \right) \left( \frac{RTV_{lo}}{\frac{M}{\rho_l} (p_{h1} - p_{h2})x + RTV_{lo}} \right)^{\frac{H}{\frac{M}{\rho_l} (p_{h1} - p_{h2})}} \quad (9)$$

$$C = \frac{p_1}{H + \frac{M}{\rho_l} (p_{h1} - p_{h2})} + \left( C_o - \frac{p_1}{H + \frac{M}{\rho_l} (p_{h1} - p_{h2})} \right) \left( \frac{V_{lo}}{\frac{M}{RT\rho_l} (p_{h1} - p_{h2})x + V_{lo}} \right)^{\frac{H}{\frac{M}{\rho_l} (p_{h1} - p_{h2})} + 1}$$

$$= \frac{p_1}{\frac{Mp_{h1}}{\rho_l}} + \left( C_o - \frac{p_1}{\frac{Mp_{h1}}{\rho_l}} \right) \left( \frac{V_{lo}}{\frac{M}{RT\rho_l} (p_{h1} - p_{h2})x + V_{lo}} \right)^{\frac{p_{h1}}{p_{h1} - p_{h2}}} \quad (10)$$

$\frac{p_h}{RT}$ 는 공기 중 삼중수소 농도(mol/cm<sup>3</sup>)이며  $\frac{Mp_h}{RT\rho_l}$ 는 공기 중 수증기량(cm<sup>3</sup>w/cm<sup>3</sup>g)이므로 위 식의 양변에 삼중수소의 비방사능(Bq/mol)을 곱하면 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$C = \frac{C_{g1}}{h_{rel}h_{abs}} + \left( C_o - \frac{C_{g1}}{h_{rel}h_{abs}} \right) \left( \frac{V_{lo}}{(h_{rel} - 1)h_{abs}x + V_{lo}} \right)^{\frac{h_{rel}}{h_{rel} - 1}} \quad (11)$$

$C_o$  = 포집수 중 삼중수소 농도 (Bq/cm<sup>3</sup>)

$C_{g1}$  = 기체 중 삼중수소 농도 (Bq/cm<sup>3</sup>)

$h_{rel}$  = 상대 습도

$h_{abs}$  = 포화 수증기량 (cm<sup>3</sup>w/cm<sup>3</sup>g)

이 식은 포집 용액으로 물을 사용하며 평형 도달율이 1인 삼중수소 버블러의 포집수 중 삼중수소 농도를 나타낸다.

#### 버블러 포집효율 측정

버블러를 통과하는 기포의 직경은 넓은 범위의 기체유량 조건에서 0.35~0.45cm 이며 직경이 0.2cm 이상인 한 개의 기포가 물속에서 상승하는 속도는 24cm/s로 거의 일정하다고 한다. 월성 제2발전소 기체유출물감시기에 설치된 버블러를 예로 들면 물을 200mL 채웠을 때 평균 기포 발생 수심은 10.7cm 정도가 되므로 기포가 물을 통과하는 데 걸리는 시간은 0.45sec일 것으로 계산된다.

그러나 동시에 많은 기포가 통과할 경우 기포를 따라 상승하는 물의 흐름에 의해 기포의 상승 속도가 좀 더 빨라질 수도 있으며 다른 요인에 의한 영향도 있을 수 있으므로 기포의 물 통과시간을 실측해 볼 필요가 있다.

기포가 물을 통과하는 시간은 버블링이 되는 동안 수위가 상승하는 정도, 즉 물 속에 체류 중인 공기의 부피를 측정하면 쉽게 계산할 수 있다.

$$A \times \Delta y = f \times t \tag{12}$$

$$t = \frac{A \times \Delta y}{f} \tag{13}$$

- A = 버블러 단면적
- Δy = 기포에 의한 수위변화
- f = 기체 유량
- t = 기포의 통과시간

<표 1>에 나타낸 것과 같이 월성 제2발전소에서 사용 중인 버블러의 경우 기포가 물을 통과하는데 걸리는 시간(t)은 대략 0.4sec이다.

<표 1> 월성 제2발전소 버블러의 통과시간

버블러 단면적 (cm <sup>2</sup> )	기체 유량 (cm <sup>3</sup> /s)	수위 변화량 (cm)	통과시간 (s)
16.7	11.1	0.3	0.45
	27.0	0.6	0.37
	37.0	0.85	0.38

수증기 분자의 직경을 공기 분자의 평균 직경과 같은 3.7A이라고 가정하면 25℃ 1기압일 때 공기 중 삼중수소 수증기 분자의 평균 자유 행정은 0.067μm이고 평균 운동 속도는 454m/s이므로 확산계수(D)는 0.1cm<sup>2</sup>/s이다. 기포 직경(2a)을 0.4cm라고 하면  $\sqrt{Dt/a^2}$ 는 1이 된다. <그림 1>의 그래프를 통해 알 수 있듯이  $\sqrt{Dt/a^2}$ 이 0.7 이상이면 거의 완전한 평형에 도달하게 된다. 이렇게 기포가 물을 통과하는 동안에 기체시료 중의 삼중수소 농도가 완전한 평형농도에 도달하는 버블러는 (11)식을 이용하여 포집수의 삼중수소 농도를 예측할 수 있다.

<표 2>는 월성 제2발전소에서 사용 중인 것과 같은 버블러를 3단으로 직렬 연결하여 삼중수소를 포집한 후 측정된 포집수의 삼중수소 농도이다. 각 버블러의 포집용액은 순수 200cm<sup>3</sup>이었으며 포집기간 동안 기체 시료의 온도는 25℃ 내외였다.

후단으로 갈수록 버블러에 포집된 삼중수소 농도가 급격히 낮아져서 세 번째 버블러에서는 첫 번째 버블러 삼중수소 농도의 1%에도 미치지 못하는 수준이 되므로 직렬로 연결된 세 개의 버블러에 포집되지 않고 통과되는 삼중수소의 양은 무시할 수 있을 정도로 적을 것이다. 그러므로 기체시료에 포함되어 있었던 삼중수소의 양은 세 버블러에 포집된 삼중수소의 합과 같다. 세 버블러에 포집된 삼중수소의 양을 기체 시료량으로 나누면 기체 시료 중의 삼중수소 농도를 얻을 수 있

다.

(11)식을 이용하여 계산한 삼중수소 농도 예측값은 측정값과 잘 일치하였다. 포화수증기량( $h_{abs}$ )은 25°C일 때의 포화수증기량인  $2.3E-05$  ( $cm^3_w/cm^3_g$ )을 적용하였고 포집수 변화량으로 추정된 기체시료의 상대습도( $h_{rel}$ )는 28~43%이었다.

첫 번째 버블러에 포집된 삼중수소량을 전체 삼중수소량으로 나누어 계산한 포집효율은 89~96%이다. 그러나 월성 제2발전소에서 삼중수소 배출량을 평가할 때처럼 버블러에 포집된 삼중수소의 양을 계산할 때는 통상적으로 줄어들기 전의 포집수량을 적용하므로 운영상의 포집효율은 다른 방법으로 계산하여야 한다. 첫 번째 버블러의 삼중수소 농도에 초기 포집수량( $200cm^3$ )을 곱하고 전체 삼중수소 포집량으로 나눈 운영상의 포집효율은 103~104%이다.

기체 시료에 포함된 모든 삼중수소가 첫 번째 버블러에 전부 포집되지 못함에도 불구하고 운영상 포집효율이 오히려 1보다 클 수 있는 것은 용액이 줄어들음으로 인해 용액의 삼중수소 농도가 빠르게 상승하기 때문이다. 포집수가 증발되는 현상은 포집효율을 떨어뜨리는 요인이지만 초기 포집수량을 적용하는 운영상의 포집효율은 포집수가 많이 증발할수록 오히려 높아진다.

<표 2> 월성 제2발전소 버블러 포집효율

시료 유량 (LPM)	시료 통과량 (L)	버블러 구분	포집수량 (mL)	삼중수소 농도 (Bq/mL)	삼중수소 예측농도 (Bq/mL)	포집 효율	운영상 포집효율
0.48	729	1단	188	150.0	148.8	0.96	1.03
		2단	208	4.7	-		
		3단	197	0.2	-		
0.90	1,257	1단	183	270.7	267.2	0.94	1.03
		2단	196	15.7	-		
		3단	198	0.7	-		
1.72	2,234	1단	171	359.4	351.8	0.89	1.04
		2단	191	37.4	-		
		3단	193	2.8	-		

**포집 효율을 결정하는 인자**

포집용액의 체적이 일정하고 용액의 농도 상승에 의한 포집효율의 감소가 없는 버블러를 이상적인 버블러라고 할 수 있다. (11)식의 삼중수소 농도와 이상적인 버블러의 삼중수소 농도를 비교해 보면 운영상 포집효율이 1보다 클 것인지 작을 것인지를 알 수 있다. 이상적인 버블러의 포집수 삼중수소 농도는  $C_o + C_{g1}x/V_{lo}$ 이므로 용액의 초기 삼중수소 농도  $C_o$ 를 0이라고 하면 실제 버블러의 삼중수소 농도와 이상적인 버블러의 삼중수소 농도 차이는 (18)식과 같다.

$$C_{real} - C_{ideal} = \frac{C_{g1}}{h_{rel}h_{abs}} \left( 1 - \left( \frac{V_{lo}}{(h_{rel} - 1)h_{abs}x + V_{lo}} \right)^{\frac{h_{rel}}{h_{rel} - 1}} \right) - \frac{C_{g1}}{V_{lo}} x \quad (14)$$

$$\frac{d}{dx} (C_{real} - C_{ideal}) = \frac{C_{g1}}{V_{lo}} \left[ \left( \frac{V_{lo}}{(h_{rel} - 1)h_{abs}x + V_{lo}} \right)^{\frac{1-2h_{rel}}{1-h_{rel}}} - 1 \right] \quad (15)$$

상대습도  $h_{rel}$ 가 0.5보다 작으면  $0 < x < \frac{-V_{lo}}{(h_{rel} - 1)h_{abs}}$  인 구간에서 (14)식의 도함수인 (15)식은 항상 양수이므로 (14)식은 증가함수이다. 기체 통과량(x)이 적을 때는 버블러의 삼중수소 농도가 이상적인 버블러의 삼중수소 농도와 거의 같지만 기체 통과량이 많을수록 이상적인 버블러의 삼중수소 농도보다 높아지게 된다. 즉 포집효율이 1보다 커지게 된다. 반대로  $h_{rel}$ 가 0.5보다 크면 포집효율은 1보다 작아지며  $h_{rel}$ 가 0.5이면 포집효율은 이상적인 버블러와 같이 항상 1이 된다.

포집효율(F)은 (16)식과 같이 상대습도( $h_{rel}$ )와  $\frac{\text{포화수증기량}(h_{abs}) \times \text{기체통과량}(x)}{\text{포집수량}(V_{lo})}$ 의 함수로도 표현될 수 있다.

$$F = \frac{1}{h_{rel}X} \left[ 1 - \{1 + (h_{rel} - 1)X\}^{\frac{h_{rel}}{1-h_{rel}}} \right] \quad (16)$$

$$X = \frac{h_{abs}x}{V_{lo}}$$

상대습도가 0.5와 차이가 날수록, 또는  $\frac{h_{abs}x}{V_{lo}}$ 이 클수록 포집효율은 1에서 멀어진다. 기체시료 중의 삼중수소 농도( $C_{g1}$ )는 (16)식에 들어가 있지 않으므로 포집효율과는 관련이 없음을 알 수 있다.

포집효율이 1보다 크다는 것은 곧 공기 중 삼중수소 농도가 보수적으로 평가됨을 의미한다. 공기 중 삼중수소 농도가 보수적으로 평가될 것인지 그 반대가 될 것인지는 기체 시료의 상대습도에 의해 결정된다고 할 수 있다.

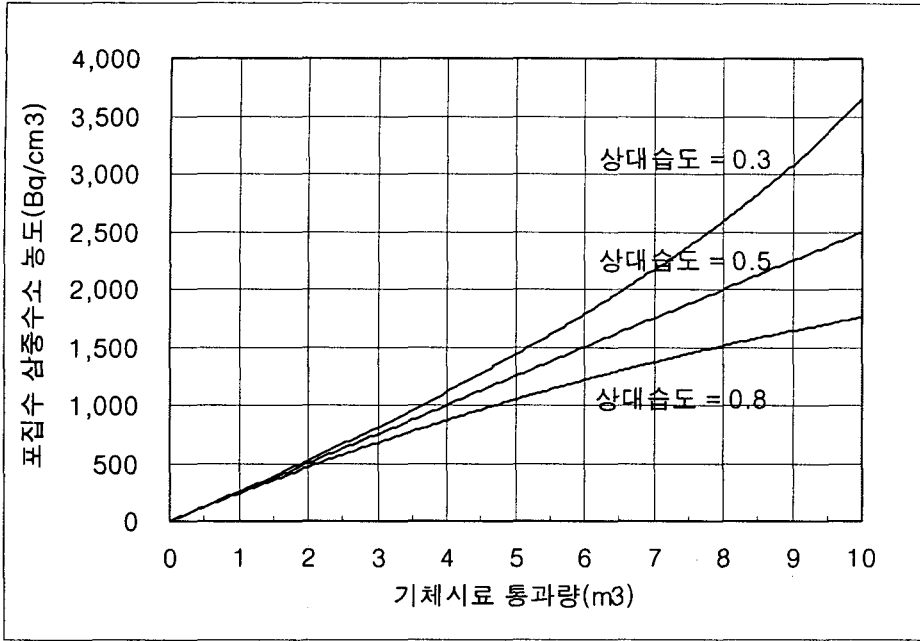
여기에서 상대습도는 통상적인 의미의 상대습도와 약간 다른 의미를 가진다. 이것은 버블러 전·후단의 수증기량의 비 즉, 버블러를 통과하기 전 기체시료의 수증기량을 버블러를 통과한 후의 포화수증기량으로 나눈 값을 의미한다.

포화수증기량은 온도에 의해 결정되는 값이고 압력과는 관련이 없지만 버블러의 내부 압력이 떨어지면 같은 양의 기체시료가 통과하더라도 기포의 체적이 늘어나 수증기량이 높아지는 효과가 발생하므로 여기에서 포화수증기량은 온도와 압력에 관계되는 값이다. 그러므로 버블러 전·후단에서 온도와 압력이 같지 않으면 버블러 전·후단의 수증기량 비는 상대습도와는 다른 값이 된다.

<그림 2>는 (11)식으로 계산한 버블러 포집수의 삼중수소 농도이다. 포집수량은  $200\text{cm}^3$ , 포화수증기량은  $2.3\text{E}-05 \text{ cm}^3_w/\text{cm}^3_g$ , 기체시료 삼중수소 농도는  $0.05\text{Bq}/\text{cm}^3$ 을 적용하였다.

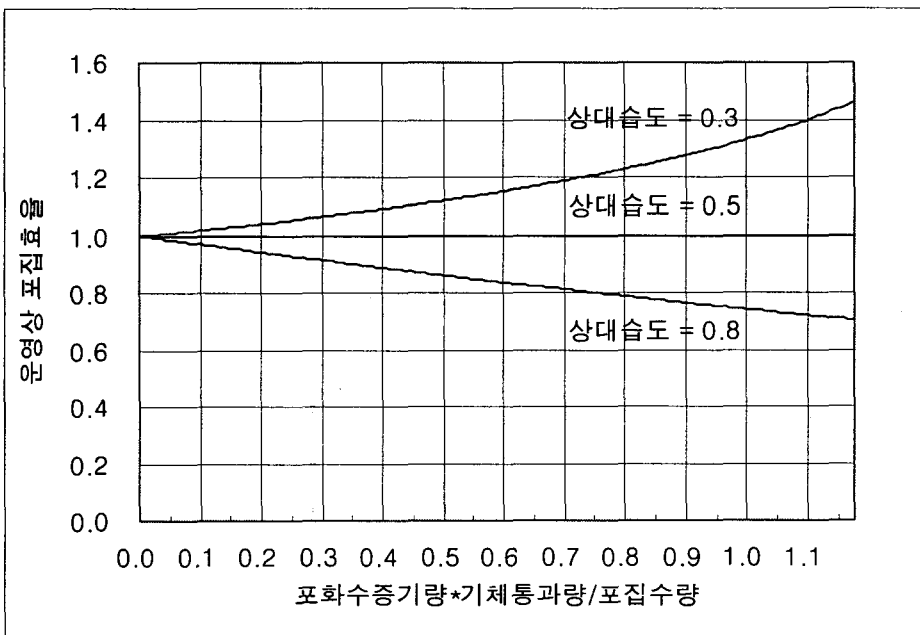
상대습도가 0.5 미만일 때 삼중수소 농도는 이상적인 버블러의 삼중수소 농도(상대습도 = 0.5)보다 높고 기체시료 통과량이 증가함에 따라 점점 가파르게 상승함을 확인할 수 있다. 상대습도가 0.5보다 높을 경우에는 삼중수소 농도가 이상적인 버블러의 삼중수소 농도보다 낮으며 기체시료 통과량이 증가함에 따라 상승 속도가 점점 완만해 진다.





<그림 2>

<그림 3>은 <그림 2>의 삼중수소 농도일 때의 운영상 포집효율을 구하여 나타낸 그래프이다. 상대습도가 0.5가 아닐 경우  $\frac{\text{포화수증기량} \times \text{기체통과량}}{\text{포집수량}}$  이 증가할수록 포집효율이 1에서 멀어지는 것을 잘 알 수 있다.



<그림 3>

## 결론

버블러의 삼중수소 포집효율이 충분히 높기 위해서는 기포가 물을 통과하는 동안에 삼중수소 농도가 평형에 도달하여야 한다. <그림 1>의 그래프에 의하면 기포가 물을 통과하는 시간이 월성 제2발전소 버블러의 절반인 0.2s 밖에 되지 않더라도 삼중수소 농도가 평형에 도달하게 됨을 알 수 있다. 그러므로 대부분의 다른 버블러에서도 삼중수소 포집효율은 충분히 높을 것으로 예상된다.

포집효율에 영향을 미치는 인자에 대한 고찰의 결론은 삼중수소 포집효율은 버블러의 성능이 아니라 포집수량, 온도, 압력, 상대습도 그리고 기체 통과량에 의해 결정된다는 것이다. 상대습도가 0.5일 경우 포집효율은 1이 된다. 상대습도가 0.5 이상이면 포집효율이 1보다 낮아지고 상대습도가 0.5 이하이면 포집효율이 1보다 높아진다.

상대습도가 0.5가 아닐 경우에도  $\frac{\text{포화수증기량} \times \text{기체통과량}}{\text{포집수량}}$  를 작게 하면 공기중 삼중수소 농도 평가의 오차를 줄일 수 있다.  $\frac{\text{포화수증기량} \times \text{기체통과량}}{\text{포집수량}}$  을 작게 하려면 되도록 포집수량을 많게 하고 기체 통과량을 적게 하여야 하지만 삼중수소 분석의 통계오차와 기체유량 측정의 오차를 고려하여야 한다.

## 참고문헌

1. D. Campling, P. Machet, B. Patel, P. Schofield. Tritium-in-Air "Bubbler" Samplers and Internal Radiation Doses at JET. Fusion Science Technology Vol 41. May 2002.
2. A. M. Valentine. An Investigation of a Bubbler Tritium Sampler. LA-3916. US Atomic Energy Commission. Jul 1968.
3. 박준범, 진광수, 박효열, 김혜경, 유병길: 3차원 구면 대칭계에 대한 기체/유체의 확산 연구. 응용물리 Vol 9, No 3. 1996년 5월.
4. S. Calvert, W. Workman. Estimation of Efficiency for Bubbler-type Gas Absorbers. Talanta Vol 4, No 2. 1996.