

시추공 전기전도도 곡선의 획득과 특성 분석

홍정표	(주)엑스지오
김영화	강원대학교 지구물리학과
박유철	강원대학교 지구물리학과
김지훈	강원대학교 지구물리학과
공남영	강원대학교 지구물리학과

1. 서 론

전기전도도 측정 기법은 유체 흐름을 측정하는 계측 방법이면서 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 유속검증, 수압시험의 결과와 비교되었다.

2. 자료 획득 및 처리

전기전도도가 높은 시추공 안으로 전기전도도가 낮은 지층수가 들어올 때, 시간에 따른 유체의 전기전도도의 변화 경향을 효과적으로 관찰하기 위하여 시스템 제작, 시추공 내에서의 측정 조건 확보, 시계열 자료의 획득 및 분석으로 이루어진다. 시계열 자료를 획득하기 위한 시스템은 지표 자료 수집 부분과 공내 전극 부분 그리고 이를 연결하는 배전판으로 구성된다(김영화 외, 2005). 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 이용되었다. 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.

현장 적용 시험은 춘천시 봉명리 강원대학교 산림학습원 안에 있는 2개의 시추공에서 이루어졌다. 지역 지질은 선캠브리아기의 창촌리층(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 시추공을 양수정과 측정공으로 바꾸어 측정하는 방식으로 실시되었다. 이 연구는 시추공을 통한 유체의 흐름이 공내수의 전기전도도 변화를 야기하며 유체흐름의 정도를 알아내기 위해서는 두 유체간의 전기전도도 차이를 크게 해야 한다는 전제 하에서 이루어졌으며 이를 위하여 0.05%와 0.07%의 염화나트륨 수용액을 공내수로 사용하였다. 실험구간에 대한 초기 공내수의 균질성 확보는 시험의 성패를 좌우하는 중요 요인으로 주변 지하수계의 변화를 최소화하면서 시추공 내에서의 큰 전기전도도 변화와 전기적인 균질성을 유지하도록 노력하였다. 공내수를 신속하게 치환하면서도 주변 지하수의 교란 방지를 도모할 수 있는 가장 효과적인 방안으로 “시추공 상부에서 양수하면서 바닥에 염수를 주입하는 방법”을 전 과정에 적용하였다.

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 희석 등의 과정에 따라 이루어졌으며 이극법 전극배열에 의한 시계열 저항 자료가 획득되었다. 저항 자료로부터 전기전도도 값을 유도하기 위하여 각 측정 사이에 전기전도도(TCDS)검증이 수행되었으며 시계열 전기전도도 자료와의 비교를 위하여 유속(Flowmeter)검증도 함께 이루어졌다. 유속검증은 공 상부에서 약 7 l/min 속도의 양수 상태에서 이루어졌으며 Robertson Geologging사의 Heat pulse type flowmeter가 사용되었다. 수압시험자료는 지오텍(2001)을 이용하였다.

유체의 저항 값으로부터 전기전도도 값을 구할 수 있는 전환상수 값(CF)은 각 전극별 시계열 전기전도도 측정에서의 저항값(R)과 전기전도도 검증에서 구한 전기전도도(σ) 분포 값으로부터 아래의 식(2)을 이용하여 유도되었다.

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

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

특히 이번 측정에서 사용된 시작품의 경우, 전극 간격, 전극 크기 및 형태가 동일하지 못하여 주변 암반의 상태 및 공내수의 상태에 따라 영향의 정도가 달리 나타날 수 있기 때문에 공내수의 전기전도도가 변화할 때마다 기존의 전기전도도 검증을 함께 실시하여 전환상수를 구했다. 각 환경별 전환상수에 의하여 시계열 저항 자료로부터 시계열 전도도 자료가 만들어졌다. 아울러 염수 치환 종료 시점에서 공내수의 전기전도도가 심도에 따라 달리 나타나는 문제점을 해결하기 위하여 식(3)에서와 같이 염수 주입 종료 시점에서의 값을 기준으로 한 normalized conductivity의 형태로 나타냈다.

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

3. 전기전도도도 곡선과 투수계수

BM-2와 BM-3의 두 시추공에서 공내수의 염수 치환이 종료된 시점으로부터 70분 동안 얻어진 약 600개의 시계열 전기전도도 분포곡선을 시간대별로 적절히 선정하여 도시하는 방법을 적용하였다(김영화 외, 2005). Normalized conductivity 방법에 따라 표시되었으며 시간에 따른 변화 경향을 효과적으로 나타내기 위하여 주입 종료 후 10분 이내의 전도도 변화 양상부터, 20분 이내, 40분까지의 전기전도도 변화를 구분하여 도시하였다. 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 흐석 현상을 보여주고 있으나 심도 12미터를 개략적인 경계로 하여 상부에서의 비교적 활발한 흐름과 하부에서의 약한 흐름이 대조를 이루고 있다. 초기 10분 동안의 전기전도도분포곡선의 형태가 20분과 40분이 경과하여도 거의 그대로 유지되는 특성을 보인다.

Figure 1은 김영화와 임현태(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. 특히 BM-2 시추공에서는 두 가지 서로 다른 공내수 농도에서 거의 동일한 결과를 얻었으며 모형실험에서 제시된 전환방정식을 적용할 수 있을 것으로 판단하였다. 실내 모델실험에서 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 환산할 경우, 각각 1.1×10^{-5} cm/sec, 4.7×10^{-6} cm/sec로 나타났다.

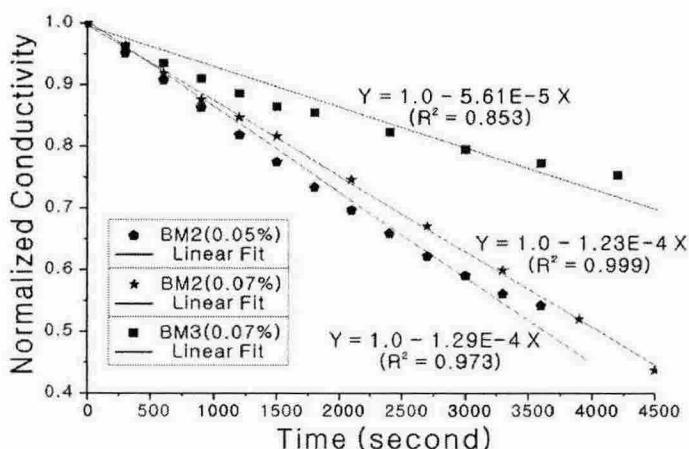


Figure 1. Linear decrease of conductivity against time obtained from boreholes BM-2 and BM-3.

Figure 2는 각 구간별 투수성을 파악하기 위한 시도로서 BM-3 시추공에서 측정 구간을 전기전도도곡선의 형태에 따라 7개의 구간으로 구분한 것이며, 각 구간 내에서 앞서 제시된 방법과 같이 normalized conductivity의 시점별 평균값(normalized mean conductivity)을 구하여 플롯하였다 (Figure 3).

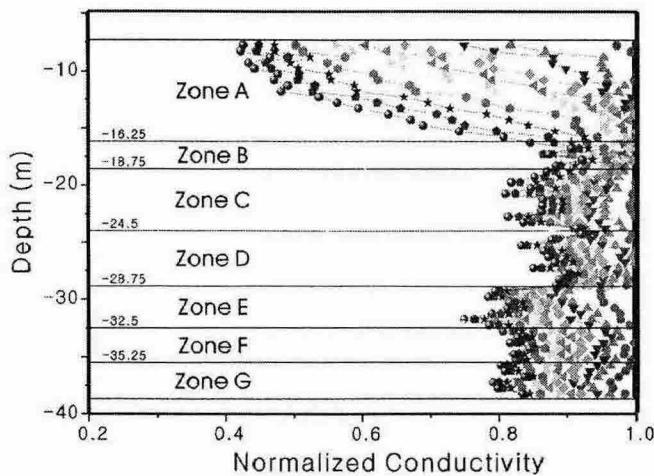


Figure 2. Conductivity variation curves obtained after the completion of saline water injection in borehole BM-3 and its zone division for obtaining zone permeability.

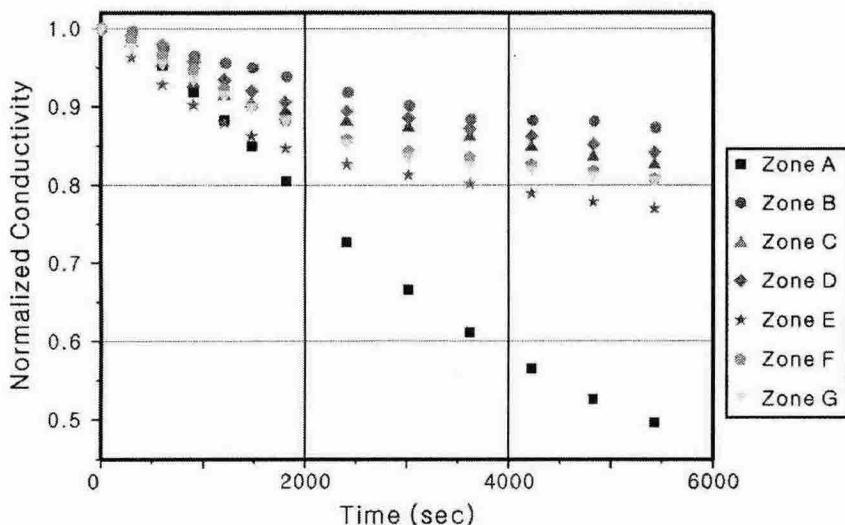


Figure 3. Linear decrease of conductivity against time obtained from each zone.

구간별 전기전도도 평균값 또한 비교적 양호한 선형관계의 전도도 감쇄 기울기를 보이고 있으나 시추공 전체를 대상으로 한 경우와는 시간 증가에 따라 전도도감쇄 기울기가 달리 나타나는 특징을 보인다. 이는 시추공을 따른 유체의 이동에 기인한 것으로 기울기를 구하기 위한 시간 한계 설정의 중요성을 보여주고 있다. Figure 4은 2000초 이내에서의 전기전도도 변화를 기준으로

구한 각 구간별 전도도 감쇄 기울기로서 앞서의 모델방정식 $Y = 2.31 \times 10^5 X$ 를 적용하여 구한 흐름(flow rate), 그리고 현장 조건에서의 투수계수의 분포와 함께 비교할 수 있다.

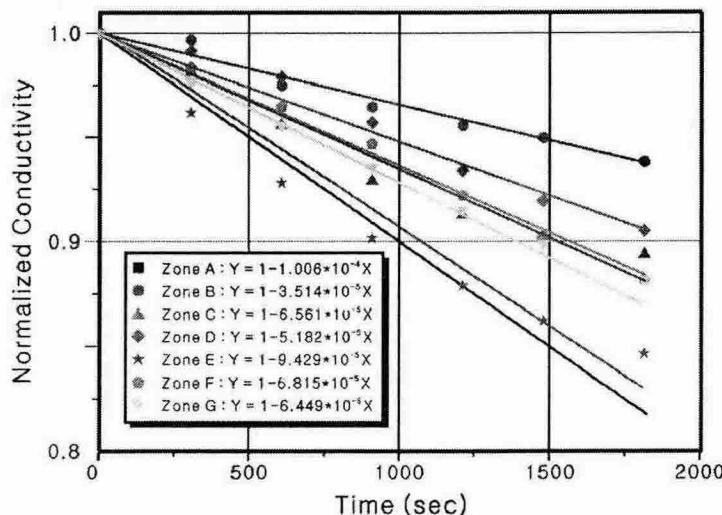


Figure 4. Linear decrease of conductivity of each zone obtained from the data up to 2000 seconds.

4. Flowmeter 및 수압시험 결과와의 비교

BM-2와 BM-3 시추공에서 얻어진 유속검증의 결과는 시추공 상부에서 분당 약 7리터의 양수를 수행하면서 얻은 것으로 모든 유향은 연직 상부 방향을 나타내며 유속값은 Flowmeter에서 별도의 보정 없이 유도된 걸보기 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(지오텍콘설판트, 2001)와도 비교할 수 있었다. Double packer를 사용하여 5미터 구간, 단계하향식 방식으로 수행하여 얻어진 수압시험의 큰 특징은 BM-2에서 $1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 이상의 상대적으로 높은 투수계수가 주로 측정된 반면에 BM-3에서는 10^{-6} cm/sec 범위 이하의 낮은 투수계수가 많이 얻어졌다는 점이다. 특히 BM-3시추공의 19미터 심도를 경계로 하부 구간이 매우 낮은 투수계수를 가진 구간으로 나타나는데 이러한 점들은 시계열 전기전도도 분포 경향과 잘 일치하고 있다.

Figure 5는 시추공 BM3에서 얻어진 수압시험 결과, normalized conductivity variation curves 및 전기전도도검증 곡선, 그리고 유속검증 등의 중요자료들을 함께 도시한 것이다. 수압시험의 결과는 19미터 심도를 경계로 상부 높은 투수계수 구간과 하부 낮은 투수계수 구간으로 구분되고 특히 심도 9미터 윗부분의 투수계수가 높게 나타나고 있다. 이에 대하여 Normalized conductivity variation curves는 15미터, 물리검증전기전도도곡선(conductivity)은 19미터 상부에서의 높은 감쇄 정도를 보여 주며, 유속측정에 있어서도 18미터 부근에서 가장 큰 유속변화를 보이고 있어 전체 자료들이 대체로 잘 일치하고 있다.

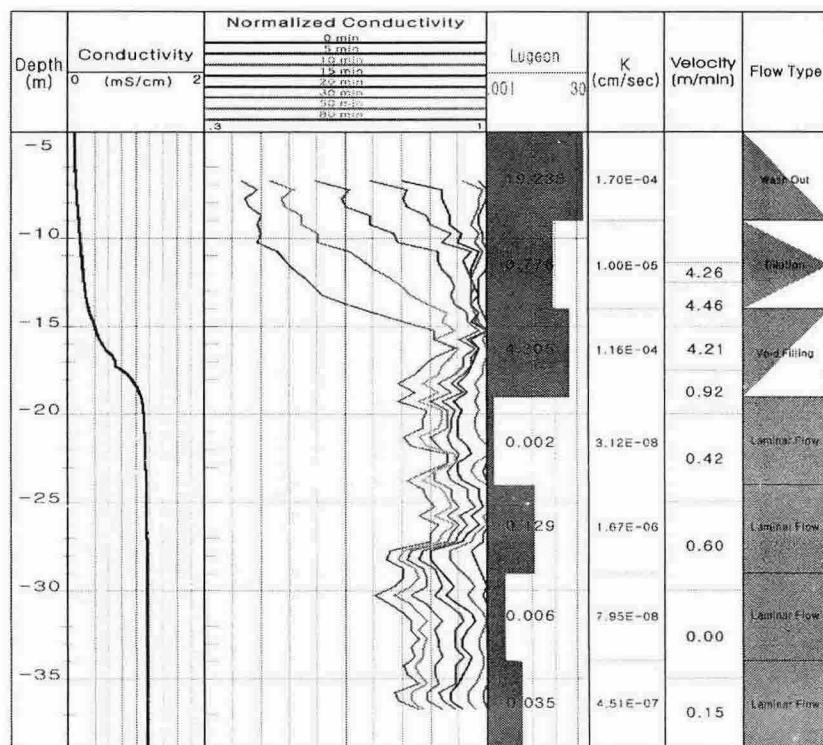


Figure 5. Comparison of all hydraulic indicators obtained from conductivity log, electric conductivity monitoring, packer test and flowmeter measurement.

5. 결 언

춘천시 봉명리 강원대학교 산림학습원 구역 내에 있는 BM-2와 BM-3의 두 시추공에서 수리 전도도 결정을 위한 전기전도도 측정의 원위치 현장 적용 시험을 실시하였다. 이 연구는 모형실험 환경에서 밝혀진 전기전도도 측정 방식에 의한 수리 상수 결정 기법이 현장 조건에서 실제로 어떻게 적용될 수 있는지를 확인하고 시계열 전기전도도곡선의 특성을 분석하고 수압시험, 유속검증의 결과와 비교하였다. 향후 측정시스템의 개선을 전제한다면 매우 효과적인 원위치 현장 투수시험 방법 될 수 있을 것으로 나타났다.

참고문헌

- 김영화, 박정빈, 임현태, 2003, 공내수 전기전도도의 자동측정시스템 구축을 위한 실험, 지질공학, 13(3), 281-292.
- 김영화, 임현태, 2003, 시추공 수리전도도 상수를 결정하기 위한 전기전도도검증 기법을 이용한 예비모형실험, 지하수토양환경, 8(1), 48-56.
- 손치무, 김영기, 김상욱, 김형식, 1975, 한국지질도 홍천도폭(1:50,000) 및 설명서, 국립지질광물연구소, 21 p.
- 지오텍 컨설팅(주), 2001, 강원대학교 연습림 지반조사 보고서, 105 p.
- 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, 44 p.

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, 21 p.