

# 시추공 수리상수를 결정하기 위한 모형실험에서 전기전도도 측정기법의 비교와 현장 적용에의 문제점

김영화  
박정빈  
임헌태

강원대학교 지구물리학과  
강원대학교 지구물리학과  
주식회사 두우건설엔지니어링

## 1. 서 론

시추공 환경에서 대수층의 분포와 그 수리학적 특성의 규명은 지하수, 석유, 환경 문제의 해결에 있어서 중요한 의미를 가진다. 지금까지 많은 연구자들(Theis, 1935; Cooper and Jacob, 1946; Lambe, 1951; Todd, 1959)에 의해 대수층에서의 수리전도도를 구하기 위한 방법들이 제시되어 왔으며 지구물리검층 방법은 표준화되고 해상도 높은 자료를 얻을 수 있다는 점에서 대수층의 수리상수를 결정하는 잠재적인 방법의 하나로 주목을 받아왔다. 전기전도도 검층기법은 유체 자체의 흐름에 의한 영향이 측정되는 계측방법에 속하면서 측정과정이 단순하다는 점에서, 과거부터 지하수 분야에 자주 활용되어 온 방법 중의 하나이다. 그러나 대부분 대수층의 위치나 대수성 파악을 위한 정성적인 접근에 머물러 있었던 문제점을 가지고 있으며, 대수층의 수리상수 결정을 위한 정량적 접근은 Tsang 등에 의하여 (Tsang and Hale, 1989; Simon et al., 2000) 이루어졌다. 이 연구들은 고농도의 지하수가 저농도의 공내수에 유입되면서 일어나는 일종의 확산모델에 근거한 전도도 변화에 초점을 맞추었다. 이 방법은 이론적으로 분명하나 이에 부합하는 현장조건으로 연결시키기에 어려움이 있다는 한계를 지니고 있으며 지금까지 이 부분 관련 연구가 저조한 원인이 되었다. 본 연구에서는 공내수의 염도를 높게 한 한 일종의 희석모델의 적용을 시도하였는데 이는 시추 이수에 약간의 NaCl 첨가만으로도 이온농도에서 지하수와 현저히 대비되는 공내수 조건이 충족될 수 있다는 점에서 유리한 것으로 기대되고 있다. 본 연구에서는 두 방법의 차이를 비교하고 전기전도도측정에 있어서 기존의 탐사기에 수동식 회로변경기(switching box)를 이용한 측정결과와 자동 회로변경 시스템에 의한 측정결과를 비교하였다. 아울러 모형실험의 결과를 현장 측정자료로 연결시키는데 있어서의 문제점을 살펴보고자 하였다.

## 2. 전기전도도 결정 원리

양끝에 고정된 두 개의 판전극으로부터 전류를 보내고 그 내부에 위치한 임의의 두 전위전극에서의 전위를 측정함으로써 저항과 비저항을 구하고 궁극적으로 전기전도도를 얻는 방

법을 채택하였다. 따라서 유체의 전기전도도를 구하는 첫 단계는 제작된 측정장치에서의 각 전극 배치 조합에 대한 배치계수(F)를 결정하는 일이다. 먼저, 단면적(S)과 전극간격(h)이 정해진 두 전극간에 측정된 전류(I)와 전위(V)로부터 얻어지는 저항(R)과 비저항( $\rho$ ) 사이의 관계는 다음과 같다<sup>20)</sup>.

$$R = V/I = \rho h / S \quad (1)$$

$$\sum R(i) = \sum \rho(i)h(i)/S(i) \quad (2)$$

$$\sum R(i) = \rho \sum h(i)/S \quad (3)$$

$$\therefore \rho = S \sum R(i) / \sum h(i) \quad (4)$$

기존의 저항-비저항 관계로부터 각 전극에서의 전극배치계수(F(i))를 구하면

$$F(i) = \rho / R(i) \quad (5)$$

각 전극 쌍에서의 전극배치계수가 구해지면 전극쌍 사이에 존재하는 유체의 비저항 값이 결정될 수 있다.

$$\rho(i) = F(i) * R(i) \quad (6)$$

마지막으로, 여기서 얻어진 전기비저항 값의 역수를 취하여 전기전도도 값( $\sigma$ )이 구해진다.

$$\sigma(i) = 1 / \rho(i) \quad (7)$$

### 3. 측정장치 및 방법

전술한 측정원리에 입각하여 시추공으로 지하수가 유입, 유출되는 것을 모형화한 모형시추공과 모형시추공 내에 들어있는 유체인 공내수의 전기전도도 측정장치 및 유출수의 유체 특성 특성 측정장치로 구성된다. 모형 시추공은 투명한 원통의 플라스틱 관과 유입수와 유출수의 양을 조절하기 위한 장치로 구성된다. 지하수의 공급은 10리터 부피의 1차 증류수 통과 타이콘 튜브, 테프론 콧을 이용하여 이루어졌으며 수두 조절에 의하여 시추공에서의 유입되고 유출되는 물(이하 유입수와 유출수)의 양을 동일하게 유지하게 하였다. 공내수의 전기전도도의 측정을 위하여 플라스틱 관의 매 5cm 마다 은 전극을 설치하고, 전기비저항 측정기와 측정시간 단축을 위한 전극교환장치를 마련하였다. 전극은 양단에 2개의 은판 전류전극을 설치하고 그 사이에 십자형 은선 전극을 설치하였다. 전기비저항 측정기는 기존의 McOhm 전기탐사기를 이용하였으며 주로 1 mA의 일정한 전류를 사용하였다.

측정장치 및 방법은 심도마다 설치된 각 전류전극 및 전위전극 조와 연결시키는 방법을 수동식 회로교환기(switching box)에 의존하는 방식(이하 수동 회로교환 시스템) 인지 자동식 회로변경 시스템(이하 자동회로교환 시스템)에 의한 것인지에 따라 크게 2구분된다. 수동 회로교환 시스템방식에서는 투명 플라스틱 관의 높이가 약 1.4m이며 직경이 6.3cm인 것을 사용하였다. 자동 회로교환 시스템방식에서는 투명 플라스틱 관의 높이가 약 1.1m이며 직경

이 7.5cm인 것을 사용하였다. 수동전극교환장치는 일반적인 비저항탐사에서의 switching box를 제작하여 사용하였으며 자동전극교환 장치는 National Instrument사의 CB-68LP 터미널 블록을 이용한 Labview 시스템을 함께 사용하였다.

실험의 핵심은 시추공 안으로 지하수가 들어올 때, 시간에 따른 유체의 전기전도도 변화 경향을 관찰하는데 있으며 이를 위해 공내수의 전기전도도를 인위적으로 조절하였다. 따라서 공내수와 지하수 사이의 가장 좋은 전기전도도 차, 측정 시간, 시간에 따른 시추공 외부로의 염의 이동 상태를 확인하는데 일차적인 초점이 두어졌다. 지하수의 유입 영향을 쉽게 탐지하면서도 유입된 지하수의 지나치게 급속한 상승과 하강을 제한하기 위해서, 공내수와 지하수 사이의 전기전도도 차이는 가능한 크게 하고 밀도차는 가능한 작게 되는 환경을 찾고자 하였으며 염도와 온도 조건을 적절히 조절함으로 밀도차 문제를 해결하였다. 이 연구에서 공내수로는 0.01%, 0.03%, 0.05%, 0.08%, 0.1%로 구성되는 5 가지 종류의 염화나트륨 용액을 사용하였고, 지하수로는 공통적으로 0%의 염화나트륨 용액에 근접하는 증류수가 사용되었다.

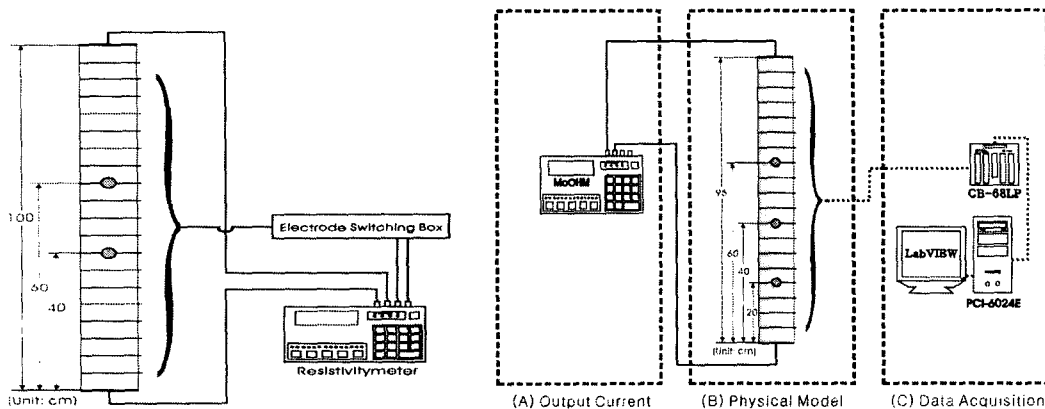


Fig. 1. Comparison of apparatus setup for fluid conductivity measurement  
(left: manual switching box, right: automatic switching box.)

#### 4. 전기전도도곡선의 비교와 자동측정시스템의 신뢰도

수동측정시스템에서 측정된 곡선과 자동측정시스템에서 측정된 곡선간의 근본적인 차이는 없었으며 단지, 값의 안정성과 동시성 측면에서 서로 장단점을 가지는 것으로 나타났다. 일단 자료의 안정성에 있어서는 수동 회로교환 시스템이 보다 앞서는 것으로 나타났다. 자동측정시스템에 의하여 얻어진 자료가 측면변화가 불규칙하게 나타나 필터링기법의 적용이 요구된 반면에 수동측정시스템에 의하여 측정된 자료는 별다른 필터의 적용 없이도 비교적 깨끗한 전기전도도 곡선을 얻을 수 있었다. 이는 수동측정시스템에서는 기존의 전기비저항탐사장비를 그대로 이용하여 전위측정자료를 얻을 수 있었음에 비하여 자동 회로교환 시스템

에서는 상대적으로 안정성이 떨어지는 AD 컨버터를 사용했음에 기인한 것으로 판단된다.

수동측정시스템의 가장 큰 문제는 다수의 측정전극이 있을 때, 측정 전극간에 발생하는 시간지연이다. 각 측정간에 소요되는 최소시간 2초의 시간지연은 측정전극이 증대되는 현장측정을 감안할 때는 적용에 한계를 느낄 수밖에 없는 것으로 나타났다. 그러나 금번 측정에서 두 측정 자료간에 전반적인 분포경향을 같이하는 결과가 얻어져 일단 자동측정시스템에 의한 측정치의 안정성에 있어서 최소한의 신뢰도를 얻은 것으로 판단된다.

### 5. 전기전도도 감소율과 흐름율

흐름율과 전기전도도 변화와의 정량적인 관계 모색을 위하여 공내수 전체를 대상으로 하여 시간에 따라 변화하는 전도도 값의 평균값을 구하고 이를 플롯하는 방법을 적용하였다. 전기전도도 값은 모두 초기 전도도값을 기준으로 Normalizing 하였으며, 유입량을 달리 하는 여러 개의 실험결과로부터 각 시점에서의 시추공내 평균 전기전도도 값의 분포가 각 시간대 별로, 유입량 별로 구분 도시되었다. Fig. 2는 예비연구 단계에서 수동측정으로 63.5mm의 모형시추공으로 얻어진 자료이다(김영화·임헌태, 2003). 모든 자료에서 평균 전기전도도 값이 단순한 직선 선형으로 감소하는 경향을 나타내고 있어, 유입된 지층수에 의해서 공내수가 희석되는 정도가 시간에 비례하여 일어나고 있음을 잘 나타내고 있으며, 여기서 나타난 전기전도도 감소의 기울기는 유입량의 크기와 좋은 상관을 보이고 있다. 이는 시간경과에 따른 전기전도도 감소의 기울기를 지층수 유입량의 지시자로 활용할 수 있는 가능성을 제시하고 있다. 이와 같은 예상은 유입량 값과 시간에 따른 전기전도도 감소를 값을 Cross plot한 Fig. 3의 결과에서 확인할 수 있었다.

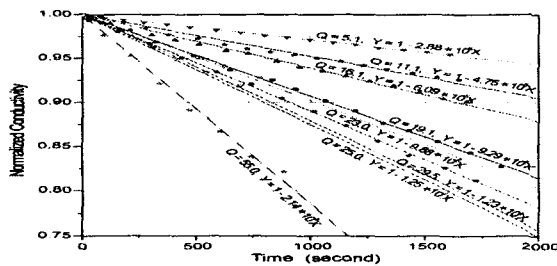


Fig. 2. Average conductivity values of borehole fluid plotted in terms of time (From Kim and Lim, 2003).

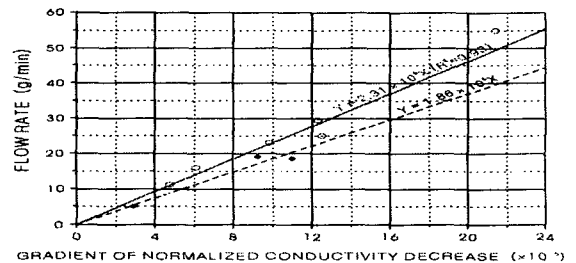


Fig. 3. Cross plot of flow rate and gradient of conductivity change data obtained from Fig. 2.

이와 같은 경향은 LabView 자동측정시스템과 직경 75mm의 모형시추공을 이용하여 측정된 각 시점별 시추공내 평균 전기전도도 값의 분포와 이들을 다시 크로스 플롯한 결과

(Figs. 4, 5)에서 보다 구체적으로 확인 될 수 있었다. Fig. 4는 전기전도도 곡선의 피크가 뚜렷이 수렴하지 못하는 자료(발산형)만을 골라서 플롯한 것으로 유출구를 통해서 빠져나가는 유체의 전기전도도가 초기 공내수와 동일한 상태라는 가정이 비교적 잘 성립되는 조건을 가진 자료들이다. 여기에서의 시간에 따른 전기전도도 감소의 기울기 값(X)을 유입량 값(Y)에 대하여 Cross plot한 결과(Fig. 4)는 높은 상관( $R^2=0.91$ )을 가지면서  $Y=2.4 \times 10^5 X$  직선 상으로 수렴하고 있다. 직경 75mm 모형시추공에서 얻어진 이 결과를 직경 63.5mm 시추공에서의 보정값으로 환산하면  $Y=1.8 \times 10^5 X$ 가 되어 Fig. 3에서의 이론곡선과 거의 일치함을 보인다.

한편 유출구를 통해서 빠져나가는 유체의 전기전도도가 초기 공내수와 동일한 상태라는 가정이 잘 성립되지 않는 조건에서 얻어져, 전기전도도 곡선의 피크가 유입구 쪽으로 뚜렷이 수렴하고 있는 자료만을 골라서 플롯한 경우(Fig. 5)에는 얻어진 회귀방정식이  $Y=4.2 \times 10^5 X$  직선 상으로 수렴함을 보인다 이는 시추공경 보정을 거치면  $Y=3.1 \times 10^5 X$ 가 된다. 예비연구 단계에서 공내수와 지층수간의 밀도조절이 정밀하게 이루어지지 못한 상태로 얻어진 회귀방정식  $Y=2.3 \times 10^5 X$ 이나, 자동측정 자료인 Fig. 6과 Fig. 7을 합하여 구한 회귀방정식  $Y=2.6 \times 10^5 X$ 의 어느 것을 기준으로 하더라도, 각 자료가 보이는 최대 편차는 50% 이내로 나타났다.

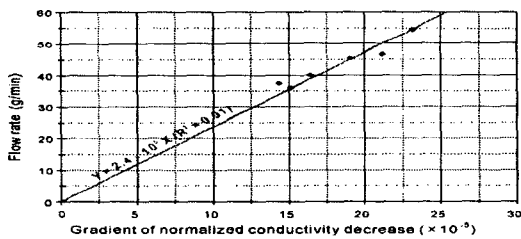


Fig. 6. Cross plot of flow rate and gradient of conductivity change data obtained from Fig.4.

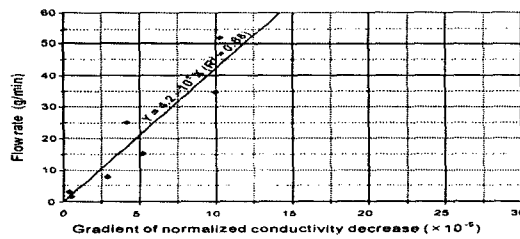


Fig. 7. Cross plot of flow rate and gradient of conductivity change data obtained from Fig. 5.

### 6. 토의 및 결론

두 가지 종류의 모형시추공과 두 종류의 측정시스템을 이용하여 지층수의 흐름에 수반되는 전기전도도 곡선의 변화 양상을 추적하는 실험을 실시하고 이로부터 시추공에서의 수리상수 결정에 관련된 제반 기초 환경을 검증하였다. 실험은 NaCl 수용액을 공내수로, 증류수를 지층수로 사용하여, 지층수의 유입과 유출되는 유량을 일정하게 유지한 상태에서 전기전도도를 측정하는 방식으로 이루어졌다. 관찰의 주 대상은 모형시추공의 사이즈에 따른 영

향과 수동 및 자동으로 따로 실시된 측정방법에 따른 전기전도도 변화 양상에 있었다. 실험의 결과, 사이즈에 따른 영향은 거의 나타나지 않은 것으로 판단되었으며, 기존의 전기비저항 탐사기를 이용하여 수동 측정한 결과와 LabView 시스템을 이용한 자동측정 결과가 거의 비슷하게 나타나고 있다. 이는 향후 측정 채널 수의 증대가 필연적인 현장측정에서 요구되는 자동측정 방법의 자료 신뢰성을 보장하는 의미가 있는 것으로 간주된다. 본 연구에서 구해진 전환방정식은 시추공에서의 현장투수계수 유도에 매우 효과적일 것으로 나타나고 있다. 그러나 현장적용을 위해서는 추가적인 전국배열 상의 연구와 공내수 균질화를 위한 교반용 장비의 개발이 필요한 것으로 나타나고 있다.

### 사사

이 연구는 한국과학재단의 지원(과제번호: R05-2002-000-01321-0)으로 이루어졌다.

### 참고문헌

- 김영화, 임헌태, 2003, 시추공 수리전도도 상수를 결정하기 위한 전기전도도검층 기법을 이용한 예비모형실험, 지하수토양환경, vol.8, no.1, (인쇄중)
- Cooper, H.H. Jr. and Jacob, C.E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, Trans. Amer. Geophy. Union, vol. 27, pp.526-534.
- Lambe, T.W., 1951, Soil Testing for Engineers, John Wiley & Sons, New York, pp.165.
- Simon Loew, Chin-Fu Tsang, Frank V. Hale, Peter Hufschmied, 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 Lab., pp.1-44.
- Theiss, C.V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Trans. Amer. Geophy. Union, vol. 2, pp.519-524.
- Todd, D.K, 1959, Groundwater Hydrology, John Wiley & Sons, New York, pp. 525.
- 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, pp. 1-21.