

# 해안대수층에서 염수 양수를 통한 염수 침투 제어 및 가능 최대 담수 양수량 산정에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on a Sea Water Infiltration Control via Pumping of Salt Water at Coastal Aquifer and Calculation of the Maximum Possible Amount of Pumping

서성국\*, 오창무\*\*, 김원일\*\*\*, 호정석\*\*\*\*, 안원식\*\*\*\*\*

Seong Kook Suh , Chang Moo Oh , Won Il Kim , Jung Seok Ho , Won Sik Ahn

### 요 지

본 연구에서는 수리모형실험을 통해 해안지역 대수층에서 해수침투가 일어나지 않는 지하수의 최적 양수량을 산정하였다. 해안 대수층 및 양수정을 구현하기 위해 가로 140 cm, 세로 70 cm, 두께 10 cm 의 직사각형 Sandtank 모형과 5 mm 원형관을 이용하여 수행하였다. 해수의 염도, 해안가의 지표경사 등을 기준으로 설정하였으며, 다공질 매체의 입자크기에 따른 수리전도도 2가지를 경계조건으로 하여 각각의 양수정 위치에 따라 최대 담수량을 모의하였으며, 이 때, 하나의 과잉 담수량에 따른 최적 염수량을 산정하여 염수침투 제어 효과를 검증하였다. 다공질매체의 수리전도도가 높을수록 최대 담수량이 증가되며 이에 따라 염수 침투 제어를 위한 최적염수량이 증가하였다. 또한 양수정의 위치가 염수조에 가까울수록 최대담수량 및 최적염수량이 감소되었다. 이러한 모의를 통하여 설정된 각각의 양수정 위치에서 최적의 염수량으로 염수침투를 제어함으로써 지속시간 이용가능한 최대담수량을 나타내었다.

**핵심용어 :** 최대 담수량, 해수침투, Sandtank 모형, 해안대수층 지하수

### 1. 서론

우리나라는 수자원 수요량에 따른 공급원으로 주로 지표수에 의존하였지만 물 수요의 증가에 따라 기상변화와 오염원의 영향이 지표수에 비해 상대적으로 적은 지하수자원의 개발과 이용에 대한 필요성이 증가하고 있다. 특히 3면이 바다인 우리나라는 해안지역이 차지하는 비율이 크고 해안지역에는 산업시설 또한 대규모로 위치하고 있으므로 안정적인 수자원의 확보가 필수적이라 할 수 있으며, 이에 따른 지하수 개발량 및 의존율은 매년 크게 증가하고 있다. 이러한 지하수의 이용은 일반적으로 우물을 통한 양수 방법으로 행해진다. 그렇지만 무분별한 개발을 통해 과잉 양수를 초래하게 되면 여러 문제점이 발생할 수 있고, 특히 해수침투로 인한 지하수 오염이 그 대표적인 예라 할 수 있다. 해수-담수간의 경계면 형성과 양수실험 등의 선행 연구 중 박화준(2009)은 모래수조를 이용한 물리모형실험과 수치해석을 통해 경계면 형성에 미치는 인자들에 대한 영향을 분석하였다. Park et al.(2004)은 2차원 및 3차원 모래수조 모형을 이용하여 양수 실험을 수행하여 분석하고, 3차원 모형의 경우 염수의 측면침투까지 모의하였다. 이영수(2005)는 해수침투 양상을 분석하기 위해 3차원 축소모형을 사용하여 양수 실험을 통해 해수침투 영향을 분석하였다. 김성윤(2008)은 시범현장을 운영하여 현장자료와 경계면 모델의 계산자료를 비교 분석하였다. 또한 담수-해수 경계면 하부의 해수를 양수하여 해수침투 제어 실험을 통하여 수치모델의 적용성을 검증하였다.

본 연구에서는 해안대수층 및 양수정을 구현하기 위해 실험 수조를 제작하고 다공질 매체의 입자크기에 따른 수리전

\* 수원대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : h8797@chol.com  
\*\* 수원대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : ocm1277@naver.com  
\*\*\* 공학박사, 대림대학 토목환경과 교수, · E-mail : wikim@suwon.ac.kr  
\*\*\*\* 공학박사, 뉴멕시코주립대학교 연구교수 · E-mail : jayho@unm.edu  
\*\*\*\*\* 공학박사, 수원대학교 명예교수, 하천환경기술연구소 소장 · E-mail : wsan@suwon.ac.kr

도도, 해수의 염도, 해안가의 지표경사를 경계조건으로 하여 양수정 위치에 따른 담수량 산정 실험을 수행하였으며, 담수-염수 경계면의 하부에 위치하는 염수를 양수함으로써 하나의 과잉 담수량에 따른 최적염수량을 산정하는 실험을 통하여 염수의 침투를 제어하는 방법에 대한 연구를 하고자한다.

## 2. 지하수 흐름 해석

### 2.1 해안대수층의 담수-해수간 경계면 이론

해안대수층에서는 일반적으로 밀도차에 의해 담수와 염수의 뚜렷한 경계면이 존재하며 지각운동, 수문순환 등의 자연적 요인과 인간 활동에 의한 인위적 요인에 의해 변동하게 된다. 담수-해수 경계면의 이론적 산정 방법은 Ghyben-Herzberg의 정수역학적 개념과 동수역학적 개념이 있다. Ghyben-Herzberg에 의한 경계면 이론에서 경계면의 높이는 일반적으로 식(2)와 같이 나타낸다.

$$z = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} h \quad (1)$$

여기서,  $z$ 는 해수면 아래의 담수-해수 경계면까지의 깊이,  $h$ 는 해수면위의 지하수면의 높이,  $\rho_w$ 는 담수의 밀도,  $\rho_s$ 는 해수의 밀도이다.

Ghyben-Herzberg 경계면 이론을 통하여 염수의 밀도가  $1.025 \text{ g/cm}^3$ , 담수의 밀도가  $1.000 \text{ g/cm}^3$ 인 경우 해수면에서 지하수면까지 높이의 40배가 해수면에서 경계면까지의 높이가 된다. 즉,  $z = 40h$  이다. 하지만, 위 식은 지하수가 수평흐름이지 않거나, 해수가 유동하는 지점 등에서는 완전히 성립되지 않는다. 그러므로 담수와 해수의 밀도차에 의한 천이영역이 크지 않다는 가정하에 형성된 면을 담수-해수 경계면이라고 한다.

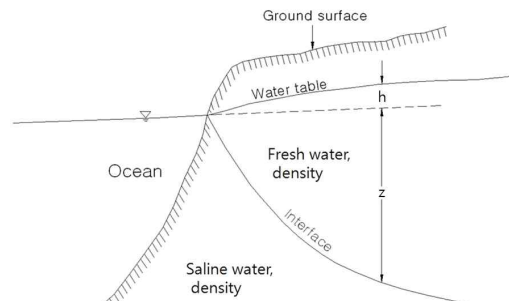


그림 1. 비피압 해안대수층의 담수-해수 경계면

### 2.2 우물로의 지하수 유동

대수층에 우물방향으로의 이동을 방사상 유동이라하며 이러한 방사상 유동을 해석하기 위해서는 극좌표를 이용할 수 있다. 만일 대수층이 수평면에 대해 등방성이라면 흐름은 방사상 대칭성을 가지게 되며, 피압대수층에 대한 2차원 흐름은 직교좌표계 내에서 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

대수층으로 함양이 있는 경우 2차원식을 피타고라스 이론을 이용하여 방사상 좌표식으로 나타내면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{w}{T} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

여기서,  $h$ 는 수두,  $w$ 는 수직누수율,  $S$ 는 저류계수,  $T$ 는 투수량계수,  $t$ 는 시간,  $r$ 은 양수정으로 부터의 거리이다.

## 3. Sandtank 수리모형실험

### 3.1 실험장치 및 경계조건

양수로 인한 해안지역 대수층의 해수침투를 평가하기 위하여 가로 140 cm, 세로 70 cm, 두께 10 cm 의 직사각형 수조를 아크릴로 제작하였으며, 수조의 양 끝에는 담수와 염수의 공급을 위한  $(10 \times 70 \times 10) \text{ cm}^3$  부피의 담수조와 염수조를 설치하였다. 또한 다양한 수위 조건의 설정을 위하여 5 cm 간격의 월류공을 타공

하였다.

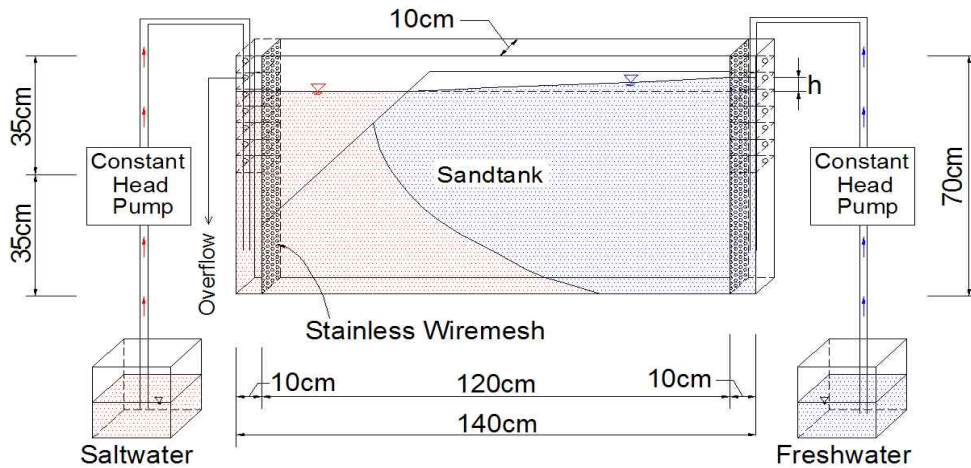


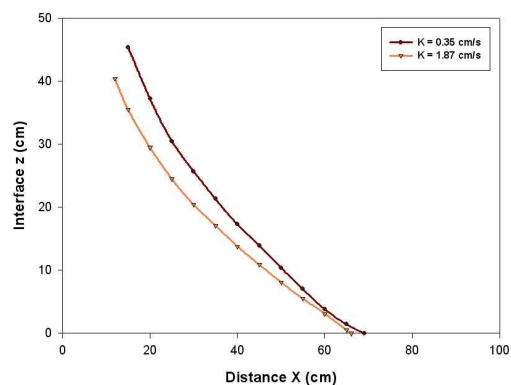
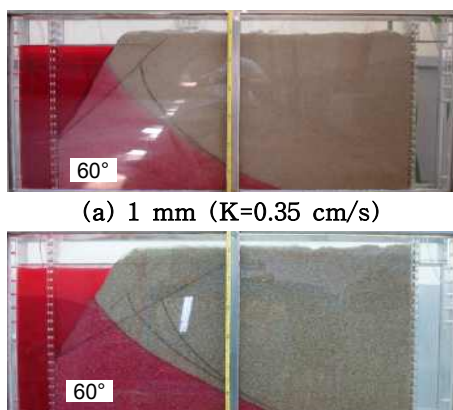
그림 2. Sandtank 모형

모형 내에서 대수층의 재현을 위한 시료는 1 mm 및 2 mm 크기의 주문진 표준사를 사용하였으며, 모래시료에 대한 체가름 실험, 공극률 실험 및 수리전도도 실험을 수행하여 기본적인 물성치를 산정하였다. 그 결과 균등계수는 1.33 및 1.59로 산정되어 균일한 입도조건의 시료로 분석되었고, 수리전도도는 1 mm 모래가 0.35 cm/s, 2 mm 모래는 1.87 cm/s로 산정되었다.

물과 염화나트륨을 용해시켜 염도 34 ppk, 비중 1.022의 염수를 제조하여 해수를 구현하였고, 담수-염수 경계면과 염수 침투를 명확히 관측하기 위하여 적색 염료를 첨가하였다. 이 때, 염수의 염도는 전기전도도 측정기(CM-21p, TOADKK)를 이용하여 측정하였고 담수와 염수는 정량이송펌프(PP-150DW, 풍림상사)에 의해 압송되어 각각의 담수조와 염수조로 공급되면서 모래시료의 공극 사이로 침투하게 된다.

### 3.2 담수-염수 경계면 평형상태 모의

양수실험을 위한 양수지점을 결정하기 위해 먼저 염수와 담수의 평형 경계면 형성 실험을 수행하였다. 염도는 우리나라 남해의 평균 농도인 34 ppk, 지표경사는 실험모형의 구조상 최적인 60°, 염수조의 수위는 55 cm의 경계조건을 설정하였으며, 수리전도도는 준비된 시료의 0.35 cm/s, 1.87 cm/s 2개 조건으로 수행하였다.



(a) 1 mm (K=0.35 cm/s)

(b) 2 mm (K=1.87 cm/s)

(c) 경계면의 비교

그림 3. 수리전도도에 따른 경계면의 비교

실험결과 염수와 담수간의 평형상태에 도달한 후, 그림 3.(c)와 같이 염수의 침투거리는 수리전도도에 따른 큰 차이를 나타내지 않았다. 하지만 양수정의 위치 결정에 있어 매우 중요하게 고려되는 염수-담수 경계면의

기울기는 수리전도도가 작을수록 기울기가 증가하였다.

### 3.3 양수정을 통한 최대담수량 및 염수침투 제어 모의

담수-염수 경계면 형성 실험과 동일한 경계조건을 설정하였으며, 평형상태 도달 후 양수정의 위치를 선정하였다. 양수정을 구현하기 위해 직경 5 mm 원형관을 사용하여 경계면에서 연직 방향으로 4 cm 간격의 3개 지점(A1, A2, A3)과 염수조 쪽으로 5 cm 이동한 수평 간격의 3개 지점(B1, B2, B3)에 대하여 담수량 산정을 위한 실험을 수행하였다. 염수의 침투상태는 양수되는 담수의 염도로 평가하였다. 실험 결과 경계면에서 가장 근접한 첫 번째 지점(A1)에서는 염수면과도 근접해 있기 때문에 적은 양수량임에도 염수의 침투가 나타나면서 양수되는 담수의 염도가 계속 증가하였다. 이는 경계면에 근접한 곳에 양수정을 설치하여 담수를 양수하였을 때 가까이 위치해 있는 염수의 영향으로 지속적인 양수정의 사용이 불가능하다는 것을 의미한다. 이러한 결과로 본 연구에서는 4지점(A2, A3, B2, B3)에 대한 담수량을 산정하였다.

표 1. 양수 실험 경계 조건

염수조수위 (cm)	지표면경사 (°)	염도 (ppk)	수리전도도 (cm/s)	양수지점	
55	60	34	0.35	담수	A1~3, B1~3
			1.87	염수	a1~3, b1~3

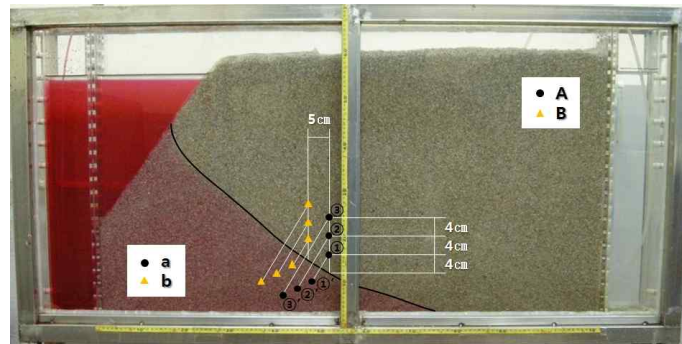


그림 4. 담수양수정 및 염수양수정 위치

최대담수량 산정을 위한 실험에서는 시간이 지남에 따라 담수-염수의 경계면에 변화가 나타나면서 경계면이 양수정 위치 쪽으로 상승하였다. 일정시간이 경과한 후, 그림 5(a)와 같이 경계면의 변화가 더 이상 발생하지 않는 새로운 평형상태가 형성되었고, 이 때, 양수된 담수의 염도를 지속적으로 측정하여 최대담수량을 산정하였다.

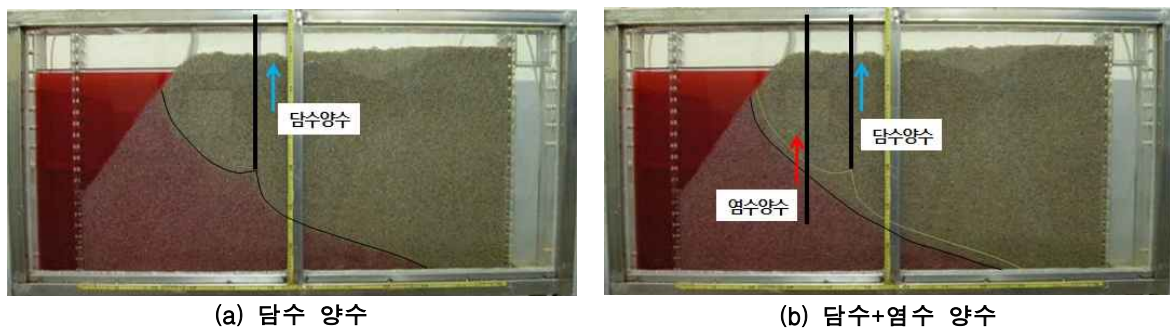


그림 5. 염수침투 제어 효과 검증

일련의 과정을 반복하면서 양수정을 통한 과잉 양수로 인해 염수가 침투하는 양상을 모의하였다. 그리고 경계면 하부의 염수를 직접 양수하는 실험을 통하여 염수침투 제어 효과 분석을 수행하였다. 염수정의 위치는 담수-염수 경계면을 기준으로 담수의 양수정과 직각의 동일거리에 설치하여 경계면이 초기 평형상태를

회복 할 수 있도록 하였다.

염수침투 제어를 위한 최적의 염수량 산정 실험 결과 그림 5(b)와 같이 시간이 경과함에 따라 초기 담수-염수 경계면과 근접하게 회복 되었고, 양수정으로 양수되는 과잉 담수량의 염도농도 또한 원래 담수의 염도농도인 0.01 % 로 회복되었다.

다음의 표 2.에 수리전도도에 따른 각각의 양수정 위치에서 최대담수량 및 염수침투 제어를 위한 최적염수량 산정결과를 나타내었다.

**표 2. 수리전도도에 따른 양수량**

구분	최대담수량 (ml/min)				최적염수량 (ml/min)			
	A2	A3	B2	B3	a2	a3	b2	b3
1 mm (K=0.35 cm/s)	27	41	24	34	50	59	47	59
2 mm (K=1.87 cm/s)	72	154	41	87	61	141	55	67

상기한 표 2.에서와 같이 수리전도도가 0.35 cm/s 인 A3 지점의 양수정 위치에서 가장 많은 담수량인 154 ml/min으로 나타났고, 이와 반대로 수리전도도가 1.87 cm/s인 B2 지점의 양수정 위치에서 24 ml/min 의 가장 적은 담수량이 산정되었다. 이는 담수-염수 경계면으로부터 양수정 위치가 멀어질수록 담수량이 많아지고, 가까운 위치일수록 담수량이 적어진다는 평가를 할 수 있다.

해수 침투 제어를 위한 최적염수량은 a3 지점의 실험 결과인 141 ml/min 가 가장 많은 염수량으로 산정되었으며, 이는 담수량이 증가할수록 염수 침투 제어를 위한 염수량의 소비 또한 증가한다는 것을 의미한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 해안대수층에서 담수-염수 경계면 형성의 특성을 파악하여 양수정 위치에 따른 가능최대담수량 산정과 과잉양수로 인하여 침투되는 해수의 제어를 위한 최적염수량 산정하는 연구를 하였다. 양수정 위치 선정에 있어 중요한 인자인 수리전도도가 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해, Sandtank 모형을 이용하여 실험을 수행하였다. 각각의 조건에 따라 총 16번의 실험을 수행하였으며, 수리전도도에 따른 양수정 위치별 최대담수량과 최적염수량을 비교하였다.

첫째, 수리전도도 조건에 따른 담수-염수 경계면의 위치는 수리전도도가 높을수록 염수조 쪽으로 이동하였다. 이는 상대적으로 대수층의 빠른 유속과 그로인한 유출로 인해 평형상태의 유지를 위한 수위비가 증가함으로써 발생하는 현상이라 할 수 있다. 그러므로 만일, 실제 해안가 내륙에서의 호우가 지속 된다면 대수층의 담수위 상승으로 인한, 담수-해수 경계면이 해안 쪽으로 이동하게 됨을 예상할 수 있다.

둘째, 담수-염수 경계면의 변화에 따라 양수량 증감에 차이가 나타났다. 이러한 결과는 담수-염수 경계면의 기울기 형성에 주요 인자인 수리전도도에 의한 영향이라 할 수 있다. 이에 따라 실제 해안대수층의 수리전도도 파악을 함으로써 담수-염수 경계면 기울기의 예측을 통하여 가능한 해수층에서 보다 떨어진 곳에 양수정 개발을 한다면 보다 많은 담수량의 이용이 가능할 것으로 판단된다.

셋째, 관정의 개발을 위한 양수정의 설치에 있어 해수침투를 제어 하는 방법에는 담수를 주입하는 방법과 염수를 양수하는 2가지 방법이 있다. 두 가지 방법중 담수주입 방법은 담수를 얻기위해 그에 상응하는 또다른 담수를 확보해야 한다는 문제점이 있으므로 지하수 개발과 이용의 목적인 물 확보가 해결되지 못한다. 또한 과도한 양수를 하여도 양수정 위치 파악에 따른 최적염수량을 양수 함으로써 염수침투의 영향 없이 지속적으로 담수를 이용할 수 있다는 장점이 있으므로 염수량수에 의한 해수침투 제어가 담수를 주입하는 방법보다 안정적인 지하수의 이용 측면에서 더 효율적이라 판단된다.

본 연구에서 수행한 모형실험은 대수층의 구현을 위하여 다공질매체 자체를 교체해야 함에 따라 실험적 오차가 발생할 수 있으나, 보다 균일한 입자 크기의 시료를 사용하여 실험을 수행한다면 오차를 최소화 할 수 있는 방법일 것이다. 또한 다양한 수리전도도를 가진 다공질매체에서의 실험 수행이 필요하며, 이러한 결과들의 비교 및 분석을 한다면 보다 정확한 실제 해안대수층의 지하수 개발 및 이용의 많은 도움을 줄 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 김성윤 (2008). 해수 양수를 통한 지하수 해수빼기 침투 제어 기술. 석사학위논문, 동아대학교.
2. 박남식, 홍성훈, 심명근 (2003). 유전자 방법과 병렬처리를 이용한 해안지하수 최적 양수량 결정 모형 개발. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제23권, 제5B호, pp. 397-403.
3. 박화준 (2009). 해안대수층의 염수-담수 경계면 형성에 영향을 미치는 인자들에 대한 실험 연구. 박사학위 논문, 수원대학교.
4. 시뢰, 최뢰, 이찬종, 홍성훈, 박남식 (2009). 모래상자 수리모형실험을 통한 경계면 모델의 관정 염도 모의 실험. 대한지질공학회논문집, 대한지질공학회, Vol.19, No.1, pp. 9-14.
5. 이영수 (2005). 3차원 축소모형을 이용한 해수침투의 실험적 연구. 석사학위논문, 한양대학교.
6. 이정호, 윤정호, 문유리 김훈미, 황상일 (2007). 해안지역 지하수 수자원 통합관리방안 연구 I. 한국환경정책·평가연구원.
7. 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.
8. Park, H.J., Kim, J.S., Ho, J.S., An, W.S. (2007). "Numerical Modeling Study For Saltwater Intrusion On Sand Tank Experiment." 2007 AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA.
9. 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.
10. Park, H.J., Suh, S.K., Ho, J.H., An, W.S. (2009). "Saltwedge Dynamics of Porous Media Tank Experiment." 33rd IAHR CONGRESS, Vancouver.