

수리 변수들이 대수층 내의 담수 해수
- 확산대의 형성에 미치는 영향에 대한 정량적 분석
Quantitative Analysis for the Effects of Hydraulic Variables on
the Formation of Freshwater-Saltwater Transition Zones in Aquifers

박 남 식*
Park, Nam Shik

Abstract

The location and the shape of freshwater-saltwater transition zones in coastal aquifers are affected by many hydraulic variables. To date most work to determine the effects of these variables are limited to qualitative comparison of transition zones. In this work characteristics of transition zones (maximum intrusion length, thickness, and degree of stratification) are quantified, and effects of principal hydraulic variables (velocity and dispersivity) on these characteristics are studied using a numerical model. Dimensional analysis is used to assemble entire model results. Effects of velocity and dispersivity are seen clearly. From this study, increase in velocity is found to cause shrinkage of transition zones. This observation contradicts claims by some that, because dispersion is proportional to velocity, increase in velocity would cause expansion of transition zones.

요 지

해안 대수층 내에서 담수와 해수 사이에 형성되는 확산대의 위치와 형태는 많은 변수들에 의하여 영향을 받는다. 현재까지 수행된 많은 연구는 확산대들의 정성적 비교로 국한되었다. 본 연구에서는 정량적 분석을 위하여 확산대 특성(최대 침투 길이, 두께, 성층 정도)을 계량화하고 수치 모형을 이용하여 주요 변수(유속과 확산지수)가 확산대 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 차원해석을 통하여 정리된 실험 결과는 유속과 확산지수가 확산대의 특성에 미치는 영향을 명확히 규명하였다. 유속의 증가는 확산계수를 증가시키기 때문에 확산대가 팽창한다는 일부의 주장과는 달리 확산대는 축소하는 것으로 밝혀졌다.

1. 서 론

날로 심화되는 지표수의 수질 악화는 지하수의
수자원으로서의 가치를 더욱 높여 주고있다. 현재

* 동아대학교 토목공학과

지하수는 무조건 양질의 물로 받아들여지는 경향이 있으나 지하수도 각종 오염물의 위협을 받고있으며, 또한 유해 물질 함량의 초과로 폐쇄되는 우물들도 속출하고있다. 일단 오염된 지하수와 대수층의 정화는 지표수의 정화보다 훨씬 어렵기 때문에 오염 방지가 절대적으로 필요하다. 오염을 효과적으로 방지하려면 개발로 인한 영향에 대한 예측 평가가 선행되어야하며 이러한 과제의 수행에는 수치모형이 가장 적합하다.

해안에 인접한 대수층의 지하수 자원을 위협하는 해수 침투 현상을 분석할 때 가장 중요한 요소는 밀도 차이이며(그림 1), 이를 고려하는 수치모형에는 두 종류가 있다. 첫째는 담수와 해수 사이에 형성되는 (농도가 연속적으로 변하는) 유한한 두께의 확산대(disperse interface)를 고려하는 확산모형(dispersion model)과 그 두께가 다른 길이의 척도(예 : 유역의 크기)에 비하여 작아서 무시할 수 있다는 가정을 사용하는 비확산모형(sharp-interface model)이 있다. 해수의 영향을 받는 대규모 유역 전체에 대한 지하수 자원의 평가에는 비확산모형 외에는 다른 대안이 없는 실정이다(박, 1994). 그러나 모형 유도에 사용된 가정때문에 비확산모형을 국부 지역에서의 해수 침투 현상을 분석하는 데 적용시키기에는 적합하지않다.

본 연구에서는 대수층에서 발생하는 해수 침투 현상을 분석할 때 사용되는 확산모형을 이용하여 확산대에 미치는 주요 수리 요소들의 영향을 분석한다. 확산대의 형성에 미치는 영향이 큰 수리 변수들은 이송(advection)과 확산을 지배하는 유속과 확산지수이며 이 변수들의 변화에 대한 확산대의 반응에 대하여 많은 연구가 수행되었다. (예, Volker와 Rushton, 1982; Reilly와 Goodman, 1986; 등). 그러나 확산대 형태의 다양성으로 인해 분석은 여러 경우에 대하여 도시된 확산대를 정성적으로 비교검토하는 것으로 국한되었다. 이러한 방법은 주관적인 요소가 개입될 뿐 아니라 분석할 수 있는 실험 결과의 수에도 명백한 한계가 있으므로 본 연구에서는 확산대 형태의 정량적 분석을 가능케하기 위하여 확산대 특성의 계량화를 시도하였다. 계량화된 확산대의 특성은 해수침투의 최대 침투 길이, 확산대의 두께, 지하수의 성층 정도이다.

최대 침투 길이는 해수가 얼마만큼 내륙으로 침입했는지를, 두께와 성층 정도는 각각 수평과 수직 방향에서의 염화물 농도 변화를 나타낸다.

수치 모형 실험에는 제주도 동북지역에 대한 수리 변수들의 값을 사용하였다 (건설부 등, 1993). 수치 모형 실험 결과에 대한 확산대의 특성은 차원 해석을 통하여 관련 변수들을 무차원화하여 종합적으로 분석하였다. 확산계수(dispersion coefficient)는 유속에 비례하므로 유속이 커지면 확산대의 두께도 커진다는 주장이 있다. 그러나 지하수 흐름은 상류부의 담수를 바다 쪽으로 이송시키는 역할도 수행하며 이는 확산대를 축소시키는 경향이 있다. 그러므로 유속은 서로 상충되는 효과를 동반하며 확산대의 반응은 두 역할 중 지배적인 요소에 의하여 좌우된다. 본 연구에서 수행한 실험 결과 이송이 확산보다 지배적이어서 유속의 증가는 확산대의 축소를 야기시키는 것으로 밝혀졌다.

2. 확산모형

염화물의 농도가 연속적으로 변하는 유한한 두께의 확산대의 존재를 고려할 때 지하수와 염화물의 질량 보존의 법칙으로부터 얻어지는 확산모형의 지배방정식은 다음과 같다:

$$\nabla \cdot K \cdot (\nabla h + \epsilon c e_z) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \theta \epsilon \frac{\partial c}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (D \cdot \nabla c) v \cdot \nabla c = \theta \frac{\partial c}{\partial t} \quad (2)$$

여기서 ∇ 은 구배(gradient)연산자, c 는 해수의 농도로 표준화된 염화물의 농도, $\epsilon (= \Delta \rho / \rho')$ 은 담수와 해수 사이의 밀도 변화율, K 는 수리전도도 텐서, θ 는 유효 공극률, 그리고 e_z 는 연직 방향 단위 벡터, S_s 는 비저류 계수이다. 지하수 흐름 식(1)에서 미지수인 등가 담수 수두(equivalent freshwater hydraulic head)는

$$h = \frac{p}{\rho g} + z \quad (3)$$

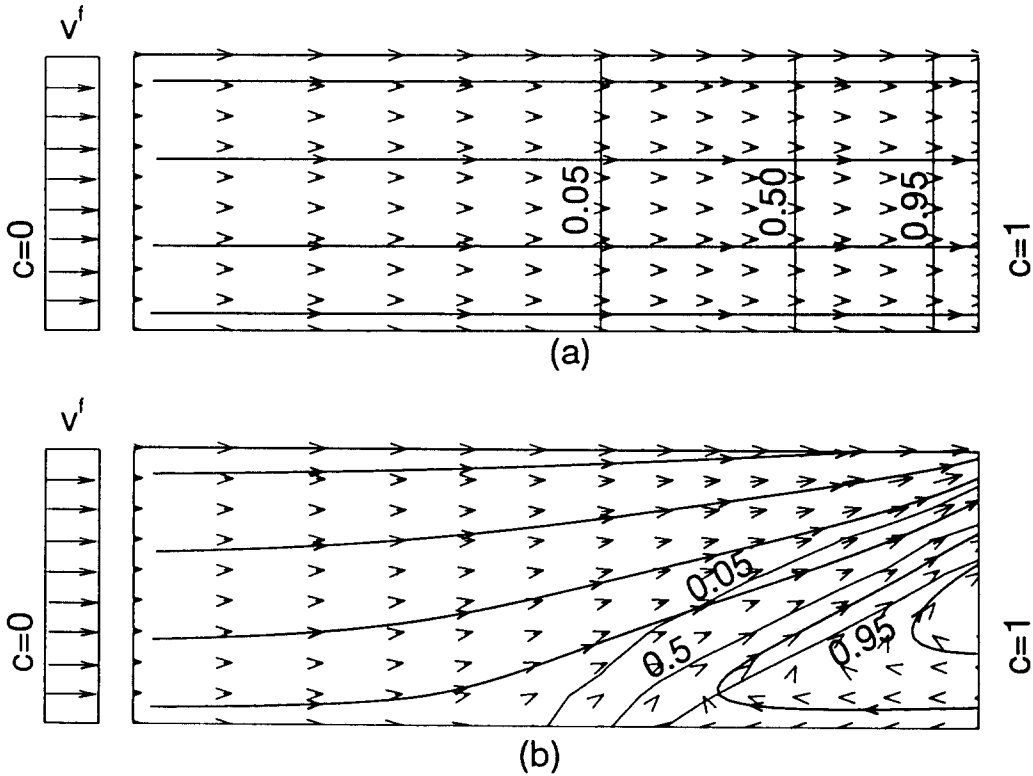


그림 1. (a) 담수와 해수 사이의 밀도 차이를 무시한 경우 (b) 밀도 차를 고려한 경우

로 정의된다(Luszczynski, 1971). 여기서 p 는 지하수압, ρ' 는 담수의 밀도, z 는 위치 수두이다. Darcy의 유속 벡터와 확산 계수 텐서는

$$v = -K \cdot (\nabla h + \epsilon c e_z) \quad (4)$$

$$D = D_m I + \alpha_T |v| I + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{vv}{|v|} \quad (5)$$

여기서 D_m 은 분자 확산 계수, I 는 단위 텐서, α_L 과 α_T 는 각각 종 방향과 횡 방향 확산지수이다. 본 연구에서는 식 (1)과 (2)를 유한요소법으로 처리한 수치모형 DSTRAM (Huyakorn과 Panday, 1990)을 이용하였다. 이 모형은 많은 검증을 거친 후 현장에 적용된 바있다 (Park, 1991).

3. 수치 모형 실험 범위

앞서 소개된 확산 모형의 지배 방정식에서 볼 수 있듯이 확산대는 다음과 같은 많은 수리 변수들의 영향을 받는다: D , v , θ , H (대수층의 두께), L (대수층의 길이), S_s , i (위 아래 대수층과의 지하수 교환, vertical leakage), $\Delta\rho$, ρ' , g , K . 그러나 본 연구에서는 하나의 균질한 등방성 피압 대수층(K , α , i , H 는 일정)에서 정상 상태의 확산대(θ , S_s 는 수치 모형 실험 결과에 무관)를 평균 해수 성질($\Delta\rho$, ρ' 는 일정)로 국한하였다. 그러므로 연구 대상 변수들은 L , α , v 등이다. 여기서 대수층의 길이(L)는 내륙 쪽 경계 조건이 대수층 내의 등농도선 분포에 영향을 미치지 않으면 수치 모형 실험 결과와 무관하다. 그러므로 확산대의 반응에 영향을 미치는 대상 변수는 확산지수(α)와 내륙으로부터의 담수 유입량(v)으로 압축된다.

수치 모형 실험에 사용된 수리 변수들의 값은 제

주도 동북부지역 수리 지질 자료(건설부 등, 1993)에 의거하여 $H=200\text{m}$, $K=100\text{m/d}$, $\rho^l=1000\text{kg/m}^3$, $\rho^s=1025\text{kg/m}^3$, 그리고 대수층의 길이는 2km 로 하였다. 실험 대상 변수인 확산지수는 100m 부터 7m 까지 6가지 값($100, 70, 50, 25, 10, 7$)을 사용하였고, 담수유입량은 3.0m/d 부터 0.03m/d 까지 9가지 값($3.0, 1.0, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1, 0.07, 0.05, 0.03$)을 사용하였다. 참고로, 선행된 제주 동북부지역에서의 해수 침투 연구(이, 1993)에서는 40m 의 확산 지수가 사용되었다. 이 지역의 평균 담수 유입속도는 0.3m/d 정도이다.

4. 경계 조건과 수치 모형 실험

수치 모형 실험에 사용된 경계 조건들은 그림 2에 도시되었다. 대수층 내의 흐름은 내륙 쪽에서 유입된 담수가 해수 쪽 경계를 통하여 유입되는 해수를 밀어내는 상태이다. 해수 쪽 경계에서의 수송 방정식에 대한 경계 조건을 제외하고는 표준 조건들이다. 해수 쪽 경계의 아랫 부분에서는 해수가 유입되고, 윗 부분에서는 내륙쪽으로부터 흘러온 지하수가 유출된다(그림 1b). 해수가 유입되는 부분에서는 $c=1$ 의 경계조건이 사용될 수 있다. 유출 부분에서는 흔히 순간적 혼합의 가정을 사용하여 $c=1$ 의 조건을 적용하기도한다. 그러나 유출 부분에서의 농도는 상류로부터 도달하는 지하수 농도에 의하여 결정되므로 $c=1$ 의 조건은 적당치않다. 대신 경계에 도달하는 염화물을 거의 그대로 유출시키는 $\nabla c \cdot n=0$ 의 조건이 더 합리적이다(n 은 unit normal vector). 그러나 해수 쪽 경계에서 유출 부분은 흐름에 의하여 결정되는 관계로 수치 실험을 수행하기 전에는 알 수 없으므로 수치 실험 중 시산법을 통하여 경계 조건이 적용되어야 한다.

수치 모형 실험 중 수치확산(numerical dispersion)을 피하기 위하여 상류부 가중(upstream weighting)을 사용치 않았으며 수치해의 안정성을 기하기 위하여 확산대 근처의 격자 Peclet수를 4 이하로 하였다(Price 등, 1966; Voss와 Souza, 1987). 수치 모형 실험에 사용된 격자는 11×21 과 21×80 의 두 가지로 확산 지수가 작은 경우에는 조

밀한 격자를 사용하였다. 지배 방정식의 비선형성은 Picard 반복법(Huyakorn과 Pinder, 1983)을 이용하였으며 경우에 따라 매개 변수연속법(Rheinboldt, 1987)도 같이 사용하였다. 실험 결과의 일부($v=3, 0.3, 0.03\text{m/d}$ 와 $\alpha=100, 50, 10\text{m}$ 에 대한)가 그림 3에 도시되었다. 그림에 나타난 것처럼 확산대의 형태는 유속과 확산지수의 변화에 따라 큰 차이를 보인다.

5. 확산대 특성의 계량화

모의 실험으로 부터 얻어진 결과를 정량적으로 분석하기 위하여 확산대 특성을 다음과 같이 계량화하였다. 확산대 두께(B_{DI})는 순수 해수와 담수 사이의 두께를 나타내는 척도로 등농도선 0.01과 0.99사이의 면적을 확산대의 대표적 등농도선의 길이로 나눈 것으로 정의하였다. 여기서 확산대의 대표적 등농도선은 중심 농도를 나타내는 0.5 등농도선이 가장 적당한 것으로 여겨질 수 있으나 확산대가 대수층 내에서 명확히 발달치 않은 경우(즉, 0.5 선이 존재치않거나 짧은 경우)에는 B_{DI} 값이 비현실적으로 커지므로 확산대의 대표적 등농도선은 0.01선으로 하여 두께 B_{DI} 를 측정하였다(그림 4). 두번째 특성인 해수의 최대 침투 길이(L_{DI})는 염화물 농도가 기존 담수의 농도보다 증가하는 지점까지를 해안선으로 부터 측정한 거리이다. 이 거리는 0.01 등농도선이 대수층 바닥과 만나는 지점까지의 거리로 정의하였다(그림 4). 세번째 특성인 확산대의 성층 정도(θ_{DI})는 연직 방향의 단위 길이당 평균 농도 변화로써 나타낼 수 있으나 성층 정도가 심화됨에 따라 등농도선들의 경사가 완만해지는 경향이 있으므로(그림 3b, e, f) 0.5 등농도선이 대수층의 바닥과 이루는 각으로 정의 하였다(그림 4).

6. 차원해석을 통한 수치 모형 실험 결과 분석

수치 모형 실험에서 얻어진 결과를 종합 분석하기 위하여 차원해석(Buckingham의 Pi 정리)을 수행하였다. 관련 변수는 종속 변수($B_{DI}, \theta_{DI}, L_{DI}$)와 독립 변수($D, v, H, \Delta\rho, \rho^l, g, L$)를 합쳐 모

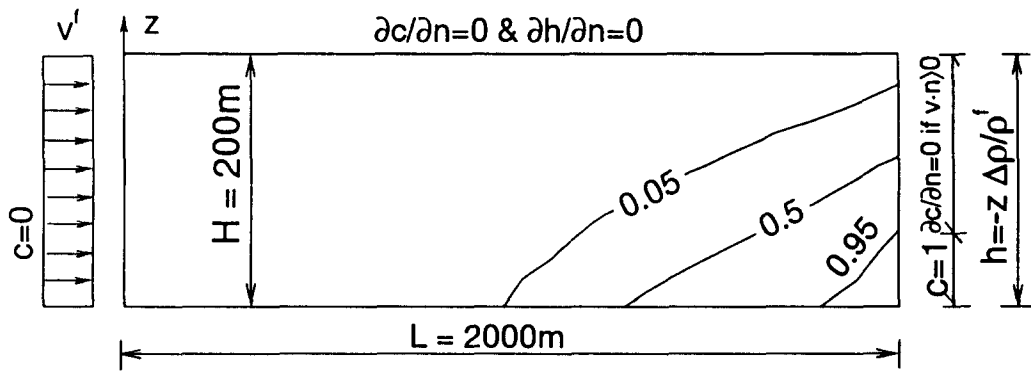


그림 2. 수치모형 실험에 사용된 대수층과 경계조건들

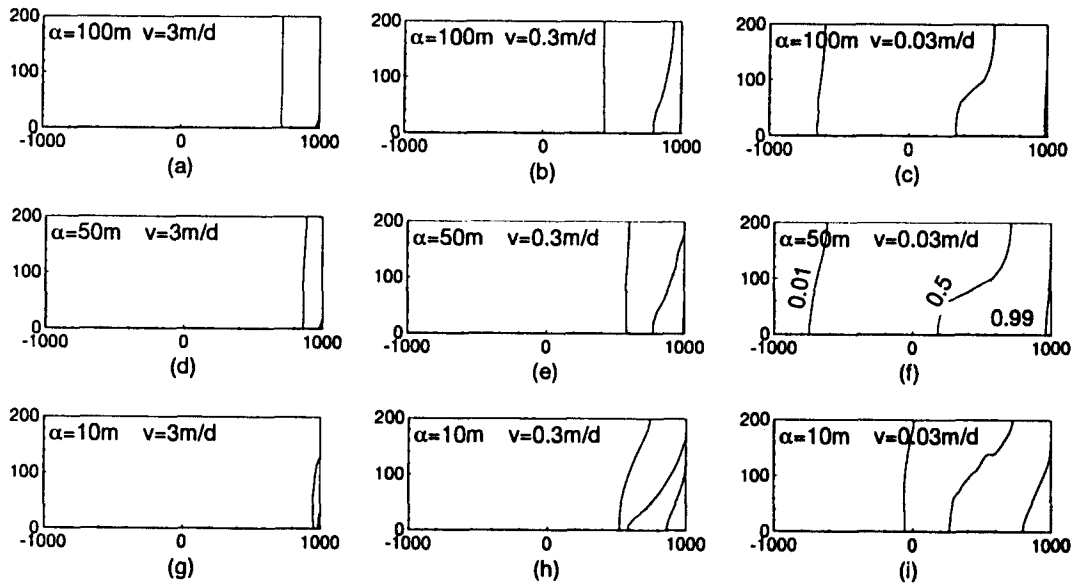


그림 3. 등농도선(0.01, 0.5, 0.99)으로 나타낸 일부 실험 결과

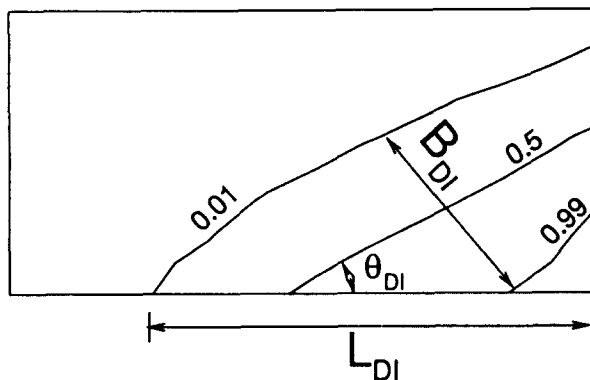


그림 4. 계량화된 확산대 특성의 정의

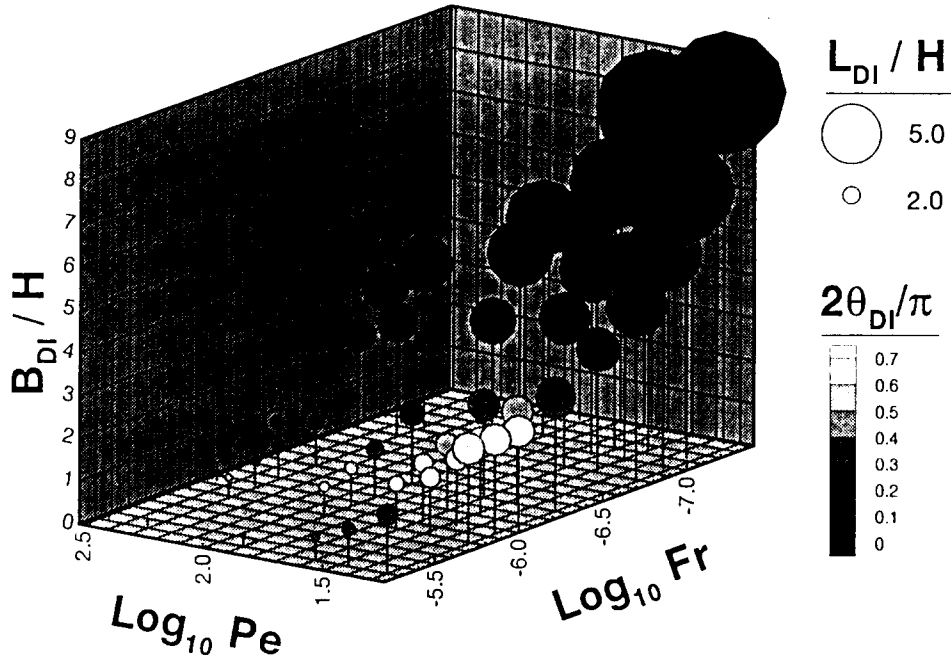


그림 5. Pe와 Fr수의 변화에 대한 확산대 특성의 반응

두 10개이다. 반복 변수를 ν , H , ρ' 로 하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\frac{B_{DI}}{H}, \frac{L_{DI}}{H}, \frac{2\theta_{DI}}{\pi} = f(\text{Pe}, \text{Fr}; \epsilon, \frac{L}{H}) \quad (6)$$

여기서 Peclet수 $\text{Pe} = H/D$, Froude수 $\text{Fr} = \nu / (gH)^{1/2}$ 이고 $g' = \epsilon g$ 는 수정된 중력가속도이다. 식(6)은 확산대 특성들이 4개의 무차원 수들의 함수임을 가리키나, 현재의 수치 모형 실험에서는 ϵ 과 L/H 가 고정된 수이므로 Pe와 Fr수만의 함수로 생각할 수 있다. θ_{DI} 는 $\pi/2$ 로 표준화되어 $\theta_{DI} = 1$ 은 0.5 등농도선이 대수층 바닥에 대하여 수직이라는 것을 의미하므로 수직 방향 농도 변화가 없다는 것을 가리키고 θ_{DI} 값이 작을수록 농도 변화가 크다는 것을 나타낸다.

모든 모의 실험 결과에 대한 확산대 특성을 Pe와 Fr수의 함수로 나타낸 것이 그림 5에 도시되었다. 좌표계의 횡축은 Pe와 Fr수를 나타내는데 상

용-log를 사용하였다. 좌표계의 종축은 무차원 두께 (B_{DI}/H)를 나타내고, 원의 크기는 무차원 침투 길이 (L_{DI}/H)를 나타낸다. 확산대의 성층정도 (θ_{DI})는 원 내의 그림자의 진하기로 나타내었다.

그림에서 나타나는 특성을 살펴보면 Fr수가 증가(유속 증가)하면 확산대의 최대 침투 길이 (L_{DI}/H)는 감소하는 경향을 보여준다. 또한 Pe수가 증가(확산지수 감소)하면 Fr수가 작은 경우를 제외하고는 동일한 경향을 보인다. Fr수가 작은 경우에는 침투 길이가 Pe수에 무관한 것처럼 보이거나 이는 확산대가 내륙 쪽 경계조건 ($c=0$)의 영향을 받은 것으로 판단된다. 즉, 그림 3c와 f의 경우 $c=0$ 가 적용된 내륙 쪽 경계가 현재의 위치보다 더 상류에 위치하였다면 $c=0.01$ 등농도선도 역시 상류로 이동하여 최대 침투 길이를 증가 시키리라는 것을 쉽게 짐작할 수 있다. 확산대의 두께 (B_{DI}/H)도 최대 침투 길이와 동일한 경향을 보이는 것을 관찰할 수 있다. 즉, Fr수가 증가하면 두께가 감소함을 알 수 있다. 이는 유속의 증가는 확산 계수의

증가를 초래하지만 확산보다 이송의 영향이 더욱 지배적이라는 것을 나타낸다. 확산대의 성층정도는 일반적으로 Fr수가 감소함에 따라, 또, Pe수가 증가함에 따라 심화되는 것으로 나타난다. Pe수가 증가함에 따라 성층 정도가 심화되는 것은 비확산 모형($\alpha=0$)으로 얻어지는 비확산대가 확산대보다 경사가 완만하다는 관측과 일관된 경향이다 (Volker와 Rushton, 1982; 박, 1994).

7. 결 론

본 연구에서는 해안 대수층 내에서 담수와 해수 사이에 형성되는 정상상태의 확산대의 형태에 영향을 미치는 두 수리 변수(유속과 확산지수)의 역할을 수치 모형 실험을 통하여 분석하였다. 실험 결과는 확산대 특성(확산대의 침투 길이, 두께, 성층 정도)의 계량화를 통하여 종래의 정성적 비교검토에서 탈피하여 정량적으로 분석하였다. 분석 결과는 다음과 같다. 확산 지수의 증가는 확산대의 침투 길이와 두께를 증가시키나 성층 정도는 감소시킨다. 유속의 증가는 침투길이, 두께와 성층정도를 모두 감소시키는 것으로 관찰되었다. 유속의 증가는 확산계수의 증가를 야기시켜 확산대의 두께를 증가시키려는 경향이 있지만 증가된 담수의 이송으로 인한 확산대의 축소 경향이 더욱 지배적임을 나타낸다.

본 결론은 해수의 수평 방향 침투에 대하여 얻은 것으로 upconing과 같은 해수의 연직방향 침투에는 적용되지 않는다. 앞으로의 연구에는 해수의 연직 방향 침투와 부정 상태의 확산대 반응에 대한 연구도 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

제주도 수자원 종합 개발계획 수립보고서. (1993). 건설부, 제주도, 한국수자원공사. 제 5 장.
 박남식 (1994). "해수 침투로 인한 지하수 오염: 수학적 모형들에 대한 비교검토." 대한토목학회 1994년도 학술발표회 논문집, 제 2권, pp. 147-150.
 이상호 (1993). "해수의 지하수 침투 예측모형 연구."

한국수자원공사 연구보고서 WRRI-WR-3-5, 대전, pp. 27-28.

Huyakorn, P.S., and Panday, S. (1990). "DSTRAM: Density-dependent solute transport analysis finite element model." *HydroGeoLogic*, Herndon, VA.
 Huyakorn, P.S., and Pinder, G.F. (1983). *Computational methods in subsurface flow*, Academic Press, NY, USA.
 Luszczynsk, N.J. (1971). "Head and flow of ground water of variable density." *J. of Geophysical Research*, Vol. 66, No. 12, pp. 4247-4556.
 Park, N.S. (1991). "Density-dependent cross-sectional flow and solute transport modeling for Manatee-South Hillsborough Water Resources Assessment Project." prepared for SWFWMD, Brooksville, Florida.
 Price, H.S., Varga, R.S., and Warren, J.E. (1966). "Application of oscillation matrices to diffusion convection equations." *J. of Math. and Physics*, pp. 301-311.
 Reilly, T.E., and Goodman, A.S. (1987). "Analysis of saltwater upconing beneath a pumping well." *J. of Hydrology*, Vol. 89, pp. 169-204.
 Rheinboldt, W.C. (1987). "Methods for solving systems of nonlinear equations." *CBMS-NSF, Regional Conference Series in Applied Mathematics*, SIAM, Philadelphia, USA, pp. 81-85.
 Volker, R.E., and Rushton, K.R. (1982). "An assessment of the importance of some parameters for seawater intrusion in aquifers and a comparison of dispersive and sharp interface modeling approaches." *J. of Hydrology*, Vol. 56, pp. 239-250.
 Voss, C.I., and Souza, W.R. (1987). "Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-saltwater transition zone." *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 10, pp. 1851-1866.

(접수: 94.12.23)