

방사성폐기물 처분장 주변에서 정상상태의 지하수 수치 모델 개발

A Numerical Model for Steady State Groundwater Flow Near a Radioactive Waste Repository

서 경 석* · 이 한 수* · 한 경 원*
Suh, Kyung Suk · Lee, Han Soo · Han, Kyung Won

Abstract

A numerical model for steady state groundwater flow has been established to understand the groundwater flow phenomena near a radioactive waste repository. The integrated finite difference method based on a network composed of nodes and members was applied to investigate groundwater flow in homogeneous, heterogeneous and layered media. Its numerical solution was in good agreement with analytic solution. Physical phenomena associated in the groundwater flow depending on both hydraulic characteristics and effects of fractured zone were also investigated. A method by which feasible groundwater flow paths can be identified was developed. This method used the composite network for the geologic media near a repository and the direction of computed groundwater velocity. Groundwater velocity and travel time were predicted for the possible pathway from a repository to a biosphere.

요 지

방사성 폐기물 처분장 주변의 지하수 유동 현상을 이해하기 위해 정상상태에서의 지하수 수치모델을 수립하였다. 지하수 수치모델은 절점과 부재로 구성된 network에 의해 균질, 비균질, 다층매질에서 지하수 흐름을 조사하는데 이용되었고 모델의 수치해는 해석해와 일치하는 결과를 가졌다. 또한 지하매질의 수리학적 특성과 균열지역의 영향에 의한 지하수 유동의 물리적 변화현상도 조사되었다. 처분장 주변의 지하매질에 대해 구성된 network과 계산된 지하수 속도의 방향을 이용하여 지하수의 가능한 이동경로를 산정하는 방법이 개발되어 방사성 폐기물 처분장에서 생태계로의 가능한 지하수의 이동속도 및 시간을 예측하였다.

*정회원 · 한국에너지연구소, 방사성폐기물관리부

1. 서 론

방사성폐기물 영구 처분장 건설에 있어 안전성의 확보는 무엇보다도 중요하다. 방사성폐기물은 안정된 지하 암반에 건설된 인공동굴등에 처분한 후 수백년 이상 인간환경으로부터 격리되어 생태계에 방사선 장해를 초래하지 않도록 하여야 한다.

처분된 폐기물로부터 방사성핵종이 생태계로 누출되는 주요 경로는 지하수에 의한 방사성핵종의 침출 및 이동이므로 처분장 주변에 지하수가 존재하지 않는 경우 방사성핵종은 생태계로 누출되지 않는다. 그러나 처분장 주변에 지하수가 존재하는 경우 인근 암반과 처분장내의 수두차(hydraulic head difference)에 의해 지하수가 침투하여, 처분장이 서서히 지하수로 포화된 후 방사성핵종은 지하수에 의해 이동하여 생태계로 누출된다. 이러한 측면에서 처분장 주변의 지하수 유동 현상을 규명하는 것은 방사성폐기물 처분 안전성 평가에서 중요한 항목으로 고려되고 있으며, 현재 각국에서는 이에 대해 활발한 연구활동을 보이고 있다. 각국에서 개발된 지하수 유동 모델을 상호비교하는 HYDROCOIN(HYDROlogic COde INtercomparison)⁽¹⁾ 프로젝트가 결성되어 방사성폐기물 처분 안전성 측면에서 처분장과 주변 암반을 통한 지하수 유동현상을 규명하는 연구가 수행되었다. 국내에서는 이진재⁽²⁾가 방사성핵종의 지중 이동경로 해석을 위해 INTERA⁽³⁾의 지하수 유동 모델을 이용한 바 있다.

지하매질에서 지하수 유동 체계를 이해하기 위해 사용되는 모델에는 Analog모델, 해석모델, 수치모델 등 여러가지가 있으나⁽⁴⁾ 본 연구에서는 방사성폐기물 처분장 주변의 지하수 유동현상을 조사하기 위해 정상상태에서의 수치방법을 이용하였다. 모델의 검증을 위해 수두에 대한 Laplace방정식의 해석해를 구하여 수치해를 비교한 후 지하수 수치모델을 이용하여 가상의 방사성폐기물 처분장 주변에서 지하매질의 특성에 따른 지하수 유동현상을 규명하였으며, 지하암반내 불연속적 균열에 의한 지하수 유동의 변화 현상도 조사하였다.

처분장에서 누출된 방사성핵종이 지하수에 의해 어떤 경로로 생태계에 도달하는가를 조사하기 위해 구성된 network과 계산된 지하수 속도의 방향

을 이용하여 처분장에서 생태계로의 가능한 지하수의 이동경로를 산정하는 방법을 개발하여 지하수의 이동경로 및 생태계로의 도달시간을 예측하였다.

2. 지하수 유동 이론

2.1 정상상태에서의 지하수 유동 방정식

Darcy는 모래를 통한 유체의 흐름을 해석하는데 실험실실험을 통하여 다음과 같은 경험식을 제시하였다.

$$Q = K \cdot i \cdot A = u \cdot A \quad (1)$$

여기서, Q : 유량(flow rate) A : 단면적

i : 동수구배(hydraulic gradient)

K : 수리 전도도(hydraulic conductivity)

u : Darcy 속도

한편, 흙입자와 공극으로 구성된 연속 매질에서 유체는 공극을 통해 흐르므로 실제 유체의 흐름이 발생하는 것은 매질의 공극 단면적을 통해서이다. 따라서, 평균 선형속도(average linear velocity)는 다음과 같이 정의된다.

$$v = \frac{Q}{n \cdot A} = \frac{u}{n} \quad (2)$$

여기서, v : 평균 선형속도,

n : 매질의 공극율

식 (1)과 (2)에서 Darcy속도와 평균 선형속도는 거시적 개념으로 실제 속도는 매질의 공극을 통해 유체 입자가 각각의 불규칙한 흐름경로를 따라 흐르게 되나 이러한 실제유속을 측정하기가 어렵기 때문에 매질의 전단면을 통해 흐르는 평균속도를 도입하였다⁽⁵⁾.

Darcy의 법칙은 실험적으로 Reynolds number가 1에서 10사이의 값을 넘지 않는 층류에서 유용하며⁽⁶⁾, 다행히 많은 자연적 지하수 흐름은 Reynolds number가 1보다 작아 Darcy의 법칙을 적용시킬 수 있다⁽⁷⁾.

주어진 매질에서 동수두선을 구하여 지하수 유동 현상을 규명하기 위해 일반적으로 수두에 관한 편미분 방정식을 세운 후 적절한 초기 및 경계조건으로 이를 해석함으로써 그 해를 얻을 수 있는데 이 경우 매질이 균질해야 한다는 가정을 만족해야 한다. 지하수 흐름에 대한 식은 Darcy의 법칙과 연속방정식에 의해 지하매질을 등방성의 균질

한 다공성 매질로 간주하면 수두에 대한 Laplace 방정식으로 표시되며, 정상상태의 2차원 흐름영역에서의 일반적인 지하수 유동 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

식 (3)의 해는 2차원 흐름영역에서의 수두 $h(x, z)$ 를 제시하고 있는데 동일 수두를 연결한 등수두선 (equipotential line)과 유선(flow line)은 수직관계가 있는 바 이를 해석하여 흐름영역에서의 지하수 유동 현상을 추정할 수 있다.

2.2 지하수 수치 모델

수리학적 특성이 다른 비균질 및 다층매질의 경우 각 지하수 흐름 경로마다 매질의 특성이 달라 각각의 경우마다 경계조건을 다르게 적용시켜야 하므로 식 (3)의 해석해를 구하는 경우 현상 해석이 매우 어려워진다. 이러한 경우 각 흐름경로에 매질의 특성을 반영하여 각각의 흐름경로가 만나는 점에서 질량 보존식을 세워 비균질 및 다층매질의 지하수 유동현상을 규명할 수 있는데 이는 본 연구에서 사용한 수치 모델의 기본 원리가 된다⁽³⁾.

모델의 기본 개념은 각 절점에서 질량 보존의 법칙을 또, 각 부재에서 Darcy의 법칙을 적용하여 정상상태에서의 지하수 유동 현상을 규명하였다. 그림 1에 절점(node : 물성이 다른 매질이 만나는 점)과 각 절점을 연결하는 부재(member : 물성이 다른 매질)로 구성되는 network을 나타내었다. 각 절점에서 질량보존의 법칙을 세우면 다음과 같다.

$$\sum Q_i = 0 \quad (4)$$

여기서,

Q_i : 각 절점에 연결된 부재의 유동율

i : 구성된 network의 각 부재

부재 i 에 대한 속도 u_i 는 Darcy의 법칙에 의해 다

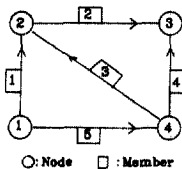


그림 1. Typical network.

음과 같이 정의된다⁽⁵⁾.

$$u_i = - \frac{k_i}{\mu} [\nabla(p + \rho_i g \cdot z)] \quad (5)$$

따라서, 각 부재에 대한 유동율(mass flow rate)은 다음과 같이 표시된다.

$$Q_i = \rho_i A_i u_i = \frac{\rho_i A_i}{L_i} \cdot \frac{k_i}{\mu} \cdot [\Delta p + \rho_i g \cdot \Delta z] \quad (6)$$

여기서, ρ : 유체밀도, L : 부재길이
 k : 부재의 투수능(permeability)
 μ : 점성계수, p : 절점에서의 압력
 A : 단면적, g : 중력가속도
 z : 임의 기준면에 대한 절점의 높이
 ∇ : gradient Δ : 증분(increment)

식 (6)과 같이 각각의 부재에 대한 유동율을 구하여 식 (4)에 대입하면 각 절점에서 압력을 구하는 식으로 변환되어 각각의 절점에 대해 식을 세워 보면 결국 행렬의 형태로 나타내어지며, 이 행렬식을 풀기위해 Gaussian elimination⁽⁶⁾방법을 사용하였다. 이러한 방법은 비균질매질에서 3차원 지하수 유동을 1차원의 연속적이고 평행한 부재의 등가의 network으로 이상화시킴으로써 3차원 지하수 유동 해석도 가능하다. 또한 불연속적인 균열로 이루어진 매질에서도 균열지역의 수리학적 특성을 부재에 반영시킴으로써 균열지역에 대한 지하수 유동 해석이 가능하여 이러한 경우에 특히 유용하다. 각 절점에서 압력을 구한 후 다음 식을 사용하여 각 절점에서 수두를 구하였다.

$$h = z + \frac{p}{\rho g} \quad (7)$$

식 (4)에 의해 구성된 network의 각 절점에서 압력과 각 부재에서 Darcy의 유속을 구한 후 부재를 따른 지하수의 이동 시간은 다음과 같다.

$$T_i = L_i / v_i \quad (8)$$

방사성폐기물 처분장에서 누출된 방사성핵종이 지하수에 의해 생태계로 도달함으로써 지하매질을 통한 방사성핵종의 이동을 예측하는데 지하수 이동경로의 산정은 필수적이다.

지하수 이동경로의 산정은 처분장 주위의 지하매질에 대해 구성된 network의 각 절점에서 이에 연결된 여러 부재들을 절점을 중심으로 들어오는 부재는 음으로 나가는 부재는 양으로 표시하여 net-

work을 먼저 정의한 후 각 부재에서 계산된 지하수 평균 선형속도가 음의 부호를 갖는 것은 가정한 흐름과 반대이고 양의 부호를 갖는 것은 가정한 흐름과 같은 것으로 이를 이용하여 network의 각 절점에 연결된 부재의 방향을 다시 정의하게 된다.

INTERA⁽³⁾에서는 처분장에서 생태계 유출지점로의 지하수 흐름경로를 산정하기 위해 이와 유사한 방법을 사용한 바 있으나, 이 방법은 처분장에서 생태계 유출지점까지의 가능한 지하수 이동경로를 찾기 위해 계속하여 중복되는 부분이 발생한다. INTERA의 방법을 간략히 설명하면 다음과 같다. 그림 1에서 출발점인 절점 1번을 1단계로 하고 1번 절점에서 각각의 부재 1과 5를 통해 만나는 절점 2, 4를 2단계로 하고 다음, 절점 2와 4에 연결된 부재중 밖으로 나가는 부재만을 고려하여 절점 2에서는 부재 2를 통해 만나는 절점 3은 유출지점이므로 다음 단계로는 고려하지 않는다. 다음 절점 4에서 밖으로 향하는 부재는 3, 4로 먼저 3을 통해 만나는 절점 2를 다시 3단계로 고려하고, 부재 2와 부재 4에 의해 만나는 절점 3은 역시 유출지점이므로 이는 고려하지 않는다. 이때 절점 2는 2단계에 이미 포함되어 있으므로 다시 중복되게 된다.

다음 서로 다른 3개의 단계로 정의된 각 절점에서 이에 연결된 부재들로 처분장에서 유출지점까지의 이동경로를 찾기 위해 하나의 이동경로로 이들 부재들을 연결하게 되는데 이를 찾기 위해 먼저 3단계로 구성된 부재들을 곱하여 총 6개로 만든 후 이 부재들이 연결된 절점을 찾은 후 이 절점이 각 단계에 정의된 부재에 의해 서로 연결되면 이때의 연결된 부재들만을 흐름경로로써 정의하게 된다. 즉 그림 1에서 서로 다른 3단계로 구성된 부재 1-2, 1-3-2, 1-4, 5-2, 5-3-2, 5-4의 6개를 만든 후 서로 연결된 부재인 1-2, 5-3-2, 5-4의 3개 부재만을 이동경로로 산정한다. 따라서 그림 8과 같이 많은 절점과 부재로 구성되는 격자에 대해서는 컴퓨터의 기억용량을 초과하게 되어 계산이 불가능해지며 INTERA에서도 이 방법에 의하면 가능한 지하수의 이동경로를 20개 미만까지만 산정할 수 있다고 지적하였다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하여 구성된 network의 절점과 부재수

에 관계없이 지하수 이동경로를 산정할 수 있는 새로운 해석방법을 개발하였는 바 이는 다음과 같다.

그림 1에서 절점 1에 연결된 부재 1, 5를 찾고 1번 부재를 첫번째로 5번 부재를 두번째로 순서를 둔 후 첫번째 순서로 고려된 1번 부재에 의해 절점 2로 진행한다. 다음 절점 2를 생태계 유출절점 3과 비교하여 같지 않으므로 절점 2에 연결된 밖으로 향하는 부재 2만을 찾아 절점 3으로 진행한 후 이 절점이 유출지점이므로 첫번째 지하수 이동경로인 1-2를 산정하고 다시 절점 1로 가 두번째로 연결된 부재 5에 의해 위와 동일한 방법으로 나머지 이동경로인 5-3-2, 5-4를 찾게 된다. 이 방법은 처분장 절점에 연결된 부재들에 순서를 두어 한 번 산정된 부재들이 중복되지 않도록 한 것이다. INTERA⁽³⁾에서 제시한 방법에 의하면 network구성시 격자수의 제한을 갖게되어 2차원 또는 3차원의 경우 해석이 매우 어려워지게 되나, 본 연구에서 개발된 산정방법을 이용하면 network구성시 격자수에 제한을 받지 않아 해석하고자 하는 지형의 차원에 관계없이 방사성폐기물 처분장 주변의 지하매질의 관심지역에 대해서는 격자를 좀더 세분화시켜 해석할 수 있는 장점이 있다.

수치모델에서 구성된 network과 계산된 지하수 속도의 방향을 이용하여 방사성폐기물 처분장으로부터 생태계 유출지점까지의 가능한 지하수 이동경로를 산정한 후 부재의 전체 이동경로를 따른 지하수의 생태계로의 평균선형 속도를 구할 수 있는데 이는 다음과 같다.

$$v = \frac{\sum L_i}{\sum T_i} \quad (9)$$

2.3 수치모델의 검증

앞에서 설정한 수치모델의 실제적용에 앞서 식 (3)에 제시된 수두에 관한 편미분 방정식의 1차원 및 2차원에 대한 해석해를 구하여 본 연구에 사용된 모델의 수치해와 비교함으로써 모델을 검증하여 보았다.

1차원의 경우 균질매질(homogeneous media)과 비균질매질(heterogeneous media) 및 다층매질(layered media)에 대한 해석해를 구하기 위해 거리 100 m를 5m의 등간격으로 20개 구간으로 분할하여 경계조건으로 $x=0$ 일 때 수두 $h=20$ m, $x=100$

일 때 수두 $h=10\text{m}$ 로 가정하였다. 또한, 균질매질의 경우 전기간에 대해 수리 전도도를 일정하게 주었고, 비균질매질의 경우 거리의 함수로써 수리 전도도를 변화시켜 주었으며, 다층매질의 경우는 매질을 3개로 분할하여 각 매질에 따라 수리 전도도를 변화시켜 해석해를 구하였다. 1차원 각 경우에 대한 지배방정식 및 해석해는 다음과 같다.

● 균질매질, 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 : K = K_0, \quad 0 \leq x \leq 100$$

해 : $h(x) = -0.1x + 20$

● 비균질매질, 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K(x) \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 :$$

$$K(x) = \frac{1}{x + \frac{1}{K_0}}, \quad 0 \leq x \leq 100$$

$$\text{해 : } h(x) = \frac{-1}{500 + \frac{10}{K_0}} \left(\frac{x^2}{2} + \frac{x}{K_0} \right) + 20 \quad (10)$$

● 다층매질, 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_n \frac{\partial h_n}{\partial x} \right) = 0 \quad 0 \leq x \leq 100$$

$$\text{해 : } h(x) = \frac{h(L) - h(0)}{\sum M + L/K_M} [x/K_n + \sum] + h(0)$$

1차원 다층매질에서의 해석해에 대한 유도는 부록에 수록하였다. 위 식에서, K_0 는 첫 구간에서의 수리 전도도이고, K_n 은 각 매질에서의 수리 전도도이다. 또한, 동일조건하에서 수치해를 구하여 해석해와 비교하였는데 그림 2에서 균질매질, 비균질매질 및 다층매질의 경우 수치해와 해석해가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 앞에서 설명한 수치모델이 비균질 및 다층매질의 경우 지하수의 유동 현상을 해석하는데 유용하다는 것을 입증하고 있다.

2차원의 경우 균질매질에 대해 그림 3과 같이 양 옆과 바닥은 흐름이 없는 불투수성으로, 또 지표면에서의 지하수위가 $x=0$ 에서 $x=s$ 까지 바닥을 기준으로 선형으로 증가하는 함수의 형태로 경계조건을 주었다.

이러한 경계조건하에서 매질을 균질하고 등방성

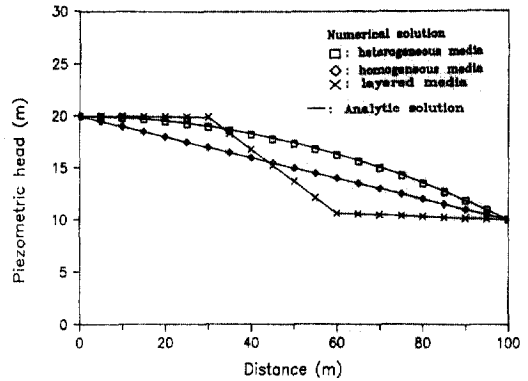


그림 2. Comparison of analytical and numerical solution in one-dimensional system.

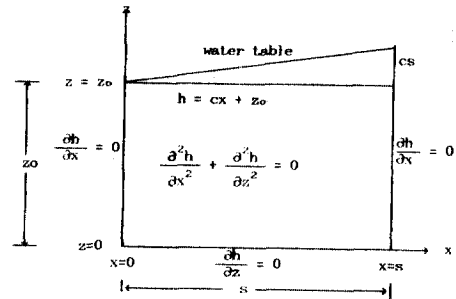


그림 3. Groundwater flow system in two-dimensional homogeneous media.

으로 고려하면 식 (3)의 해석해는 Toth⁽⁹⁾에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$h(x,z) = z_0 + \frac{cs}{2} - \frac{4cs}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\cos[(2m+1)\pi x/s] \cdot \cosh[(2m+1)\pi z/s]}{(2m+1)^2 \cosh[(2m+1)\pi z_0/s]} \quad (11)$$

위 식의 무한급수항을 살펴보면 함수 $\cosh[(2m+1)\pi z/s] / \cosh[(2m+1)\pi z_0/s]$ 는 m 이 커질수록 급하게 1로 수렴하고, $\cos[(2m+1)\pi x/s]$ 는 ± 1 이내에서 진동한다. 따라서 진폭은 $1/(2m+1)^2$ 이 되므로, 이 진폭이 주어진 오차 한계 이내에 들어오면 무한급수의 합계산을 끝나게 하여 해석해를 구하였다.

2차원 다층매질의 경우는 그림 4와 같이 양 옆과 바닥은 흐름이 없는 불투수성으로, 또 지표면에서

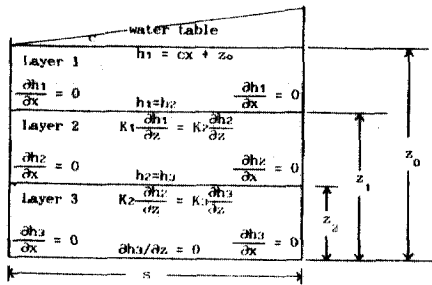


그림 4. Groundwater flow system in two-dimensional layered media.

는 지하수위가 $x=0$ 에서 $x=s$ 까지 바닥을 기준으로 선형으로 증가하는 함수의 형태로 또, 각 매질의 경계에서의 수두와 유량이 같은 것으로 경계조건을 주었다. 이 경우 식 (3)의 해석해는 3개 매질의 경우 Freeze⁽⁴⁰⁾에 의해 다음과 같이 주어진다. 식 (12)의 무한급수 합은 식 (11)의 방법과 동일하게 계산하였다.

$$h_1(x,z) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos \frac{m\pi x}{s} \left[\cosh \frac{m\pi z}{s} (U) + \sinh \frac{m\pi z}{s} (Y) \right]$$

$$h_2(x,z) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos \frac{m\pi x}{s} \left[\cosh \frac{m\pi z}{s} (W) + \sinh \frac{m\pi z}{s} (V) \right]$$

$$h_3(x,z) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos \frac{m\pi x}{s} \cdot \cosh \frac{m\pi z}{s} \quad m=0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

여기서, $A_0 = \frac{1}{s} [z_0 s + \frac{cs^2}{2}]$,

$$A_m = \frac{2}{sQ} \left[\left(\frac{s}{m\pi} \right)^2 \cdot (c \cdot \cos m\pi - c) \right]$$

$$W = \cosh^2(m\pi z_2/s) - (K_3/K_2) \cdot \sinh^2(m\pi z_2/s)$$

$$V = (1 - W) / \tanh(m\pi z_2/s)$$

$$T = \cosh^2(m\pi z_1/s) - (K_2/K_1) \cdot \sinh^2(m\pi z_1/s)$$

$$R = (1 - T) / \tanh(m\pi z_1/s)$$

$$U = W \cdot T + \cosh(m\pi z_1/s) \cdot \sinh(m\pi z_1/s) \cdot$$

$$V \cdot (1 - K_2/K_1)$$

$$Y = W \cdot R + V \cdot (1 + K_2/K_1 - T)$$

$$Q = \cosh(m\pi z_0/s) \cdot U + \sinh(m\pi z_0/s) \cdot Y$$

여기서 c 는 지하수위의 경사로 0.25를 취하였고 x 축의 거리 400m를 50m, z 축의 거리 180m를 60m의 간격으로 분할하여 총 36개의 절점을 만든 후 지표면의 경계조건으로는 지하수위를 주었다. 특히 다층매질의 경우 z 축을 60m 간격으로 3개 매질로 분할하여 각 매질에서 수리 전도도를 다른 값으로 주었다. 또한 동일 조건하에서 균질 및 다층매질에 대한 수치해를 구하여 식 (11) 및 (12)에 의한 해석해와 비교하였는데 그림 5 및 6의 각 위치에서 제시된 수두값은 바닥을 기준으로 하여 산정한 값들로 해석해와 수치해가 거의 일치하고 있다. 따라서 본 연구에서 설정한 수치모델이 정상상태의 지하수 유동현상을 규명하는데 적절한 것으로 생각되었고, 특히 비균질 매질 및 다층매질에 있어 지하수 흐름을 해석하는데 유용한 것으로 판단되었다.

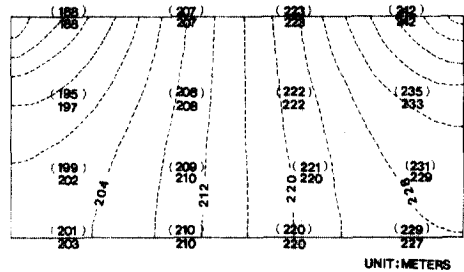


그림 5. Comparison of analytical and numerical solution in two-dimensional homogeneous media. () : numerical solution.

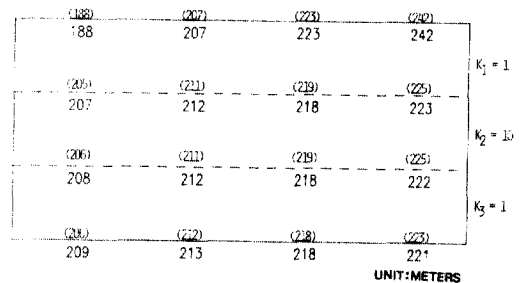
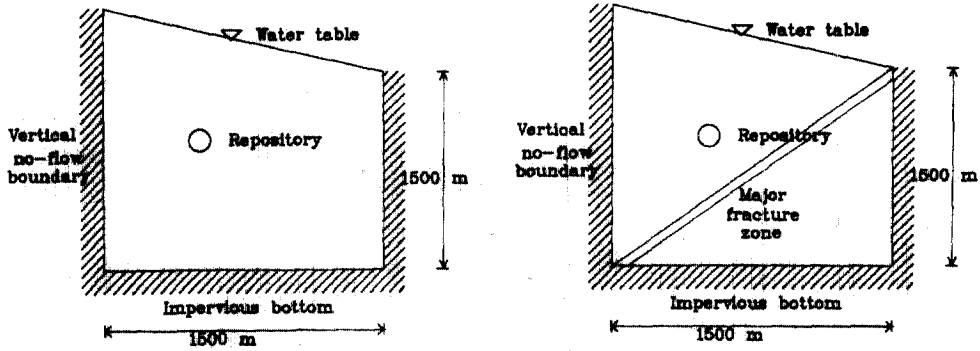


그림 6. Comparison of analytical and numerical solution in two-dimensional layered media. () : numerical solution.



(a) geologic media without major fracture zone (b) geologic media with major fracture zone

그림 7. Schematic representation of the location of a repository.

3. 가상 처분장 주변에서 지하수 유동 현상

본 연구에서 개발된 수치모델을 이용하여 가상의 처분장 주변에서의 지하수 유동의 변화 현상을 조사하기 위하여 그림 7과 같은 2개 경우의 가상의 처분장을 고려하였다. 이러한 가상의 처분장에 모델을 적용시키기 위하여 절점과 부채로 구성되는 network을 그림 8과 같이 구성하여 수리학적 특성이 다른 4개 경우에 대해 계산을 수행하였다.

표 1. Input parameter values for each case.

	Geologic media without major fracture zone		Geologic media with major fracture zone	
	case 1	case 2	case 3	case 4
permeability (m ²)	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹²
porosity	0.03	0.005	0.03	0.005
density (kg/m ³)	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
viscosity (kg/m·sec)	0.001	0.001	0.001	0.001

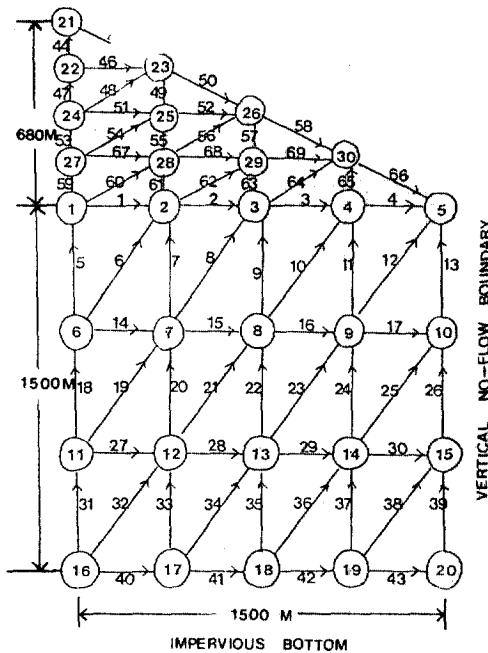


그림 8. Layout of the network near a repository.

표 1의 입력자료는 구성된 network의 각 부채에 대한 값들이다⁽¹⁾. 투수능(permeability)은 case 1과 case 3에서 10⁻¹⁰ m²의 값을, case 2와 case 4에서는 10⁻¹⁴ m²의 값을 취하여 투수능의 변화에 따른 지하수 유동의 변화 현상을 고찰하였다. 또한, 지하매질에 균열(fracture)이 있는 경우에 대한 영향을 평가해 보기 위하여 균열을 포함하는 case 3과 case 4에서는 균열에서의 투수능을 10⁻⁸ m²과 10⁻¹² m²로 원래 값의 100배로 하였다.

공극율은 투수능과 같은 형식으로 균열지역이 존재하지 않는 경우와 존재하는 경우에 대해 표 1에 제시된 값을 사용하였고, 밀도와 점성계수는 물에 대한 일반적인 값을 사용하였다. 지하수위의 경사는 0.45로 주었고 그림 8에서 화살표는 network 구성시 부채를 따른 가정한 지하수 흐름 방향이다.

모델에서 균열을 포함하는 지역은 그림 8에 주

어진 network의 부재 12-23-34로 나타내었다. 모델의 경계조건으로는 절점 21, 23, 26, 30, 5에 지하수위를 양옆과 바닥은 흐름이 없는 불투수성 지반으로 고려하였다.

가상의 처분장 주변에서 수리학적 특성이 다른 4개 경우에 대한 모델의 계산 결과인 수두분포(hydraulic head distribution)은 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 여기서 제시된 수두값은 처분장이 위치한 지역의 아래부분인 불투수성 지반을 기준($z=0$)으로 하여 산정하였다. 그림 9는 투수능이 큰 매질에 대한 등수두선을 제시한 것으로 지하수 흐름은 등수두선과 수직관계가 있는 바 지하수 흐름은 수두가 큰 지역에서 수두가 작은 지역으로 이동하고 있음을 알 수 있다. case 1은 균열이 존재하지 않는 경우이고 case 3는 부재 12-23-34에 균열을 포함하는 지역이 존재하는 경우로 두 경우

를 비교하여 보면 case 3에서 지하수 흐름은 균열을 포함하는 지역 근처에서 빠르게 이동함을 알 수 있다. 또 지하수 속도는 등수구배에 비례하므로 case 3의 경우 균열지역의 왼쪽편에서 동일거리에 대한 수두차가 case 1에 비해 커서 균열지역으로 빠르게 이동하는 반면 균열지역의 오른쪽에서는 오히려 case 1에 비해 늦게 이동됨을 알 수 있다. 그림 10은 투수능이 적은 매질에 대한 등수두선을 제시한 것으로 지하수 흐름은 그림 9와 유사한 형태를 나타내고 있다. 그림 8에서 처분장의 위치는 절점 8번으로, 생태계로의 유출지점은 절점 5번으로 가정하였다.

투수능이 적은 매질에서 부재를 따른 지하수 이동경로에 대해 계산된 일부 결과들을 표 2에 제시하였는데 case 4에서 지하수 이동경로중 균열지역을 만나면 이곳에서 지하수의 이동이 빨라지며, 이동경로가 긴 경우에는 처분장이 위치한 곳의 아래쪽에 균열지역을 만나더라도 이후 균열이 없는 지역의 경로를 따라 이동하므로 생태계로 늦게 이동됨을 알 수 있다.

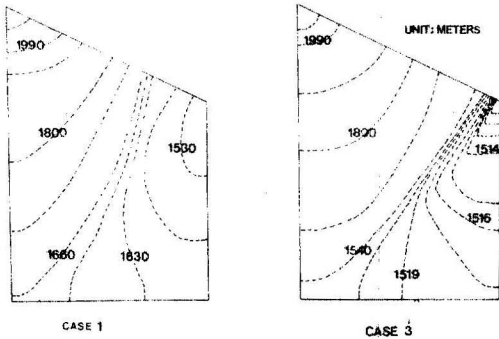


그림 9. Hydraulic head distribution in high permeable media.

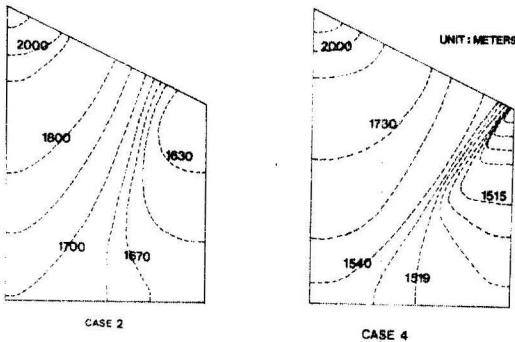


그림 10. Hydraulic head distribution in low permeable media.

표 2. Average linear groundwater velocity and travel time along pathway.

	groundwater pathway	length (m)	velocity (m/yr)	time (yr)
case 2	22-35-36-24-17-13	3000	18	170
	22-35-36-25-13	2750	19	147
	22-35-42-37-30-26-13	3250	12	260
	22-35-42-38-26-13	3000	16	178
	22-35-42-43-39-26-13	3250	14	228
case 4 (fracture zone : 12-23-34)	21-28-23-12	2250	36	62
	21-32-40-34-23-12	3500	28	125
	21-33-34-23-12	3000	42	70
	21-33-34-29-25-13	3250	6	540

4. 결 론

방사성폐기물 처분장 주변의 지하수 유동 현상을 이해하기 위하여 절점과 부재로 구성된 network으로 표시되는 정상상태에서의 지하수 수치모델을 수립하였다. 설정된 지하수 수치모델은 1차원과 2차원 균질, 비균질, 다층매질에 대하여 해석해와 비

교하였다. 계산결과는 서로 잘 일치하였고, 특히 본 연구에서 개발된 모델은 비균질 및 다층매질에서 지하수 흐름을 해석하는데 유용한 것으로 판단되었다. 모델을 이용하여 가상의 처분장 주변의 지하매질의 특성 및 균열지역의 존재 유, 무에 의한 지하수 유동의 변화 현상을 조사하였다. 또한, 지하수의 이동경로에 따른 지하수 속도 및 생태계로서의 지하수 도달시간을 개발된 지하수 이동경로 산정 방법에 의해 정량적으로 제시하였다.

이러한 수치실험은 실제 현상에 대한 것은 아니나 방사성폐기물 처분장 주변의 지하수 유동의 변화 현상을 규명한다는 목적하에 초기단계로써 수행된 것으로 추후 신뢰성 있는 현장 부지자료가 확보되면 관측치와의 비교에 의한 모델의 검증이 필요하다.

감사의 말

본 연구는 방사성폐기물 관리기금으로 수행하였다.

참고 문헌

1. OECD, *The International HYDROCOIN Project*, Paris, 1988.
2. 이진재, "방사성폐기물 처분장내의 고화폐기물의 용출을 결정과 방사성핵종의 지동이동에 관한 연구", 한국과학기술원, 1986, pp.95~114.
3. INTERA Environmental Consultants, Inc., "NETFLO : A Network Ground-Water Flow Code", ONWI-425, Battelle Memorial Institute, 1983.
4. Prickett, T. A., "Modeling Techniques for Groundwater Evaluation", In *Advances in Hydroscience*, Academic Press, New York, 1975, pp.1~128.
5. Freeze, R. A. and Cherry, J. A., *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1979, pp.69~75.
6. Bear, J., *Dynamics of Fluids in Porous Media*, American elsevier publishing company, Inc., New York, 1972, pp.125~128.
7. Todd, D. K., *Groundwater Hydrology*, John Wiley & Sons, New York, 1980, pp.67~68.
8. Pinder, G. F. and Gray, W. G., *Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology*, Academic Press, New York, 1977, pp.15~18.
9. Toth, J., "A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta, Canada", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 67, No. 11, 1962, pp.4375~4387.

10. Freeze, R. A. and Witherspoon, P. A., "Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow : 1. Analytic and Numerical Solutions to the Mathematical Model", *Water Resources Research*, Vol. 2, No. 4, 1966, pp.641~656.
11. INTERA Environmental Consultants, Inc., "Porosity, Permeability, and Their Relationship in Granite, Basalt, and Tuff", ONWI-458, Battelle Memorial Institute, 1983, pp.8~22.

<부 록>

1차원 정상상태에서의 다층매질(layered media)에 대한 해석해는 다음과 같이 구해진다.

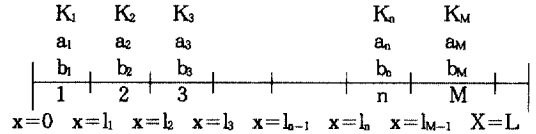


그림 A. M-layer composite region.

그림 A와 같이 n번째 다층매질에서 수두에 대한 Laplace 방정식 및 일반해는 다음과 같다(이때 각 매질은 균질하다).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_n \frac{\partial h_n}{\partial x} \right) = 0 \quad h_n = a_n \cdot x + b_n \quad (1)$$

이때, 경계조건은

$$x=0, \quad b_1 = h(0) \quad (2)$$

$$x=L, \quad a_M \cdot L + b_M = h(L) \quad (3)$$

다층매질의 각 경계에서는 수두가 같고, 질량보존의 법칙에 의해 유량(flux)이 보존되어야 하므로 각 층사이의 경계조건은 다음과 같이 표시된다.

$$\bullet \text{ 수두 : } a_{n-1} \cdot l_{n-1} + b_{n-1} = a_n \cdot l_{n-1} + b_n \quad (4)$$

$$\bullet \text{ 유량 : } K_{n-1} \cdot a_{n-1} = K_n \cdot a_n \quad (5)$$

여기서,

$$a_n = \left. \frac{\partial h_n}{\partial x} \right|_{x=l_{n-1}}, \quad a_{n-1} = \left. \frac{\partial h_{n-1}}{\partial x} \right|_{x=l_{n-1}}$$

식 (5)는 순환공식(recursive formula)에 의해 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} a_n &= \left(\frac{K_{n-1}}{K_n} \right) \cdot \left(\frac{K_{n-2}}{K_{n-1}} \right) \cdot \left(\frac{K_{n-3}}{K_{n-2}} \right) \cdots \left(\frac{K_1}{K_2} \right) \cdot a_1 \\ &= \frac{K_1}{K_n} \cdot a_1 \end{aligned} \quad (6)$$

b_n 을 b_{n-1} 으로 나타내기 위해 식 (4)에 식 (6)을 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} b_n - b_{n-1} &= \frac{K_1}{K_{n-1}} \cdot a_1 \cdot l_{n-1} - \frac{K_1}{K_n} \cdot a_1 \cdot l_{n-1} \\ &= K_1 \cdot a_1 \cdot l_{n-1} \cdot \left(\frac{1}{K_{n-1}} - \frac{1}{K_n} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)은 순환공식(recursive formula)에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$b_n - b_1 = K_1 \cdot a_1 \cdot \sum_1^n \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \sum_1^n = & l_{n-1} \left(\frac{1}{K_{n-1}} - \frac{1}{K_n} \right) + l_{n-2} \left(\frac{1}{K_{n-2}} - \frac{1}{K_{n-1}} \right) + \dots \\ & + l_1 \left(\frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2} \right) \end{aligned}$$

식 (8)에서 n 이 M 일 경우, 식 (2), (3)의 경계조건을 사용하면

$$b_M - b_1 = h(L) - a_M \cdot L - h(0) = K_1 \cdot a_1 \cdot \sum_1^M \quad (9)$$

식 (6)과 (9)로부터 a_1 은 다음과 같이 표시된다.

$$a_1 = \frac{1}{K_1} \cdot \frac{h(L) - h(0)}{\sum_1^M + L/K_M} \quad (10)$$

식 (2), (6), (8), (10)을 식 (1)에 대입하면 다층매질의 임의거리 x 에서의 수두를 나타내는 식은 다음과 같이 제시된다.

$$h_n(x) = \frac{h(L) - h(0)}{\sum_1^M + L/K_M} \cdot \left[\frac{x}{K_n} + \sum_1^n \right] + h(0)$$

(接受: 1969. 8. 31)