

공내수 치환기법을 이용한 연안지역 대수층의 수리특성 평가

황세호¹⁾, 박윤성¹⁾, 신제현¹⁾, 박권규¹⁾, 최선영¹⁾, 이상규²⁾

Detection of inflow permeable zones using fluid conductivity logging in coastal aquifer

Seho Hwang¹⁾, Yunsung Park¹⁾, Jehyun Shin¹⁾, Kwon Gyu Park¹⁾, Sun Young Choi¹⁾ and Sang Kyu Lee²⁾

요약: 연안지역에서 해수침투대의 특성을 파악하기 위하여 전기전도도검층을 수행하였다. 검층의 목적은 투수성 파쇄대 및 고염분 지하수가 유입되는 구간의 확인이다. 전기전도도검층은 시추공 내의 지하수를 전기적으로 다른 성질을 갖는 지하수로 치환하고 일정 양수 또는 자연 상태에서 시간에 따른 전기전도도의 변화를 측정한다. 따라서 시추공과 교차하는 투수성 파쇄대 또는 다공성의 대수층에서 시추공 내로 유입되는 지층수 전기전도도의 변화 특성을 일정 시간 간격에 따라서 측정하면 지하수가 유입되는 구간의 확인이 가능하다. 현장 시험에 적용한 공내수 치환 시스템은 주입과 양수, 유량측정이 가능하며 내경이 작은 모니터링 PVC 케이싱도 적용이 가능하도록 제작하였다. 전남 영광의 연안지역에 위치하는 3개 시추공에 공내수 치환기법을 적용하여 전기전도도의 변화 특성을 측정된 결과, 연안지역의 고염분 지하수는 균열암반을 통한 해수침투는 물론 간척사업으로 인한 잔류염분의 영향을 동시에 받고 있음을 확인할 수 있었다. 공내수 치환기법과 추가적으로 수행될 정량적인 해석 결과는 연안지역에서 수리상수 추정, 최적의 양수설계, 해수침투 특성 평가 등에 활용될 것으로 예상된다.

주요어: 공내수 치환기법, 해수침투, 전기전도도검층, 투수성 파쇄대 확인

Abstract: Fluid conductivity logging has been applied in the boreholes to identify the permeable fractures and estimate the origin of saline groundwater in coast area. Fluid replacement technique measures the fluid electrical conductivity with depth at different times in a well after the borehole is first washed out with different water by passing a tube to the borehole bottom. Then formation water flows into the borehole through aquifer such as permeable fractures or porous formation during ambient or pumping condition. Measured conductivity profiles with times therefore indicate the locations of permeable zone or fractures within the open hole or the fully slotted casing hole. As a result of fluid conductivity logging for three boreholes in the study area, it is interpreted that saline groundwater is caused by seawater intrusion through fractured rock, although the effect by land reclamation partially remains. We are planning the quantitative analysis to estimate the hydraulic characteristics using fluid replacement technique, and this approach might be usefully utilized for assessing the characteristics of seawater intrusion, the design of optimal pumping, and estimating the hydraulic properties in coastal aquifer.

Keywords: fluid replacement method, seawater intrusion, fluid conductivity logging, detection of permeable fracture

1) 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부(Geological & Environmental Hazards Division, KIGAM)

E-mail: hwangse@kigam.re.kr

2) 한국지질자원연구원 선임연구부장(Vice President, KIGAM)

1. 서론

국내 서·남해 연안지역에서 광범위하게 발생하고 있는 해수침투는 해수침투대의 범위와 정도, 고염분 지하수의 기원 등을 가능한 한 정확하게 파악해야 지속적인 연안 지하수의 개발과 보전은 물론 고염분 지하수의 확산방지 및 저감이 가능하다. 서·남해 연안지역은 오랜 기간동안의 간척사업으로 실제의 해안선 파악이 어려울 정도이며 특히, 연안지역 고염분 지하수의 기원을 평가하는데 많은 어려움이 따른다.

해수침투대의 특성을 파악하기 위하여 다양한 지표조사를 수행하며 직접적인 조사를 위하여 시험 시추공을 굴착한다. 시험 시추공은 지질특성, 대수층 평가, 장기모니터링, 수리시험 등에 이용하는데 연안지역의 경우, 다양한 조사를 수행할 수 있는 시추공 시공에 많은 어려움이 따른다. 즉, 기반암 상부에 매립층, 니질층 또는 사질층이 존재하기 때문에 대부분의 경우, 전 구간 케이싱을 설치하며 이와 같은 시추공 환경은 정확한 원위치 시험의 수행에 많은 제약을 주게 된다.

해수침투 특성을 파악하기 위하여 수행하는 물리검층법 중에서 전기전도도검층은 연안대수층의 특성 파악에 효과적이지만 다수의 대수층이 존재하는 경우, 공내수가 혼합되어 정확한 대수층(여기서는 균열암반의 파쇄대나 미고결 지층의 투수성 지층을 모두 포함)의 파악이 모호한 경우가 많다. 나공(Open hole)인 경우, 텔레뷰어검층(Acoustic Televiewer 또는 Optical Televiewer), 공경검층 등에서 파쇄대의 분포 특성을 파악할 수 있지만 실질적으로 어떤 파쇄대가 지하수의 유동과 관련이 있는지는 파악하기 어렵다. 지하수의 유동 가능성이 높은 파쇄대는 온도 또는 전기전도도의 변화율검층 자료에서 정성적인 추정만이 가능하다. 지하수 유동과 관련된 파쇄대의 확인은 packer 시험 또는 유향·유속검층(황세호 등, 2004a; Paillet *et al.*, 1993; Cohen, 1995)을 적용한다. 연안지역의 경우, 시추공 전 구간에 스크린을 설치한 케이싱을 삽입하며 관측정은 통상적으로 내경이 50 mm 정도이기 때문에 수리특성 파악을 포함하는 시추공 조사에 더욱더 많은 제약을 받게 된다.

본 연구에서는 연안지역에 위치하는 시추공에 대하여 공내수의 전기전도도 변화특성을 이용하여 시추공과 교차하는 투수성 파쇄대의 확인과 염분농도 변화 특성에서 해수침투의 특성을 파악하고자 하였다. 투수성 파쇄대 또는 다공성 대수층의 수리특성을 파악하기 위하여 공내수 치환기법을 적용하였다. 공내수 치환기법의 개념은 Tsang *et al.* (1990)에 의해 처음으로 제안되었으며 스위스 북쪽에 위치하는 심도 1689 m의 시추공에 적용하여 투수성 파쇄대의 확인과 각각의 투수성 파쇄대에 대한 투수량계수를 추정하였다. Drost *et al.* (1968)은 시추공내의 농도변화에서 수평적인 유동 속도를 측정하기도 하였는데 Drost의 연구는 Tsang *et al.* (1990) 연구개발의 기본 개념이 되었다. Cohen (1995)은 시추공과 교차하는 투수성 파쇄대 확인에 공내수 치환기법이 유향·유속검층보다 민감도가 높다는 결과를 보고하기도 하였다. 국내의 경우, 시추공 내 농도변화의 속도를 이용한 수리특성 연구가 수행되기도 하였다(김영화 등, 2003; 김영화 등, 2005).

본 논문에서는 공내수 치환기법의 개념, 측정 시스템의 제작과 현장 적용, 자료해석, 그리고 향후 정량 해석을 위한 수치계산에 대하여 기술 한다.

2. 공내수 치환기법의 개념, 시스템 개발 및 현장 적용

(1) 공내수 치환기법의 개념

시추공과 교차하는 파쇄대는 일반적으로 시추코아의 관찰, 공경검층 또는 텔레뷰어검층 등으로 파악이 가능하지만 투수성 파쇄대의 확인은 온도/전기전도도의 변화, 직접적인 유동의 측정, 또는 패커시험 등을 이용한다. 각 시험법은 시추공 환경, 대수층의 수리적인 특성에 따라서 적용하며 해석의 과정도 많은 차이점이 있다. 본 연구에서 적용한 공내수 치환기법은 공내수의 전기적 특성과 다른 물(여기서는 전기적으로 낮거나 높아 공내수의 전기적 특성과 차이가 있음을 의미함)을 주입하여 자연 상태 또는 일정 양수 상태에서의 전기전도도의 변화 특성을 이용하여 투수성 파쇄대를 확인하고 농도 변화에서 수리상수를 추정하는 기법이다. Fig. 1은 공내수 치환기법의 개념을 나타낸 것으로 시추공 바닥에 공내수와 다른 전기적 특성을 갖는 지하수를 주입하고 상부에서 양수를 하여 공내수의 전기적 특성을 주입수로 변화시킨 후에 양수 또는 자연 상태에서 시간에 따른 전기전도도의 변화를 측정, 해석한다. 이와 같은 기법은 Cohen (1995)이 제시한 것처럼 유향·유속검층보다 투수성 파쇄대의 확인에 효과적으로 이용될 수 있다. 공내수 치환기법의 현장 적용은 시추공의 크기, 심도 등에 따라서 세심한 주의가 필요한데, 특히 측정시 수위의 변화와 본 연구에서 적용한 소구경 시추공, 즉 내경이 50 mm 정도인 경우에는 주입과 양수, 그리고 전기전도도의 측정이 좁은 시추공 내에서 동시에 진행되기 때문이다. 일반적으로 조사시추공 또는 관측정이 나공(Openhole)인 경우, 적용 가능한 조사법이 다양하지만 해수침투대와 같이 케이싱을 삽입하는 경우에는 개별적인 대수층의 특성 파악에 어려움이 많기 때문에 공내수 치환기법의 적용이 유용하다. Tsang *et al.* (1990)은 투수성 파쇄대의 확인은 물론 현장자료에 대한 수치모델링을 적용하여 개별파쇄대의 투수량계수를 추정하기도 하였다.

(2) 공내수 치환 시스템 제작

공내수 치환 시스템은 다양한 시추공 환경에서 적용이 가능하도록 설계·제작하였으며 2번의 수정/보완을 통하여 시작품을 제작하였다. 공내수 치환 시스템은 주입과 양수용 펌프, 유량제어를 위한 by-pass 설계, 유량측정계, 각종 호스, 발전기, 그리고 이상의 모든 것을 한 곳에 연결한 유량제어 시스템으로 구성된다(Fig. 2 참조). 시작품의 특징은 일반적인 관측정이 내경 50 mm의 PVC 케이싱을 삽입하기 때문에 작은 시추공에도 적용이 가능하도록 제작된 것이다. 주입과 양수에 이용한 펌프는 시추공경과 양수/주입량을 고려하여 미국 Grundfos사의 MQ3-35 펌프를 이용하였다. 펌프는 부식에 강한 스테인리스 재질로 제작되었으며 흡입구의 구경은 25 mm이나 15 mm까지 조정이 가능해 유량이 작은 소구경 시추공에서도 적용이 가능하다. 주입과 양수량을 측정하는 유량계는 가압식 유량계로 Flownic사의 KV-1-B이고 측정오차는 $\pm 2\%$ 이내이다. 그리고 공내수 치환에 필요한 물은 용량 2 ton 정도의 물탱크를 이용하였으며 전기전도도가 낮은 지하수 또는 수돗물을 이용하였다. Fig. 2에서 공내수 전기전도도의 측정은 지하수 또는 환경오염 분야에서 많이 이용하는 CTD (Conductivity, Temperature, Depth)로 측정하거나 상용의 물리검층 장비를 이용하여 측정한다. CTD의 경우, 크기가 매우 작아 측정에 편리한 장점이 있으나 주입후, 양수 시 수위가 변하면 정확한 심도의 측정이 어렵기 때문에 상용의 물리검층 장비를 이용하여 측정하는 것이 효과적이다. Fig. 2의 왼쪽은 영국 Robertson Geologging사의 물리검층 장비로 전기전도도를 측정하는 손데의 직경은 38 mm이다.

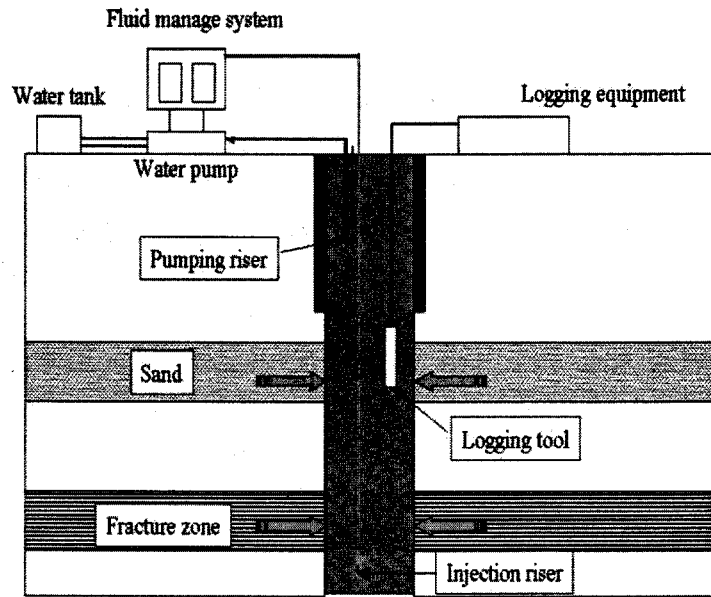


Fig. 1. Schematic diagram of fluid replacement technique.

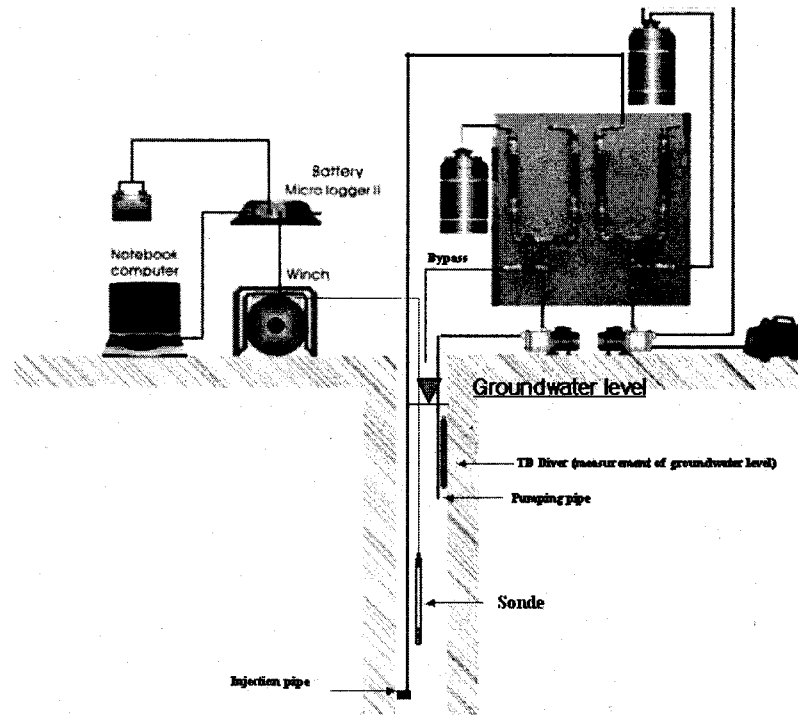


Fig. 2. Control unit of injection & pumping, flow rate, and fluid conductivity logging system

(3) 현장 자료 취득 및 해석

전남 영광군 백수읍 일대에 해수침투 연구 목적으로 굴착한 시험 시추공에서 공내수 치환 시스템을 이용하여 연안지역 대수층의 특성을 파악하고자 하였다. Fig. 3은 시험 시추공의 위치를 나타내며 공내수 치환기법을 적용한 시추공은 YK-8, YK-19, 및 YK-21공이고 굴착심도는 50 m 이다. YK-8호공은 3인치 시추공으로 심도 36 m까지 철재케이싱이 삽입되어 있고, YK-19호공은 6인치 시추공으로 전구간에 스크린을 설치한 내경 4인치의 PVC 케이싱이 삽입되어 있으며 YK-21호공은 3인치 시추공으로 전 구간에 스크린을 설치한 내경 50 mm의 PVC 케이싱이 삽입되어 있다. 이 지역은 지표로부터 매립층, 니질층, 사질층 및 화강암인 기반암이 분포한다. 시추공 YK-8호공은 염수 지하수영역에 위치하며 YK-21호공은 염-담수 경계 영역에 YK-19호공은 담수 영역에 위치한다(황세호 등, 2004b).

Fig. 4는 시추공 YK-8호공에 대한 물리검층 자료, 공내수 치환 후의 전기전도도검층 및 초음파주사검층 자료이다. 물리검층 자료에서 공내수의 높은 전기전도도는 암반구간인 케이싱 하부에 분포하며 시추공과 교차하는 파쇄대는 확인이 어려울 정도로 매우 작다. 중앙 왼쪽의 전기전도도검층 자료는 담수 주입으로 공내수를 완전히 치환한 후에 측정된 전기전도도검층 자료이며 중앙 오른쪽의 전기전도도검층 자료는 3.5 l/min로 주입하고 2.5 l/min 양수하면서 공내수가 담수로 완전히 치환된 후에 2.5 l/min로 일정 양수하면서 측정한 자료이다. 담수 주입후, 자연 상태에서 측정된 전기전도도의 자료에서 2개의 파쇄대(심도 44.8 m, 49.9 m)에서 고염분 지하수가 유입되는 것을 확인 할 수 있다. 시간이 경과함에 따라서 유입구간을 중심으로 염분도가 지속적으로 증가하며 시추공 아래 방향으로 전기전도도의 변화가 좀더 크며 이와 같은 것은 미세하지만 하향의 흐름이 존재하는 것으로 판단된다. 일정 양수를 수행하면서 측정한 경우, 빠른 시간에 투수성 파쇄대의 확인이 가능함을 알 수 있으며 44.8 m 상부에서 나타나는 전기전도도의 변화는 양수량이 일정하지 못해 발생한 것이다. YK-8호공에서의 시험은 공내수 치환 시스템을 처음으로 개발하고 현장에 적용한 결과이며 특히, 일정 양수에 어려움이 많았다. 공경검층에서는 확인이 어려운 2개의 투수성 파쇄대를 확인하기 위하여 초음파주사검층을 수행하였으며 파쇄대는 심도 44.8 m 및 49.9 m로 확인되었다. YK-8호공에 대한 공내수 치환기법을 적용한 결과, 2개의 중요한 결론을 얻을 수 있었다. 첫째는 공경검층에서 확인이 어려운 투수

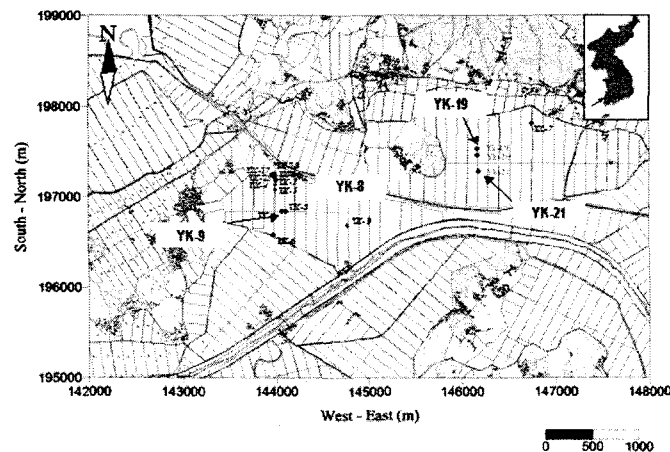


Fig. 3. Location map of boreholes in Yeonggwang, Korea.

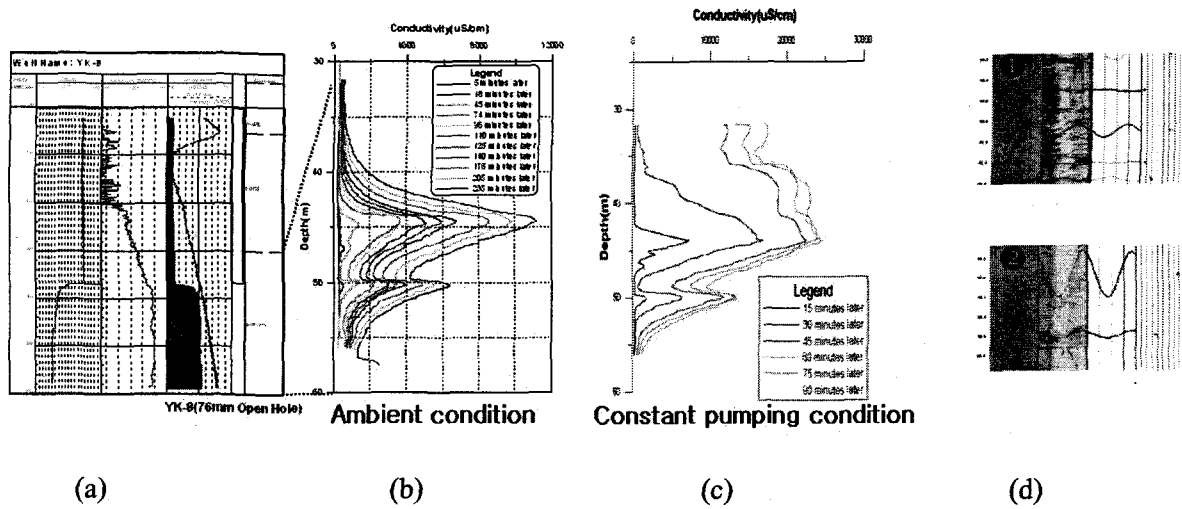


Fig. 4. Results of geophysical well logs in borehole YK-8. (a) geophysical well logs, (b) and (c) are the fluid conductivity profiles of YK-8 under ambient and pumping conditions, respectively. (d) acoustic televiwer logs.

성 파쇄대의 존재, 위치 및 투수성 여부를 확인한 것이고 두 번째는 고염분 지하수가 분포하는 지역에 위치한 YK-8호공의 높은 공내수 전기전도도는 균열암반을 통해 유입되는 고염분 지하수이며 현재에도 해수침투가 진행 중이라는 단서를 확인한 점이다.

Fig. 5와 Fig. 6은 시추공 YK-21호공 및 YK-19호공에 대한 결과로 전 구간에 스크린을 설치한 PVC 케이싱 내에서 수행한 결과이다. 염-담수의 경계에 위치하는 시추공 YK-21호공에는 담수를 주입하였으며 주입량은 5.2 l/min, 양수량 3.4 l/min로 공내수를 담수로 치환한 후에 5 l/min의 일정 양수 상태에서 전기전도도 변화를 측정된 결과이다. 다수의 투수성 파쇄대와 대수층이 존재하며 고염분 지하수는 전기전도도검층을 수행한 심도 하부, 시추공 바닥 부분에서 유입되고 있으며 심도 약 40 m, 35 m, 30 m 및 15 m 부근에도 지하수가 유입되는 것으로 해석된다. 하부 구간에서 유입되는 지하수의 염분도가 상부 구간보다 상대적으로 높음에도 불구하고 시추공 상부 구간에서 전기전도도가 감소하는 이유는 시추공 상부구간, 즉 사질층에서의 지하수 유입량이 하부보다 많아 염분농도가 희석되기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 장기양수 시험 중에 수행한 다채널 전기전도도 모니터링 결과와도 일치하고 있다(신재현 등, 2005).

Fig. 6은 담수 영역에 위치하는 시추공 YK-19호공에 대한 결과로 주입수의 전기전도도는 약 3,400 μS/cm이며 주입량은 5.4 l/min, 양수량은 3.8 l/min이다. 고염분의 주입수가 완전히 치환된 후, 12 l/min으로 일정 양수하면서 전기전도도검층을 수행한 결과이다. 시추공 YK-19 및 YK-21호공에서 주입수의 치환은 양수할 때 유출되는 공내수의 전기전도도를 측정하거나 시추공 전 구간에 대한 전기전도도를 일정 시간간격으로 측정하여 확인하였다. 시추공 전 구간에 대한 전기전도도검층은 주입수 치환의 효과를 명확하게 확인 할 수 있어 주입량의 제어에도 이용할 수 있다. 시추공 YK-21호공과는 반대로 전기전도도가 감소하는 구간, 즉 지하수가 유입되는 심도 약 25 m, 20 m, 15 m, 13 m 및 11 m을 확인할 수 있었다. Fig. 5와 Fig. 6에 대한 공내수 치환기법의 결과는 스크린이 설치된 케이싱이 전 구간에 삽입된 시추공인 경우라도 투수성 파쇄대와 대수층을 확인할 수 있음을 보여준다.

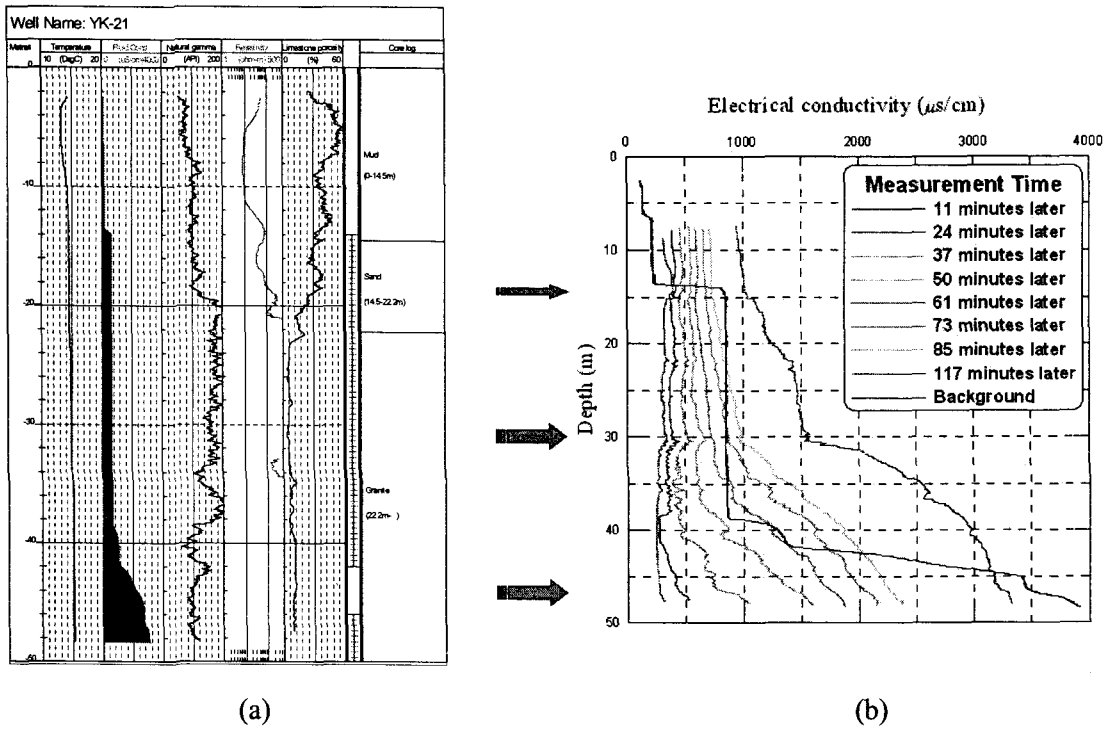


Fig. 5. Results of geophysical well logs (a), and fluid conductivity profiles of YK-21 under pumping condition (b).

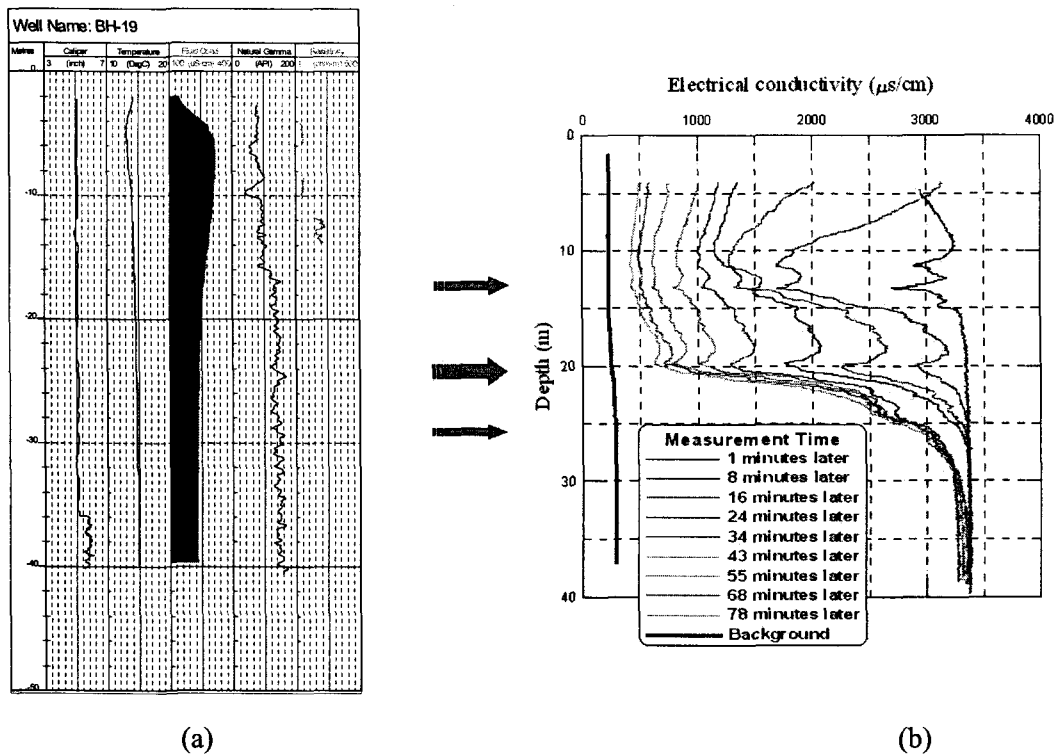


Fig. 6. Results of geophysical well logs (a), and fluid conductivity profiles of YK-19 under pumping condition (b).

3. 토의

공내수 치환기법의 개념은 Fig. 7과 같이 표현할 수 있는데 시추공 내에 일정한 유속(w)이 존재하고 시추공 내로 유입되는 3개의 투수성 파쇄대를 통하여 시추공 내로 유입되는 염분농도 C_i 인 일정 유량(q_i)이 존재할 때의 염분농도를 나타낸 것이다. Tsang *et al.* (1990)은 식 (1)과 같은 용질이동 편미분방정식을 이용하여 Fig. 7에 대한 수치모델링을 수행하여 타당성을 검증하고 스위스 북부에 위치하는 장심도의 시추공에 대한 공내수 치환기법 적용 결과에서 개별 투수성 파쇄대의 확인과 투수량계수(transmissivity)의 추정이 가능함을 제시하였다.

$$K \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} + G = \frac{\partial C}{\partial t} \tag{1}$$

식 (1)에서 K 는 분산계수, C 는 염분농도, v 는 공내수의 속도, G 는 각 파쇄대에서의 유입량(q)과 염분농도로 표현되는 소스이다.

Fig. 8과 같이 시추공 내에 일정한 지하수 유동(w)이 존재하고 각 파쇄대에서의 유입량과 염분농도를 알 수 있으면 식 (1)을 이용하여 시간에 따른 염분농도의 변화를 파악할 수 있다. Fig. 8은 K 가 $1.25 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, w 는 $1.5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, 두개의 투수성 파쇄대의 유입량 중에서 q_2 는 w 와 같으며 $q_2 = q_1$ 인 경우에 유한차분법을 이용하여 계산한 농도분포를 나타낸 것이다. 따라서 투수성 파쇄대를 통해 시추공 안으로 유입되는 지하수의 농도와 유입량, 파쇄대의 수와 분포 양상, 공내수의 흐름 특성에 대하여 수치모델링을 수행하면 전기전도도 변화특성을 이해하는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다. 그리고 일정 양수 상태에서도 모든 파쇄대를 통하여 시추공 내로 지하수가 유입되는 것이 아니라 유출되는 경우도 존재하며 또한 측정시 수위변화에 대한 보정 등이 필요하기 때문에 좀더 현실성 높은 수치모델링 프로그램 개발이 필요하다. 또한 앞으로 투수성 파쇄대를 통하여 시추공내로 유입되는 유입량을 정량적으로 파악하기 위한 역산 기법의 적용이 필요하다.

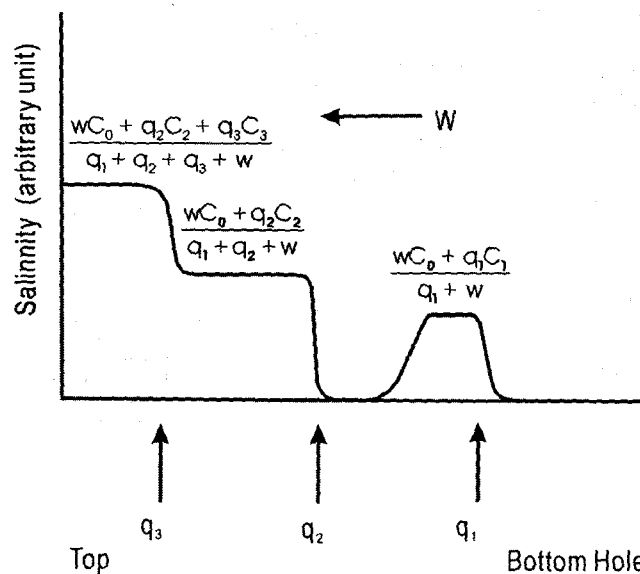


Fig. 7. Schematic picture of salinity curves at a large time, assuming very small diffusion effects (Tsang *et al.*, 1990).

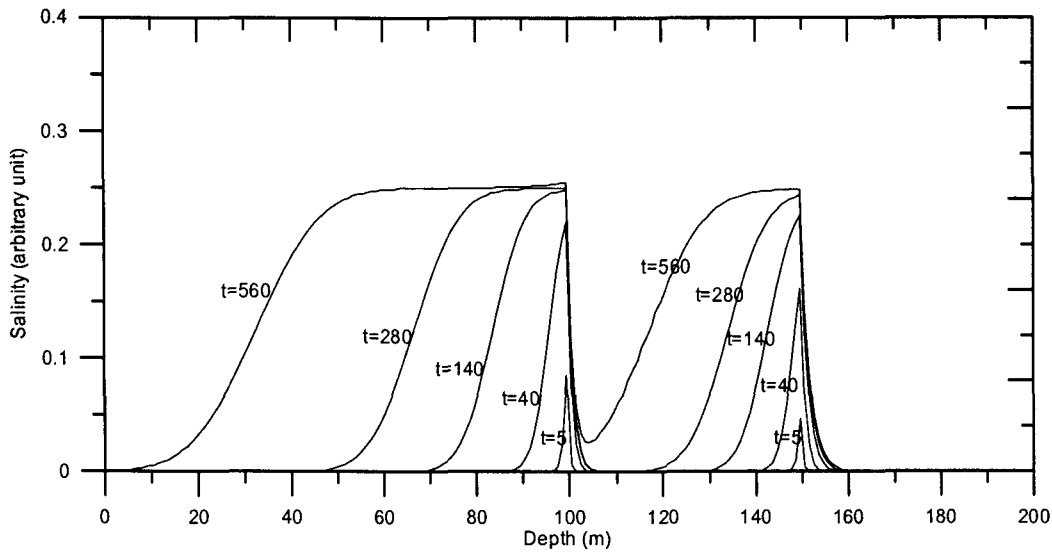


Fig. 8. Numerical results for two inflow points (q_1 , q_2) at 50m and 100m, Wellbore flow rate, dispersion coefficient, and flow rate of q_2 ($q_1=2\times q_2$) are 1.5×10^{-7} m³/s, 1.25×10^{-5} m²/s, and 3.0×10^{-7} m³/s, respectively.

4. 결론

연안지역 해수침투대에서 고염분 지하수가 유출되는 대수층을 확인하기 위하여 공내수 치환기법을 적용하였다. 공내수 치환기법의 주요 목적은 시험 시추공과 교차하는 투수성 파쇄대 및 고염분 지하수가 유입되는 구간의 확인이었다. 현장 시험을 목적으로 제작한 공내수 치환 시스템은 주입과 양수, 유량제어 및 측정이 가능하며 내경이 50 mm인 모니터링 PVC 케이싱도 적용이 가능하도록 제작하였다. 전남 영광의 연안지역에 위치하는 3개 시추공에 공내수 치환기법을 적용하여 전기전도도의 변화 특성을 측정된 결과, 연안지역의 고염분 지하수는 균열암반을 통한 해수침투 영향과 간척사업으로 인한 잔류염분의 영향을 동시에 받고 있음을 확인할 수 있었다. 공내수 치환기법은 개별적인 투수성 파쇄대, 대수층의 파악에 효과적이기 때문에 각 대수층의 수리상수 추정, 염분농도를 고려한 최적의 양수설계, 고염분 지하수의 확산저지에 필요한 주입구간 선정 등에 활용될 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원에 수행하는 기본사업인 ‘해수침투 확산저지 및 피해개선기술 개발’ 연구의 일부이며 논문자료 정리에 도움을 준 오하연씨에게 감사드립니다.

참고문헌

- 김영화, 임헌태, 2003, 시추공 수리전도도 상수를 결정하기 위한 전기전도도검층 기법을 이용한 예비모형 실험, 지하수토양환경, 8, 48-56.
 김영화, 김지훈, 홍정표, 2005, 대수층의 수리특성 연구를 위한 시추공 전기전도도 측정기법의 현장 시험 적용, 지질공학, 15, 1-8.

- 신재현, 황세호, 박권규, 박윤성, 변중무, 2005, 다채널 전기전도도 모니터링 시스템의 개발과 연안지역 공내수 모니터링에 적용 사례, 물리탐사, 8, 156-162.
- 황세호, 김용제, 염병우, 고진석, 이상규, 2004a, 물리검층을 이용한 균열암반의 지하수 유동특성 해석, 한국지구시스템공학회 춘계학술발표회 논문집, 167-171.
- 황세호, 박권규, 신재현, 이원석, 박인화, 지세정, 성낙훈, 이봉주, 윤옥, 황인걸, 허대기, 성원모, 윤왕중, 2004b, 해수침투 확산저지 및 피해개선기술 개발, 한국지질자원연구원, M1-0324-00-0006-03-B31-00-002-00, 119 p.
- Cohen, A. J. B., 1995, *Hydrogeological characterization of fractured rock formations: A guide for groundwater remediators*, LBL-38142, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkely, CA.
- Doughty, C., and Tsang. C. F., 2002, *Inflow and outflow signatures in flowing wellbore electrical conductivity logs*, LBNL-5148, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkely, CA.
- Drost, W., Klotz, D., Koch, A., Mose, H., Neumaier, F., and Rauert, W., 1968, Point dilution methods of investigation ground water flow by means of radioisotopes, *Water Resources Res.*, 4, 125-146.
- Paillet, F. L., Kay, R. T., Yeskis, D., and Pedler, W., 1993, Integrating well logs into a multiple-scale investigation of a fractured sedimentary aquifer, *The Log Analyst*, 35, 24-40.
- Tsang, C. F., Hufschmied, P., and Hale, F. V., 1990. Determination of fracture inflow parameters with a borehole fluid conductivity logging method, *Water Resource Research*, 26, 561-578.