

해안대수층에서 발생하는 해수침투에 관한 실험적 연구

Experimental Study of Saltwater Intrusions in Coastal Aquifer

박화준*, 김진성**, 권경준***, 서성국****, 안원식*****

Hwa Jun Park, Jin Sung Kim, Kyung Jun Kwon, Seong Kook Seo, Won Sik Ahn

요 지

대수층내의 담수-염수 경계면의 위치와 기울기를 파악하는 것은 해안가의 지하수 개발을 위해 선행되어야 하는 연구이다. 가로 140 cm, 세로 70 cm의 사각형 수조에 모래를 채운 모래염수조를 이용하여 포화된 다공질 매체에서 형성되는 담수-염수 경계면을 모의하였다. 다공질 매체의 입자크기에 따른 수리전도도, 해안가 지형의 지표경사, 해수의 염도에 대한 조건을 각기 달리하여 여러 실험조건에서 각 경우에 따라 형성되는 경계면의 형태를 모의하였고, 각 인자가 경계면의 형성에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다. 각 조건에 따른 총 31가지의 실험을 수행하였으며, Glover 포텐셜 유도식을 이용한 염수침투 경계면을 비교하였다. 모형에서 측정된 염수침투 경계면은 위의 이론식들의 계산치와 유사한 양상을 보였으며, 경계면의 위치와 기울기는 수리전도도, 지표면경사, 염도에 영향을 받는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 해수침투, 담수-염수 경계면, 모래염수조

1. 서 론

해안지역의 대수층은 담수와 염수가 같이 공존하고 있는 영역이며 두 액체간의 약 2.5%의 밀도차로 인해 담수면 밑에 해수가 썩기 형태로 존재하고 있다. 이 지역에서 지하수를 과도하게 양수하게 되면 염수와 담수간의 평형이 교란되어지고 정수압의 균형이 변화하여 해수가 침투하게 된다. 이로 인한 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. 본 연구에서는 사각형 수조에 모래를 채운 모래염수조 모형을 이용하여 포화된 다공질 매체에서 형성되는 담수-염수 경계면을 모의하였다. 해안대수층의 담수-염수 경계면 형성에 영향을 미치는 조건이 될 수 있는 인자로서 다공질 매체의 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 경계면의 형성에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하고자 하였다.

2. 해안에서 발생하는 해수침투 특성

해안대수층에서의 해수침투는 Ghyben-Herzberg 이론과 결합된 Dupuit 이론, 그리고 해안선 부근의 flow net 해석에 대한 포텐셜 흐름 이론으로 나타낼 수 있다. Glover(1959)는 flow net 분석법을 이용하여 해안 대수층의 흐름 패턴을 정의하였다. 해안선에서부터의 거리 x 와 담수-염수 경계면의 높이 z 를 이용하여 식(1)과 같은 모델을 제시하였다.

* 정회원 · 수원대학교 토목공학과 박사수료 · E-mail : hwajoon@suwon.ac.kr
** 정회원 · 수원대학교 하천환경기술연구소 연구원 · 공학석사 · style_move@hanmail.net
*** 정회원 · 수원대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : kkj3311@hanmail.net
**** 정회원 · 수원대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : skseo@suwon.ac.kr
***** 정회원 · 수원대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · E-mail : wsan@suwon.ac.kr

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

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 무수히 나누어진 섬에서 해수위로부터 염수 경계면에 대한 거리를 추정하는 계산식을 제안하였다. 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 $V_0(I-x)$ 와 관련된 해안에서의 거리 x 를 이용하여 정의할 수 있다. 여기서 I 는 선의 중심선에서부터 대칭되는 거리이다. Ghyben-Herzberg 이론과 식(2)의 관계를 이용하여 경계면의 위치를 좌표화하기 위해 유도된 식은 다음과 같다. 여기서, $k_0 = \bar{k}(\rho_s - \rho_f)/\rho_f$ 이다.

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

3. 실험방법

경계면 변화모의를 위한 모래염수조 모형은 그림 1과 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. 염수조 모형의 모래는 1mm 및 2mm 주문진 표준사를 사용하였다. 시료에 대한 체가름실험과 공극률 실험 및 수리전도도 실험결과, 균등계수가 1.33 및 1.59로 산정되어 입경이 대체로 균일한 시료인 것으로 나타났다. 수리전도도는 1mm 모래가 0.35 cm/s, 2mm 모래가 1.87 cm/s로 측정되었다. 또한 1mm 모래와 2mm 모래를 1:1 비율로 혼합한 시료의 수리전도도는 0.67 cm/s로 측정되었다.

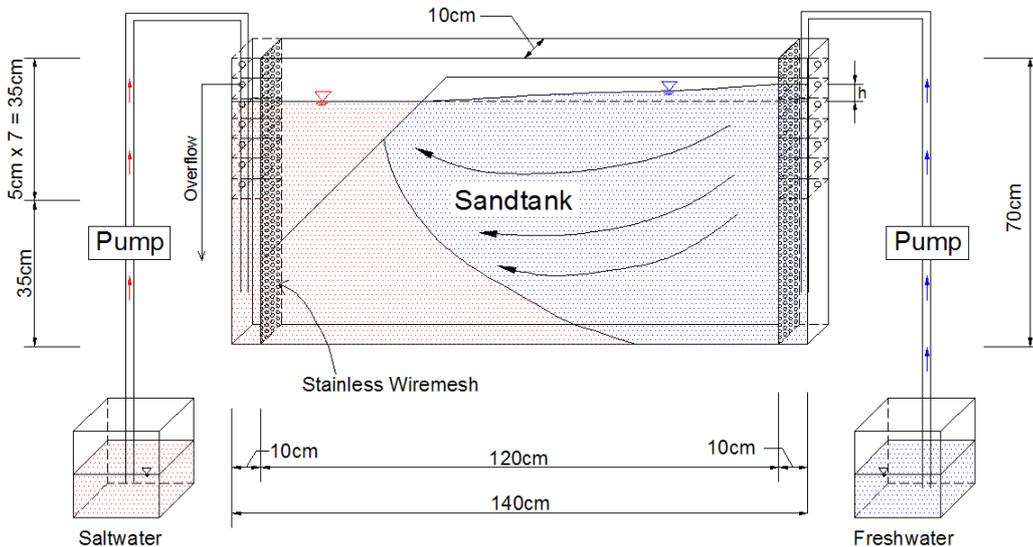


그림 1. 모래염수조 모형

모래입경에 따른 수리전도도(실험A), 지표경사(실험B), 염도(실험C)를 각 조건에 대해 실험하였다. 수리전도도에 따른 실험A의 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 실험B의 경우 2가지의 수리전도도(0.35 cm/s, 1.87 cm/s)에 대하여 각각 5개의 지표면 경사(20°, 30°, 45°, 50°, 55°)를 달리하여 10번의 실험을 수행하였다.

60°, 75°)를 달리하여 10번의 실험을 수행하였다. 염수의 염도에 따른 실험C의 경우 2가지의 수리전도도(0.35 cm/s, 1.87 cm/s)에 대하여 각각 3가지의 염도 조건(2.5%, 3.4%, 4.5%)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, 이 때 담수조의 높이를 수위차(그림 1에서의 h) 만큼 높여 지속적인 수압이 가해져야 염수의 약 2.5% 정도 높은 밀도에 해당하는 만큼의 담수무게가 만들어져 이에 대한 평형상태가 이루어진다. 본 연구에서는 담수조의 수위 h를 조절함에 따라 경계면의 위치가 일정시간 이상 변화하지 않을 때를 평형상태로 간주하였다. 수위차 h는 담수주입량을 조절하여 이루어지며, 계속적으로 주입되는 담수는 모래층인 인공 대수층을 통과하여 염수조쪽으로 이동하면서 염수조의 월류공을 통해 수조 밖으로 배출된다. 여기서 배출되는 물의 양은 식(1)의 단위폭당 유출량 q 를 산정하는데 사용된다.

4. 모의조건에 따른 실험결과

4.1 실험결과와 이론식의 비교

각 실험에 대한 결과를 Glover(1959) 및 Henry(1959)의 이론과 비교하였다. 대수층의 수리전도도, 염수조 모형의 지표면 경사, 염수의 염도 조건에 따른 비교 그래프는 그림 2~4와 같다. 그래프에서 수직선으로 표시된 0 지점은 각 실험마다 나타나는 지표면과 염수위가 맞닿는 지점이며, Distance x는 0 지점을 기준으로 염수조 모형의 거리(cm)를 나타낸다.

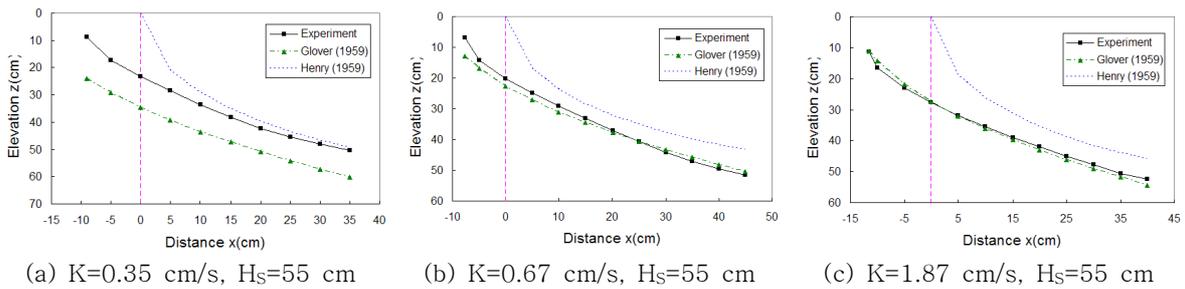


그림 2. 대수층의 수리전도도에 따른 이론식과의 결과비교

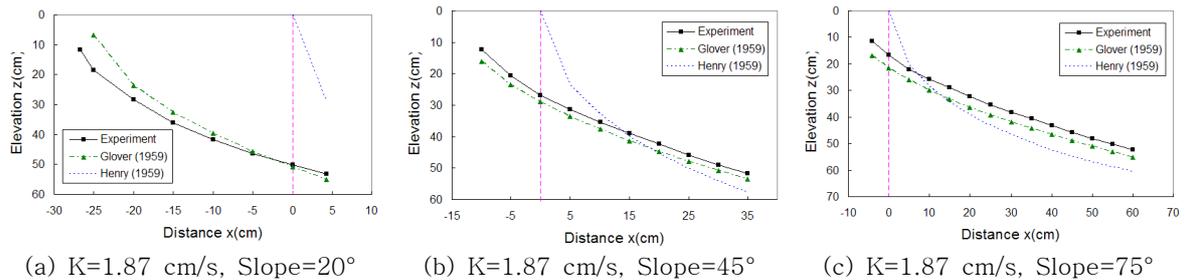


그림 3. 지표면 경사에 따른 이론식과의 결과비교

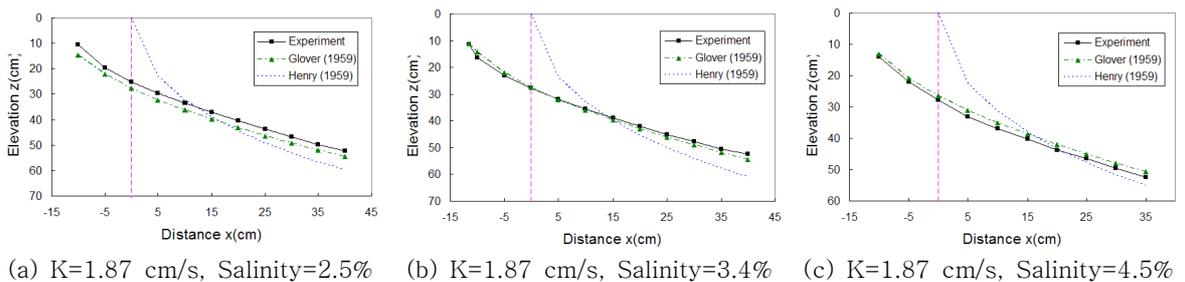


그림 4. 염수의 염도에 따른 이론식과의 결과비교

대수층의 수리전도도에 따른 실험결과를 이론식과 비교한 그림 2에서는 수리전도도가 낮을 경우 Henry 이론이 실험결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 수리전도도가 높아질수록 실험결과 값이 Glover의 계산식과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 특히 수리전도도가 가장 높은 1.87 cm/s의 경우 Glover 이론과 비교하여 볼 때 경계면 모의가 거의 완벽히 재현되었다고 할 수 있다. 그림 3 및 그림 4와 같이 지표면 경사와 염수의 염도에 따른 비교결과에서는 Henry 이론이 대체적으로 큰 오차가 나며, 또한 Distance x가 염수인 지점은 이론상으로 계산되지 않기 때문에 실제 적용에 있어서의 문제점으로 나타났다. Glover 이론의 경우에는 그림 2의 결과와 마찬가지로 수리전도도가 큰 경우에 실험모의결과와 잘 일치하였다.

4.2 실험조건에 따른 담수-염수 경계면의 모의

수리전도도에 따라 5가지의 염수조 수위 조건에 대한 경계면을 모의하였다. 그림 5와 같이 경계면의 위치와 기울기가 크게 변하지 않고 일정한 패턴을 갖는 것으로 보아 염수의 수위 조건은 경계면 형성에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

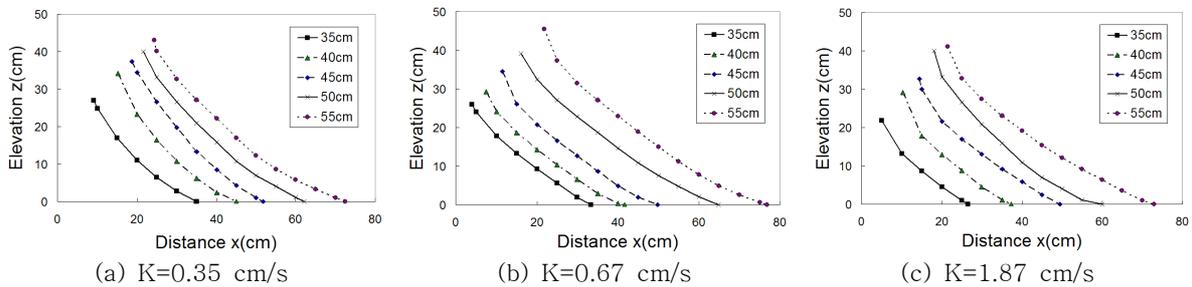


그림 5. 염수조의 수위에 따른 담수-염수 경계면의 비교

지표면의 경사에 따른 담수-염수 경계면 형성의 실험결과는 그림 6과 같이 나타났으며 그림 7은 각 조건에 따른 실험결과를 비교한 그래프이다. 염수가 지표면과 맞닿는 경계면의 시작위치가 전부 다르게 나타나면서 지표면 경사가 완만할수록 경계면의 기울기가 크게 나타났다. 이 때 경계면 시작위치의 높이(Elevation z)는 K=0.35 cm/s인 실험의 경우 평균 44 cm로 나타났으며 K=1.87 cm/s인 실험의 경우에는 평균 41 cm로 나타나 수리전도도에 따른 실험(실험A)과 마찬가지로 K=1.87 cm/s 실험의 경계면 시작위치가 낮게 형성되면서 실험결과가 모두 일정한 패턴을 보였다. 경계면의 끝부분의 위치는 K=0.35 cm/s인 실험의 경우 Distance x가 66.3~77.37 cm로 11.4 cm 차이를 보였으며, K=1.87 cm/s인 실험의 경우에는 66.1~75.8 cm로 9.7 cm 차이를 보이면서 역시 일정한 패턴을 보였다. 경계면은 대수층 사면에서 담수 및 염수의 유출 흐름(streamline)에 의해 형성되고, 담수 및 염수의 유출 지점인 사면 경사의 등수위선(equipotential line)을 직각으로 통과하게 된다. 그림 6과 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 가깝게 나타났다. 이외 다른 조건의 모든 실험결과도 비슷한 양상을 보인다.



그림 6. 지표면의 경사에 따라 형성된 담수-염수 경계면

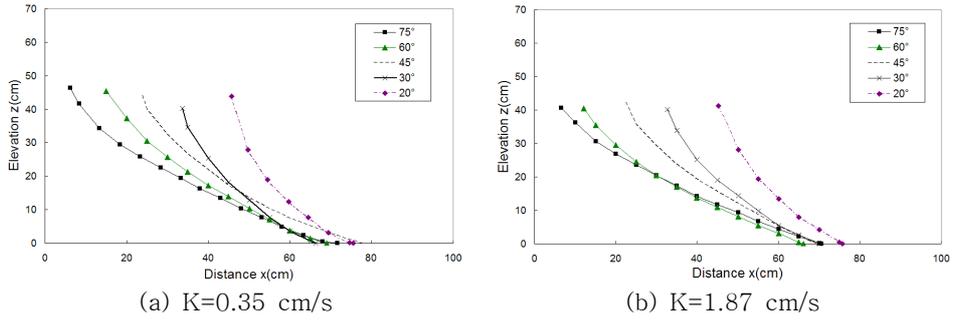


그림 7. 지표경사에 따른 담수-염수 경계면의 비교

염도 조건에 따른 담수-염수 경계면의 모의결과 비교그래프는 그림 8과 같다. 실험A와 실험B에 비해 미비한 차이를 나타내면서 일정한 패턴을 나타내지 않는다. 이러한 이유는 지표 사면으로 유출되는 담수가 염수와 섞이면서 이로 인해 염수의 염도가 희석되기 때문인 것으로 사료된다. 만약 지표 사면으로 유출되는 담수가 염수와 섞이지 않고 모두 바로 염수조에서 배수가 된다면 더욱 뚜렷한 경향을 나타낼 것이다.

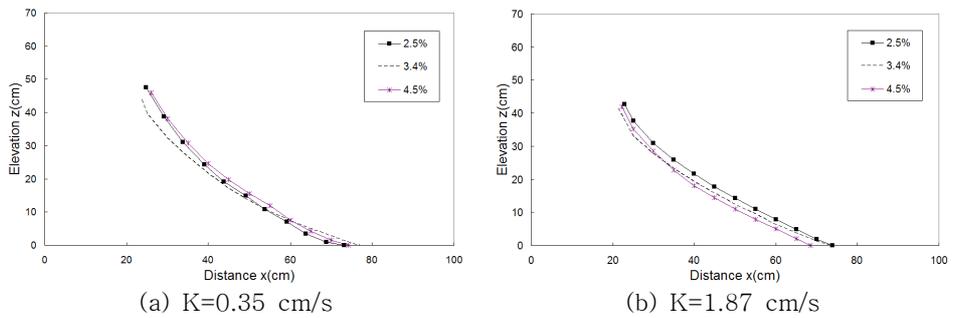


그림 8. 염도에 따른 담수-염수 경계면의 비교

5. 결론

본 연구를 통해 토양에 따른 수리전도도 값에 따라 담수-염수 경계면의 위치가 변화하는 것을 확인할 수 있었으며, 해안 지표면의 경사는 경계면의 기울기에 영향을 미치는 인자로 나타났다. 지표면의 경사가 낮은 경우에는 담수-염수 경계면의 기울기가 크게 나타났으며, 반대로 경사가 높은 경우에는 경계면의 기울기가 작게 나타났다. 이와 같은 결과는 위치흐름의 기본 이론인 대수층에서의 흐름의 방향은 사면경사와의 등수위선의 직각 교차를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 염수의 염도 또한 경계면의 위치에 영향을 주는 인자이지만 수리전도도에 비해 그 영향의 정도가 미비하였다. 이는 유출되는 담수가 염수와 함께 희석되어지면서 염수의 밀도가 변화하기 때문인 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Glover, R.E. (1959). The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer, Journal of Geophysical Research, Vol. 64, No. 4, pp. 457-459.
2. Henry, H.R. (1959). Salt water intrusion into fresh water aquifers, Journal of Geophysical Research, Vol. 64, pp. 1911-1919.