

대수층의 수리특성 연구를 위한 시추공 전기전도도 측정기법의 현장 시험 적용

김영화^{*1)} · 김지훈¹⁾ · 홍정표²⁾

¹⁾강원대학교 지구물리학과, ²⁾(주)엑스지오

Test Application of Electrical Conductivity Measurement in Borehole for Determining Aquifer Properties

Yeong-Hwa Kim¹⁾ · Ji-Hoon Kim¹⁾ · Jeong-Pyo Hong²⁾

¹⁾Dept. of Geophysics, Kangwon National Univ., ²⁾Xgeo Co. Ltd.

전기전도도 측정방법에 의한 수리전도도 측정 기법 개발의 일환으로, 모형 시추공을 이용한 실내 실험에 이은 원위치 현장 적용 시험을 실시하였다. 현장 적용은 사전 현장 적용실험을 거쳐 춘천시 봉명리 강원대학교 산림학습원 구역 내에 있는 BM-2와 BM-3의 두 시추공에서 이루어졌다. 두 시추공을 양수정과 측정공으로 서로 번갈아 사용하며 염수 주입과 종료를 기준으로 다수의 시계열 전기전도도 자료를 획득하였다. 이들 시계열 전기전도도 분포곡선의 분석으로부터 공별, 심도별 수리 특성 정보를 얻을 수 있었으며, 원위치 현장 투수시험 방법으로서의 가능성이 확인되었다.

주요어: 투수계수, 시추공, 전기전도도, 현장수리계수, 염수주입

As a trial to find an efficient technique for determining hydraulic conductivity, a test application of electrical conductivity measurement technique was made using a signal conditioning data acquisition system in borehole. The experiment was made in two test boreholes BM-2 and BM-3 which are located in the Experiment Forests of Kangwon National University in Bongmyongri, Chunchon. We obtained series of electric conductivity variation curves after the beginning and completion of saline water injection using these two boreholes as the pumping well and the observing well alternatively. The analysis of time series electrical conductivity data suggests kinds of valuable information about aquifer properties by holes and depths, and we could confirm the potential of this method as an efficient tool for in situ aquifer test.

Key words: permeability, borehole, electric conductivity, in situ hydraulic constant, saline water injection

* Corresponding author : yhkim@kangwon.ac.kr

서 언

대수층의 수리전도도와 연관된 지구물리검층 연구의 많은 부분은 공극률과 투수계수(Croft and Dak, 1971; Coates and Dunanoir, 1973; Dziuba, 1996) 사이의 관계에 기초를 두고 있으며, 주로 퇴적암을 대상으로 하는 일종의 간접적인 투수계수 연구 방법에 속한다. 최근에 많은 연구자들의 관심을 끌고 있는 텔레뷰어(Breton and Skinner, 1974), NMR(Sievers, 1966; Tang et al, 1998) 및 tube 파(Goldberg et al, 1990; Buffin, 1996)를 이용한 연구들은 절리의 특성 파악에 근거를 두고 있으며 보다 적극적인 수리전도도 연구방법으로서 적용 영역을 결정질 암반까지 확대한 의의를 지닌다. 한편 전기전도도검층, 유속검층(Paillet et al., 1987) 및 온도검층은 유체검층이라는 명칭이 나타내는 바와같이 유체의 흐름을 그대로 반영한다는 점에서 수리전도도를 구하는 가장 직접적인 지구물리연구 방법이라고 할 수 있다.

그 중에서 전기전도도 측정 기법은 유체 흐름을 측정하는 계측 방법이며 측정 과정이 단순하여, 과거부터 지하수 분야에 자주 활용되어 온 방법이다(Drost et al., 1968). 그러나 이 방법은 오랫동안 대수층의 위치나 대수성 파악을 위한 정성적인 접근에 머물러 있었으며, Tsang 등(Tsang and Hale, 1989; Loew et al, 2000)의 소수 연구자에 의하여 대수층의 수리상수 결정과 연관된 정량적 접근 시도가 있었다. 이 연구들은 고농도의 지층수가 저 농도의 공내수에 유입되면서 일어나는 일종의 확산모델에 근거한 전도도 변화에 초점을 맞춘 것으로 현장 적용의 어려움 때문에 아직까지는 실용화되지 못한 상태이다. 김영화와 임현태(2003), 김영화 외(2003)는 실내 모형시추공 연구를 통하여 짧은 시간 안에 효과적으로 유체흐름을 파악할 수 있는 실용화 가능성을 제시하였다.

본 연구는 모형 시추공을 이용한 실내실험 결과의 현장 적용성을 알아보기 위하여 실시되었다. 현장 적용은 사전 적용 실험을 거쳐 춘천시 봉명리 강원대학교 산림학습원 구역 내에 있는 BM-2와 BM-3의 두 시추공에서 이루어졌다. 양수정에서의 양수와 관측정에서의 염수 주입을 콘트롤하면서 시계열 전기전도도 자료의 획득 조건을 체크하였으며 시추공별, 또는 염수 농도별로 얻어진 각 600여개의 시계열 전기전도도 분포곡선들로부터 공별, 심도에 따른 수리특성 정보를 얻을 수 있었다. 아울러 동일 시추공에서 얻어진 유속검층, 수압시험 자료들과의 상관성을 발견하고자 노력하였다.

시스템 및 현장작업

실험의 근본적인 목표는 전기전도도가 높은 시추공 안으로 상대적으로 전기전도도가 낮은 지층수가 들어올 때, 시간에 따른 유체의 전기전도도의 변화 경향을 효과적으로 관찰하는데 있었다. 이를 위한 연구의 진행은 시스템 제작, 시추공 내에서의 측정 조건 확보, 시계열 자료의 획득 및 분석으로 이루어진다. 많은 채널의 시계열 자료를 거의 동시에 획득하기 위한 시스템은 지표 자료 수집 부분과 공내 전극 부분 그리고 이를 연결하는 배전판으로 구성된다. 지표 자료 수집 부분의 제작에는 Lap-top computer와 NI 4060 PCI based 5 1/2 digit multimeter instrument kit, SCXI-1127 64 channel high voltage Multiplexer, SCXI-1000 4 slot Chassis 등이 이용되었으며 공내 전극부분은 100 가닥선의 케이블에 50cm 간격으로 환형의 동판을 설치하여 만들어졌다. 공내 측정 부분과 지표 자료 수집부분의 연결은 전극배전판과 NI SCXI-1331 64 channel Terminal block에 의하여 이루어졌다(Fig. 1).

현장적용 시험의 대상지역으로 춘천시 봉명리 강원대학교 산림학습원 안에 있는 2개의 시추공을 선정하였다. 이 시추공 지역은 선캠브리아기의 창춘리층(손치무 외, 1975)에 속하는 우백질 편마암으로 구성되어 있으며 전체적으로 암상이 비교적 균질하여 절리의 존재만이 유일한 암질 변화 요소로 나타나 공내수의 균질성 확보 조건을 충족시키기에 유리한 조건을 제공하고 있다. 측정은 자연상태에서의 측정과 양수상태의 측정으로 구분하여 측정하였으며 양수상태의 측정은 BM-2와 BM-3 두

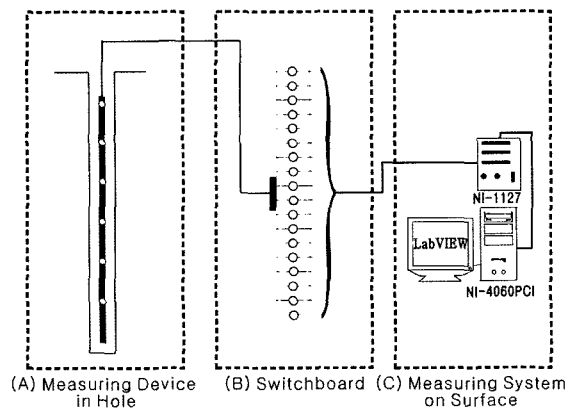


Fig. 1. Simplified schematic of conductivity measurement for field experiment

시추공을 양수정과 측정공으로 바꾸어 측정하는 방식으로 실시되었다.

이 연구는 시추공내의 유체(이하 공내수)와 주변 지하수의 전기전도도가 다른 경우, 시추공을 통한 유체의 흐름이 공내수의 전기전도도 변화를 야기하며 유체흐름의 정도를 알아내기 위해서는 두 유체간의 전기전도도 차이를 어느 정도 크게 해야 한다는 전제 하에서 이루어졌다. 따라서 주변 지하수계의 변화를 최소화 하면서 시추공 내에서의 큰 전기전도도 변화와 전기적인 균질성을 유지하도록 노력하였다. 특히 실내 모형실험에서와 달리, 실험구간에 대한 초기 공내수의 균질성 확보는 시험의 성패를 좌우하는 중요 요인으로 대두되었다. 이 연구지역에서의 적용에 앞선 사전시험 과정에서, 공내수를 신속하게 치환하면서도 주변 지하수의 교란 방지를 도모할 수 있는 가장 효과적인 방안을 모색한 결과, “시추공 상부에서 양수하면서 바닥에 염수를 주입하는 방법”을 결정하고 이 방법을 전 과정에 적용하였다.

지층수의 유입 영향을 쉽게 탐지하면서 유입된 지층수의 지나치게 급속한 상승과 하강을 제한하기 위해서 공내수로 사용할 염화나트륨 수용액의 농도를 0.05%와 0.07%로 결정하였다. 작업은 양수정에 펌프설치 및 양수 개시, 관측정 공저까지 염수 주수 호스와 측정 전극 케이블의 삽입, 현장 측정시스템의 설치완료, 관측정 바닥에 염수 주입, 염수 주입 중단, 공내수 회석 등의 과정에 따라 이루어졌으며 시계열 저항 자료가 획득되었다. 저항 자료로부터 전기전도도 값을 유도하기 위하여 각 측정 사이에 전기전도도(TCDS)검층이 수행되었으며 시계열 전기전도도 자료와의 비교를 위하여 유속(Flowmeter)검층도 함께 이루어졌다. 유속검층은 공 상부에서 약 7 l/min 속도의 양수 상태에서 이루어졌으며 Robertson Geologging사의 Heat pulse type flowmeter가 사용되었다.

자료 처리

시계열 전기전도도 측정이 이극법 전극배열에 의한 저항측정 방법(Fig. 1)에 의존 하였으므로, 비저항 또는 전기전도도 값을 구하기 위한 별도의 보정시험 과정을 고려하였다. 특히 이번 측정에 사용된 시작품에서는 전극 간격, 전극 크기 및 형태가 엄밀한 의미에서 균일하다고 볼 수 없는 상태였으며, 주변 암반의 상태 및 공내수의 상태에 따라 영향 범위가 달리 나타날 위험이 있었기 때문에 공내수의 전기전도도가 변화할 때마다 기존의 전기전도도 검층을 함께 실시하여 시계열 전기전도도

측정 자료와 비교하는 방법을 사용하였다. 유체의 저항 값으로부터 전기전도도 값을 구할 수 있는 전환상수 값(CF)은 각 전극별 시계열 전기전도도 측정에서의 저항 값(R)과 전기전도도 검층에서 구한 전기전도도(σ) 분포 값으로부터 아래의 식(2)을 이용하여 유도되었다.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R \cdot CF} \quad (1)$$

$$CF = \frac{1}{R \cdot \sigma} \quad (2)$$

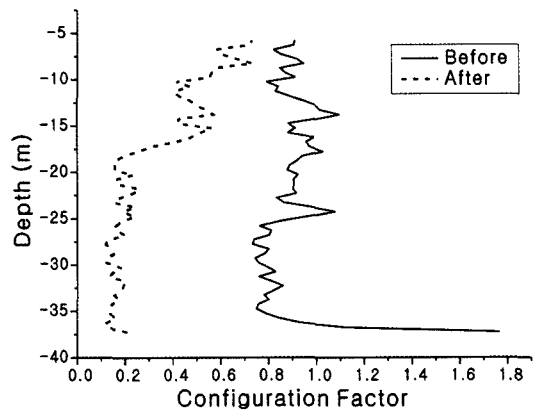


Fig. 2. Configuration factors obtained just before and after the time series conductivity measurement in borehole BM-3.

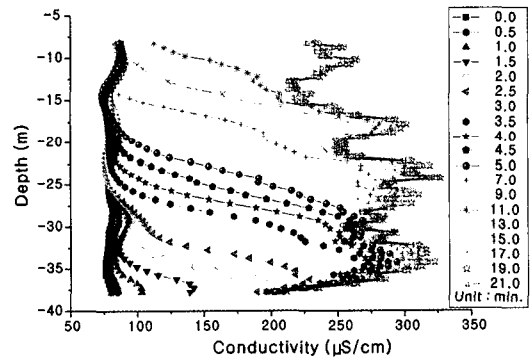


Fig. 3. Field conductivity variation curves obtained during the saline water injection in borehole BM-3. Each number represents the time elapsed from the beginning of saline water injection.

Fig. 2는 측정에 사용된 전극케이블의 전환상수 값의 분포로서 시추공 BM-3에서 0.07% 공내수를 사용한 경우의 측정 전, 후에서 얻어진 결과이다. 측정 전후에 있어서 전환상수의 값의 분포가 크게 달리 나타나고 있음을 보이며 이는 유체 전기전도도의 분포 변화가 전환상수의 값 결정에 크게 영향을 미치고 있음을 나타내고 있다. 그림으로 제시하지 않았지만 여러 번의 측정마다 약간씩 달리 나타나는 복잡한 양상을 보여, 측정 자료의 집적과, 전극케이블의 개선을 통한 추가 연구가 필요함을 보인다.

Fig. 3은 염수 치환을 하는 사이에 측정된 공내수의 전기전도도 변화 상태로서, 공내수의 초기 전도도 값이 $80 \mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 염수 주입 시작과 함께 하부로부터 상부 방향으로 전기전도도 증가 양상이 잘 나타나 있다. 전 구간에서 전기전도도 값이 안정되기 시작하는 13분을 공내수의 염수 치환이 완료된 시점으로 판단하였다. 그러나 염수 치환 종료 시점에서 공내수의 전기전도도가 심도에 따라 달리 나타나는 문제점이 발견되었으며 이러한 현상은 여러 번의 다른 측정에서 공통적으로 인지되는 것으로 확인하였다. 본 연구에서는 심도에 따라 달리 나타날 염수 농도에서의 차이보다는 측정에 사용된 전극케이블에서의 전환상수가 농도에 따라 달리 나타남에 기인한 것으로 판단하였으며 이후의 모든 측정에서 전기전도도를 다음의 식(3)에서와 같이 염수 주입 종료 시점에서의 값을 기준으로 한 *normalized conductivity*의 형태로 나타냈다.

normalized conductivity

$$= \frac{\text{한 시점에서의 전기전도도}}{\text{염수주입 종료시점에서의 전기전도도}} \quad (3)$$

결 과

BM-2와 BM-3의 두 시추공에서 얻어진 시계열 저항 자료로부터 시계열 전도도 자료를 만들었으며 그 결과의 일부가 Fig. 4로 제시되었다. 이는 공내수의 염수 치환이 종료된 시점으로부터 70분 동안 얻어진 약 600개의 시계열 전기전도도 분포곡선 중에서 시간대별로 적절히 선정하여 도시한 것이다. 모형연구 과정에서 효과적인 것으로 제시된 *normalized conductivity* 방법에 따라 표시되었으며 시간에 따른 변화 경향을 효과적으로 나타내기 위하여 주입 종료 후 10분 이내의 전도도 변화 양상

부터, 20분 이내, 40분까지의 전기전도도 변화를 구분하여 도시하였다.

Fig. 4의 왼쪽 그림들은 BM-2에서의 시간대별 전기전도도 곡선의 변화 양상을 나타낸 것이다. 10분 이내의 전기전도도 분포곡선에서는 심도 23미터 부근에서 피크가 뚜렷하며, 5미터 심도와 17미터 심도에서도 상대적으로 약하지만 피크를 보인다. 시간이 진행됨에 따라 특히 5~10미터 심도 구간의 이상대가 확대되고 있으며 이는 관측공의 지하수위 감소에 따라 이 구간의 절리 파쇄대를 따른 상부 지하수의 유입이 증가된 것으로 해석된다. 오른쪽에 제시된 BM-3 시추공에서의 결과는 전반적으로 BM-2시추공에 비하여 낮은 희석 현상을 보여주고 있으나 심도 12미터를 개략적인 경계로 하여 상부에서의 비교적 활발한 흐름과 하부에서의 약한 흐름이 대조를 이루고 있다. 초기 10분 동안의 전기전도도 분포곡선의 형태가 20분과 40분이 경과하여도 거의 그대로 유지되는 특성을 보인다.

한편 Table 1은 BM-2와 BM-3 시추공에서의 유속검층 결과로서 각 시추공 상부에서 분당 약 7리터의 양수를 수행하면서 얻은 것으로 모든 유형은 연직 상부 방향을 나타내며 유속값은 Flowmeter에서 별도의 보정 없이 유도된 결보기 유속이다. BM-2 시추공에서의 유속 측정 결과는 심도 28미터, 24미터 및 18미터 심도에서 현저한 유속 증가를 보이고 있는데, 시계열 전기전도도 곡선에서 심도 23미터와 17미터 부근에서 나타난 피크의 존재와 대비가 가능하다. BM-3공에서는 15미터 심도를 경계로 상부에서의 높은 유속과 하부에서의 낮은 유속이 대조를 이루고 있으며 이는 심도 12미터를 개략적인 경계로 하여 상부에서의 비교적 활발한 흐름과 하부에서의 약한 흐름이 대조를 이루고 있는 시계열 전기전도도 분포에 비교 될 수 있다.

아울러 BM-2, BM-3 시추공에서의 모든 측정 결과들은 기존의 수압시험의 결과(지오택콘설탄트, 2001)와도 비교할 수 있었다. Double packer를 사용하여 5미터 구간, 단계하향식 방식으로 수행하여 얻어진 수압시험의 큰 특징은 BM-2에서 $1 \times 10^5 \text{cm}/\text{sec}$ 이상의 상대적으로 높은 투수계수가 주로 측정된 반면에 BM-3에서는 $10^6 \text{cm}/\text{sec}$ 범위 이하의 낮은 투수계수가 많이 얻어졌다는 점이다(Table 2). 특히 BM-3시추공의 19미터 심도를 경계로 하부 구간이 매우 낮은 투수계수를 가진 구간으로 나타나는데 이러한 점들은 시계열 전기전도도 분포 경향과 잘 일치하고 있다.

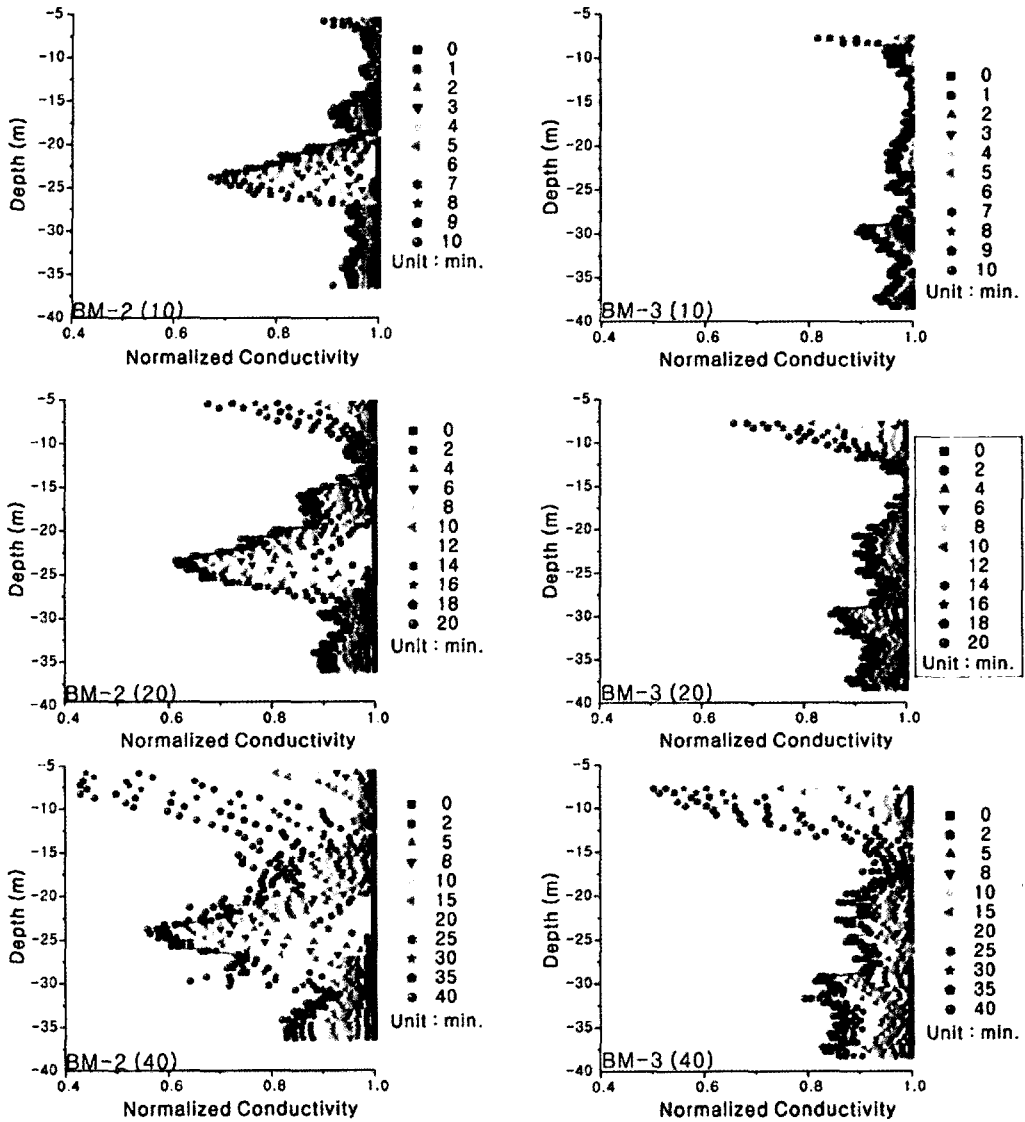


Fig. 4. Conductivity variation curves obtained after the completion of saline water injection in boreholes BM-2 and BM-3. Each number in the legend represents the time elapsed from the completion of saline water injection. Each number in the parentheses shows the time duration of the measurement.

Fig. 5는 김영화와 임헌태(2003)가 제시한 방법에 따라 각 시추공에서 normalized conductivity의 시점별 평균값(normalized mean conductivity)을 구하여 플롯한 결과로서 좋은 선형관계의 전기전도도 감쇄의 기울기(이하 전도도 감쇄 기울기)를 구할 수 있었다. 각 시추공에서 얻어진 전도도 감쇄 기울기는 BM-2 시추공에서 1.25×10^{-4} , BM-3 시추공에서 5.61×10^{-5} 로 나타났다. 특

히 BM-2 시추공에서는 두 가지 서로 다른 공내수 농도에서 거의 동일한 결과를 얻었으며 모형실험에서 제시된 전환방정식을 적용할 수 있을 것으로 판단하였다. 실제 모형실험에서 얻어진 모델방정식($Y = 2.31 \times 10^5 X$)을 그대로 적용한 경우, BM-2 시추공에서 28.9 g/min, BM-3 시추공에서 13.0 g/min의 흐름율(flow rate)이 유도되었다. 이를 현장 조건에서의 평균 투수계수로 환산

Table 1. Result of flowmeter measurement.

Hole No.	Depth (m)	Velocity(m/min)
BM-2	9.5	4.19
	10.0	4.21
	12.0	4.08
	14.0	4.09
	16.0	4.20
	18.0	4.07
	20.0	3.43
	22.0	3.29
	24.0	3.35
	26.0	2.70
	28.0	2.50
BM-3	30.0	1.78
	35.0	0.72
	11.4	4.26
	12.5	4.46
	15.0	4.21
	17.5	0.92
	20.0	0.42
	25.0	0.60
30.0	0.00	
35.0	0.15	

할 경우, 각각 1.1×10^5 cm/sec, 4.7×10^6 cm/sec로 나타나 수압시험 및 유속검층 결과와의 비교에서도 수궁할 수 있는 범위 내에 있는 것으로 판단되었다.

토의 및 결론

이 연구는 모형실험 환경에서 밝혀진 전기전도도 측정 방식에 의한 수리 상수 결정 기법이 현장 조건에서 실제로 어떻게 적용될 수 있는지를 확인하는데 중점이 두어졌다. 첫 번째 과제인 적절한 현장 측정 시스템의 고안은 100 가닥선의 케이블과 동판을 이용한 전극케이블의 제작, National Instruments사의 제품을 중심으로 한 Signal conditioning data acquisition system 조립, 그리

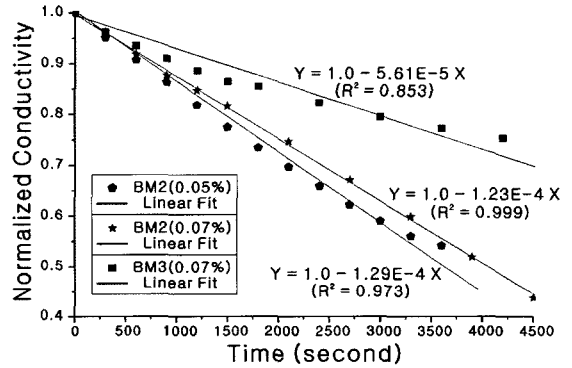


Fig. 5. Linear decrease of conductivity against time obtained from boreholes BM-2 and BM3.

Table 2. Hydraulic conductivities obtained from pressure packer test in borehole BM-2 and BM3 (after Geotech Consultant, 2001)

Hole No.	Test zone (m)	Hydraulic conductivity k (cm/sec)	Hole No.	Test zone (m)	Hydraulic conductivity k (cm/sec)
BM-2	4.0 ~ 9.0	1.09E-04	BM-3	4.0 ~ 9.0	1.70E-04
	9.0 ~ 14.0	6.25E-06		9.0 ~ 14.0	1.00E-05
	14.0 ~ 19.0	1.04E-06		14.0 ~ 19.0	1.16E-04
	19.0 ~ 24.0	1.88E-05		19.0 ~ 24.0	3.12E-08
	24.0 ~ 29.0	2.62E-05		24.0 ~ 29.0	1.67E-06
	29.0 ~ 34.0	8.60E-05		29.0 ~ 34.0	7.95E-08
	34.0 ~ 39.0	1.53E-05		34.0 ~ 39.0	4.51E-07

고 전극케이블과 data acquisition system을 연결할 배전판 제작으로 채널 수의 확대에 따른 시계열 자료의 동시성 확보와 시계열 자료의 품질 문제를 상당 부분 해결할 수 있었다. 측정과정에서, 특히 전극케이블 상태 변화 때의 불안정한 자료의 발생, 농도 변화에 따른 전환상수 값의 불안정 등 여러 문제점이 인지되기는 했지만 비전문가의 시작품인 점을 고려한다면 나쁜 결과는 아닌 것으로 판단된다. 향후 전극 제작 부분에서 크게 개선될 것을 기대하며 차체에 이극법 저항측정 방식의 탈피도 고려해 볼 필요가 있다고 본다.

이 기법의 현장 적용에서 가장 어려웠던 부분은 공내수의 균질성 확보에 있었다. 연구 지역에서의 적용에 앞서 균질성 확보와 주변 지하수계의 교란 방지를 위한 사전 시험으로 (1) 분사 노즐을 동일한 속도로 이동시키며 치환하는 방법 (2) 공 상부에서 주입하고 바닥에서 양수하여 치환하는 방법 (3) 상부에서 양수하고 바닥에서 주입하면서 치환하는 방법 (4) 비닐 또는 합성백을 이용한 동시 치환방법 등을 비교 적용해 본 결과, 상부에서 양수하고 바닥에서 주입하는 방법이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 이 연구에서는 공내수 치환 방법을 개선하고 균질성 확보에 도움이 되는 지질 조건 지역을 초기 시험 적용 대상으로 선정함으로써 시계열 전기전도도 자료에 대한 최소한의 품질관리는 달성했으나 향후 이 방법의 폭넓은 활용을 위해서는 공내수의 균질성 확보 문제가 보다 확실하게 해결되어야 할 것으로 생각된다.

장비 분야에서 요구되는 개선의 필요와 대조적으로 자료 처리 과정에서 적용된 normalized conductivity와 전도도 감쇄 기울기 이용 방법은 매우 효과적인 것으로 나타났으며, 최소한 결정질 암반 지역에서는 현 측정 시스템으로도 효과적인 측정이 가능할 것으로 판단되었다. 무엇보다도 현장 적용 시험에서도 실내 모형실험에서와 같이 일정한 전도도 감쇄 기울기를 얻을 수 있었음에 큰 의미가 있는 것으로 생각되며, 모델실험에서 제시된 전환방정식을 원위치 환경에서도 적용이 가능한 것으로 나타났다. 이는 시간 경과에 따른 전도도 감쇄 기울기를 지층수 유입량의 판단을 위한 지시자로 활용할 수 있음을 말하고 있으며, 전기전도도 측정 방법이 지층수의 유입량을 판단하고, 나아가 시추공 주변 지반의 수리상수를 결정하는 데 매우 효과적으로 이용될 수 있음을 보였다.

사 사

이 연구는 한국과학재단 지원에 의한 연구과제(우수

과학자 지원연구과제, 과제번호: R05-2002-000-01321-0)의 일부이며, 과학재단 측의 연구비 지원에 감사드린다. 아울러 실험을 도와준 강원대학교 지구물리학과 박정빈 석사, 임헌태 석사, 채희삼군에게 감사한다.

참고문헌

- 김영화, 박정빈, 임헌태, 2003, 공내수 전기전도도의 자동측정시스템 구축을 위한 실험, 지질공학, 13(3), 281-292.
- 김영화, 임헌태, 2003, 시추공 수리전도도 상수를 결정하기 위한 전기전도도검층 기법을 이용한 예비모형 실험, 지하수토양환경, 8(1), 48-56.
- 손치무, 김영기, 김상욱, 김형식, 1075, 한국지질도 홍천도폭(1:50,000) 및 설명서, 국립지질광물연구소. 21p.
- 지오택 컨설턴트(주). 2001. 강원대학교 연습림 지반조사 보고서, 105p.
- Brereton, N.R., and Skinner, A.C., 1974, Groundwater flow characteristics in the Triassic sandstone in the Fylde area of Lancashire, Water Services, August, 7, 16p.
- Buffin, A., 1996, Permeability from wave form sonic data in the Otway basin, Society of Professional Well Log Analysts Annual Logging Symposium, 37th, New Orleans. La, Transactions, GG 1-11.
- Coates, G.R., and Dumanoir, J.L., 1974, A new approach to improved log-derived permeability, Log Analyst, 15, 17-31.
- Croft, M.G., and Dak, N., 1971, A method of calculating permeability from electric logs, in Geological Survey Research 1971: U.S. Geological Survey Professional Paper 750-B, B265-B269. 14p.
- Drost et al., 1968, Point dilution methods of investigating groundwater flow by means of radioisotopes, Water Resources Research, 4, 125-145.
- Dziuba, T., 1996, Improved permeability prediction in carbonates, Society of Professional Well Log Analysts Annual Logging Symposium, 37th, Transactions, H1-13.
- Goldberg, D., Speed, D., Wilkinson, C., and Scholz, E., 1990, A correlation of hydraulic conductivity from pulse tests with sonic log amplitude, Geological Applications of Wireline Logs Geological Soc. Special Publication, 48, 297-302.

Paillet, F.L., Hess, A.E., Cheng, C.H., and Hardin, E., 1987, Characterization of fracture permeability with high-resolution vertical flow measurements during borehole pumping, *Ground Water*, 25(1), 28-40.

Seevers, D.O., 1966, A nuclear magnetic method for determining the permeability of sandstone, *Society of Professional Well Log Analysts Annual Logging Symposium*, 7th, Tulsa, Okla, Transactions, 14p.

Loew, S., Tsang, C-F, Hale, F.V. Hufschmied, P., 2000, The Application of Moment Methods to the Analysis of Fluid Electrical Conductivity Logs in Boreholes, *Nagra-Doe Cooperative Project Report*, Earth Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, 44p.

Tang, X.M., Altunbay, M., and Shorey, D., 1998, Joint interpretation of formation permeability from wireline acoustic, NMR, and image log data, *Society of Professional Well Log Analysts Annual Logging Symposium*, 39th, Houston, Tex., Transactions, KK 1-14.

Tsang, C.F. and Hale, F., 1989, A direct integral method for the analysis of borehole fluid conductivity logs to determine fracture inflow parameters, *Nagra-Doe Cooperative Project Report*, Earth Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, 21p.

투 고 일	2004년	11월	15일
심 사 일	2004년	11월	16일
심사완료일	2005년	1월	23일

김영화 (Yeonghwa Kim)
 강원대학교 지구물리학과
 200-701, 강원도 춘천시 효자동
 Tel: 033-250-8582
 e-mail: yhkim@kangwon.ac.kr

김지훈 (Jihoon Kim)
 강원대학교 지구물리학과
 200-701, 강원도 춘천시 효자동
 Tel: 033-250-8582
 e-mail: forret@empal.com

홍정표 (Jeong Pyo Hong)
 (주)엑스지오
 412-220, 경기도 고양시 덕양구 행신동 996-5
 원스톱프라자 702호
 Tel: 031-791-4073
 e-mail: jphong@xgeo.co.kr