

도서 지하매질내 해수침입 예측: Ghyben-Herzberg 근사식의 한계

박주완, 최희주, 이명찬

한국원자력연구소

요 약

도서지역에서의 해수침입에 의한 해수-담수 경계면의 예측은 담수의 이용측면에서 뿐만 아니라 방사성폐기물 영구처분장과 같은 시설을 지하동굴을 이용하여 건설할 경우 설계개념의 설정 및 처분시설의 성능평가 측면에서도 중요한 사항이다. 해수침입의 예측에 널리 사용되어 온 Ghyben-Herzberg 근사식을 자연수위면의 경사가 급한 도서 지하매질에 적용할 경우 야기되는 문제점을 지적하고, 보다 신뢰성이 향상된 방법인 염분 이동식에 근거한 수치해를 이용하여 해수-담수 경계면을 예측하였다. 경사도가 다른 두 가지 가상 처분시스템에 대한 정상상태에서의 해수침입 해석 결과, Ghyben-Herzberg 근사식은 담수지역에서의 수직 수두구배가 작은 경우에만 적용되며 국내에서 방사성폐기물 처분부지로 고려하였던 굴업도와 같은 작은 도서의 지하매질에서의 해수-담수 경계면 예측시 오류를 범할 수 있으므로 단순 적용은 피해야 할 것으로 판단되었다.

1. 서 론

해안을 따라서 지하수계는 담수와 해수가 만나는 경계면이 존재하게 된다. 이 해수-담수 경계면의 예측은 담수의 이용 측면에서 뿐만 아니라 방사성폐기물 영구처분장과 같은 시설을 지하 동굴을 이용하여 건설할 경우 처분동굴의 위치와 심도 등 설계개념의 설정 및 처분시설의 성능평가 측면에서도 중요한 사항이다.

해수중에는 담수보다 높은 농도의 염분이 존재하고 있어 염분은 담수계로 확산 및 분산에 의한 이동을 하게 될 뿐만 아니라 밀도가 높아 밀도차에 따른 부력은 지하수의 이동을 야기하며, 해수의 침입이 이루어진다. 해수침입의 예측에는 Ghyben-Herzberg 근사식이 널리 이용되어 왔다. 이 근사식은 지하수압의 평형을 기본으로 유도된 식으로 대개 피압대수층(confined aquifer)에서 상당히 정확히 예측하는 것으로 Bear[1]는 언급하고 있으나, 국내에서 방사성폐기물 처분부지로 고려하였던 굴업도와 같은 작은 도서의 지하매질에서의 해수-담수 경계면 예측을 위해서는 적용에 신중을 기하여야 한다. 해수-담수 경계면 예측에 대한 신뢰성을 향상시키기 위한 방법으로는 sharp interface model과 염분이동 방정식을 이용하는 방법이 있다[2]. 본 논문에서는 해수침입의 예측방법에 대한 신뢰도 증대를 위해 염분 이동식에 근거한 수치해를 이용하여 가상 처분시스템에 대한 해수-담수 경계면을 예측하고 Ghyben-Herzberg 근사식을 자연수위면의 경사가 급한 작은 도서 지하매질내에서의 해수침입 예측에 적용할 경우 야기되는 문제점을 지적하였다.

2. 해수침입 예측모델

가. Ghyben-Herzberg 근사식

이 근사식은 Badon-Ghyben과 Herzberg에 의해 각각 독립적으로 발표된 것으로[1] 균질성 매질내에서 다음의 식으로 해수-담수면의 경계를 예측하고 있다.

$$z_s = \frac{\rho_f}{(\rho_s - \rho_f)} z_f \quad \text{----- (1)}$$

여기서 z_s : 해수면 하부의 담수층의 깊이[m], z_f : 해수면 상부의 지하수면의 높이[m],

ρ_s, ρ_f : 각각 해수와 담수의 밀도[kg/m³]

일반적인 값으로 $\rho_f=1000.0$ 와 $\rho_s=1025.0$ 에 대해서 다음의 식으로 근사적으로 예측된다.

$$z_s \approx 40 z_f \quad \text{----- (2)}$$

나. Sharp interface model

이 모델에서는 해수와 담수를 경계하는 면이 존재하고(담수와 해수가 서로 섞이지는 않는다) 각각의 영역에서 해수와 담수의 유동을 나타내는 식으로서 지하수의 흐름이 표시되며,

$$\nabla^2 \cdot h_f = 0 \quad \text{----- (3)}$$

$$\nabla^2 \cdot h_s = 0 \quad \text{----- (4)}$$

여기서 h_f : 담수지역에서의 수두[m], h_s : 해수지역에서의 수두[m]

경계면에서는 다음과 같은 경계조건이 존재한다.

(i) 경계면에서 압력은 연속이며,

(ii) 경계면을 따라 접선 방향으로의 해수와 담수의 지하수 유동 속도(v)는 서로 같다.

이 모델의 단점은 해수지역에서의 지하수유동을 충분히 정확하게 예측하지 못한다는 것이며, 따라서 해수지역에 처분장을 계획하고 있을 경우 이 모델의 이용은 곤란하다[2]. 그러나 해수침입 모델링이 밀도구배가 크지 않거나 처분장의 성능평가가 아닌 담수지역의 지하수 자원의 분석과 같은 경우에는 이 모델의 사용도 적절하다.

다. 지하수 유동-염분 이동 연계 해석 모델

해수-담수 경계면을 예측하는 또 다른 방법은 지하수 유동식과 염분 이동식을 함께 해석하는 것이다. 이 경우 해수-담수 경계면은 단일 면으로 표현되지 않고 분산항의 도입으로 인해 해수의 농도가 변화하고 있는 천이지역(transition zone)으로 표시된다. 지하수 유동식은 연속방정식과 Darcy의 법칙으로 표시되며, 염분이동은 분산 및 이류에 의해 이루어지며, 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$\mathbf{q} = \phi \mathbf{v} = - \frac{\mathbf{k}}{\mu} \nabla P^R \quad \text{----- (5)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho) + \nabla \cdot (\rho \phi \mathbf{v}) = 0 \quad \text{----- (6)}$$

$$\rho^{-1} = (1 - c_m)\rho_f^{-1} + c_m\rho_s^{-1} \quad \text{----- (7)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi\rho c_m) + \nabla \cdot (\rho\phi \mathbf{v} c_m) = \nabla \cdot (\rho\phi \mathbf{D} \cdot \nabla c_m) \quad \text{----- (8)}$$

여기서 q 는 Darcy 속도[m/sec], \mathbf{k} 는 투수계수[m²], μ 는 동점성계수 [kg m⁻¹ s⁻¹], ϕ 는 공극율 [-], P^R 는 지하수압 (= ρgh) [N/m²], \mathbf{v} 는 지하수 이동속도[m/sec], c_m 은 질량평균된 염분농도[-]를 나타내며, \mathbf{D} 는 수리학적 분산계수 [m²/sec]로서 그 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{ij} = \frac{D_m}{\tau} \delta_{ij} + a_T v \delta_{ij} + (a_L - a_T) \frac{v_i v_j}{v} \quad \text{----- (9)}$$

여기서 D_m 은 분자확산계수[m²/sec], τ 는 굴곡도(tortuosity factor)[-], v 는 \mathbf{v} 의 크기[m/sec], a_L , a_T 는 각각 종방향과 횡방향의 분산길이[m]를 나타낸다.

보통 Darcy법칙은 (5)식과 같은 형태이나 μ 와 ρ 를 농도의 함수로 놓아 밀도 변경시의 지하수 유동해석을 가능케 할 수 있으며 질량보존식은 일정농도인 경우에 해당되는 (6)식에서 ρ 를 (7)식과 같이 농도의 함수로 놓으면 된다. 한편 염분 이동식은 (8)식과 같으며 이러한 식들은 q 와 c_m 의 연계성때문에 비선형항을 포함하고 있어 수치적으로 풀기가 까다로우며 계산에 비용이 많이 소요되는 단점이 있다.

3. 가상 처분 시스템 해석모델 설정

해수침입을 고려한 지하수유동 해석모델은 처분장이 위치할 도서지역에 대하여 지형도상의 수직 2차원 단면 모델을 그림 1과 같이 구성하였다. 모델에 적용한 경계조건으로는 상부, 좌·우측 해수경계면에는 해수밀도를 고려한 깊이에 따른 압력을 지정하였고, 하부 바닥면에는 지하수의 흐름이 없다는 조건을 부여하였다. 해석에는 방사성폐기물 처분시설의 성능평가지 요구되는 대수층내로의 정상상태 해수침입 계산이 가능한 NAMMU 프로그램[4]이 사용되었고, 계산에 사용된 입력자료로서 각 물성치에 적용한 값은 표 1과 같다.

4. 계산 결과 : Ghyben-Herzberg 근사식과 염분 이동식의 비교

그림 1과 같은 해석모델에 대하여 염분 이동식을 적용하여 수치계산한 결과는 그림 2 및 3과 같다. 그림 2는 해수침입 후 시스템내의 압력 분포를 나타내며, 그림 3은 해수 농도의 분포와 지하수 이동 경로를 나타낸다. 그림 3에서는 해수-담수 경계면의 깊이가 대략 해수면 하부 400 m 정도에서 형성되는 것을 보여 주고 있으며, 처분동굴의 위치가 해수쪽 지하압반층에 위치하는 것이 처분장 성능평가의 측면에서는 유리함을 보여주고 있다(지하수 이동길이는 담수층에 처분동굴이 건설될 때와 비교하여 크게 길지는 않으나 지하수 유동시간은 거의 10배이상 길어짐). Ghyben-Herzberg 근사식에 의한 계산 결과는 상기 (2)식을 이과없이 적용하면 자인수위면의 높이차를 100 m로 가정했을 때 해수-담수 경계면의 깊이는 해수면 하부 약 4 km가 되어야 할 것이다. Ghyben-Herzberg 근사식은 담수지역에서 지하수압의 평형을 가정하므로 수두분포는 수직이며 따라서 이 지역에서의 유동은 수평유동이다. 본 가상 시스템의 경우 수두구배는 그림 2에

서와 같이 매우 경사가 급하고 여기서의 유동은 거의 수직유동이다. 이것은 담수지역에서의 수두강하가 매우 커지는 결과를 초래하며 따라서 경계면의 담수층에서의 수두는 더욱 더 감소하게 된다. 이는 해수-담수 경계의 깊이가 Ghyben-Herzberg 근사식에 의해 예측되는 것보다 훨씬 줄어듦을 의미한다. 그림 2에서 알 수 있듯이 경계에 근접한 담수지역에서의 수두는 약 10 m에 불과하며 이 수두값을 Ghyben-Herzberg 근사식에 적용하면 해수-담수 경계면의 깊이는 약 400 m 정도가 되어 대략 염분 이동식을 이용하여 예측된 값과 비슷하다. 결국 Ghyben-Herzberg 근사식은 담수지역에서의 수직 수두구배가 작은 경우에만 적용되는 것이며, 이는 도서지역의 경우 길이가 보다 길거나 높이가 훨씬 낮은 경우에 해당된다. 이러한 Ghyben-Herzberg 근사식의 한계를 보기 위한 방편으로 그림 1의 해석 모델에서 지하 매질의 깊이와 기타 입력자료들 그대로 두고 자연수위면의 경사도를 낮추고 모델의 길이를 늘린 경우(경사도를 약 60%에서 6%로 낮추었으며 따라서 모델의 길이가 약 10배 늘어났음)에 대한 지하수압 분포와 해수농도 분포를 그림 4와 5에 각각 나타내었다. 그림 5에 나타났듯이 해수-담수 경계면의 깊이는 해수면 하부 1000 m를 넘고 있으며 Ghyben-Herzberg 근사식에 의한 계산값에 보다 접근하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

도서 지하매질내에 처분장을 설치할 경우 해수 침입에 의한 해수-담수 경계면의 위치를 결정하기 위해 고전적 방법인 Ghyben-Herzberg 근사식에 의한 계산 결과와 지하수 유동-염분 이동식의 연계해석을 사용한 수치해석 결과를 비교하였다. 그 결과 지하수의 수직유동이 큰 지역에 대해 지형 및 지하수체계의 영향을 무시하고 Ghyben-Herzberg 근사식을 그대로 적용하는 것은 해수-담수 경계면 예측에 오류를 야기할 수 있으며, 도서지역의 경우 지하수문체계 조건은 길이가 길거나 높이가 훨씬 낮은 경우와 같이 지하수의 수평이동이 큰 지역에 대해서만 적용되는 한계를 가지고 있음이 확인되었다. 따라서 방사성폐기물의 영구처분을 위한 처분동굴을 도서지역의 지하매질에 설치하는 경우 처분장의 위치 및 심도와 같은 설계개념의 결정이나 성능평가시에는 지하수유동과 함께 염분이동을 연계하여 모델링하는 방법을 사용해야 할 것이며, 지하매질중 해수층에 위치한 처분장의 성능평가시에는 특히 그러하다고 할 수 있다.

참고문헌

1. J. Bear, *Hydraulics of Groundwater*, McGraw Hill (1979)
2. C.P. Jackson and C.L. Farmer, "Modelling Saline Intrusion for Repository Performance Assessment", NSS/R166 (1989)
3. A.W. Herbert, C.P. Jackson and D.A. Lever, "Coupled Groundwater Flow and Solute Transport with Fluid Density Strongly Dependent upon Concentration", *Water Res. Res.*, Vol. 24, pp. 1781-1795 (1988).
4. 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)

표 1. 계산에 사용된 물성치의 값

물성치	용어 정의	적용 값
μ	동점성계수	$8.904 \times 10^{-4} [\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}]$
g	중력가속도	$9.81 [\text{m s}^{-2}]$
ρ_f	담수 밀도	$997 [\text{kg m}^{-3}]$
ρ	해수 밀도	$1022.8 [\text{kg m}^{-3}]$
D_m	분자확산계수	$1.0 \times 10^{-8} [\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
α_L	종분산길이	$50 [\text{m}]$
α_T	횡분산길이	$5 [\text{m}]$

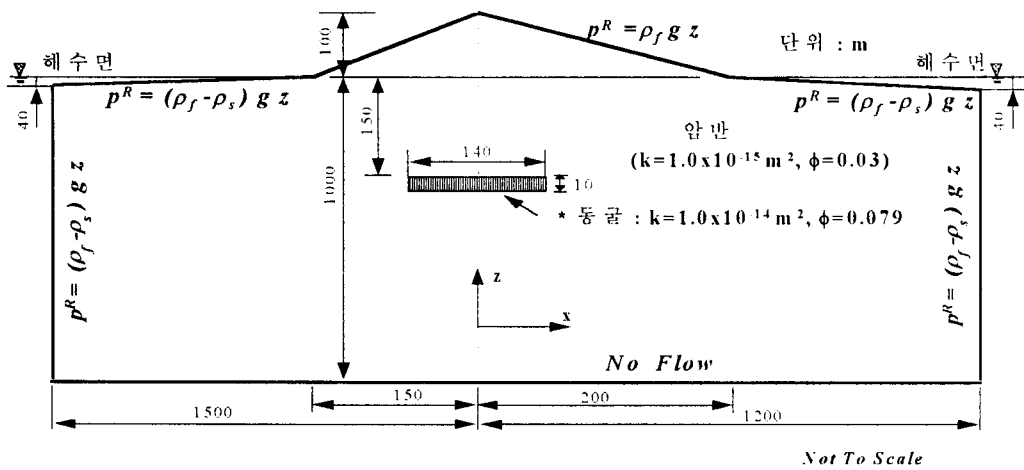


그림 1. 2차원 수직단면 지하수 유동해석 모델

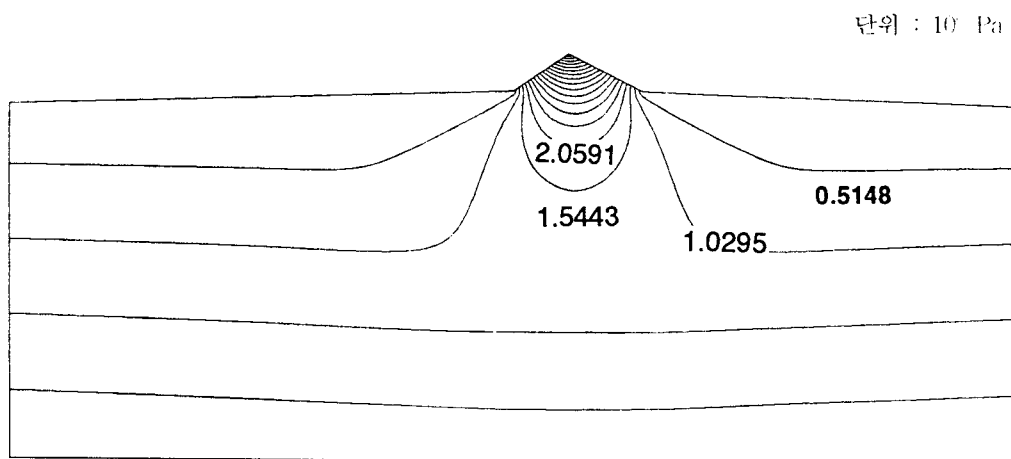


그림 2. 해수침입후의 지하수압 분포

(처분동굴의 위치 : 해수면 하부 150m 깊이, 자연수위면의 경사도 : 약 60 %인 경우)

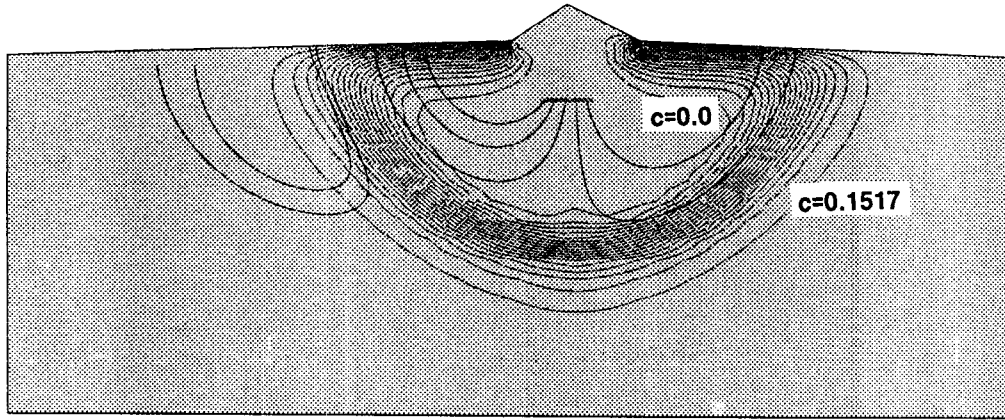


그림 3. 해수농도 분포 및 이동경로

(처분동굴의 위치 : 해수면 하부 150m 깊이, 자연수위면의 경사도 : 약 60 %인 경우)

단위 : 10^5 Pa

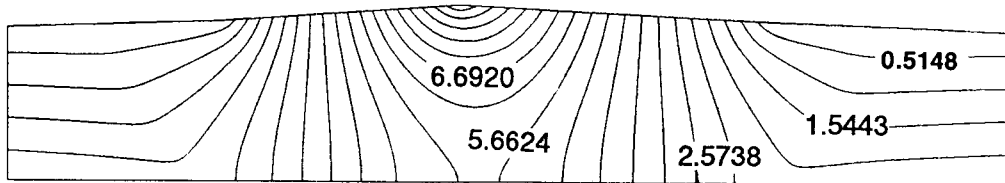


그림 4. 해수침입후의 지하수압 분포

(처분동굴의 위치 : 해수면 하부 150m 깊이, 자연수위면의 경사도 : 약 6 %인 경우)

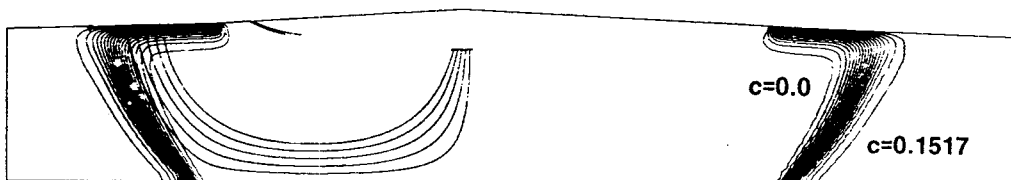


그림 5. 해수농도 분포 및 이동경로

(처분동굴의 위치 : 해수면 하부 150m 깊이, 자연수위면의 경사도 : 약 6 %인 경우)