

공내수 치환 전기전도도검층을 이용한 연안지역 대수층의 탐지

황세호¹ · 박윤성¹ · 신제현¹ · 박권규^{1*}

¹한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

Detection of Inflow Permeable Zones Using Fluid Replacement Conductivity Logging in Coastal Aquifer

Seho Hwang¹, Yunseong Park¹, Jehyun Shin¹ and Kwon Gyu Park^{1*}

¹Geological and Environmental Hazards Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요 약: 연안지역의 해수침투대에서 투수성 파쇄대 및 고염분 지하수가 유입되는 구간을 탐지하기 위하여 공내수 치환 전기전도도검층을 수행하였다. 공내수 치환 전기전도도검층은 시추공 내의 지하수를 전기적으로 다른 성질을 갖는 지하수로 치환하고 일정 양수 또는 자연 상태에서 시간에 따른 전기전도도의 변화를 측정하는 것으로 시추공과 교차하는 투수성 파쇄대 또는 다공성의 대수층에서 시추공 내로 유입되는 지층수 전기전도도의 변화 특성을 측정하면 지하수가 유입되는 구간의 확인이 가능하다. 현장 시험에 적용한 공내수 치환 시스템은 주입과 양수, 유량측정이 가능하며 내경이 작은 모니터링 PVC 케이싱이 설치된 시추공에도 적용이 가능하도록 제작하였다. 전남 영광의 연안지역에 위치하는 3개 시추공에서 공내수 치환기법을 적용하여 전기전도도의 변화 특성을 측정한 결과, 연구지역의 고염분 지하수는 균열암반을 통한 해수침투로 확인되었다. 공내수 치환 전기전도도검층법은 연안지역에서 수리상수 추정, 최적의 양수설계, 해수침투 특성 평가 등에 활용될 것으로 예상된다.

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

Abstract: Fluid replacement and conductivity logging have been applied to three boreholes in coastal aquifer in order to identify permeable fractures and to estimate the origin of saline groundwater. Fluid replacement technique measures and monitors the change of borehole fluid conductivity with depth under ambient or pumping condition after replacing the original borehole fluid with different one (by pumping out original one and injecting simultaneously new one at the hole bottom). After the replacement of borehole fluid, the change of fluid conductivity can be the direct indicator of the intake flow of formation water through aquifer such as permeable fractures or porous formations. The conductivity profiles measured 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 at coastal area in Yeonggwang, Jeonnam Province, it is interpreted that the seawater intrusion in this area is not by remnant saline groundwater after land reclamation but mainly by intrusion of saline water through fractured rock. This approach might be useful for assessing the characteristics of seawater intrusion, the design of optimal pumping, the mitigation of seawater intrusion using freshwater injection, and estimating the hydraulic characteristics in coastal aquifer.

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

서 론

국내 서·남해 연안지역에서 광범위하게 발생하고 있는 해수침투는 해수침투대의 범위와 정도, 고염분 지하수의 기원 등

2006년 8월 3일 접수; 2006년 8월 17일 채택
한국물리탐사학회 제7회 특별 심포지엄-시추공 물리탐사-에서(일부)발표
*Corresponding author

E-mail: kgpark@kigam.re.kr

Address: Geological and Environmental Hazards Division,
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

을 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 간척사업의 영향으로 연안지역 고염분 지하수의 기원을 평가하는데 많은 어려움이 따른다.

해수침투대의 특성을 파악하기 위해 먼저 다양한 지표조사를 수행하고, 지질특성, 대수층 평가, 장기모니터링 및 수리시험 등을 수행하기 위해 시험 시추공을 굴착하는데, 연안지역은 기반암 상부에 매립층, 니질층 또는 사질층이 존재하기 때문에

대부분 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 Televiwer 또는 Optical Televiwer), 공경검층 등에서 파쇄대의 분포 특성을 파악한 후, 지하수 유동과 관련된 파쇄대의 확인을 위해 packer 시험 또는 유향·유속검층(황세호 등, 2004a; Paillet *et al.*, 1993; Cohen, 1995)을 적용할 수 있지만 연안지역의 경우, 전술한 바와 같이 시추공 전 구간에 스크린을 설치한 케이싱을 삽입하며 관측정은 통상적으로 내경이 50 mm 정도이기 때문에 위와 같은 실험은 많은 제약을 받게 된다.

본 연구의 목적은 연안지역에 위치하는 시추공에서 투수성 파쇄대의 확인과 염분농도 변화로부터 해수침투의 특성을 파악하는 것으로 공내수 치환기법을 적용한 전기전도도 검층을 수행하였다.

공내수 치환기법은 Tsang *et al.* (1990)에 의해 처음으로 제안되었으며 스위스 북쪽에 위치하는 심도 1,689 m의 시추공에 적용하여 투수성 파쇄대의 확인과 각각의 투수성 파쇄대에 대한 투수량계수를 추정하였다. Tsang *et al.* (1990)의 공내수 치환기법은 시추공내수의 농도변화에서 수평적인 유동 속도를 측정 한 Drost *et al.* (1968)의 결과를 기초로 개발되었다. Cohen (1995)은 시추공과 교차하는 투수성 파쇄대 확인에 공내수 치환기법이 유향·유속검층보다 민감도가 높다는 결과를 보고하기도 하였다. 국내에서는 시추공 내 농도변화의 속도를 이용한 수리특성 연구가 수행되기도 하였다(김영화, 임헌태, 2003; 김영화 등, 2005).

본 논문에서는 공내수 치환기법의 개념, 측정 시스템의 제작과 현장 적용, 그리고 자료해석에 대하여 기술 한다.

공내수 치환기법의 개념

시추공과 교차하는 파쇄대는 일반적으로 시추코어의 관찰, 공경검층 또는 텔레뷰어검층 등으로 파악이 가능하지만 투수성 파쇄대의 확인은 온도/전기전도도의 변화, 지하수 유동의 직접적인 측정, 또는 패커시험 등을 이용한다.

본 연구에서 적용한 공내수 치환기법은 공내수의 전기전도도보다 매우 높거나 낮은 유체를 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 주입하면서 상부에서 양수를 하여 공내수의 전기적 특성을 주입

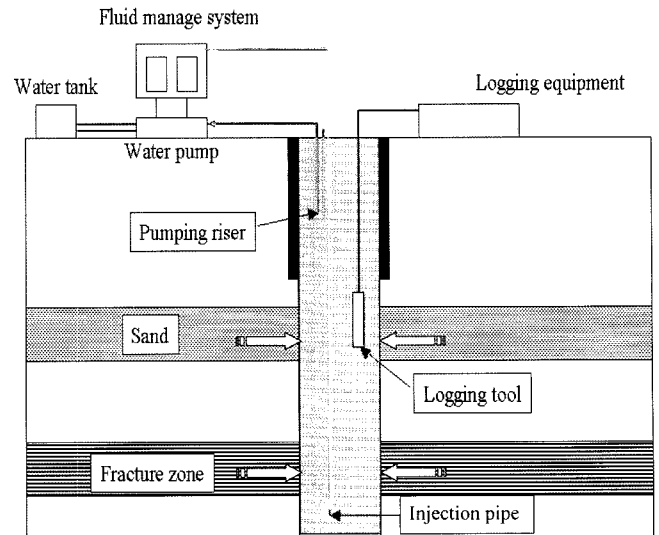


Fig. 1. Schematic diagram of fluid replacement technique.

수로 변화시킨 후에 양수 또는 자연 상태에서 시간에 따른 전기전도도의 변화를 측정, 해석한다. 이와 같은 기법은 Cohen (1995)이 제시한 것처럼 유향·유속검층보다 투수성 대수층의 확인에 효과적으로 이용될 수 있다. 공내수 치환기법의 현장 적용에서 측정시 수위의 변화가 최소가 되도록 유지해야 하고 본 연구에서 적용한 소구경 시추공, 즉 내경이 50 mm 정도인 경우에는 주입과 양수, 그리고 전기전도도의 측정이 좁은 시추공 내에서 동시에 진행되기 때문에 공내수 치환 시스템의 개발과 현장 적용에 세심한 주의가 필요하다. 일반적으로 조사시추공 또는 관측정이 나공인 경우에는 적용 가능한 조사법이 다양하지만 해수침투대와 같이 연안지역에 위치하는 시추공의 경우, 케이싱을 삽입하기 때문에 개별적인 대수층의 특성 파악에 어려움이 많아 공내수 치환기법의 적용이 유용하다. Tsang *et al.* (1990)은 투수성 파쇄대의 확인은 물론 현장자료에 대한 수치모델링을 적용하여 개별파쇄대의 투수량계수를 추정하기도 하였다.

공내수 치환 시스템 제작

공내수 치환 시스템은 주입과 양수용 펌프, 유량제어를 위한 우회관(by-pass) 설계, 유량측정계, 각종 호스, 발전기, 그리고 이상의 모든 것을 한 곳에 연결한 유량제어 시스템으로 구성된다(Fig. 2의 오른쪽 상부 참조). 시제품의 특징은 조사 시추공에 내경 50 mm의 PVC 케이싱을 삽입한 경우에도 적용이 가능하도록 직경이 작은 호스를 이용하여 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 유량계

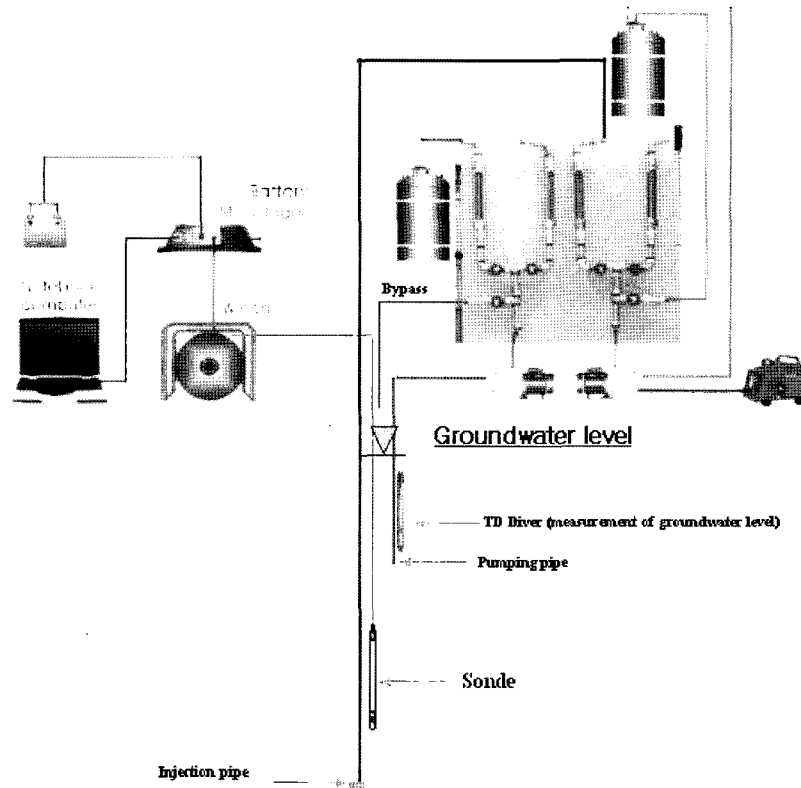


Fig. 2. Conceptual picture of the fluid replacement and fluid conductivity logging system.

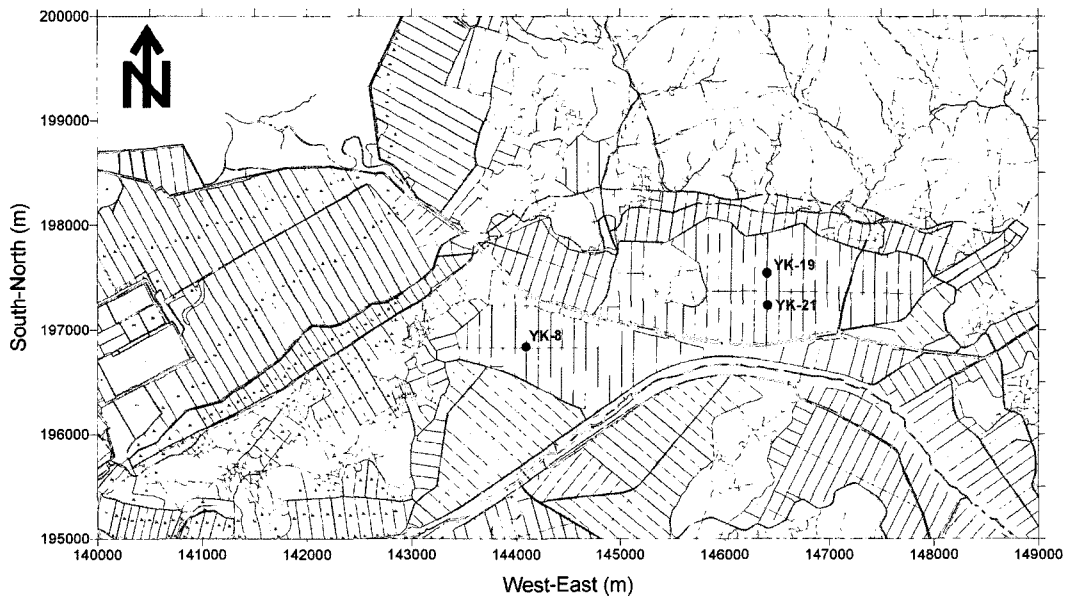


Fig. 3. Location map of boreholes in Yeonggwang, Korea.

는 가압식 유량계로 Flownic사의 KV-1-B이고 측정오차는 $\pm 2\%$ 이내이다. 그리고 공내수 치환에 필요한 물은 용량 2 m^3 정도의 물탱크를 이용하였으며 전기전도도가 낮은 지하수 또는 수돗물을 이용하였다. Fig. 2에서 공내수 전기전도도의 측정은 지하수 또는 환경오염 분야에서 많이 이용하는 CTD

(Conductivity, Temperature, Depth) 측정센서로 측정하거나 상용의 물리검층 장비를 이용하여 측정한다. CTD 측정센서의 경우, 직경이나 길이가 매우 작아 측정에 편리한 장점이 있으나 압력변화를 이용하여 심도를 측정하기 때문에 측정시 수위가 변하면 정확한 심도의 측정이 어려운 단점이 있어 상용의

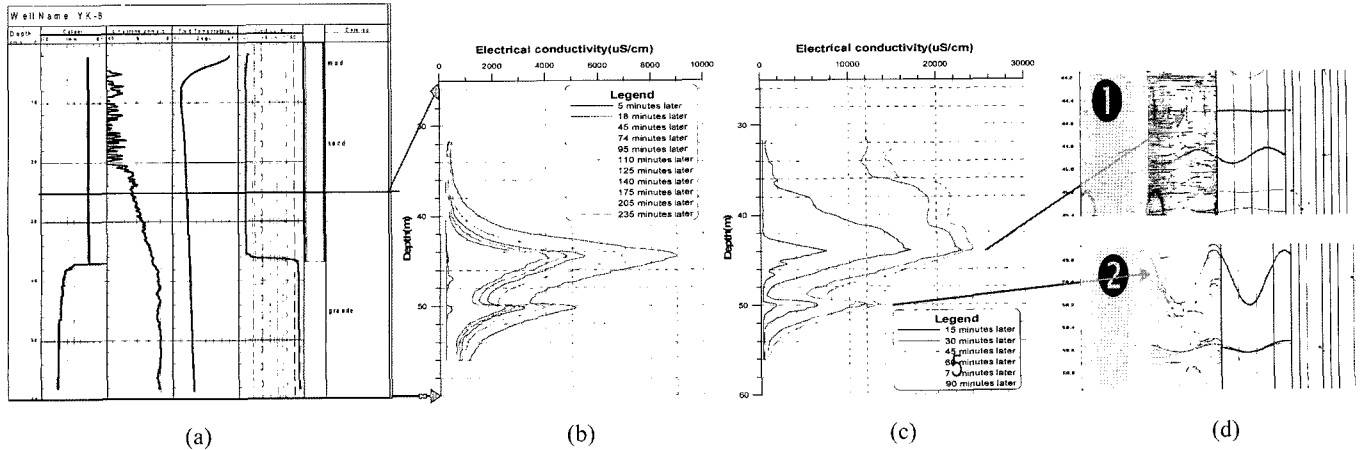


Fig. 4. Results of geophysical well logs in borehole YK-8. (a) geophysical well logs, (b) and (c) are the fluid conductivity profiles of YK-8 under ambient and pumping conditions, respectively. (d) is acoustic televiewer logs.

물리검층 장비를 이용하여 측정하는 것이 효과적이다. Fig. 2의 왼쪽은 영국 Robertson Geologging사의 물리검층 장비로 전기전도도를 측정하는 검층용 센서(sonde)의 직경은 38 mm이다.

현장 자료 취득 및 해석

전남 영광군 백수읍 일대에 해수침투 연구 목적으로 굴착한 시험 시추공에서 공내수 치환 시스템을 이용하여 연안지역 대수층의 특성을 파악하고자 하였다. 이 지역은 지표로부터 매립층, 니질층, 사질층 및 화강암인 기반암이 분포한다. Fig. 3은 시험 시추공의 위치를 나타낸 것으로 공내수 치환기법을 적용한 시추공은 YK-8, YK-19, 및 YK-21공이고 굴착심도는 40 ~ 60 m이다. YK-8호공은 $\Phi 3''$ 시추공으로 심도 36 m까지 철재케이싱이 삽입되어 있고, YK-19호공은 굴착심도가 42 m이고 $\Phi 6''$ 시추공에 $\Phi 4''$ 의 PVC 케이싱이 삽입되어 있으며 심도 8.7 ~ 24.1 m 구간에 지하수의 유동이 원활하도록 스크린(screen)이 설치되어 있다. YK-21호공은 $\Phi 3''$ 시추공으로 전 구간에서 스크린을 설치한 내경 50 mm의 PVC 케이싱이 삽입되어 있으며 설치구간은 14 ~ 22 m, 46 ~ 50 m 구간이다. 시추공 YK-8호공은 고염수 지하수영역에 YK-21호공은 염-담수 경계 영역에 YK-19호공은 담수 영역에 위치한다(황세호 등, 2004b).

Fig. 4는 시추공 YK-8호공에 대한 물리검층 자료와 공내수 치환 후의 전기전도도검층 및 초음파주사검층 자료이다. Fig. 4(a)의 물리검층 자료 중에서 4번째 열의 공내수검층 자료를 보면 높은 전기전도도는 암반구간인 케이싱 하부에 분포하며 암반 구간에서의 공경검층 변화가 매우 작아 시추공과 교차하는 투수성 파쇄대의 확인은 어렵다. 중앙 왼쪽의 Fig. 4(b)는 공내수를 담수로 완전히 치환한 후에 자연상태에서 연속적으로 측정된 전기전도도검층 자료이며, 중앙 오른쪽의 Fig. 4(c)

는 3.5 l/min로 주입하고 2.5 l/min 양수하면서 공내수를 담수로 완전히 치환하고 주입을 중단한 후에 2.5 l/min로 일정 양수하면서 측정된 자료이다. 담수 주입후, 자연 상태에서 측정된 전기전도도의 자료를 보면 시간이 경과함에 따라서 심도 약 45 m, 50 m에서 전기전도도가 지속적으로 증가하여 고염분 지하수가 시추공 안으로 유입되는 것을 확인 할 수 있다. 일정 양수를 수행하면서 측정된 경우, 빠른 시간에 전기전도도가 증가하는 것을 알 수 있으며 자연상태와 동일하게 2개의 투수성 파쇄대의 확인이 가능함을 알 수 있다. YK-8호공에서의 시험 결과는 공내수 치환 시스템을 처음으로 개발하고 현장에 적용한 것이며 특히, 일정 양수에 어려움이 많았다. 공경검층에서 확인이 어려운 2개의 투수성 파쇄대를 확인하기 위하여 초음파주사검층을 수행하였으며 파쇄대는 Fig. 4(d)와 같이 심도 44.8 m 및 49.9 m에 위치하는 매우 작은 파쇄대로 확인되었다. YK-8호공에 대한 공내수 치환기법을 적용한 결과, 2개의 중요한 결론을 얻을 수 있었다. 첫째는 공경검층에서 확인이 어려운 투수성 파쇄대의 존재, 위치 및 투수성 여부를 확인한 것이고 두 번째는 고염분 지하수가 분포하는 지역에 위치한 조사 시추공에 대한 전기전도도검층 결과 측정층 구간과 암반 구간에서도 공내수의 높은 전기전도도가 측정되었는데 YK-8호공에서의 높은 공내수 전기전도도는 균열암반을 통해 유입되는 고염분 지하수로 현재에도 해수침투가 진행 중이라는 단서를 확인한 점이다.

Fig. 5와 Fig. 6은 시추공 YK-21호공 및 YK-19호공에 대한 공내수 치환 전기전도도검층 결과이다. Fig. 5(a)의 전기전도도검층 자료와 같이 염-담수의 경계에 위치하는 시추공 YK-21호공에는 전기전도도가 256 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 인 수돗물을 주입하였으며 주입량은 5.2 l/min, 양수량 3.4 l/min로 공내수를 담수로 치환한 후, 주입을 정지하고 5 l/min의 일정 양수 상태에서 전기전도도 변화를 측정된 결과이다. Fig. 5(b)는 시간에 따른 전기전도도검층 자료로 다수의 투수성 파쇄대와 대수층이 존재하는

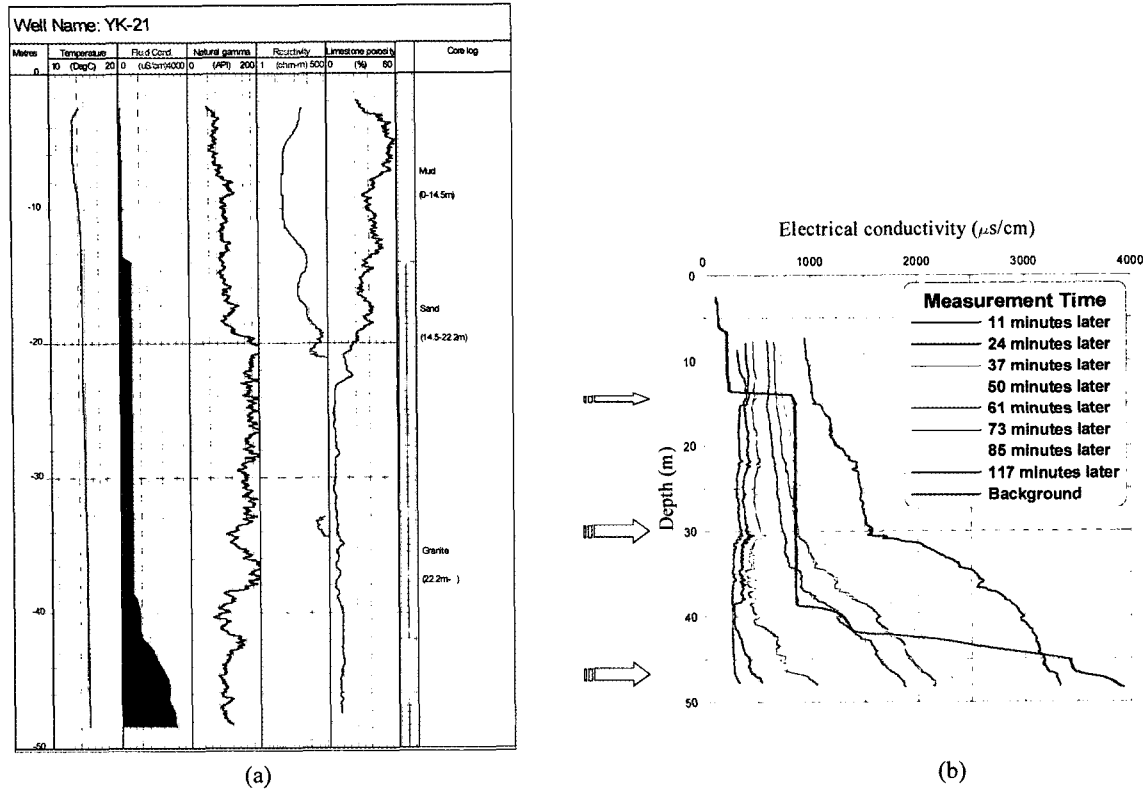


Fig. 5. Results of geophysical well logs (a), and fluid conductivity profiles of YK-21 under pumping condition (b).

것을 알 수 있다. 즉 고염분 지하수는 전기전도도검층을 수행한 심도 하부인 시추공 바닥 부분에서 유입되고 있으며 심도 약 40 m, 35 m, 30 m 및 15 m 부근에도 지하수가 유입되는 것으로 해석되며 YK-21호공의 고염분 지하수는 암반내의 지하수에 기인하는 것으로 판단된다. 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 해석된다. 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 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이며 주입량은 5.4 l/min, 양수량은 3.8 l/min이다. 시추공 YK-19호공은 Fig. 6(a)의 전기전도도검층 자료를 보면 전기전도도가 약 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 정도인 담수지하수 지역에 위치한다. Fig. 6(b)은 고염분의 주입수가 완전히 치환된 후, 12 l/min으로 일정 양수하면서 전기전도도검층을 수행한 결과이다. 담수 주입시 시추공 전 구간에 대한 전기전도도검층 자료는 주입수 치환의 효과를 확인할 수 있어 주입량의 제어에도 이용할 수 있다. 심도 약 10~15 m 구간은 담수 주입 종료 후 1분 후에 측정된 결과로 사질층을 통한 지하수의 유입이 상대적으로 많이 빠른 시간 내에 전기전도도가 변한 것을 알 수 있다. 시추공 YK-21호공과는

반대로 전기전도도가 감소하는 구간, 즉 지하수가 유입되는 심도 약 25 m, 20 m, 15 m, 13 m 및 11 m를 확인할 수 있었다. 가장 많은 변화를 보이는 심도 20 m, 13 m 구간에 주요 대수층이 존재하는 것으로 해석된다.

Fig. 5와 Fig. 6에 대한 공내수 치환기법의 적용 결과는 스크린이 설치된 케이싱이 전 구간에 삽입된 시추공인 경우라도 투수성 파쇄대와 대수층을 확인과 염도가 다른 대수층을 개별적으로 구별할 수 있음을 보여준다.

결론

연안지역 해수침투대에서 고염분 지하수가 유출되는 대수층을 탐지하기 위하여 공내수 치환 전기전도도검층을 기법을 적용하였다. 현장시험 목적으로 공내수 치환 시스템을 제작하였으며 주입과 양수, 유량제어 및 측정이 가능하며 내경이 50 mm인 모니터링 PVC 케이싱에도 적용이 가능하다. 전남 영광의 연안지역에 위치하는 3개 시추공에 공내수 치환기법을 적용하여 전기전도도의 변화 특성을 측정된 결과, 시추공 YK-8호공의 경우 연안지역의 고염분 지하수는 균열암반을 통한 해수침투 영향과 간척사업으로 인한 잔류염분의 영향을 동시에 받고 있음을 확인할 수 있었다. 시추공 YK-21 및 YK-19의 경우, 스크린이 설치된 내경 50 mm의 PVC 케이싱 내에서도 개별적인 투수성 파쇄대나 대수층의 확인이 가능하였으며 시추

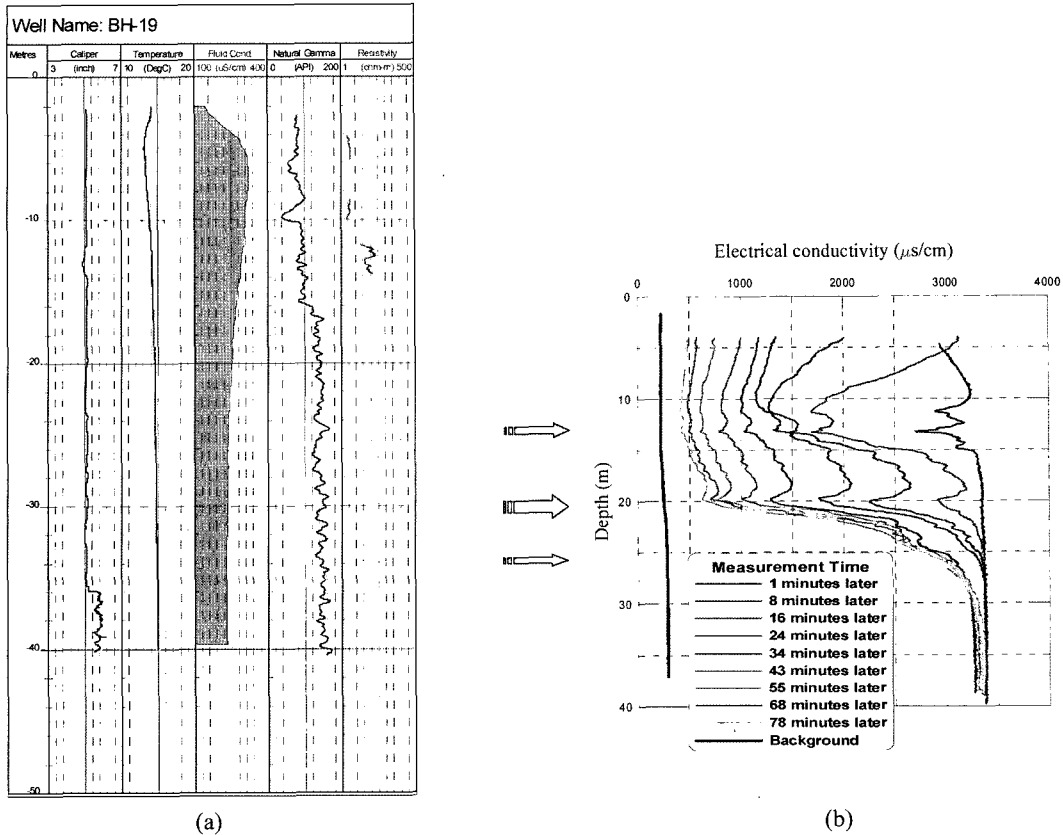


Fig. 6. Results of geophysical well logs (a), and fluid conductivity profiles of YK-19 under pumping condition (b).

공 YK-21호공에서는 개별적인 대수층의 염분농도 확인이 가능하였다. 공내수 치환기법은 나공과 PVC 케이싱 설치된 시추공 환경에서도 개별적인 투수성 파쇄대, 대수층의 파악에 효과적이기 때문에 각 대수층의 수리상수 추정, 염분농도를 고려한 최적의 양수설계, 고염분 지하수의 확산저지에 필요한 주입 구간 선정 등에 활용될 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘해수침투 확산 저지 및 피해개선기술 개발’ 과제의 일환으로 수행되었습니다. 이 논문의 오류와 미비한 점을 지적하여 주신 익명의 심사자에게 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.

신제현, 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, 신제현, 이원석, 박인화, 지세정, 성낙훈, 이봉주, 윤옥, 황인걸, 허대기, 성원모, 윤왕중, 2004b, 해수침투 확산 저지 및 피해개선기술 개발, 한국지질자원연구원, M1-0324-00-0006-03-B31-00-002-00, p119.
 Cohen, A. J. B., 1995, Hydrogeological characterization of fractured rock formations: A guide for groundwater remediators, LBL-38142, 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 Research, 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.