

밀도차이에 따른 해안방조제 유출수량의 차이점 연구

박유철, 김강주*

강원대학교 자연과학대학 지구물리학과

*군산대학교 공과대학 토목환경공학부

parkyc@kangwon.ac.kr

요 약 문

해안방조제에서 해수가 강물에 유출되는 현상은 생태계의 변화를 초래하고 강물을 농업에 이용할 수 없게 한다. 이런 현상을 방지하기 위하여 해수의 유출수량을 예측할 필요가 있다. 해수와 강물 사이의 지하수 흐름은 염도에 따른 밀도의 차이를 고려하여 연구되어야 한다. 또한, 담수와 염수의 혼합에 따른 물질의 이송 및 분산도 고려하여야 한다. 본 연구에서는 염도에 의한 밀도 차이에 따른 지하수의 흐름을 나타내는 지배방정식을 이용하여, 해안방조제에서의 해수가 강물로 유출되는 현상을 수치모사하였다. 수치모사 결과, 밀도 차이를 고려하지 않았을 때 발견할 수 없었던 지하수의 흐름이 생겼고, 밀도 차이로 인하여 해수의 유출 수량이 증가하였다. 따라서, 해안방조제의 해수의 유출수량 연구에서는 반드시 밀도 차이를 고려하여야 한다.

key word : 지하수 흐름, 이송, 분산, 밀도 차이, 해안방조제, 해수의 유출수량

1. 서론

해안방조제를 통한 해수의 강물로의 유출은 강물의 염도를 증가시킨다. 특히 강물의 유속이 작은 경우에는 해수에 의한 침입으로 생태계의 변화를 초래하고, 강물을 농업용수로 사용하기 어렵게 한다. 현재 해안방조제에서의 유출량 계산은 염도 차이에 의한 밀도 차이를 고려하지 않고 수행되고 있다. 그러나, 해안방조제에서는 강물과 해수가 서로 만나므로, 밀도의 차이가 지하수의 유동 방향 및 유출량에 큰 영향을 끼치리라 예상된다.

염수와 담수가 만나는 지점에서의 지하수의 흐름은 주로 해안에서의 해수 침입과 관련하여 연구되어 왔다. 해수 침입 현상은 Dupuit의 가정을 사용하여 해석적으로 경계를 구하거나 (Henry, 1959), 염수와 담수 사이의 뚜렷한 경계를 가정하여 수치적으로 경계를 구하거나 (Sharnir and Dagan, 1971), 밀도 차이를 고려한 부정류 상태의 지하수 유동을 수치적으로 구하는 방향으로 연구되어 왔다 (Huyakorn, 1987).

본 연구에서는 밀도 차이에 의한 지하수의 흐름을 모사하고, 이를 바탕으로 해안방조제에서 유출수량을 계산하여, 기존의 밀도 차이를 고려하지 않은 경우와 차이를 비교 및 분석하였다.

2. 본론

해안방조제에서의 지하수의 흐름에 대한 지배방정식은 두 개의 편미분방정식으로 구성된다. 각각의 편미분방정식은 담수와 염수가 섞이는 것을 가정하여 밀도 차이에 의한 지하수 흐름에 대한 식과 지하수 흐름에 따른 염(salt)의 거동에 대한 식이다.

우선, 지하수의 밀도가 염도에 따라 변하는 경우에, 지하수 흐름의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{ij} \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} + \eta c e_j \right) \right] = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \phi \eta \frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\rho}{\rho_0} q$$

여기서, K_{ij} 는 수리전도도의 텐서이고, h 는 지하수의 수두를 담수의 수두로 치환한 것이며, $x_j(j=1, 2, 3)$ 직교좌표계를 나타낸다. η 는 밀도와 염도 사이의 비례 상수이며, c 는 염도이며, e_j 는 중력가속도를 나타내는 벡터이다. S_s 는 비저유계수이며, t 는 시간이고, ϕ 는 공극률이며, q 는 주입 또는 배출되는 지하수의 유량이다. 그리고, ρ 와 ρ_0 는 각각 지하수의 밀도와 담수의 밀도이다. 지하수의 수두 h 는 담수의 밀도를 기준으로 다음과 같이 계산된다.

$$h = \frac{p}{\rho_0 g} + z$$

여기서, p 는 압력 수두이고, g 는 중력가속도이며, z 는 위치 수두이다.

지하수의 밀도와 염도 사이의 비례상수 η 는 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{\epsilon}{c_s}$$

여기서, c_s 는 지하수의 최대 밀도 ρ_s 를 가질 때의 염도이다. 즉, 순수한 해수의 염도를 의미한다. ϵ 은 해수와 담수 사이의 밀도 차이의 비율을 의미하며 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0}$$

지하수의 밀도가 변하면 대수층의 수리전도도도 변하며, 다음과 같이 계산된다.

$$K_{ij} = \frac{k_{ij} \rho g}{\mu}$$

여기서 k_{ij} 는 대수층의 고유투수계수 텐서이며, 지하수의 점성도 μ 는 일반적으로 염도에 많은 영향을 받지 않는다. 지하수의 밀도는 염도에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\rho = \rho_0 (1 + \epsilon c / c_0)$$

다음으로, 염수와 담수가 서로 만나게 되어 위의 지배 방정식에 따라 흐르게 되면, 염수와 담수의 혼합이 생기고, 지하수의 염도가 변한다. 이를 지하수 내의 물질 거동 방정식으로 표현하면, 다음과 같은 이송과 분산을 포함하는 편비분방정식이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - V_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = \phi \frac{\partial c}{\partial t} + q(c - c^*)$$

여기서, $D_{ij} = \phi \tilde{D}_{ij}$ 이고, \tilde{D}_{ij} 는 분산 텐서이다. V_i 는 Darcy 속도이며, c^* 는 주입 또는 배출되는 염수의 농도이다. 대수층 내의 Darcy의 속도는 다음과 같이 주어진다.

$$V_i = -K_{ij}^0 \left[\frac{\partial h}{\partial x_j} + \eta c e_j \right]$$

여기서, K_{ij}^0 는 대수층에서 담수가 흐를 때의 수리전도도 텐서이다.

유한요소법을 사용하여 지하수 흐름 방정식과 물질의 이송-분산식을 행렬식으로 정리할 수 있다. 먼저, 지하수 흐름 방정식을 정리하였다.

$$A_{IJ} h_J + B_{IJ} \frac{dh_J}{dt} = F_I, \quad I=1, 2, \dots, n$$

여기서, I, J 는 노드 번호이고, h_J 는 수두값이고, n 은 전체 절점의 개수이며, A_{IJ}, B_{IJ}, F_I 는 다음

과 같다.

$$A_{ij} = \sum_e A_{ij}^e = \sum_e \int_{R^e} K_{ij} \frac{\partial N_I}{\partial x_i} \frac{\partial N_J}{\partial x_j} dR$$

$$B_{IJ} = \sum_e B_{IJ}^e = \sum_e \int_{R^e} S_s N_I N_J dR$$

$$F_I = \sum_e F_I^e = \sum_e \left[\int_{B^e} N_I \frac{\rho_0}{\rho} V_m dB + \int_{R^e} N_I \frac{\rho}{\rho_0} q dR - \int_{R^e} \left(\eta K_{ij} N_J c_J \frac{\partial N_I}{\partial x_i} e_j + \phi \eta - N_I N_J \frac{dc_I}{dt} \right) dR \right]$$

여기서, R^e 는 요소 공간이고, B^e 는 요소 공간의 경계이다. N_I 와 c_J 는 각각 요소 공간내의 기저함수와 절점에서의 염도이다.

다음으로, 물질의 이송-분산식은 다음과 같이 정리된다.

$$E_{IJ} c_J + \tilde{B}_{IJ} \frac{dc_I}{dt} = \tilde{F}_I, \quad I=1, 2, \dots, n$$

여기서,

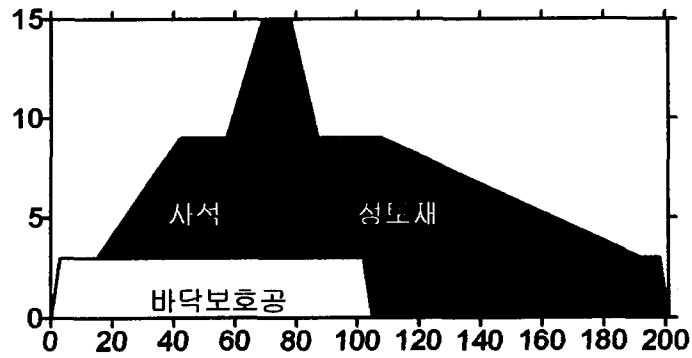
$$E_{IJ} = \sum_e E_{IJ}^e = \sum_e \int_{R^e} \left(D_{ij} \frac{\partial N_I}{\partial x_i} \frac{\partial N_J}{\partial x_j} + V_i N_I \frac{\partial N_J}{\partial x_i} \right) dR$$

$$\tilde{B}_{IJ} = \sum_e \tilde{B}_{ij}^e = \sum_e \int_{R^e} \phi N_I N_J dR$$

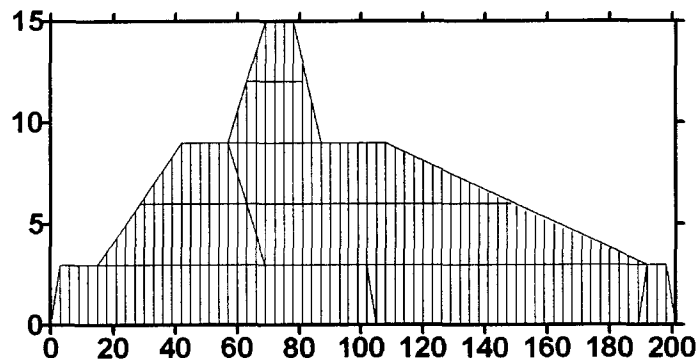
$$\tilde{F}_I = \sum_e \tilde{F}_I^e = \sum_e \left[\int_{R^e} N_I q (c^* - N_J c_J) dR + \int_{B^e} N_I \left(D_{ij} \frac{\partial \hat{c}}{\partial x_j} \right) n_i dB \right]$$

일반적으로 방조제와 같은 자유면 대수층에서의 지하수의 흐름은 자유면 경계 조건 (moving boundary condition)을 가진다. 이러한 자유면 경계조건은 그 경계면의 위치를 미리 알 수 없으므로 일반적인 유한요소법으로 모사하기 어렵다. 현재 사용되고 있는 댐에서의 자유면 경계조건 모사 프로그램은 지하수가 포화되어 있는 공간과 불포화되어 있는 공간을 함께 고려하는 방식이다. 그러나, 이러한 방식은 계산이 오래 걸리고, 수치계산을 위해서 기억 공간을 많이 요구하여 실용성이 떨어진다. 본 연구에서는 자유면 경계 조건을 고려한 향상된 유한요소법을 사용하여, 계산 공간을 적게 사용했고 계산 시간이 적게 걸렸다.

본 연구에서는 새만금 방조제의 기본 설계도를 기준으로 수치 모델을 구성하였다. <그림 1>은 본 연구에서 사용된 방조제의 모식도이다. 해안방조제의 각 부분은 구성 물질이 다르므로 서로 다른 수리전도도를 가진다. 연구에 사용된 수리전도도는 사석은 $K = 364.6$ m/day, 성토제는 $K = 6.912$ m/day, 그리고 바닥보호층은 $K = 5.421$ m/day의 입력자료를 사용하였다. 계산에 사용된 요소망은 <그림 2>에 도시하였다. <그림 2>는 수직적으로 과장하였으므로 요소의 모양이 일그러져보이나, 실제로는 직각삼각형과 정사각형에 가까운 모양이다. <그림 2>의 요소망은 배경 요소망이고 이를 바탕으로 새로운 요소망을 형성되었다. 해안방조제의 해수와 강물의 높이는 새만금 지역의 평균 해수면과 강물의 높이에 기초하여 설정하였다.



<그림 1> 방조제 내부의 구성



<그림 2> 방조제의 유한요소망

3. 결론

본 연구에서는 해수와 강물의 높이가 같은 경우와 해수가 강물보다 높은 경우에 대하여 수치모사 하였다. 해수와 강물의 높이가 같은 경우에는 지하수가 해수 쪽에서 강물 쪽으로 지하수의 흐름이 관찰된다. 만일, 밀도 차이를 고려하지 않는다고 수치모사를 행하면, 해수 쪽에서 강물 쪽으로의 지하수 흐름은 나타나지 않는다. 해수가 강물보다 높은 경우에는, 밀도 차이를 고려하였을 경우의 유출수량이 밀도 차이를 고려하지 않았을 경우보다 18% 증가하였다. 따라서, 해안방조제에서 지하수의 흐름을 모사하는 경우에는 반드시 밀도차이에 의한 효과를 고려하여야 한다.

4. 참고문헌

- Henry, H.R., Salt intrusion into freshwater aquifers, *Journal of Geophysics Research*, 64, 1911-1919, 1959.
- Huyakorn, P.S., and P.F. Andersen, J.W. Mercer, and H.O. White, Jr., Saltwater intrusion in aquifers: Development and Testing of a Three-Dimensional Finite Element Model, *Water Resources Research*, 23(2), 293-312, 1987.
- Shamir, V., and G. Dagan, Motion of the seawater interface in coastal aquifers: A numerical solution, *Water Resources Research*, 7(3), 644-657, 1971.