

인공 하수처리수 주입과 양수 방식에 따른 인공 대수층의 해수침투평가

강정옥 · 이소정 · 김창균[†]

인하대학교 환경공학과

(2006년 3월 24일 접수, 2006년 6월 8일 채택)

Assessment on Saline Water Intrusion between Types of Injections of Artificial Reclaimed Water and Extractions in Artificial Aquifer

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 way for artificially recharging the coastal aquifer, to effectively prevent from seawater intrusion. To do this, we assessed hydraulic and geochemical properties depending upon various extraction and recharging conditions. While solely being recharged, the intrusion could be significantly retarded than those of recharge and extraction implied together. At 0.5 to 2 for the ratio of the extraction over the recharge rate, the fresh water was exploited from the tank, where the void regime was simultaneously saturated with the recharged water. In the meantime, the saline water zone was diluted and back-tracked by the recharged water due to forming a hydraulic geochemical barrier around the injection well. However, if the ratio was being increased to greater than 4, saltwater more deeply intruded to the freshwater zone because the artificial recharge was not sufficiently supplied to timely back-fill the void space. When the aquifer water was intermittently extracted at the ratio of 0.5~2 over the recharge rate, the value of S.M.I. decreased, but increasing it to more than 4 unlikely escalated the value of S.M.I. as much as 3~47% indicating that the salt water intruded. It finally revealed that the proper ratio of extraction/recharge or intermittent extraction would efficiently retracted seawater intrusion while the freshwater sources could be conservatively utilized.

Key Words : Seawater Intrusion, Artificial Recharge, Intermittent pumping, Coastal Aquifer

요약 : 연안 대수층에 발생하는 해수침투를 효과적으로 방지하기 위한 대책으로서 인공 하수처리수의 대수층 함양수로의 가능성을 평가하고자 sand box를 이용한 실험실 규모의 연구를 수행하였다. 이를 위하여, 인공 대수층 내에서 다양한 양수 및 주입 조건에 따른 수리화학적 거동 특성을 평가하였다. 염수의 침투는 함양과 양수가 동시에 이루어질 때보다 양수가 없이 단지 함양만 이루어진 경우 더욱 저지되었다. 양수량과 함양량의 비가 0.5~2인 경우, 양수에 의하여 담수대로 침투하는 염수가 인공 수조 밖으로 배출됨과 동시에 함양에 의하여 함양관 주위로 형성된 수리화학적 방벽에 의하여 그 빈 공간은 함양수로 채워져 희석되어 해수침투가 후퇴되었다. 그러나 양수량이 함양량에 비하여 약 4배 이상인 경우 양수로 인한 빈 공간을 채울 만큼 함양량이 불충분해 염수는 담수대로 더욱 깊숙히 침투하였다. 양수량과 함양량의 비가 0.5~2인 간헐적인 양수의 경우 S.M.I.값은 감소하였지만 그 비가 4이상인 경우 S.M.I.값은 3~47%로 오히려 증가하여 해수 침투가 진행됨을 나타내었다. 결론적으로 적절한 비율의 인공함양 혹은 간헐 양수방식을 채택할 경우 지하 대수층의 담수 자원을 안정적으로 이용하는 동시에 해수 침투를 효율적으로 방지할 수 있음을 확인하였다.

주제어 : 해수침투, 인공함양, 간헐적 양수, 연안대수층

1. 서론

우리나라에서는 장래 물 부족에 대비하여 2002년 건설교통부의 지하수 관리 기본 계획에 따라 지하수 자원의 매장량을 조사하였으며 그의 무분별한 사용을 제한하고 있다. 한편 연안 해역 및 도서지방의 경우 지하수 자원의 과도한 개발로 인하여 해수가 담수 대수층으로 침투하여 지하수를 담수원으로 사용할 수 없는 실정이다.¹⁾ 지하수의 염수화는 연안 해역에서 가장 광범위하게 발생하는 수질 오염의 형태로

서, 대부분 연안해역의 폭넓은 대수층을 통하여 진행되고 있다.²⁾ 더욱이, 인천을 포함한 서해 연안지역은 조석 간만의 차가 커서 해수 침투에 매우 취약하고, 인위적인 지하수의 과도한 개발로 인하여 지하수 수질은 날로 악화되고 있다.

해수침투 정도 및 현상을 과학적으로 입증하기 위하여 최근 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. 연안지역의 해수침투 정도를 정확하게 조사하기 위하여 지질 조사기법으로서 임해지역의 해수침투 평가를 위한 물리검층 방법을 동원한 연구가 수행되어 해수침투 정도에 대한 특성을 규명하였다.³⁾ 또한 해수와 담수대의 경계가 어떻게 연안 지역으로 이동하는지를 SHARP 모델을 이용하여 조사하였다.⁴⁾ 특히, 서해연안지역의 천부 지하수의 수리화학적 특성에 의한 연안

[†] Corresponding author
E-mail: annnaaa@kopec.co.kr
Tel: 031-298-4079

Fax: 031-289-4519

대수층의 해수 혼입에 미치는 영향을 조사한 바 있다.⁵⁾ 그러나 일련의 연구는 해수침투 현상에 대한 지질 화학적 현상 규명에 편중되어 있으며 해수침투 현상에 대한 방지 및 복원을 위한 공학적인 접근은 시도되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 해수침투 방지 및 연안지역 지하수원의 안정적인 이용을 위한 공학적인 방안을 제안하고자, 인공함양과 양수량에 따른 담수대/염수대의 수리·화학적 거동을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1. 인공 수조(sand box)장치

연구에 사용된 인공수조는 하·폐수 처리수의 함양, 저류 및 양수 등에 따른 인공 대수층(담수대/염수대)에 미치는 수리학적 영향을 조사하기 위하여 길이 120 cm, 높이 100 cm, 폭 20 cm의 직육면체로써 아크릴 재질로 제작되었다(Fig. 1). 인공수조에는 180 L의 주문진사 모래를 충전하였고 실험을 시작하기 전 충전된 모래는 수돗물을 이용하여 일정한 전기전도도를 나타낼 때까지 세정하였다. 수조의 좌·우측부분에는 각각 peristaltic pump(CP-7518, Cole-Parmer, USA)가 연결된 수위조절장치(constant head valve)⁶⁾를 이용하여 일정한 수두로 염수와 담수가 유입되도록 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 염수가 대수층을 통하여 유출입이 자유롭도록 하였다. 또한 인공수조의 양끝단의 배출구(drainage)에서 peristaltic pump를 이용하여 일정한 유량으로 인공수조내의 물을 유출시켜 흐름이 원활하도록 하였다.⁷⁾ 담수와 염수의 경계면 위치 결정을 위한 시료 채취를 위하여 수조의 길이 방향으로 중앙부분에 20개의 시료 채취점을 지정하였으며, 각각의 지점에서 주기적으로 시료를 채취하기 위하여 SUS 316 wire 180 mesh로 감싼 스테인리스 스틸 병(15 mL)을 설치하였다. 인공 하수 처리수의 함양 및 추출(양수) 등의 변동에 따른 염수의 분포 및 유동 특성을 평가하였으며 각 실험 조건을 Table 1에 나타냈다. 즉 연속적인 양수 및 간헐적인 양수 조건에 따른 해수 침투 특성을 조사하였으며 이 연구를 통하여 염수대의 담수대로의 확장 및 침투 방지를 위한 최적의 하수 처리수의 함양 및 추출(양수) 조건 등을 도출하였다.

실험에서 사용된 담수, 염수 및 하수 처리수는 실험실에서 인공적으로 제조하였다. 담수는 일반 수돗물을 사용하였으며, 인공 염수로는 NaCl(Duksan, 99.0%)을 수돗물에 녹여 1,025 g/L의 밀도로 제조하여 사용하였고, 인공 처리수로는 인천 S하수처리장의 방류수 중 NO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻를 분석한 후 KNO₃(Shinyo Pure Chemical, 99.0%), NaCl(Duksan, 99.0%) 및 K₂SO₄(Duksan, 99.0%)를 이용하여 각각 농도를 3.95 mg/L, 237.76 mg/L, 141.86 mg/L이 되도록 조제하여 사용하였다. 본 연구에 사용된 담수, 염수 및 인공 하수처리수의 조성은 Table 2와 같다.

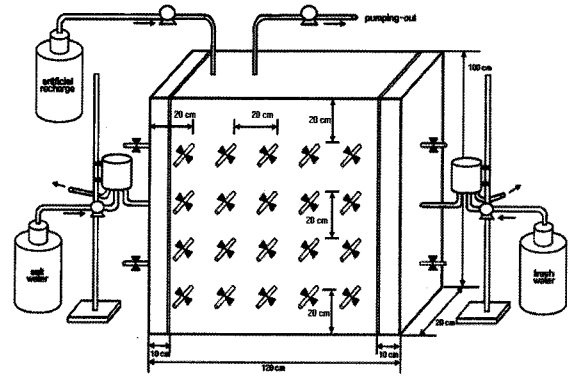


Fig. 1. Schematic diagram of sand box model.

Table 1. The experimental condition on water flow through the sand box(unit: mL/min)

Fresh water	Saline water	Recharge	Extraction
3	3	5	5
			10
			10(intermittent)
		10	20(intermittent)
			5
			10
		10(intermittent)	
		20(intermittent)	

Table 2. 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 + 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

2.2. 시료 채취 및 분석 방법

실험에 이용된 주문진사 모래에 대한 입도 분석을 실시하여 그 결과를 이용하여 시료의 유효입경(Effective grain size, D₁₀)을 결정하였다. 또한 D₁₀, D₃₀, D₆₀을 이용하여 균등계수(Uniformity coefficient, C_u) 및 곡률계수(Coefficient of curvature, C_g)를 식 (1) 및 식 (2)를 이용하여 산정하였다.⁸⁾

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

$$C_g = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2)$$

균등계수는 조립 등의 입도분포가 좋고 나쁜 정도를 나타내는 계수로서 C_u가 4이하인 시료는 분급이 잘된 경우이며

6이상인 시료는 분급이 불량한 경우를 나타내고, C_u 가 1~3 범위일 경우 입도분포가 좋은 시료로 판단할 수 있다.⁹⁾ 또한 식 (3)에 나타난 바와 같이 균등계수를 이용하여 공극률(n)을 산출할 수 있으며, 균등계수가 1인 경우 토양의 입경이 균질함을 의미한다.¹⁰⁾

$$n = 0.255(1 + 0.83 C_u) \quad (3)$$

인공 대수층의 수리전도도(hydraulic conductivity)를 측정하기 위하여 정수위법을 사용하였다.¹¹⁾ 정수위법은 포화수리전도도를 실험실내에서 측정하는 방법이며, 비교적 투수성이 높은 모래($K > 10^{-3}$ cm/sec) 등의 수리전도도 결정에 이용된다. 대수층에 일정한 수두차를 유지하면서 주어진 일정기간 내에 대수층을 통과한 물의 체적을 측정하여 Ford(1991)¹²⁾가 제안한 식 (4)에 대입하여 포화수리전도도(saturated hydraulic conductivity)를 결정하였다.

$$Ks = \frac{V \times L}{A \times t \times H} \quad (4)$$

- 여기서, K_s : 포화수리전도도(cm/min)
- V : 대수층을 통과한 물의 부피(cm^3)
- L : 인공대수층의 두께(cm)
- A : 인공대수층의 단면적(cm^2)
- t : 시간(min)
- H : 수위변화(cm)

실험 조건에 따라 인공수조(sand box)로부터 채취된 시료(2400개)에 대한 용존 이온 성분의 농도를 기준으로 배경값 도출, 해수 침투 영향을 반영할 수 있는 이온종의 선별, 해수 침투 영향을 반영한 이온종을 포괄하는 합수 도출 및 가중치 선정 후 해수 침투 인자(Seawater Mixing Index)¹⁴⁾를 산출하였다. 박(2002)¹⁴⁾이 해수침투를 평가하기 위하여 제안한 S.M.I. 지수는 기본적으로 해수의 주요 성분인 Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} 를 이용하여 식 (5)와 같이 정의 된다.

$$S.M.I. = a \times \frac{C_{Na}}{T_{Na}} + b \times \frac{C_{Mg}}{T_{Mg}} + c \times \frac{C_{Cl}}{T_{Cl}} + d \times \frac{C_{SO_4}}{T_{SO_4}} \quad (5)$$

여기서 S.M.I.는 해수 혼합 지수(Seaawter Mixing Index)이며 이 값이 1이상이면 염수와 접한 담수대는 해수와 혼합 영향을 받은 것으로 추정할 수 있다. a, b, c, d는 각 이온 성분의 가중치로서 각각 해수의 Na^+ 함량비(0.31), Mg^{2+} 함량비(0.04), Cl^- 함량비(0.57), SO_4^{2-} 함량비(0.08)을 나타낸다. C는 측정된 각 이온의 농도이며, T는 각 이온종의 배경값(threshold)을 나타낸다. 이 배경값은 Sinclair(1974)¹⁵⁾가 제안한 방법에 의하여 추출하였다.

시료는 30 mL 채수병을 이용하여 공기나 다른 이물질의 침입이 없도록 가득 채수하였으며 채수시 온도, pH, 산화환원전위(Eh), 전기전도도 등을 분석하였다.¹³⁾ 채취된 시료는

0.45 μm 여과지로 여과한 후 음이온 분석을 위한 시료로 test 튜브에 담아 4°C 이하로 냉장 보관하였고, 양이온 분석용 시료의 경우 채수 용기 표면에서 발생하는 양이온의 흡착과 용존 이온의 침전 및 미생물의 성장과 산화를 방지하기 위하여 농질산(1%)을 1 mL 첨가하여 pH 2 이하, 4°C 이하로 냉장 보관 하였다.¹³⁾ 또한, 유도결합플라즈마 방출분광분석기(ICP-OES, Varian, Liberty Series II, USA)를 이용하여 주요 양이온 Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ 를 정량 분석하였으며, 이온크로마토그래피(IC, Yong Lin Instrument, Water 432 Conductivity Detector, Korea)를 이용하여 주요 용존 음이온 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 를 정량 분석하였다. 본 연구에서 실시한 시료채취 및 분석 절차는 Fig. 2와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 인공 수조(sand box) 내 인공 대수층의 특징

Table 3에서 보는 바와 같이 정수위법을 이용하여 결정된 포화수리전도도의 평균값은 5.08 cm/min이었다. 한편 Table 4에서 보는 바와 같이 인공수조에 충전된 모래의 입경 분포는 0.3 mm에서 5 mm이었으며 d_{10} , d_{30} 과 d_{60} 은 각각 0.87 mm, 1.08 mm, 1.64 mm로 식 (1) 및 (2)를 이용하여 구한 균등계수(C_u , uniformity coefficient)는 1.89, 곡률계수(C_g)는 0.82로 나타났는데, 이것은 사용된 모래가 분급이 균등하게 분포되어 있음을 나타내는 것이다.⁹⁾ 또한 식 (3)을 이용하여 측정된 인공대수층의 공극률은 0.37이었다.

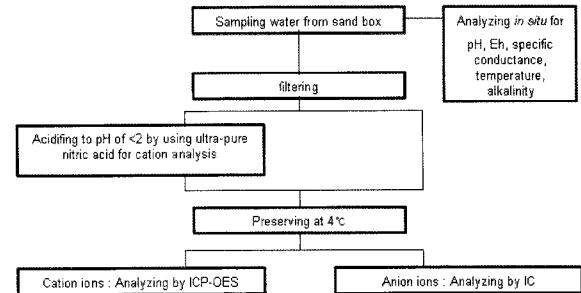


Fig. 2. The sampling and analytical procedures.

Table 3. Saturated hydraulic conductivity observed from the constant head methods

Run	V(cm^3)	L(cm)	A(cm^2)	t(min)	H(cm)	Ks(cm/min)
1	2,233	88	2,000	4.30	4	5.71
2	2,490	88	2,000	4.53	5	4.83
3	2,615	88	2,000	4.77	5	4.83
4	1,790	88	2,000	3.08	5	5.11
5	1,800	88	2,000	3.57	4	5.55
6	1,360	88	2,000	2.77	5	4.33
7	1,460	88	2,000	2.50	4.8	5.35
8	1,480	88	2,000	2.40	5.4	5.02
9	1,452	88	2,000	2.68	4.8	4.96
Average						5.08

Table 4. The physical properties on the artificial aquifer within the sand box

Soil type	Diameter(mm)			C_u	C_g	Soil classification	Porosity
Sand	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	1.89	0.82	well sorted sand	0.37
	0.87	1.08	1.64				

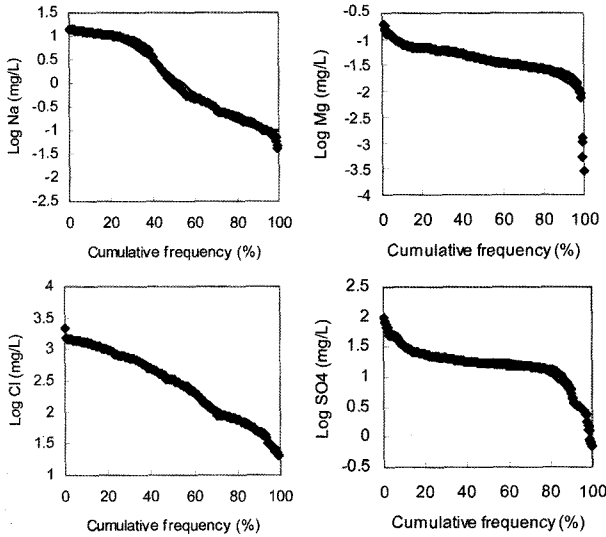


Fig. 3. Cumulative frequency curves for the determination of threshold values on ions in the sandbox.

한편 채취된 시료 중 Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- 및 SO_4^{2-} 등 각 용존 성분의 농도를 기준으로 Sinclair(1974)¹⁵⁾ 및 김옥배(1985)¹⁷⁾ 가 제안한 배경값 결정 공식을 이용하여 배경문턱값(threshold)을 결정한 결과 Fig. 3에서 보는 바와 같이 $Na^+ = 1.68$ mg/L, $Mg^{2+} = 0.05$ mg/L, $Cl^- = 336.52$ mg/L 및 $SO_4^{2-} = 21.16$ mg/L로 나타났다.

3.2. 비전도도 분포와 지구화학적 자료를 이용한 양수방식에 따른 해수침투의 특성평가

Surfer8를 이용하면 염수의 거동을 2차원적으로 나타낼¹⁸⁾ 수 있으며 2차원 평면에 도시되는 등비전도도선(EC contour line)의 분포를 통하여 담수/염수 경계면의 거동 및 염수의 침입 영향 여부를 평가하게 된다. 이 방법은 수중에 존재하는 모든 이온에 대한 전기 전도 특성을 분석하여 수리학적 담수/염수 경계면의 거동을 평가하는 방법이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 36시간 동안 연속적으로 수조 양단(왼쪽: 담수, 오른쪽: 염수)을 통하여 3 mL/min의 유속으로 각각 담수 및 염수를 유입시키면서 전기전도도 및 S.M.I. 지수를 비교하였다. 그 결과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 전기전도도 및 S.M.I.간의 상관관계가 약 0.73의 낮은 값을 나타내었다. 이는 실험에 이용된 염수에 염수외의 성분의 존재에 의하여 수중 용존이온의 농도가 증가하여 비전도도의 측정에 영향을 주었기 때문으로 판단되었다.^{19,20)}

따라서, 본 연구에서는 해수 침투를 좀더 명확하게 판단

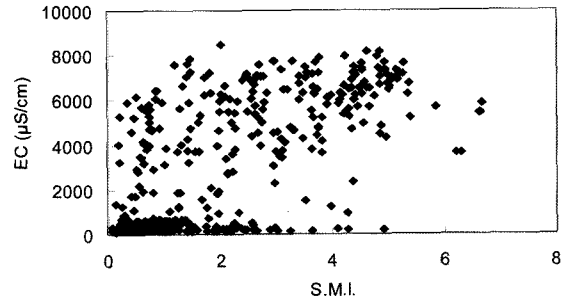


Fig. 4. The correlation between S.M.I. and EC on water samples in the sand box.

하기 위하여 함양 및 양수 조건에 따라 전기전도도 측정애 근거한 등비전도도선의 작성과 더불어 S.M.I.(Seawater Mixing Index)¹⁴⁾를 산정하여 해수침투의 정도를 정량적으로 비교 평가하였다.

1) 일정 인공함양 조건(5 mL/min)에서 양수 방식(연속: 5 mL/min, 간헐: 10 mL/min)에 따른 염수침투 특성 비교

36시간 동안 연속적으로 수조 양단(왼쪽: 담수, 오른쪽: 염수)에 3 mL/min의 유속으로 담수 및 염수를 유입시키면서 인공함양관을 통하여 인공하수 처리수를 5 mL/min의 유량으로 일정하게 주입하였다. 양수 방식에 따른 총 양수 유량이 동일하도록 연속 및 간헐 양수를 다음과 같이 수행하였다. 먼저 연속 양수의 경우 36시간 동안 5 mL/min유량을 양수관을 통하여 양수하여 총 양수 유량이 10.8 L가 되도록 하였다. 간헐 양수의 경우 실험개시 후 전반 18시간 동안 10 mL/min의 유량으로 양수정을 통하여 양수한 후, 연이은 후반 18시간 동안 양수를 중지시켜 총 양수유량이 연속 양수 유량과 동일한 10.8 L가 되도록 조절하였다. 실험 결과는 Fig. 5 및 6에 나타내었다. Fig. 5 및 6에서 x 및 y축은 각각 인공수조의 길이(m) 및 높이(m)를 나타내며 그래프 상의 곡선은 등비전도도선을 나타낸다.

Fig. 5 및 6에서 보는 바와 같이 실험 개시 후 18시간 동안 각 양수 조건에 따른 인공 수조내 담수/염수 침투 경계면의 변화는 크게 차이가 없었다. 그러나 Fig. 7에서 보는 바와 같이 S.M.I.값을 기준으로 비교하면 양수량/함양량의 비가 2(양수량 10 mL/min, 함양량 5 mL/min)인 간헐적 양수의 경우 양수량/함양량의 비가 1인 연속 양수의 경우(양수량 5mL/min, 함양량 5 mL/min) 보다 S.M.I. 값이 최대 44%까지 감소하여 해수침투가 저지되고 있음을 알 수 있었다.

간헐적 양수의 경우 양수 중지 후에도 지점별 S.M.I. 변화 양상 및 S.M.I.값의 증가량이 낮게 나타나 인공수조 내 함양관을 중심으로 해수침투가 함양수에 의하여 계속 저지되고 있음을 알 수 있었다. 이는 Kang 등²¹⁾의 연구결과와 일치하며 적절한 양수량/함양량의 비 및 양수 유형에 따라 해수침투를 방지할 수 있음을 확인하였다. 즉 일정 유량의 간헐적인 양수 조건에서 해수 침투를 방지하는 동시에 지하수를 안정적으로 취수할 수 있었다.

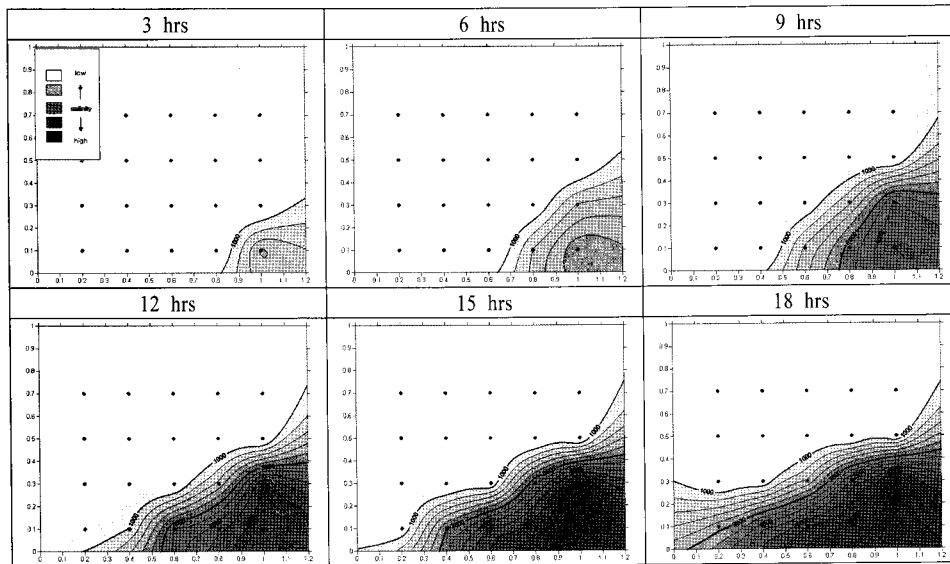


Fig. 5. The temporal variation of interface between saline and fresh water for 5 mL/min of recharge and 5 mL/min of continuous extraction.

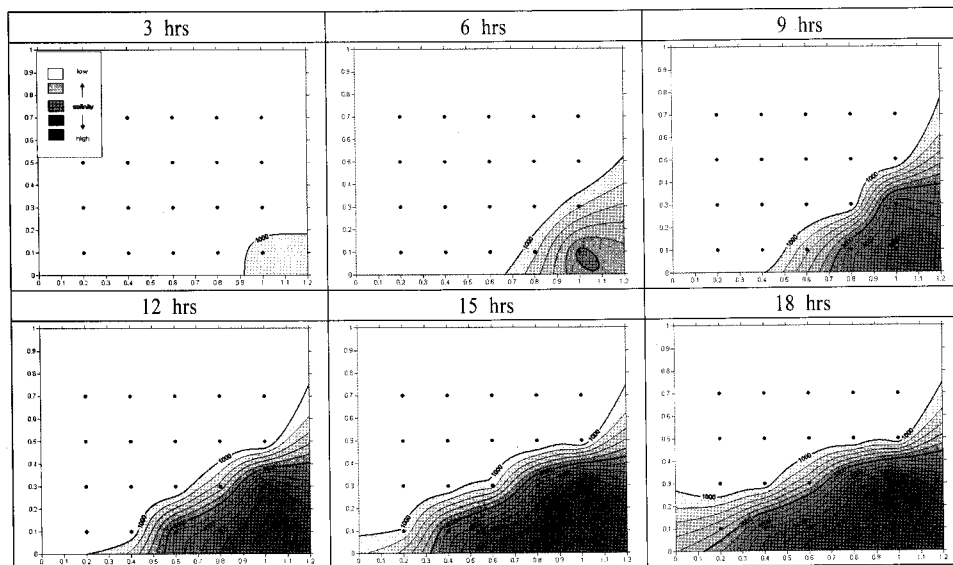
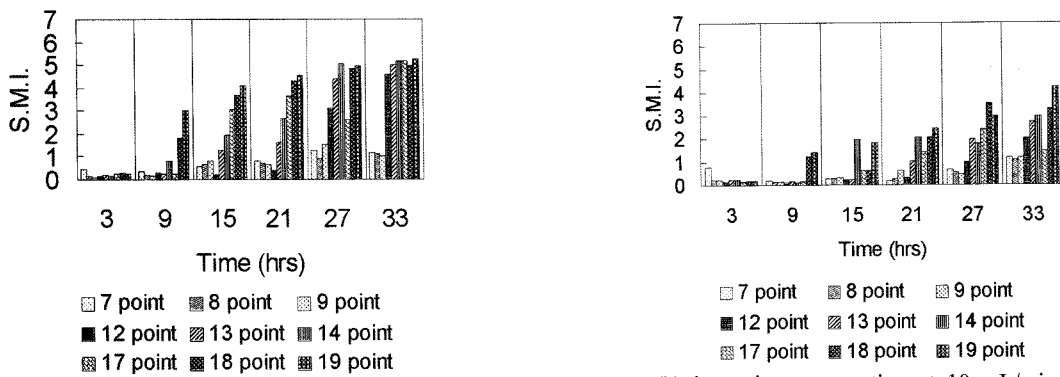


Fig. 6. The temporal variation of interface between saline and fresh water for 5 mL/min of recharge and 10 mL/min of intermittent extraction.



(a) continuous extraction at 5 mL/min

(b) intermittent extraction at 10 mL/min

Fig. 7. The comparison of S.M.I. values at the various sampling points between continuous 5 mL/min and intermittent 10 mL/min extraction for 5 mL/min of recharge.

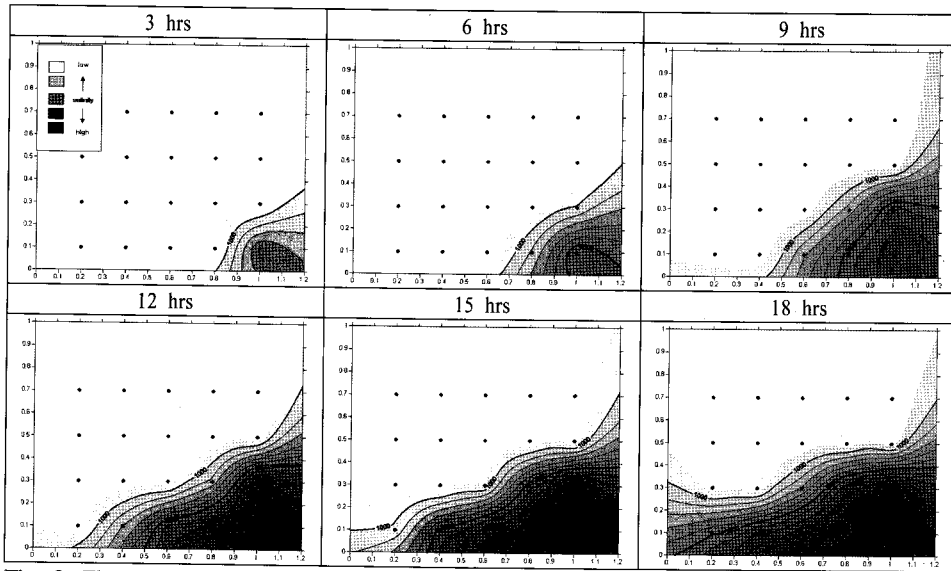


Fig. 8. The temporal variation of interface between saline and fresh water for 5 mL/min of recharge and 10 mL/min of continuous extraction.

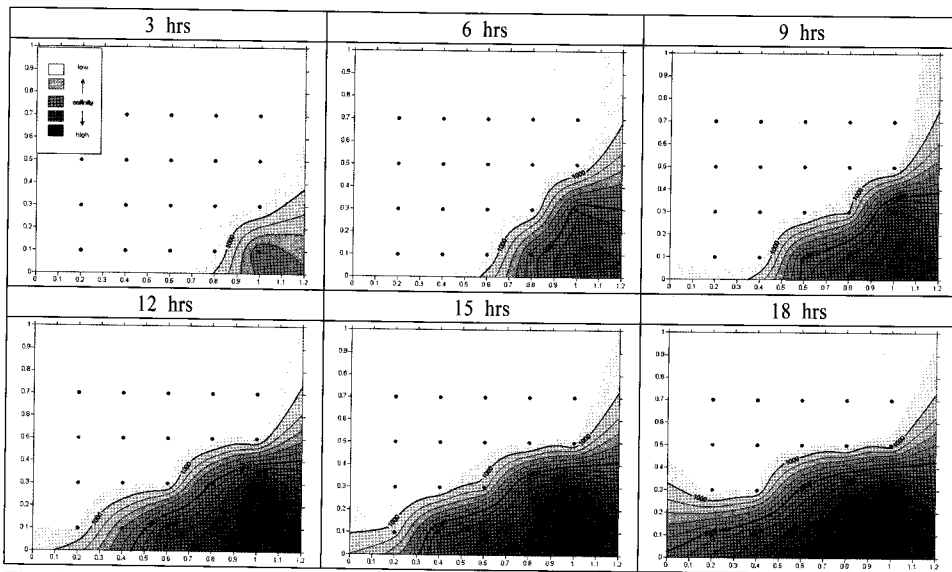


Fig. 9. The temporal variation of interface between saline and fresh water for 5 mL/min of recharge and 20 mL/min of intermittent extraction.

2) 일정 인공함양 조건(5 mL/min)에서 양수방식(연속: 10 mL/min, 간헐: 20 mL/min)에 따른 염수침투 특성 비교

36시간 동안 연속적으로 수조 양단(왼쪽: 담수, 오른쪽: 염수)에 3 mL/min의 유속으로 담수 및 염수를 유입시키면서 인공함양관을 통하여 인공하수 처리수를 5 mL/min의 유량으로 일정하게 주입하였다. 양수 방식에 따른 총 양수 유량이 동일하도록 연속 및 간헐 양수를 다음과 같이 수행하였다. 먼저 연속 양수의 경우 36시간 동안 10 mL/min 유량을 양수관을 통하여 양수하여 총 양수 유량이 21.6 L가 되도록 하였다. 한편 간헐 양수의 경우 실험개시 후 전반 18시간 동안 20 mL/min의 유량으로 양수정을 통하여 양수한 후, 연이은 후반 18시간 동안 양수를 중지시켜 총 양수유량이 연속 양수 유량과 동일한 21.6 L가 되도록 조절하였다. Fig. 8 및

9에 나타난 바와 같이 양수 방식에 따른 담수/염수의 침투 경계면의 거동은 큰 차이가 없었다. 그러나 20 mL/min의 유량으로 간헐적으로 양수한 경우 인공수조의 담수/염수 경계면 내부의 비전도도가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 두 경우 모두 양수의 총량은 같으나 간헐 양수의 경우 양수량이 인공함양에 비하여 4배 높은 20 mL/min로 함양 대비 매우 높은 양수로 인하여 주어진 함양량에 의하여 염수 침투가 저지되지 못함을 알 수 있다(Fig. 10).

3) 일정 함양 조건(10 mL/min)에서 양수 방식(연속: 5 mL/min, 간헐: 10 mL/min)에 따른 염수침투특성 비교

36시간 동안 연속적으로 수조 양단(왼쪽: 담수, 오른쪽: 염수)에 3 mL/min의 유속으로 담수 및 염수를 유입시키면서

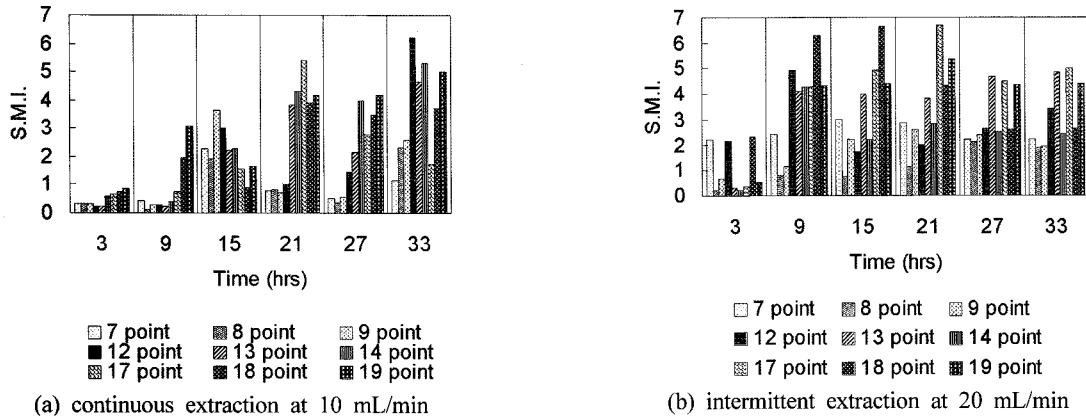


Fig. 10. The comparison of S.M.I. values at the various sampling points between continuous 10 mL/min and intermittent 20 mL/min extraction for 5 mL/min of recharge.

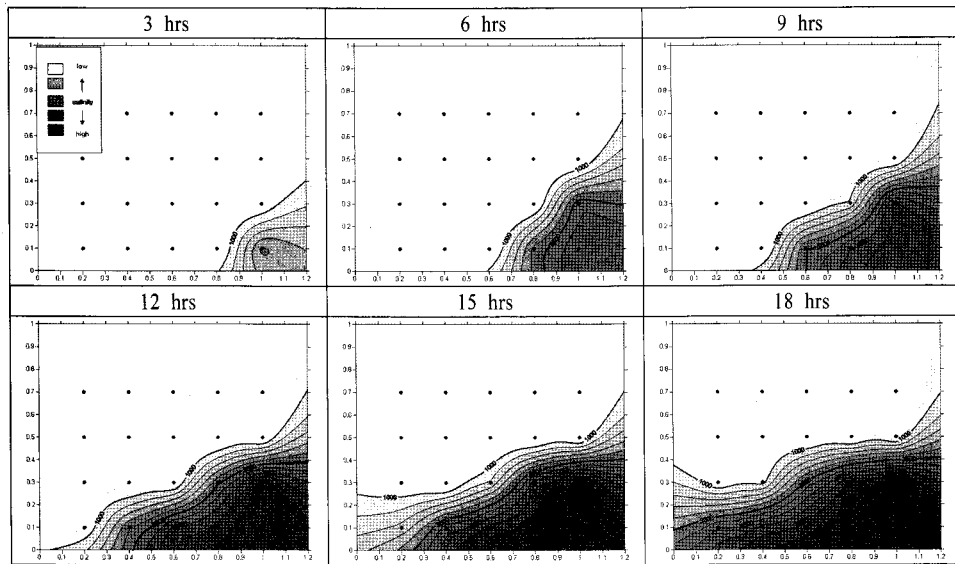


Fig. 11. The temporal variation of interface between saline and fresh water for 10 mL/min of recharge and 5 mL/min of continuous extraction.

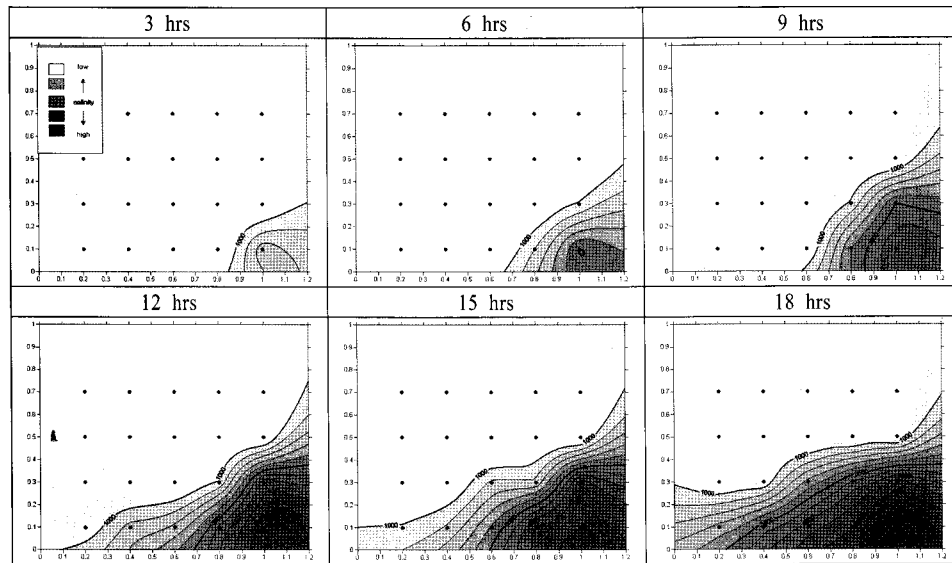


Fig. 12. The temporal variation of interface between saline and fresh water for 10 mL/min of recharge and 10 mL/min of intermittent extraction.

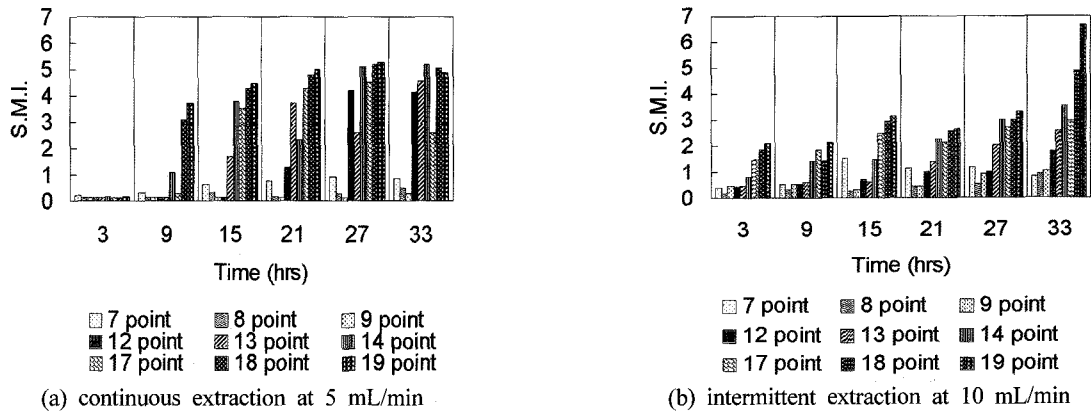


Fig. 13. The comparison of S.M.I. values at the various sampling points between continuous 5 mL/min and intermittent 10 mL/min extraction for 10 mL/min of recharge.

인공함양관을 통하여 인공하수 처리수를 10 mL/min의 유량으로 일정하게 주입하였다. 양수 방식에 따른 총 양수 유량이 동일하도록 연속 및 간헐 양수를 다음과 같이 수행하였다. 먼저 연속 양수의 경우 36시간 동안 5 mL/min 유량을 양수관을 통하여 양수하여 총 양수 유량이 10.8 L가 되도록 하였다. 한편 간헐 양수의 경우 실험개시 후 전반 18시간 동안 10 mL/min의 유량으로 양수정을 통하여 양수한 후, 연이은 후반 18시간 동안 양수를 중지시켜 총 양수유량이 연속 양수 유량과 동일한 10.8 L가 되도록 조절하였다.

Fig. 11 및 12에서 보는 바와 같이 양수량이 2배 높은 간헐 양수의 경우 연속 양수에 비하여 상대적으로 염수의 침입이 적었으며 Fig. 13에서 보는 바와 같이 전반적으로 S.M.I. 값도 낮게 나타났다. 따라서 함양량에 비해 2배의 간헐 양수 조건을 유지할 경우 해수 침투를 방지하는 동시에 연안 담수대수층을 안정적으로 보존하면서 지하수를 이용할 수 있음을 확인하였다.

4) 일정 함양 조건(10 mL/min)에서 양수방식(연속: 10 mL/min, 간헐: 20 mL/min)에 따른 염수 침투 특성 비교

36시간 동안 연속적으로 수조 양단(왼쪽: 담수, 오른쪽: 염수)에 3 mL/min의 유속으로 담수 및 염수를 유입시키면서 인공함양관을 통하여 인공하수 처리수를 10 mL/min의 유량으로 일정하게 주입하였다. 양수 방식에 따른 총 양수 유량이 동일하도록 연속 및 간헐 양수를 다음과 같이 수행하였다. 먼저 연속 양수의 경우 36시간 동안 10 mL/min 유량을 양수관을 통하여 양수하여 총 양수 유량이 21.6 L가 되도록 하였다. 한편 간헐 양수의 경우 실험개시 후 전반 18시간 동안 20 mL/min의 유량으로 양수정을 통하여 양수한 후, 연이은 후반 18시간 동안 양수를 중지시켜 총 양수유량이 연속 양수 유량과 동일한 21.6 L가 되도록 조절하였다.

실험기간동안 양수 방식에 따른 총 양수량이 연속 및 간헐 조건 모두 21.6 L로 동일하더라도 간헐 양수의 경우 연속 양수의 경우보다 함양량이 양수량에 비해 1/2로 감소하여 염

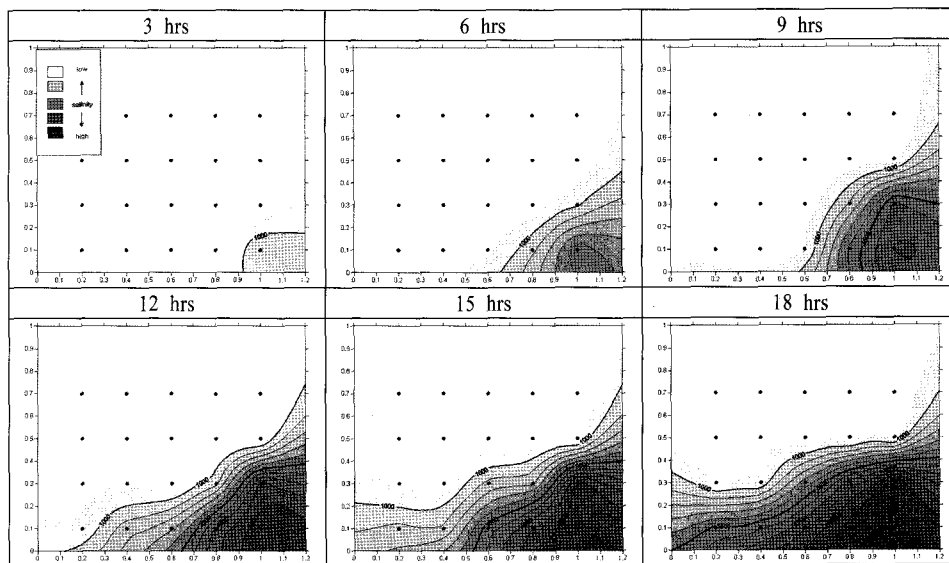


Fig. 14. The temporal variation of interface between saline and fresh water for 10 mL/min of recharge and 10 mL/min of extraction.

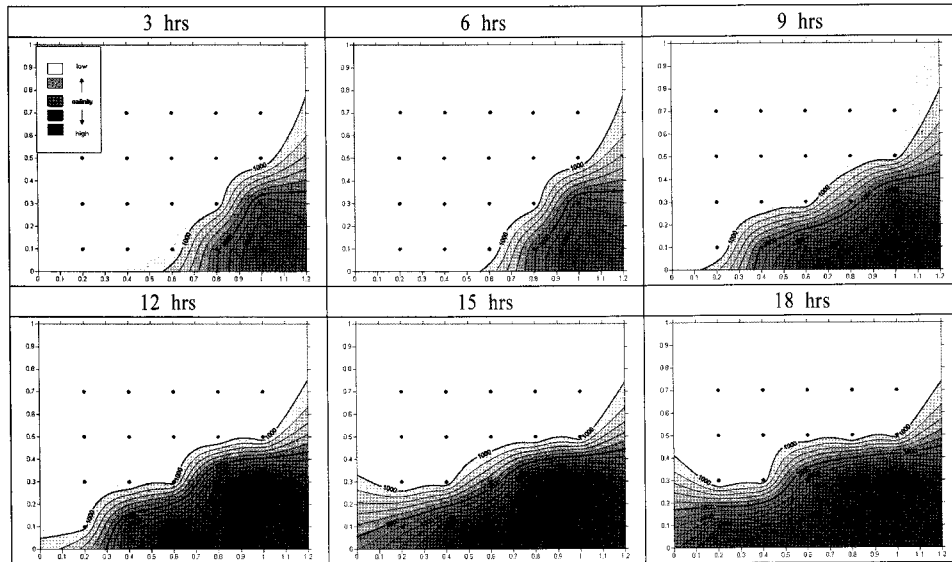


Fig. 15. The temporal variation of interface between saline and fresh water for 10 mL/min of recharge and 20 mL/min of intermittent extraction.

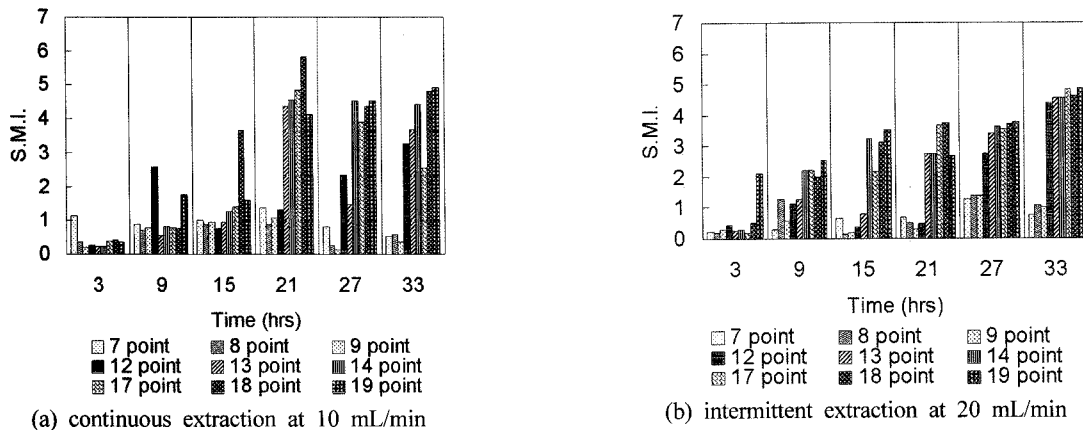


Fig. 16. The comparison of S.M.I. values at the various sampling points between continuous 10 mL/min and intermittent 20 mL/min extraction for 10 mL/min of recharge.

수가 더 빠른 속도로 침투함을 알 수 있었다. 또한 Fig. 14 및 15에서 보는 바와 같이 간헐 양수의 경우 연속 양수에 비하여 비전도도가 크게 증가하는 동시에 등비전도도선의 등간격도 조밀하게 형성되었다. 한편 Fig. 16에서 보는 바와 같이 S.M.I 값은 두 가지 실험 조건에서 큰 차이를 보이지 않았으나 양수량이 큰 간헐 조건으로 양수를 하더라도 함양량과의 비에 관계없이 염수침투가 심각하게 초래됨을 알 수 있었다.

4. 결론

인공 수조를 이용하여 연속, 간헐 양수 및 함양 조건 변화에 따른 담수/염수 이동 경계면의 특성 및 S.M.I값을 통한 해수 침투 방지 및 복원을 위한 연구 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 일정한 함양 조건에서 양수량 증가는 양수량/함양량의

비가 0.5~2일 경우 효율적으로 해수 침투를 방지하는 일종의 수리학적 방벽(barrier) 역할을 하였다. 그러나 양수량/함양량의 비가 4이상일 경우 상대적으로 큰 양수량은 염수의 침투를 유발하였다.

- 2) 일정 함양 조건에서 연속 및 간헐 양수 조건의 비교 실험 결과 간헐적인 양수조건에서 양수 증지 후 함양량이 증가할수록 염수대의 분포 범위는 축소되었으며 동시에 비전도도도 감소되어 적절한 비율의 간헐적 양수량/함양량 조건은 해수침투를 저지할 수 있음을 확인하였다.

- 3) S.M.I. 인자에 의한 해수 침투 평가는 전기전도도 측정에 의한 2차원적인 등비전도도 평가방법보다 더 명확하게 해수 침투 여부를 평가할 수 있었다.

- 4) 담수대의 분포 및 비전도도 변화는 양수량/함양량의 비, 함양량 같은 인자에 영향을 받으므로 연안역의 지하 대수층 개발 시 양수량/함양량의 비, 양수 및 함양 지속 시간은 해수 침투에 심각한 영향을 초래할 수 있으므로 양수량/함양량의

비, 함양량 등에 대한 최적 값의 설정은 해수 침투 방지 및 복원에 매우 중요한 영향을 미치리라 판단되었다.

사 사

이 논문은 한국학술진흥재단의 지역대학 우수과학자 지원 사업으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 한정상, 지하수환경과 오염, 초판, 박영사, 서울, pp. 976~994(1998).
2. Freeze, R. A. and Cherry, J. A., Groundwater, Prentice Hall, New Jersey, pp. 375~378(1979).
3. 이상규, 황세호, 황학수, 박인화, "임해지역 해수침투 평가를 위한 폴리검층의 적용성," 한국물리탐사학회지, 3(3), 1~6(2000).
4. 심병완, 정상용, "SHARP 모델을 이용한 해안 대수층의 해수침투 경계면 추정," 한국지하수토양환경학회지, 8(1), 68~74(2003).
5. 황학수, 이상규, 고동찬, 김양수, 박인화, "전기비저항 모니터링을 이용한 해수침투 파악," 한국물리탐사학회지, 3(1), 1~6(2000).
6. Kim, C. G., "Detection and transport of multiphase organic waste(heterocyclic sulphur compounds) through alluvium/weathered rock aquifers at hazardous waste disposal site," A thesis submitted for admission to the degree of doctor of philosophy at University of Queensland(1999).
7. Lee, S. S., Kim, J. S., Kim, D. J., "Groundwater flow modeling for a finite unconfined sandy aquifer in a laboratory scale," *Journal of the Korean Society of Groundwater Environmental*, 6(4), 188~193(1999).
8. Fetter, C. W., Applied Hydrogeology, 3rd ed., Prentice Hall, New Jersey, pp. 533~536, 84~86(1994).
9. 김건영, 고용권, 김천수, 김형수, 김성이, "강변여과수 개발을 위한 낙동강 충적층 지하수의 지구화학적 특성연구," *The Journal of Engineering Geology*, 13(1), 83~105(2003).
10. Vukovic, M. and Soro A., Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition, Water Resources Publication, Littleton,(1992).
11. 배재근, 오종민, 환경인을 위한 토양오염 측정 분석, 1st edition, 신광문화사, 서울, pp 103~107(2002).
12. 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).
13. UNEP International Environmental Technology Centre (IETC), <http://www.unep.or.jp/webm>(2005).
14. 박세창, 윤성택, 채기탁, 이상규, "서해 연안지역 천부지하수의 수리지구화학 : 연안 대수층의 해수 혼입에 관한 연구," 지하수토양학회지, 7(1), 63~77(2002).
15. Sinclair, A. J., Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs, *Journal of Geochemical Exploration*, 3(2), 129~149(1974).
16. 원종호, 김정우, 차우석, 최희철, "Soil Aquifer Treatment (SAT)에서 주입-건조 주기의 변화에 따른 유기물 및 질소화합물 제거," 대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문집, 전북대학교, 498~504(2004).
17. 김옥배, "지구화학탐사에서 자료집단의 Threshold 결정을 위한 통계치리에 관한 연구," 대한광산학회지, 22, 207~214(1985).
18. 김동주, 하현철, 온한상, "자유면 대수층 모형에서의 Time Domain Reflectometry를 이용한 해수침투 모니터링," 대한지질학회지, 13(1), 17~27(2003).
19. 김옥배, 박희열, "해수침투에 의한 지하수 수질오염 판별을 위한 환경지구화학적 연구," 한국자원공학학회지, 34, 548~558(1997).
20. 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 groundwater in the coastal area of Kimje, Korea," *J. Hydrology*, 30, 188~198(2005).
21. 강정욱, 이소정, 김창균, "인공하수 주입 및 양수에 따른 대수층의 수리학적 특성 연구," 대한환경공학회, 27(9), 995~1005(2005).