

방사성 폐기물 처분동굴 주변 지하수 유동에 대한 민감도 분석

박주완, 최희주, 이명찬, 김창락, 조찬희

한국원자력연구소

요 약

방사성 폐기물 처분장 주변에서의 지하수 유동에 대한 민감도 분석을 수행하여 안전성 평가 측면에서 필요한 성능측도에 미치는 영향을 파악하였다. 각 암반층의 투수계수 및 공극률의 변화에 대한 지하수 유속과 수두의 민감도와 경계 조건을 변경함으로써 인해 지하수 유동시간에 미치는 영향을 adjoint 민감도 분석법에 의해 살펴보았다. 민감도 분석 결과, 본 논문에서 고려된 처분부지의 경우 해수에 접한 경계 면에서는 해수의 밀도를 고려한 경계조건을 사용하는 것이 지하수 유동이 없다고 가정하는 경계조건보다 약간 보수적임을 보여주었고, 투수계수 변화에 따른 지하수 수두 및 Darcy 속도는 처분동굴이 위치한 암반의 투수계수 변화에 매우 민감하고 실제적으로 동굴에서 멀리 떨어진 바다 암반층의 투수계수 변화에는 민감하지 않았다.

1. 서 론

지하수 유동 해석에 사용되는 수리학적 물성치, 경계조건 등의 입력 인자 값에는 불확실성이 있으며, 이 불확실성은 수치해석 모델에 의해 예측되는 양, 예를 들면, 어떤 점에서의 지하수나 지하수 유동 속도와 같은 성능측도(Performance measures)의 불확실성을 야기한다. 방사성 폐기물 처분장의 안전성 평가 측면에서 지하수 유동과 관련된 주요한 성능측도는 처분장 주변에서의 지하수 유속, 지하수 유동시간 및 환경으로의 방사성 핵종의 유출율(flux)이다.

민감도는 일반적으로는 입력 인자의 변화에 대한 성능측도의 변화율로 정의되며, 수학적으로는 입력 인자에 대한 성능측도의 미분계수로 정의된다. 민감도 분석을 위해 본 논문에서 이용한 adjoint법은 Sykes[1]에 의해 정상 상태 지하수 유동에 적용된 후, Carrera와 Neuman[2]에 의해 비정상 상태의 지하수 유동에도 적용 가능하도록 개발되었다.

본 논문의 목적은 adjoint법을 응용하고 있는 NAMMU 프로그램[3]을 이용하여 방사성 폐기물 처분장 주변에서의 지하수 유동평가를 위한 수치해석 모델링시 적용한 경계조건들과 수리학적 입력 인자인 투수계수와 공극률에 대한 지하수 수두, 유동속도, 유동시간 등 성능측도의 민감도를 조사하기 위한 것이다. 각 암반층의 투수계수 및 공극률 변화에 기인하여 폐기물 처분장의 임의 구역을 지나는 유속과 수두의 민감도를 분석하였으며, 지정된 경계 조건을 변경함으로써 인한 영향을 알아 보았다.

2. 지하수 유동에서의 adjoint 민감도 분석법

지하수 유동은 투수계수, 공극률과 같은 각 암반층의 수리학적 특성, 수십가지의 지층 및 다양한 경계 조건에 의해 특성지어진다. 각 입력 인자를 차례로 변경시켜 가면서 민감도를 계산하는 것은 시간과 경비를 요하는 지루한 작업이다. 이런 문제점을 극복하기 위해 개발된 adjoint 분석법은 수치 모델을 한번 모사한 것과 비슷한 노력으로 모든 입력 인자에 대한 민감도를 계산할 수 있는 장점이 있다. 정상 상태 지하수 유동에 대하여 이러한 adjoint법을 사용하여 민감도계수를 구하기 위한 적용 단계는 다음과 같다.

2차원 정상상태 지하수 유동모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [b K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j}] + Q = 0 \quad \text{----- (1)}$$

$$h(\Gamma_1) = \hat{h} \text{ on } \Gamma_1 \quad \text{----- (2a)}$$

$$-b K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j}(\Gamma_2)n_i = \hat{q} \text{ on } \Gamma_2 \quad \text{----- (2b)}$$

여기서 K_{ij} 는 수리전도도[m/sec], h 는 지하수두[m], Q 는 지하수 유입량 혹은 방출량[m³/sec m²], \hat{h} 는 경계면 Γ_1 상에 지정된 수두[m], \hat{q} 는 경계면 Γ_2 상에 지정된 유속[m³/sec m], b 는 지층의 두께[m]를 나타낸다.

또한, 정상 상태 지하수 유동 모델에서의 성능측도는 다음과 같이 표현된다.

$$P = \int_A f(\{a\}, h) dA \quad \text{----- (3)}$$

여기서 $\{a\}$ 는 입력 인자로 이루어진 열벡터를 나타내며, K, Q, \hat{h}, \hat{q} 가 포함된다.

$f(\{a\}, h)$ 는 민감도 분석에서 관심지역과 입력 인자를 정의하기 위해 선정된 정상 상태 지하수 유동 시스템의 상태함수로서 다음과 같다[3,4].

- 한 점에서의 Darcy속도 :

$$f(\{a\}, h) = q(x_i) g(x_i), \quad g(x_i) = \delta(x_i - x'_i) \quad \text{----- (4)}$$

여기서 $g(x_i)$ 는 임의의 가중함수, x_i 는 위치벡터, x'_i 는 관심있는 지점의 위치벡터이며, $\delta(x_i - x'_i)$ 는 Dirac-delta함수를 나타낸다.

- 한 점에서의 수두 :

$$f(\{a\}, h) = h(x_i) g(x_i) \quad \text{----- (5)}$$

- 지하수 유동 경로에 따른 유동시간 :

$$f(\{a\}, h) = \sum_{k=1}^N s_k / (|q(x_k)| / \phi) \quad \text{----- (6)}$$

여기서 N 는 유동경로를 이산화하는데 사용된 지점 x_k 의 수, s_k 는 지점사이의 유동경로의 길이, ϕ 는 암반의 공극률이며, $q(x_k)$ 는 Darcy 속도를 나타낸다.

정상상태 지하수 유동의 경우 adjoint식은 다음과 같이 표현된다[1]:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [b K_{ji} \frac{\partial \psi^*}{\partial x_i}] + \frac{\partial f(\{a\}, h)}{\partial h} = 0 \quad \text{----- (7)}$$

$$\psi^*(\Gamma_1) = 0 \quad \text{on } \Gamma_1 \quad \text{----- (8a)}$$

$$bK_{j,i} \frac{\partial \psi^*}{\partial x_i} n_j = 0 \quad \text{on } \Gamma_2 \quad \text{----- (8b)}$$

여기서 ψ^* 는 adjoint 상태함수이다.

민감도 계수의 종류에는 변수를 고정시킨 경우 입력인자에 관한 성능측도의 미분계수인 직접 민감도계수(예를 들어 투수계수 k 에 대한 Darcy속도의 민감도는 $\frac{\partial q}{\partial k}$), 직접 민감도에 입력인자가 변함에 따라 변수가 변함으로서 발생하는 간접 민감도(예를 들어 투수계수에 대한 Darcy속도의 민감도는 $\frac{dq}{dk}$)를 합한 여유 민감도 계수(Marginal sensitivity coefficient) 및 입력인자의 단위와 수치범위가 다른 경우 민감도계수를 무차원화하여 입력인자의 상대적인 변화에 대한 성능측도의 상대적 변화를 나타내는 정규 민감도계수(예를 들어 투수계수에 대한 Darcy속도의 민감도는 $\frac{dq}{dk} \cdot \frac{k}{q}$)가 있다. 정상상태 지하수 유동의 경우 여유 민감도 계수는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dP}{da_k} = & \int_A \left[\frac{\partial \mathcal{K}(a, h)}{\partial a_k} + \psi^* \frac{\partial Q}{\partial a_k} - \frac{\partial \psi^*}{\partial x_i} \frac{\partial (bK_{ij})}{\partial a_k} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] dA \\ & + \int_{\Gamma_1} \left[\frac{\partial \hat{h}}{\partial a_k} bK_{ij} \right] d\Gamma_1 + \int_{\Gamma_2} \psi^* \frac{\partial \hat{q}}{\partial a_k} d\Gamma_2 \quad \text{----- (9)} \end{aligned}$$

즉, (9)식의 각 항들은 (1)식과 (7)식의 해로부터 구해지며, 여유 민감도 계수는 (9)식으로부터 구해진다.

3. 가상 처분 시스템 설정

정상상태 지하수유동의 민감도를 계산하기 위하여 그림 1과 같은 처분시스템을 구상하고, 처분부지 지하암반에 동굴이 분산 배치되어 건설되고, 각 암반질은 균질, 등방성으로 가정하였다. 본 분석에서는 방사성 폐기물 처분부지에 대한 지질조사가 충분히 진전되지 않은 상태이므로 문헌상의 일반적인 지질자료를 이용하였으며, 처분동굴 주변 지질구조를 가능한 한 단순화시켰다. 지하암반의 투수계수는 암반 A, 암반 B 및 암반 C가 각각 2.5×10^{-15} , 1.0×10^{-15} , $1.0 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, 공극률은 각각 0.1, 0.03, 0.001, 동굴내부는 투수계수 $1.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2$, 공극률 0.079의 파쇄석으로 충전, 폐쇄되었다고 가정하였다.

지하수 유동해석은 2차원 수직단면에 대해 수행하였고 그림 2에 나타낸 바와 같은 유한요소망으로 요소를 결정하였다. 모델에 적용된 경계조건으로는, 정상부에서의 지하수위의 대칭조건으로부터 좌측 경계면에서의 지하수흐름은 없다고 가정하였으며, 지표면에서는 지하수위가 지표면과 일치한다고 가정하였다. 해저에서는 해수의 밀도를 고려한 경계조건을 부여하였으며, 우측 경계면에는 본 논문의 관심인 경계조건에 대한 민감도를 보기위해 지하수 흐름이 없는 경우와 해수의 밀도와 깊이에 따른 경계조건을 각각 고려하였다. 또한 해수면으로부터 지하 300m의 바닥면에는 지하수의 흐름이 없다는 조건을 부여하였다.

4. 민감도 계산결과

그림 1과 같은 가상 처분부지에 대한 투수계수 및 공극률과 경계조건 변화에 따른 지하수 유동 시간의 민감도를 계산한 결과는 표 1 및 그림 3과 같다. 여기서 지하수 유동경로의 시작점은 최우측 동굴의 우측하단이며, 이 지점으로부터 환경으로의 지하수 유동시간은 약 230년이었다. 표 1에 따르면 투수계수에 대한 정규 민감도 가운데 지하수 유동시간은 처분동굴이 위치한 암반 B의 수평방향 투수계수에 가장 민감하며, 이 투수계수를 1% 증가시키면 지하수 유동시간은 약 0.62% 감소함을 나타내고 있다. 수치해석의 결과에 따르면 최우측 동굴의 우측하단에서 시작한 지하수 유동경로는 암반 A와 B를 통과하고 있으므로 암반 C나 동굴의 투수계수 변화에 대해서 민감하지 않은 것은 당연하다고 볼 수 있다. 공극률에 의한 영향은 특정 암반층을 통과하는 지하수 유동시간은 그 암반층의 공극률에 비례하므로(상기 식 (6) 참조) 단순히 주어진 암반층에서의 유동시간을 새로운 공극률과 이전 공극률의 비로 축척하여 계산할 수 있음을 나타내고 있다.

한편 그림 3에서 알 수 있듯이 모델 우변의 해수측 경계 조건에 대한 정규민감도는 상부 경계면에서와 비교하여 상당히 낮은 값을 보이므로 지하수 유동모델의 해에 거의 영향이 없다고 볼 수 있으나 그 값이 (-)로 나온다는 것은 지하수 흐름이 없다고 보는 경우에 비해 지하수 유동 시간이 짧아짐을 의미하므로 우측 경계면에는 경계 조건을 부여하는 것이 약간 보수적이라고 할 수 있다(우측 경계 조건으로 지하수 흐름이 없다고 보는 경우의 지하수 유동 시간은 약 237년으로 계산된다).

처분장 부근에서의 지하수 유량의 불확실성을 추정하는 데 사용하기 위하여 최우측 처분동굴의 우측 중앙지점, 좌표 (-130, -100)에서의 투수계수에 대한 Darcy속도의 민감도와 그 지점에서의 지하수두의 민감도를 계산하여 표 2에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 Darcy 속도도 처분동굴이 위치한 암반 B에서의 투수계수의 변화에 대해 민감하며 바닥층의 투수계수 변화에 대해서는 실제로 민감하지 않음을 나타내고 있다. 그러나 선정된 지점에서의 지하수두의 민감도는 처분동굴이 위치한 암반 B의 투수계수 변화보다 암반 A의 투수계수 변화에 대해 높았다. 이는 처분장 산체의 지형조건이 처분동굴 근처의 압력에 미치는 영향이 클 수 있다. 한편 상기 두 경우 우측 경계면에서 해수의 밀도를 고려한 경계조건과 지하수 흐름이 없다고 가정한 경계조건에 대한 성능측도의 값의 차이는 미미하였다. 따라서 우측 경계조건을 부여하는 것이 보수적이기는 하나 본 가상 처분부지에서와 같이 처분동굴의 위치가 산정상 밑인 경우에 있어서는 큰 차이는 없다고 할 수 있다.

5. 결론

Adjoint법을 응용하고 있는 NAMMU 컴퓨터 프로그램을 사용하여 방사성폐기물 처분장에서 성능측도의 민감도 계산을 수행하였다. 민감도 분석은 지하수 유동 평가에서의 지하수 거동을 이해하고, 적합한 경계조건의 설정, 수리학적 입력인자의 중요성 평가 등의 고찰을 가능케 한다.

각 암반층의 투수계수 및 공극률의 변화와 지정된 경계조건을 변경함으로써 인한 방사성폐기물

처분장의 임의 구역을 지나는 지하수 유동시간, 유속과 수두에 미치는 민감도를 분석한 결과 고려된 가상 처분부지의 경우 큰 차이는 없으나 해수의 밀도를 고려한 경계조건을 사용하는 것이 해수에 접한 경계면에서는 지하수유동이 없다고 가정하는 경계조건보다 보수적임을 보여주었고, 투수계수 변경에 따른 지하수두 및 Darcy속도는 민감도를 보기 위해 설정된 지점에서의 투수계수 변화에 매우 민감하고 실제적으로 동굴에서 멀리 떨어진 바닥 암반층의 투수계수에는 민감하지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과들은 추후 방사성폐기물 처분장의 부지조사가 완료된 후 지하처분장의 안전성평가지 지하수 유동 모델링 및 성능측도의 불확실성 분석에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Sykes, J. F. et al., Water Resr. Res., Vol. 21, pp. 359-371 (1985).
2. Carrera, J and S. P. Neuman, Water Resour. Res., Vol. 22, pp. 211 - 227 (1986).
3. Rae, J., P. C. Robinson and L. M. Wizkens, "A User's Guide for the Program NAMMU 1. General Information", AERE-R 12120, UKAEA, UK (1981)
4. Bao, Y. B., "Sensitivity Analysis of Groundwater Flow", SKB 90-36 (1990).

표 1. 지하수 유동시간의 정규민감도 계산결과

입력인자 변경지역	지하수 유동시간의 정규민감도 (%)		
	x방향 투수계수(k_{xx})	y방향 투수계수(k_{yy})	공극률(ϕ)
암반 A	-2.2E-1*	-2.2E-2	+4.7E-1
암반 B	-6.2E-1	-1.3E-1	+5.3E-1
암반 C	-8.4E-4	-6.4E-4	0.0
동 굴	-4.1E-3	-5.9E-4	0.0

* -2.2E-1 = -2.2×10^{-1}

표 2. Darcy속도와 지하수두의 정규민감도 계산결과

입력인자 변경지역	Darcy속도의 정규민감도 (%)		지하수두의 정규민감도 (%)	
	x방향 투수계수(k_{xx})	y방향 투수계수(k_{yy})	x방향 투수계수(k_{xx})	y방향 투수계수(k_{yy})
암반 A	-2.3E-1	+3.6E-1	-1.2E-1	+1.7E-1
암반 B	+5.8E-1	+2.2E-1	-9.3E-2	+3.2E-2
암반 C	-2.1E-3	-7.6E-4	-9.1E-4	-1.7E-4
동 굴	+9.0E-2	-1.9E-2	+1.1E-2	-3.4E-4

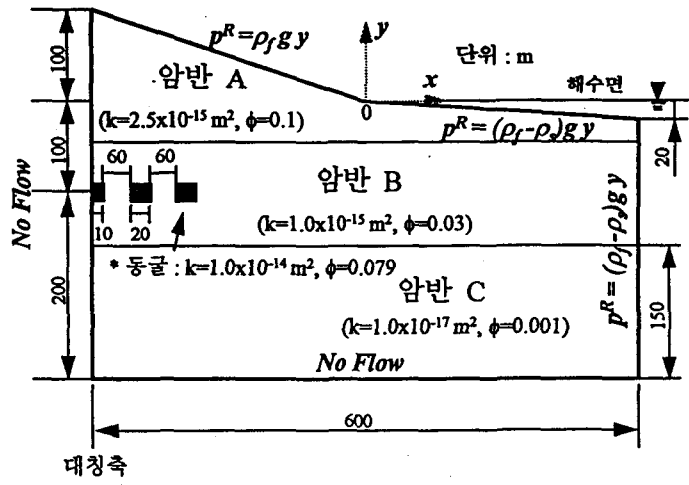


그림 1. 지형단면, 처분동굴의 위치 및 경계조건.

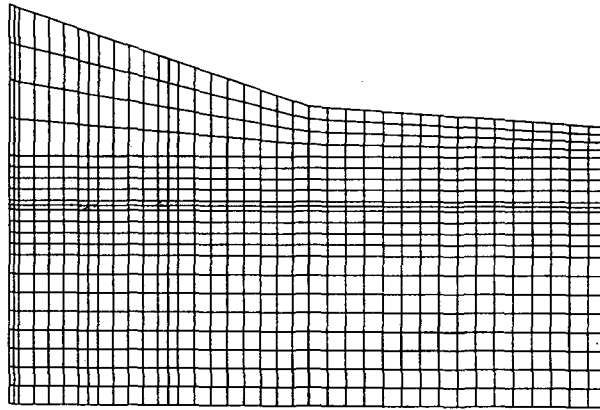


그림 2. 계산에 사용된 유한요소 그리드.

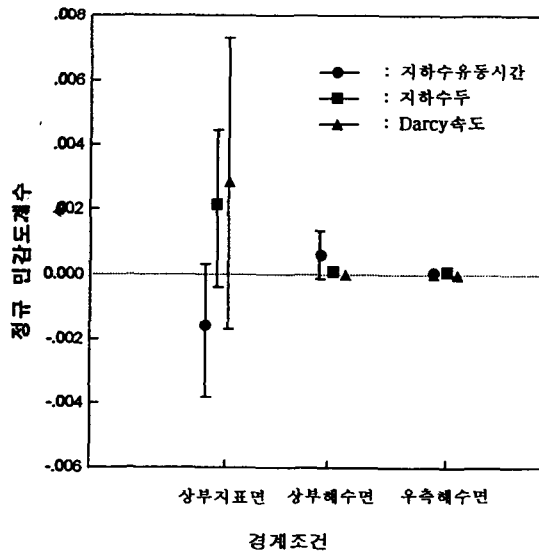


그림 3. 경계조건의 변경에 따른 경계면의 위치별 정규민감도 분포.