

부안 지역 해안 대수층 내에서의 지하수 유동 및 염분 이동 삼차원 수치 모델링

김중휘 · 김준모

서울대학교 지구환경과학부
jung0209@engeo.snu.ac.kr

요 약 문

본 연구의 대상 지역은 전라북도 부안군 변산면 격포리 일대이다. 이 지역의 해안 대수층 내에서 발생하고 있는 해수 침투 현상을 효과적으로 모사하고 지하수 양수정의 설치 및 운영의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 지형과 지층의 구성 등의 수리지질학적 특성을 종합적으로 고려한 지하수 유동 및 염분 이동 삼차원 수치 모델링을 수행하였다. 지하수 양수 전의 정상 상태 수치 모델링 결과에서는 지하수 유동 및 염분 이동의 측면에서 대상지역의 수리지질학적 특성이 잘 반영되어 나타났다. 또한 지하수 양수 시의 비정상 상태 수치 모델링 결과에서는 지형과 지층의 특성에 따라서 염분 이동의 양상이 특징적으로 나타났으며 양수정의 위치에 따른 염분 농도의 시간적·공간적 분포의 변화를 효과적으로 예측할 수 있었다. 이러한 결과들은 향후 연구지역 뿐만 아니라 국내의 다른 해안 지역에서 지하수 자원의 개발 시에 해수 침투의 양상을 파악하고 예측하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key words : 해안 대수층, 해수 침투, 지하수 유동, 염분 이동, 삼차원 수치 모델링

1. 서론

해안 지역 대수층 내에서 염수인 해수가 담수인 지하수계로 침입하는 현상을 해수 침투라고 한다(Bear et al., 1999; Cheng and Ouazar, 2003). 이러한 해수 침투 현상은 해안 지역의 지하수 자원 고갈 및 염수화의 직접적인 원인이 되며 지하수 양수나 지하 공간의 개발 등의 인위적인 요인에 의하여 심화되기도 한다. 따라서 해안 지역에서의 지하수 자원의 효과적인 개발을 위해서는 대상 지역의 수리지질학적 특성을 종합적으로 고려하고 모사할 수 있는 수리동역학적 분산 수치 모델을 활용하는 것이 필요하다.

이 연구의 목적은 연구 지역의 지형과 지층의 구성 등의 수리지질학적 특성을 종합적으로 고려한 삼차원 수치 모델링을 수행하여 해수 침투 현상을 정량적으로 모사하고 이를 바탕으로 지하수 양수정의 설치 및 운영에 따른 수리지질학적 및 수리동역학적 변화를 정량적으로 예측하는 것이다. 이를 위하여 수리동역학적 분산 수치 모델인 COFAT3D(Kim and Yeh, 2004)를 이용하여 전라북도 부안군 변산면 격포리 일대 해안 대수층 내에서의 지하수 유동 및 염분 이동 삼차원 수치 모델링을 수행하였다.

2. 본론

2.1. 수치 모델링 개요

연구 지역은 전라북도 부안군 변산면 격포리 일대이다. 이 지역은 서쪽과 서북쪽으로 바다와 접하고 중앙에는 층적층으로 피복된 평지가 분포하며 그 주변은 50~150 m 내외의 산지가 분포한다. 수치 지도로부터 추출된 고도값을 활용하여 이러한 지형의 특징을 모델에 적용하였다. 지층의 분포는 하부로부터 크게 기반암, 풍화대, 토양의 3가지 층을 고려하였고 현장 자료로부터 이들 지층의 수직적 분포를 파악하여 모델에 적용하였다. 수치 모델링 영역은 주변 산지의 능선과 해안선을 경계로 설정되었으며 그림 1과 같이 15250개의 절점과 12915개의 육면체 요소로 이산화되었다. 세 지층은 수직적으로 나뉘어 졌으며 각 지층의 물성은 표 1에 정리되어 있다.

표 1. 수치 모델링에 사용된 지층의 물성치 값.

Properties	Symbol	Unit	Soil	Weathered zone	Tuff
Porosity	n	Dimensionless	0.43	0.19	0.13
Hydraulic conductivity	K	m/sec	2.88×10^{-6}	2.10×10^{-7}	1.24×10^{-9}
Bulk density	ρ_b	kg/m ³	2.66×10^3	2.65×10^3	2.64×10^3
Longitudinal dispersivity	α_L	m	81.36	35.95	24.60
Lateral dispersivity	α_T	m	0.814	0.359	0.246
Modified compressibility of medium	α'	1/m	5.65×10^{-8}	5.10×10^{-10}	3.30×10^{-10}
Modified compressibility of water	β'	1/m		4.31×10^{-6}	
Tortuosity	τ	Dimensionless		0.41	
Molecular diffusion coefficient	D_m	m ² /sec		1.68×10^{-9}	
Density difference ratio	ε	Dimensionless		0.0245	

모델의 경계 조건은 바닥과 산지의 능선을 따라 설정된 측면에 대해서는 지하수 유동과 염분 이동에 대하여 각각 no flow와 no flux 경계를 지정하였다. 해안쪽 측면에는 지하수 유동에 대해서는 해수면($z = 0$ m)에서 수리수두가 0 m이고 하부로 내려갈수록 해수의 농도를 고려하여 증가하는 수리수두 값을 지정하였다. 염분 이동에 대해서는 최상부의 1개 요소의 면에 대하여 염분이 지하수의 유동을 따라 이동은 가능하지만 분산은 일어나지 않도록 Neumann boundary를 적용하고 그 값을 0으로 지정하였으며 그 하부로는 표준화 염분 농도를 1.0으로 고정하였다. 지표면에 대해서는 최대 압력수두 0 m, 최소 압력수두 -300 m 를 가지는 variable boundary를 적용하였고 강수량은 연구지역에 인접한 군산관측소에서 측정한 연평균 강수량(한국기상청, 1971-2000)의 20%인 241.82 mm/year를 지정하였다.

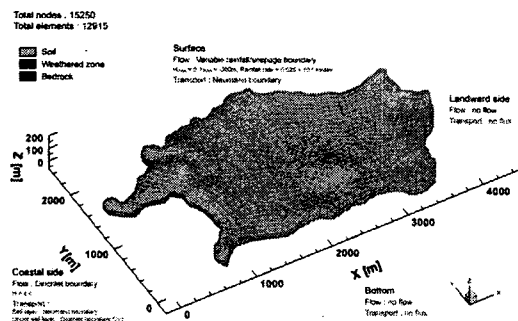


그림 1. 수치 모델링에 사용된 유한 요소망.

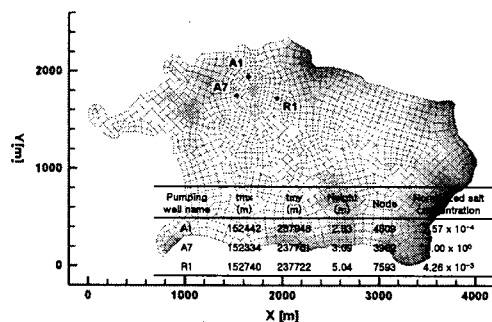


그림 2. 지하수 양수정의 위치.

본 연구에서는 먼저 정상 상태 수치 모델링을 통하여 지하수 양수 이전의 연구 지역의 해수 침투 현상을 모사하였고 이 결과를 초기 조건으로 하여 비정상 상태 수치 모델링을 수행하여 양수정의 설치 및 운영에 따른 해수 침투 양상을 예측하였다. 정상 상태 및 비정상 상태 수치 모델링 모두에서 같은 모델 영역과 유한요소망, 경계조건, 물성값을 사용하였다. 한편 비정상 상태 수치

모델링에서는 297 개의 시간 구간에 걸쳐서 0일 부터 950000일(2603년)을 모델링 하였다. 현장의 양수정들 중에서 그 위치를 고려하여 3개의 양수정을 선택하였고 각각의 관정명은 A1, A7, R1 이다 (그림 2). 각 관정에 대하여 충적층 및 풍화대의 중간에 해당하는 절점에서 양수를 실시하였고 양수량은 50 ton/day로 지정하였다.

2.2. 지하수 양수 전의 정상 상태 수치 모델링 결과

지하수 양수 전의 정상 상태에 대한 수치 모델링의 결과는 그림 3에 도시되어 있다. 압력수두는 주로 지형을 따라 분포하며 골짜기와 평지지역에서 삼출면을 형성하고 있다. 또한 수리수두 분포의 경우 평지와 산지의 지형기복의 영향이 매우 잘 드러나며 지하수 유동 속도 분포에서는 전체적으로 주변의 산지에서 중앙의 평지로 유입되는 양상을 매우 잘 보여주고 있다. 한편 표준화 염분 농도의 공간적 분포에서는 전체적으로 남서쪽의 해안과 접한 평지지역을 중심으로 해수가 침투한 양상을 보여주며 북쪽의 해안에서 가까운 평지지역에도 약간의 해수 침투 현상이 나타나고 있다.

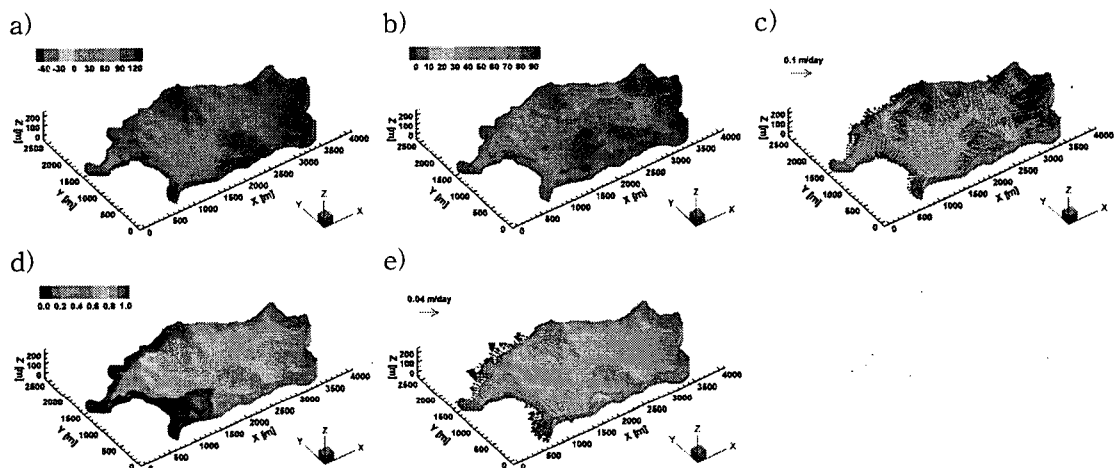


그림 3. 정상상태 수치 모델링 결과, a) 압력수두 분포 [m], b) 수리수두 분포 [m], c) 지하수 유동속도 분포 [m/day], d) 표준화 염분 농도 분포, e) 표준화 염분 이동 속도 분포 [m/day].

2.3. 지하수 양수 시의 비정상 상태 수치 모델링 결과

지하수 양수 시의 비정상 상태 수치 모델링 결과는 그림 4에 도시되어 있다. 염분농도의 이동은 전반적으로 북쪽의 낮은 언덕지역을 중심으로 이루어지며 아래쪽 평지에 들어와 있는 염분농도 역시 북쪽으로 이동하여 평지에서 연결되는 양상을 보이고 있다.

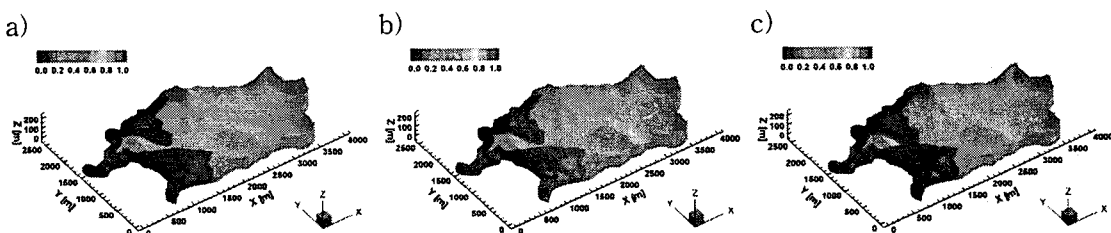


그림 4. 양수 시작 후 950000일 이후의 표준화 염분 농도 분포. a) A1 관정 양수 경우, b) A7 관정 양수 경우, c) R1 관정 양수 경우.

특히 염분의 이동은 수리전도도와 염분의 분산계수가 상대적으로 높은 상부의 풍화대와 토양에서 주로 이루어지며 시간이 지남에 따라 밀도차에 의한 영향으로 하부의 기반암으로 확장되는 특징을 보여준다. 또한 A1 관정 양수시와 A7 관정 양수시에는 표준화 염분 농도 0.1인 면이 평지쪽으로 확장되고 각각 양수정이 있는 방향으로 약간 더 길게 확장되지만 R1 관정 양수시에는 다른 두 경우에 비하여 좀 더 안쪽까지 염분 농도가 확장되지만 관정 주변까지는 확장되지 않는다. 각 양수정에서 시간에 따른 표준화 염분 농도의 변화를 보면 A1, A7의 경우 점차적으로 증가하여 0.1에 가까운 값을 가지는 반면 해수의 침투가 가장 안쪽 평지까지 나타나는 R1 관정에서는 오히려 농도가 거의 증가하지 않는 양상을 보이고 있다 (그림 5).

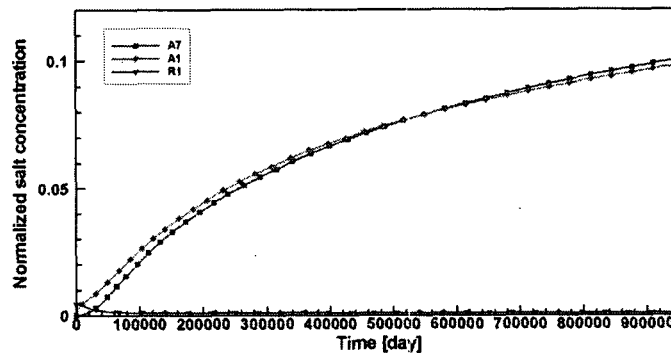


그림 5. 각 관정에서 시간에 따른 표준화 염분 농도의 변화.

3. 결론

연구지역인 전라북도 부안군 변산면 격포리 일대에 분포하는 해안 대수층 내에서의 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 삼차원 수치 모델링을 수행하였다. 먼저 정상 상태 수치 모델링 결과에서는 지하수 유동 및 염분 이동의 측면에서 현장의 지형과 지층의 구성 등의 전반적인 수리지질학적 특성이 잘 반영되어 나타났다. 그리고 지하수 양수 시의 비정상 상태 수치 모델링 결과에서는 지형과 지층의 특성에 따라서 염분 이동의 양상이 특징적으로 나타났으며 양수정의 위치에 따른 염분 농도의 시간적·공간적 분포의 변화를 효과적으로 예측할 수 있었다. 이러한 결과들은 향후 연구지역 뿐만 아니라 국내의 다른 해안 지역에서 지하수 자원의 개발 시에 해수 침투의 양상을 파악하고 예측하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 사사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 3-3-2)에 의해 수행되었습니다.

5. 참고문헌

- 1) Bear, J., Cheng, A. H. D., Sorek, S., Ouaza, D., and Herrera, I., Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Concepts, Methods, and Practices, 625 pp., Kluwer Academic Publishers, Boston, Massachusetts (1999).

- 2) Cheng, A. H. D., and Ouazar, D., Coastal Aquifer Management: Monitoring, Modeling, and Case Studies, 296 pp., CRC Press, Boca Raton, Florida (2003).
- 3) Kim, J. M., and Yeh, G. T., COFAT3D: A finite element model for fully coupled groundwater flow and solute transport in three-dimensional saturated-unsaturated porous and fractured media, version 1.0, Technical Report, No. GGEL-2004-12, 354 pp., Geological and Groundwater Engineering Laboratory, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea (2004).
- 4) 한국기상청, 군산관측소 기후자료 (<http://www.kma.go.kr/>) (1971-2000).