한국지하수토양환경학회 춘계학술대회
2002년 4월 12-13일 서울시립대학교

불포화 층상 해안 대수층 내에서의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 유한 요소 모델링

정병주 · 김준모
서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부
junmokim@snu.ac.kr

요 약 문

불포화 층상 해안 대수층 내에서의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 연구를 위해 하나의 지하수 유동-용질 이동 연동 수치 모델이 제시되었다. 이 수치 모델은 밀도 의존적 지하수 유동 지배 방정식, 염분 이동 지배 방정식 및 농도와 밀도의 관계식, 그리고 유한 요소법에 기초하여 개발되었다. 서로 다른 두가지 성질의 불포화 대수층이 고려되었다. 하나는 사질토층 위에 점토층이 존재하는 층상 대수층이고, 다른 하나는 사질토층과 점토층이 혼합된 두가지 물질로 구성된 균질화된 대수층이다. 수치모델의 결과는 층상 불균질성 (layered heterogeneity)가 해안 대수층 내에서의 밀도의존적 지하수 유동과 염분 이동에 있어서 매우 중요한 역할을 하고 있음을 보여준다. 그러한 층상 불균질성의 효과는 사질토층과 점토층과의 현저한 수리학적 및 수리역학적 성질의 차이에 기인한다. 따라서 실제 해안 대수층 내에서 관찰되는 점토층을 적절히 고려하는 것이 보다 합리적고 타당한 해안 대수층내에서의 밀도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동 해석을 가능하게 할 것이다.

---

key word : 불포화, 해안 대수층, 연동 수치 모델, 지하수 유동, 염분 이동

1. 서론

해안선 부근에서 해수가 대수층을 따라 담수 지하수계로 침입하는 현상을 해수침투 (seawater intrusion)라고 한다. 이 현상은 자연적인 요인과 인위적인 요인에 의해 지역마다 그 차이가 발생한다. 자연적인 요인에는 강우량 및 증발산량 변화와 그에 수반되는 지하수면의 변화, 조석차에 의한 해수면 변화, 해수와 담수간의 밀도차와 같은 것이 있으며, 대수층을 구성하는 지질매체의 특성 즉 대수층의 투수성이나 단층 파쇄대의 공간적 분포등이 영향을 미친다. 최근에는 또한 임해지역에서의 무분별한 지하수 개발등의 인위적인 요인에 의하여 해수침투 현상이 내륙으로 확산되고 있다. 이중 해수침투 양상의 변화를 초래하는 자연적인 요인중 가장 중요하다고 생각되는 것은 해안 대수층의 특성에 따른 변화로 이러한 문제에 대한 수치학적 이해는 염수화로 인한 피해를 줄이고, 앞으로의 상황을 예측하는데 꼭 필요한 단계가 될 것이다.

이번 연구는 불포화 층상 해안 대수층 내에서의 밀도의존적 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 유한 요소법 (finite element method)를 이용한 모델링이며, 대수층 매질차에 의한 해수침투 양상 변화에 대한 이해를 명확히 하기 위해 점토-사질토 두 개의 층으로 구성된 대수층과 점토와 사질토를 혼합한 대수층의 모형을 가정하고 각각의 경우에 대해 지하수위 변화와 염분 농도 변화를 비교 분석하였다.

2. 본론

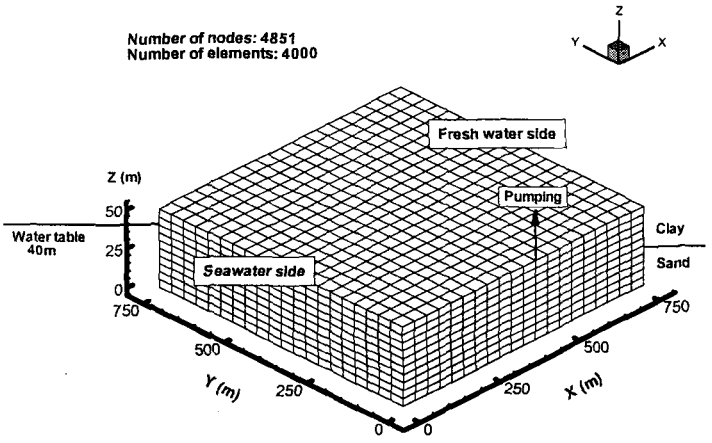

Figure 1. Finite element mesh used in the numerical simulation.

포화-불포화 지질매체 내의 지하수 유동과 염분이동에 대한 지배식을 풀기 위해 3DFEMFAT (Yeh, 1985)를 사용하였으며, 이는 염분 변화에 따른 지하수의 밀도 변화를 고려하여 다시 지하수 유동에 반영할 수 있는 연동 수치 모델(coupled flow-transport model) 로서 해수침투와 같은 현상에 적용이 용이하다. 해수침투는 밀도의존적 지하수 유동 지배 방정식(density-dependent flow equation)과 질량 보존의 법칙에 기반한 염분 이동 지배 방정식(solute transport equation), 그리고 밀도와 농도의 관계식으로 설명할 수 있다(Galeati et al., 1992). Figure 1은 모델링에 사용된 유한 요소 망은 3차원으로서 21×21×11=4851 개의 절점과 20×20×10=4000 개의 요소로 구성되어 있으며, 초기 지하수위는 -10m로 설정하였다. 불포화대에 대한 함수도(water content)와 수리전도도(hydraulic conductivity)의 관계와 각각의 매질에 대한 실험값은 van Genuchten의 모델(van Genuchten, 1980)에서 참고하였다. 층상 대수층(layered aquifer) 모형은 각각 하부에 25m의 사질토층과 상부에 25m의 점토층으로 구성했으며, 균질화 대수층(lumped aquifer) 모형은 20%의 점토와 80%의 사질토가 균질하게 섞인 것으로 가정하였다. 시간은 1개월 간격으로 5년간 시뮬레이션 한 것으로 설정하고, 도메인의 왼쪽 면 375m지점에 인공적 양수의 효과를 가정한 양수정을 설치하였으며, 전체 시뮬레이션 시간동안 -30m의 일정한 수위를 유지하도록 양수하였다. Table 1은 모델링에 사용된 각각 2가지 대수층 모형에 대한 수리상수 및 물성치를 나타낸 것이다.

Table 1.
Material properties of the layered and lumped coastal aquifer systems

Property	Layered aquifer		Lumped aquifer
	Sand	Clay	
Porosity, n	0.44	0.66	0.48
Saturated hydraulic conductivity, Ksat (ms^{-1})	9.06×10^{-4}	2.29×10^{-6}	7.25×10^{-4}
Solid density, ρ_s (kgm^{-3})	2.65×10^{3}	2.80×10^{3}	2.68×10^{3}
Irreducible water content, θ_r	6.69×10^{-2}	5.00×10^{-5}	5.86×10^{-2}
Unsaturated hydraulic parameters			
α_v (m^{-1})	9.127	1.352	7.572
n_v (dimensionless)	4.27	1.20	3.66
Longitudinal dispersity, α_L (m)	10.0	10.0	10.0
Lateral dispersity, α_T (m)	1.0	1.0	1.0
Tortuosity, τ (dimensionless)	0.4	0.4	0.4

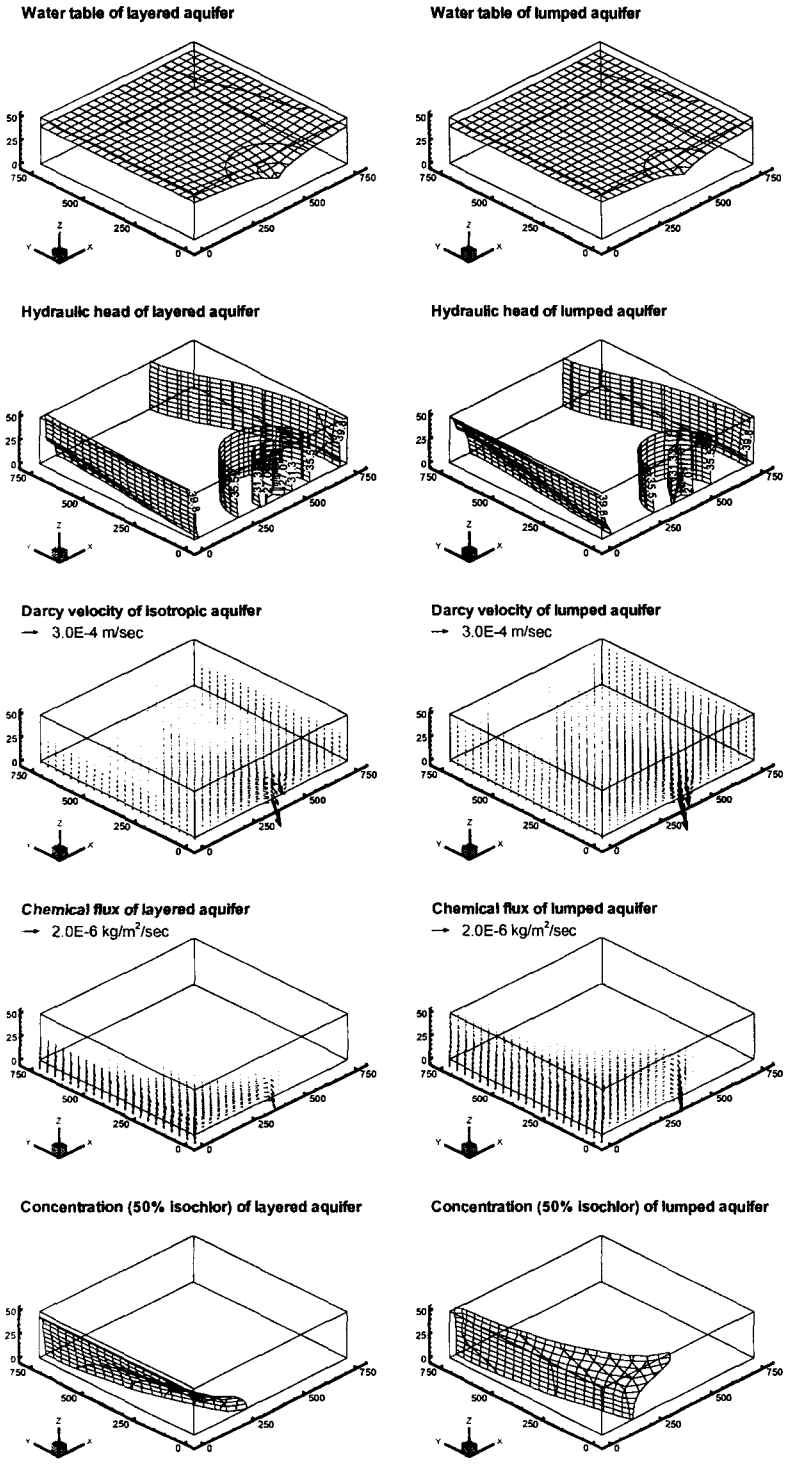

Figure 2. Comparison of Layered aquifer and Lumped aquifer after 1 month.

3. 결론

Figure 2는 지하수 양수 시작 1달 후 층상 대수층과 균질화 대수층 각각의 지하수면과 수리수두변화, 지하수 이동 속도, 염분 이동 속도 및 농도의 분포를 표시한 것이다. 지하수면은 두가지 대수층 모두 양수로 인한 수위변화를 반영하고 있으며, 그 정도의 차이는 심하지 않은 것으로 보인다. 그러나 수리수두 분포에서 나타나듯 양수정 가까이의 등위면이 균질화 대수층에서 층상 대수층보다 간격이 좁아진 것을 볼 때 양수정 근처의 지하수 속도가 층상 대수층의 경우가 보다 강화되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 지하수 유속과 염분 이동 속도는 각각 층상 대수층과 균질화 대수층 사이의 매질의 특성을 잘 반영하고 있다. 층상 대수층의 위층을 구성하는 투수도가 낮은 점토y의 영향으로 점토층 내에서의 지하수 유속과 염분 이동 속도의 크기는 급격히 약화되어 있는 양상을 보이며, 대부분 사질토층으로의 지하수와 염분의 이동이 있을 뿐이다. 총 해수 염분농도의 50%에 해당하는 농도 등분포면 (concentration isochlor)의 모양을 보면 층상 대수층과 균질화 대수층 사이의 차이점을 보다 잘 관찰할 수 있다. 층상 대수층의 경우는 상부의 투수도가 낮은 점토층으로 인해 하부의 사질토층으로 염분이 이동하는 모습을 모이지만, 균질화 대수층의 경우에는 오히려 초기의 염분 이동 속도가 하부보다는 상부

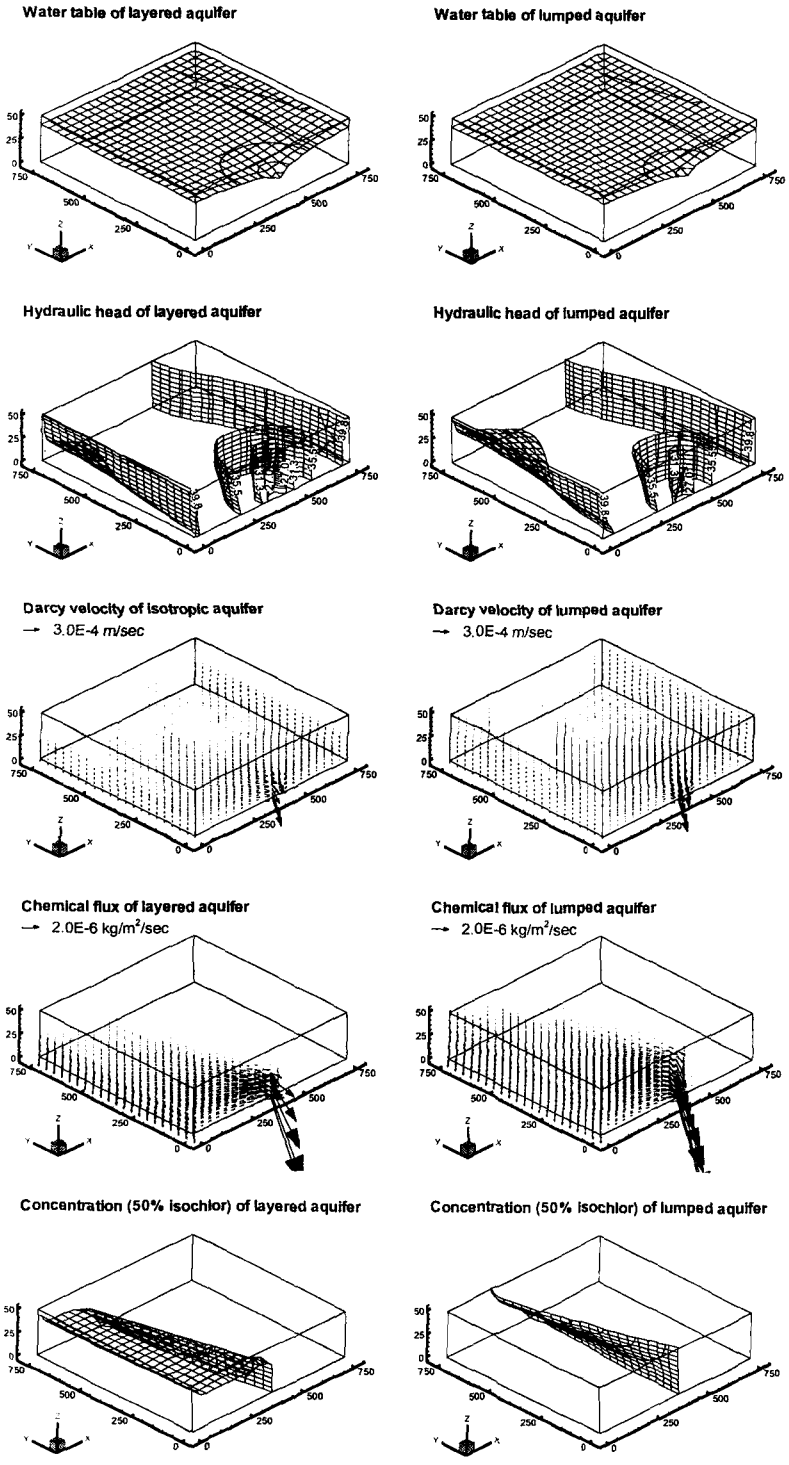

Figure 3. Comparison of Layered aquifer and Lumped aquifer after 5 years.

관찰되는 점토층을 적절히 고려하는 것이 보다 합리적이고 타당한 도 의존적 지하수 유동 및 염분 이동해석을 가능하게 할 것이다.

가 빠른 현상이 관찰된다. 이는 균질화 대수층이라 할지라도 점토층 보다는 수리전도도가 200배 이상 높고, 양수에 의한 수위 강하의 영향이 양수정과 가까운 곳의 상부부터 미치게 되므로 양수초기의 염분 이동 속도가 하부보다는 상부가 빠르게 나타나는 것으로 보인다.

Figure 3은 양수후 5년이 지난 후 층상 대수층과 혼합 대수층 각각의 지하수면과 수리수두 변화, 지하수 이동 속도, 염분 이동 속도 및 농도의 분포를 도시한 것이다. 대수층 모두에서 지하수면 하강과 더불어 염분 이동 속도의 크기가 급격히 증가하였다. 또한 양수정 위치를 넘어선 지역까지도 염분 이동이 있었으며, 이는 주로 분산효과에 의한 것으로 생각된다. 농도 등분포면의 모양은 거의 해안선에 수평으로 방향이 바뀌었으며, 최종적인 농도 분포면의 모양은 각각 층상 대수층과 혼합 대수층에서 현저히 다른 양상으로 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 결과에 근거한다면, 실제 해안 대수층 내에서 해안 대수층 내에서의 밀

4. 참고문헌

1. Yeh, G. T., 3DFEMFAT User's manual of a 3-dimensional finite element model of density-dependent flow and transport through saturated-unsaturated media, pp. 199, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, 1995.

2. van Genuchten, M. Th., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. of Am. J., 44, pp. 892-898, 1980.

3. Galeati, G., G. Gambolati, S. P. Neuman, Coupled and partially coupled Eulerian-Lagrangian model of freshwater-seawater mixing, Water Res. Res., 28, pp. 149-165, 1992.