

인공 하수 주입 및 양수에 따른 대수층의 수리학적 특성 연구

강정옥 · 이소정 · 김창균[†]

인하대학교 환경공학과

(2005년 9월 1일 접수, 2005년 9월 30일 채택)

Investigation on Hydraulic Properties According to Artificial Recharge and Extraction

Jeong-Ok Kang · So-Jung Lee · Chang-Gyun Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Inha University

ABSTRACT : The study with laboratory sandbox model has been carried out to address potential use of reclaimed water, as a counter-measure artificially recharging the coastal aquifer, to effectively prevent from seawater intrusion due to overexploitation. It also investigated plausibility for either preserving or recovering the freshwater interface facing with seawater intrusion. To do this, we assessed hydraulic properties in artificial aquifer (seawater/freshwater interface) depending upon the variation of extraction, storage and injection of reclaimed water. The variation of interface between freshwater and seawater were visualized by Surfer 8(Golden Software, USA) according to given experimental conditions. The interface between seawater and freshwater has been sensitively influenced by the change of extraction rate, where seawater zone migrated much faster into freshwater zone even though extraction rate became decreased. However, decreasing recharge rate could slow down moving of saline water zone toward freshwater zone. When the recharge was solely introduced into the sand box model, saline water intrusion was retarded than those of recharge and extraction working together. And also, the level of salinity of saline water was diluted by artificial recharge. It finally revealed that the artificial recharge would hydraulically avoid seawater intrusion while the fresh-water sources could be conservatively utilized.

Key Words : Seawater Intrusion, Artificial Recharge, Coastal Aquifer, Groundwater

요약 : 지하수 과도 개발에 따라 연안 대수층에 발생하는 해수침투를 효과적으로 방지하기 위한 대책으로서 인공 하수처리수의 대수층 함양수로의 가능성을 평가하고자 sand box를 이용한 연구를 수행하였다. 또한 인공 하수처리수의 함양에 의한 해수침투 경계면의 이동 억제 및 회복능을 조사하였다. 이를 위하여, 인공 대수층 내에서 양수, 저장, 인공 하수 처리수 주입의 변화에 따른 해수/담수 경계면의 수리학적 거동 특성을 평가하였다. 주어진 실험 조건에 따른 해수/담수 경계면의 변화는 Surfer 8(Golden Software, USA)에 의하여 도시화 되었다. 해수와 담수의 경계면은 양수량의 변화에 의하여 민감하게 영향을 받았으며 양수량을 감소시키더라도 경계면의 담수대 이동 속도는 더욱 증가하였다. 그러나 함양량이 감소할 경우 오히려 경계면이 담수대로 이동하는 속도는 감소하였다. 염수의 침투는 함양과 양수가 동시에 이루어질 때보다 양수를 하지 않으면서 함양이 이루어진 경우 더욱 저지되었으며 염수의 염도는 인공 함양수에 의해 희석되어 저하되었다. 결론적으로 인공함양을 효과적으로 이용할 경우 지하 대수층의 담수 자원을 안정하게 이용하는 동시에 해수침투를 수리학적으로 방지할 수 있음을 확인하였다.

주제어 : 해수침투, 인공함양, 연안대수층, 지하수

1. 서론

현재 우리나라에서는 장래 물 부족에 대비하여 지하수 자원의 매장량을 조사하였으며 무분별한 사용을 제한하고 있다. 특히, 연안 해역 및 도서지방은 지하수 자원의 과도한 개발로 인하여 해수가 담수 대수층으로 침투하여 지하수를 담수원으로 사용할 수 없는 실정이다. 지하수의 염수화는 연안 해역에서 가장 광범위하게 발생하는 수질 오염의 형태로서, 대부분 연안 해역의 폭넓은 대수층을 통하여 진행되고 있다. 더욱이, 인천을 포함한 서해 연안 지역은 조석 간만의

차가 커서 해수침투에 매우 취약하고, 지하수의 과도한 개발로 인하여 지하수 수질은 날로 악화되고 있다.

해수침투 정도 및 현상을 과학적으로 입증하기 위하여 최근 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. 연안 지역의 해수침투 정도를 정확하게 조사하기 위한 지질 조사기법으로 임해지역의 해수침투 평가를 위한 물리검층 방법을 동원한 연구가 수행되어 해수침투 정도에 대한 특성을 규명하였다.¹⁾ 또한, 해수와 담수대의 경계가 어떻게 연안 지역으로 이동하는지를 SHARP 모델을 이용하여 조사하였다.²⁾ 특히, 서해 연안 지역의 천부 지하수의 수리학적 특성에 의한 연안 대수층으로의 해수 혼입에 미치는 영향을 조사한 바 있다.³⁾ 그러나 일련의 연구는 해수침투 현상에 대한 지질 화학적 현상 규명에 편중되어 있으며 해수침투 현상에 대한 방지 및 복

[†] Corresponding author
E-mail: cgk@inha.ac.kr
Tel: 032-860-7561

Fax: 032-865-1425

원을 위한 공학적인 접근은 시도되지 않았다. 본 연구에서는 해수침투 방지 및 연안 지하수 원의 안정적인 이용을 위한 공학적인 방안 제안하고자 인공함양 및 양수량을 조절함으로써 염수대/담수대의 수리학적 거동을 조사하고 인공 하·폐수 처리수의 관정 함양량에 따른 담수대의 회복 여부를 평가하였다.⁴⁾

2. 실험방법

2.1. 인공 수조(sand box) 장치 제작

본 연구에 사용된 인공 수조는 하·폐수 처리수의 함양, 저류 및 양수 등에 따른 인공 대수층(염수대/담수대)에 미치는 수리학적 영향을 조사하기 위하여 제작되었다. 인공 수조는 길이 120 cm, 높이 100 cm, 폭 20 cm의 직육면체의 아크릴 재질로 제작되었다(Fig. 1). 인공 수조에는 180 L의 주문진사 모래를 충전하였다. 실험을 시작하기 전 충전된 모래는 수돗물을 이용하여 일정한 전기전도도를 나타낼 때까지 세정하였다. 수조의 좌·우측 부분에는 각각 peristaltic pump (CP-7518, Cole-Parmer, USA)가 연결된 수위조절장치(constant head valve)를 이용하여 일정한 수두로 염수와 담수가 유입 되도록 하였고 상부에는 함양(recharge)과 양수(pumping)를 위한 peristaltic pump를 설치하여 대수층 내부의 인공 관정과 연결되도록 하였다. 인공 수조의 양쪽 벽에서 안쪽으로 10 cm 부분에 SUS wire 50 mesh와 PP wire 120 mesh로 모래층 지지대를 만들어 담수와 염수의 대수층으로의 유출입이 원활하도록 하였다. 담수와 염수의 경계면을 관찰하기 위하여 시료채취 지점을 수조의 길이 방향으로 중앙 부분에 40개를 설치하였으며, 각각의 지점에서 주기적으로 시료를 채취하기 위하여 SUS 316 wire 180 mesh로 감싼 스테인리스 스틸 병(15 mL)을 설치하였다. 한편, 관정의 수위 조절을 통하여 조수간만에 따른 염수대/담수대의 경계면 거동을 조사하였으며 인위적인 지하수 원의 양수에 따른 지하수위 변동에 의한 경계면의 영향도 파악하였다. 또한, 염수대/담수대

의 전이 특성을 해석하기 위하여 하·폐수 처리수의 함양, 저류 및 추출(양수) 등 변동에 따른 염수의 분포 및 유동 특성을 평가하였다. 본 연구를 통하여 염수대의 담수대로의 확장 및 침투를 방지하기 위한 최적의 하·폐수 처리수의 함양, 저류 및 추출(양수) 조건 등을 도출하였다.

2.2. 담수, 염수, 인공 처리수 제조

본 실험에서는 유입수로서 담수, 염수 및 인공 처리수(인공 하수 최종 방류수)를 사용하였다. 담수는 일반 수돗물을 사용하였으며, 인공 염수는 NaCl (Duksan, 99.0%)을 수돗물에 녹여 1,025 g/L의 밀도로 제조하였다. 실험실에서 사용한 수돗물(담수), 염수 및 인공 하수처리수의 비전도도와 염도는 Table 1에 나타내었다. 인공 하수처리수 인천 S하수처리장의 방류수 중 NO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻를 분석한 후 NaCl (Duksan, 99.0%), K₂SO₄ (Duksan, 99.0%) 및 KNO₃ (Shinyo Pure Chemical, 99.0%)를 이용하여 각각 농도를 3.95 mg/L, 237.76 mg/L, 141.86 mg/L이 되도록 조제하였다.

인공 대수층의 수리전도도(hydraulic conductivity)를 측정하기 위하여 정수위법을 사용하였다. 정수위법은 포화수리전도도를 실험실내에서 측정하는 방법이며, 비교적 투수성이 좋은 모래 등의 수리전도도 결정에 이용된다. 대수층에 일정한 수두 차를 유지하면서 주어진 일정기간 내에 대수층을 통과한 물의 체적을 측정하여 Ford(1991)⁵⁾가 제안한 식 (1)에 대입하여 포화수리전도도(saturated hydraulic conductivity)를 결정하였다.

$$K_s = \frac{V \times L}{A \times t \times H} \quad (1)$$

여기서 K_s 는 포화수리전도도(cm/min)이며, V 는 대수층을 통과한 물의 부피(cm³), L 은 인공대수층의 두께(cm), A 는 인공대수층의 단면적(cm²), t 는 시간(min), H 는 수위변화(cm)이다.

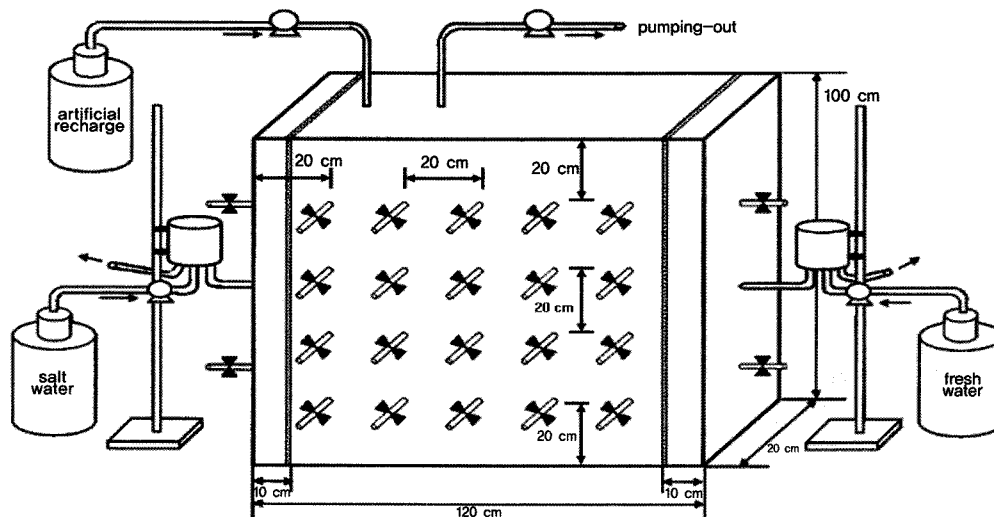


Fig. 1. Schematic diagram of sand box model.

Table 1. Water quality of lab prepared fresh, saline and reclaimed water

Component	Fresh water		Saline water	Lab prepared reclaimed water
	Tap water	NaCl + Tap water	NaCl + Tap water	NaCl + K ₂ SO ₄ + KNO ₃ + Tap water
Specific conductivity, ms/cm	0.17	109.2		1.035
Salinity, ppt	0.1	79.5		0.5
density, g/L	999.9	1025		1014

3. 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 담수, 해수 및 인공 하수처리수의 조성은 Table 1과 같다.

인공 수조에 충전된 모래의 입경 분포는 0.3 mm에서 5 mm이었으며 d₁₀과 d₆₀은 각각 0.87 mm, 1.64 mm로 균등계수(Cu, uniformity coefficient)는 1.89이었는데, 이것은 사용된 모래가 분급이 균등하게 분포되어 있음을 나타내는 것이다(Fig. 2).⁴⁾

Table 2. Saturated hydraulic conductivity from the constant head methods

	V(cm ³)	L(cm)	A(cm ²)	t(min)	H(cm)	Ks(cm/min)
1	2233	88	2000	4.3	4	5.712326
2	2490	88	2000	4.5333	5	4.833529
3	2615	88	2000	4.7667	5	4.827692
4	1790	88	2000	3.0833	5	5.108757
5	1800	88	2000	3.5667	4	5.551402
6	1360	88	2000	2.7667	5	4.325783
7	1460	88	2000	2.5	4.8	5.353333
8	1480	88	2000	2.4	5.4	5.024691
9	1452	88	2000	2.6833	4.8	4.960248
Average						5.077529

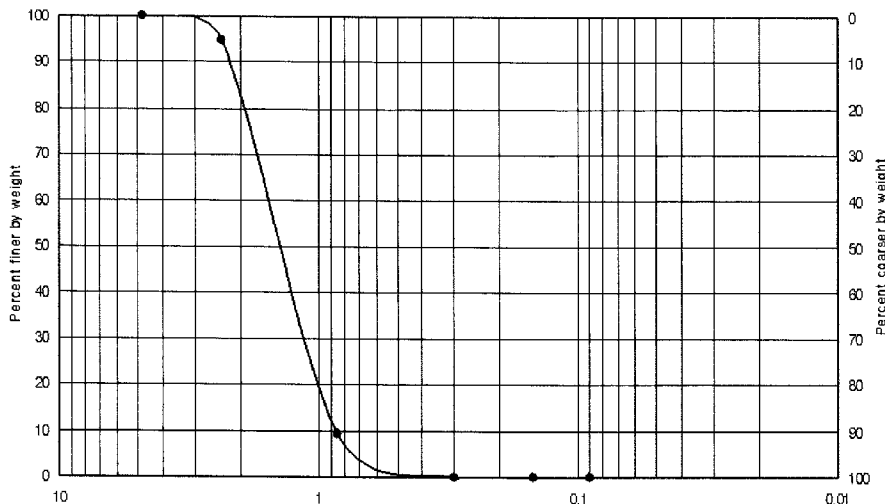


Fig. 2. Grain-size distribution curve of sand.

정수위법을 이용하여 결정된 포화수리전도도의 평균값은 5.078 cm/min이었으며, 본 연구에서는 이 값을 기준으로 대수층의 수리특성 측 실험 조건에 따른 염수대의 침투 속도를 결정하였다(Table. 2).

3.1. 무 인공 주입 및 무 양수 조건에 따른 해수침투 특성

인공 수조 내에 담수와 염수의 침투 경계면 결정은 지하수 수질 기준 중 염소이온의 공업용수 기준인 500 mg/L로 하였다. 양수와 함양이 없는 조건에서 담수와 염수가 각각 15 mL/min으로 인공 수조의 양단(오른쪽: 담수, 왼쪽: 염수)으로부터 유입될 경우 시간의 경과에 따른 염수대/담수대의 경계면의 이동 속도는 Fig. 3과 같이 나타났다.

실험 개시 초기에는 경계면 이동 속도가 최대 0.75 cm/min를 나타내었으나 350분 이후에는 0.1 cm/min이하의 안정된 침투 속도를 보였다. 이는 해수침투 초기에는 주어진 대수층 용적당 해수의 확산계수가 높아 빠르게 경계면이 이동되어 해수침투가 발생하나 일정 이상의 해수침투가 진행된 경우 해수의 담수대로의 확산이 상대적으로 제한되어 이동 속도가 감소한 것으로 사료된다. 이와 같은 조건에서 140분, 350분, 490분, 670분이 경과되었을 때 담수와 염수의 경계면 변화는 Fig. 4와 같이 나타났다. 그림에서 x 및 y축은 각각 인공 수조의 길이(m) 및 높이(m)를 나타내며 그래프 상의 곡선은 등염도(ppt)선을 나타낸다. Fig. 4에서도 알 수 있듯이 140분의 경우 경계면의 모양이 매우 날카롭게 형성되어 그 진

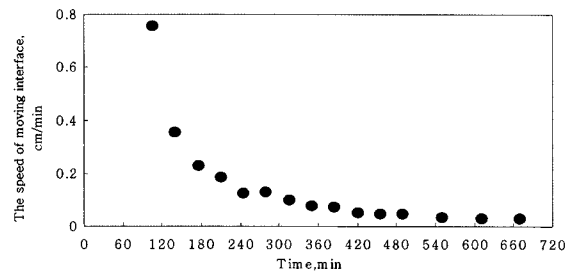


Fig. 3. Moving velocity of frontal interface.

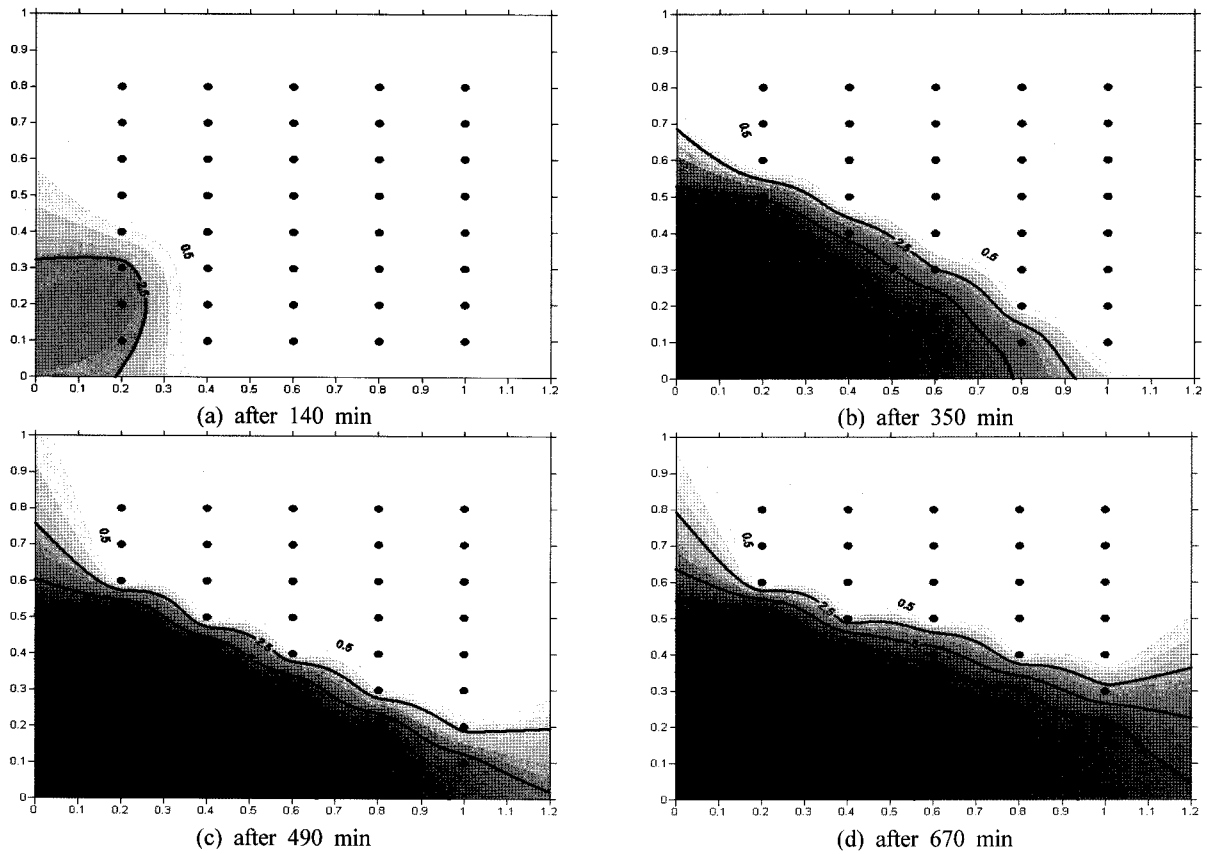


Fig. 4. Temporal movement of interface without recharge and extraction.

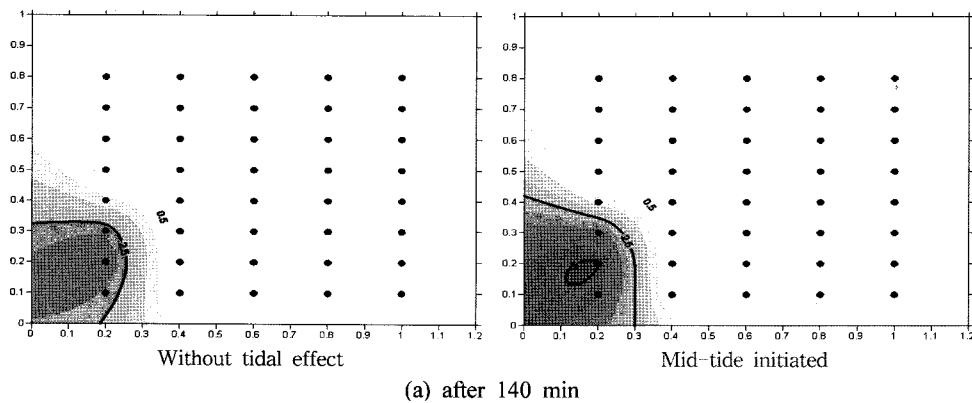
행속도가 빠른것을 알 수 있으나 시간이 경과함에 따라 경계면의 침부 모양이 완곡하게 직선화되어 그 진행 속도가 느려짐을 알 수 있다.

3.2. 조석효과에 따른 해수침투 특성

해안 지역에서 조수는 주변 지역의 지하수위에 영향을 미쳐서 염수 경계면 유동에 경미한 변화를 발생시킨다.^{6,7)} 이를 확인하기 위하여 다음과 같은 실험을 하였다. 즉 양수와 함양이 없는 조건에서 담수와 염수를 수조 양단(오른쪽: 담수, 왼쪽: 염수)에서 각각 15 mL/min으로 유입되도록 하였으며, 이때 염수를 유입구 높이별로 75 cm, 50 cm, 25 cm, 50 cm, 75 cm의 순서로 각각 120분, 120분, 240분, 120분,

120분 동안 유입되도록 하여 조석 간만의 차가 해수침투에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 5의 (a)는 조석 간만의 차가 없을 경우(왼쪽)와 조석 간만의 차가 있을 경우(오른쪽) 실험 개시 140분 경과 후의 경계면 이동을 나타내었다. 이때 수두는 75 cm에서 50 cm로 변화된 후 50 cm로 수두가 유지되었으며, 경계면의 확산 영역이 약간 증가하는 것으로 나타났다.

또한 실험개시 315분, 670분 경과 후 조수에 의하여 염도는 대수층 바닥을 통하여 직선 방향으로 길게 이동하는 것을 알 수 있다. Fig. 5의 (b)에서 315분 경과 후 간조(low tide)의 영향을 받은 인공대수층은 그렇지 않은 경우보다 등염도 곡선이 조금 더 조밀한 것을 볼 수 있다. 이것은 경계면의



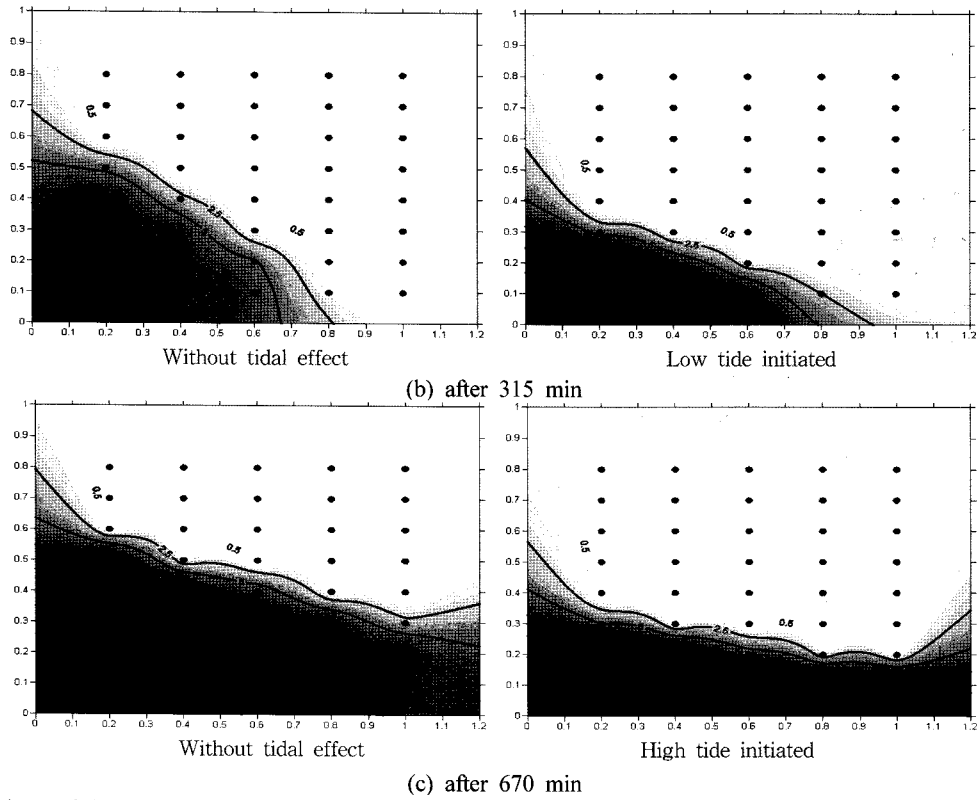


Fig. 5. Comparison of frontal interface between without and with tidal effect given.

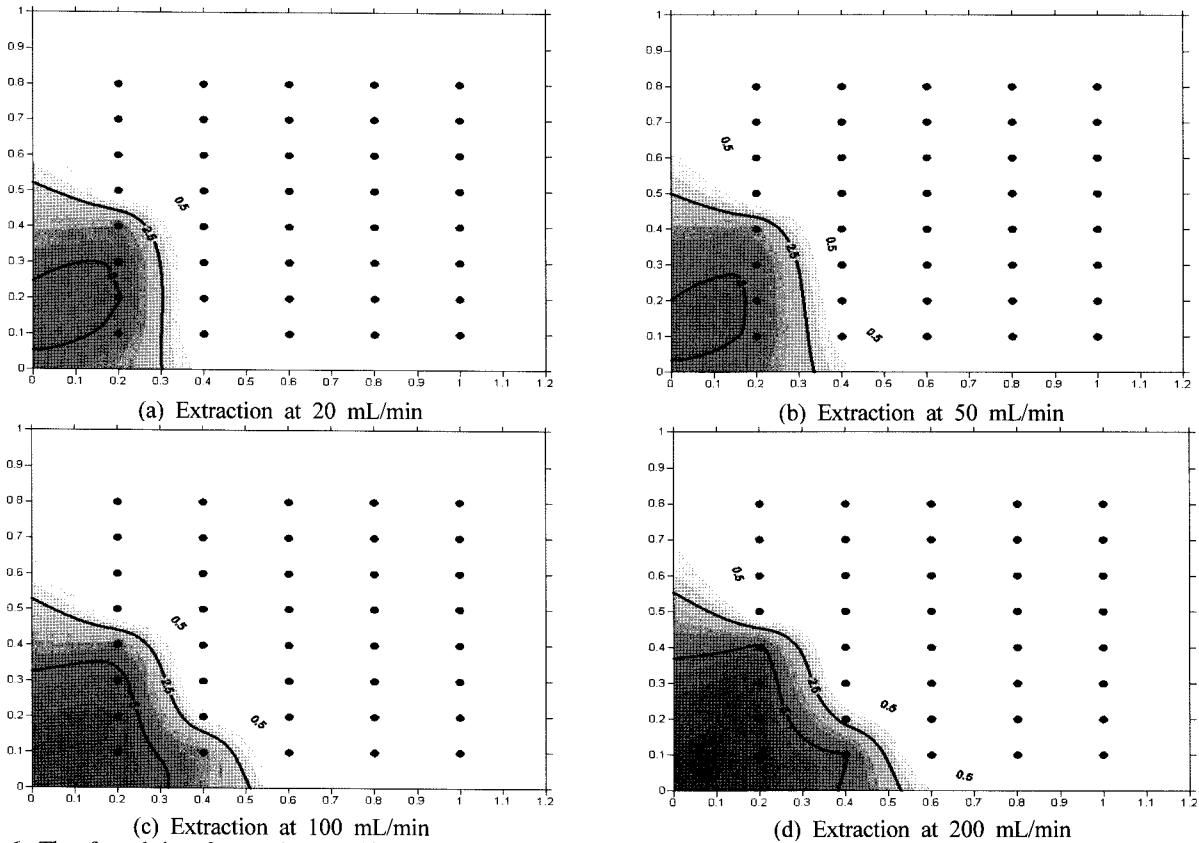


Fig. 6. The frontal interfaces when aquifer water was pumped out at varying rates while the recharge rate was kept at 20 mL/min (after 210 min).

이동 속도가 더 빠르다는 것을 의미한다. Fig. 5의 (c)에서 670 분 경과 후 만조(high tide)의 영향을 받은 인공 대수층에서 염수는 담수 쪽으로 바다를 따라서 낮고 깊게 침투되었으며 그 농도 또한 높은 것을 알 수 있다.

3.3. 일정한 인공 함양 조건에서 양수량에 따른 염수/담수 경계면 변동 특성

(1) 인공 주입 20 mL/min인 경우 양수량 (20, 50, 100, 200 mL/min)에 따른 경계면 거동

인공 하수처리수를 수조의 함양관을 통하여 20 mL/min으로 공급하는 동시에 양수정을 통하여 20~200 mL/min의 유량으로 양수할 경우 염수/담수 경계면의 거동을 평가하였다. 이때 수조의 양단(오른쪽: 담수, 왼쪽: 염수)을 통하여 인공 담수 및 염수가 15 mL/min의 유량으로 동시에 공급되었다. 인공 하수처리수 함양량이 20 mL/min일 경우 양수량을 각각 20 mL/min에서 50 mL/min, 100 mL/min, 200 mL/min로 증가시킬 경우 실험 개시 후 210분경과 시 염수/담수 경계면은 Fig. 6과 같이 관찰되었다.

즉 양수량이 20 mL/min에서 50 mL/min으로 2.5배 증가하더라도 해수 침투의 증가는 무시할만하였다. 그러나 양수량이 함양량 20 mL/min의 5배 이상 증가한 100 mL/min인 경우 침투 경계면 변화가 크지 않았으나 내부 해수침투영역의 염도가 급격히 증가하는 양상을 나타내었다. 양수량이 200 mL/min으로 증가한 경우에도 이와 유사한 양상을 보였다.

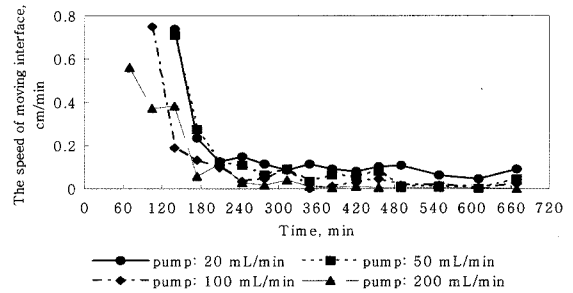


Fig. 8. Moving velocity of frontal interface when aquifer water was pumped out at varying rates while the recharge rate was kept at 20 mL/min.

양수량이 20 및 50 mL/min인 경우 385분경과 시(Fig. 7) 210분경과 시의 경우 보다 확산영역 및 염도가 증가하였다. 한편, 양수량이 100 및 200 mL/min인 경우 210분경과 시의 경우보다 확산 영역은 미미하게 증가하였으나 염도는 7.5 ppt까지 크게 증가하는 것으로 나타났다. Kim 등의 연구에서는 양수량이 증가할수록 경계면의 이동 속도가 증가하였다.⁸⁾ 그러나 본 연구에서는 함양량이 20 mL/min인 경우 Fig. 8에서 보는 바와 같이 양수량이 적을수록 경계면 이동 속도가 빠르게 측정되었는데, 이는 Kim 등의 연구와는 다르게 본 연구에서는 함양정이 해수 유입부에 치우쳐 설치되었기 때문으로 사료된다. 또한, 양수량이 높은 경우 경계면 이동 속도가 시간이 경과할수록 빠르게 감소하는데 그 이유는 횡축 방향으로 0.5 m 지점에서 양수가 이루어질 때 양수량이 증가

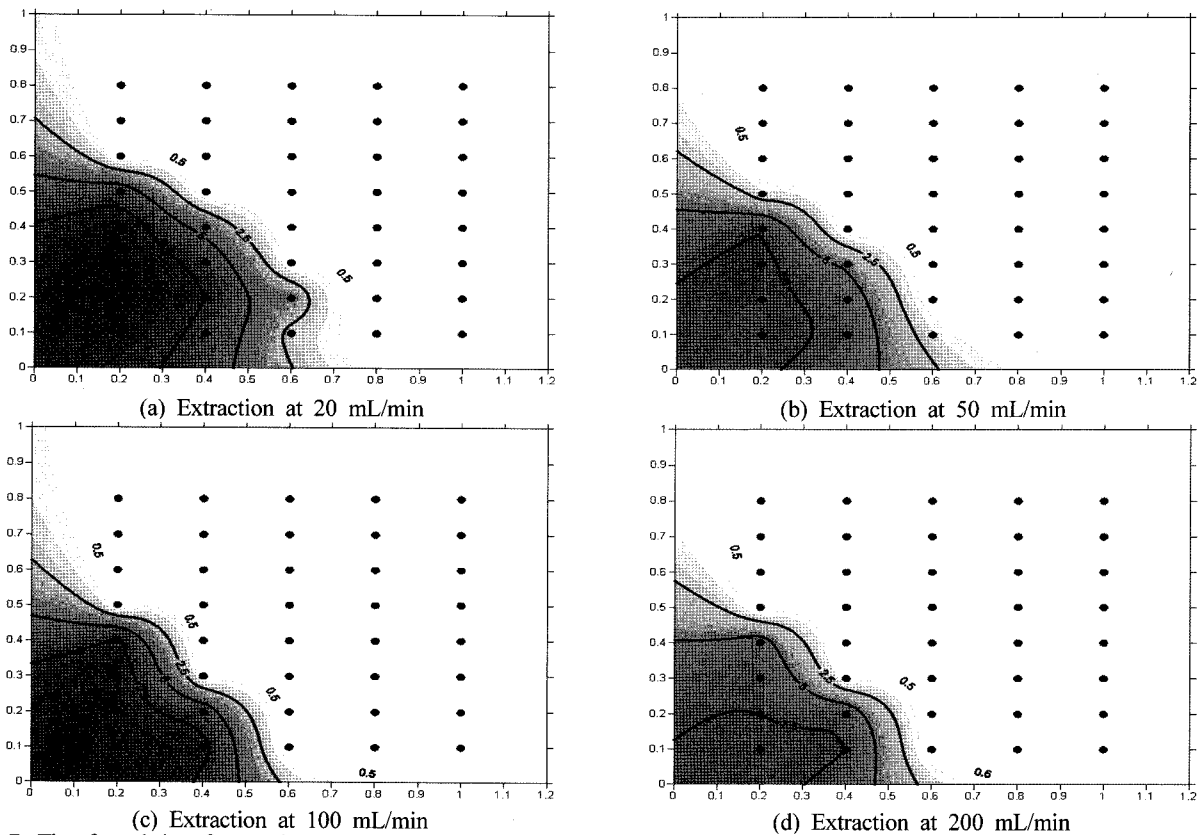


Fig. 7. The frontal interfaces when aquifer water was pumped out at varying rates while the recharge rate was kept at 20 mL/min (after 385 min).

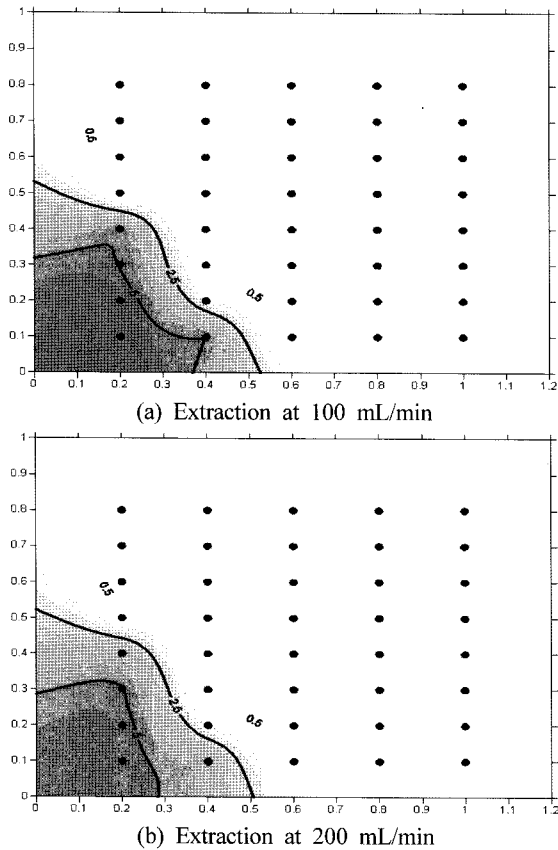


Fig. 9. Comparison of frontal interface when aquifer water was pumped out at different rates while the recharge rate was kept at 50 mL/min (after 210 min).

할수록 양수에 의해 제거되는 염수가 증가하여 0.5 m 이후 영역으로 확산되는 염수의 양이 감소하였기 때문으로 판단된다.

(2) 인공 주입 50 mL/min인 경우 양수량(100, 200 mL/min)에 따른 경계면 거동

함양량을 50 mL/min일 때 양수량을 각각 100 및 200 mL/min로 유지할 경우 시간에 따른 염수대/담수대의 거동 특성을 Fig. 9 및 10에 나타내었다. 양수 시간이 385분으로 증가할 경우 210분의 경우보다 확산 영역 및 염수대의 염도가 7.5 ppt까지 증가하는 것으로 나타났다. 즉 연안 지역 해수/담수 영역이 교차하는 대수층에서 지하수를 개발하여 이용할 경우 일정 유량의 함양을 유지하더라도 지하수 양수 시간이 증가할수록 해수침투 및 염도가 증가할 것으로 판단된다. Fig. 10에서 횡축 0.5 m 지점을 기준으로 양수량이 200 mL/min인 경우가 100 mL/min의 경우보다 염도가 낮은 것으로 나타났는데 이는 양수량의 증가에 따라 염수가 과도하게 양수정을 통하여 인공 수조 외부로 유출되고 그 자리에 인공 함양수가 유입되었기 때문으로 판단된다.

3.4. 일정 양수 조건에서 인공 주입량 변화에 따른 해수/담수 경계면 특성

양수량이 100 mL/min의 경우 인공 하수처리수의 함양량

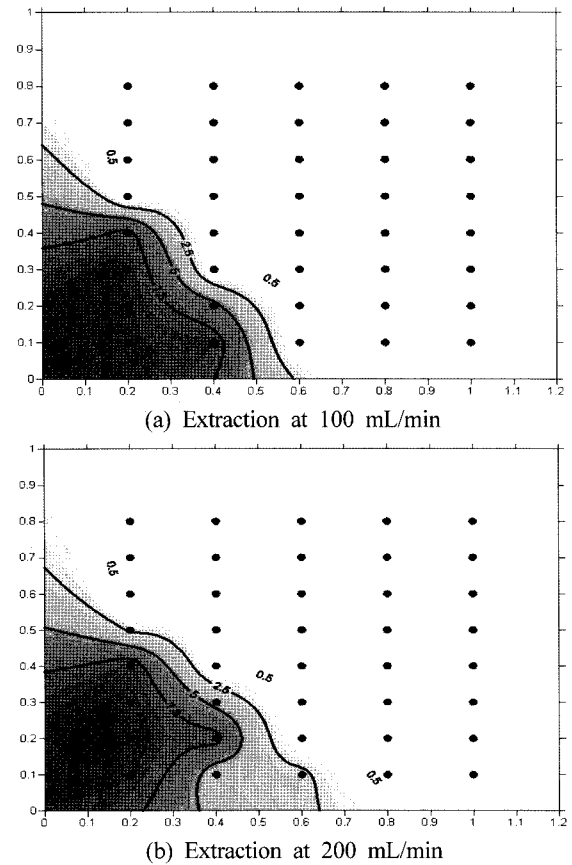


Fig. 10. Comparison of frontal interface when aquifer water was pumped out at different rates while the recharge rate was kept at 50 mL/min (after 385 min).

이 20 mL/min인 경우에 비하여 동일 경과시간에 따른 염수대의 확산 영역의 차이 즉, 내부 염도의 차이가 미미하였다 (Fig. 11). 양수량이 200 mL/min 경우 인공 하수처리수의 함양량 변화에 따른 확산 영역 및 염수대의 농도 변화는 거의 동일하게 관찰되었으나 실험 개시 385분경과 후 염수대 내부의 염도가 함양량 50 mL/min의 경우 9.5 ppt까지 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 12).

Fig. 13에서 양수량이 일정할 경우 함양량이 증가하면 경계면 이동 속도가 증가 하는 것을 볼 수 있다. 이는 Kim 등의 연구 결과와 상반된다. 즉 Kim 등의 연구에서는 양수량이 일정할 때 함양량이 증가할수록 경계면의 이동속도가 감소하였다.⁸⁾ 이와 같이 본 연구 결과와 Kim 등의 연구 결과의 차이는 단순한 함양정의 설치 위치가 다르기 때문인 것이다. 즉, 본 연구에서는 함양정을 염수대 쪽으로 치우쳐 설치하여 함양량이 증가함에 따라 염수대의 확산면이 비례적으로 증가하였기 때문이다.

3.5. 간헐적 양수 조건(100 mL/min)에서 인공 주입(20, 50 mL/min)에 따른 염수/담수 경계면 특성

실험 개시 후 6시간 동안 100 mL/min의 유량으로 양수를 시행한 뒤 6시간 동안은 양수를 중지시켰다. 이와 동시에

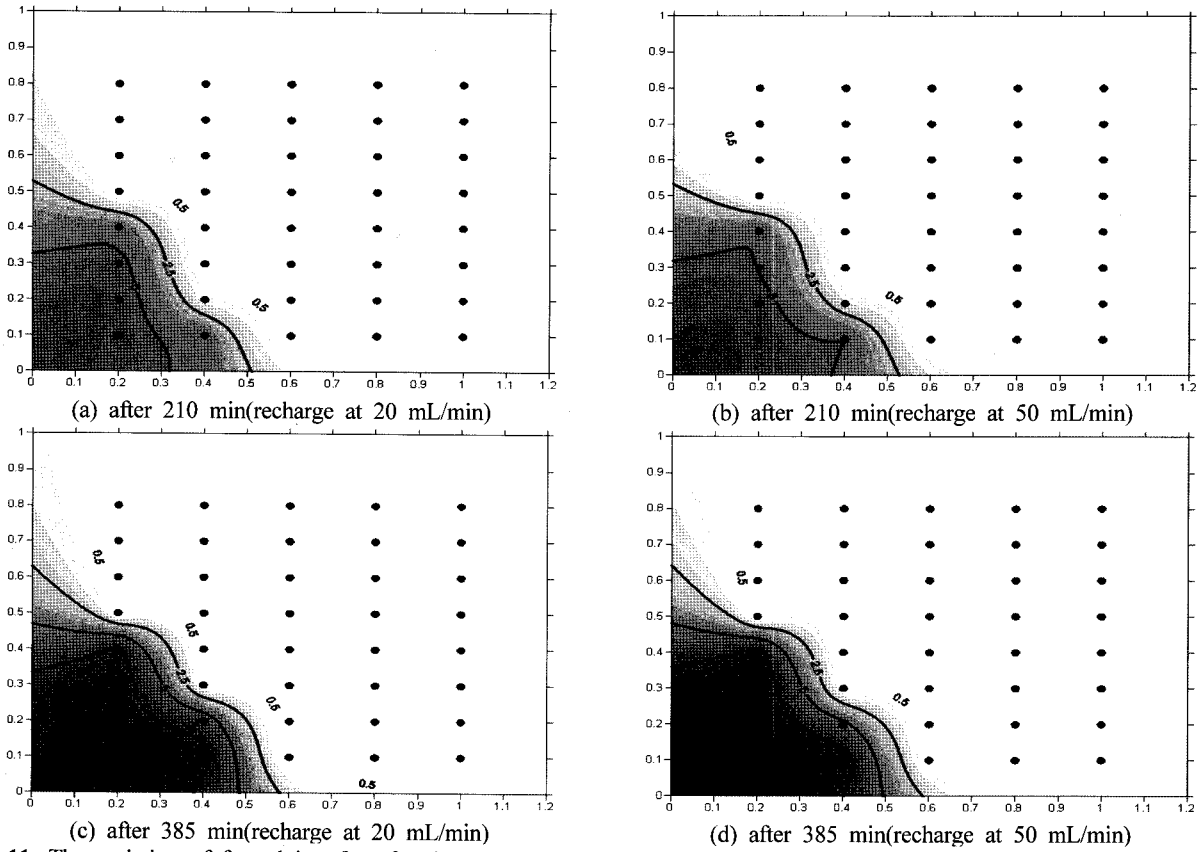


Fig. 11. The variation of frontal interface for the varying recharge rates at 100 mL/min of extraction.

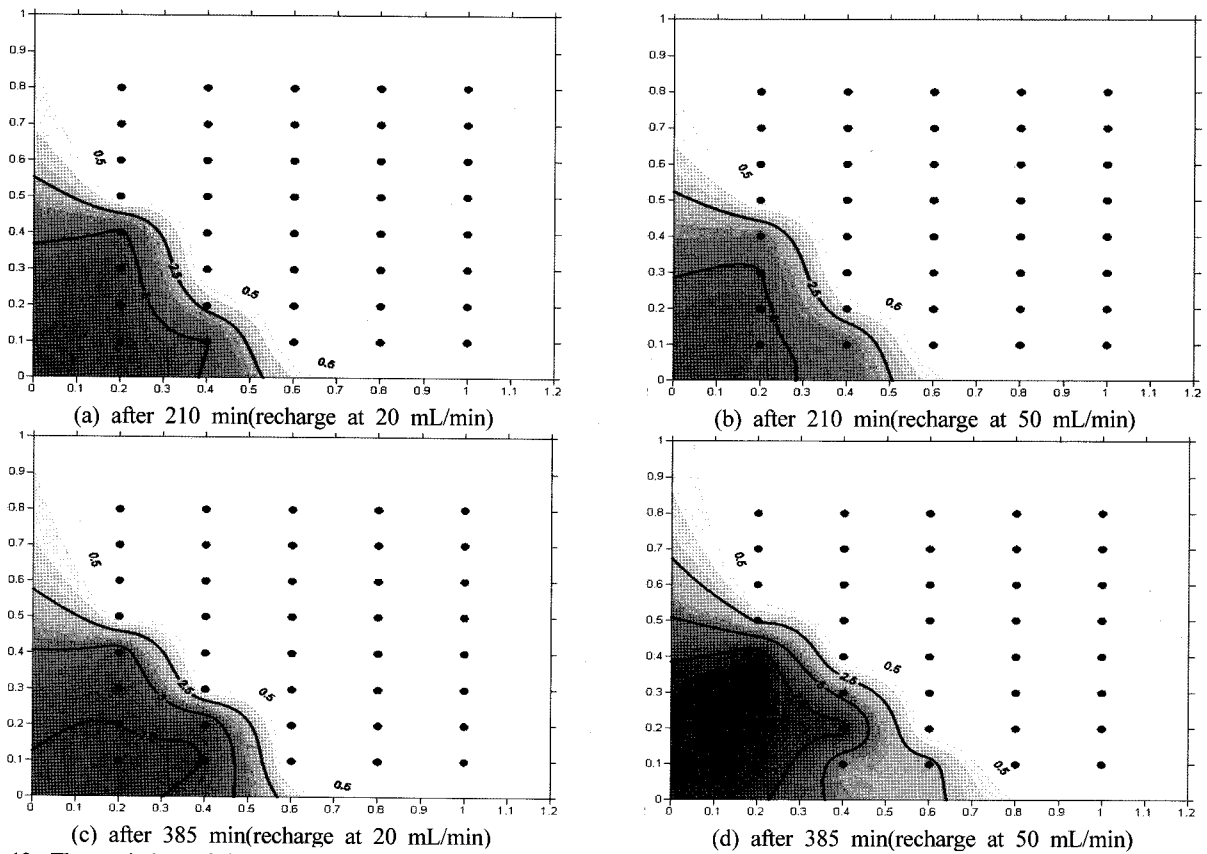
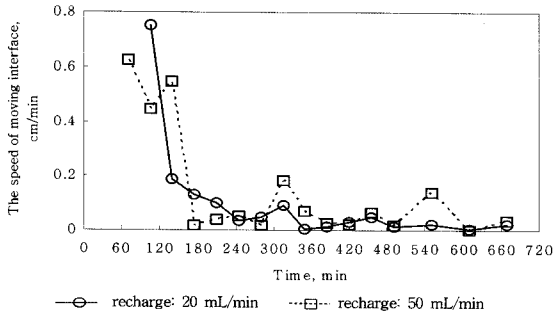
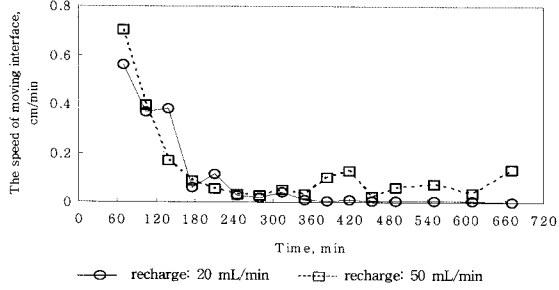


Fig. 12. The variation of frontal interface for the varying recharge rates at 200 mL/min of extraction.



(a) Extraction 100 mL/min for recharge 20, 50 mL/min

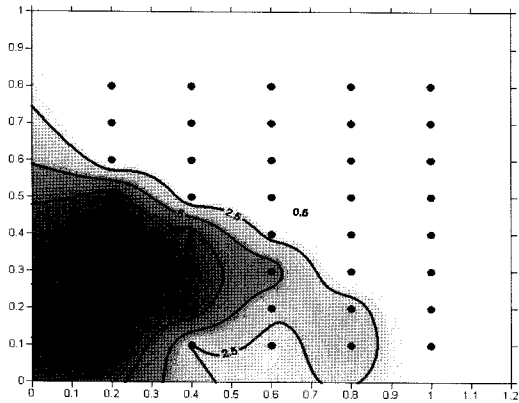


(b) Extraction 200 mL/min for recharge 20, 50 mL/min

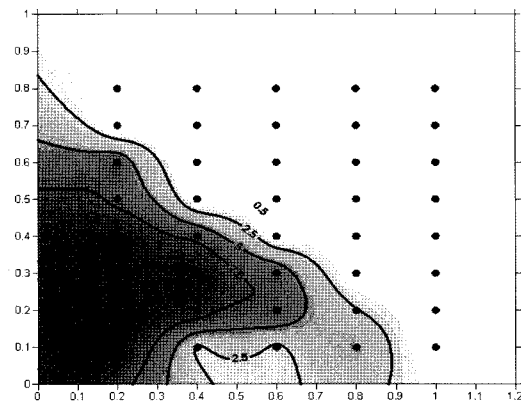
Fig. 13. Moving velocity of frontal interface when aquifer water was recharged at different rates while the pumping rate was kept at 100 mL/min or 200 mL/min.

12시간 동안 수조 양단(오른쪽: 담수, 왼쪽: 염수)에 담수, 염수를 15 mL/min으로 유입시키면서 동시에 함양을 각각 20 및 50 mL/min으로 유지하면서 염수/담수 경계면의 거동을 평가하였다.

Fig. 14에서 보는 바와 같이 양수가 중단된 후 25분 경과 시 염수/담수의 침투 경계면은 함양량이 50 mL/min인 경우 20 mL/min일 때보다 다소 넓게 확산되는 것을 알 수 있다. 그러나 내부의 염도는 감소하는 것으로 나타났다. 양수 중지 후 250분경과 시 50 mL/min으로 함양하는 경우 내부 염도가 확산영역 전범위에 걸쳐 감소하는 경향을 나타내었다 (Fig. 15). 100 mL/min의 유량으로 6시간 동안 양수 후 양수를 중지하고 함양을 50 mL/min으로 유량으로 수행한 경우 시간 경과에 따른 경계면의 거동 및 염도 변화를 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 16에 나타난 바와 같이 시간 경과에 따라 경계면의 침투 면적이 확산되고 있음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 12 및 13에서 보는 바와 같이 양수 및 함양을 동시에 수행할 경우 양수 중지 후 함양만을 수행하는 경우보다 염수대의 확산을 더 효율적으로 제어할 수 있었다. 한편 염수대의 확산은 Fig. 15에서 보는 바와 같이 함양량에 변화에는 크게 영향을 받지 않았으나 Fig. 16에서와 같이 함양 시간에 더 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

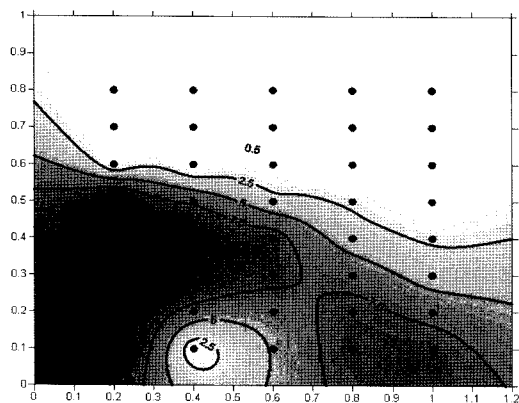


(a) Recharge rate 20 mL/min

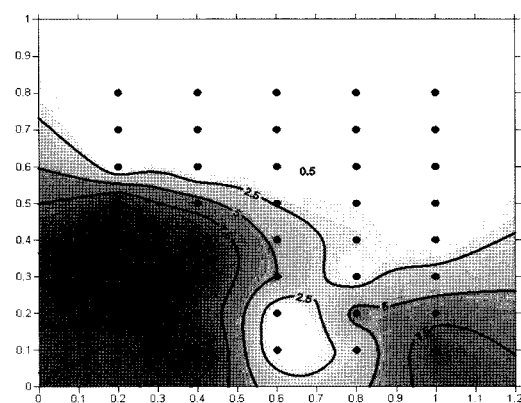


(b) Recharge rate 50 mL/min

Fig. 14. Comparison of frontal interface when aquifer water was recharged at different rates while the pumping rate was kept at 100 mL/min (25 min after pumped-off).



(a) Recharge rate at 20 mL/min



(b) Recharge rate at 50 mL/min

Fig. 15. Comparison of frontal interface when aquifer water was solely recharged at different rates after pumped off (250 min after pumped-off).

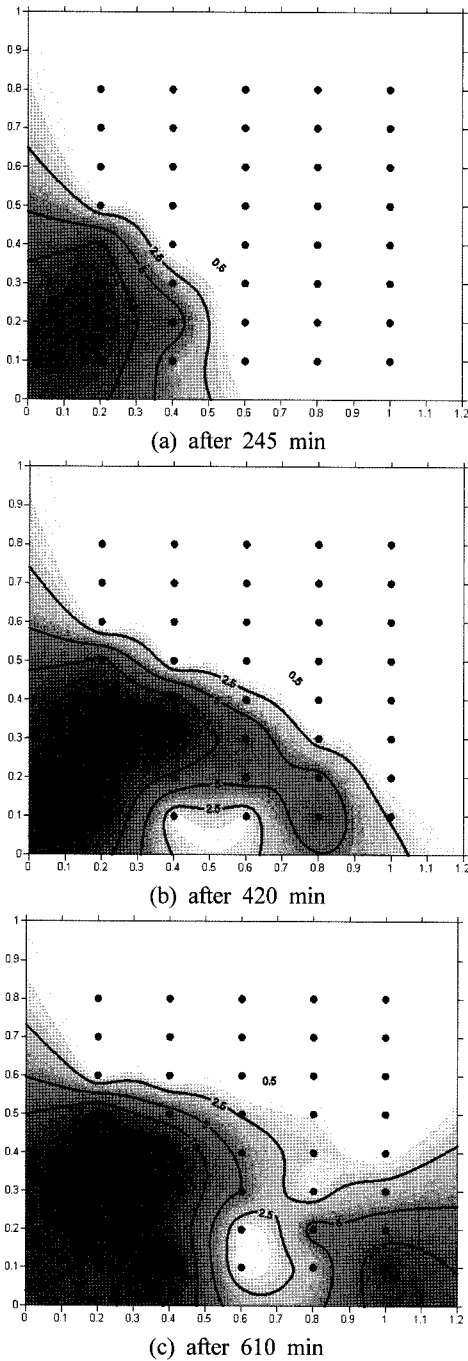


Fig. 16. Temporal movement of interface when recharge was kept at 50 mL/min while intermittent pumping-out.

4. 결론

인공 수조를 이용하여 양수, 함양, 간헐 양수 및 조석 변화에 따른 염수대/담수대의 이동 경계면의 특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 담수 및 염수대의 수두가 일정하게 유지되는 동안, 염수대/담수대의 경계면 이동 속도는 초기에 일정하게 증가한 후 일정 시간 경과 후 정상상태에 도달하였다.

2) 간조의 경우, 등염도 분포는 조수의 영향이 없는 경우와 비교하여 더욱 조밀하게 분포되었다. 만조의 경우 염수는 수조의 바닥에 높은 밀도로 분포하였으며 등염도 분포는 담수대 깊숙이 수조 바닥에 낮게 분포하여 침투되었다.

3) 일정 함양 조건에서 양수량 증가는 염수대의 경계 및 염도에 큰 영향을 미치지 못하였다. 그러나 오히려 양수 지속 시간은 염수 분포 및 염도를 증가시키는 것으로 나타났다.

4) 일정한 양수 조건에서 함양량 변화는 염수 분포 및 염도에 큰 영향을 미치지 못하였으나 함양 지속 시간이 증가함에 따라 염수대 경계면 및 염도가 증가하는 것으로 나타났다.

5) 양수 중지 후 함양량이 증가할수록 염수대의 분포 범위는 축소되었으며 동시에 염도도 감소하였다.

6) 염수대의 분포 및 염도 변화는 양수, 함양 및 조석 변화 등과 같은 인자의 증감에 따라 크게 영향을 받지 않았으나 이들 인자의 시간 변화에 따라 크게 영향을 받았다. 따라서 연안 역의 지하 대수층 개발 시 양수 및 함양 지속 시간은 해수침투에 심각한 영향을 초래할 수 있으므로 효율적인 이용시간의 설정은 해수 침투 방지 및 복원에 매우 큰 영향을 미치리라 판단되었다.

사 사

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(R05-2004-000-12756-0).

참고문헌

1. 이상규, 황세호, 황학수, 박인화, “임해지역 해수침투 평가를 위한 물리검층의 적용성,” 한국물리탐사학회지, 3(3), 1~6(2000).
2. 심병완, 정상용, “SHARP 모델을 이용한 해안 대수층의 해수침투 경계면 추정,” 한국지하수토양환경학회지, 8(1), 68~74(2003).
3. 박세창, 윤성택, 채기탁, 이상규, “서해 연안지역 천부지하수의 수리지구화학 : 연안 대수층의 해수 혼입에 관한 연구,” 한국지하수토양환경학회지, 7(1), 63~77(2002).
4. Fetter, C. W., Applied Hydrogeology, 3rd ed., Prentice Hall, New Jersey, pp. 533~536, 84~86(1994).
5. Ford, E-J., Measuring saturated hydraulic conductivity using a laboratory bath and ‘KSAT.WRK’, a graphic outlook spreadsheet. CSIRO Division of Soils, Technical Memorandum, pp. 1~4(1991).
6. Zhang, Q., Volker, R. E., Lockington, D. A., “Influence of seaward boundary condition on contaminant transport in unconfined coastal aquifer,” Journal of Contaminant Hydrology, 49, 201~215.(2001).
7. Kim, J.-H., Kim, J.-H., Cheong, T.-J., Kim, R.-H., Koh, D.-C., Ryu, J.-S., Chang, H.-W., “Use of time series analysis for the identification of tidal effect on ground-

- water in the coastal area of Kimje, Korea,” *Journal of Hydrology*, **30**, 188~198(2005).
8. 김동주, 하현철, 온한상, “자유면 대수층 모형에서의 Time Domain Reflectometry를 이용한 해수침투 모니터링,” *대한지질학회지*, **13**(1), 17~27(2003).
 9. Freeze, R. A. and Cherry, J. A., *Groundwater*, Prentice Hall, New Jersey, pp. 375~378(1979).
 10. Kim, J.-H., Kim, R.-H., Lee, J. H., Cheong, T.-J., Yum, B.-W., Chang, H.-W., “Multivariate statistical analysis to identify the major factors governing groundwater quality in the coastal area of Kimje, South Korea,” *Hydrological Processes*, **19**, 1261~1276(2005).
 11. Nguyen, C. D., Hiroyuki, A., Hiroyuki, Y., Kenichi, K., “Simulation of groundwater flow and environmental effects resulting from pumping. *Environmental Geology*,” **47**, 361~374(2005).
 12. 한규인, 이상선, 정차연, “해수침투 방지를 위한 물리검층과 GIS활용방안,” *한국지구물리탐사학회 2000 농업현장에 필요한 물리탐사 기술 심포지움 논문집*, 한국지구물리탐사학회, 경기도, pp. 54~69(2000).