

공기유입시스템에서의 섬유매체에 의한 방사성액체폐기물  
처리에 관한 연구

A Study on the Treatment of Radioactive Liquid Wastes  
using Synthetic textile by Air Intake System

김태국, 이영희, 안섭진, 손종식, 홍권표  
한국원자력연구소

요 약

저준위 방사성액체폐기물 처리방법으로 에너지 소모가 적은 경제적이고 효율적인 처리방법을 제시하기 위하여 면 과 Polyester 가 함유된 합성섬유를 증발매체로 하여 자연기상 상태의 건조한 공기를 유입하여 방사성 액체폐기물과 접촉시켜 증발하는 연구를 하였다. 본 연구에서는 자연상태의 공기를 강제 유입시켜 액체의 증발현상, 증발매체표면에서의 물질전달 등 이론을 토대로 방사성액체 폐기물을 처리하는 연구를 수행하였다. 실험은 방사성폐액을 직접 사용하였으며, 증발에 영향을 미치는 변수에 따라 증발 단위 면적당 방사성 폐액의 증발량추정 및 제염계수를 조사하였다. 증발효과는 유입공기의 습도가 낮고 공기의 유속과 공급액의 유량이 증가하고 폐액의 온도가 높아질수록 증발량이 증가하였다. 실험결과 습도는 70% 이하, 공급폐액의 유량이  $3.4 \text{ l/hr.m}^2$  이상, 공기유속은  $1.14 \sim 1.47 \text{ m/sec}$  범위가 조업조건이며, 이때 제염계수는  $5.1 \times 10^3$ , 배출공기의 방사능 농도는  $4.7 \times 10^{-13} \text{ } \mu\text{Ci/ml.air}$ 로 측정되었다. 공급유량이  $4.6 \text{ l/hr.m}^2$ 와 공기유속이  $1.47 \text{ m/sec}$ 일때 최대 증발조건으로 확인되었으며 대기의 온.습도 및 풍속에 따른 실험을 통하여 달튼형의 증발식 Air factor  $[Eh = (0.0168 + 0.0141V) \Delta H]$ 를 도출하였다.

Abstract

In this study based on the mass transfer theory, experiments for the evaporation rates depending on various conditions were carried out through the operation of the existing Natural Evaporation Facility in KAERI.

Evaporation media were made of the cotton and polyester. Air circulation in the facility was forced by exhausting fans. The evaporation rate and the decontamination factor were calculated by the result of experiment. The evaporation rate increased as the flow rate of air supply, the feed rate of liquid waste, and the temperature of supplied air increased. As for the humidity of supplied air, the evaporation rate was getting higher as the humidity was getting lower.

As the result of this study, operation conditions of the Natural Evaporation Facility are optimized as follows ; The air temperature above  $8\text{C}^\circ$ , the air humidity below 70%, the air flow rate  $1.14 \sim 1.47 \text{ m/sec}$ , and the liquid waste feed rate  $4.6 \text{ l/hr.m}^2$ . The decontamination factor and the

radioactivity are  $5.1 \times 10^3$  and  $4.7 \times 10^{-13} \mu\text{Ci/ml}$  respectively, at the above mentioned optimum operation conditions.

The air factor in the Dalton's equation for evaporation was determined from results of experiment on the temperature, the humidity, and the flow rate of supplied air as following ;  $E_h = (0.0168 + 0.0141V) \Delta H$

## 1. 서 론

저농도 방사성 액체폐기물은 지금까지 주로 이온교환과 증발농축 방법을 사용하여 감용을 하고 있으나 폐액이 함유하고 있는 특성에 따라 감용의 한계를 가지고 있다는 단점이 있다. 현재 자연 증발에 관한 많은 연구가 국내외적으로 이루어지고 있다. 인도에서는 증발표면적을 넓히기 위한 Ceramic 계통의 다공성 물질을 사용하여 저농도 방사성액체폐기물을 처리하고 있으며<sup>(1)</sup>, 뉴델리의 Non- Conventional Energy Sources에서는 농산물의 곡물 건조공정에 이용하고 있다<sup>(2)</sup>. 프랑스의 Aceren에서는 대기와 증발대상 액체와의 증기압 차이를 driving force로 하여 접촉면적을 늘리기 위한 porous plastic sheet를 사용하여 처리하고 있으며<sup>(3)</sup>, 오스트리아에서는 solarpond 및 aluminum hydroxide를 사용하여 저농도 방사성 액체폐기물을 처리하고 있다<sup>(4)</sup>. 또한 이집트의 El-Minia에서는 태양열에 의한 증발 대상 액체의 온도를 증가시켜 증발시키는 방법을 이용하고 있다<sup>(5)</sup>.

본 논문에서는 합성섬유로 제작된 증발천을 수직으로 여러개 설치한 system에서 수직형증발표면에서의 증발이론, 액체의 증발현상 및 물질전달 등 이론식을 바탕으로 증발현상에 대한 이론적 고찰을 하였으며, 이러한 이론을 토대로 면 35%와 Polyester 65%가 함유된 일반합성섬유를 증발매체로 사용하여 외부의 공기를 유입하여 저농도 방사성 액체폐기물을 직접 처리하는 연구를 수행하였다.

## 2. 이 론

### 2.1. 수직형 증발표면(합성섬유)에서의 증발이론

증발표면의 일부를 고려해볼 때, 이 부분에서의 단위면적 그리고 단위시간당의 증발량은 다음과 같은 식으로 표현된다<sup>(6)</sup>.

$$d_E = k \cdot (P_s - P_w) / H \cdot dt$$

$d_E$  : 단위 면적당, 단위 시간당 증발량,       $P_s$  : 점 M에서의 포화증기압  
 $P_w$  : 공기의 수증기압,       $k$  : 상수,       $H$  : 대기압

### 2.3. 물질 전달에 의한 증발이론

증발현상에 관한 물질전달 이론은 prandtl과 Schmidt의 혼합길이와 Taylor의 연속혼합개념에 의한 두가지 과정으로 크게 나눌 수 있다<sup>(7,8)</sup>. 이 두방법에 관한 물리적 및 수학적 설명은 Anderson 과 Marciano 에 의하여 소개되었으며<sup>(9, 10)</sup>, 수증기  $q$  의 확산과정을 다음과 같이 일반식으로 표시할 수 있다.

$$\frac{q}{t} = \bar{U} \nabla Ke \nabla q$$

$q$  : Specific humidity,       $Ke$  : Diffusion coeff of vapor  
 $\bar{U}$  : Mean wind velocity,       $\nabla$  : Laplace operator

#### 2.4. 물질 전달에 의한 경험식

증발에 영향을 미치는 함수를 고려한 증발량은 다음과 같이 Dalton형으로 나타낼 수 있다.

$$E_h = f(v) (H_w - H_d)$$

### 3. 실험방법

실험은 저농도 방사성액체폐기물을 직접사용하였으며 실험장치로는 길이 5m, 폭 1.2m의 직사각형 형태인 증발천과 순환펌프, 액체필터를 설치하였으며 배출공기중 Cs,Co농도를 측정하기 위한 냉각장치 및 외부공기를 여과하기위한 공기필터와 온,습도측정기를 설치하였다. 실험변수로는 자연변수인 유입공기의 습도와 증발면적 및 증발천 사이의 간격을 고려한 공기유속에 따라 증발량을 측정하였으며 공학적변수인 공급액유량 및 공급액 온도변화 조건에서 증발율을 측정하였다. 최적의 증발량 및 제염계수를 도출하기 위하여 방사능 농도가  $10^4 \sim 10^7 \mu\text{Ci/ml}$  방사성폐액을 증발천에 완전히 흡수시킨 시스템이 정상상태에 도달하였을 때부터 일정시간 간격으로 유입 및 배출의 온,습도를 측정하였으며, 증발천 모듈 사이에서의 풍속을 측정하였다. 저장조에 설치된 수위기록계를 통해서 증발량 측정실험을 수행하였다. 또한 배출되는 공기의 일부를 포집하여 응축시켜 그 응축액을 MCA로 분석하여 제염계수 및 배출공기의 방사능농도를 측정하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 유입공기의 상대습도 변화에 따른 증발량

공기유속과 공급액 온도가 일정한 상태에서 상대습도가 40%에서 80%까지 증가함에 따라 증발량은 급격히 감소하며 상대습도가 80% 이상에서는 거의 증발이 일어나지 않았으며 따라서 유입공기의 상대습도를 낮출 경우 증발량을 증가시키는데 효과적임을 알 수 있다.

#### 4.2 공기유속 변화에 따른 증발효과

유입공기의 습도가 낮을 수록, 공기의 유속이 높을수록 증발량이 비례적으로 증가하며 1.47 m/sec 일때 최대의 증발을 나타냈으며 풍속이 증가하면 증발량도 증가하나 풍속이 무한대로 증가할 경우 증발량은 오히려 감소하였다. 이러한 이유는 증발천이 서로 붙으므로써 증발 면적이 감소하는 결과로 증발량이 저하되었다.

#### 4.3 공급액 유량에 따른 증발효과

유입공기의 상대습도가 57%인 조건하에서 공급액의 유량을 변화시키면서 증발량을 조사한 결과 공기속도가 1.47m/s 인 조건에서 폐액의 공급량이  $4.6 \text{ l/hr.m}^2$  일때 최대의 증발을 나타내며  $3.4 \text{ l/hr.m}^2$  이하에서는 증발량이 급격하게 감소하였다. 따라서 증발에 필요한 포화증기압을 기준으로 공급액을 적절하게 공급해 주어야한다.

#### 4.4 시간대별에 따른 증발효과

24시간 공정을 가동하면서 각 시간대별에 따른 증발량 변화를 알아보기 위하여 대전지방 년도별 월평균 조건과 5월중 시간대별 자연증발시설의 온습도 변화량에 따른 증발량변화를 직접 방사성액체폐기물을 처리하면서 조사하였다. 인입공기의 습도 변화에 따라 증발량도 민감하게 변화함에 따라 일몰이후 야간에는 증발이 거의 일어나지 않았으며(상대습도 80%이상) 오전 10시이후부터 증발이 되기 시작했으며 오후 1-4시까지가 최대증발이 일어났다.

#### 4.5 제염계수 및 배기체의 방사능측정

본 연구의 실험을 통하여 처리된 방사능농도는  $2 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ 이며 제염계수(DF)가  $1.1 \times 10^3 \sim 5.1 \times 10^3$ 으로 높게 측정되었으며 배기체농도는 대기방출 허용농도  $1 \times 10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{m}^3$  air 기준으로 볼때 stack에서  $4.7 \times 10^{-13} \sim 4.7 \times 10^{-14} \mu\text{Ci}/\text{m}^3$  air으로 나타나 배기체중 Cs과 Co가 공기중에 허용기준치 이하로 배출되어 안정함이 입증되었다.

### 5. 결 론

1. 증발효과는 유입공기의 습도가 낮을수록, 공기의 유속이 증가할수록, 공급액의 온도 및 유량이 증가할수록 증발량이 증가하는 것으로 나타났다.
2. 대기의 온도, 습도 및 풍속에 따른 실험 data를 통하여 달톤형 증발식으로부터 다음과 같은 실험식을 도출하였다.

$$E_h = (0.0168 + 0.0141 V) \Delta H$$

3. 기상조건과 증발처리용량을 고려한 적절한 조업조건으로서 유입공기의 습도는 70% 이하이며, 공급폐액의 유량은  $3.4 \text{ l}/\text{hr.m}^2$ 이상과 폐액온도는  $10^\circ\text{C}$ 이상이었 으며 공기유속은  $1.14 \sim 1.47 \text{ m}/\text{sec}$  범위가 적정조업 범위에 해당되었다. 또한 공급유량이  $4.6 \text{ l}/\text{hr.m}^2$ 과 공기유속  $1.47 \text{ m}/\text{sec}$ 가 최대증발 조건으로 나타났다.
4. Stack을 통해서 나가는 배출공기의 비방사능을 측정한 결과 제염계수(DF)가  $1.1 \times 10^3 \sim 5.1 \times 10^3$ 으로 측정되었으며, 대기방출 농도가  $4.7 \times 10^{-13} \sim 4.7 \times 10^{-14} \mu\text{Ci}/\text{m}^3$  air 로 공기중의 허용기준치 이하로 안정함이 입증되었다.

### 참 고 문 헌

1. K. BALU, S.C. BHATIA, Management of Radioactive Wastes, Bhabha Atomic Research Centre, Bombay (1979).
2. T. Nejat Veziroglu "Alternative Energy Sources VI" Vol 1. PP. 369
3. CENG, Technical Report, CENG (1964).
4. IAEA, Treatment of Low and Intermediated Level Radioactive Waste Concentrates, IAEA TR-No. 82, (1968).
5. T. Nejat Veziroglu "Alternative Energy Sources VI" Vol. 1 PP.369~401
6. H.L.Penman, "Natural Evaporation from open water", Proc. Roy., Soc., London, A, 1984.
7. Bird, Transport Phenomena, John Willey & sons Co. (1974).
8. Welty, "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer", John Wiley and sons Co., PP.555-559, (1984).
9. E.R.Anderson and I.J.Marciano, "A Review of Evaporation Theory and Development of Instrumentation", U.S. Navy Elect. Lab. (1950).
10. G. Earl Harbeck, "A Practical Field Technique for Measuring Reservoir Evaporation Utilizing Mass-Transfer Theory", U.S. Geological Survey Pro. Paper, 272-e, (1962).