

## 자연증발에 의한 극저준위 방사성 폐액 처리장치의 모형 개발에 관한 연구

황두성 · 주동표 · 김영욱

아주대학교 공과대학 화학공학과  
(1990년 2월 15일 접수, 1990년 8월 16일 채택)

### A Mathematical Model for Very Low Radioactive Liquid Waste Treatment by Natural Evaporation

Doo Seong Hwang, Dong Pyo Ju and Young Wook Kim

Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Ajou University  
(Received 15 February 1990; accepted 16 August 1990)

#### 요 약

극저준위 방사성 폐액을 한정된 공간 내에서 처리할 수 있도록 여러 장의 천을 수직으로 설치한 자연증발 장치를 고안하고 0.1 wt%  $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Li}$  수용액을 모의폐액으로 사용하여 공기와 향류로 접촉시켜 폐액을 증발시키는 연구를 하였다. 증발플럭스와 단위시간당의 폐액의 증발량은 천의 높이와 간격, 유입공기의 온도, 습도 및 풍속, 폐액의 온도와 유속 그리고 계의 물질전달계수에 따라 결정되므로 이들 인자를 사용하여 증발플럭스를 추정할 수 있는 수식모형을 개발하였다. 실측한 플럭스는 수식모형으로부터 추정한 플럭스와 잘 부합되었으며 증발플럭스를 증가시킬 수 있는 조업조건을 수식모형을 이용하여 검토하였다.

**Abstract**—An evaporating apparatus containing several vertical canvas for liquid flow was designed to treat very low-level liquid radwastes within restricted area and 0.1 wt%  $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Li}$  aqueous solutions were evaporated into countercurrently flowing air. The evaporation rate was influenced by various parameters such as the height and clearance of canvas, temperature, humidity and velocity of entering air, temperature and velocity of solution and mass transfer coefficient of the system. Using these parameters, a mathematical model equation was proposed to predict the rate of evaporation. Flux of water vapor calculated from the model equation under various operating conditions was coincided well with experimental one and conditions to increase the rate of evaporation were examined using the model equation.

#### 1. 서 론

에너지의 상당량을 원자력에 의존하고 있는 우리나라는 현재 12기의 원자력 발전소가 가동 또는 건설 중에 있으며 2000년대 초에는 국내 전력 공급의 약 50% 이상을 원자력 발전으로 공급할 예정이다. 또한 원자력의

이용은 의학, 공업 및 농업 분야에서도 매년 증가 추세이다. 그러나 원자력 설비의 안전 운용 및 광범위한 응용을 위하여는 방사성 폐기물의 원활한 처리, 처분이 필수적으로 요구되고 있다. 원자력 설비를 가동시켜 얻게 되는 최종 폐기물로서는 처분하여야 할 고화체 드럼과 희석, 방출시켜야 할 극저준위( $5.4 \times 10^{-6} \text{Ci/m}^3$ ) 폐액이

있다[1]. 이제까지는 극저준위 폐액은 허용농도 이하로 희석하여 하천에 방류하도록 되어 있었다. 그러나 하천수가 인근 주민의 식수원일 뿐만 아니라 농작물 재배에도 사용되고 있으므로 오조작 등에 의한 폐액의 누출 가능성과 아울러 극저준위 폐액일지라도 액상 폐기물의 무방출 개념에 따라 이의 처리문제가 대두되고 있다.

방사성 액체 폐기물을 증발조작으로 처리할 경우 자연증발을 시키면 폐액을 가열하는 재래식 방법에 비하여 제염계수(decontamination factor)가 증대되므로 자연증발법은 여러 연구자들[2-5]의 관심의 대상이 되어 왔다. 그러나 태양열을 이용하여 극저준위 폐액을 증발시킬 경우 수분증발 후에 남은 소량의 농축액만 별도로 처리하면 되는 장점이 있는 반면에 넓은 증발면적과 충분한 일사량이 요구된다는 단점이 있다.

이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 극저준위 방사성 폐액을 자연증발시키되 실내의 한정된 공간에서도 많은 증발이 가능하도록 증발장치 내에 여러 장의 천을 수직으로 설치하여 폐액을 흘려 내리고 동시에 장치의 하부로부터 공기를 향류로 불어 넣어 수분이 증발하도록 하는 증발장치를 사용하였다. 모의폐액으로는 0.1 wt%  $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Li}$  수용액을 사용하였다. 증발속도에 관계되는 변수로는 천의 높이와 천 사이의 간격, 유입공기의 온도, 습도 및 풍속, 폐액의 온도와 하강속도, 그리고 계의 물질전달계수 등을 생각할 수 있는 바 이러한 변수를 사용하여 본 연구와 같은 자연증발 장치에 적용할 수 있는 수식모형을 개발하고 이를 실측치와 비교하였으며 아울러 증발속도를 증가시킬 수 있는 설계 및 조업조건을 수식모형을 기초로하여 검토하였다.

## 2. 수식 모형

증발기 내에 수직으로 설치된 여러 천들의 표면을 흐르는 액상으로부터의 증발현상은 계에 대한 물질 및 에너지수지로부터 다음과 같이 기술될 수 있다.

### 2-1. 수증기의 증발

Fig. 1과 같이 천과 천 사이의 간격이  $x$ 이고 폭  $W$ , 높이  $Z$ 인 천 위로 평균 속도  $V_1$ 로 하강하는 액상을 생각하자. 액면 위를 공기가  $V_g$ 의 속도로 향류로 흐를 경우 시간  $dt$  동안에 부피가  $(x\Delta A/2)$ 인 체적요소 속의 기·액 경계면적  $\Delta A$ 로부터 증발된 수증기의 질량  $dm$ 은

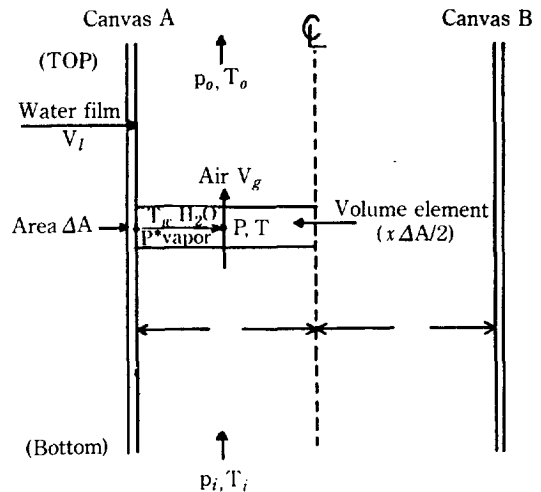


Fig. 1. Evaporation from falling liquid.

$$dm = k \Delta A (y_i - y) dt \quad (1)$$

로 표시할 수 있으며 또한 체적요소 속의 수증기량은 이상기체의 법칙을 적용할 경우

$$m = 109.7 \Delta A \frac{xp}{TP} \quad (2)$$

이므로 식 (1)과 (2)로부터 증발된 수증기의 질량  $dm$ 은 다음과 같이 표시된다.

$$dm = k \Delta A \left( \frac{P^*}{P} - \frac{Tm}{109.7 x \Delta A} \right) dt \quad (3)$$

### 2-2. 증발 공정의 엔탈피 수지

$dm$  kg의 물이 온도  $T_w$ 에서 증발되어 온도  $T$ 인 공기 증으로 혼합될 경우 계의 엔탈피수지는 다음과 같다.

$$\left( \begin{array}{c} \text{증발에 필요한} \\ \text{잠열} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{증발된 수증기의} \\ \text{엔탈피 변화량} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{공기의} \\ \text{엔탈피 변화량} \end{array} \right)$$

또는

$$-dm \lambda_w + dm C_{pA} (T - T_w) = m_B C_{pB} dT \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} C_{pA} &= (1.005 + 1.88H) \times 10^3 \\ m_B &= (\text{공기의 부피}) / (\text{습용적}) \\ &= \frac{x \Delta A / 2}{(2.83 + 4.56H) \times 10^{-3} T} \\ \lambda_w &= f(T_w) \end{aligned}$$

이다.

수증기의 엔탈피 변화량 및 절대습도  $H$ 를 무시하고  $T$  및  $T_w$ 에 대하여 본 실험에 적용된 조작온도의 평균치인 296.3 K와 294.4 K를 대입하면 식 (4)는

$$dm = -2.45 \times 10^{-4} x \Delta A \, dT \quad (5)$$

가 되고 적분하면

$$m = m_o - 2.45 \times 10^{-4} x \Delta A (T - T_i) \quad (6)$$

가 된다. 여기서  $m_o$ 는 부피가  $(x \Delta A / 2)$ 인 유입공기 중의 수증기량으로서 식 (2)에 따라 유입공기의 조건으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$m_o = 109.7 \Delta A \frac{x p_i}{T_i P} \quad (7)$$

### 2-3. 물의 증기압

물의 증기압은 본 실험에 적용한 온도변화 범위 내에서는 다음과 같은 수온의 함수로 표시될 수 있다.

$$P^* = 5.954039 \times 10^{-7} T_w^3 - 48.35968 T_w^2 + 13149.08 T_w - 1196378 \quad (283K \leq T_w \leq 303K)$$

이로부터  $1.013 \times 10^5$  Pa인 전압  $P$ 에 대하여 식 (3)의  $P^*/P$ 는 아래 식으로 대체될 수 있다.

$$\frac{P^*}{P} = 5.87763 \times 10^{-7} T_w^3 - 4.77391 \times 10^{-4} T_w^2 + 0.129804 T_w - 11.81025 \quad (8)$$

### 2-4. 체적요소의 공기온도

식 (3)은 식 (5), (6) 및 (7)을 대입할 경우 다음과 같이 표시된다.

$$-dT = \frac{k}{109.7x} \left\{ T^2 - \left( T_i + 4.478 \times 10^5 \frac{P_i}{P T_i} \right) T + 4.478 \times 10^5 \frac{P^*}{P} \right\} dt \quad (9)$$

여기서 조작조건에 따라 값이 결정되는 인자인  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 다음과 같이 정의하면 위 식은 식 (12)로 변환된다.

$$\alpha = T_i + 4.478 \times 10^5 \frac{P_i}{P T_i} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \beta &= 4.478 \times 10^5 \frac{P^*}{P} \\ &= 0.2631783 T_w^3 - 213.7542 T_w^2 + 58120.13 T_w - 5288099 \end{aligned}$$

$$-dT = \frac{k}{109.7x} (T^2 - \alpha T + \beta) dt \quad (12)$$

방정식  $T^2 - \alpha T + \beta = 0$ 의 두 근을  $T_1, T_2 (T_1 > T_2)$ 라 하

면

$$-dT = \frac{k}{109.7x} (T - T_1) (T - T_2) dt$$

또는

$$\int_{T_1}^{T_2} \left( \frac{1}{T - T_1} - \frac{1}{T - T_2} \right) dT = \frac{k}{109.7x} (T_1 - T_2) \int_0^t dt$$

가 되므로 적분, 정리하면 체적요소의 공기온도에 대하여 다음을 얻는다

$$T = \frac{T_2 - T_1 \left( \frac{T_i - T_2}{T_i - T_1} \right) \exp \left\{ \frac{kt}{109.7x} (T_1 - T_2) \right\}}{1 - \left( \frac{T_i - T_2}{T_i - T_1} \right) \exp \left\{ \frac{kt}{109.7x} (T_1 - T_2) \right\}} \quad (13)$$

### 2-5. 공기의 온도감하

증발조 출구에서의 공기온도  $T$ 는  $T_o$ 이고 이 때까지의 기·액 접촉시간  $t$ 는  $Z/V_g$ 이므로 식 (13)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_o = \frac{T_2 - T_i \left( \frac{T_i - T_2}{T_i - T_1} \right) \exp \left\{ \frac{kZ(T_1 - T_2)}{109.7x V_g} \right\}}{1 - \left( \frac{T_i - T_2}{T_i - T_1} \right) \exp \left\{ \frac{kZ(T_1 - T_2)}{109.7x V_g} \right\}} \quad (14)$$

식 (14)로부터 증발조 입·출구 사이의 공기의 온도감하는 아래와 같이 표현된다.

$$T_o - T_i = (T_i - T_1) \frac{\exp \left\{ \frac{kZ(T_1 - T_2)}{109.7x V_g} \right\} - 1}{\left( \frac{T_i - T_2}{T_i - T_1} \right) - \exp \left\{ \frac{kZ(T_1 - T_2)}{109.7x V_g} \right\}} \quad (15)$$

### 2-6. 수식 모형

장치로 유입되는 공기의 유량은 공기의 선속도와 장치의 특성치를 사용하여 다음과 같이 표시된다.

$$Q = (Wx/2) (V_g) (2n) = x W V_g n \quad (16)$$

또한 단위시간당의 증발량  $E$ 는 유입공기량  $Q$ 를 이용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$E = (m - m_o) Q / (x \Delta A / 2) \quad (17)$$

따라서 식 (16)과 (6)을 (17)에 대입하되  $T = T_o$ 로 놓으면

$$E = -4.90 \times 10^{-4} x W n V_g (T_o - T_i) \quad (18)$$

가 된다. 증발조 내의 전 기·액 접촉 면적은  $2nZW$ 이므로 증발플럭스  $N_A$ 는

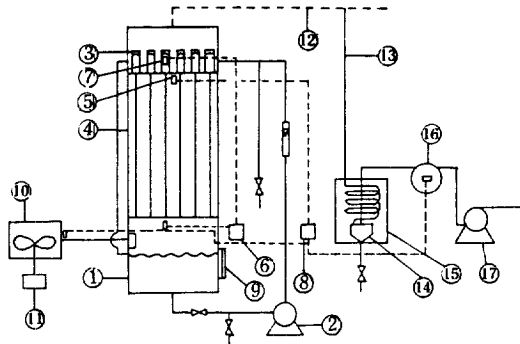


Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup.

1. Storage tank      2. Pump
3. Head tank and distributor
4. Evaporator
5. Temper-hygrometer probe
6. Indicator      7. Thermocouple
8. Thermometer      9. Level gauge
10. Blower      11. Blower controller
12. Air outlet duct      13. Sampling pipe
14. Condenser      15. Ice bath
16. Cold trap      17. Vacuum pump

$$N_A = \frac{E}{2nZW} = -2.45 \times 10^{-4} \left( \frac{x}{Z} \right) V_g (T_o - T_i) \quad (19)$$

가 되며 여기에 식 (15)를 대입하여 본 장치에 대하여 다음 수식모형을 얻는다.

$$N_A = 2.45 \times 10^{-4} \left( \frac{xV_g}{Z} \right) (T_i - T_i) \frac{1 - \exp\left(\frac{kZ(T_i - T_i)}{109.7xV_g}\right)}{\left(\frac{T_i - T_i}{T_i - T_i}\right) - \exp\left(\frac{kZ(T_i - T_i)}{109.7xV_g}\right)} \quad (20)$$

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3-1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 증발조, 송풍설비 및 응축장치 등으로 구성되어 있으며 Fig. 2에 개략도를 나타내었다. 모의폐액으로는 0.1 wt%  $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Li}$  수용액을 사용하였으며 폐액은 증발조 하단의 저장탱크로부터 수위조절탱크로 펌핑하여 공급분배관을 통하여 증발조 내의 각 천 위로 고루 분산되어 호르도록 하였다. 증발되고 남은 폐액은 저장탱크로 떨어져 다시 순환하도록 하였고 수위조절탱크와 천 하단의 배수관에 열전대를 설치하여 천 위를 호르는 폐액의 입구 및 출구온도를 측정하였다. 폐액과 공기가 향류로 접촉하

Table 1. Description of the evaporator

Size	Height (m)	1.7
	Width (m)	0.29
	Depth (m)	0.22
Canvas	Height Z (m)	1.0
	Width W (m)	0.19
	Clearance between canvas x, m	0.05/0.15
	Number of Canvas n(-)	6/2

Table 2. Operating conditions

Gas phase	Velocity of air $V_g$ (m/sec)	0.3-6.0
	Temp. of inlet air $T_i$ (K)	288-298
	Relative humidity of inlet air RH (%)	35-75
Liquid phase	Average velocity $V_l$ (m/sec)	0.12/0.60
	Temperature $T_w$ (K)	285-297

여 자연증발이 되도록 하기 위하여 공기는 증발조의 하부로 도입시켰고 공기의 유속은 송풍기와 연결된 조절기를 작동시켜 조절하였다. 유입공기와 유출공기의 온도와 습도를 측정하기 위하여 증발조의 상부와 송풍기의 입구에 각각 온·습도계를 설치하였으며 습윤공기의 일부를 응축기로 유도하여 포집하였다. 증발조 본체는 아크릴로 제작하였고 내부에 천을 수직으로 설치하되 필요에 따라 천의 수효를 조절할 수 있도록 하였으며 천의 상·하부에 폐액의 분배관과 배수관을 연결하여 이들이 천을 팽팽히 지지하는 역할도 하도록 하였다. 실험장치의 규격을 Table 1에, 조작조건을 Table 2에 수록하였다.

#### 3-2. 실험방법

저장탱크 내의 모의폐액을 수위조절탱크로 펌핑하여 공급분배관을 거쳐 천 위로 흘려 보내어 천이 폐액으로 완전히 젖도록 한 다음 이 때의 저장탱크 속의 폐액량을 측정하고 송풍기를 가동, 공기를 유입시킨다. 일정시간 간격으로 유입 및 유출 공기의 온도와 습도를 측정하여 변화 여부를 확인하면서 아울러 폐액의 입구 및 출구에서의 온도를 측정하였다. 장치를 한 시간 가량 가동시킨 후 수분의 증발로 인하여 감소된 저장탱크 내의 폐액량을 측정한 다음 폐액의 공급을 중단하고 송풍기를 정지시킨다. 증발된 수분량은 가동 전후의 탱크 내의 폐액량의 차이로 결정하였고 이 값을 장치 내의 전 증발면적과 조작시간으로 나누어 증발속도 혹은 증발플럭스를 계산하였다. 폐액은 천을 6장 설치한 경

우는 0.12 m/sec의 속도로, 2장인 경우에는 0.6 m/sec의 속도로 흘러 내렸으며 폐액의 평균 유속은 천의 상부와 하부의 두 지점에 리트머스 종이를 부착시킨 후 흐르는 폐액 속으로 미량의 산용액을 주사하고 상·하 두 리트머스 종이가 변색이 일어나는 시간의 차이를 측정한다. 다음 두 지점 사이의 거리를 변색시간 차로 나누어 알아 내었다. 모의폐액 및 응축액 중의  $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Li}$  함유량은 원자흡수 흡광분석기 (모델 SP 191)를 이용하여 분석하였다.

## 4. 결과 및 검토

### 4-1. 물질전달계수

물질전달계수는 증발속도에 직접적인 영향을 미치는 인자로서 장치의 특성, 두 상의 접촉 방식, 물성 및 조작조건 등에 따라 값이 달라지게 된다. 본 장치는 수직한 천 위를 폐액이 하강하면서 향류로 흐르는 공기 중으로 증발이 일어나므로 계의 물질전달계수는 문헌에 보고된 젖은 벽탑의 결과 또는 평판 흐름의 결과 등을 이용하여 추정할 수도 있겠으나 조작 중에 천의 하단 부위에서는 액상의 rippling 현상이 부분적으로 관찰되었고 또한 상단에서는 천이 액막으로 균일하게 덮이지 못하고 축축히 젖어 있기만 함으로써 물질전달 면적의 증가가 예상되는 부분들이 있어 문헌의 결과에 비하여 증발속도의 증가가 예견되었다. 이에 따라 물질전달계수는 문헌의 식을 이용하여 추정하는 대신에 측정된 증발플럭스를 기·액상의 온도와 습도로부터 계산한 장치 상·하부의 증발에 대한 log mean driving force로 나눔으로서 실측하여 사용하였다. Fig. 3은 6장의 천을 5 cm 간격으로 설치하고 폐액을 평균속도 12 cm/sec로 흘러 내릴 때의 실험결과를 무차원 그룹을 사용하여 나타낸 것이다. Sherwood수에 대한 Schmidt수의 의존도는 본 연구의 실험조건만으로는 결정할 수 없으므로 기왕의 보고들을 감안하여 1/3로 고정시켰으며

$$\text{Re} = \frac{ZV\rho}{\mu} \quad (21)$$

로 계산하되 유체의 속도  $V$ 는 액상의 표면과 기상 사이의 상대속도를 취하여 다음과 같이 계산하였다.

$$V = \frac{3}{2} V_i + V_g \quad (22)$$

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 본 장치에 대한 물질전달 계수의 무차원 관계식은

$$\text{Sh} = 0.048 \text{Re}^{0.60} \text{Sc}^{1/3} \quad (23)$$

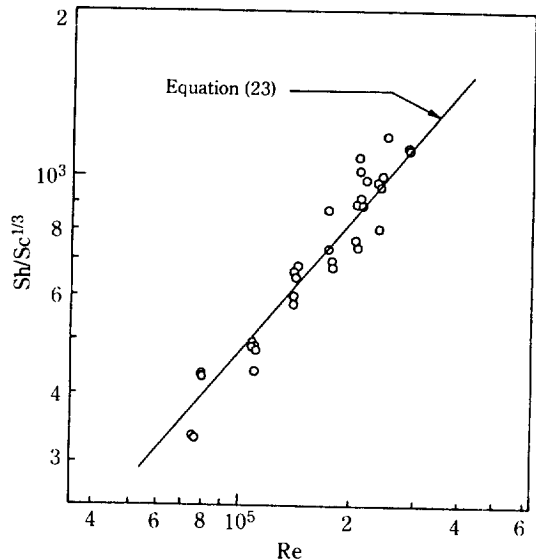


Fig. 3. Dimensionless correlation for mass transfer.

$$(C.C. = 0.954; S.E. = 0.010)$$

혹은

$$j_D = 0.048 \text{Re}^{-0.20} \quad (24)$$

으로 표시되었다. Table 3은 이러한 결과를 평판흐름, 도관 및 젖은 벽탑의 결과와 비교한 것이다.  $j_D$ 에 대한  $\text{Re}$ 의 의존도  $-0.2$ 는 기존의 값들과 부합되었으며  $j_D$ 의 수치적 값은 다른 장치들, 특히 본 연구와 같이 흐름 방향의 거리를 장치의 특성길로 하여 Reynolds수를 표시하는 평판흐름의 경우보다 30% 가량 크게 나타났으나 이것은 전술한 바와 같은 본 장치의 액상의 유동특성에 기인한 것으로 판단된다.

### 4-2. 실측치와 이론치의 비교

Table 1과 2에 수록한 장치 및 조작조건에 대하여 실측한 증발플럭스  $N_A$ 와 수식모형 (20)을 사용하여 추정된 플럭스를 Fig. 4와 5에 비교하여 나타내었다. 플럭스를 추정하는 경우 물질전달계수의 값은 식 (24)에 조작조건을 대입하여 계산하였다. Fig. 4는 6장의 천을 5 cm 간격으로 설치한 결과이며 Fig. 5는 천의 수효가 2장이고 간격이 15 cm일 때의 결과를 나타낸 것이다. 어느 경우나 실측한 플럭스와 계산치가 잘 부합되는 것으로 보아 식 (20)은 본 연구에서와 같은 증발장치를 해석할 수 있는 합리적인 수식모형으로 생각된다.

Table 3. Comparison of dimensionless correlations

Geometry	Authors	Correlation	Ref.
Vertical canvas	This work	$j_D = 0.048 \text{ Re}^{-0.20}$	
Horizontal plate	Sherwood et al.	$j_D = 0.037 (\text{Re})^{-0.20}$	[6]
Wetted-wall column	Gilliland & Sherwood	$j_D = 0.023 (\text{Re})^{-0.17}$	[7]
Wetted-wall column	Johnstone & Pigford	$j_D = 0.0328 \text{ Re}^{-0.23}$	[8]
Smooth pipe	Chilton & Colburn	$j_D = 0.023 (\text{Re})^{-0.20}$	[9]

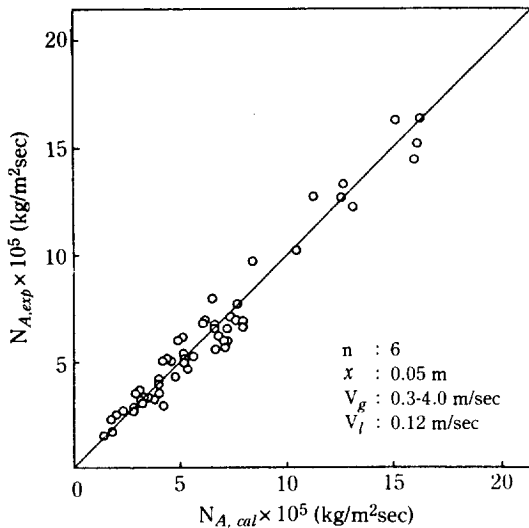


Fig. 4. Comparison of experimental and calculated flux of evaporation.

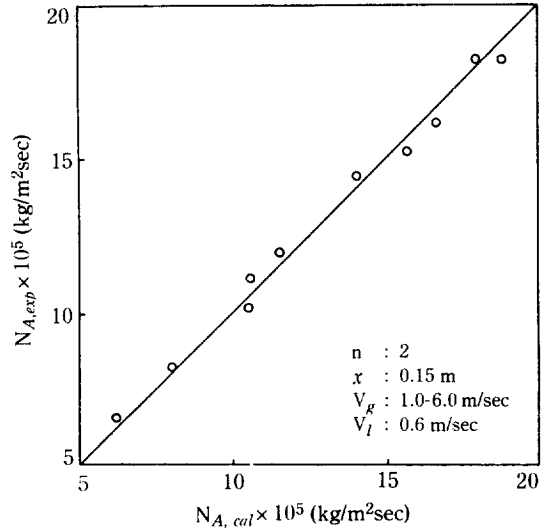


Fig. 5. Comparison of experimental and calculated flux of evaporation.

#### 4-3. 증발플럭스에 대한 인자들의 영향

수식모형 (20)을 보면 증발플럭스  $N_A$ 는 여러 가지 인자들의 복합적인 작용에 따라 값이 결정됨을 알 수 있다. 증발에 미치는 각 인자들의 영향에 관한 지식은 본 연구에 사용한 장치를 scale up할 경우 및 최적 조업조건의 선정에 필수적인 자료이므로 주요 인자들의 영향을 식 (20)을 기초로 하여 조사하여 보았다. Table 4에 플럭스에 관련되는 인자들을 분류하여 나타내었고 아울러 실험조건 중 대표적인 값을 표준치로 선정하여 수록하였다. 특정 인자의 영향은 다른 인자들의 값을 표준치로 유지시키면서 해당 인자의 값을 임의로 변화시킬 때 수식모형 (20)으로부터 계산되는 이론적인  $N_A$ 의 변화를 조사하여 판단하였다.

##### 4-3-1. 물질전달계수

Fig. 6은 물질전달계수의 변화에 따라 달라지는 증발플럭스  $N_A$ 를 도시한 것으로 물질전달계수의 값이  $k/k_s=1$ 에서 2로 100% 증가될 경우  $N_A$ 는 78.3% 증가할 것으로 예측된다. 본 장치에 대한 물질전달계수는 평균

Table 4. Parameters and their standard values

	Parameters & units	Standard value
System	Mass trans. coeff. $k$ , kg/m <sup>2</sup> sec	0.0101
Equipment	Height of canvas $Z$ , m	1.0
	Clearance between canvas $x$ , m	0.05
Operation	Velocity of air $V_g$ , m/sec	2.0
	Temp. of inlet air $T_b$ , K	296.3
	Relative humidity of inlet air RH, %	60
	Velocity of solution $V_l$ , m/sec	0.12
	Temp. of solution $T_w$ , K	294.4

흐름 및 젖은 벽면의 경우보다 우월함을 알 수 있었으나 전술한 고찰로 미루어 판단할 때 천을 액막으로 완전히 덮는 대신 축축하게 젖은 상태로만 유지시킬 수 있다면 물질전달계수의 증대가 예상되고 이에 따라 현재보다

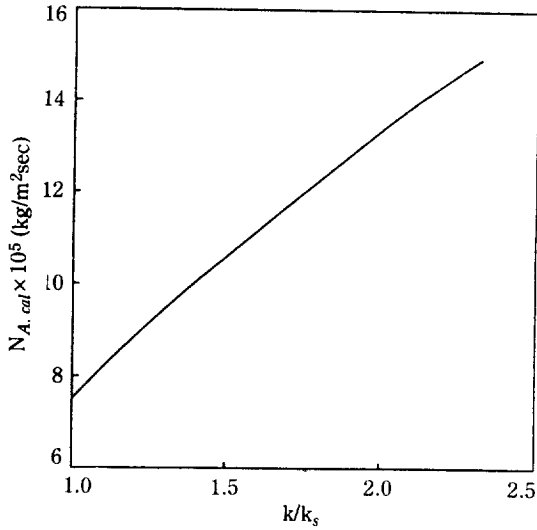


Fig. 6. Influence of mass transfer coefficient on  $N_A$ .  
(cf. Table 4 for numerical values of parameters)

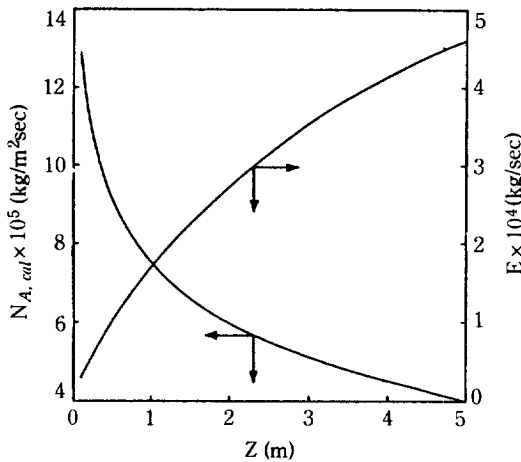


Fig. 7. Influence of height of canvas on evaporation rate.  
(cf. Table 4 for numerical values of parameters except  $x$ ).

플럭스가 더 커질 수 있으리라 생각되며 이에 대한 추가적인 연구가 요청된다.

#### 4-3-2. 천의 높이

증발표면의 역할을 하도록 설치한 천의 높이(길이)가 증발플럭스  $N_A$  및 단위시간당의 증발량  $E$ 에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 플럭스는 천의 높이가 증대됨에 따라 지수함수적으로 감소하여 이는 증발기의 상부로 갈수록 증발에 대한 구동력이 감소하는 정성적

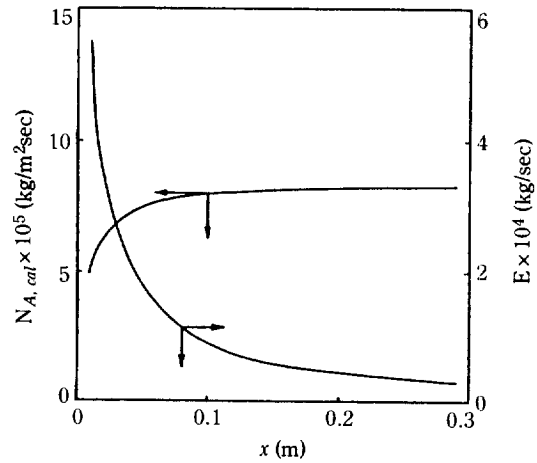


Fig. 8. Influence of clearance between canvas on evaporation rate.  
(cf. Table 4 for numerical values of parameters except  $x$ ).

현상과 부합된다. 그러나 천의 높이를 증대시킬 경우 장치 내의 천 증발면적이 넓어지므로 단위시간당의 수분의 증발량은 오히려 커지게 된다. 증발량은 상승하는 공기가 수증기로 포화되는 높이의 천을 사용할 때 최대가 되겠으나 천의 길이가 길어짐에 따라 조업 공간의 문제, 효율 감소와 아울러 천들을 팽팽하게 수직으로 지지하기가 어려워질 것이 예상되므로 이러한 사항들을 고려하여 천의 높이를 선정하여야 할 것이다.

#### 4-3-3. 천 사이의 간격

천 사이의 간격이 플럭스 및 증발량에 미치는 영향을 Fig. 8에 도시하였다. 간격을 증가시킬 경우 플럭스는 서서히 증가되나 증가율은 둔화되어 대략 10 cm 정도 이후에는 거의 일정한 값으로 수렴한다. 반면에 간격을 좁게 할수록 동일 평면상에 설치할 수 있는 천의 수효가 많아져서 증발면적이 넓어지므로 보다 많은 증발량을 얻을 수 있다. 따라서 플럭스가 약간 감소되더라도 천 사이의 간격을 줄여 증발량을 증가시키는 것이 더 효과적이라고 판단되나 간격을 너무 가까이 하면 공기가 천 사이를 통과할 때 인접한 천들의 접합현상이 일어날 수 있고 이로 인한 역효과가 우려된다. 본 실험의 경우 많은 데이터가 5 cm 간격으로 천을 설치한 경우의 것이나 실험에 적용한 풍속 범위 내에서는 천의 접합 현상은 관찰되지 않았으며 이로 미루어 볼 때 간격을 현재보다 더 좁힐 수 있는 여지가 있으리라 생각되는 바 최적 간격의 선정을 위하여 추가적인 실험이 요청된다.

#### 4-3-4. 기·액상의 유속

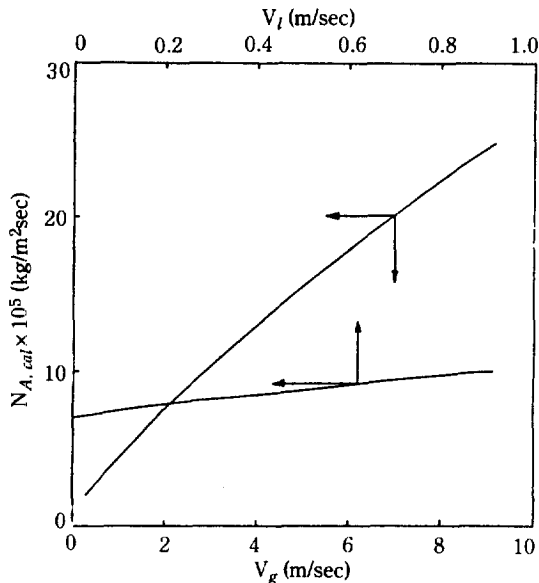


Fig. 9. Influence of fluid velocities on  $N_A$ .

(cf. Table 4 for numerical values of parameters except  $V_g$  and  $V_l$ ).

두 상의 유속이 증발플럭스에 미치는 영향을 Fig. 9에 나타내었다. 폐액의 하강속도가 빨라지면 식 (21) 및 (22)에 따라 Reynolds 수가 커져서 물질전달계수가 증대되므로 플럭스가 증가하게 된다. 풍속의 증가는 플럭스를 크게 증가시키나 풍속이 점점 커짐에 따라 자연증발과 더불어 증발면으로부터의 비말동반 현상 (entrainment)이 우려되고 이는 곧 제염계수의 하락을 의미하여 가열 방식에 대한 자연증발식 증발조작의 상대적인 장점을 상실하게 되므로 비말동반이 일어나지 않는 범위 내에서 최대 풍속을 사용하여야 할 것이며 이를 위하여는 각 풍속에 대한 제염계수의 변화에 관한 실험이 필요하다.

#### 4-4. 정량적인 최적 조업조건

방사성 액체 폐기물을 처리하기 위하여 본 연구에서 사용한 것과 같은 형태의 증발장치를 건설할 경우 효율의 극대화를 위한 최적 조업조건의 선정이 필요하다. 수식모형 (20)을 이용하면 증발플럭스  $N_A$  및 증발량  $E$ 의 증대에 관계되는 여러 인자들의 정성적인 영향을 고찰할 수 있으나 이들에 대한 정량적인 최적 조건을 알아내기 위하여는 조업공간의 확정과 장치의 규격 변화에 따른 경제성에 대한 고찰이 선행되어야 하며 아울러 천 위를 흐르는 폐액의 유동 문제 및 여러 가지 조작조건하에서의 제염계수의 변화에 관한 연구가 병

행되어야 할 것이다.

## 5. 결 론

극저준위 방사성 폐액을 한정된 공간 내에서 처리할 수 있도록 여러 장의 천을 수직으로 설치한 자연증발 장치를 사용하여 모의 폐액인 0.1 wt%  $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Li}$  수용액과 공기를 향류로 접촉시키는 연구로부터 다음 결론을 얻었다.

1. 증발플럭스는 증발면으로 사용한 천의 높이와 간격, 유입 공기의 온도, 습도 및 풍속, 폐액의 온도와 유속, 계의 물질전달계수에 따라 결정되며 이들 인자를 사용하여 증발플럭스를 추정할 수 있는 수식모형으로 식 (20)을 제안하였다.
2. 실측한 계의 물질전달계수는 식 (23) 혹은 (24)로 표현되었다. 본 장치에 대한 물질전달계수는 젖은 벽 탑이나 평판 흐름의 경우보다 큰 값으로 나타났는데 이는 천 위를 흐르는 폐액의 유동상태에 기인한 것으로 생각되며 천의 재질 선택 및 폐액의 분산방법의 개선에 따라 현행 이상의 값도 가능하리라 판단된다.
3. 여러 가지 조작조건에 대하여 수식모형으로부터 추정된 플럭스는 실측치와 잘 부합되었으며 이로부터 식 (20)이 본 연구에서 사용한 바와 같은 자연증발 장치를 잘 해석할 수 있는 수식모형임을 알 수 있다.
4. 최적 설계 및 조작조건의 선정에 고려하여야 할 사항들을 수식모형을 이용하여 검토하였다.

## NOMENCLATURE

- C.C. : coefficient of correlation [-]  
 $C_s$  : humid heat of air [J/kg K]  
 $C_p$  : heat capacity [J/kg K]  
 $\mathcal{D}$  : diffusion coefficient [ $\text{m}^2/\text{sec}$ ]  
 $dm$  : mass of water vapor evaporated through  $\Delta A$  during time interval  $dt$  [kg]  
 $E$  : evaporation rate for entire apparatus [kg/sec]  
 $H$  : absolute humidity [kg/kg]  
 $j_D$  : Colburn j-factor for mass transfer [-]  
 $k$  : mass transfer coefficient [ $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ sec}$ ]  
 $M$  : molecular weight [kg/kgmol]  
 $m$  : mass of water vapor in volume element [kg]  
 $m_o$  : water vapor content in entering air of volume  $x \Delta A/2$  [kg]  
 $N$  : mass flux [ $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ sec}$ ]  
 $n$  : number of canvas [-]  
 $P$  : total pressure [Pa]  
 $P^*$  : vapor pressure of water [Pa]



$p$	: partial pressure of water vapor [Pa]
$Q$	: volumetric flow rate of air [ $\text{m}^3/\text{sec}$ ]
$Re$	: Reynolds number, $ZV\rho/\mu$ [-]
$Re'$	: Reynolds number, $ZV'\rho/\mu$ [-]
$RH$	: relative humidity [%]
$Sc$	: Schmidt number, $\mu/\rho D$ [-]
$S.E.$	: standard error of estimate [-]
$T$	: temperature of air [K]
$T_1, T_2$	: roots of equation $T^2 - \alpha T + \beta = 0$ [K]
$T_w$	: temperature of simulated solution [K]
$t$	: contact time between two phase [sec]
$V$	: relative velocity of simulated solution and air [ $\text{m}/\text{sec}$ ]
$V'$	: velocity of air relative to wall of column [ $\text{m}/\text{sec}$ ]
$V_g$	: velocity of air [ $\text{m}/\text{sec}$ ]
$V_H$	: humid volume [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]
$V_l$	: average velocity of simulated solution [ $\text{m}/\text{sec}$ ]
$W$	: width of canvas
$x$	: clearance between two adjacent canvas [m]
$y$	: mole fraction of water vapor [-]
$Z$	: height of canvas or diameter of wetted-wall column [m]

### Greek Letters

$\alpha$	: parameter defined by Eqn. (10)
$\beta$	: parameter defined by Eqn. (11)
$\Delta A$	: interfacial area [ $\text{m}^2$ ]
$\lambda_w$	: latent heat of vaporization of water [ $\text{J}/\text{kg}$ ]
$\rho$	: density of air [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\mu$	: viscosity of air [ $\text{kg}/\text{m sec}$ ]

### Subscripts

$A$	: water vapor
$B$	: air
$i$	: interface in Eqn. (1); inlet condition
$o$	: outlet condition
$s$	: standard value

### REFERENCES

1. 박현휘 외 : “한국에너지연구소 처리시설 운영”, KAERI/MR-99/85 (1985).
2. Khoe, G.: “Effluent Management Practices at the AAEC Research Establishments”, AAEC/e, 493 (1978).
3. Los Alamos Scientific Lab.: “An Environment Sampling Program for a Solar Evaporation Pond for Liquid Radwastes”, LA-8177 (1980).
4. Chauvent, P.: “Concentration des Effluents Radioactifs par Evaporation a Tirage d’Air Force”, N SECA 091 (1966).
5. “한국에너지연구소 방사성 폐액 자연증발 시설 방안별 기술 검토 보고서”, TA-030-ES-H001(1986).
6. Sherwood, T.K., Pigford, R.L. and Wilke, C.R.: “Mass Transfer”, p. 201, McGraw-Hill, NY (1975).
7. Gilliland, E.R. and Sherwood, T.K.: *Ind. Eng. Chem.*, **26**, 516 (1934).
8. Johnstone, H. F. and Pigford, R.L.: *Trans. AIChE*, **38**, 25 (1942).
9. Chilton, T.H. and Colburn, A.P.: *Ind. Eng. Chem.*, **26**, 1183 (1934).