The Journal of Engineering Geology, Vol.13, No.1, March, 2003.pp.17-27

자유면 대수층 모형에서의 TIME DOMAIN REFLECTOMETRY를 이용한 해수침투 모니터링

Monitoring of Seawater Intrusion in Unconfined Physical Aquifer Model using Time Domain Reflectometry

김 동 주 (Dong-Ju Kim)* 고려대학교 지구환경과학과
하 헌 철 (Heon-Cheol Ha) 고려대학교 지구환경과학과
온 한 상 (Han-Sang On) 고려대학교 지구환경과학과

요약 / ABSTRACT

본 연구에서는 해수침투에 관한 기존 이론을 검증하고 지하수 함양량과 양수량의 변화에 따른 담-염수 경계면 이동현상을 고찰하기 위하여 실내 모형규모의 자유면 대수층에서 시간 영역 광전자파 분석기 (Time Domain Reflectometry: TDR)를 이용하여 2차원 염수침투 현상을 관측하였다. 실험 결과 염수와 담수의 경계면에서는 분산 혹은 확산에 의한 혼합대 (mixing zone)가 두텁게 형성되었으며 Badon Ghyben과 Herzberg가 가정한 비혼합 경계면 (sharp interface)은 형성되지 않았다. 따라서 본 연구에서 획득한 기준 해수면에 대한 자유수면(H_f)과 염수 경계면(H_s)까지의 깊이의 비에 관한 실험치와 Ghyben-Herzberg 근사법의 이론치가 일치하지 않음을 알 수 있었다. 한편, 함양량과 양수량을 달리하면서 경계면의 변화를 관찰한 결과 주어진 함양량에 대하여 양수량이 증가함에 따라 경계면의 이동속도가 증가하였고, 본 모형조건하에서 경계면의 이동속도는 함양량에 대한 양수량의 비 (Q_p/Q_r)에 약 7배나 달하는 것으로 나타났으며 이는 해안선에 인접한 해수 침투 취약지역에서는 양수량이 아주 중요한 역할을 한다는 것을 지시한다.

주요어 : 해수침투, 담-염수 경계면, TDR, 자유면 대수층

In this study, a phenomenon of saltwater intrusion was monitored under various conditions regarding recharge and pumping rate using time domain reflectometry for a laboratory scale unconfined aquifer to verify the basic theory behind seawater intrusion and to investigate movement of salt-freshwater interface in accordance with the ratio of pumping and recharge rate. Results showed that a thick mixing zone was formed at the boundary instead of a sharp salt-freshwater interface that was assumed by Ghyben and Herzberg who derived an equation relating the water table depth (H_f) to the depth to the interface (H_s). Therefore our experimental results did not agree with the calculated

* Corresponding auther: djkim@korea.ac.kr

values obtained from the Ghyben and Herzberg equation. Position of interface which was adopted as 0.5 g/L isochlor moved rapidly as the pumping rate (Q_p) increased for a given recharge rate (Q_r). In addition, interface movement was found to be about 7 times the ratio of Q_p/Q_r in our experimental condition. This indicates that pumping rate becomes an important factor controlling the seawater intrusion in coastal aquifer.

Key Words : seawater intrusion, salt-freshwater interface, TDR, unconfined aquifer

서 론

해안선 부근에서 해수가 대수층을 따라 담수 지하수계로 침입하는 해수침투는 강우량, 증발산량 변화에 따른 지하수면의 높이 변화, 조석에 의한 해수면 변화, 해수와 담수간의 밀도차 등 주로 자연적인 요인에 의하여 발생하며 투수성 퇴적층이나 단층파쇄대의 공간적 분포 등 지질학적 특성에 의하여 그 정도가 좌우되는데, 최근에는 임해지역에서의 무분별한 지하수 개발과 과다 양수 등 인위적인 요인에 의하여 내륙으로 확산되고 있어 문제가 커지고 있다. 우리나라에서의 해수침투에 관한 사례는 제주도와 같은 도서지역 (최순학 외, 1989; 최순학 외 1991; 이성복 외; 1997)과 서해안 중부 지대 (Jeen et al., 2001), 서해안 연안지역 (박세창 외, 2002), 임해지역 (김천수 외, 1997), 그리고 부산 동남해안 지역 (심병완 외, 2002a)에 대하여 보고된 바 있다. 이러한 사례연구는 대부분이 지구화학적 연구에 국한되었으나 최근에는 연안지역에서의 해수침투의 범위와 농도분포 등을 해석하기 위한 수리동역학적 모델링 연구도 시도되었으며 그 대표적인 사례로서 담염수 경계면에서의 분산을 고려하지 않은 비확산 모델 연구 (박남식 외, 1997)와 분산을 고려한 모델 연구(심병완 외, 2002b)를 들 수 있다.

해수침투에 의하여 지하수가 염수화 되면 복구에 막대한 비용과 시간이 소요되며 완전한 원상회복이 거의 불가능한 치명적인 재해를 가져온다. 해수침투에 의한 담수 지하수의 염수화 피해를 최소화하고 효율적인 지하수의 이용과 관리를 위해서는 수리지질학적 초기 및 경계조건을 쉽게 조절할 수 있는 모형연구 (Lee et al., 2001; Zhang et al., 2001)를 통하여 해수침투 현상의 원리를 고찰하고 해수침투에 가장 크게 영향을 주는 수리지질학적 인자를 도출하는 것이 요구된다.

따라서 본 연구의 목적은 현장조사 방법의 단점을 보완한 실내 자유면 대수층 모형에서 시간영역 광전자파 분석기 (Time Domain Reflectometry, TDR) (Kim, 1996; Jacques et al., 1998; Kim et al., 1998)을 이용하여 다양한 recharge 및 pumping rate 조건하에서 2차원 해수침투 현상을 모니터링하고 관측결과를 기존의 이론치와 비교분석함으로써 비확산 모델의 타당성을 검증하는데 있다. 또한 다양한 보충수량에 대한 양수량의 비 에 대한 해담수 경계면의 이동현상을 측정하므로써 양수량이 해수침입에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

이 론

Ghyben-Herzberg 근사법

해수와 담수의 경계면의 위치를 예측하기 위하여 해수밀도와 담수밀도, 담수의 수두와 기준 해수면에서 경계면까지의 깊이와의 관계를 나타낸 식이 다음과 같다.

$$H_s = [\gamma_f/(\gamma_s - \gamma_f)]\, H_f = \delta H_f \quad (1)$$

$$\delta = \gamma_f/(\gamma_s - \gamma_f) \quad (2)$$

여기에서 H_s는 육지의 임의의 지점에서 해수면으로부터 담수-염수 경계면까지의 깊이이고, H_f는 해수면을 기준으로 한 담수의 수두. γ_s는 해수의 밀도, γ_f는 담수의 밀도이다. 식 (1) 혹은 (2)는 Ghyben (1889)과 Herzberg (1901)에 의해서 밀도가 다른 2개의 유체가 U관내에 있을 때

각 유체의 기둥 높이에 대한 정수압 평형조건으로부터 도출되었으며 (Fig. 1), 여기에는 2개의 중요한 가정이 포함된다. 첫째, 해수와 담수는 비혼합 (immiscible)유체로 가정하여 해수-담수 경계면에서는 비혼합 경계면 (sharp interface)이 성립되어야 하며 둘째, Dupuit의 가정에 의하여 담수층의 두께가 담수와 해수가 만나는 해안선에서는 영이 되어야 한다는 것이다.

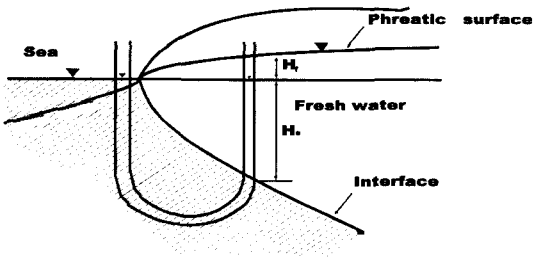

Fig. 1. Ghyben-Herzberg approximation of estimating a depth(Hs) to the salt-freshwater interface in an unconfined coastal aquifer.

자유면 대수층에서의 해수침투 이론

2차원 수평 자유면 대수층 조건에서의 경계면 선단부의 길이(L), 우물에서의 담-염수 경계면 높이 (z_i)등은 Fig. 2와 같이 도식적으로 표현될 수 있으며 (Raudkivi and Callander, 1976), 대수층 단위폭당 유량을 Q라고 할 때,

$$Q=-K_f\frac{dh_f}{dx}(h_f-z_i) \qquad (3)$$

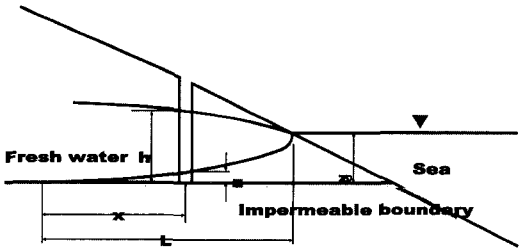

Fig. 2. Schematic diagram used for delineation of salt-freshwater interface in an unconfined coastal aquifer.

여기서, K_f 는 담수층에서의 투수계수이고, h_f는 대수층 바닥으로부터 지하수면까지의 높이,

그리고 x는 담-염수 경계면 선단부에서부터 해안으로의 거리이다.

또한 담-염수 밀도차에 의한 Ghyben-Herzberg 이론에 따라

$$h_f-z_o=\frac{\triangle\gamma}{\gamma_f}(z_o-z_i) \qquad (4)$$

여기서 $\triangle\gamma$, z_o는 각각 염수와 담수의 밀도차, 대수층 바닥면에서 기준 해수면까지의 높이이다. 식 (4)의 h_f를 x에 대하여 미분하여 식 (3)에 대입하여 정리하면

$$Q=K_f\frac{\triangle\gamma}{\gamma_f}\frac{dz_i}{dx}(1+\frac{\triangle\gamma}{\gamma_f})(z_o-z_i) \qquad (5)$$

식 (5)에서 Q를 x에 대하여 적분하면,

$$\int Qdx=\int K_f\frac{\triangle\gamma}{\gamma_f}(1+\frac{\triangle\gamma}{\gamma_f})(z_o-z_i)dz_i \qquad (6)$$

따라서,

$$Qx=K_f(1+\frac{\triangle\gamma}{\gamma_f})\frac{\triangle\gamma}{\gamma_f}(z_oz_i-\frac{1}{2}z_i^2) \qquad (7)$$

여기서 $x = 0 \rightarrow z_i = 0$

$x = L \rightarrow z_i = z_o$ 이므로

$$QL=\frac{1}{2}K_f(1+\frac{\triangle\gamma}{\gamma_f})\frac{\triangle\gamma}{\gamma_f}z_o^2 \qquad (8)$$

따라서, 담-염수 경계면의 선단 (toe) 길이 L은 식 (9)와 같이 주어진다.

$$L=\frac{1}{2}\frac{\triangle\gamma}{\gamma_f}\frac{\gamma_s}{\gamma_f}\frac{K_fz_0^2}{Q_0} \qquad (9)$$

또한 식 (7)로부터

$$z_i^2-2z_0z_i=-\frac{2Q_0x}{K_f}\frac{\gamma_f}{\triangle\gamma}\frac{\gamma_f}{\gamma_s} \qquad (10)$$

식 (10)을 z_i에 관해서 풀면,

$$z_i = z_o - \left(-\frac{2\,Q_0 x}{K_f}\,\frac{\gamma_f}{\triangle\gamma}\,\frac{\gamma_f}{\gamma_s} + z_o^{\,2}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{11}$$

식 (11)로부터 주어진 지하수 함양량, 투수계수, 담염수 밀도, 그리고 대수층 바닥면으로부터 해수면까지의 높이 등을 알면 경계면 선단부에서 임의의 거리 x만큼 떨어진 지점에 위치한 우물에서의 담-염수경계면의 높이를 추정할 수 있게 된다.

재료 및 방법

실내 대수층 모형

해수침투 현상을 모형화하여 해수와 담수간의 경계면을 관찰하기 위하여 실험실 규모의 사질 자유면 대수층 모형을 제작하였다 (Fig. 3). 대수층 모형은 폭 50cm, 높이 150cm, 길이 160cm이며, 불포화대와 포화대의 두 부분으로 구성되었다. 조사(coarse sand)와 자갈의 혼합토로 구성된 포화대는 바닥에서부터 50cm까지이며, 세사 (fine sand)로 구성된 불포화대는 포화대 상부로부터 80cm까지이다.

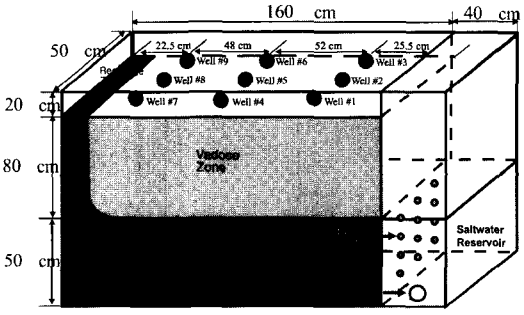

Fig. 3. Physical aquifer model to simulate salt-freshwater interface in a laboratory scale.

모형의 우단에 폭 50cm, 높이 150cm, 길이 40cm의 염수조 (saltwater reservoir)가 위치하며 대수층과 염수조의 벽면에는 지름 2.5cm의 12개의 유출구를 만들어 지하수와 염수의 원활한 유출입을 유도하였다. 대수층 모형의 상류, 중류, 하류에 각각 3개씩의 piezometer 우물을 설치하여 지하수위와 지하수의 전기전도도(Electrical Conductivity, EC) 변화를 측정하였다. 또한 담-염수 경계면의 이동을 모니터링하기 위하여 대수층 모형 전면에 길이 10 cm의 2선 TDR 탐침을 수직 수평방향으로 70개 설치 하였다 (Fig. 4).

경계면 이동실험

사력토에 의한 자유면대수층 성형과 탐침 설치가 완료된 후 상류부에 peristaltic pump를 사용하여 함양량 (Q_r)을 25 mL/min으로 하여 정상류 상태의 흐름을 부과하였으며 상중하류의 piezometer 우물에서 지하수위를 측정하여 대수층 매질체의 투수계수 (K_f)를 구하였다. 그런 다음 지하수 함양을 중단한 후 정지흐름조건에서 모형 우단의 염수조에 다량의 NaCl을 투입하여 염수농도를 25,000 mg/L으로 유지하였으며 TDR탐침을 이용하여 대수층내에 분자분산 (molecular diffusion)에 의한 담-염수 경계면이 형성되는 것을 관찰하였다. 분자분산에 의한 경계면 형성 후 함양량을 25 mL/min으로하여 경계면 이동을 측정하였으며 TDR에 의한 경계면 측정은 평형상태 즉 담수와 염수의 하류와 상류방향으로의 운동에너지가 평형을 이루는 시점까지 계속되었다. 지하수 함양량을 부과한 경우, 담수의 유입에 따른 우단 수조의 염수 농도가 하강하였으므로 염수농도를 25,000 mg/L으로 일정하게 유지하기 위하여 매 시간별 일정량의 NaCl를 투입한 후 균질혼합하였다.

한편 함양량 (Q_r)과 양수량 (Q_p)의 변화에 따른 담-염수 경계면의 이동을 분석하기 위하여 Q_r= 25mL/min, 50mL/min의 두 조건에 대하여 염수조에서 가장 멀리 떨어진 상류측 양수정 #7, 8, 9에서 각각 양수한 양의 합이 Q_p= 25, 50, 100, 200 mL/min이 되도록 양수함으로써 각 조건에 따른 경계면의 이동을 관측하였다.

TDR 보정

대수층 모형에 설치된 TDR 탐침에 의한 측정치는 저항이므로 이를 염농도 (g/L)로 환산하기 위해서는 TDR 탐침에 대한 보정이 요구된다. 이를 위해 500mL의 유리 용기에 대수층 매질체를

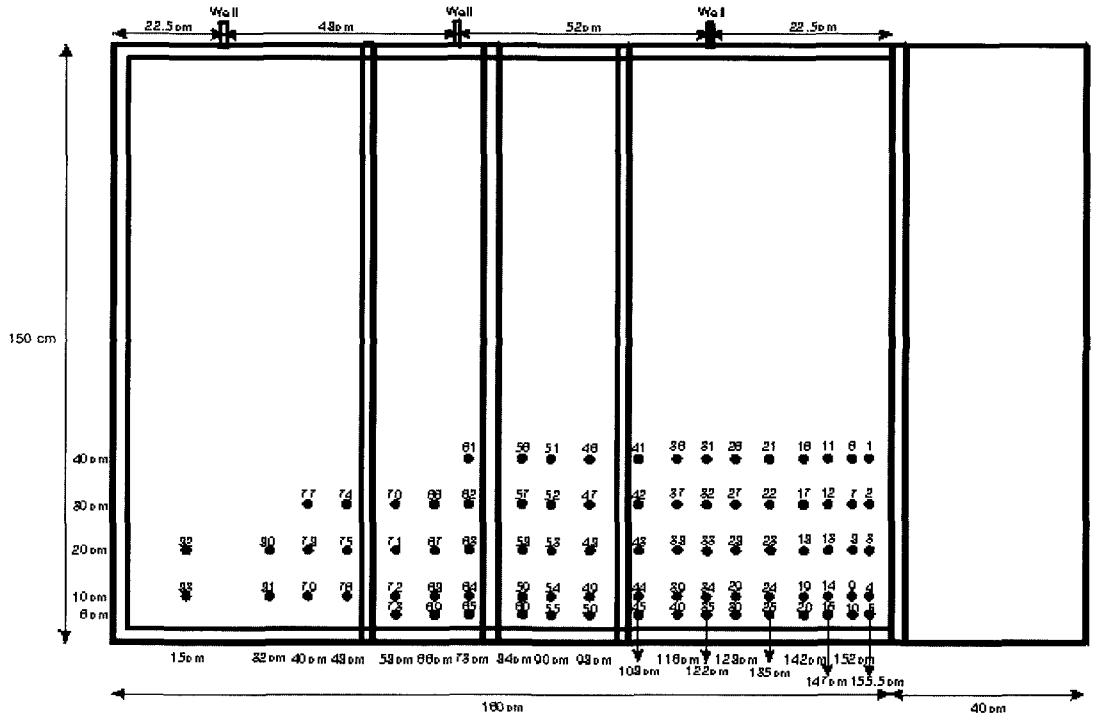

Fig. 4. Plan view of Time Domain Reflectometry(TDR) installed in the front side of the physical aquifer model.

채운 후 NaCl 용액(0, 1, 2, 3, 5, 20 g/L)으로 포화시킨 후 Cable tester (Tektronix 1502B)를 이용하여 각각의 농도에 따른 저항치 (R)를 측정하였다. 일반적으로 염농도 (C) 와 저항 (R)간에는 반비례 관계가 성립하므로 NaCl 농도 (g/L)와 1/R의 상관관계를 이용하여 측정한 저항치를 농도로 환산하였다 (Fig. 5).

결과 및 고찰

경계면 형성 모니터링

함양량이 없는 조건에서 해수의 분자분산에 의한 해수침투 양상을 관찰한 결과, 염수조에 NaCl 투입 초기에는 상당히 빠른 속도로 염분이 대수층 내로 이동하다가 시간이 경과함에 따라서 점차적으로 느려짐을 알 수 있었다. 염분의 공업용수 최대 허용치인 0.5g/L 선을 기준으로 속도를 계산해보면, 9분, 24시간, 68시간 경과후의 속도는 각각 246.6, 1.3, 0.8 cm/hr로 나타났다. 평형상태에 도달한 68시간 경과 후의 분자분산과 함양량 25 mL/min의 정상류 흐름에서의 담-염수 경계면

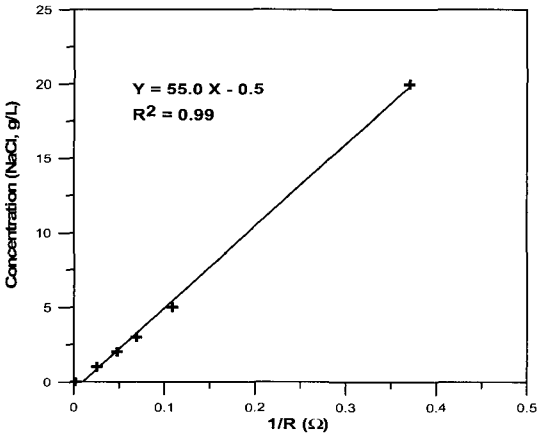

Fig. 5. Regression curve relating 1/R to NaCl concentration.

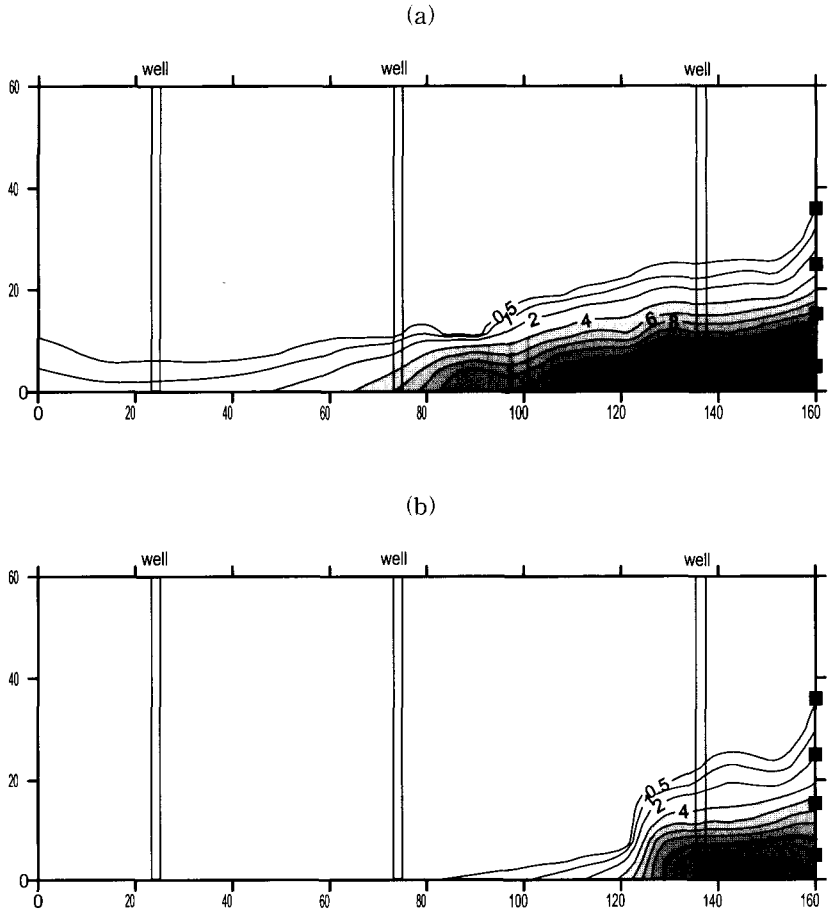

Fig. 6. Salt-freshwater interface formed by (a) diffusion after 68hr and (b) under a recharge rate of 25 mL/min. A thick solid line denotes a 0.5 isochlor.

형성에 관한 등염농도곡선 (Isochlor) (Huyakorn et al., 1987)이 Fig. 6(a), (b)에 도시되었다. 본 모형조건에서의 담-염수 경계면은 Ghyben-Herzberg가 가정한 비혼합 경계면이 형성되지 않았고 오른쪽 염수조 바닥면부터 좌측 상단의 담수지역으로의 점진적인 농도구배가 형성되어 매우 두꺼운 혼합대 (Reilly and Goodman, 1985)가 형성되었음을 알 수 있다. 본 연구에서는 약 20 cm ~ 30 cm 두께의 혼합대가 형성되었으며 이는 비슷한 규모의 모형 연구 결과(Zhang et al ., 2001)에서 약 4cm 두께의 혼합대가 형성된 것보다 훨씬 높게 나타났다. 이러한 혼합대의 형성과 해수침투에는 대수층 매질체의 고유특성인 분산지수가 큰 영향을 미치며 (Shim et al., 2002), 본 연구에서 나타난 두꺼운 혼합대의 형성은 기존의 동일 모형에서의 종분산지수에 대하여 수행한 Kim et al. (2001)의 연구결과 분산지수는 2.2 cm 에서 13.5 cm 범위였는 반면 Zhang et al (2001)이 수행한 모형에서의 분산지수는 0.06 cm에 불과하였다는 사실에 기인된다.

본 연구에서 설정한 모형 대수층 조건 (γ_f =1.000 g/cm^3 γ_s=1.025 g/cm^3, K_f =5.33cm/min, Q_0=25 mL/min/ 50 cm, z_0=

Table 1. Computed and observed values of parameters involved in Ghyben-Herzberg approximation(Eq.(2)) and estimation of interface toe(Eq. (9), (11))

	δ (-)	L (m)	z_i (cm)	h_f (cm)	$h_f - z_i$ (cm)
Computed	40	1.77	22.47	36.34	13.87
Observed	288	0.32	7.3	36.10	28.8

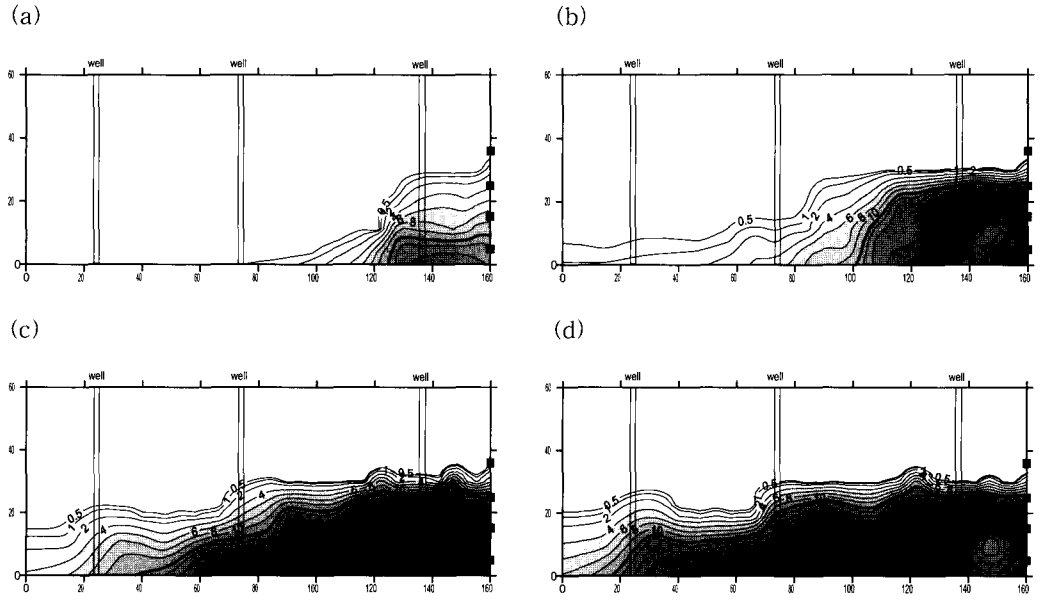

Fig. 7. Interface movement with time for Qr = 25 mL/min and Qp = 50 mL/min : (a) 0hr (b) 6hr (c) 12hr (d) 18hr. A thick solid line denotes a 0.5 isochlor.

36 cm)과 Fig. 6(b)에 표시된 담-염수 경계면에 관한 실측치 (z_i= 7.3 cm)를 Ghyben-Herzberg의 경계면에 대한 근사식 (식(2))과 자유면 대수층에서의 경계면 침투길이 (L), 그리고 우물의 바닥면에서부터 경계면까지의 높이 (z_i)를 산정하는 식 (9), (11)로부터 구한 이론치를 비교하였다 (Table 1). 그 결과 δ, L, z_i 값에서 실측치와 이론치 사이에 큰 차이를 보여주었으며 실측치가 훨씬 작게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 차이는 식 (2)와 식 (9)의 도출에 설정된 담-염수간의 비혼합 경계면의 가정에서 비롯되며 본 모형에서 관측된 것과 같이 혼합대가 비교적 두텁게 나타날 경우 경계면으로 0.5 isochlor를 사용하였으므로 식 (1)에서 H_s값이 증가하여 δ 이 증가하고 반면 경계면의 선단부까지의 침투길이 (L)과 우물 바닥면에서 경계면 까지의 높이 (z_i)는 감소하기 때문이다.

다양한 조건하에서의 경계면 이동 분석

다양한 함양량과 양수량 조건 중 대표적인 관측결과 (Q_r =25mL/min, Q_p= 50 mL/min와 Q_r =50 mL/min, Q_p= 100 mL/min)에 대하여 시간

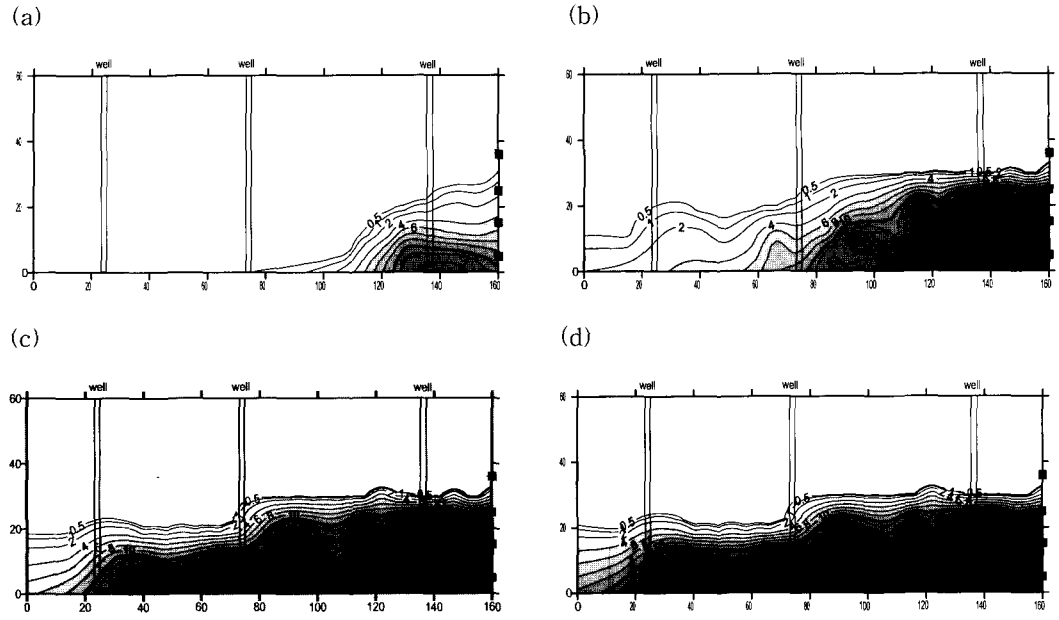

Fig. 8. Interface movement with time for Qr = 50 mL/min and Qp = 100 mL/min : (a) 0hr (b) 6hr (c) 12hr (d) 16hr. A thick solid line denotes a 0.5 isochlor.

Table 2. Speed of moving interface for various pumping rate when recharge rate = 25 mL/min

Pumping rate (mL/min)	25	50	100	200
Travel distance (cm)	2.09	86.80	63.79	105.63
Elapsed time (hr)	76.0	12.0	4.0	5.0
Speed of interface (cm/hr)	0.03	7.23	15.95	21.13

Table 3. Speed of moving interface for various pumping rate when recharge rate = 50 mL/min

Pumping rate (mL/min)	25	50	100	200
Travel distance (cm)	-9.41	37.65	115.04	103.53
Elapsed time (hr)	42.0	64.0	16.0	6.0
Speed of interface (cm/hr)	-0.45	0.59	7.19	17.26

에 따른 경계면 변화를 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 도시하였다. 두 경우 모두 주어진 함양량과 양수량에 대하여 시간이 경과함에 따라 0.5 g/L선과 0.5 isochlor가 상류부로 이동하였으며, 양수후 약 16-18시간만에 평형상태에 도달하는 것을 알 수 있었다. 각 함양량 조건별 양수량 변화에 따른 경계면 이동속도를 0.5 g/L선을 기준으로 산정한 결과가 Table 2와 Table 3에 각각 수록되었다. 두

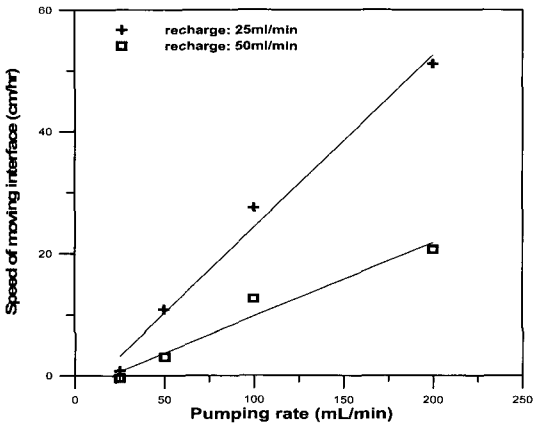

Fig. 9. Relationship between speed of moving interface and pumping rate for two different recharge rates.

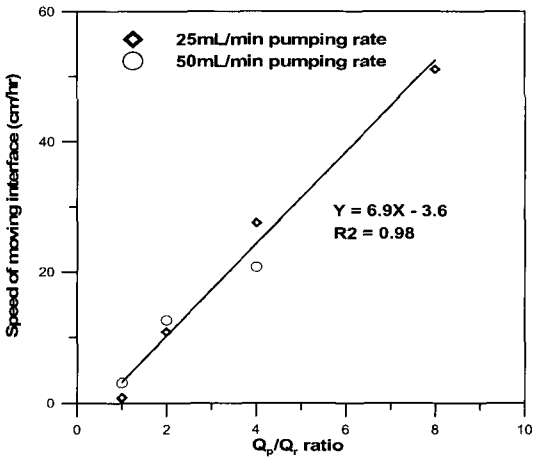

Fig. 10. Relationship between speed of moving interface and Qp/Qr.

경우 모두 양수량이 증가할수록 경계면 이동속도가 증가하였으며, Fig. 9에서 보는 것처럼 주어진 양수량에 대한 경계면 이동 속도는 함수량이 반으로 감소하였을 경우 반대로 그 증가폭이 약 2배 가량인 것으로 나타났다. 또한 함양량에 대한 양수량의 비 (Q_p/ Q_r)에 따른 경계면 이동속도의 변화 (Fig. 10)를 분석한 결과 이동속도가 양수량에 관계없이 Q_p/ Q_r 비의 약 7배에 달하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 양수량이 담-염수 경계면의 이동에 결정적인 역할을 한다는 것을 의미하며, 해안지역에서 주어진 지하수 함양량에 대하여 최대 허용한도 양수량의 결정에 귀중한 자료로 활용될 것으로 사료된다.

결 론

초기 및 경계조건의 설정이 자유로운 실내 대수층 모형과 시간 영역 광전자파 분석기 (TDR)을 이용하여 실험실 규모의 2차원 해수침투 현상을 관찰하고 해수면으로부터의 담-염수 깊이의 비와 경계면 침투길이에 관한 기존의 이론식을 검증하였다. 연구결과 본 연구에 사용된 자유면 대수층 모형 조건에서는 분산지수가 비교적 크게 나타나 Ghyben-Herzberg가 제시한 비혼합 경계면이 설정되지 않아 기존의 이론치와 큰 차이를 보였다. 따라서 이러한 경계면에 관한 이론식의 사용을 위해서는 대수층 지질매체가 가지고 있는 종분산지수의 결정이 선행되어야 하며, 비혼합 경계면 대신 두터운 혼합대가 형성될 수 있는 매질체에 대해서는 기존 이론식의 적용이 제한되어야 할 것이다. 또한 함양량과 양수량을 달리하면서 경계면의 변화를 관찰한 결과 양수량이 증가함에 따라 경계면의 이동속도가 증가하였고, 주어진 양수량에 대하여 함양량이 적을수록 경계면의 이동속도가 증가하였다. 함양량에 대한 양수량의 비 (Q_p/ Q_r)에 대한 경계면 이동속도를 분석한 결과 이동속도가 Q_p/ Q_r에 약 7배 가량으로 나타나 주어진 해안 유역에서 지하수 이용량이 해-담수 경계면 이동에 결정적 영향을 미친다는 것을 모형연구를 통하여 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 2002년도 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행되었으며 이에 감사드린다.

참 고 문 헌

김천수, 김경수, 배대석, 송승호, 1997, 임해지역 주변에서의 해수침투특성, 대한지하수환경학회, 4권, 2호, 61-72.

박남식, 이용두, 중-동 제주 수역의 지하수 개발로 인한 해수침투, 대한지하수환경학회, 4권, 1호, 5-13.

박세창, 윤성택, 채기탁, 이상규, 2002, 서해 연안지역 천부지하수의 수리지구화학: 연안 대수층의 해수 혼입에 관한 연구, 한국지하수토양환경학회지, 7권, 1호, 63-77.

심병완, 정상용, 김희준, 성익환, 김병우, 2002a, 지구물리 탐사자료의 지구통계학적 분석에 의한 부산 동남해안 지역의 해수침투 특성, 한국지하수토양환경학회지, 7권, 3호, 3-17.

심병완, 정상용, 김희준, 성익환, 2002b, 수리동역학적 모델링에서 분산지수에 따른 해수침투 범위의 변화, 한국지하수토양환경학회지, 7권, 4호, 59-67.

이성복, 김구영, 한소라, 한정상, 1997, 제주도 삼양 3수원지 염소이온농도 상승 원인에 관한 연구, 대한지하수환경학회, 4권, 2호, 84-94.

Choi, S.-H., Kim, Y.-K., 1989, Geochemical Characteristics of Groundwater in Cheju Island, Journal of Geological Society of Korea, v. 25, n. 3, 230-238.

Choi, S.-H., Kim, Y.-K., Lee, D.-Y., 1991, Sea Water Intrusion in the Coastal Area of Cheju Volcanic Island, Korea, Journal of Korean Institute of Mining Geology, v. 24, n. 3, 319-327.

Jacques, D., Kim, D.J., Diels, J., Venderborght, J., Vereecken, H., and Feyen, J., 1998, Analysis of steady state chloride transport through two heterogeneous field soils, Water Resources Research, v. 34, n. 10, 2539-2550.

Jeen S.W., Kim, J.M., Ko, K.S., Y, B.W., Chang, H.W., Hydrogeochemical characteristics of groundwater in a mid-western coastal aquifer system, Korea, Geosciences Journal, v. 5, n. 4, 339-348.

Kim, D.J., 1996, Application of an automated time domain reflectometry to solute transport study at field scale: Experimental methodology and calibration of TDR, Econ. Environ. Geol., v. 29, n. 6, 699-712.

Kim, D.J., Vanclooser, M., Feyen, J. and Vereecken, H., 1998, Simple linear model for calibration of time domain reflectometry measurements on solute concentration, Soil Science Society of america Journal, v. 62, n. 1, 83-89.

Kim, D.J., Kim, J.S., Yun, S.T. and Lee, S.H., 2002, Detemination of longitudinal dispersivity in an unconfined aquifer, Hydrological Processes, v. 15, 1955-1964.

Lee, S.S., Kim, J.S. and Kim, D.J., 2001, Monitoring of drawdown pattern during pumping in an unconfined physical aquifer model, Hydrological Processes, v. 15, 479-492.

Ghyben, B.W., 1889, Nota in verband met de voorgenomen put boring nabij Amsterdam, K. Inst. Ing. tijdschr., The Hague, 21.

Herzberg, A., 1901, Die Wasserversorgung einiger Nordsee Bader, J. Gasbeleucht. Verw. Beleuchtungsarten Wasservesorg, v. 44, 815-819.

Huyakorn, P.S., Andersen, P.F., Mercer, J.W. and White Jr., H.O., 1987, Saltwater intrusion in aquifers: Development and testing of a three-dimensional finite element model, Water Resources Research, v. 23, n. 2, 293-312.

Raudviki, A.J. and Callander, R.A, 1976, Analysis of Groundwater Flow, The Gresham Press, UK, 203p.

Reilley, T.E. and Goodman, A.S., 1985, Quantitative analysis of saltwater-freshwater relationships in groundwater

systems- A historical perspective, Journal of Hydrology, v. 80, 125-160.

Zhang, Q., Volker, R.E. and Lockington, D.A., 2001, Influence of seaward boundary condition on contaminant transport in unconfined coastal aquifers, Journal of Contaminant Hydrology, v. 49, 201-215.

투 고 일 2002년 12월 16일
심 사 일 2002년 12월 17일
심사완료일 2003년 2월 14일

김동주
고려대학교 지구환경과학과
136-701 서울특별시 성북구 안암동 5-1
Tel: 02-3290-3177
e-mail: djkim@korea.ac.kr

하헌철
고려대학교 지구환경과학과
136-701 서울특별시 성북구 안암동 5-1
Tel: 02-3290-3177

한온상
고려대학교 지구환경과학과
136-701 서울특별시 성북구 안암동 5-1
Tel: 02-3290-3177