

트리튬을 이용한 지하수 연대측정 수학적모델 개발 및 삼광광산 주변 지하수 유동시간 분석

Development of the Mathematical Model to Calculate Groundwater Ages Using Tritium and Analysis on Groundwater Flow Times around the Samkwang Mine

김계남(Gye - Nam Kim)* · 구자공(Ja - Kong Koo)** · 김천수(Chun - Soo Kim)*

요 약 : 수학적모델 개발, 현장수리시험, 그리고 연구지점에서 샘플링한 강수 및 지하수의 트리튬농도를 분석하여, 삼광광산 주변의 편마암에서의 지하수의 유동시간을 평가했다. 이 연구의 결과는 다음과 같다: (1) 연구지역에 1961~1993년 동안 내린 강우의 트리튬농도를 고려하여, 지하수의 연령을 계산할수 있는 수학적모델을 개발했다. (2) 지표면으로부터 44, 92, 102, 205 m 밑의 터널내의 지하수의 연령은 각각 2.0, 4.0, 4.5, 9.0 년으로 평가되었다. 이들 결과는 1991~1993 년 동안 터널내의 지하수의 트리튬 농도에 관한 자료로 검증했다.

Abstract : Flow times of the groundwater in the gneiss near Samkwang mine in Korea were estimated through the development of a mathematical model, the field hydraulic tests, and the analysis of tritium concentration of the groundwater and rainfall sampled in the study positions. Results of this study are as follows: (1) The mathematical model to calculate the age of groundwater was developed considering the tritium concentrations of rainfall precipitated in the studied area for period 1961 to 1993. (2) The ages of the groundwater in the tunnel 44, 92, 102, and 205 m below the surface were estimated at 2, 0, 4.0, 4.5, and 9.0 years, respectively. These results were verified by the data on the tritium concentrations of the groundwater in the tunnel for period 1991 to 1993.

서 론

유해 또는 방사성 폐기물 처분장의 건설시 수문학적 안전성 확보는 무엇보다도 중요하다. 이 폐기물 처분장은 수백년 이상 생태계로부터 격리되어야 한다. 지하암반에 처분된 폐기물 처분장으로부터 오염물질이 생태계에 도달하는 가장 중요한 추진력은 지하수 유동이다. 그러므로 처분장의 안전성 분석을 위해 현실적이고 신빙성 있게 지하수 이동시간을 예측하는 것은 필연적이다.

핵폭탄 실험이 시작된 1953년 이래 대륙지방에서 대기내의 트리튬 농도(^3H)가 증가되었다는 것이 발견된 1950년대 이후부터 트리튬(^3H)은 수문학 연구 도구로 사용되어 왔다. Foster (1975)는 지하매질에서의 확산에, Egboka *et al.*(1983), Knott와 Olimpio(1986)는 지하수 충전(Recharge)과 지하수 연대측정에 트리튬을 이용했다. Robertson과 Cherry(1989)는 Central Ontario 지방 실트질모래(Silty Sand)층에 함유된 지하수의 연대를 분석하기 위해 트리튬을 사용했다. 최근에 Bradbury (1991)는 트리튬을 이용하여 Central Winsconsin내의 지하수의 연령을 측정했다. 이 논문에 사용된 편마암 층에서의 수리전도도와 수리분산계수는 현장수리시험을 통해 측정했으며, 지하수

연대를 측정하기 위한 새로운 수학적 모델을 개발했다. 새로운 모델은 이전 강우에 의한 기존 트리튬 농도분포를 고려하여 새로운 강우에 의한 지하매질내의 트리튬 농도를 계산한다는 점이 기존 모델과의 차이점이다. 또한 새로운 모델에 의한 계산결과를 검증하기 위해, 해수면선상 EL.(+)180m에 위치한 터널내부의 연구지점에서 샘플링한 강수 및 지하수의 트리튬 농도 분석결과를 사용했다.

수학적모델의 개발

포화된 동질의 다공성 매질 내에서의 방사성 용질의 이동을 나타내는 일차원 Advective-Dispersive식의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\partial C/\partial t = D(\partial^2 C/\partial x^2) - V(\partial C/\partial x) - \lambda C, \quad -t \geq 0, -x \geq 0 \quad (1a)$$

여기서 x: 트리튬 유입 지점으로부터 유동로의 거리(m),

t: 시간 (yr),

C: 트리튬 농도 (g/m^3),

V: 지하수의 평균속도 (m/yr),

λ : 트리튬의 방사성 붕괴상수 ($1/\text{yr}$),

그리고 D: 아래와 같이 정의되는 수리분산계수 (m^2/yr),

$$D = \alpha_L V + D^* \quad (1b)$$

여기서 α_L : 종분산지수 (m),

*한국원자력연구소 환경관리센터(NEMAC, Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon, 305-606, Korea)

**한국과학기술원 토목공학과(Dept. of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science & Technology, Taejon, 305-701, Korea)

그리고 D^* : 분자확산 유효계수 (m^2/yr),
(트리튬의 D^* 는 0으로 가정함).

기존모델(Cleary, 1978)은 아래와 같은 초기조건과 경계조건을 사용하여 해를 구했다.

$$C(0, t) = C_i, \quad t \geq 0 \quad (2a)$$

$$C(\infty, t) = 0, \quad t \geq 0 \quad (2b)$$

$$C(x, 0) = 0, \quad x \geq 0 \quad (2c)$$

위의 지배방정식에 대한 해석해 식은 다음과 같다.

$$C(x, t) = \frac{1}{2} C_i \left[\exp \left(\frac{Vx}{2D} - \frac{x}{\sqrt{D}} - \sqrt{\frac{V^2}{4D} + \lambda} t \right) \times \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x}{2\sqrt{Dt}} - \sqrt{\left(\frac{V^2}{4D} + \lambda \right) t} \right\} + \exp \left(\frac{Vx}{2D} + \frac{x}{\sqrt{D}} \sqrt{\frac{V^2}{4D} + \lambda} \right) \times \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x}{2\sqrt{Dt}} + \sqrt{\left(\frac{V^2}{4D} + \lambda \right) t} \right\} \right] \quad (3)$$

기존모델을 이용하여 Egboka *et al.*(1983)은 중첩법(Superposition Technique)으로 조사기간 동안 깊이별 트리튬농도 분포 계산을 하였다. 먼저, 조사기간(여기서, 1961~1993)동안 매년 내린 강수 속의 트리튬농도(C)에 대해 깊이별 트리튬농도를 식(3)을 이용하여 따로따로 계산한다. 다음으로 조사기간 전체에 대한 깊이별 트리튬농도는 같은 깊이에 대해 각각의 연도별 계산결과를 중첩시키는 방법으로 다른 깊이에 대한 깊이별 트리튬농도를 구한다. 이 모델의 문제점은 이전 강수에 의한 지하매질 내의 지하수의 기존 트리튬 농도분포를 고려하지 않고 단지 새로운 강수의 유입에 의한 깊이별 지하수의 트리튬 농도를 계산한다는 것이다. 그러나 새 모델은 이런 문제점을 해결한다. 즉, 조사기간 동안의 연도별 유입농도를 지수함수로 표시하여 각 연도의 초기농도들을 서로 연관시켜 줌으로써 이전 강수에 의한 지하매질내의 기존 농도를 고려하여 계산하도록 했다. 새 모델은 Superposition Technique을 사용하지 않고 전 조사기간에 대한 깊이별 C값을 한번에 계산한다. 새 모델은 다음과 같은 새로운 경계조건들을 사용한다.

$$C(0, t) = \sum_{i=1}^t NO_i e^{-\lambda(t-t_i)} h(t-t_i) \quad t \geq 0 \quad (4a)$$

$$C(\infty, t) = 0, \quad t \geq 0 \quad (4b)$$

여기서 NO_i 은 조사기간 동안 각 연도별 강수의 트리튬 농도 $C(0, t)$ 를 식(4a)에 대입하여 구한 값으로 각각 $t=t_i$ 에서의 상수이다. 식 (1a)의 초기조건은 다음과 같다.

$$C(x, 0) = 0, \quad x \geq 0 \quad (5)$$

식(1a), (4a), (4b) 그리고 (5)를 풀기 위해, 새로운 변수

(Variable)를 사용한다.

$$N(x, t) = C(x, t) e^{-(\alpha x - \beta t)}, \quad x \geq 0, \quad t \geq 0 \quad (6a)$$

$$\text{여기서 } \omega = V/2D, \quad (1/m) \quad (6b)$$

$$\beta = \lambda + V^2/4D, \quad (1/yr) \quad (6c)$$

그런 다음, 식(1a)는 아래와 같이 편미분후 정리하면.

$$\partial N / \partial t = D(\partial^2 N / \partial x^2), \quad x \geq 0, \quad t \geq 0 \quad (7)$$

방정식(7)의 초기와 경계조건은 다음과 같다.

$$N(0, t) = \sum_{i=1}^t NO_i e^{\alpha h(t-t_i)} e^{\lambda t}, \quad t \geq 0 \quad (8a)$$

$$r = V^2/4D \quad (8b)$$

$$N(\infty, t) = 0, \quad t \geq 0 \quad (9)$$

$$N(x, 0) = 0, \quad x \geq 0 \quad (10)$$

위의 편미분 방정식의 해를 구하기 위해, 상미분 방정식을 적용하면,

$$SN = D \frac{d^2 N}{dx^2} \quad x \geq 0 \quad (11)$$

이 식에 대한 변환된 조건은 다음과 같다.

$$\bar{N}(0, s) = \sum_{i=1}^t NO_i \frac{1}{s-r} e^{-(s-r)t_i} e^{\lambda t_i} \quad s > 0 \quad (12a)$$

$$\bar{N}(\infty, s) = 0 \quad s > 0 \quad (12b)$$

상미분방정식(11)의 해는 아래와 같다.

$$\bar{N}(x, s) = A e^{-\sqrt{sD}x}, \quad s > 0, \quad x \geq 0 \quad (13)$$

여기서 A는 유입경계조건 $\bar{N}(0, s)$ 로 아래와 같이 구한다.

$$\bar{N}(0, s) = \sum_{i=1}^t NO_i \frac{s}{s-r} e^{-st_i} e^{\lambda t_i}, \quad s > 0 \quad (14)$$

그러므로

$$\bar{N}(x, s) = \sum_{i=1}^t NO_i \frac{s}{s-r} e^{-(s-r)t_i} e^{\lambda t_i} \frac{e^{-\sqrt{sD}x}}{s} = \sum_{i=1}^t NO_i e^{\lambda t_i} \left(e^{-(s-r)t_i} \frac{e^{-\sqrt{sD}x}}{s} + r \frac{1}{s-r} e^{-(s-r)t_i} \frac{e^{-\sqrt{sD}x}}{s} \right) \quad s > 0, \quad x \geq 0 \quad (15)$$

식(15)를 역변환시키면 다음과 같다.

$$N(x, t) = \sum_{i=1}^t NO_i e^{\lambda t_i} \left(\int_0^t e^{r\tau} h(\tau-t_i) \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{x^2}{D(t-\tau)}} \right) d\tau + e^{\lambda t} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{x^2}{D(t-t_i)}} \right) \right), \quad x \geq 0, \quad t \geq 0 \quad (16)$$

그런 다음 $C(x, t)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$C(x, t) = e^{[Vx/2D - (\lambda + V^2/4D)t]} \sum_{i=1}^t NO_i e^{\lambda t_i} \int_0^t e^{r\tau} h(\tau-t_i)$$

$$\left. \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{x^2}{D(t-\tau)}}\right) d\tau + e^{-\lambda t} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{x^2}{D(t-t_i)}}\right) \right\}, \quad x \geq 0, t \geq 0 \quad (17)$$

식(17)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$C(x,t) = e^{(\lambda x/2D - (\lambda + v/4D)t)} \sum_{i=1}^n NO_i e^{\lambda t_i} \left[\int_{t_i}^t e^{-\lambda \tau} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{x^2}{D(t-\tau)}}\right) d\tau + e^{-\lambda t} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{x^2}{D(t-t_i)}}\right) \right], \quad x \geq 0, t \geq 0 \quad (18)$$

연구지역에 AGE 모델의 적용

연구지역 위치 및 트리튬 농도 분포

본 연구 대상지역은 남한의 중서부 지역인 충청남도 청양군에 위치한 삼광광산이며, 이곳은 편마암이 넓게 분포하고 있다. 수리상수를 측정된 조사공은 연구지역 남쪽에 위치한다(Figure 1). 지하수의 연령을 측정할 연구지점 A, B, C, D는 해수면상 EL.(+)180 m이며, 지표면으로부터 50~200 m 아래에 위치한다(Figure 2).

1961~1993년 동안 연구지역 주변에 내린 강수의 트리튬 농

도는 Figure 3과 같다. 여기서 1961~1976년 동안의 자료는 IAEA 보고서(1992)를 인용했으며 1977~1993년 동안의 자료는 KAERI 보고서(Ahn and Kim, 1993)을 참고했다. 트리튬 농도는 1963년에 1384.6 TU로 가장 높은 농도를 나타내고, 1990년 이후에는 10 TU 부근의 값을 나타낸다.

현장수리시험

현장수리시험은 연구지역 남쪽에 위치한 Drilling Site 1 내의 4개의 조사공에서 실시했다(Figure 4(a)). 조사공 B-3의 지표고를 기준으로 조사공 B-1, B-2, 그리고 B-4의 비교높이는 각각 (-)9.0, (-)2.8, (-)11.8 cm이다. 수리전도도는 2.65 m 떨어진 조사공 B-1과 B-2에서 일정 압력 (3 kg/cm²) 주입시험으로 측정하였고, 결과는 Figure 4(b)와 같다. 각 주입구간의 수리전도도는 열극의 특성에 따라 변한다. 연구지역에서 측정된 수리전도도는 1.53 × 10⁻⁵ - 4.95 × 10⁻⁹ m/sec이다(Ahn et al., 1991). 조사된 수리전도도 자료에 근거하여 연구지역 편마암층에서의 깊이별 수리전도도에 관한 관계식을 세우면 다음과 같다.

$$K = 1.7 \times 10^{-5} \times Z^{-1.3}$$

여기서 Z: 지표면으로부터 깊이 (m)

K: 수리전도도 (m/sec)

중분산지수(α_s)는 단정주입상(Single Well Injection Phase) 시험으로 측정했다. 본 시험은 지표로부터 50 m 관입된 B-2 시험공을 주입점으로 사용하였다. 주입시험시 추적자 혼합용액의 지표 익류를 방지하기 위하여 지표하 12 m에 Pneumatic Packer를 설치하고 수압을 가하여 염소 혼합용액을 B-2 시험공의 지표로부터 12 m와 50 m 사이로 방출시켰다. 또한, 관측정으로는 주입공에서 4.15 m 상거하여 설치한 B-4 시험공을 사용하였으며, 농도변화 측정지점은 이 지역에 대한 평균농도를 나타내는 지표하 23 m와 27 m로 2개 지점을 선정하여 TDS Sensor로 그 농도변화를 측정하였다. 추적자 시험시 제반시험조건은 다음과 같다.

본 연구지역인 편마암에서의 중분산지수는 관측정에서 관측한 시간별 관측농도와 Gelhar과 Collins(1971)의 해석해를 이용하여 구한다. 중분산지수를 구하기 위해서는 먼저 Figure 4(c)와 같이 경과시간(t)별 관측농도비(C/Co)를 그래프내에 점으로 표시한다. 다음으로 중분산지수와 공극률을 가정하여 해석해에 대

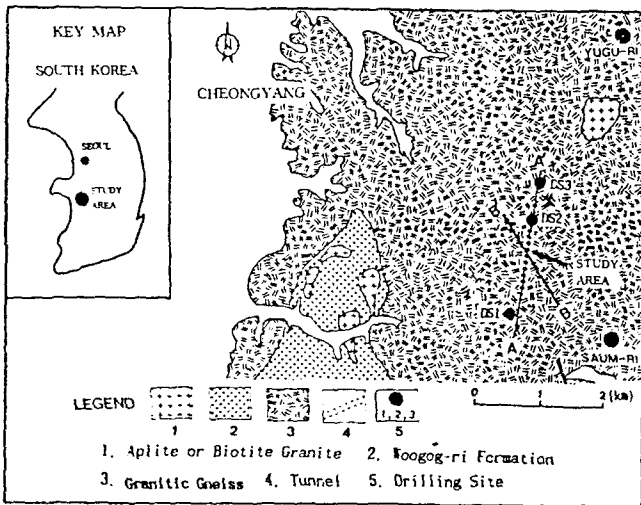


Figure 1. Location and geologic map of the studied area.

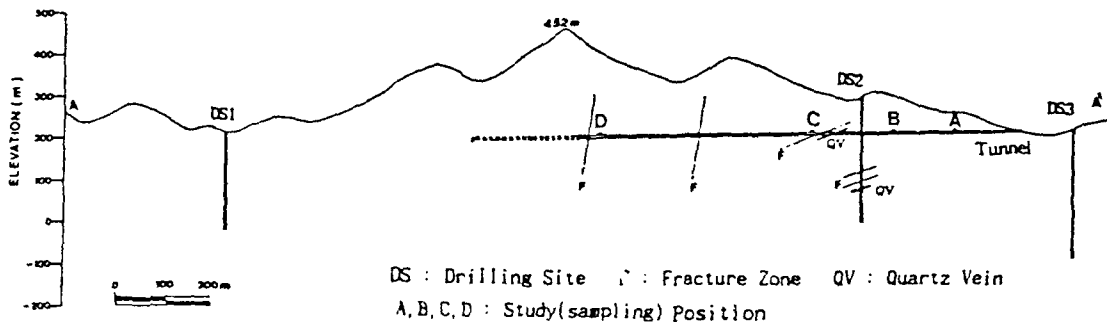


Figure 2. Vertical cross section of line A-A'.

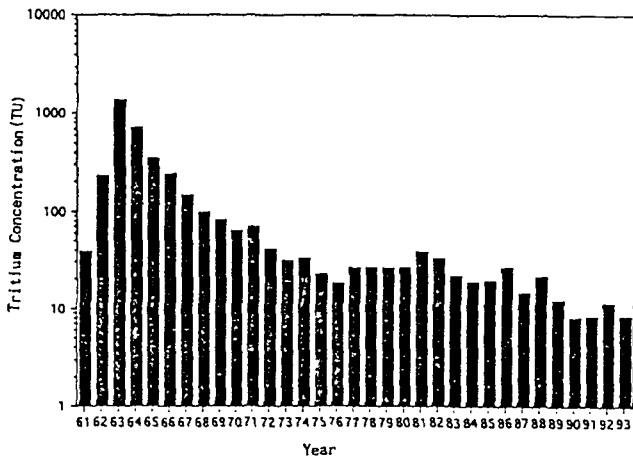


Figure 3. Data on tritium concentration in the precipitation near Samkwang mine in Korea.

입하고, 이 해석해를 이용하여 경과시간에 대한 농도비(C/C_0)를 계산한다. Figure 4(c)는 B-4 관측공 내부의 지표면으로부터 27 m에 위치한 지점에서의 관측값과 해석해 계산값을 도시한 것이다. 또한 Table 2는 깊이별 종분산지수를 나타낸다.

연구지역에 AGE모델의 적용

식(18)에서 $C(x, t)$ 를 계산하기 위해, 식(18)을 수치프로그램화 한 AGE 모델을 개발했다. AGE 모델은 동질의 지하 매질 내에서 일차원적으로 깊이별 트리튬 농도를 계산하기 위한 FORTRAN 코드이다. 이 때 $C(x, t)$ 는 이 새로운 모델에 필요한 입력 상수인 D, λ , 그리고 V 를 사용하여 계산할 수 있으며 트리튬의 방사성 붕괴상수(λ)는 12.43/year(Mann *et al.*, 1982)이다.

Figure 5는 1961~1993년 동안 내린 강수속의 트리튬에 의해 지표면으로부터 지하매질 깊이에 따른 트리튬 농도를 AGE 모델로 계산한 것이다. 여기서 지하수의 평균유동속도는 22 m/year로 수리전도도공식에 근거하여 추정된 값이다. 여기에 기존 모델로 구한 트리튬 농도를 함께 표시했다. 새 모델은 기존 농도를 고려하므로 계산결과 깊이에 따른 농도구배가 커진다. 이 때문에 연도별 유입 트리튬에 의한 깊이에 따른 농도분포 범위가 작아지는 반면에 농도는 커진다. 새 모델과 기존모델의 결과를 93년도에 연구지점에서 샘플링하여 측정된 실제의 트리튬 농도와 비교하면, 새 모델이 좀더 정확하다는 것을 알 수 있다.

Figure 6은 TRAFRAP 모델(Huyakorn *et al.*, 1986)을 사용하여 Figure 1의 B-B'단면에 대한 수두분포체계를 모델링한 결과다. 터널 부근에서 수두차이는 커지며 강수는 수직방향으로 터널 내부로 유입한다. 연구지점들은 Figure 2에서 보여주는 것처럼 지표면 아래 약 50~200 m에 위치한 터널의 내부에 있다. 또한, Table 3은 1991년부터 1993년까지 3년 동안 삼광광산 터널내의 연구지점에서 샘플링한 지하수의 트리튬 농도이다. 터널내의 연구지점 위층에서의 지하수 평균유동시간은 강수의 Historic 트리튬농도 자료와 샘플링한 지하수의 트리튬농도 자료를 비교분석하고 트리튬의 반감기와 지하수의 혼합을 고려하여 산정했고, 또한 현장시험으로 구한 입력상수를 사용하여 TRAFRAP모델로 계산한 값을 참조하여 17~27 m/year로 예측했다. 다음으로 좀

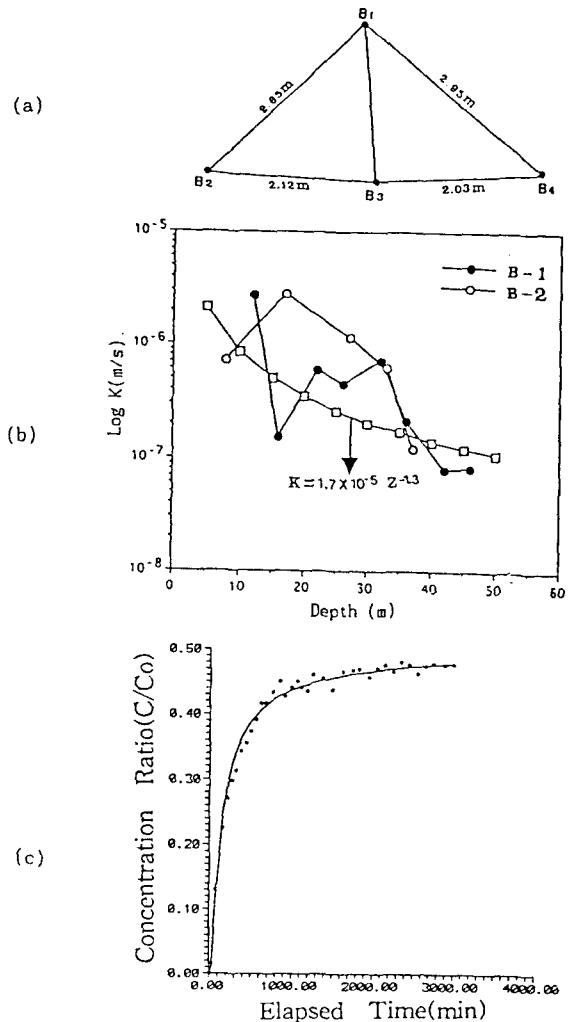


Figure 4. (a) Configuration of test holes in DS1 (b) Hydraulic conductivity distribution along the depth in borehole B-1 and B-2 in DS1 (c) Concentration ratio along the time in borehole B-4 in DS1.

Table 1. Condition of Longitudinal dispersivity.

제반시험조건	측정값
Input concentration	2,200 mg/l
Distance between injection and observation hole	4.15 m
Depth of measuring point in injection hole	23 m, 27 m
Injection rate	0.083 l/sec(4.98 l/min)
Injection duration	3,000 min

Table 2. Longitudinal dispersivity summary.

Depth(m)	Q(l/min)	r(m)	α_L (m)
23	4.98	4.15	8.2
27	4.98	4.15	9.8

더 정확한 값은 AGE모델을 이용하여 계산한 트리튬농도와 실측한 지하수 트리튬농도를 Calibration하여 구했다.

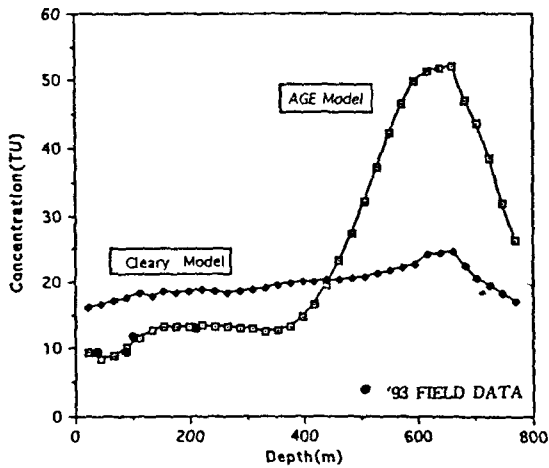


Figure 5. Tritium concentration distribution calculated by the AGE and the Cleary models along the depth from the earth surface due to the rainfall during 1961~1993.

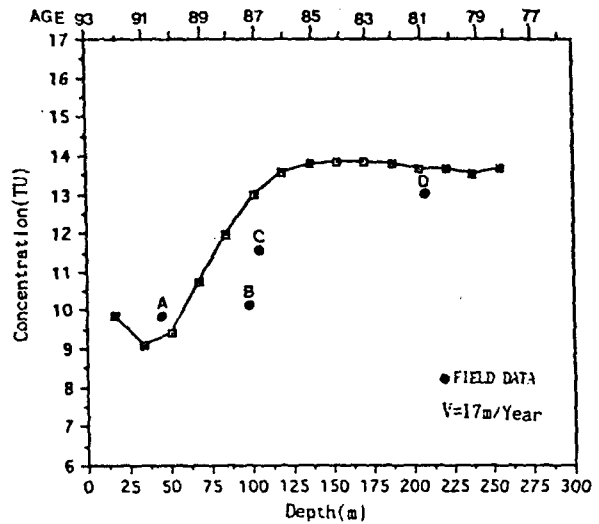


Figure 7. Comparison of the tritium concentrations analyzed in the laboratory with those estimated by the AGE model for the flow velocity of 17 m/year.

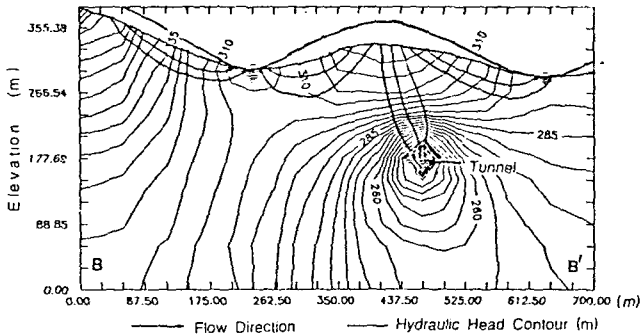


Figure 6. Hydraulic head distribution calculated by TRAFRAP in the vertical cross section of the line B-B'.

Table 3. Tritium concentrations of groundwater sampled in study points. 단위(TU)

	월	A지점	B지점	C지점	D지점
1991	5	13.45	11.94	13.08	13.59
	7	13.03	11.42	12.06	15.11
	10	12.12	12.14	13.98	14.67
1992	4	11.19	12.37	12.61	16.43
	7	12.81	10.64	17.50	12.42
	8	11.31	11.79	13.97	13.75
1993	4	10.02	10.71	12.12	12.87
	7	9.32	9.64	11.16	13.21
	10	9.81	10.26	11.52	13.22

Figure 7~9은 17, 22, 27 m/year에 대한 AGE 모델의 계산 결과이다. 실선은 지표면으로부터 깊이에 따른 트리튬 농도를 AGE 모델로 계산한 것이다. Point A, B, C, 그리고 D는 1993년도에 연구지점에서 샘플링한 지하수를 실험실에서 분석한 농도이다. 모델로 계산된 농도와 실험실에서 분석한 농도는 Figure 8과 같이 유동속도가 22 m/year 일 때 가장 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 지표면으로부터 44, 92, 102, 그리고

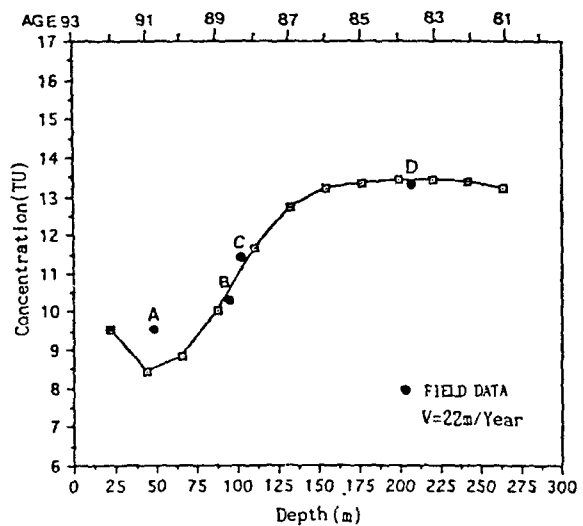


Figure 8. Comparison of the tritium concentrations analyzed in the laboratory with those estimated by the AGE model for the flow velocity of 22 m/year.

205 m 아래에 위치한 연구지점 A, B, C, 그리고 D 까지의 지하수 유동시간은 Figure 8과 같이 각각 2.0, 4.0, 4.5, 그리고 9.0년으로 평가됐다.

Figure 10~11은 1991년과 1992년의 지하수 샘플들을 실험실에서 분석한 트리튬 농도와 AGE 모델로 계산한 트리튬 농도를 비교한 것이다. 여기서 모델에 사용된 지하수의 평균유동속도는 22 m/year이다. AGE 모델로 계산된 트리튬 농도는 실험실에서 분석된 농도와 거의 일치한다.

결론

(1) 트리튬을 이용하여 지하수 연령을 계산하기에 적합한 수

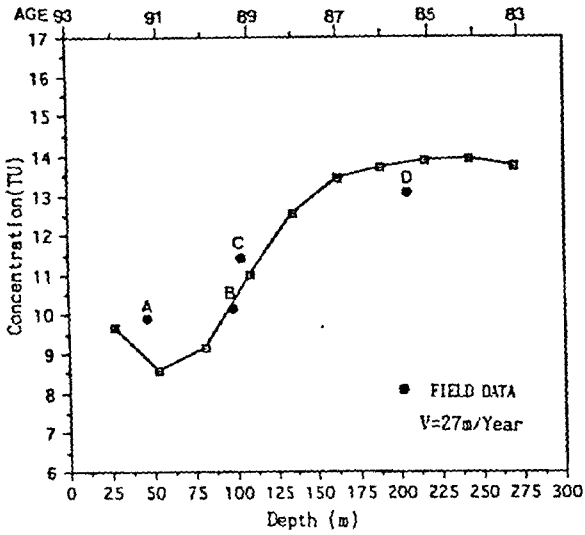


Figure 9. Comparison of the tritium concentrations analyzed in the laboratory with those estimated by the AGE model for the flow velocity of 27 m/year.

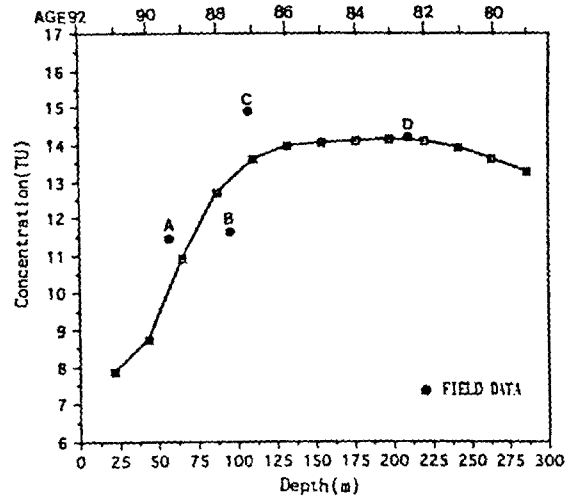


Figure 11. Comparison of the tritium concentrations calculated by the AGE model with those analyzed in the laboratory of the groundwater sampled in 1992.

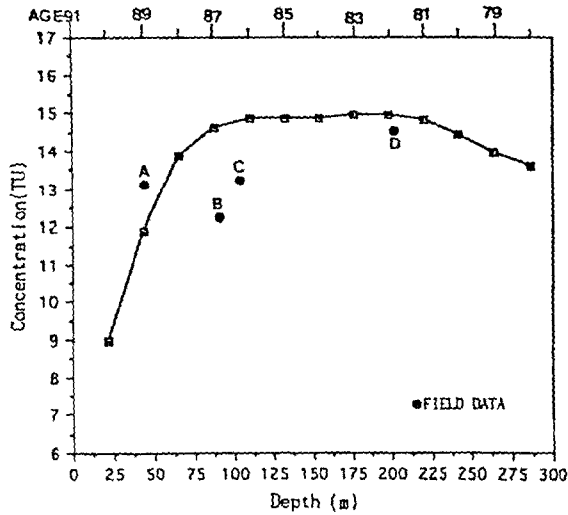


Figure 10. Comparison of the tritium concentrations calculated by the AGE model with those analyzed in the laboratory for groundwater sampled in 1991.

학모델을 개발했다.

$$C(x,t) = e^{(vx/2D - (\lambda + v^2/4D)t)} \sum_{i=1}^I NO_i e^{\lambda t} \left[\int_0^t e^{\tau} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{x^2}{D(t-\tau)}} \right) d\tau + e^{\lambda t} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{x^2}{D(t-t_i)}} \right) \right], \quad x \geq 0, \quad t=0$$

(2) 지표면으로부터 44, 92, 102, 그리고 205 m 아래에 위치한 터널내의 지하수 연령은 새로운 수확모델과 트리튬 농도 분석을 통해 각각 2.0, 4.0, 4.5, 그리고 9.0년으로 평가되었다.

참고문헌

Ahn, J. S., Kim, C. S., Yun, S. T. and Kim, G. N., 1991, A study on the groundwater flow and hydrogeochemical interaction in fractured rock masses, Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI-NEMAC/RR-38/91.

Ahn, J. S. and Kim, G. N., 1993, Development of hydrogeologic environment assessment techniques, Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI-NEMAC/RR-85/93.

Bradbury, K. R., 1991, Tritium as an indicator of groundwater age in Central Wisconsin, *Groundwater*, 29, No.3, p.398-404.

Cleary, R. W., 1978, Analytical models for groundwater pollution and hydrology, Princeton Univ..

Egboka, B.C.E. et al., 1983, Migration of contaminants in groundwaters at a landfill, A case study, 3, Tritium as an indicator of dispersion and recharge, *J. Hydrol.*, 63, p. 51-80.

Foster, S. S. D., 1975, The chalk groundwater tritium anomaly-A possible explanation, *J. Hydrol.*, 25, p.159-165.

Gelhar, L. and Collins, M. A., 1971, General analysis of longitudinal dispersion in nonuniform flow, *Water Resource Research* 7(6), p.1511-1521.

Huyakorn, P. S., White H. O., Guvanasen, V. M. and Lester, B. H., 1986, A two-dimensional finite element code for simulating fluid flow and transport of radionuclides in fractured porous media with water table boundary conditions, hydrogeologic, Inc..

Knott, J. F. and Olimpio, J. C., 1986, Estimation of recharge rates to the sand and gravel aquifer using environmental tritium, Nantucket Island, Massachusetts, U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 2297, 26p.

Robertson, W. D. and Cherry, J. A., 1989, Tritium as indicator of recharge and dispersion in groundwater system in Central Ontario, *Water Res. Res.*, 25, p.1097-1109..

IAEA, 1992, Statistical treatment on data on environmental isotopes in precipitation, Vienna.