

## **Simplified Approximation Method of the Multi-Compartments Model on the Migration of Contaminant through Unsaturated Zone**

### **불포화대에서 오염물질 이동현상에 대한 다중구획 모델의 단순 근사방법**

**Jae Hak Cheong**

Korea Institute of Nuclear Safety, 19 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon

**radwaste@kins.re.kr**

**정재학**

한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 구성동 19번지

(Received August 31, 2006 / Approved December 13, 2006)

#### **Abstract**

A conventional single compartment model cannot simulate reasonably the migration phenomenon of contaminants through unsaturated zone, due to the intrinsic unrealistic assumption of the compartment model that contaminants entering a compartment are immediately and uniformly mixed. Although, a multi-compartments model, in which even physically identical layer is divided into multiple compartments, may be used for explaining the retardation of contaminant mass flux along with increasing number of compartments, its numerical modeling is usually time-consuming and appropriate analytical solutions have not been reported yet. In order to improve the conventional compartment models on contaminant migration through unsaturated zone, a series of analytical solutions for multi-compartments model were derived and a generalized constraint under which the results from multi-compartments model can be simply approximated by single compartment model was proposed. The simplified approximation method was verified by a simple numerical analysis on the constraint under hypothetical conditions. It was also proved that the influent contaminant transfer rate from the bulk unsaturated zone can be generally represented into a time-dependent nominal transfer rate rather than a constant. In addition, the nominal transfer rate turned out to be very sensitive to the contaminant transfer rate between compartments in unsaturated zone, but to be almost insensitive to the transfer rate from contaminated zone. It is expected that the simplified approximation method developed in this study can be used for rapid and reasonable estimation of the migration phenomenon of contaminant through unsaturated zone, instead of time-consuming multi-

compartments modeling.

**Key Words** : Multi Compartments Model, Unsaturated Zone, Simplification, Approximation

## 요 약

특정 구획으로 유입된 오염물질이 해당 구획 내부에 순간적으로 균일하게 분포한다는 구획 모델에 대한 기본가정의 한계로 인해, 전통적인 단일구획모델로는 불포화대에서 오염물질의 이동현상을 적절하게 예측할 수 없다. 한편 물리적으로 동일한 불포화대를 여러 개의 구획으로 구분한 다중구획모델링 기법은 실제 불포화대에서의 오염물질 이동 지연효과를 적절하게 설명할 수 있으나, 지금까지 일반적인 해석해가 보고된 바 없으며 고려하는 구획의 개수가 증가할수록 모델링에 많은 시간이 소요되는 등의 한계가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 이류가 지배적인 조건 하에서 불포화대의 오염물질 이동현상에 대한 다중구획모델을 수립하고 이를 해석적인 방법으로 계산할 수 있는 일반해를 유도한 후, 다중구획모델을 단일구획모델로 근사할 수 있는 수학적 제약조건을 도출하였다. 단순화된 근사방법론의 유효성은 가상적인 조건 하에서 간단한 수치해석적 방법을 통해 검증하였다. 물리적으로 동일한 특성을 갖는 불포화대를 단일 구획으로 가정할 경우, 불포화대로부터 포화대로 유입되는 오염물질의 전이율은 상수가 아닌 시간 종속적인 명목전이율로 표현할 수 있음을 증명하였다. 또한 명목전이율은 불포화대 구획간 전이율에 민감하며 오염층으로부터의 전이율에 대한 민감도는 미미한 것으로 나타났다. 이 연구에서 개발된 단순화된 근사방법론은 많은 시간이 요구되는 다중구획 모델링을 통하지 않고 불포화대 오염물질 이동현상을 신속하고 합리적으로 예측하기 위한 목적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**중심단어** : 다중구획모델, 불포화대, 단순화, 근사법

## I. 서 론

구획모델(compartment model)은 의학, 환경공학 등 다양한 분야에서 생체 또는 환경매질 내 물질의 시간변화에 따른 거동을 모사하기 위한 목적으로 광범위하게 적용되고 있으며, 특히 최근에는 방사성폐기물 처분시설이나 원자력시설 해체후 부지 재이용 안전성 평가와 관련하여 방사성핵종의 지중 이동현상을 모사하는데 이용되고 있다[1-3].

일반적으로 구획모델에서는 대상 시스템을 적절한 개수의 구획으로 구분하고 질량보존법칙과 시간변화에 따른 각 구획간 물질 이동현상을 대표하는 일련의 선형미분방정식을 수립한 후, 각 구획 내 물질

의 초기량과 구획간 물질의 전이율(transfer rate) 등의 입력자료를 이용해 미분방정식의 해를 구하게 된다. 이러한 구획모델은 시간변화에 따라 각 구획 내에 존재하는 오염물질의 양, 구획간 오염물질의 전이 플럭스(transfer flux) 등을 예측할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 물리적 특성이 동일한 매질에 대해서도 지나치게 큰 영역을 단일 구획으로 설정할 경우에는 구획모델의 기본가정(특정 구획으로 유입된 물질이 즉시 해당 구역 전체에 균일하게 분포)과 부합할 수 없으며, 구획모델 모사결과의 민감도는 구획의 개수와 단위 구획의 물리적인 규격(size)에 따라 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 구획모델을 이용해 오염물질 이동현상을 정확하게 예측하기 위해

서는 해당 시스템의 특성을 고려하여 구획의 개수를 적절하게 선정해야 한다[3].

Scott는 구획모델을 이용해 오염물질의 환경매질 내 이동현상을 모사하기 위해서는 최소한 피클릿수(Peclet number) 보다 많은 구획을 설정하여야 하며, 그렇지 않은 경우 수치분산(numerical dispersion)으로 인해 모델의 정확도가 저하된다는 분석결과를 제시하였다[4]. 한편 Kirchner와 Rood 등은 토양 내에서 오염물질 이동현상을 모사할 때 물리적으로 의미 있는 구획의 개수는 피클릿수의 1/2 보다 커야 한다고 보고하였다[5,6]. 이들 연구자들의 분석결과는 다음과 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$N_{compt} \geq P_e \text{ or } \frac{1}{2} P_e \dots\dots\dots (1a)$$

$$P_e = \frac{L_T}{a_z} \dots\dots\dots (1b)$$

여기서,

$N_{compt}$  = 구획의 개수,

$P_e$  = Peclet number,

$L_T$  = 매질의 전체 길이(m),

$a_z$  = 종분산지수 (longitudinal dispersivity, m).

오염물질의 불포화대(unsaturated zone, UZ) 이동현상을 모사하기 위한 구획모델의 정확성을 확보하기 위해서는 일단 전체 불포화대를 물리적 특성이 동일한 영역으로 구분하고, 동일한 물리적 변수(예: 두께, 다공도, 포화도, 지연계수 등)를 갖는 영역에 대해서도 적절한 개수의 다중구획(multi compartments)으로 나누어 모델링할 필요가 있다. 그러나 수식 (1a)와 (1b)에서 알 수 있듯이 불포화대의 수직길이(두께)가 길거나 종분산지수가 작은 경우 설정해야 할 구획의 수가 증가하게 되며, 이 경우 다중구획 모델을 수립하는데 많은 시간이 소요될 수 있다. 불포화대에서의 종분산지수는 부지조건에 따라 큰 편차가 있으며, Anderson의 연구결과에 따르면 종분산지수는 매질 전체길이의 1~1/100 범위(대표값 1/10)에 주로 분포함을 알 수 있다[7]. 이들 결과를 종합하면, 불포화대 이동현상을 모사하기 위해서

는 종분산지수의 크기에 따라 최대 100개(또는 50개), 평균 10개(또는 5개)에 달하는 다수의 구획을 설정할 필요가 있다고 말할 수 있다.

Cole 등은 단일구획 모델은 거의 대부분 불포화대 오염물질 이동현상을 과대평가하는 경향이 있으며 다중구획모델에서는 불포화대를 구성하는 구획의 개수가 증가될수록 오염물질 이동속도가 지연되는 효과가 나타나는 것으로 보고하였다[8]. 즉, 불포화대 이동현상에 대한 정확한 모사를 위해서는 다중구획 모델이 적합하며, 이를 통해 다수의 개별구획에 대한 오염물질 전이플럭스와 피크(peak) 발현시기를 예측할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 전술한 바와 같이 다중구획 모델을 수립하기 위해서는 많은 시간적 노력이 필요할 수 있으며, 또한 개별구획에 대한 정보(예: 전이플럭스)는 알 수 있으나 물리적으로 동일한 매질 영역(즉, 다중구획 모델에서 설정된 다수의 구획들) 전체에 대한 정보는 알 수 없다는 한계가 있다.

이 연구에서는 위에서 언급한 불포화대 다중구획 모델링의 한계를 개선하기 위하여 우선 일정한 제한 조건 하에서 불포화대의 오염물질 이동현상에 대한 다중구획 모델에 대한 해석해(analytical solutions)를 유도하고, 단일구획 모델을 기반으로 다중구획 모델의 계산결과를 근사할 수 있는 단순화된 방법론을 제시하였다.

## II. 해석적 방법을 이용한 다중구획 모델링 및 단순화 방법론

### 가. 다중구획모델의 해석해

불포화대에서 오염물질의 이동현상은 주로 이류(advection) 및 분산(dispersion) 메커니즘에 의해 진행되는 것으로 알려져 있으며, 이에 따라 지금까지 개발된 수치모델들은 이류만을 고려하거나 또는 이류와 분산을 함께 고려한 모델로 분류할 수 있다. 참고로 MEPAS, MMSOILS 모델에서는 불포화대 오염물질 이동현상 해석에 이류 분산모델을 채택하였으며, RESRAD, DandD 모델에서는 압출류(plug low)를 가정한 이류모델을 채택하고 있는 것으로 조사되

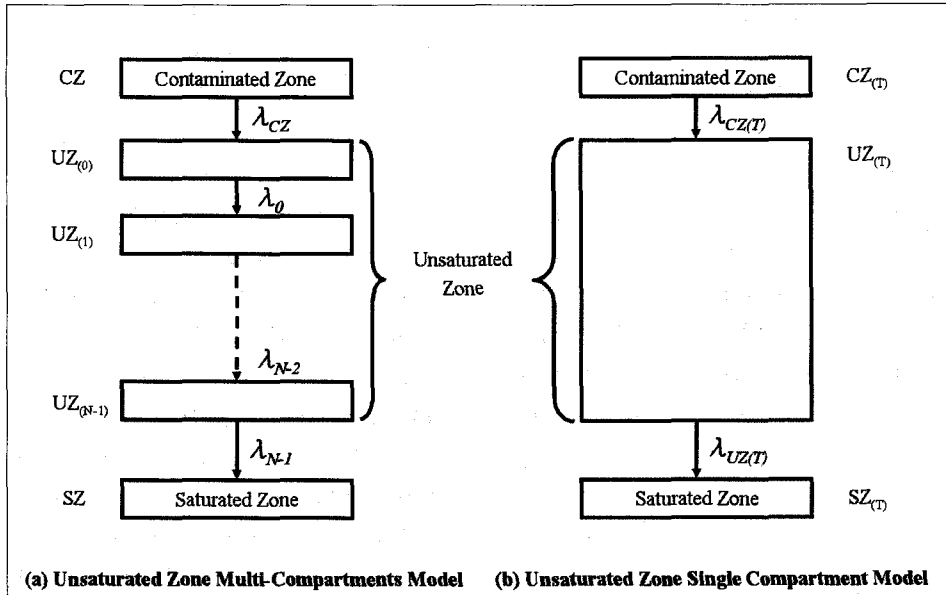


Fig. 1. Schematic view of the uni-directional compartment(s) models for simulating advection-dominant migration of contaminant through unsaturated zone.

었다[2,3].

이 연구에서는 문제를 단순화하기 위해서 이류가 지배적인(advection-dominant) 불포화대 조건을 가정하고, 불포화대를 단일구획 및 다중구획으로 설정한 구획모델을 수립하였다(Fig. 1 참조). 오염층(contaminated zone, CZ)에 존재하는 오염물질은 강수 중에서 오염층 내부로 침투(infiltration)된 물에 의한 침출(leaching)현상에 의해 불포화대로 유입되며, 불포화대로 유입된 오염물질은 이류에 의해 궁극적으로 포화대로 유입되는 것으로 가정하였다. 오염물질의 방사성붕괴는 고려하지 않았다.

Fig. 1(a)에 도시한 바와 같이 불포화대를 N개의 다중구획으로 설정할 경우, 오염층 구획(CZ), 불포화대 각 구획(UZ(0)~UZ(N-1)) 및 포화대 구획(SZ) 내에 존재하는 오염물질 양의 시간 경과에 따른 변화율은 다음과 같은 연립 선형미분방정식으로 표현할 수 있다:

$$\frac{dA_{CZ}(t)}{dt} = -\lambda_{CZ} \cdot A_{CZ}(t) \quad (2)$$

$$\frac{dA_{UZ(0)}(t)}{dt} = +\lambda_{CZ} \cdot A_{CZ}(t) - \lambda_0 \cdot A_{UZ(0)}(t) \quad (3)$$

$$\frac{dA_{UZ(1)}(t)}{dt} = +\lambda_0 \cdot A_{UZ(0)}(t) - \lambda_1 \cdot A_{UZ(1)}(t) \quad (4)$$

$$\frac{dA_{UZ(N-1)}(t)}{dt} = +\lambda_{N-2} \cdot A_{UZ(N-2)}(t) - \lambda_{N-1} \cdot A_{UZ(N-1)}(t) \quad (5)$$

$$\frac{dA_{SZ}(t)}{dt} = +\lambda_{N-1} \cdot A_{UZ(N-1)}(t) \quad (6)$$

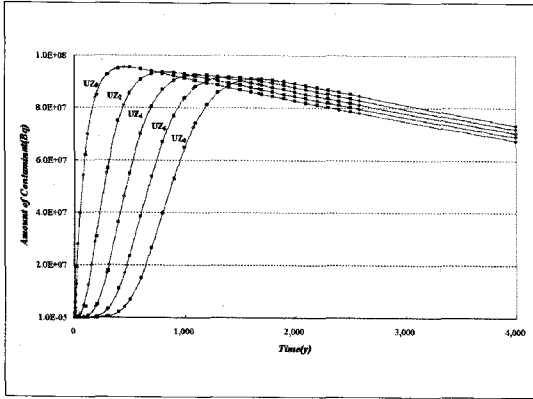
여기서,  $\lambda_{CZ}$  = 오염층으로부터 전이율( $y^{-1}$ ),  $\lambda_{UZ(i)}$  = 불포화대 구획 i로부터 전이율( $i = 0 \sim N-1$ ),  $A_{CZ}(t)$  = 오염층에 존재하는 오염물질의 양(Bq),  $A_{UZ(i)}(t)$  = 불포화대 구획 i에 존재하는 오염물질의 양(Bq),  $A_{SZ}(t)$  = 포화대에 존재하는 오염물질의 양(Bq).

한편  $t=0$  일때 오염물질은 오염층 구획에만 존재하고 불포화대 및 포화대 각 구획에는 존재하지 않는 것으로 가정하였으며, 이러한 초기조건들은 다음과 같이 정리할 수 있다:

$$A_{CZ}(0) = S, A_{UZ(i)}(t) = 0, A_{SZ}(0) = 0 \quad (7)$$

여기서, S = 오염층에 존재하는 초기 오염물질의 양(Bq),

다중구획모델에서 일정시간(t)이 경과한 후 오염층에 존재하는 오염물질의 양(Bq)은 수식 (2)와 (7)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.



**Fig. 2. Comparison of the amount of contaminant in selected UZ compartments (solid line, hollow circle and filled square represent the results calculated by analytical solutions, numerical analysis, and AMBER code, respectively).**

$$A_{CZ}(t) = S \cdot e^{-\lambda_{\alpha} \cdot t} \dots\dots\dots (8)$$

수식 (3)을 적분하고 수식 (7)의 초기조건을 대입하면, 불포화대 첫번째 구획 UZ(0)에 존재하는 오염물질의 양에 관한 다음 관계식을 얻을 수 있다:

$$A_{UZ(0)}(t) = \left( \frac{\lambda_{CZ} \cdot S}{\lambda_{CZ} - \lambda_0} \right) \cdot (-e^{-\lambda_{\alpha} \cdot t} + e^{-\lambda_0 \cdot t}) \dots\dots (9)$$

이 연구에서는 구획모델의 정확성을 향상시키기 위해 물리적으로 동일한 특성을 가진 불포화대를 다중구획으로 구분하는 경우를 고려하였으며, 따라서 불포화대 각 구획에서 다음 구획으로 유출되는 오염물질의 전이율은 동일하다고 가정할 수 있다(즉,  $\lambda_0 = \lambda_1 = \dots = \lambda_{N-1} = \lambda$ ). 이러한 조건 하에서 수식 (4), (5) 및 (7)로부터 불포화대 특정 구획  $i(\geq 0)$  내에 존재하는 오염물질의 양에 대한 해석해를 유도하면 다음과 같다:

$$A_{UZ(i)}(t) = (-M \cdot \lambda_{CZ} \cdot S) \cdot (\lambda^i) \cdot \dots\dots\dots (10)$$

$$\left( -M^i \cdot e^{-\lambda_{\alpha} \cdot t} + \sum_{j=1}^i \left( \frac{1}{j!} \cdot t^j \cdot M^{i-j} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \right) \right)$$

여기서,  $M = (-1)/(\lambda_{CZ} - \lambda)$ .

또한 불포화대 구획의 개수가  $N(\geq 2)$ 개 일 때(즉, 구획  $UZ_0 \sim UZ_{N-1}$ 이 존재할 때), 불포화대에서 유출

**Table 1. A set of hypothetical input parameters for validating the analytical solutions of multi compartments model.**

Parameter	Symbol	Value
Number of UZ compartment	N	10
Initial amount of contaminant in the contaminated zone	S	$1.0 \times 10^{10}$ Bq
Transfer rate of contaminant released from CZ compartment	$\lambda_{CZ}$	$1.0 \times 10^4$ y <sup>-1</sup>
Transfer rate of contaminant released from each UZ compartment	$\lambda$	$1.0 \times 10^2$ y <sup>-1</sup>

된 오염물질이 포화대 구획에 누적된다고 가정하면, 수식 (6)과 (10)으로부터 일정한 시간(t)이 경과한 후 포화대 구획 내에 존재하는 오염물질의 양에 관한 해석해를 다음과 같이 구할 수 있다:

위에서 해석적 방법으로 유도한 다중구획모델에 대한 일반해의 타당성을 확인하기 위하여, 불포화대를 10개의 동등한(identical) 구획으로 구분한 경우를 고려한 가상적인 입력자료 조건을 Table 1과 같이 가정하였다.

$$A_{\alpha}(t) = (Q \cdot \lambda^N) \cdot \left( -M^{N-1} \cdot R_{\alpha} \cdot e^{-\lambda_{\alpha} \cdot t} + \sum_{m=0}^{N-1} \left[ \frac{1}{m!} \cdot M^{(N-m-1)} \cdot \sum_{k=0}^m \left\{ (-1)^k \cdot \frac{m!}{(m-k)!} \cdot R^{k+1} \cdot t^{(m-k)} \right\} \right] \cdot e^{-\lambda \cdot t} + \sum_{n=3}^N (-R)^n \cdot M^{(N-n)} + M^{(N-2)} \cdot (R^2 - R \cdot (M + R_{CZ} \cdot M)) \right) \dots\dots (11)$$

여기서,  $Q = -M \cdot \lambda_{CZ} \cdot S$ ,  $R = -1/\lambda$ ,  $R_{CZ} = -1/\lambda_{CZ}$ .

Fig. 2는 이 연구에서 유도된 해석해, 수치해석방법(제4차 Runge-Kutta법) 및 AMBER 전산코드를 이용하여 Table 1에 제시된 조건 하에서 불포화대 개별 구획(여기에서는 UZ<sub>0</sub>, UZ<sub>2</sub>, UZ<sub>4</sub>, UZ<sub>6</sub>, UZ<sub>8</sub>를 선정) 내에 존재하는 오염물질의 양을 계산한 후 비교한 결과이다[9].

Fig. 2는 이 연구에서 유도한 다중구획모델에 대한 해석해가 타당함을 보여주고 있으며, 또한 불포화대 구획의 번호가 증가할수록 오염물질의 양이 최대값을 보여주는 시점(즉, peak 발현 시점)이 점차 지연

되고 오염물질 양의 최대값(즉, peak의 높이) 또한 감소됨을 예시하고 있다.

**나. 단일구획모델의 해석해**

불포화대 전체를 하나의 구획으로 설정할 경우 (Fig. 1(b) 참조), 시간경과에 따라 오염층, 불포화대 및 포화대 구획에서 오염물질 양의 변화율은 다음과 같은 연립 선형미분방정식으로 나타낼 수 있다:

$$\frac{dA_{CZ(T)}(t)}{dt} = -\lambda_{CZ(T)} \cdot A_{CZ(T)}(t), \dots\dots\dots (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{UZ(T)}(t)}{dt} = & +\lambda_{CZ(T)} \cdot A_{CZ(T)}(t) \\ & -\lambda_{UZ(T)} \cdot A_{UZ(T)}(t) \end{aligned} \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{dA_{SZ(T)}(t)}{dt} = +\lambda_{UZ(T)} \cdot A_{UZ(T)}(t), \dots\dots\dots (14)$$

$$\begin{aligned} A_{CZ(T)}(0) = S, \quad A_{UZ(T)}(0) = 0, \\ A_{SZ(T)}(0) = 0. \end{aligned} \dots\dots\dots (15)$$

오염층 구획의 전이율은 단일구획모델과 다중구획모델에서 동일하므로(즉,  $\lambda_{CZ} = \lambda_{CZ(m)}$ ), 단일구획모델에서 오염층 구획에 존재하는 오염물질의 양은 수식 (8)을 이용해 계산할 수 있다.

불포화대 단일구획(UZ(m))에 존재하는 오염물질의 양과 포화대 구획(SZ(m))에 존재하는 오염물질의 양은 수식 (12)~(14)를 순차적으로 적분하고, 수식 (15)에 제시된 초기조건을 대입함으로써 다음과 같은 일반해로 나타낼 수 있다:

$$\begin{aligned} A_{UZ(T)}(t) = & \left( \frac{\lambda_{CZ} \cdot S}{\lambda_{CZ} - \lambda_T} \right) \\ & \cdot (-e^{-\lambda_{CZ} \cdot t} + e^{-\lambda_T \cdot t}) \end{aligned} \dots\dots\dots (16)$$

$$\begin{aligned} A_{SZ(T)}(t) = & \left( \frac{\lambda_{CZ} \cdot S}{\lambda_{CZ} - \lambda_T} \right) \cdot \lambda_T \\ & \cdot \left( \frac{1}{\lambda_{CZ}} \cdot e^{-\lambda_{CZ} \cdot t} - \frac{1}{\lambda_T} \right) \\ & \cdot e^{-\lambda_T \cdot t} + \frac{1}{\lambda_T} - \frac{1}{\lambda_{CZ}} \end{aligned} \dots\dots\dots (17)$$

**다. 다중구획모델의 단순 근사방법**

대부분의 구획모델에서는 구획간 전이율을 시간에 대해 독립적인 상수(constant)로 가정하고 있지만, 단일구획모델에서 불포화대의 전이율을 상수로 가정하면 다중구획모델에서 나타나는 오염물질의 이동 지연효과(Fig. 2 참조)를 적절하게 모사할 수 없다. 이러한 한계를 극복하기 위하여, 이 연구에서는 단일구획모델을 이용해 다중구획모델의 특성(구획수 증가에 따른 오염물질의 이동 지연현상)을 근사하기 위한 목적으로, 단일구획모델에서 불포화대의 전이율( $\lambda_{UZ(T)}$ )을 상수가 아닌 시간종속적 파라미터( $\lambda_{UZ(T)(t)}$ )로 가정하였다.

불포화대 다중구획모델을 단일구획모델로 근사하기 위해 필요한 제약조건(constraints)으로서 다음과 같은 관계식들을 고려할 수 있다.

$$\begin{aligned} A_{CZ}(t) + A_{SZ}(t) + \sum_{k=0}^{N-1} A_{UZ(k)}(t) \\ = A_{CZ(T)}(t) + A_{UZ(T)}(t) + A_{SZ(T)}(t), \end{aligned} \dots\dots\dots (18)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{N-1} \cdot A_{UZ(N-1)}(t) \\ = \lambda_{UZ(T)} \cdot A_{UZ(T)}(t). \end{aligned} \dots\dots\dots (19)$$

수식 (16)은 질량보존의 법칙에 근거한 조건이고, 수식 (17)은 각 모델에서 포화대로 유입되는 오염물질 플럭스를 나타내는 수식 (6)과 (14)가 수치적으로 일치해야 함을 반영한 것이다. 그러나 이들 조건들은 전체 구획의 오염물질 양과 포화대로의 전이플럭스가 일치하기 위한 필요조건에 불과하여, 단일구획모델과 다중구획모델에서 불포화대 오염물질 이동현상이 전체 시간에 대해 동일하기 위한 충분조건은 아니다.

이 연구에서는 불포화대 다중구획모델을 단일구획모델로 단순화하기 위한 제약조건으로 다음과 같은 관계식을 도출하였다:

$$\begin{aligned} \frac{A_{SZ}(t-\Delta t) - A_{SZ}(t+\Delta t)}{A_{CZ}(t) + \sum_{k=0}^{N-1} A_{UZ(k)}(t)} \\ = \frac{A_{SZ(T)}(t-\Delta t) - A_{SZ(T)}(t+\Delta t)}{A_{CZ(T)}(t) + A_{UZ(T)}(t)}. \end{aligned} \dots\dots\dots (20)$$

여기서,  $\Delta t$  = 오염물질 양의 순간적인 변화를 고려하기 위해 설정한 시간간격(y).

수식 (20)은 오염층과 불포화대에 존재하는 오염물질 총량에 대한 포화대 오염물질량의 변화율이 다중구획모델과 단일구획모델에서 동일하다는 가정에 근거한 것이다. 이 연구에서는  $\lambda_{UZ(T)}(t)$ 를 시간에 따라 가변적인 변수(즉, 시간 t의 함수)로 가정하고, 수식 (20)에 대한 수치해석을 통해  $\lambda_{UZ(T)}(t)$ 의 시간경과에 따른 변화곡선을 구하는 방법을 제안하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 가. 불포화대 단일구획의 명목전이율

수식 (20)에 제시된 다중구획 모델에 대한 단순근사방법의 적용성을 확인하기 위하여, Table 1의 입력자료와 수치해석 방법(뉴턴법)을 이용하여 수식 (20)을 만족하는  $\lambda_{UZ(T)}(t)$ 를 계산하였다. 수차례의 예비계산 결과,  $\Delta t$ 를 1d~0.5y 범위에서 변화시킬 경우에도  $\lambda_{UZ(T)}(t)$ 는 거의 일정한 값을 보여주었다. 이와 같은 방법으로 계산된 UZ 단일구획 모델의 명목전이율(nominal transfer rate)은 물리적으로 동일한 특성을 갖는 불포화대 영역을 하나의 구획으로 보았을 때, 이로부터 유출되는 오염물질의 걸보기 전이율로 이해할 수 있다.

Fig. 3은 다중구획모델에서 오염층 구획의 전이율( $\lambda_{CZ}$ )과 불포화대 구획간 전이율( $\lambda$ )을 각각 표준조

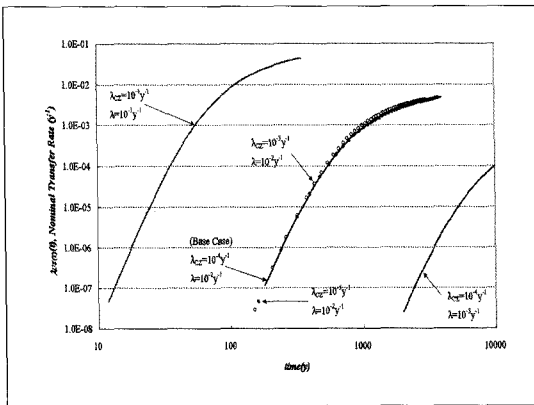


Fig. 3. Sensitivity of the time dependent nominal transfer rate ( $\lambda_{UZ(t)}$ ) to the known constant transfer rates  $\lambda_{CZ}$  and  $\lambda$ .

건( $\lambda_{CZ} = 10^{-4} \text{ y}^{-1}$  및  $\lambda = 10^{-2} \text{ y}^{-1}$ )에서 10배 증가시키거나 1/10로 감소시킬 경우 나타나는  $\lambda_{UZ(T)}(t)$ 의 민감도를 도기한 것이다. 다른 조건이 동일한 경우 다중구획모델에서 가정한  $\lambda$ 의 값이 커질수록 단일구획모델의 명목전이율은 조기에 급격하게 증가하는 현상으로 보여주었다. 그러나  $\lambda_{CZ}$  값의 변화는 명목전이율에 유의할 만한 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

전술한 바와 같이 일반적인 구획모델에서는 구획의 전이율을 상수로 가정하는 것이 원칙이지만, 지금까지 일부 연구자들은 전이율의 시간종속성에 대한 추론을 제시한 바 있다. 특히 Kirchner는 직렬형 구획모델(serial compartment model)에서 구획 내부의 오염물질 체류시간 (residence time, 전이율의 역수)이 실질적으로 시간에 따라 가변적임을 입증한 바 있다[5]. 이는 불포화대 오염물질 이동현상에 대한 다중구획모델을 단일구획모델로 근사할 경우, UZ 단일구획의 명목전이율이 시간종속적인 함수로 나타나는 이 연구의 결과와 부합하는 것이다.

#### 나. 포화대로 유입되는 오염물질의 전이플럭스

수식 (18)~(20)에서 알 수 있듯이, 불포화대 다중구획 모델을 단일구획 모델로 근사하기 위해서는 특정 시각에 불포화대 전체에 존재하는 오염물질의 양과 포화대로 유입되는 오염물질 전이플럭스는 두 모델에서 같은 값을 가져야 한다. 단일구획 모델에서 포화대로 유입되는 오염물질의 전이플럭스( $F_{sz}$  및

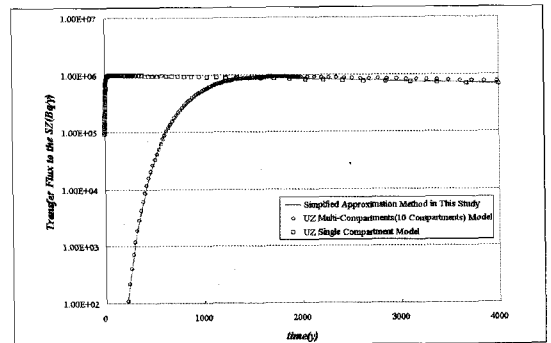


Fig. 4. Comparison of contaminant transfer fluxes into the saturated zone calculated by UZ 10-compartments model, UZ single compartment model, and simplified approximation method (based on the hypothetical conditions listed in Table 1).

$F_{SZ(T)}$ 는 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

다중구획모델:

$$F_{SZ(t)} = \lambda_{UZ(N-1)}(t) \cdot A_{UZ(N-1)}(t), \dots (21)$$

단일구획모델:

$$F_{SZ(T)}(t) = \lambda_{UZ(T)}(t) \cdot A_{UZ(T)}(t), \dots (22)$$

Fig. 4는 Table 1의 표준조건을 적용하여 다중구획 모델과 단일구획모델에서 포화대로 유입되는 전이플럭스를 해석적인 방법으로 계산한 결과와 단순 근사법으로 계산한 결과를 비교한 것이다. 이를 통해 불포화대를 단순한 단일구획으로 설정할 경우, 포화대로 유입되는 오염물질 전이플럭스의 피크가 다중구획모델이나 이에 대한 단순근사법 계산결과에 비해 초기에 발현되고 상대적으로 과대평가하게 됨을 알 수 있다. 또한 이 연구에서 제시한 단순근사법을 이용한 계산결과는 불포화대를 10개의 구획으로 구분한 다중구획모델에서 포화대로 유입되는 전이플럭스 계산결과를 잘 근사하고 있음을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

구획모델을 이용하여 불포화대에서의 오염물질 이동현상을 모사하기 위해서는 불포화대를 다수의 구획으로 구분한 다중구획모델의 적용이 필요하며, 다중구획모델에서 불포화대 오염물질 이동현상은 이 연구에서 도출된 일련의 해석해와 간단한 수치해석을 통한 단순화 방법론을 적용함으로써 근사할 수 있다. 단순화된 근사방법을 적용할 경우 불포화대를 다수의 구획으로 구분하지 않더라도 구획수 증가에 따른 오염물질의 이동 지연효과를 적절하게 모사할 수 있으며, 거시적인 규모에서 불포화대의 오염물질 전이율과 전이플럭스를 예측할 수 있다. 또한 물리적으로 동일한 특성을 갖는 불포화대를 하나의 영역으로 가정할 경우, 불포화대로부터 포화대로 유입되는 오염물질의 전이율은 상수가 아닌 시간종속적인 명목 전이율로 표현할 수 있으며, 명목전이율은 불포화대 구획간 전이율에 민감하고 오염층으로부터의 전이율에 대한 민감도는 미미함이 확인되었다.

이 연구에서 개발된 단순화된 근사방법론은 다중구획 모델링에 소요되는 시간을 절약하고 불포화대 오염물질 이동현상에 대한 신속한 예측을 위한 목적으로 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 또한 이 연구에서 유도된 단방향 다중구획모델에 대한 일련의 해석해는 향후 방사성붕괴효과, 구획별로 상이한 오염물질 전이율, 양방향 오염물질 전이경로 등을 추가적으로 고려한 확장된 다중구획모델에 대한 해석해를 유도하기 위한 기본자료로 활용할 수 있다.

#### 감사의 글

이 연구는 과학기술부가 주관하는 2006년도 원자력연구개발 중장기계획사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] International Atomic Energy Agency, Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities - Test Case, Volume 2, IAEA, 2004.
- [2] J. J. Cheng et al., Benchmarking Analysis of Three Multimedia Models: RESRAD, MMSOILS, and MEPAS, DOE/ORO-2033, US DOE, 1995.
- [3] R. Haaker et al., Comparison of the Models and Assumptions used in the DandD 1.0, RESRAD 5.61, and RESRAD?Build 1.50 Computer Codes with Respect to the Residential Farmer and Industrial Occupant Scenarios provided in NREG/CR-5512, NUREG/CR-5512, Vol. 4, 1999.
- [4] F. A. M. Scott, Investigation into the Application of Compartmental Models in their Representation of Contaminants in the Environment, MSC Thesis, Center for Environmental Technology, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London (1998).
- [5] Gerald Kirchner, Applicability of Compartmental



- Models for Simulating the Transport of Radionuclides in Soil, *J. Environ. Radioactivity*, Vol. 38, No. 3, pp. 339-352, 1998.
- [6] Arthur S. Rood, Groundwater Concentrations and Drinking Water Doses with Uncertainty for the U.S. Ecology Low Level Radioactive Waste Disposal Facility, Richland Washington, K Spar Inc., (2003).
- [7] National Research Council, Studies in Geophysics - Groundwater Contamination, National Academy Press, 1984.
- [8] C. R. Cole et al., Groundwater Models in Support of NUREG/CR-5512, NUREG/ CR-5621, Pacific Northwest National Laboratory, 1999.
- [9] Swedish Radiation Protection Authority, Further AMBER and Ecolego Intercomparisons, SSI Report 2004:01, 2004.