

해안대수층에서 담수-염수 경계면 형성에 영향을 미치는 조건에 대한 실험적 연구

Experimental Study to Parameterize Salt-Wedge Formations in Coastal Aquifer

박 화 준* / 김 원 일** / 호 정 석*** / 안 원 식****

Park, Hwa Jun / Kim, Won Il / Ho, Jung Seok / Seo, Seong Kook / Ahn, Won Sik

Abstract

Saltwater intrusion in coastal aquifer was investigated using a laboratory model. Salt-wedge profiles were reproduced in a porous media tank 140 cm long, 70 cm high, and 10 cm wide. The experiments were performed with various conditions of porous media hydraulic conductivity, salinity, and ground surface slope to assess relationships on salt wedge location and inclination. Salt-wedge profiles induced by saltwater intrusion were observed in porous media equilibrium state, and compared with previously derived formulas of the Glover (1959), Henry (1959) and Strack (1976). It was found that salt-wedge shape and formations were affected by the water level ratio (H_F/H_S) due to high hydraulic conductivity, saltwater salinity and ground surface slope. High H_F/H_S of porous media having high hydraulic conductivity shifted the saltwater interface toward the saltwater reservoir. Increasing surface slope of the porous media caused the salt-wedge profile inclination to decrease. Saltwater salinity also contributed to the location of saltwater interface, yet the impact was not more significant than hydraulic conductivity.

Keywords : Saltwater intrusion, Freshwater-Saltwater interface, Salt-Wedge profile, Sandtank model, Coastal aquifer groundwater

요 지

해안대수층의 염수침투에 의한 담수-염수 경계면 특성을, 가로 140 cm, 세로 70 cm, 두께 10 cm 의 직사각형 모래수조 모형을 이용하여 모의하였다. 대수층 모형의 특성과 염수의 염도에 따른 총 31가지의 실험을 수행하였으며, 위치흐름 해석법을 유도한 Glover (1959)의 이론식과 호도그래프를 이용한 Henry (1959) 해석식 및 위치흐름 해석법을 이용한 Strack (1976)의 해석해 결과와 비교하였다. 대수층의 수리전도도, 해수의 염도, 그리고 해안가 지표경사에 따른 담수-염수 경계면의 위치와 기울기를 모의하였다. 다공질매체의 수리전도도와 해수의 염도가 높을수록 평형

* 수원대학교 대학원 토목공학과 박사과정
Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Suwon University, Gyeonggi-do, Korea
** 교신저자, 수원대학교 하천환경기술연구소 책임연구원, 공학박사
Corresponding Author, Ph.D. River Environment Technology Institute of Suwon University, Gyeonggi-do, Korea
(e-mail: wikim@suwon.ac.kr)
*** 뉴멕시코대학교 토목공학과 연구교수
Research Professor, Dept. of Civil Engineering, University of New Mexico
**** 수원대학교 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil Engineering, Suwon University, Gyeonggi-do, Korea

을 이루려는 담수-염수의 수위비(H_F/H_S)가 높아지고, 이에 따라 경계면이 염수조 방향으로 이동하였다. 또한 염수조 방향의 모래사면의 경사가 급해질수록 경계면의 기울기가 완만하게 형성되었다.

핵심용어 : 해수침투, 담수-염수 경계면, 염수썰기, 모래수조 모형, 해안대수층 지하수

1. 서론

해안지역의 대수층은 담수와 염수가 같이 공존하고 있는 영역이며 두 액체간의 약 2.5 %의 밀도차로 인해 해수가 썰기 형태로 존재하고 있다. 우리나라에서 수자원 이용의 대부분을 지하수에 의존하고 있는 제주도의 경우, 동부 지역은 내륙 수 km 까지 해수침투대가 존재하여 지하수의 이용에 많은 어려움이 따르고 있다(황세호 등, 2006). 서남해안 일대는 해안선 구배 및 갯벌로 인한 지형적 요인과 함께 조석 간만의 큰 차로 인하여 지하수 사용시 해수의 빠른 유입-유출로 인해 염분성 수질을 보이는 지역이 다수 존재하며 농업용수 지하수 수질기준을 초과하여 사용이 불가한 지하수 관정이 증가하고 있는 추세이다(이정호 등, 2007). 최선영(2004)은 영광지역의 해수침투 분포 양상을 파악하기 위해 GIS 통계적 공간분석 기법을 이용하여 염소이온 농도 분포도를 작성하였다. 해수침투에 대한 조사가 전국적으로 이루어지고 있으며 관측망 또한 점진적으로 확대되고 있다. 한편, 최뢰 등(2008)은 Strack의 해석해를 이용하여 해안지하수의 개발가능량과 평가하기 위한 무차원 양수율 곡선을 제시하였다.

지하수대에 해수침투가 발생하게 되면 오염된 대수층은 수자원으로서의 기능을 상실하게 되며, 지하수의 흐름과 생태계가 변하게 된다. 해수침투 복구에 소요되는 시간과 비용은 매우 크며, 원상복구는 사실상 거의 불가능하다. 인위적인 지하수 개발로 인한 해수침투를 사전에 방지하기 위해서는 먼저 토양조건과 지표상태 등의 대수층 조건에 따른 담수-염수간의 정확한 경계면의 위치와 기울기를 산정하는 것이 필요하다.

모래수조 모형을 이용한 해안 대수층에 대한 실험 연구로, Oostrom *et al.* (1992)이 비피압 대수층에서의 밀도에 따른 오염물의 거동을 연구하였다. 대수층 모형으로는 길이 167 cm, 높이 100 cm의 수조에 입경 0.5 mm 실리카를 사용하였다. 수평 포화 수리전도율은 35 m/day로 나타났으며, 수평 Darcy 유속과 오염물과 지하수간의 밀도차가 오염물의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 인자임을 확인하였다. Zhang *et al.* (2002)은 수조 모형을 통해 해안대수층에서의 오염물의 밀도에 따른 오염물 이송을 연구하였다. 길이 1,650

mm, 높이 600 mm의 직사각형 수조 양옆에 담수조와 염수조를 설치해 담수위와 염수위를 조절했다. 평균 직경 0.725 mm의 유리구슬을 채워 공극률 0.37과 포화투수계수 4.0 mm/s의 비피압대수층 모형을 만들었으며 염수조쪽으로 약 1:6.12의 지표경사를 주었다. 담수-염수 경계면의 평형상태를 유지하기 위해 약 24 mm의 수두차를 두었다. Park *et al.* (2004)은 2차원 및 3차원 모래수조 모형을 이용하여 다양한 양수 실험을 수행하였을 때, 3차원 모형의 경우 염수의 측면침투까지 모의할 수 있었다. 이영수(2005)는 해수침투 양상을 분석하기 위하여 (120 × 50 × 50) cm³의 크기를 갖는 축소모형을 제작하여 양수실험을 수행하였다. 해수근접지역에 양수정을 설치하여 5.0 ml/min, 8.0 ml/min의 양수량에 대한 양수실험을 수행하여 적정양수량을 산정하였다. 홍성훈과 박남식(2006)은 담수렌즈 모형실험을 통해 담수-염수 경계면의 변화를 실험하였다. 길이 43 cm, 높이 25 cm의 표면이 타원형인 모래수조의 좌우측에 염수조를 통해 염수(염도 46.3 ppk, 비중 1.04)를 공급시키고, 담수는 모래수조 중앙으로 담수함양정을 통해 공급시켰다. 대수층으로 쓰인 모래의 유효 공극률과 투수계수는 각각 0.3과 7.042×10⁻⁴ m/sec 였다. 담수 양수로 인한 염수 썰기의 변화와 과잉 담수 양수와 염수 양수를 통한 담수-염수 경계면의 변화를 모의하였다. 또한 각각의 담수와 염수 흐름 방정식을 이용한 수치모형 모의 결과를 실험치와 비교하였다. 강정옥(2006)은 길이 120 cm, 높이 100 cm, 폭 20 cm의 인공 모래상자를 제작하였고, 지하수의 과도한 개발에 의해 발생된 해수침투를 효과적으로 회복하기 위한 방법으로 하수처리수를 인공함양하여 담수-염수 경계면의 변화를 모의하였다. 양수량과 함양량의 적정비율에 대한 연구를 하여 인공함양을 효과적으로 이용할 경우 해수침투를 수리화학적으로 방지할 수 있음을 확인하였다. 대수층의 수리경사(hydraulic gradient)에 따른 염수썰기의 위치 변화가 Goswami and Clement (2007)에 의해 모의되었다. 균일한 입경 1.1 mm의 실리카 구슬로 채워진 직사각형 수조(길이 53 cm, 높이 30.5 cm)의 양옆에 담수조와 염수조를 설치하였다. 대수층 모형의 공극률은 0.385, 수리전도율(hydraulic conductivity)은 1,050 m/day, 그

리고 염수의 염도는 1.026 g/ml로 모의하였다. 담수 조의 수위를 조절함으로써 염수썰기의 위치를 조절했는데, 초기 평형 단계를 포함하여 3단계의 평형상태를 실험하였으며 각각의 단계별로 담수 유입량을 산정하였다. 또한 수치모형으로 염수썰기의 변화와 담수 유입량을 모의해 실험치와 비교하였다. 김성운(2008)은 담수-염수 경계면 하부의 해수를 양수하는 실험을 통하여 해수썰기 제어 실험을 수행하였으며 수치모형의 적용성을 검증하였다. 지하수 흐름을 모의하는 경계면 모델을 이용하여 시범 현장인 전북 부안군 변산면 격포리 지역의 전기비저항 탐사 자료와 비교하였다.

이러한 기존의 모래수조 모형을 이용한 연구에서는 모두 같은 실험조건에서 하나의 다공질매체에 대한 연구만을 수행하였다. 대부분 담수 또는 염수의 양수와 주입에 따른 경계면의 변화와 이에 따른 해수침투 및 회복정도를 모의하였을 뿐, 해안대수층의 토양조건과 지형조건에 따라 형성되는 경계면 자체의 특성에 대한 연구는 미비하다. 본 연구에서는 가로 140 cm, 세로 70 cm의 사각형 수조에 모래를 채운 모래수조 모형을 이용하여 다양한 조건에서의 포화된 다공질 매체에서 형성되는 담수-염수 경계면을 모의하였다. 해안대수층의 담수-염수 경계면 형성에 영향을 미치는 조건이 될 수 있는 인자로서 다공질매체의 입자크기에 따른 수리전도도, 해안가 지형의 지표경사, 해수의 염도를 선정하여 경계면을 모의하였다. 다양한 실험조건을 설정하여 각 조건에 따라 형성되는 경계면의 위치와 기울기의 형태를 파악하였으며, 이러한 인자들이 담수-염수 경계면 형성에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하고자 하였다.

2. 해안가 해수침투 특성

해안대수층에서의 해수침투는 Ghyben-Herzberg 이론과 결합된 Dupuit 이론, 그리고 해안선 부근의 flow net 해석에 대한 포텐셜 흐름 이론으로 나타낼 수 있다. Ghyben-Herzberg 이론은 담수의 지배흐름을 수평방향 흐름으로 가정하였으며, 담수와 염수 사이의 염분 확산으로 이루어지는 천이대(mixing zone)를 고려하지 않은 서로 혼합되지 않는 이상유체(multiple-phase flow) 형태의 가상의 경계면이 존재한다는 가정 아래 유도되었다. Glover (1959)는 flow net 분석법을 이용하여 해안대수층의 흐름 패턴을 정의하였다. 해안선에서부터의 거리 x 와 담수-염수 경계면의 높이 z 를 이용하여 Eq. (1)과 같은 모델을 제시하였다.

$$z = \sqrt{\frac{\gamma^2 q'^2}{K^2} + \frac{2\gamma q' x}{K}} \quad (1)$$

여기서, γ (무차원)는 $\rho_f/(\rho_s - \rho_f)$, K 는 수리전도도 (L/T), q' [(L^3/T)/ L]는 단위 폭에 대한 해안 대수층으로부터의 유출량이고, ρ_f 는 담수의 밀도, ρ_s 는 염수의 밀도이다.

Henry (1959)는 호도그래프(hodograph) 해석법을 이용해 무한히 연속적인 섬에서 해수위로부터 염수 경계면에 대한 거리를 추정하는 절대해를 유도하였다. 수평방향 흐름 조건에 대한 Dupuit 가정을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = -\bar{k}z \frac{dh}{dx} \quad (2)$$

여기서, \bar{k} 는 전달계수이다. 지하수위 h 는 수직단면에서 일정한 것으로 가정하였으며, z 는 흐름의 전체 깊이를 포함하는 것으로 가정하였다. 이 때의 흐름은 이론적으로 수평공급되는 유속인 V_0 , 그리고 $V_0(l-x)$ 와 관련된 해안에서의 거리 x 를 이용하여 정의할 수 있다. 여기서 l 은 섬의 중심선에서부터 대칭되는 거리이다. Ghyben-Herzberg 이론과 Eq. (2)의 관계를 이용하여 경계면의 위치를 좌표화하기 위해 유도된 식 Eq. (3)과 같다. 여기서, $k_0 = \bar{k}(\rho_s - \rho_f)/\rho_f$ 이다.

$$\frac{z}{l} = \sqrt{\frac{V_0}{k_0} \left[\frac{2x}{l} - \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right]} \quad (3)$$

Strack (1976)은 해안대수층에서 경계면 문제를 풀기 위해 위치흐름 해석법을 이용한 해석식을 개발하였다. 피압대수층과 비피압대수층, 각각의 경우에 해당하는 식을 제안하였으며 담수-염수 경계면이 존재하는 영역과 존재하지 않는 영역을 구분하였다. 비피압대수층에서 potential ϕ 및 경계면의 위치 θ 는 다음과 같다.

$$\phi = \frac{s(h_f - d)^2}{2(s-1)} \quad (4)$$

$$\theta = \sqrt{\frac{2\phi}{s(s-1)}} \quad (5)$$

여기서, s 는 염수와 담수의 밀도비(ρ_s/ρ_f), h_f 는 담수의 수두, d 는 평균해수면의 높이이다.

3. 모래수조 수리실험

3.1 모래수조 실험모형

담수와 염수 사이의 경계면 변화모의를 위한 모래수조 모형은 Fig. 2와 같다. 길이 140 cm, 높이 70 cm, 폭 10 cm 크기의 아크릴로 제작되었으며, 수조의 양옆은 담수와 염수를 공급하기 위하여 10 cm × 10 cm 크기의 담수조와 염수조를 설치하였다. 또한, 모형 내의 일정수위를 유지시키면서 다양한 수위 조건을 만들 수 있도록 5 cm 간격으로 율류공을 설치하였다. 이 때 모형 내의 모래가 담수조 및 염수조로 빠져나가지 않도록 모래 입자의 크기보다 조밀한 간격을 가진 스테인리스 철망을 설치하였다. 염수조 모형의 모래는 1 mm 및 2 mm 주문진 표준사를 사용하였다. 시료에 대한 체가름 실험과 공극률 실험 및 수리전도도 실험결과는 Table 1 과 같다. 균등계수가 1.33 및 1.59로 산정되어 입경이 대체로 균일한 시료로 분석되었다. 수리전도도 실험은 정수위실험(constant head test)을 응용하여 모래수조 모형에서 직접 측정하였으며, 수리전도도는 1 mm 모래가 0.35 cm/s, 2 mm 모래가 1.87 cm/s로 산정되었다. 또한 1 mm 모래와 2 mm 모래를 1:1 비율로 혼합한 시료의 수리전도도는 0.67 cm/s로 산정되었는데, 1 mm 모래의 수리전도도 값에 더욱 근접하게 나타났다.

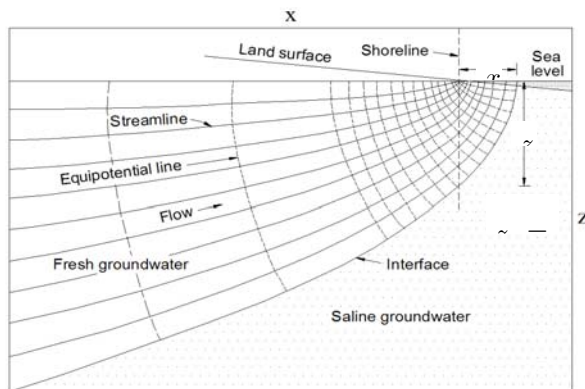


Fig. 1. Flow Pattern Near a Beach (Glover, 1959)

수조에 염수를 공급하기 위해 담수에 염화나트륨을 용해시켜 염도 34 ppk(=34 ‰), 비중 1.022의 염수를 제조하였고, 염수의 이동을 가시화하기 위해 적색 염료를 첨가하였다. 이 때, 염수의 염도는 전기전도도 측정기(CM-21P, TOADKK)를 이용하여 측정하였다. 염수 및 담수는 정량이송펌프(PP-150DW, 풍림상사)에 의해 압송되어 담수조와 염수조로 공급되면서 다공질매체인 모래의 공극 사이로 침투하게 된다.

3.2 담수-염수 평형상태 실험

모래수조 내에서 형성되는 경계면의 형태를 알아보기 위하여 모래입경에 따른 수리전도도, 지표면의 경사, 염수의 염도를 각 조건에 대해 실험하였다. 수리전도도는 대수층내의 지하수 유동에 직접적인 관련이 있으므로 염수침투 경계면 형성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되어 3개의 각각 다른 조건으로 실험하였다. 염도차이는 담수와 염수간의 상이한 밀도 차이에 의한 이류(advection)가 발생하므로 담수와 염수 경계면의 변화, 즉 염수췌기의 기울기에 영향을 미칠 것으로 예상하였다. 또한, 염수에서 담수로의 염분의 이동에 따른 염분의 확산(diffusion)이 예상된다. 실험시 기준이 되는 조건으로 지표면의 경사는 45°, 염수조의 수위는 55 cm, 그리고 염도는 우리나라 남해의 평균 농도인 34 ppk로 설정하였다(Fig. 3).

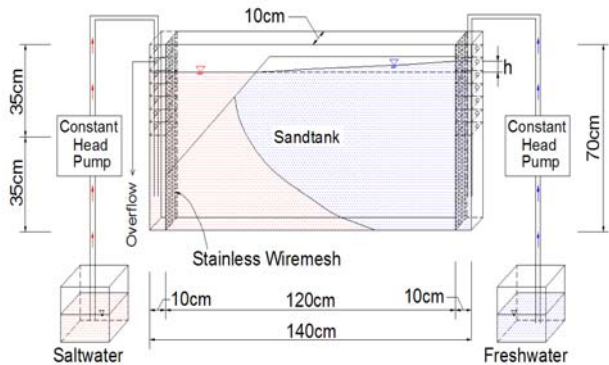


Fig. 2. Schematic View of Sandtank Model

Table 1. Hydraulic Characteristics of Porous Media Used in the Sandtank Model

| Particle mean diameter | D10 (mm) | D60 (mm) | CU | porosity (%) | Hydraulic conductivity (cm/s) |
|--------------------------|----------|----------|------|--------------|-------------------------------|
| 1 mm | 0.85 | 1.13 | 1.33 | 42.8 | 0.35 |
| 2 mm | 1.35 | 2.15 | 1.59 | 37.8 | 1.87 |
| mixture of 1 mm and 2 mm | - | - | - | 38.1 | 0.67 |

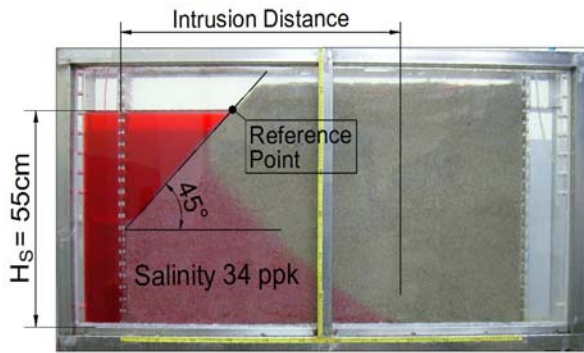


Fig. 3. Sandtank Equilibrium Condition and Reference Point ($H_s=55$ cm, Slope=45°)

수리전도도에 따른 실험의 경우 3가지의 수리전도도 (0.35 cm/s, 0.67 cm/s, 1.87 cm/s)에 대하여 각각 5개의 염수조의 수위(35 cm, 40 cm, 45 cm, 50 cm, 55 cm)를 달리하여 15번의 실험을 수행하였다. 지표면 경사에 따른 실험의 경우 2가지의 수리전도도(0.35 cm/s, 1.87 cm/s)에 대하여 각각 5개의 지표면 경사(20°, 30°, 45°, 60°, 75°)를 달리하여 10번의 실험을 수행하였다. 염수의 염도 따른 실험의 경우 2가지의 수리전도도(0.35 cm/s, 1.87 cm/s)에 대하여 각각 3가지의 염도 조건(25 ppk, 34 ppk, 45 ppk)을 달리하여 6번의 실험을 수행하였다.

담수와 염수를 펌핑하여 담수조와 염수조에 채우면 수조의 두 액체가 Wiremesh를 통과하여 모래의 공극 속으로 침투하게 된다. 일정시간이 지나면 담수-염수간의 밀도차이로 인해 염수가 담수 밑으로 침투하면서 경계면이 형성되는데, 염수의 약 2.5 % 정도 높은 비중에 해당하는 만큼의 수압이 담수조 쪽에 가해져야 평형상태가 이루어진다. 담수조의 수위를 염수조의 수위보다 일정 높이만큼 높여 수위차(Fig. 2에서의 h)를 조절함으로써 수압을 가해지게 되는데, 수위차가 너무 낮을 경우에는 경계면이 담수조쪽으로 계속 이동하게 되어 평형상태가 이루어지지 않기 때문에 수위 조절을 통해 적정 수위를 유지해 주어야 한다. 각 조건(수리전도도,

지표면의 경사, 염도)에 따른 실험마다 모래수조 내에서 염수가 차지하는 부피와 염수의 밀도가 다르기 때문에 수위차가 매 실험마다 달라지게 된다. 본 연구에서는 수위차를 조절함에 따라 경계면의 위치가 일정시간 이상 변화하지 않을 때를 평형상태로 간주하였다. 담수조의 수위는 담수주입량을 조절하여 이루어지며, 계속적으로 주입되는 담수는 모래층인 인공 대수층을 통과하여 염수조쪽으로 이동하면서 염수조의 윗류공을 통해 수조 밖으로 배출된다. 여기서 배출되는 물의 양은 Eq. (1)의 단위폭당 유출량 q' 를 산정하는데 사용된다.

수리전도도와 염수조의 수위 조건에 따른 실험에서 평형상태가 이루어지기 위해 설정되어진 수위차는 Table 2와 같다. 수리전도도가 클수록, 그리고 염수조의 수위가 높을수록 설정된 수위차가 크다.

4. 실험결과

4.1 담수-염수 경계면 모의

모래수조 내에서 평형상태를 이룬 담수-염수 경계면을 측정하였으며 실험에 대한 결과를 위치흐름 이론을 이용한 Glover (1959)의 유도식과 호도그래프를 이용한 Henry (1959)의 해석해 및 Strack (1976) 해석해와 비교하였다(Fig. 4). 그래프에서 수직선으로 표시된 지점은 각 실험마다 다른 값을 갖는 모래사면과 염수위(H_s)가 맞는 지점(Reference point)이며, Distance x는 기준점에서부터 염수조 모형의 거리(cm)로서, 해수침투 거리를 나타낸다. 염수조쪽의 지표면 경사에 의해 각각의 염수위 조건에 따라 염수위가 모래사면에 접하는 기준점의 수직위치가 달라지므로 모래수조 내의 상대적인 담수-염수 경계면의 위치가 달라지게 된다. 이와 같이, 경계면의 위치는 주어진 염수위의 조건에 따라 달라졌지만, 경계면의 기울기는 크게 변하지 않고 서로 평형을 이루고 있음을 보여주고 있다.

Table 2. Freshwater Level Difference (h) for Saltwater Level Condition (unit: cm)

| Saltwater level | K=0.35 cm/s | K=0.67 cm/s | K=1.87 cm/s |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| 35 cm | 1.31 | 1.82 | 2.16 |
| 40 cm | 1.55 | 1.93 | 2.42 |
| 45 cm | 1.79 | 2.29 | 2.54 |
| 50 cm | 2.17 | 2.37 | 2.64 |
| 55 cm | 2.38 | 2.42 | 2.72 |

대수층의 수리전도도에 따른 실험결과를 이론식과 비교한 Fig. 4의 그래프를 보면 수리전도도가 낮은 경우에는 Glover 유도식보다 Henry 해석해와 Strack의 해석해가 실험결과와 일치하는 경향을 확인할 수 있다. 특히 염수위가 높게 주어진 경우일수록 실측 경계면과 기울기가 잘 일치하고 있음을 보여준다. Henry의 해석해에서 경계면의 기울기는 이론상 무한한 섬의 중심선에서 염수위가 맞는 기준점(Fig. 3)까지의 거리인 l 값에 영향을 받게 되는데, 이 값은 본 실험에선 담수조

경계에서 기준점까지의 거리이며, 주어진 염수위 조건에 따라 달라지게 된다. Strack의 해석해는 Henry 해석해와 비슷한 기울기를 갖는 형태의 경계면을 추정하지만 수리전도도가 큰 경우는 실험결과와 차이를 나타낸다. 이는 Strack 해석해의 주요변수인 담수수두(h_f)의 측정오차 때문인 것으로 판단된다. 경계면의 깊이가 담수수두에 민감하게 반응하므로 작은 오차에도 경계면의 깊이가 크게 변한다. 또한 Strack의 해석해와 Henry의 해석해는 담수-염수 경계면이 염수위가 지표면과 만나

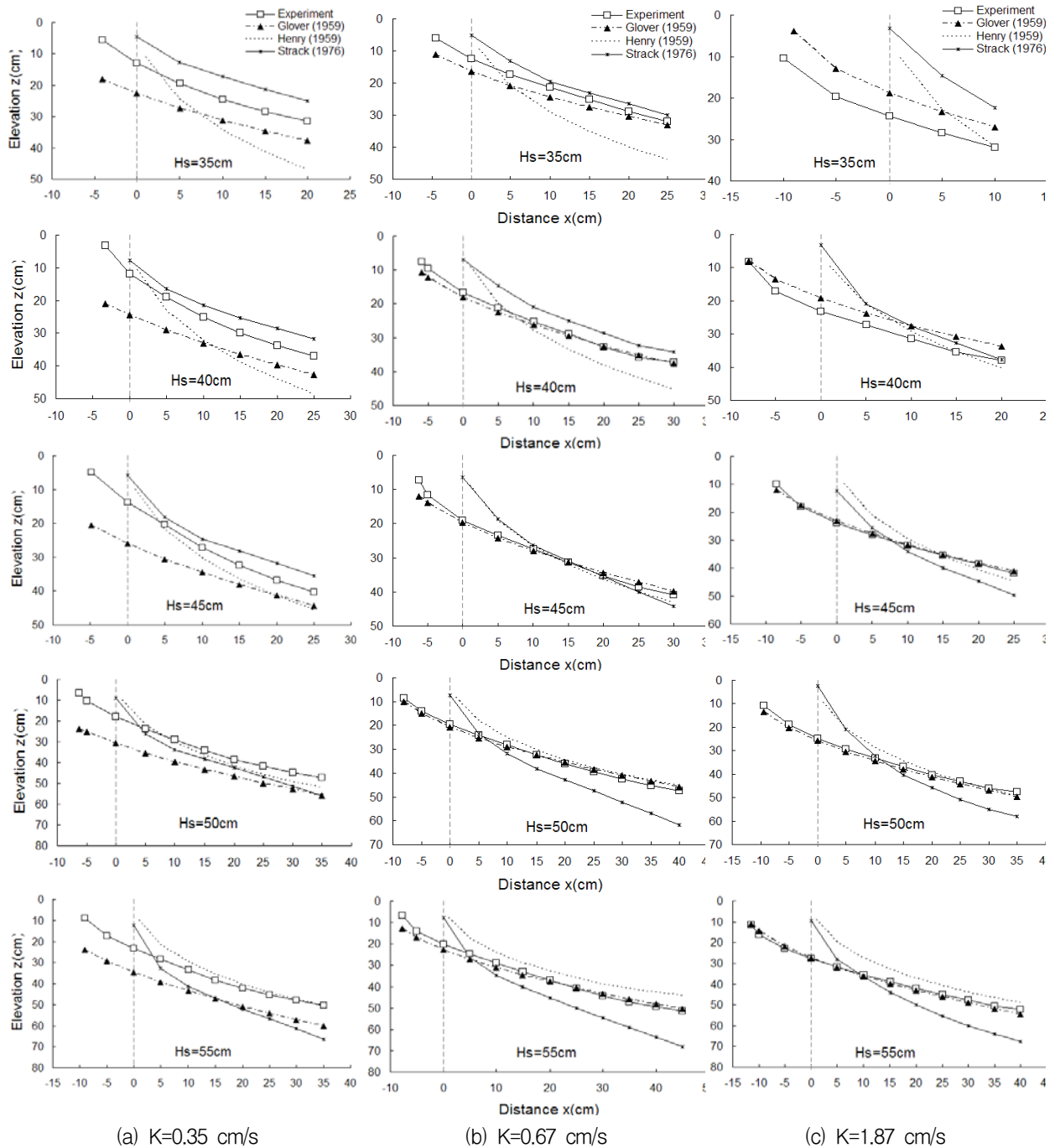


Fig. 4. Salt-Wedge Profile Comparisons with Analytic Solutions

는 기준점에서 시작한다는 가정으로 전개되었으므로 실질적인 경계면, 즉 염수썰기(salt-wedge)의 시작점(Fig. 1의 x_0)은 이론상 경계면의 깊이가 계산되지 않는 제한점을 나타내었다.

Glover 유도식의 계산 결과에서 경계면의 기울기는 염수위와 관계없이 일정하였고, 전체적으로 경계면의 높이가 낮게 계산되었다. 또한 상대적으로 높은 수리전도도의 경우(Figs. 4(b) and (c)), Glover 유도식은 수리전도도와 염수위 조건과 관계없이 매우 유사한 경계면을 예측하고 있다.

이와 같이 모래수조로 실험한 평형상태의 담수-염수 경계면은 수리학적으로 적절히 모의된 것으로 보이며, Glover 유도식은 실제 해안가에서의 담수-염수 경계면의 일차적인 예측에 사용해도 무방할 것으로 판단된다.

4.2 수리전도도와 염도에 따른 담수-염수 경계면의 위치

주어진 염수위에 따른 담수-염수 수위비(H_F/H_S)가 담수-염수 경계면의 위치 변화에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 본 연구에서는 대수층의 수리전도도와 염수의 염도가 수위비와 정비례하는 것으로 나타났다. 수조 내에서 염수와 담수가 평형을 이루고 있다면, 다음과 같은 조건이 성립된다.

$$\rho_S H_S g = \rho_F H_F g \quad (4)$$

여기서, ρ_S 및 ρ_F 는 염수 및 담수의 밀도이며, H_S 및 H_F 는 모래수조에서 염수위와 담수위를 나타낸다. 중력

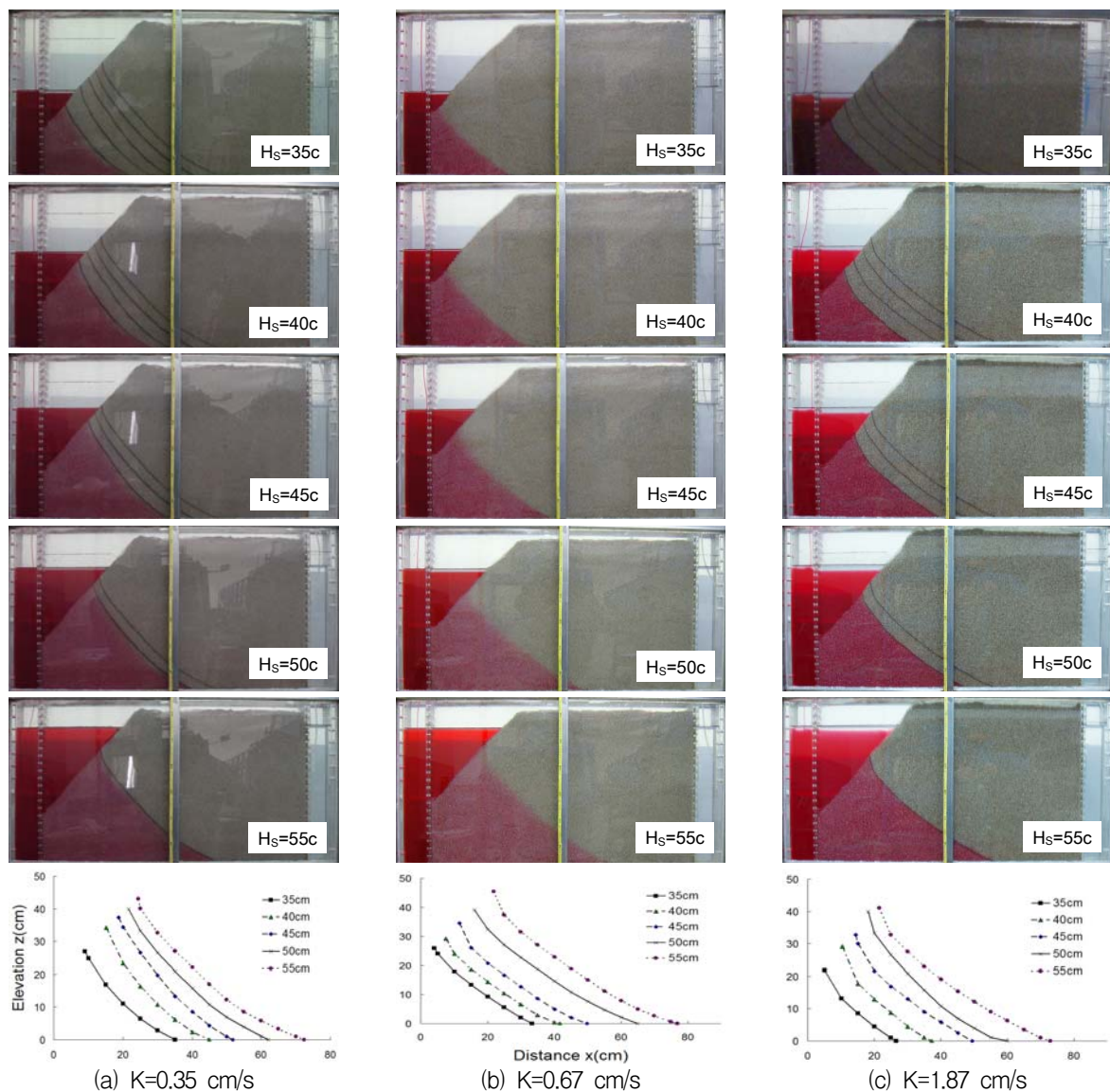


Fig. 5. Salt-Wedge Profile Placements Due to Hydraulic Conductivities

가속도 g 는 염수와 담수에서 동일하므로 상쇄되고 다음과 같이 간략화 된다.

$$\frac{H_F}{H_S} = \frac{\rho_S}{\rho_F} \quad (5)$$

Fig. 5에서와 같이 수리전도도가 낮은 대수층의 경우 (Fig. 5(a)), 수리전도도가 높은 경우(Figs. 5(b) and (c))보다 염수위 조건에 따른 경계면들이 담수조 쪽으로 치우쳐 있음을 알 수 있다. 수조바닥 부분의 염수침투거리(Fig. 3)를 측정하여 평균값으로 나타내면 $K=0.35$ cm/s인 경우 53.26 cm, $K=0.67$ cm/s인 경우 53.02 cm, $K=1.87$ cm/s인 경우 49.5 cm로 계산되었다. Fig. 6에서와 같이 수리전도도가 높을수록 모래수조 내의 평형상태를 유지시키기 위해서는 수위비(H_S/H_F)를 높여줘야 하며, 이에 따라 담수조의 정수압이 증가하여 담수-염수 경계면이 염수조쪽으로 위치하게 되는 것을 볼 수 있다.

염도 조건에 따른 담수-염수 경계면의 모의결과와 비교그래프는 Fig. 7과 같다. Eq. (5)에서와 같이 염수의 밀도(ρ_S)가 높을수록 수위비가 높아져 담수-염수 경

계면이 염수조쪽으로 이동하여 형성된다. 하지만, 실험 결과에 따르면 그 차이는 염수위 조건이나 수리전도도 조건에 대한 실험보다 미비하다. 이에 대한 가장 큰 이유는 모래사면으로 유출된 담수로 인해 염수의 염도가 어느 정도 희석이 되기 때문으로 사료된다. 만약 모래사면으로 유출된 담수가 염수와 섞이지 않고 모두 바로 모래수조에서 배수가 된다면 현재 결과보다는 경계면이 형성되는 위치에 많은 영향을 줄 것이다.

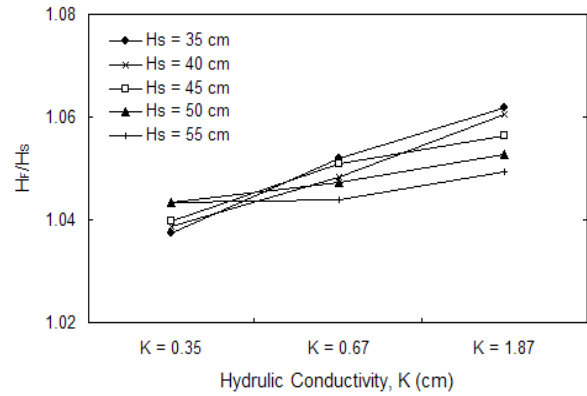
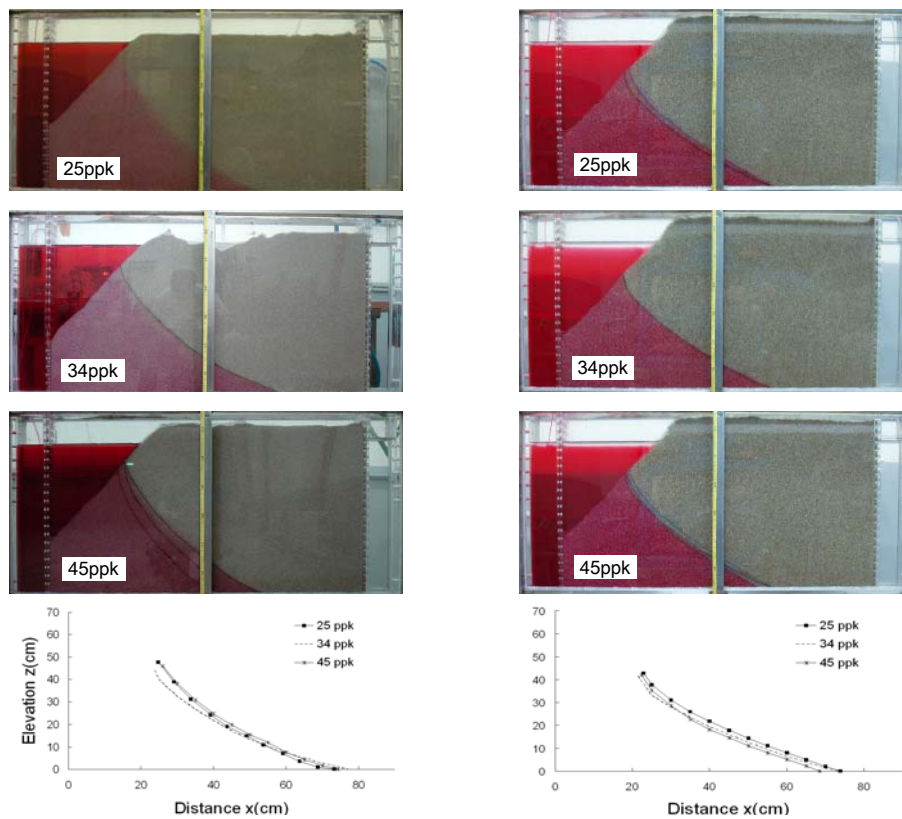


Fig. 6. Relationships between H_F/H_S and Hydraulic Conductivity



(a) $K=0.35$ cm/s

(b) $K=1.87$ cm/s

Fig. 7. Salt-Wedge Profile Placements Due to Saltwater Salinities

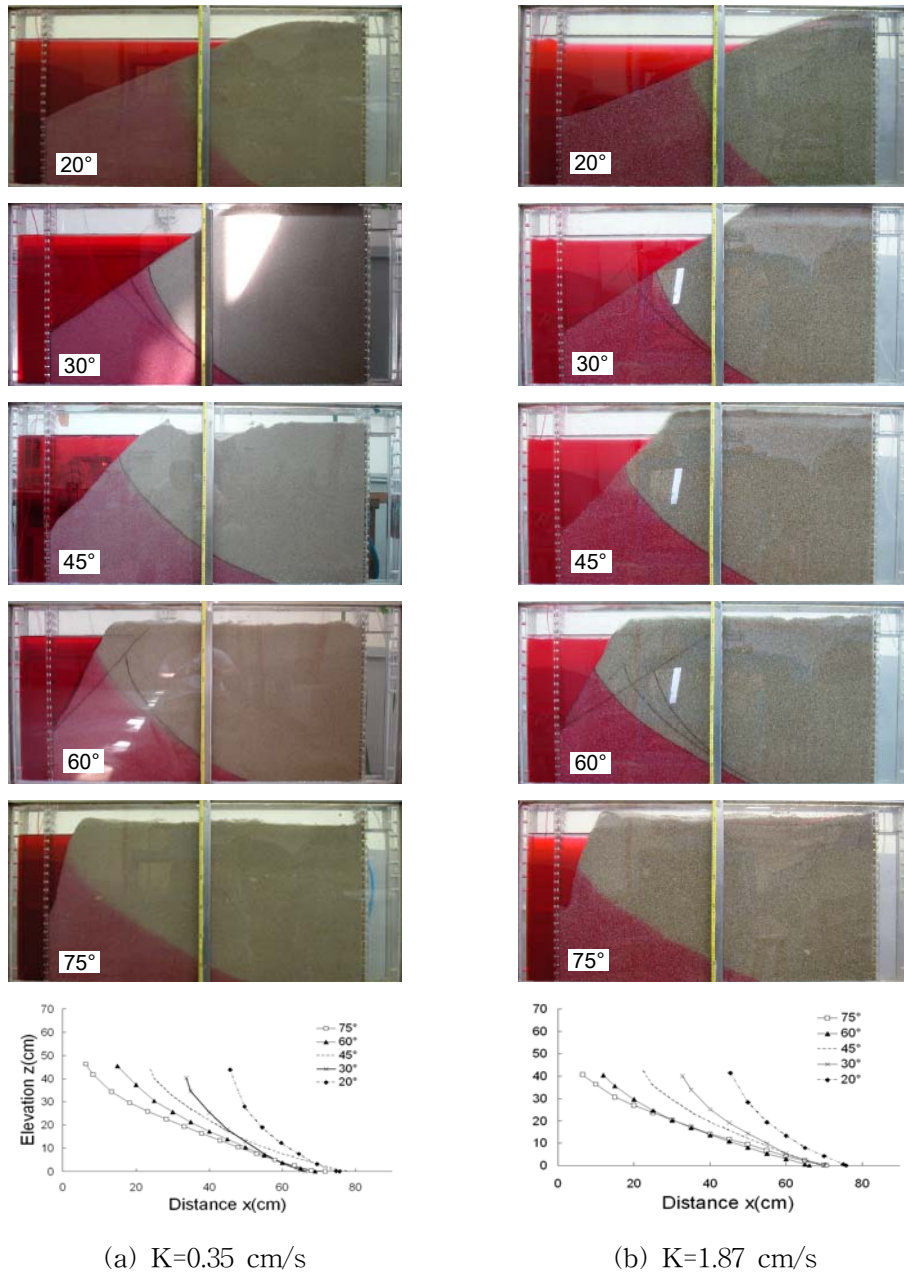


Fig. 8. Salt-Wedge Profile Inclines Due to Porous Media Surface Slopes

4.3 모래사면 경사에 따른 담수-염수 경계면의 기울기

지표면의 경사에 따른 담수-염수 경계면 형성의 실험결과는 Fig. 8과 같이 나타났으며 각 조건에 따른 실험결과를 그래프로 비교하였다. 염수가 지표면과 맞닿는 경계면의 위치가 전부 다르게 나타나면서 지표면 경사가 완만할수록 경계면의 기울기가 크게 나타났다.

담수-염수 경계면은 서로 동일한 크기와 방향 에너지를 갖는 담수와 염수의 유출흐름(streamline)으로 이루어진다. 본 모래수조에서, 대수층내로 흐르는 담수의

유출 지점인 모래사면을 하나의 등수위선(equipotential line)으로 볼 수 있으므로, 위치흐름 해석법의 기본 조건에 의해, 담수-염수 경계면은 모래사면을 직각으로 통과하게 된다. 따라서 Fig. 8과 같이 지표면 경사가 완만한 20° 실험의 경우에 형성되는 경계면의 기울기는 가장 크게 나타나면서 지표면과 직각에 가까운 각도를 이루며, 반대로 지표면 경사 가장 급한 75° 실험의 경우에는 경계면의 기울기가 가장 작게 나타나면서 이 경우 또한 지표면과의 각도가 직각에 가까워 나타났다. 이외 다른 조건의 모든 실험결과도 비슷한 양상을 보인다. 염수침투거리는 K=0.35 cm/s인 경우 66.3~77.7 cm,

$K=1.87 \text{ cm/s}$ 인 경우 $66.1\sim 75.8 \text{ cm}$ 의 범위에서 큰 차이를 나타내지 않았으며, 이 경우에도 수리전도도가 클수록 경계면이 염수조쪽으로 형성되었다.

실제 해안가 지표면의 경사는 본 실험 모래수조의 일정한 경사와 달리 불규칙한 경사를 이루므로 경계면 기울기가 어느 정도 상쇄될 것이다. 하지만 해안가 담수양수정 위치의 결정에 경계면의 기울기는 상당히 민감한 고려사항이므로, 해안가 지표면 경사가 일정한 지역의 담수-염수 경계면 기울기 예측에 중요한 자료를 제공할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 해안대수층에서 염수 침투로 인해 형성되는 담수-염수 경계면의 특성을 연구하였다. 대수층 수리전도도에 따른 담수-염수 수위비(H_F/H_S), 대수층 지표면 경사, 그리고 염수의 염도가 경계면의 위치와 기울기에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해, 2차원 모래수조 실험을 수행하였다. 각각의 조건에 따라, 총 31번의 실험을 수행하였으며, 경계면 실측치를 기존에 발표된 경계면 이론식의 계산치와 비교하였다. 이에 대한 결과는 다음과 같다.

- (1) 염수의 담수 침투에 의한 염수 경계면의 위치는 대수층의 수리전도도에 따른 담수-염수 수위비(H_F/H_S)에 영향을 받았다. 수리전도도가 높을수록 상대적으로 빠른 대수층의 유속과 이에 따른 담수-염수의 유출로 인해, 평형상태의 유지를 위한 수위비가 커지게 되며, 따라서 경계면의 위치가 염수조쪽으로 이동하였다. 일반적으로 해안대수층에서 담수와 염수가 서로 평형상태로 경계면을 이루고 있으므로, 내륙에서의 호우로 인한 국지적인 담수위 상승의 경우, 담수-염수 경계면이 해안 쪽으로 이동하게 됨을 예상할 수 있다.
- (2) 염수의 염도 또한 경계면의 위치에 영향을 주었으나, 수리전도도에 비해 그 영향의 정도가 미비하였다. 이는, 모래사면으로 유출된 담수로 인해 염수의 염도가 어느 정도 희석되어지면서 염수의 밀도가 변화하기 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 대수층 지표면의 사면 경사는 염수침투 경계면의 기울기에 많은 영향을 미쳤다. 지표면의 경사가 낮은 경우에는 담수-염수 경계면의 기울기가 크게 나타났으며, 경사가 높은 경우에는 경계면의 기울기가 작게 나타났다. 이와 같은 결과는 위치흐름의 기본 이론인 대수층에서의 흐름방향(stream)은 사면경사의 등수위선(equipotential

line)의 직각교차를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

- (4) 위치 흐름을 이용하여 유도한 Glover (1959) 식은 전반적으로 좋은 예측 결과를 보여주었으며, 특히 대수층의 수리전도도가 높을수록 실험치와 잘 일치하였다. 호도그래프를 이용한 Henry (1959)의 해석해와 Strack (1976)의 해석해도 해안가 사면의 담수유출 경계(x_0 , (Fig. 1)) 부분을 제외하면 실험치와 일치하였으며, 특히 수리 전도도가 낮은 실험에서 좋은 결과를 보였다. 일반적인 해안가 초기 예상 경계면의 위치를 예측시에는 Glover (1959)의 해석해를, 그리고 전체적인 담수-염수 경계면 예측에는 Henry (1959)와 Strack (1976)의 해석해와 함께 이용하면 무방할 것으로 판단된다.

보다 정확한 대수층 수리전도도의 영향을 연구하기 위해서는 좀 더 다양한 수리전도도를 가진 다공질매체에서의 실험이 선행되어야 한다. 대수층의 수리전도도 조건에 따른 해수침투 실험은 사면 경사나 염도에 따른 실험에 비해 다공질매체 자체를 교체하여야 하므로 다른 실험에 비해 비교적 실험오차가 크다. 균일한 입자 크기로 이루어진 다공질매체를 사용하는 것은 이같은 실험오차를 최소화할 수 있는 방법일 것이며, 또한 동일한 조건에 따른 수치모형 결과에 의한 비교도 보다 객관적인 분석에 많은 도움을 줄 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 강정욱 (2006). 연안역 해수침투 방지 및 복원을 위한 인공 하수처리수 주입에 따라 형성된 인공 대수층의 수리화학적 특성 연구. 석사학위논문, 인하대학교
- 김성윤 (2008). 해수 양수를 통한 지하수 해수취기 침투 제어 기술. 석사학위논문, 동아대학교
- 이영수 (2005). 3차원 축소모형을 이용한 해수침투의 실험적 연구. 석사학위논문, 한양대학교.
- 이정호, 윤정호, 문유리 김훈미, 황상일 (2007). 해안지역 지하수 수자원 통합관리방안 연구 I. 한국환경정책·평가연구원
- 최 퇴, 이창해, 박남식 (2008). "Strack의 단일 포텐셜 해석해를 이용한 해안지하수." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제1호, pp. 27-34.
- 최선영 (2004). GIS의 통계적 공간분석을 이용한 해수 침투 분포 양상 파악. 석사학위논문, 전남대학교
- 홍성훈, 박남식 (2006). "담수렌즈 수리모형을 이용한 담수-염수 경계면 수치모형의 검증." **대한토목학회**

논문집, 대한토목학회, 제26권, 제3B호, pp. 263-269.

황세호, 신제현, 박인화, 박기화 (2006). 물리검층 자료를 이용한 제주도 동부지역의 해수침투 특성 고찰, 제6회 지하수 학술 세미나

Glover, R.E. (1959). "The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer." *J. of Geophysical Research*, Vol. 64, No. 4, pp. 457-459.

Goswami, R.R. and Clement, T.P. (2007). "Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics." *Water Resources Research*, Vol. 43, W04418.

Henry, H.R. (1959). "Salt water intrusion into fresh water aquifers." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 64, pp. 1911-1919.

Oostrom, M., Dane, J.H., Cuven, O., and Hayworth, J.S. (1992). "Experimental investigation of dense solute plumes in an unconfined aquifer model."

Water Resources Research, Vol. 28, No. 9, pp. 2315-2326.

Park, N.S., Kim, J.H., Nagendra, K., Hong, S.H., Kim, H.D. (2004). "Characteristics of Groundwater Flow in Coastal Aquifers : Laboratory Experiments." 동아대학교건설기술연구소 연구 및 보고, Vol. 28, No. 1, pp. 131-141.

Strack, O.D.L. (1976). "A single potential solution for regional interface problems in coastal aquifers." *Water Resources Research*, Vol. 12, pp. 1165-1174.

Zhang, Q., Volker, R.E., and Lockington, D.A. (2002). "Experimental investigation of contaminant transport in coastal groundwater." *Advances in Environmental Research*, Vol. 6, pp. 229-237.

| | |
|------------------|------------------|
| 논문번호: 09-059 | 접수: 2009.06.01 |
| 수정일자: 2009.09.14 | 심사완료: 2009.09.14 |