

# 강하천수역에서 방사성물질들의 시공간적농도분포에 대한 수학적모형화

임정길, 강건호, 허동길

위대한 령도자 김정일 동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《적의 핵무기를 비롯한 대량살륙무기로부터의 방위대책을 철저히 세워야 하겠습니다.》

(《김정일전집》 제8권 281페이지)

방사성물질에 의한 피해방지대책을 세우는데서 나서는 중요한 문제의 하나는 원자력 시설의 사고와 유사시 핵탄이 폭발할 때 환경에 류입되는 방사성물질의 변화특성을 밝히는것이다. 그래야 방사선에 의한 피해방지대책을 제때에 철저히 세울수 있다.

우리는 강하천수역에 방사성물질들이 류입되는 경우 그것의 거동을 수학적모의를 통하여 고찰하였다.

## 1. 이론적해석

강하천수역에서 방사성물질들의 농도변화상태를 정량적으로 연구하는데서 제기되는 문제는 그것이 연구수역의 수문학적 및 기하학적특성량, 방사성물질의 물리화학적 및 생물학적변화특성, 강하천에 작용하는 외적작용 등과도 관련되어있을뿐아니라 모형의 내부물리적 구조가 비교적 완결되어있는 경우에도 모형에 들어있는 보조변수들과 물리화학적파라미터들을 결정하는 방법론이 해결되지 못한 조건에서는 일반적인 모형을 적용할수 없다는것이다. 그러므로 강하천에서 방사성물질들[3]의 농도변화를 정확히 해명하자면 구체적인 대상수역에 대한 간접적인 조사자료에 기초하여 현상의 물리화학적과정을 밝히고 그에 알맞는 모형을 작성한 다음 해석적인 풀이형태를 결정하는 문제가 해결되어야 한다.

강하천수역에서 U, Cs, Sr 와 같은 물질들은 반감기가 매우 길고 농도변화를 고찰하는 시간이 매우 짧으므로 그것들의 방사성붕괴에 의한 농도변화를 무시할수 있으나 실험을 위하여 연구하려는 강에 방사성동위원소를 주입할수도 없다.

강하천수역에서 방사성물질의 흡착과 침전현상을 평가하려면 강에서 물의 흐름속도와 강의 위치를 비롯한 여러가지 조건에 따라서 실험적으로 분배계수  $K_d$  와 양금률, 실험상수를 결정하여야 한다. 그러자면 많은 노력과 시약, 설비가 요구되는데 이것은 현실적으로 불가능하다.

이로부터 우리는 정-역결합법으로 물리화학적파라미터들을 결정하는 문제가 해결된 조건[1]에 맞게 강하천수역에서 방사성물질의 시공간적농도분포상태를 정량적으로 평가할수 있는 수학적모의방법을 제기하였다.

## 2. 강하천수역에서 방사성물질들의 시공간적변화동태평가를 위한 1차원비정상수학적모형의 해석적풀이

강하천수역에서 방사성물질의 거동을 고찰하는 기간에 물흐름자름면면적의 변화를 무시하는 경우 방사성물질들의 1차원비정상이류막흐름수송방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - Kc \quad x \in (0, l), \quad t \in (0, T] \quad (1)$$

이러한 1차원비정상이류막흐름수송방정식 (1)에 대하여 초기조건과 경계조건이 다음과 같이 주어졌다고 하자.

$$c(x, 0) = \varphi(x), \quad x \in (0, l) \quad (2)$$

$$c(0, t) = f(t), \quad c(l, t) = g(t), \quad t \in (0, T] \quad (3)$$

여기서  $c=c(x, t)$ 는  $t$ 시각  $x$ 점에서 방사성물질의 농도(mg/L)이고  $D$ 는  $x$ 축방향의 막흐름분산계수( $m^2/s$ )이며  $u$ 는 대상수역의 평균물흐름속도(m/s),  $K$ 는 방사성물질의 농도감소과정을 반영한 계수( $1/s$ )이다.[4, 5]

푸리에방법으로 1차원막흐름비정상과정에 대한 막흐름분산방정식의 초기경계값문제 (1) - (3)의 해석적풀이를 구하면 다음과 같다.

$$c(x, t) = \exp(\mu x + \lambda t) v(x, t) \quad (4)$$

여기서  $\mu = \frac{-u}{2D}$ ,  $\lambda = -K - \frac{u^2}{4D}$ ,  $v(x, t) = v_1(x, t) + v_2(x, t)$ 이다.

$v_1(x, t)$ 는 다음의 식으로 구해진다.

$$v_1(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp \left[ 1 - \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 t D \right] \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (5)$$

여기서  $A_n = \frac{2}{l} \int_0^l \varphi(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx$ 이고  $\varphi(x) = \psi(x) \exp(-\mu x)$ 이다.

$v_2(x, t)$ 는 다음의 식으로 구해진다.

$$v_2(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^t \exp \left[ - \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 (t-\tau) D \right] g_n(\tau) d\tau \sin \frac{n\pi x}{l} + \sum_{n=0}^{\infty} B_n \exp \left[ - \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 t D \right] \sin \frac{n\pi x}{l} + Q(x, t) \quad (6)$$

여기서

$$g_n(\tau) = - \frac{2}{l} \int_0^l \frac{\partial Q(x, \tau)}{\partial t} \sin \frac{n\pi x}{l} dx,$$

$$B_n = \frac{2}{l} \int_0^l \varphi_1(\xi) \sin \frac{n\pi \xi}{l} d\xi,$$

$$Q(x, t) = \mu_1(t) + \frac{\lambda}{l} [\mu_2(t) - \mu_1(t)]$$

이다. 그리고  $\varphi_1(x) = Q(x, 0)$ 이고  $\mu_1(t) = f(t) \exp(-\lambda t)$ 이며  $\mu_2(t) = g(t) \exp[-(\mu l - \lambda t)]$ 이다.

우에서 논의한 해석적풀이모형은 1차원비정상이류막흐름수송모형에서 막흐름분산계수

$D$ ,  $K$ 를 정-역결합법으로 결정[2]한데 근거하여 강하천에 류입되는 방사성물질에 대한 시공간적농도변화특성을 연구하는데 리용할수 있다.

식 (4)를 리용하여 강하천수역에 류입되는 방사성물질의 시공간적상대농도변화동태를 모의한 결과는 그림과 같다. 이때 초기자료들로서는  $u=0.2\text{m/s}$ ,  $f(t)=20\text{mg/L}$ ,  $g(t)=2\text{mg/L}$ ,  $l=9\text{km}$ ,  $K=9.03\cdot 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 을 리용하였고 오염물질로 방사성물질들(U, Cs, Sr)을 선정하였다.

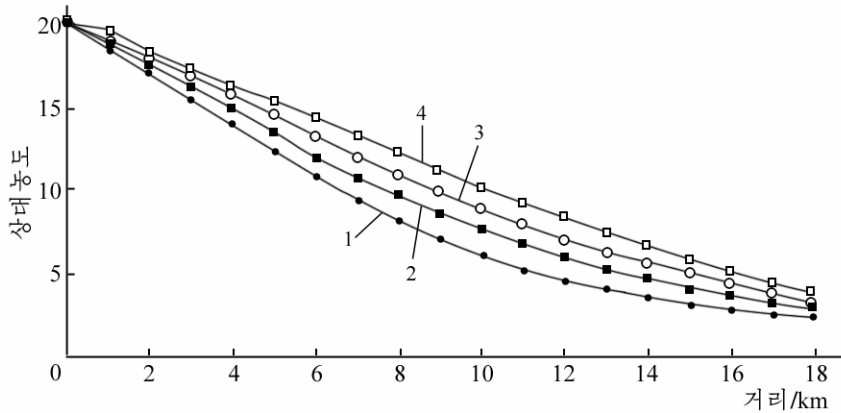


그림. 거리에 따르는 방사성물질의 상대농도변화동태

1-4는 각각 1h, 1h 10min, 1h 20min, 1h 30min후의 모의결과

그림에서 보는바와 같이 방사성물질의 농도는 시간에 따라 약간씩 증가하며 같은 시간에서도 거리가 멀어짐에 따라 전반적으로 낮아진다는것을 알수 있다.

이러한 결과들은 연구하는 강하천으로 방사성물질이 정상방출되는 경우 제때에 필요한 방사성오염방지대책들을 세우지 않는다면 강하천이 방사성물질로 심하게 오염될수 있다는것을 보여준다.

그러므로 강하천에서 방사성오염현상을 방지하려면 강으로 방사성물질이 정상방출되는 현상들이 일어나지 않도록 제때에 필요한 오염방지대책들을 세우며 부득이한 사정으로 방사성물질들을 내보내는 경우에는 방출구마다 방사성물질들의 허용농도를 미리 정해주어야 한다.

이로부터 비정상마당에서 1차원이류막흐름수송방정식에 대한 초기경계값문제 (1)-(3)의 풀이결과식 (4)는 강하천수역에 류입되는 방사성오염물질에 대한 시공간적농도변화특성을 정량적으로 연구하는데 충분히 리용할수 있다.

## 맺 는 말

1) 강하천에서 방사성물질의 농도분포를 결정하기 위한 1차원비정상수학적모형에 대한 해석적풀이를 얻었다.

2) 1차원비정상과정에 대한 방사성물질의 시공간적농도변화특성을 정량적으로 해석하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 42, 1, 7, 1996.
- [2] 한목란; 원자력, 4, 4, 주체101(2012).
- [3] Klaus Froehlich; Environmental Radionuclides, Vienna, Austria, 16, 23~33, 2009.
- [4] P. P. Povinec; Analysis of Environmental Radionuclides, Bratislava, Slovakia, 11, 325~337, 2008.
- [5] Michael Pöschl; Radionuclide Concentrates in Food and the Environment, Taylor & Francis, 153~160, 2007.

주체106(2017)년 3월 5일 원고접수

## **Mathematical Modelling of Space-Time Concentration Distribution of Radioactive Materials at the Rivers**

*Im Jong Gil, Kang Kon Ho and Ho Tong Gil*

Since the problems for deciding the physicochemical parameters by positive-negative combination method at the rivers were solved, we reported the mathematical modelling method that can be able to estimate the space-time concentration distribution of radioactive materials.

First, we solved the analytical problems about the one-dimensional irregularity mathematical model.

Second, we analyzed the change property in the space-time concentration of radioactive materials to one-dimensional irregularity process quantitatively.

Key words: radioactive material, density distribution, river contamination