

삼중수소를 이용한 지하수 연령측정 방법에 관한 연구

A Study on Groundwater Age Dating Methods Using Tritium

오진석(Jin - Seok O)* · 김선준(Sun - Joon Kim)**

요약 : 지하수에 대한 삼중수소농도의 측정치가 발표된 충청남도 청양, 제주도 지역 및 미국 조지아 지역에 대해 평균체제시간을 계산하는 지하수연령측정 모델인 PFM, CMM, DBM과 평균체제시간과 분산매개변수를 동시에 계산하는 DNM, DM(C_{FF})모델을 적용하여 그 결과를 비교하였다. 입력자료인 강우의 삼중수소 농도의 부족한 측정자료를 보완하기 위하여 한국의 포항, 카나다의 오타와지역의 강수자료를 이용하여 입력함수를 작성하였다. 내재적으로 적은 분산을 가정하는 PFM과 DBM모델에 의한 결과는 유사하게 계산되었으며, 동일한 지역에서도 특이하게 높은 농도를 보이는 지점은 CMM에 의한 계산이 되지 않았다. 평균체제시간과 분산매개변수가 동시에 계산된 DNM과 DM(C_{FF})모델의 결과는 PFM, CMM, DBM의 결과를 이용하여 매개변수값을 한정시켰다. 동일지역에서도 삼중수소농도의 변화가 큰 경우는 각 지점마다 특징적인 지하수유동특성을 보이는 것으로 판단되어, 전 지역에 걸쳐 동일한 모델을 일률적으로 적용하는 것은 바람직하지 않은 것으로 사료된다.

Abstract : Areas of Chungyang in Chungcheongnamdo, Cheju island and Georgia in U.S.A. were selected to calculate their groundwater ages and dispersion parameters using tritium. Piston flow model, Completely mixing model and Dispersion binomial model which calculate mean residence times, and Dispersion normal model and Dispersion model(C_{FF}) which calculate mean residence times and dispersion parameters simultaneously were applied. Since the input data, tritium concentrations of rainwaters, lack in part, tritium input function was prepared using the correlation of tritium concentrations of rainwaters of Pohang, Korea and Ottawa, Canada. Similar results of PFM and DBM reflect the intrinsical similarity of two models, assumption of low dispersion. The ages of sites of showing relatively higher tritium concentrations than other sites in the same region were not calculated by CMM. Since the calculations of DNM and DM(C_{FF}) provide the combination of wide ranges of parameters and groundwater ages, the ranges of dispersion parameters were narrowed down under the assumption that ages calculated by PFM and DBM are correct. Since large variation of tritium concentrations of outflows in a same region may reflect the different characteristics of each groundwater flow regime, using only one specific model on a whole region is not recommended.

서 론

지하수의 연령추정에는 여러 가지 동위원소들이 이용될 수 있으나 강수의 일부분으로 대수층에 유입되는 삼중수소는 유입농도가 계절별, 연도별로 변하고 방사능 붕괴 성질을 가지고 있으며 물 자체로 이동하는 특성을 가지고 있으므로 매우 유효한 추적자이다.

지하수 연령추정의 모델은 Eriksson(1958)이 완전혼합모델(CMM, Completely mixing model)을 소개한 이후, Nir(1964)가 Piston flow model(PFM)과 분산방정식의 한 해에 기초한 분산모델을 소개하였다. Davis et al.(1967)과 Dincer et al.(1970)은 Nir의 접근방법의 단순화를 위해 대칭이항분포를 이용한 분산모델을 적용하였다. Maloszewski와 Zuber(1982)는 PFM, CMM, 선형모델(Linear model) 등의 기본모델들을 혼합하여 분산을 나타낼 수 있는 모델들을 제시하였다.

본 연구에서는 평균체제시간을 가정하고 연령을 산출하는 Piston flow model, 완전혼합모델, 분산이항분포모델과 평균체제시간 및 선택된 확률분포함수에 따른 특징적 분산매개변수를 함께 가정하는 분산모델인 분산정규분포모델, 분산 방정식의 C_{FF} 해를 이용한 모델의 이론적 배경을 검토하였으며, 이러한 모델들을 유출수 자료가 발표되어 있는 3개지역(청양, 제주, 미국 조지아)에 대해 적용하여 그 결과를 비교하였다. 적용대상지역으로 선정한 곳은 1990년에서 1992년까지 유출수 자료(한국 원자력 연구소, 1991)가 발표된 결정질암반지역인 청양지역, 분산정규분포에 의한 계산결과(Rose, 1993)가 있는 결정질암반지역인 조지아 지역, 분산이항분포모델(기울기와 절대값 비교에 의한 근사치를 구하는 방법)에 의한 계산결과가 발표된 투수성 화산암 지역인 제주지역(Davis et al., 1970)이다.

입력 자료

*서울시 서초구 반포4동 52-1, 삼보지질(주) 토목사업부, 137-044
**서울시 성동구 행당동 17, 한양대학교 자원공학과, 133-791

삼중수소 입력 자료인 강수의 삼중수소농도는 국내 포항지역

의 측정치를 사용하였으나, 측정기간이 부족하므로 이를 보충하기 위하여 세계적으로 가장 오랜 자료를 가지고 있는 캐나다 오타와지역 및 조지아지역의 측정치와 상관관계분석을 통하여 입력자료를 만들어 사용하였다.

청양지역의 경우, 삼중수소 유출농도의 측정기간이 1990년부터 1992년까지이므로 강수내의 삼중수소입력자료를 1953년부터 1991년까지 준비하였다. 우선 61년부터 76년까지의 입력자료는 I.A.E.A.관측지점(network)의 하나인 포항자료(I.A.E.A., 1981)를 사용하였고 53-60년과 77-78년은 포항지역과 오타와지역 자료(I.A.E.A., 1981)와의 상관관계분석을 통하여 만들었으며, 79-91년은 조지아주의 피드몬트지역(Rose, 1993)과의 상관관계분석을 통하여 만들었다.

1991년의 유출수 자료가 있는 조지아지역의 삼중수소입력자료는 기존문헌(Rose, 1993)에 발표된 1953년부터 1991년까지의 자료를 사용하였다. 1967년도 유출수 자료가 있는 제주지역의 삼중수소입력자료는 기존문헌(Davis et al., 1970)의 자료를 이용하였다.

사용된 연도별 입력 자료는 삼중수소농도를 강수량에 의해 가중한 연평균값이다.

$$\langle C \rangle = \frac{\sum C_i P_i}{\sum P_i} \quad (1)$$

여기서 C_i 는 i 번째 달의 삼중수소농도이고 P_i 는 i 번째 달의 강수량이며 $\langle C \rangle$ 는 강수량에 의해 가중된 연평균 삼중수소농도를 나타낸다.

지하수 연령추정방법 분류

현재까지 균열을 통하여 지하수가 유동하는 지하수 체계(Fractured rock)에서 사용되는 지하수 연령추정방법은 크게 시스템이론과 추계론적 모델로 분류할 수 있다. 시스템이론은 단위펄스에 대해 시스템의 유입과 유출사이의 관계를 규명하는 이론으로 선형시스템해석에 기초하여 유입과 유출관계를 공식화하여 통과시간분포를 유도하며, 추계론적 모델은 변하는 속도장에서의 추적자 유동을 묘사할 수 있다. 시스템이론은 컨버루션 접근방법(Lumped parameter model)과 혼합구획들의 상호 연관된 배열을 고려하는 유한상태혼합구획 접근방법(Distributed parameter model)으로 구분할 수 있다. 후자는 계산결과 얻어진 여러 매개변수값의 물리적인 의미에 의심의 여지가 있기 때문에 일반적으로 연령추정에는 많이 사용되지 않으며 변하는 유입을 수학적으로 처리하기가 쉬운 컨버루션 접근방법이 연령추정에 많이 이용된다. 본 연구에서는 유입지역으로의 유량이 일정하다는 정상상태의 가정하에 컨버루션 접근방법을 이용하여 지하수 연령을 산출하였다.

지하대수층에서 질량보존법칙에 근거한 추적자유입과 유출의 관계를 컨버루션 적분에 의해서 표현하면 다음과 같다.

$$Q_0(t) C_0(t) = \int_0^t Q_i(t-\tau) C_i(t-\tau) g(\tau, t) d\tau \quad (2)$$

여기서 $C_0(t)$ 는 추적자 유출농도, $C_i(t-\tau)$ 는 추적자 유입농도,

$Q_i(t-\tau)$ 는 유입량, $Q_0(t)$ 는 유출량, $g(\tau, t)$ 는 시스템반응함수이다. 정상상태를 가정했으므로 (2)식은 (3)식으로 간단히 표현할 수 있다.

$$C_0(t) = \int_0^t C_i(t-\tau) g(\tau) d\tau \quad (3)$$

이 식을 이용하는 방법에는 두 가지가 있다. 알려진 추적자 입력자료와 관측된 추적자 출력자료를 이용해 시스템반응함수를 직접 계산하는 방법(Identification or inverse type of problem)과 시스템반응함수인 통과시간분포함수를 가정한 후 모델에 의한 출력값과 실제 측정치를 비교해서 가장 타당한 평균체제시간을 구하는 방법이다. 본 연구에서는 지하수 연령추정에 주안점을 두었으므로 유입시기를 결정하는 Lumped parameter 개념을 도입하여 후자의 방법을 이용하였다. 대부분의 경우 지하수로의 유입은 이산구간(Discrete interval)으로 발생하므로 (3)식은 (4)식으로 표현될 수 있다.

$$C_0(t) = \sum_0^t C_i(t-\tau) g(\tau) e^{-\lambda\tau} \quad (4)$$

(4)식은 또한 대수층 안에서의 방사능 붕괴를 고려한 식으로써, λ 값(0.0558)은 방사능붕괴상수이다. 이 식에 기초하여 시스템 내부에서의 지하수 통과시간분포의 가정된 형태에 따라 분류된 5개의 다른 시스템반응함수를 갖는 모델들을 청양, 조지아, 제주지역에 각각 적용하여 지하수 연령을 산출하였다.

모델적용지역과 출력자료

청양지역은 대부분이 선캠브리아기의 화강편마암으로 구성되며 이 지역내 활석광산(대홍)과 금광산(삼광)을 연결하는 수평갱도에서 유출되는 지하수의 연령을 추정하였다. 활석광산의 수평 갱도입구로부터 약 135 m지점을 기점으로 하여 38m(A), 150 m(B), 340 m(C), 600 m(D), 860 m(E)지점의 파쇄대를 통해 배출되는 갱내유출수(Figure 1)의 1991년도 삼중수소 농도값을 출력자료(Table 1)로 이용하였다. 미국 남동 피드몬트지역인 조지아지역은 고생대 규장질 편마암과 편암지역으로서 Yellow river의 YR8, YR17지점, Pole branch

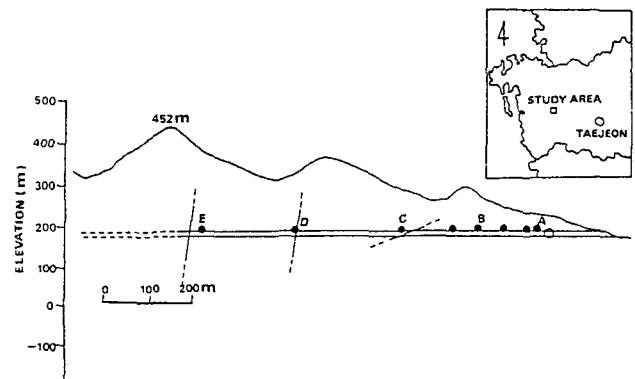


Figure 1. Map of the tunnel in Chungyang area. Open circle indicates the starting point of sampling.

Table 1. Tritium concentrations of samples and corresponding calculated ages by various models with the ranges of parameter values for DNM and DM (Chungyang).

	A	B	C	D	E
Tritium conc.*	13.45	11.94	21.14	13.08	13.59
PFM	17년	18년	21년	17년	19년
Ages	CMM	18년	15년	17년	25년
	DBM	18년	17년	21년	17.6년
	$\sigma(DNM)$	26-27년	28-29년	17년	28년
	$D/vx(DM(CFF))$	1.0-1.1	0.8-1.3	0.4	1.1
					1.2-1.5

*Unit is TU. D/vx is dispersion parameter($=pc^{-1}$).

Table 2. Tritium concentrations of samples and corresponding calculated ages by various models with the ranges of parameter values for DNM and DM(Chungyang).

	A	B	C	D	E
Tritium conc.*	18.9	21.1	30.7	27.9	23.0
PFM	16년	18년	20년	22년	19년
Ages	CMM	41년	21년		22년
	DBM	20년	21년	23년	22.6년
	$\sigma(DNM)$	23-25년	22-23년	14-15년	17년
	$D/vx(DM(CFF))$	1.0-1.5	0.0-1.3	0.1-0.3	0.4-0.5
					0.8-1.1

*Unit is TU. D/vx is dispersion parameter($=pc^{-1}$).

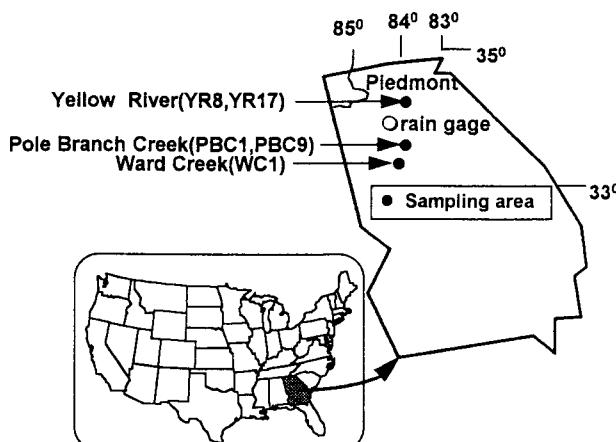


Figure 2. Sampling sites in Georgia.

creek의 PBC1, PBC9지점, Ward creek의 WC1지점의 91년도 유출수 자료(Table 2)를 선택하여 모델에 적용하였다(Figure 2). 제주지역은 높은 투수성을 가진 화산암 지질로서 빠른 속도의 지하수 유동로가 특징으로 중간지역인 16지점과 45지점의 샘물과 고산간지역인 15지점의 샘물에서 1967년도에 측정한 삼중수소농도(Table 3)를 각 모델에 적용하였다(Figure 3).

적용모델 및 결과

평균체제시간을 가정한 후 PFM, CMM, 분산이항분포모델

Table 3. Tritium concentrations of samples and corresponding calculated ages by various models with the ranges of parameter values for DNM and DM(C_{FF})(Cheju).

	S16	S45	S15	
T.U.	170	210	190	
PFM	5.2년	5년	5.2년	
Ages	CMM	8년	4년	3년
	DBM	6.2년	5.6년	6년
	DTM	7.6년	3년	2.6년
	$\sigma(DNM)$	3-4년	1-3년	1-4년
	$D/vx(DM(C_{FF}))$	1.0-1.2	1.0-1.5	

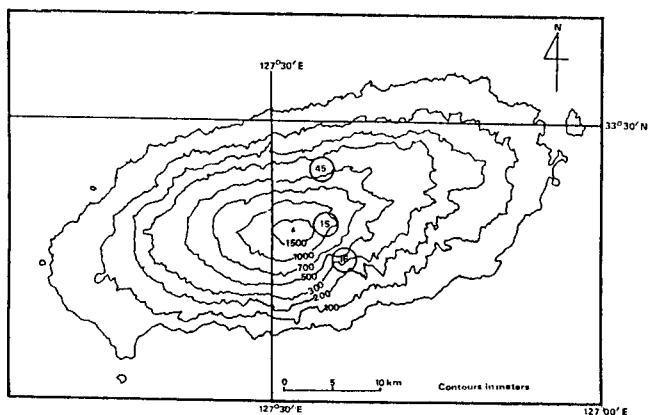


Figure 3. Topographic map of Cheju island with sampling sites, open circles with numbers.

(DBM, Dispersion binomial model)을 적용하여 계산된 삼중수소농도값과 삼중수소농도측정값이 가장 유사한 평균체제시간을 지하수의 연령으로 산출하였다. 이를 중 PFM과 CMM은 지하수유동특성의 양 극단을 나타내게 되며 일정한 유입의 경우 PFM에 의해서 계산된 연령은 최소값, CMM에 의해서 계산된 연령은 최대값을 나타낸다. 이들 모델은 평균체제시간을 계산하는 것이며, 평균체제시간은 시스템의 연령을 의미한다.

대수층내에서는 수리지질구조에 따라 어느 정도 분산과 확산이 일어난다. 추적자로 삼중수소를 사용하는 경우, 반감기가 12.43년이므로 오랜기간에 걸쳐 일어나는 확산은 중요성이 미약하므로 본 연구에서는 고려하지 않았다. 분산을 고려하는데 있어 분산의 정도를 나타낼 수 있는 매개변수가 도입된 분산모델인 분산정규분포모델(DNM, Dispersion normal distribution model)과 분산모델(C_{FF} 해)을 각 지역에 적용하였다.

Piston Flow Model

이 모델은 시스템으로 들어간 물의 일부분이 바로 이전에 들어간 부분을 따라서 흐르며 다른 시간에 들어간 물은 서로 섞이지 않는다는 가정에 기초한다. 유입지역으로부터 거리 x_0 에 위치한 시료채취 지점에서의 삼중수소농도, C는 다음과 같다.

$$C = C_0 \exp\left(\frac{-x_0}{\sqrt{T}}\right) = C_0 \exp\left(\frac{-t}{T}\right) \quad (5)$$

여기서 C_0 은 핵실험이전시대의 일정한 삼중수소농도, v 는 일정한 지하수 유동속도, T 는 삼중수소 평균수명(18년)이다. 이 모델의 시스템반응함수 $g(t)$ 는 $\delta(t-\tau_0)$ 이므로 (5)식은 (6)식과 같이 쓸 수 있다. 함수는 Dirac delta 함수이고 τ_0 는 평균통과시간으로 지하수의 연령을 나타낸다.

$$C_0(t) = C_0(t-\tau_0)e^{-\lambda t} \quad (6)$$

Figure 4(a), (b)의 x축은 청양과 조지아 지역의 강수가 대수 층으로 유입된 것으로 가정한 연도를 나타내며, y축은 가정된

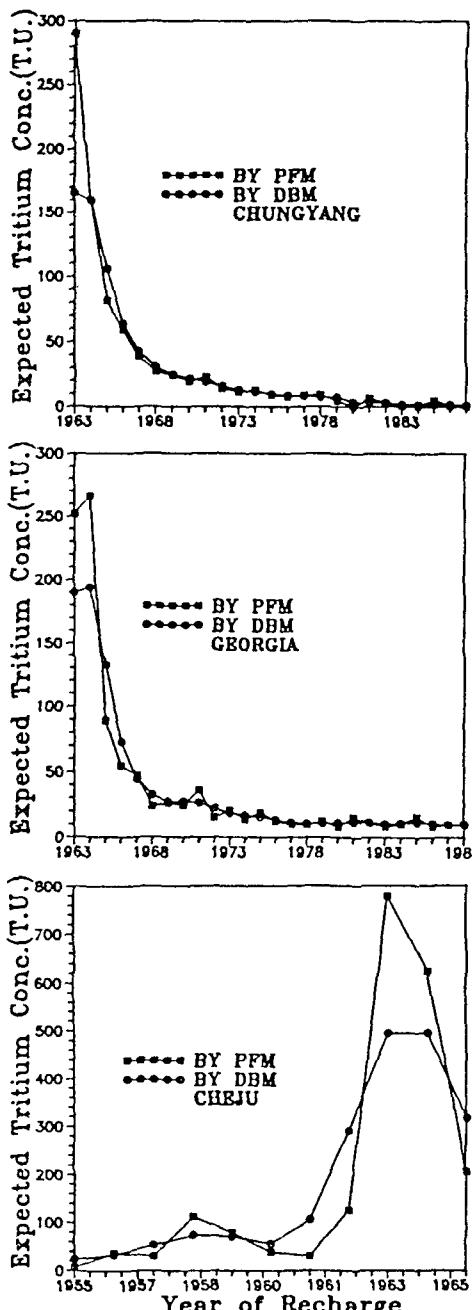


Figure 4. Year of recharge vs. expected tritium concentration of outflows. (A)Chungyang in 1991, (B)Georgia in 1991, (C)Cheju in 1967.

유입연도에 따른 1991년도 유출수의 삼중수소농도값을 PFM에 의해 계산한 결과를 나타낸다. Figure 4(c)는 동일한 방법으로 제주지역의 1967년도 유출수의 삼중수소농도값을 계산한 것이다.

완전혼합모델

이 모델은 충진수가 전 대수층을 통해 항상 일정하게 혼합한다는 가정에 기초하고 지수함수통과시간분포의 시스템반응함수를 갖으므로 다른 모델처럼 일정방향의 유동은 가능하지 않다. 이론적으로는 완전혼합대수층의 경우와 연관되지만 균열이 발달한 지역과 카르스트 대수층 안에서의 지하수같은 몇몇 수문시스템에 대해서도 만족할 만한 것으로 제시되었다 (Yurtsever, 1983).

$$C_0(t) = \sum C_i(t-\tau)(1-k)^{\tau}e^{-\lambda t} \quad (7)$$

$$k = 1 - 1/T \quad (8)$$

(7)식(Ferronsky and Polyakov, 1982)에서 τ 는 조지아와 청양의 경우, 0에서부터 38까지 변하고 제주의 경우는 0에서부터 15까지 변한다. (8)식에서 T 는 평균체제시간이다. Figure 5 (a), (b)의 x축은 가정해준 평균체제시간을 나타내고 y축은 각각의 평균체제시간에 해당하는 CMM에 의해 계산된 1991년도의 청양지역과 조지아지역 유출수의 삼중수소농도값이다. Figure 5(c)는 1967년도의 제주지역에 대한 결과이다.

분산모델

수문시스템에서 실제 추적자거동은 대부분 PFM과 CMM사이에서 일어난다. 분산모델은 서로 다른 시간에 시스템으로 유입되는 충진수간의 상호혼합과 함께 수리학적 분산을 가정한 모델이다.

Nir(1964)는 대수층으로 농도가 일정한 유입수가 들어가고 시스템반응함수는 정규분포의 형태를 갖는다는 가정하에 다음과 같이 나타내었다.

$$C(x_0, t) = \frac{C_0}{(4\pi Dt)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x_0-vt)^2}{4Dt}\right] dx \quad (9)$$

$$C(x_0, x) = \frac{C_0}{(4\pi D_m x)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x_0-vt)^2}{4D_m x}\right] dx \quad (10)$$

(9)식에서 D 는 수리학적 분산계수(Dispersion coefficient)이고, (10)식에서 D_m 은 D/v 로 수리학적 분산상수(Dispersion constant)를 나타낸다. 삼중수소가 평균수명 T 의 값으로 붕괴한다는 것을 고려한다면 다음과 같이 된다.

$$C(x_0, x) = \frac{C_0}{(4\pi D_m x)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x_0-x)^2}{4D_m x} - \frac{x}{vT}\right] dx \quad (11)$$

(11)식은 1953년 이후에 일어난 삼중수소 유입농도의 변화를 고려하고, 대수층의 수리지질구조에 따른 연구자의 판단에 의한 적당한 확률분포함수를 선택하여 변형할 수 있다. 본 연구에

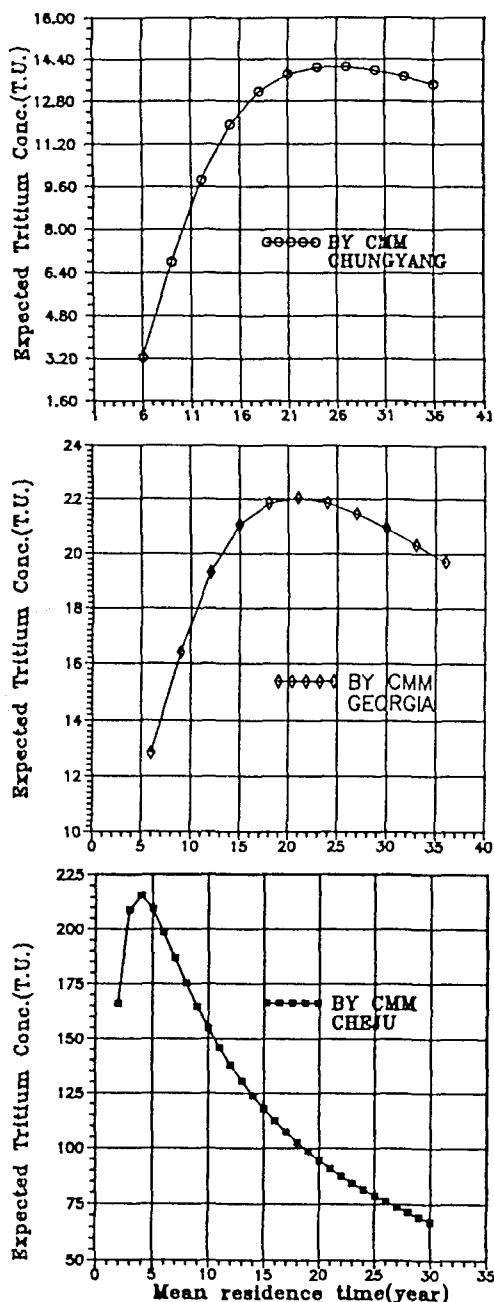


Figure 5. Assumed mean residence time vs. expected tritium concentration of outflows by CMM. (A) Chungyang, (B) Georgia, (C) Cheju.

서는 분산이항분포모델(DBM), 분산정규분포모델(DNM), 분산방정식의 CFF해 모델을 적용하였다. 이러한 모델들의 적용 가능성은 이론적으로 정당화 되기보다 실제 과정을 어느 모델이 가장 잘 나타낼 수 있는가에 따른 것이다(Himmelblau and Bischoff, 1968).

분산 이항분포 모델

지하수의 유입은 이산적으로 발생하는데 착안하여 이항분포함수를 이용하였다. 일반적으로 이 모델은 분산이 작은 지역에 적용되는 특징을 가지고 있다(Maloszewski and Zuber,

1982).

$$\left[\begin{matrix} n \\ x \end{matrix} \right] = \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x q^{n-x} \quad (12)$$

표준편차가 1인 경우 $n=4$ 이므로 적용한 n 값은 4로 하였으며, Figure 4에 DBM에 의해 계산된 결과를 PFM 계산결과와 함께 도시하였다.

분산 정규분포 모델

이 모델은 어느 기간에 채취된 지하수의 연령은 지하의 수리학적 분산에 의해 정규분포를 나타낸다고 가정한다. 정규분포 내의 임의의 연도(year)의 중량비는 가정된 평균체제시간과 이에 대한 지하수 연령들의 표준편차에 기초한다.

$$T_i^* = T_i e^{-\lambda t} \quad (13)$$

여기서 T_i 는 i 번째 연도(i th year)에 대한 삼중수소 유입농도, λ 는 붕괴상수, t 는 시간(1991년도-유입년도), T_i^* 는 i 번째 연도에 대한 방사능붕괴를 보정한 삼중수소농도이며 1953년 이전의 붕괴를 보정한 삼중수소값은 0으로 간주되었다. 평균붕괴보정치(α)는 연속되는 두 구간(연속된 연도; $i, i+1$)에서 계산된다.

$$\alpha = \frac{(T_i^* + T_{i+1}^*)}{2} \quad (14)$$

전체 유출수에 대한 각 구간의 중량비($A_{i,i+1}$)는 (14)식으로부터 계산된 각 값에 할당되는데 이것은 가정된 평균체제시간과 표준편차가 주어질 때 각 유한구간(x_i+x_{i+1})사이의 정규분포곡선 아래의 면적($A_{i,i+1}$)을 계산함으로써 구할 수 있다(Alder and Roessler, 1977). 두 점 사이의 곡선의 면적은 정해진 구간에 대한 전체확률(1.0)의 부분을 나타낸다. 같은 계산이 정규분포함수의 대칭성에 기초한 연속되는 x_i 와 x_{i+1} 에 대해서도 수행되었다. 연속된 연도에 대한 가중평균 삼중수소농도값(Ω)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Omega = \alpha(A_{i,i+1}) \quad (15)$$

n 년으로 이루어진 기록상의 기간은 각 Ω 값들의 합이 된다. 청양과 조지아지역은 평균체제시간을 1년부터 40년까지 1년씩 증가시키고 표준편자는 1년부터 30년까지 1년씩 증가시키면서 1991년도에 예측되는 삼중수소농도값을 계산하였다(Figure 6(a),(b)). 제주지역은 1967년도 유출수 측정자료를 이용하였으므로 평균체제시간을 1년부터 15년까지 1년씩 증가시키고 표준편자는 1년부터 20년까지 1년씩 증가시키면서 1967년도에 예측되는 삼중수소농도값을 계산하였다(Figure 6(c)).

분산 방정식의 CFF해 모델

이 모델은 일반적으로 지금까지 적용되어 온 분산방정식의 해들보다 자연상태의 지하수시스템을 더욱 적절하게 나타낼 수 있으리라 판단되는 분산방정식의 새로운 해를 이용하였다(Maloszewski and Zuber, 1982). 이러한 해들은 대수층안에서 용질이동의 묘사를 위해 일반적으로 사용되는 분산 방정식(Bear, 1972)에 기초한다.

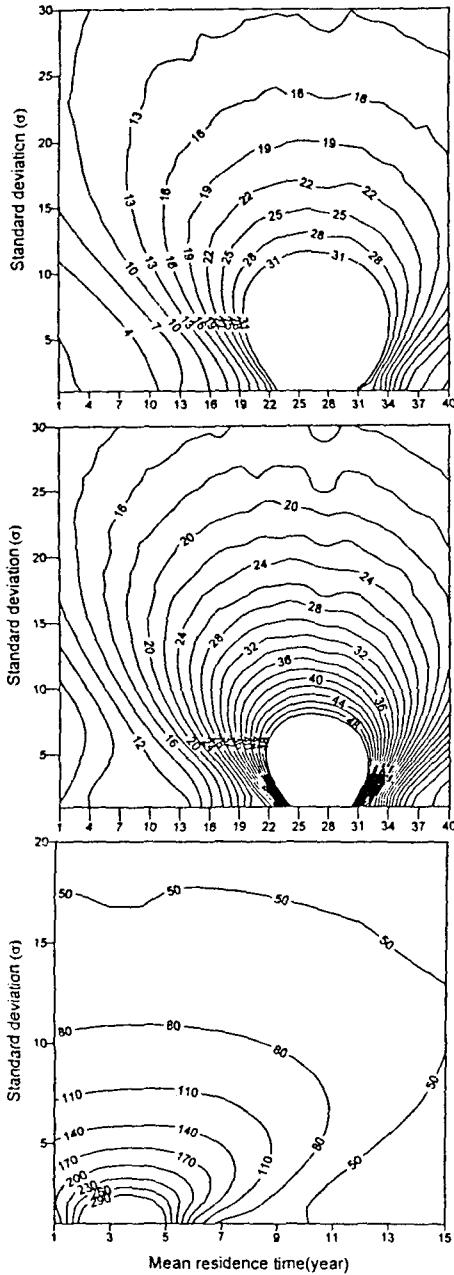


Figure 6. Computed tritium concentrations by DNM. Numbers with contours are concentrations in T.U. (A)Chungyang, (B)Georgia, (C)Cheju.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} [D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} - v_i c] \quad (16)$$

여기서 c 는 용질농도이고 t 는 시간변수, x_i 는 공간변수, v_i 는 i 방향에서의 유속성분, D_{ij} 는 dispersion tensor이다. 종분산계수 D_L 과 횡분산계수 D_T 가 v 에 비례한다는 것을 가정하면 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{1}{v} \frac{\partial c}{\partial t} = \alpha_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \alpha_T (\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}) - \frac{\partial c}{\partial x} \quad (17)$$

일차원 유동을 고려하면,

Table 4. List of symbols used in two dispersion models.

CRR	concentration observed for both injection and detection performed uniformly at the aquifer cross-section
CRF	concentration observed for injection as above and detection in outflowing water(averaged by flow rates)
CFF	concentration observed for both injection and detection averaged by flow rates
CFR	concentration observed for injection averaged by flow rates and detection averaged by the cross-section area

$$\frac{1}{v} \frac{\partial c}{\partial t} = \alpha_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{\partial c}{\partial x} \quad (18)$$

여기서 $\alpha_L = D_L/v$, $\alpha_T = D_T/v$ 는 각각 종분산상수, 횡분산상수를 나타낸다.

이 경우 농도의 개념은 Flux농도와 Resident농도로 나누어지고, 이들의 관계는 다음과 같다(Kreft and Zuber, 1978).

$$C_F V = C_R V - D_L \frac{\partial C_R}{\partial x} \quad (19)$$

Flux농도(C_F)는 주어진 단면적을 통과하는 Volumetric fluid flux($Q=\Delta V/\Delta t$)에 대한 용질 flux($\Delta m/\Delta t$)의 비를 나타내고, Resident농도(C_R)는 어떤 순간에서 시스템의 주어진 체적에 포함된 유체의 단위체적(ΔV)에 대한 용질의 질량(Δm)의 비를 의미한다. 순간적인 유입에 대하여 (19)식의 분산방정식을 풀면 4가지 해를 구할 수 있다(Table 4). C_{RR} 과 C_{RF} 해는 무한대 매개체($-\infty$ 에서 ∞ 까지)에 대해 타당하고 유입은 무한소로 얇은 Slab에서 행해지며 수학적으로 이 유입 mode는 x 변수에 대해 정의되는 $\delta(x)$ (Dirac delta function)에 의해 묘사된다. C_{FR} 과 C_{FF} 해는 유입수가 무한소로 얇은 시간동안 추적자에 의해 유입되는 반무한 매개체에 대해서 유도되었다. 수학적으로 이 유입 Mode는 $\delta(t)$ 함수에 의해 나타낼 수 있다. 자연상태의 환경추적자들은 유량에 비례해서 지하수계로 들어가고 지하수 유출지역에서 유량에 의존해서 측정된다. 그러므로 C_{FF} mode가 실제적인 상황과 가장 가까운 것으로 볼 수 있다. C_{FF} 해를 $T=x/v$ (물의 평균 통과시간)에 의해서 분산계수(D) 대신에 Peclet number의 역수인 분산 매개변수 $D/vx (=Pe^{-1})$ 를 이용하여 시스템반응함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이 분산방정식의 해(C_{FF} mode)가 시스템반응함수로 이용되었다.

$$g(t) = (4\pi * D * vx * VT)^{-1/2} t^{-1} \exp[-(1-VT)^2 * (4 * D * vx * VT)^{-1}] \quad (20)$$

여기서 D/vx 는 무차원 분산 매개변수이고 T 는 평균체제시간을 나타낸다.

일반적으로 자연상태에서 D/vx 의 최대값은 2.0이다 (Maloszewski and Zuber, 1982). 청양과 조지아지역의 경우 평균체제시간을 1년에서 40년까지 1년씩 증가시키고 D/vx 값은 0.1에서 2.0까지 0.1씩 증가시키면서 1991년도에 예측되는 삼중수소농도값을 계산하였다. 제주지역은 1967년도 유출수 측정자료를 이용하였으므로 평균체제시간을 1년에서 15년까지 1년씩 증가시키고 D/vx 값은 0.1에서 2.0까지 0.1씩 증가시키

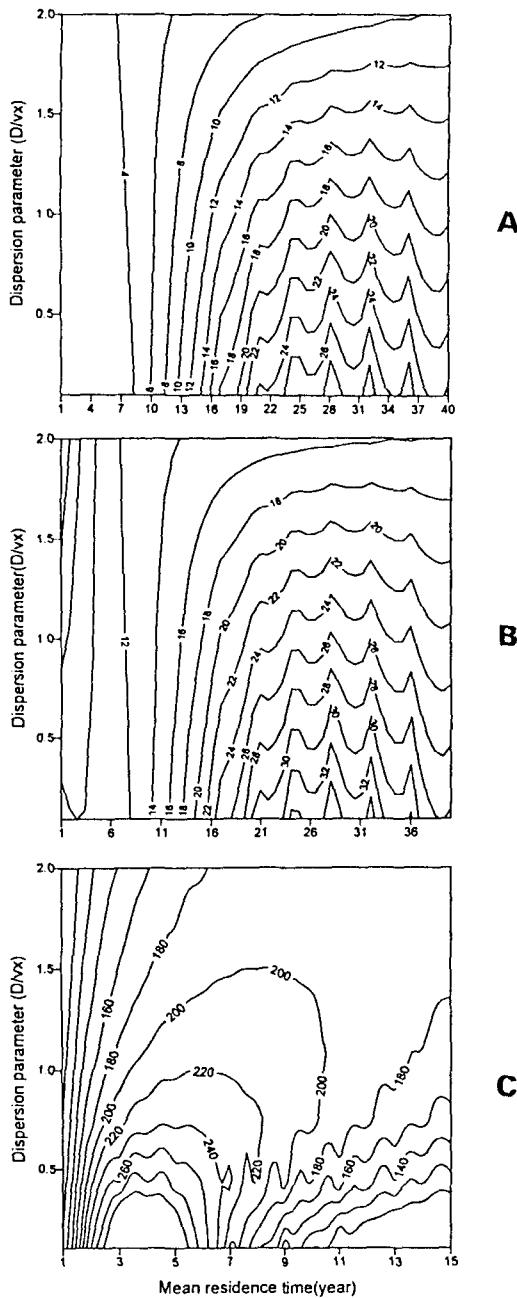


Figure 7. Computed tritium concentrations by DM(C_{FF}). Numbers with contours are concentrations in T.U. (A)Chungyang, (B)Georgia, (C)Cheju.

면서 1967년도에 예측되는 삼중수소농도를 계산하였다. Figure 7은 이러한 과정을 통하여 청양, 조지아, 제주의 각각의 평균체제시간과 D/vx 값에 따라 DM(C_{FF})에 의해 계산된 삼중수소농도를 나타내고 있다.

결과 분석 및 고찰

청양의 경우 DBM에 의한 연령과 PFM에 의한 연령사이의 차이는 모든 지점에서 1년 이내로서 유사한 결과를 보인다

(Table 1). CMM에 의한 연령계산을 보면 A, D지점은 PFM과 DBM에 의한 결과와 유사하지만 B, E지점은 이들과 각각 2-3년 및 6-7년의 차이를 보이고, 다른 지점보다 상당히 높은 유출수의 삼중수소농도를 보이는 C지점은 CMM에 의해 계산이 되지 않았다(Figure 8(a)). CMM에 의한 연령은 특히 유출수의 삼중수소농도의 변화에 민감하게 나타난다. 상당히 높은 C지점은 무한대의 결과로서 계산이 되지 않으며 그 다음 농도인 E지점은 다른 모델에 의한 체제시간보다 5년이상의 연령이 계산되고, 가장 낮은 농도의 B지점은 2년 이상 낮은 결과를 보인다. 이 지역의 연령은 전체적으로 15-25년의 범위를 보이지만, CMM에 의한 E지점의 연령을 제외하면 15~19년의 비교적 좁은 범위를 보인다.

조지아지역의 경우에서도 DBM에 의한 연령과 PFM에 의한 연령차이는 0.6-4년 정도로서 상당히 유사한 결과를 보인다 (Table 2). CMM에 의한 연령은 YR8이 DBM과 6년 정도의 차이를 보이고 YR17과 PBC9지점은 3년의 차이를 보인다. 또한 청양의 C지점과 유사하게, 측정치가 특이하게 높은 WC1지점과 PBC1지점은 CMM에 의해서 계산되지 않았는데(Figure 8(b)), 이는 청양지역의 C지점이나 조지아지역의 WC1과 PBC1지점의 지질조건이 대수층 안의 모든 물이 유입즉시 완전히 섞이는 것으로 가정한 CMM의 조건과 상이하기 때문인 것으로 사료된다. 전체적인 연령범위는 14-23년이고 CMM에 의한 연령을 제외하면 16-23년이다. 이 지역의 기존 수리지질 자료(평균두께, 공극, 유입률)를 이용하여 Rose(1993)에 의해 계산된 연령은 15-30년으로 본 연구에서 추정된 연령과 유사하다.

제주의 경우, Davis et al.(1970)이 적용한 모델인 DTM도 이 항분포함수를 이용한 것이지만(Table 3) 본 연구에서 적용된 DBM의 계산결과와 상당한 차이를 보이는데, 이것은 같은 확률분포함수를 사용하더라도 해를 구하는 방법에 따라 차이가 있음을 보여준다. DTM은 기울기 비교 방법과 절대값 비교로부터 계산된 근사해를 구한 것이고, 본 연구에서 적용한 DBM은 1967년도 유출수자료와 가장 가까운 연령을 구한 것이다. DTM은 DBM보다도 CMM에 의한 결과와 유사하였다(Table 3)(Figure 8(c)). 청양의 경우와 유사하게 PFM과 DBM에 의한 계산은 1년 이내의 유사한 연령을 도출하였고, CMM은 이들의 결과와 1-3년의 차이를 보였다.

두개의 매개변수(지하수의 연령과 이에 상응하는 분산매개변수인 σ 나 D/vx)를 동시에 고려하여, 이들의 조합에 의한 계산결과를 도출하는 DNM과 DM(C_{FF})을 각 지역에 적용한 결과, 체제시간과 분산매개변수가 광범위한 범위의 조합으로 계산되었다(Figure 6, 7). 적용지역의 분산특성이 수리시험을 통해 측정되었다면, 분산특성에 관한 측정치를 이용하여 본 모델에서 사용한 분산매개변수값(σ 이나 D/vx)을 추정하고, 본 모델의 결과에 적용하여 지하수 연령을 구할 수 있을 것이지만 이러한 자료가 없는 한, 모델들에 의한 계산결과는 두가지 변수의 조합에 의한 계산결과의 나열일 뿐이다. 하지만, PFM, CMM 및 DBM을 사용하여 계산한 지하수 연령들이 대부분의 지점에서 매우 유사한 값을 보이고, DNM과 DM(C_{FF})에 의해 계산된 연령범위에 포함되므로, PFM, CMM,

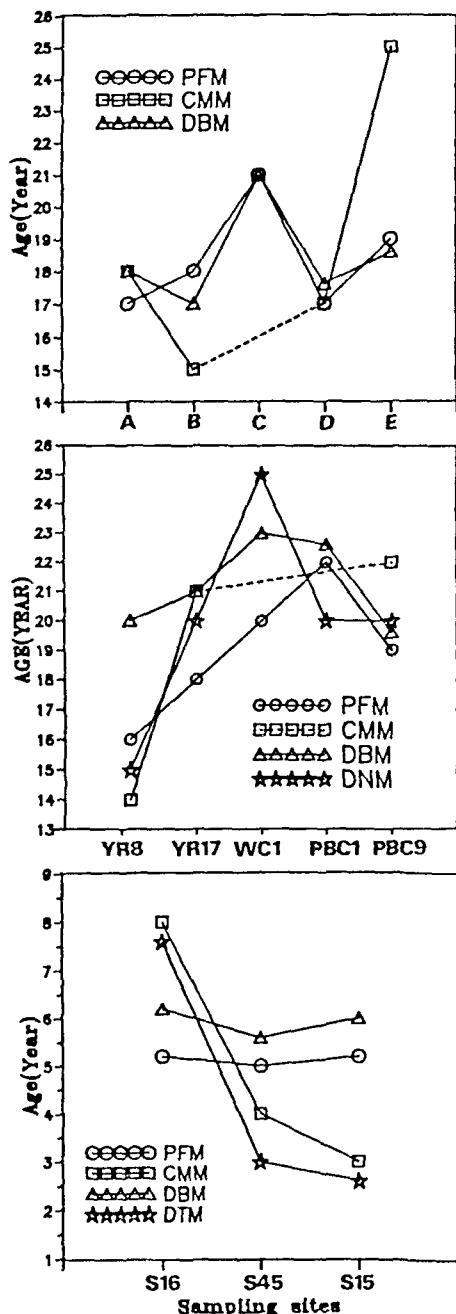


Figure 8. Comparison of calculated ages of groundwaters by various models (A) Chungyang, (B) Georgia, (C) Cheju.

DBM으로부터 계산된 연령의 범위를 적절한 체제시간으로 간주한다면, DNM과 DM(C_{FF} 해)에 의해 계산된 연령의 범위에 적용하여 각 지역에 대한 σ 값과 D/vx 값을 한정시킬 수는 있을 것이다.

청양의 경우, A지점을 예로 들면 측정된 삼중수소 농도값 13.45T.U.에 해당되는 DNM에 의해 계산된 체제시간과 분산개변수의 범위는 넓은 범위의 값들이 주어지지만, PFM, CMM과 DBM에 의해 계산된 17-18년의 체제시간 범위에 해당하는 분산개변수의 범위는 DNM의 σ 값이 2-3년 또는 26-27년이고

(Figure 6(a)), DM(C_{FF})의 D/vx 값은 1.0-1.1이다(Figure 7(b)). 여기서 σ 와 D/vx 는 $\sigma^2 = T^2(2D/vx)$ 의 관계(Nir, 1964; Maloszewski and Zuber, 1982)를 만족시켜야 하므로 이 관계를 만족시키는 σ 는 26-27년 범위이다. 청양의 A, B, C, D, E지점의 유출수의 삼중수소농도 측정치, 각 모델에 의해 계산된 연령 및 상기한 방법으로 계산된 σ 와 D/vx 값을 Table 1에 표시하였다. 유출수의 측정치가 다른 지점보다 높은 C지점은 σ 값과 D/vx 값은 다른 네 지점에 비해 작은 값을 나타내고 있으므로 C지점으로 연결되는 유동로의 분산은 다른 네 지점보다 상대적으로 작게 발생하고 있음을 나타낸다.

조지아의 경우에서도, 유출수의 측정치가 특이하게 높은 WC1과 PBC1지점의 σ 값과 D/vx 값은 다른 세 지점에 비해 비교적 작은 값(14-16년, 0.1-0.5)을 나타내지만, 그외 지점들은 σ 가 20-25이고 D/vx 가 1.5까지 이르는 분산을 보인다. YR8의 경우 D/vx 가 0.3-1.4의 넓은 범위를 보이는데 이 범위는 역시 σ 와의 관계와 범위전체에 걸쳐서는 맞지 않으며 다른 지점들(YR17, PBC9)의 D/vx 값의 범위와 PFM과 DBM의 연령과의 관계에 비해서도 잘 맞지 않는다. 따라서 지하수의 연령과 σ 를 고려하여 1.0-1.5가 좀 더 적절한 범위로 판단된다. 이 지역의 분산이 큰 원인을, Rose(1993)는 이 지역에 배태된 두꺼운 Saprolite층(평균 15 m)이 계절별(건기와 우기)로 지하수를 포집하고 방출함에 따라 분산효과를 일으킨 것으로 제시하였다.

제주지역 S16의 경우 CMM에 의해서 계산된 연령(8년)은 DNM에 의해서 계산된 연령의 범위(1-6.5년)를 약간 벗어나지만 PFM과 DBM의 계산에 의한 범위에 한하여(5.2-6.2년) 계산한 σ 값은 3-4년이고 D/vx 값은 계산이 되지 않았다. S45와 S15의 DM(C_{FF})에 의한 D/vx 값은 1.0~1.5로서 높은 분산을 나타내고 있으나 σ 는 1-4년의 비교적 작은값을 보이고 σ 와 D/vx 값들이 $\sigma^2 = T^2(2D/vx)$ 의 관계식을 만족시키지 않는다. 일반적으로 화산암에서의 지하수는 균열이나 용암동굴과 같은 공극을 통해 유동하므로 퇴적암의 대수층보다 혼합이 적게 발생할 것으로 판단되어 분산도 작을 것이라고 예측했는데 DNM으로부터 계산한 이 지역의 σ 값의 범위는 1-4년으로 이러한 예측과 어느 정도 부합되는 것이다. 하지만 DM(C_{FF})에 의한 D/vx 값은 S16이 다른 지점의 삼중수소농도값과 10~20%의 비교적 적은 차이를 나타냄에도 불구하고 계산되지 않았으며, S45와 S15의 D/vx 값은 1.0-1.5로서 예상과는 상이한 결과를 산출한 점으로 미루어 DM(C_{FF} 해)은 화산암지역에 적용하기에는 적절하지 않은 모델이라고 사료된다.

결 롬

- 세 지역 모두 DBM에 의한 결과와 PFM에 의한 결과는 유사하였는데 이는 DBM자체가 분산이 작은 경우에 적용되는 모델로서 분산이 고려되지 않는 PFM모델과 내재적 특성이 유사한 때문인 것으로 사료된다.

- 적용 지역중 유출수의 측정치가 다른 지점들보다 상당히 높은 청양의 C지점과 조지아의 WC1, PBC1지점은 CMM에 의해서 계산할 수 없는 한계를 나타내었는데 이는 이 지점들에

서 지하수의 유동이 CMM의 가정인, 대수층의 모든 물이 유입 즉시 완전히 섞이는 것과 전혀 다른 특성을 갖는 때문인 것으로 판단된다.

3. DNM과 DM(C_{FF})은 체제시간과 분산매개변수가 광범위한 범위의 조합으로 계산되어 그 자체로는 특정한 연령은 계산되지 않는다. 적용지역중 제주의 S16지점만을 제외하고 PFM, CMM, DBM으로부터 계산된 연령은 DNM, DM(C_{FF})으로부터 계산한 연령의 범위에 포함된다. 그러므로 DNM, DM(C_{FF})으로부터 계산된 σ 와 D/vx 값의 범위중 PFM, CMM, BM에 의한 연령을 적절한 체제시간으로 간주하면, 이에 해당하는 σ 와 D/vx 값을 구할 수 있다.

4. 유출수의 측정치가 상대적으로 높은 청양의 C와 조지아의 WC1, PBC1지점의 σ , D/vx 값은 동일 지역내의 다른 지점들에 비해 작은 값을 나타내므로 이 지점들로 연결되는 유동로의 분산은 다른 지점들에 비해 작게 발생하는 것을 나타낸다.

5. 위의 세 지점을 제외하고 DNM과 DM(C_{FF})에 의해서 계산된 σ 와 D/vx 값의 범위는 각각 청양이 26-29년, 0.8-1.5이고 조지아는 20-25년, 0.2-1.5를 나타낸다. 청양의 경우는 미약한 열극충진물질의 양으로 볼 때 조지아지역과 같이 이 지역에 배태된 두꺼운 Saprolite층에 의한 암체와의 물리화학적 반응에 의한 분산효과로 볼 수는 없으며, 열극내에서의 유속의 변화 등이 더 타당한 이유로 사료된다.

6. 조지아 지역의 기존 수리지질 자료(평균두께, 공극, 유입률)로부터 Rose(1993)가 계산한 지하수 연령은 15-30년이고 본 연구를 종합하여 계산한 지하수의 연령은 14-23년으로 유사하다.

7. DM(C_{FF})에 의한 제주지역의 D/vx 값은 S16의 삼중수소 농도값이 다른 지점과 10~20%의 비교적 작은 차이를 보임에도 불구하고 계산이 되지 않고, 다른 2지점의 D/vx 도 1.0-1.5로 상당히 높은 분산을 보이며 σ 값과 일치하지 않으므로 DM(C_{FF})은 화산암지역과 같이 지하수 유동속도가 빠른 지역에 적용하기에는 한계를 가진 모델이라고 사료된다.

8. 동일 지역에서도 각 지점의 유출수의 삼중수소 농도가 상당한 변화를 보일 때 (청양의 경우 평균값과 50% 이상, 조지아의 경우 20% 이상)는 동일지역내에서도 각각의 유동로의 특성 차이가 크다는 것을 의미하므로, 동일한 모델을 전 지역에 일률적으로 적용하여 지하수 연령이나 분산특성을 계산하는 것은 바람직 하지 않은 것으로 판단된다.

참고문헌

- 한국원자력연구소, 1991, 구조거동 및 지질, 수문특성 연구, KAERI-NEMAC/RR-38/ 91, p.68-78.
- Alder, H.L., and Roessler, E.B., 1977, Introduction to probability and statistics, San Francisco, W. H. Freeman and Company, p.361-363.
- Bear, J., 1972, Dynamic of fluids in porous media, New York, American Elsevier, 324p.
- Davis, G.H., Dincer, T., Florkowski, T., Payne, B.R., and Gattiger, T., 1967, Seasonal variations in the tritium content of groundwaters of the Vienna basin, In: Isotopes in Hydrology. Int.At.Energy Agency (I.A.E.A), Vienna, p.451-473.
- Davis, G.H., Lee, Ch.K., Bradley, E., and Payne, B.R., 1970, Geohydrologic interpretation of a volcanic island from environmental isotopes, J. Hydrol., 57, p.207-231.
- Dincer, T., Payne, B.R., Florkowski, T., Martine, C.J., and Tomigori, E., 1970, Snow melt runoff from measurements of tritium and oxygen-18, Water Resour. Res., 6, p.110-124.
- Eriksson, E., 1958, The possible use of tritium for estimating groundwater storage, Tellus, 10, p.472-478.
- Ferronsky, V.I., and Polyakov, V.A., 1982, Environmental isotopes in the hydrosphere, New York, John Wiley & Sons, p. 269-277.
- Himmelblau, D.M., and Bischoff, K.B., 1968, Process analysis and simulation : Deterministic systems, New York, Wiley, 327p.
- International Atomic Energy Agency, 1981, Statistical treatment of environmental isotope data in precipitation, Technical Report series No.206, IAEA, Vienna, 345p.
- Kreft, A., and Zuber, A., 1978, On the physical meaning of the dispersion equation and its solution for different initial and boundary conditions, Chem. Eng. Sci., 33, p.1471-1480.
- Maloszewski, P., and Zuber, A., 1982, Determining the turnover time of ground water systems with the aid of environmental tracers, J. Hydrol., 57, p.207-231.
- Nir, A., 1964, On the interpretation of tritium age measurements of ground water, J. Geophys. Res., 69 (12), p.2589-2595.
- Rose, S., 1993, Environmental tritium systematics of baseflow in Piedmont Province watersheds, Georgia (USA), J. Hydrol., 143, p.191-216.
- Yurtsever, Y., 1983, Models for tracer data analysis, Technical reports series No.91, IAEA, Vienna, p.381-402.