

## 공내수 전기전도도의 자동측정시스템 구축을 위한 실험

김영화\* · 박정빈 · 임헌태  
강원대학교 지구물리학과

### An Experiment for determining Electrical Conductivity in Modelholes using Continuous Measurement System

Yeonghwa Kim\* · Jeongbin Park · Huntae Lim  
Kangwon National University, Dept. of Geophysics

#### 요 약

모형시추공 내에서 공내수 전기전도도의 자동 측정시스템을 구축하고 이로부터 수리상수 결정과 관련된 제반 기초 환경을 검증하였다. 실험은 상대적으로 높은 염도를 공내수로 하고 증류수를 지층수로 사용하여, 지층수의 유입과 유출되는 유량을 일정하게 유지한 상태에서 공내수의 전기전도도 프로파일을 구하는 방식으로 이루어졌다. 관찰의 주 대상은 공내수와 지층수 사이의 염도차, 온도차 및 지층수의 유입량, 유입·유출구에 따른 모형시추공 내에서의 전기전도도 변화 양상 파악에 있었다. 실험결과, 이들 요인이 미치는 영향범위와 적정 측정 환경이 제시되어 향후 모델 실험 및 원위치시험에서 적용될 기초 실험 여건이 마련되었다.

**주요어:** 모형시추공, 전기전도도, 수리상수, 공내수, 염도

**ABSTRACT:** We setup a continuous measurement system for electrical conductivity of fluid in a model borehole and verified the basic environments in electrical conductivity measurement for estimating hydraulic constants. The experiment was made by monitoring the conductivity change within the hole using NaCl solution of different salinities and incoming formation fluid using distilled water. The experiment was made under the state of constant flow rate by maintaining balance between inflow and outflow. Conductivity variation features were observed by controlling salinity contrasts and temperature differences between fluid within the hole and incoming formation fluid, flow rate and the location of inlet and outlet. The results of the experiment show well the role of each affecting factor on the conductivity distribution, and suggest appropriate environments for conductivity measurements. It is considered that the basis of the conductivity measurement for henceforward laboratory model and/or in-situ borehole experiment has been prepared.

**Key words:** model hole, conductivity, hydraulic constant, salinity, hole water

---

\* Corresponding author: yhkim@kangwon.ac.kr

## 서 론

지구물리검층 방법은 표준화되고 해상도 높은 물성 자료를 얻을 수 있으며, 시추공을 이용하는 다른 수리학적 자료들과 자주 접한다는 특성으로 대수층의 수리상수를 결정하는 잠재적인 방법의 하나로 주목을 받아왔으며 특히 석유분야에서 전기비저항, 자연전위, 음파, 자연 감마, 감마감마, NMR(Nuclear Magnetic Resonance), 유체 검층 등, 다양한 종류의 검층기법들이 이러한 목적으로 적용되어 왔다(Gaur and Singh, 1965, Paillet, 1988, Denicol et al., 1996). 수리전도도와 연관된 이들 물리검층 연구의 많은 부분은 공극률과 투수계수 사이의 관계에 기초를 둔 간접적인 방법으로 오래동안 검층 연구의 주요부분을 차지해 왔다(Croft and Dak, 1971; Coates and Dunanoir, 19745; Dziuba, 1996). 반면에 텔레뷰어(Breton and Skinner, 1974)와 NMR(Sievers, 1966; Tang et al, 1998) 및 음파(Goldberg et al, 1990; Buffin, 1996)를 이용한 투수성 연구들은 비교적 최근에 시도되고 있는 대표적인 접근방법들이다. 유체검층으로 불리는 전기전도도검층, 유속검층, 온도검층은 유체의 흐름이 그대로 반영된다는 측면에서 수리전도도를 측정하는 직접적인 계측방법으로 주목되고 있으며 유속검층은 최근에 측정장비의 개선과 함께 그 적용 영역이 크게 확대되고 있다(Paillet et al., 1987).

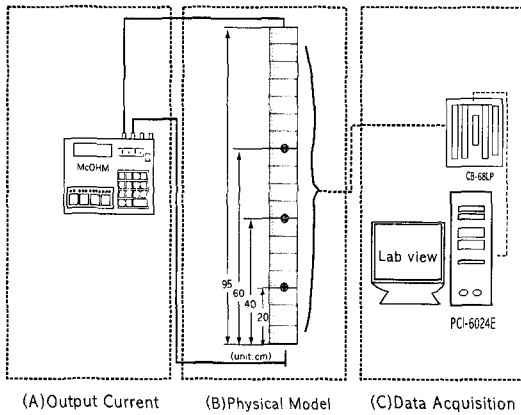
전기전도도 검층기법은 유체 자체의 흐름에 의한 영향이 측정되는 계측방법에 속하면서 측정과정이 단순하다는 점에서, 지하수 분야에 자주 활용되어 온 방안 중의 하나이다. 그동안 대수층의 위치나 대수성 파악을 위한 정성적인 접근에 머물러 있었던 문제점을 가지고 있었으나 최근 Tsang 등에 의하여 정량적인 접근이 이루어졌다(Tsang and Hale, 1989; Loew et al., 2000). 이들 연구는 공내수와 지층수의 전기전도도 차이를 이용하면서 특히 고농도의 지층수가 저농도의 공내수에 유입되면서 일어나는 전도도 변화에 초점을 맞추었다. 이 방법은 이론적으로 분명하나 이에 부합하는 현장조건으로 연결시키기에 어려움이 있다는 한계를 지닌다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 김영화·임헌태(2003)는 공내수를 고염도

로 한 일종의 희석모델의 적용을 시도하였다. 본 연구에서는 김영화·임헌태(2003)에서 적용된 연구 방향을 적용하면서 기존의 전도도 수동측정장치를 개선한 자동측정장치를 이용함으로써 각 위치별 측정시간의 동시성을 구현하고, 전기전도도 곡선에 미치는 공내수와 지층수 사이의 농도차, 온도차 및 지층수의 유입량, 유입 유출구의 상대적 위치에 따른 영향을 체계적으로 분석하고자 하였다.

## 측정장치 및 방법

측정장치는 김영화·임헌태(2003)에서 제시된 수동측정장치를 개량하여 자동연속 측정이 가능하게 한 것으로 기존 시스템과 동일하게 유체(이하 지층수)가 유입, 유출되는 것을 모형화한 모형 시추공과 모형시추공 내에 들어있는 유체(이하 공내수)의 전기전도도 측정장치 및 유출수의 유체특성 측정장치로 구성되어 있다(Fig. 1). 모형 시추공으로는 NX시추공의 공경에 근접한 직경 74.5mm의 투명 원통 플라스틱 관을 사용했으며 10리터 부피의 일차 증류수 용기와 타이콘 튜브, 테프론 콕(cock)을 이용하여 지층수 공급이 이루어지고 수두 조절에 의하여 시추공에서의 유입되고 유출되는 물의 양을 동일하게 유지하는 방법을 사용하였다. 공내수의 전기전도도의 측정을 위하여 플라스틱 관의 매 5cm 마다 2개의 전극을 설치하고, 전기비저항 측정기와 측정시간 단축을 위한 전극교환장치를 마련하였다. 전극은 양단에 2개의 은판 전류전극을 설치하고 그 사이에 십자형 은선 전극을 설치하였다. 전기비저항 측정은 McOhm 전기탐사기를 이용하여 1 mA의 일정한 전류를 사용하였다. 전극교환 장치를 자동교환장치로 적용한 것이 앞선 방법(김영화·임헌태, 2003)과 가장 다른 점으로 이를 위하여 National Instrument사의 CB-68LP 터미널 블록과 컴퓨터 소프트웨어 프로그램인 LabView 6.0이 사용되었다.

실험의 핵심은 시추공 안으로 지층수가 들어올 때, 시간에 따른 유체의 전기전도도 변화 경향을 관찰하는데 있으며 이를 위해 공내수의 전기전도도를 인위적으로 조절하였다. 따라서 공내수와 지



**Fig. 1.** Apparatus setup for fluid conductivity measurement system(up) and simplified schematic of potential measurement(down).

층수 사이의 가장 좋은 전기전도도 차, 측정 시간, 시간에 따른 시추공 외부로의 염의 이동 상태를 확인하는데 일차적인 초점이 두어졌다. 지층수의 유입 영향을 쉽게 탐지하면서도 유입된 지층수의 지나치게 급속한 상승과 하강을 제한하기 위해서, 공내수와 지층수 사이의 전기전도도 차이는 가능한 크게 하고 밀도차는 가능한 작게 되는 환경을 찾고자 하였으며 염도와 온도 조건을 적절히 조절함으로써 밀도차 문제를 해결하였다. 이 연구에서 공내수로 0.01%, 0.03%, 0.05%, 0.08%, 0.1%의 5 가지 염화나트륨 수용액을 사용하였으며, 지층수는 1차 증류수로서 0%의 염화나트륨 용액에 해당된다.

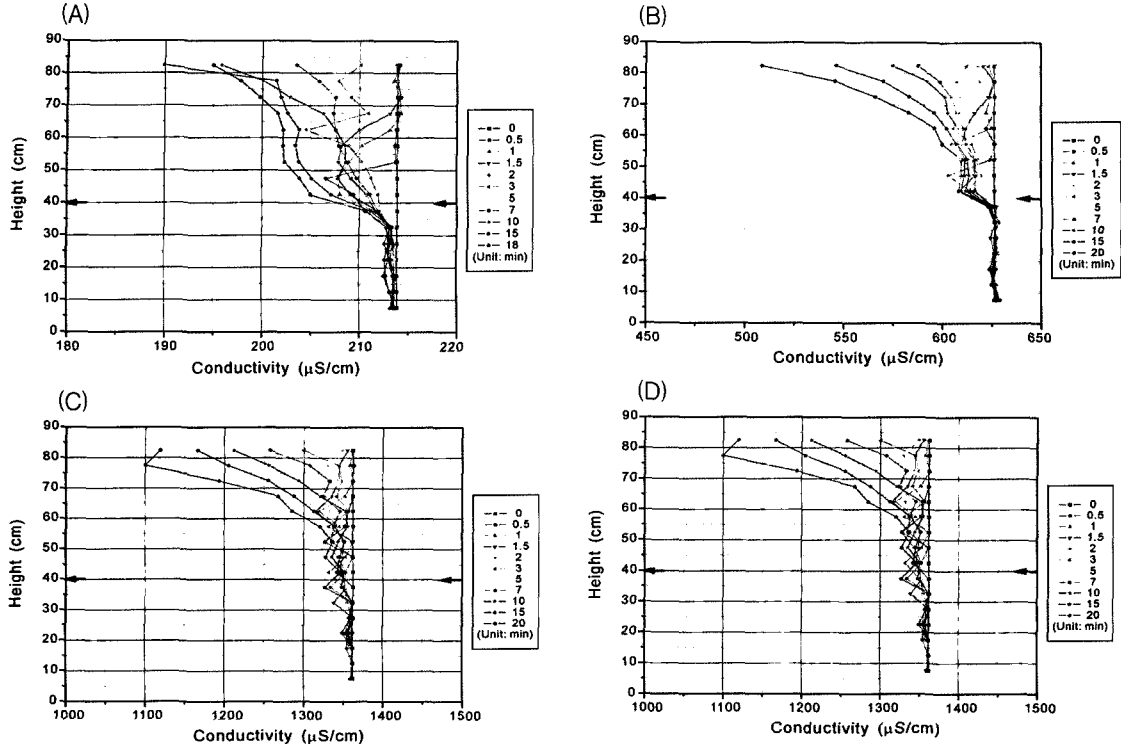
## 측정자료 및 분석

전기전도도의 측정은 양끝에 고정된 두 개의 판 전극으로부터 전류를 보내고 그 내부에 위치한 염의 두 전위전극에서의 전위를 측정하여 저항을 구하고 다시 비저항을 구하는 과정으로 얻어졌으므로 유체의 전기전도도를 구하는 첫 단계는 제작된 측정장치에서의 각 전극 배치 조합에 대한 배치계수(F)를 결정하는 일이다. 이를 위하여 농도를 달리하는 5 가지 종류의 염화나트륨 수용액을 공내수로 사용하여 지층수의 유입이 없는 상태에서 배경측정 실험을 실시하였다. 김영화·임헌태(2003)에서 제시된 식에 의하여 공내수의 비저항과 각 전극 배치조합에 대한 배치계수가 결정되었다. 4회 중복 측정으로 얻어진 값의 평균값을 사용하여 구해진 전위 전극쌍에 대한 전극배치계수들은 김영화·임헌태(2003)에서 제시된 바와 동일한 경향을 보였으며 이를 바탕으로, 지층수와 공내수 간의 농도차가 전기전도도 곡선에 미치는 영향, 온도차가 미치는 영향, 유량이 미치는 영향 그리고 유입구와 유출구의 위치가 미치는 영향들이 분석되었다.

### 농도차 조절과 전기전도도 곡선

지층수와 공내수의 농도 차이가 주는 영향을 알아내기 위해 0.01%, 0.03%, 0.05%, 0.08% 그리고 0.1% 농도의 NaCl 수용액을 공내수로 이용하고, 그 속에 1차 증류수로 이루어진 지층수를 흘려보내면서 전기전도도의 변화양상을 관찰하였다. 유입구와 유출구의 위치는 40cm 지점에 고정되어 있으며, 지층수와 공내수의 온도는 동일하게 유지한 상태에서 측정이 이루어졌다. 지층수의 유입량은 측정마다 약간의 차이가 있으나 가능한 12~14 g/min의 범위 내에서 일정하게 유지되도록 노력하였다.

측정의 결과는 0.01%, 0.03%, 0.05%, 0.08% 농도에서 20분간의 증류수 주입에 의하여 나타난 전기전도도 감소의 정도를 도시한 Fig. 2로 제시되었다. 0.01%의 경우(Fig. 2 A)에는 214  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 190  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 최대 24  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 전기전도도 감소가 나타난 반면에 0.03%의 경우(Fig. 2 B)



**Fig. 2.** Conductivity variation curves with time since formation fluid(distilled water) began to flow into hole fluid. The NaCl concentrations and flow rates are 0.01% and 11.92 g/min (A), 0.03% and 13.96 g/min (B), 0.05% and 14.28g/min (C), and 0.08% and 13.72g/min (D), respectively. Temperatures of hole fluid and formation fluid were held constant without temperature difference between the two. Arrows show the location of incoming and outgoing fluid

에는 625  $\mu\text{S/cm}$ 에서 510  $\mu\text{S/cm}$ 로 115  $\mu\text{S/cm}$ 의 감소, 0.05%의 경우(Fig. 2 C)에는 1030  $\mu\text{S/cm}$ 에서 860  $\mu\text{S/cm}$ 로 170  $\mu\text{S/cm}$ 의 감소, 0.08%의 경우(Fig. 2 D)에는 1620  $\mu\text{S/cm}$ 에서 1370  $\mu\text{S/cm}$ 로 250  $\mu\text{S/cm}$ 의 감소 폭이 나타났다. 이와 같은 전기 전도도 감소 폭은 대체로 초기 전기전도도의 15%에 해당되는 값으로서, 결과적으로 지층수의 유입에 의하여 생성된 이상대의 크기는 사용된 공내수의 농도에 비례하여 커지고 있음이 확인되었다.

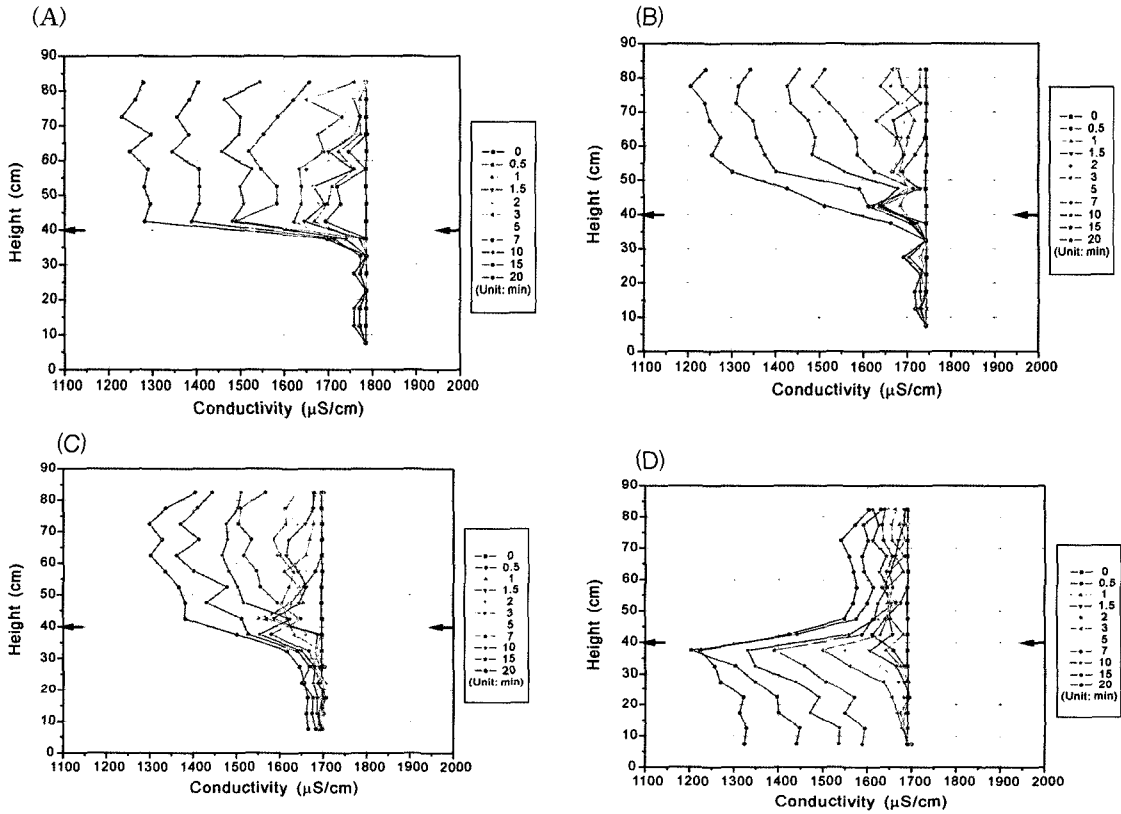
또 하나의 현상은 공내수의 농도가 커짐에 따라 지층수와와의 밀도차에 의하여 유입된 지층수가 급격히 상승하는 경향이다. 이 상승 경향은 복수의 대수층 모델에서 각 대수층 확인의 장애요인으로 예상되는 것으로 별도의 밀도차 저하 방안이 요구되고 있음을 보인다. 따라서 전기전도도 감소를

효과적으로 탐지할 수 있는 적절한 농도차 결정과, 적용되는 농도차에 따른 잉여 밀도차를 보상에 줄 수 있는 지층수와 공내수 간의 적절한 온도차를 결정해 주어야 할 필요성이 제기되었다.

#### 온도차 조절과 전기전도도 곡선

온도차에 따른 전기전도도 곡선의 변화 양상은 0.05%와 0.1%의 두 가지 NaCl 수용액을 공내수로 사용한 실험으로 이루어졌다. 유입구와 유출구의 위치는 모두 40cm 지점에 고정된 가운데 측정이 이루어졌다. 0.05%의 공내수를 사용하는 경우에는 지층수를 0  $^{\circ}\text{C}$ , 2.2  $^{\circ}\text{C}$ , 3.4  $^{\circ}\text{C}$ , 5  $^{\circ}\text{C}$  그리고 6.5  $^{\circ}\text{C}$  낮게 설정하여 실험한 반면에 0.1% NaCl Solution의 경우에는 0.3  $^{\circ}\text{C}$ , 1.8  $^{\circ}\text{C}$ , 4.1  $^{\circ}\text{C}$ , 5.8  $^{\circ}\text{C}$  그리고 8.3  $^{\circ}\text{C}$ 로서, 온도 강하의 폭을 크게 하

공내수 전기전도도의 자동측정시스템 구축을 위한 실험



**Fig. 3.** Temperature effect on conductivity variation curves with time since formation fluid began to flow into hole fluid of 0.1% NaCl solution. A: Temperatures of hole fluid and formation fluid were held constant at 20.9 °C and 21.2 °C, respectively( $\Delta T=0.3$  °C). Flow rate was 40.28 g/min. B: Temperatures of hole fluid and formation fluid were held constant at 19.4 °C and 17.6 °C, respectively( $\Delta T=1.8$  °C). Flow rate was 39.14 g/min. C: Temperatures of hole fluid and formation fluid were held constant at 19.4 °C and 15.3 °C, respectively( $\Delta T=4.1$  °C). Flow rate was 38.71 g/min. D: Temperatures of hole fluid and formation fluid were held constant at 19.4 °C and 13.6 °C, respectively( $\Delta T=5.8$  °C). Flow rate was 33.21 g/min.

여 측정이 이루어졌다.

Fig. 3은 0.1%의 NaCl 용액을 공내수로 하여 온도차에 따른 전기전도도 곡선의 변화상태를 제시하였다. 0.3 °C의 온도차가 있는 상태에서 실시된 실험에서는(A) 유입 및 유출구인 40cm 지점 위쪽에서의 급격한 전기전도도 감소경향이 특징적으로 나타났다. 이는 시간의 경과에 따라 지층수가 급격히 상향하면서 상부 쪽에서의 NaCl 수용액이 지속적으로 희석됨을 의미한다. 1.8 °C 차를 설정한 실험(B)과 4.1 °C 차를 설정한 실험(C)에서도 이 상향 경향이 지속되고 있다. 그러나,

4.1 °C 차를 설정한 실험에서는 측정 초기에 있어서 전기전도도 감소커브가 유입구 부근에 형성되었으나 시간이 흐름에 따라 앞선 실험에서와 마찬가지로 상향하는 경향으로 바뀌고 있다. 이는 낮은 온도의 지층수 유입에 의하여 지층수와 공내수간의 온도 차이가 감소함에 따른 결과로 해석될 수 있다. 5.8 °C 차를 설정한 실험(D)에서는 하향하는 양상의 전기전도도의 감소가 나타났다. 여기에 제시되지는 않았으나 8.3 °C 차를 설정한 실험에서는 하향하는 양상이 더욱 뚜렷하게 얻어졌다. 여기에 제시되지는 않았지만 0.05% NaCl

수용액을 이용하는 경우에는 지층수와 공내수 간의 온도차가 2.8 °C를 경계로 상향과 하향이 바뀌는 것으로 나타났다(임헌태, 2003).

이러한 실험의 결과는 온도에 따른 밀도 증가 경향을 측정된 Johnson 외(1991)의 실험결과와 대체로 일치하고 있다. 즉, 20 °C에서 0.9982 g/ml인 1차 증류수를 0.05% NaCl Solution으로 만들기 위한 염의 첨가는 결과적으로 0.9987 g/ml의 밀도값으로 나타나는데, 이는 2.6 °C 낮은 온도(17.4 °C)에서의 증류수 밀도에 해당되어 실험결과와 비교적 잘 일치함을 보였다. 0.1% NaCl Solution인 경우에 Johnson 외(1991)에 의거한 동일밀도 값이 온도차 5.7 °C에 해당되고 있다. 이는 Fig. 3에서 유입구 및 유출구 부근에서 상부와 하부로 균일하게 교란을 유발시켜, 피크를 잘 나타나게 하기 위한 조건이, 지층수와 공내수 간의 온도차가 4.1 °C와 5.8°C의 사이에 해당되는 사실과 부합하고 있다.

전기전도도 감소 효과를 관찰하는 측면에서 본다면 0.05% 보다 0.1%의 수용액이 효과적이라고 할 수 있다. 농도가 클수록 뚜렷한 피크를 관찰하기 위해서는 온도차를 크게 유지해야 하는 부담이 커지며 지층수의 온도가 공내수의 온도보다 약 5 °C 이상 저하시켜야 하는 조건은 쉽지 않다. 따라서, 가능한 온도차 유지 조건을 감안한 NaCl 수용액의 효과적인 농도 결정이 요구된다.

유입량 조절과 전기전도도 곡선

Fig. 4에서 Fig. 9까지는 공내수 NaCl 농도를 0.05%로 하고 유입구와 유출구를 40cm 지점에 고정된 상태에서 유입량을 변화시키면서 그 변화에 따른 전기전도도 반응을 관찰한 결과이다. 유입량을 2.99 g/min로 설정한 경우(Fig. 4)에는 전기전도도 변화 양상이 거의 나타나지 않았으며 유입량을 7.91 g/min 설정하였을 때 얻어진 전기전도도 곡선(Fig. 5)에서 40cm 지점 및 그 상부구간에 작은 규모의 피크가 관찰되고 있음을 보인다. 따라서 3-7 g/min 값의 범위는 전기전도도의 변화 양상을 관찰할 수 있는 유입량의 한계일 것으로 판단된다.

이 실험은 앞에서 설명된 온도차에 따른 전기전도도 곡선 관찰 실험결과에 의거하여 제시된 2.8

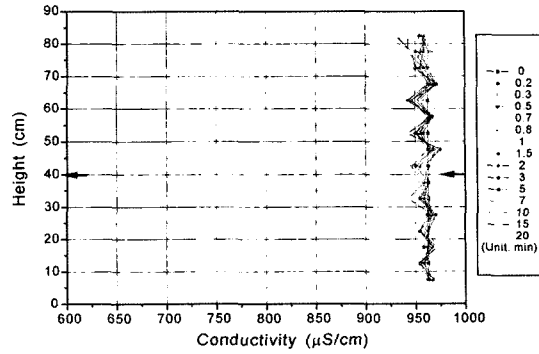


Fig. 4. Conductivity variation curves obtained with the flow rate of 2.99 g/min and 0.05% NaCl solution was used for hole fluid, The temperatures of hole fluid and formation fluid were held at 19.1 °C and 16.4 °C, respectively( $\Delta T=2.7$  °C). Arrows show the location of incoming and outgoing fluid.

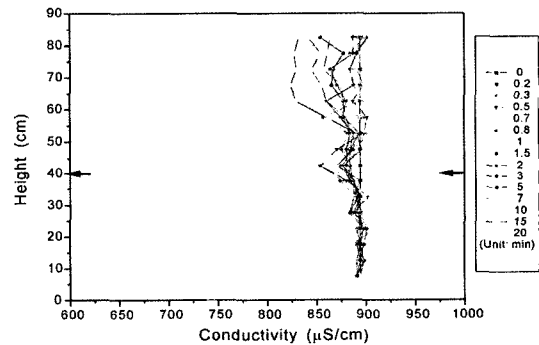


Fig. 5. Conductivity variation curves obtained with the flow rate of 7.91 g/min and 0.05% NaCl solution was used for hole fluid. The temperatures of hole fluid and formation fluid were held at 19.1 °C and 16.4 °C, respectively( $\Delta T=2.7$  °C). Arrows show the location of incoming and outgoing fluid.

°C 내외의 온도차가 주어진 상태에서 이루어졌으므로 초기 유입에 의한 전기전도도 감소 양상이 40cm 지점을 기준으로 상부와 하부가 비교적 대칭 구조를 가진 피크를 형성하고 있다. 그러나 시간이 지나감에 따라서 전도도곡선이 점차 상향, 발산하는 양상을 나타내고 있다. 이는 상대적으로 고온인 공내수에 의하여 유입된 지층수의 온도가

서서히 상승하여 나타난 현상으로 추정할 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 유입량을 각기 15.12 g/min 과 25.16 g/min으로 설정하여 측정된 것으로 유입량 증가에 따라 피크값의 크기가 증대하는 경향이 뚜렷하다. 시간 경과에 따른 상향 발산 현상도 함께 관찰되고 있다. 그러나 유입량이 증가함에 따라 상향, 발산하는 현상이 감소하면서 오히려 하향하는 경향이 관찰되고 있으며 이러한 현상은 유입량이 34.67 g/min에서 상향, 발산이 거의 제거된 형태의 전기전도도 분포로 나타나고 있음(Fig. 8)에서 확인될 수 있으며, 유입량이 51.82 g/min로 증대된 경우(Fig. 9)에는 본격적인 하향, 발산현상이 관찰되고 있다. 유량 증대에 따른 상향발산 현상의 억제, 또는 일부 하향발산 경향의 증대는 여기에 제시되지 못한 다른 실험에서도 공통적으로 나타난 현상이다.

이와 같은 지층수 흐름의 상하 역전은 유입량이 작은 경우, 상대적으로 낮은 온도이며 낮은 농도의 지층수가 상대적으로 높은 온도인 공내수에 의한 온도 상승으로 상향하는 현상을 보이나, 유입량이 많아짐에 따라 유입수의 온도상승이 미미하게 되어 상승하는 지층수의 흐름이 차단되는 현상으로 설명할 수 있다. 저농도 지층수의 상향 흐름의 차단에서 지층수의 하향이동으로의 발전은 이 실험에서 적용된 온도차 2.8°C가 Johnson 의 (1991)의 실험에서의 동일밀도 조건으로 제시된 2.6°C에 비하여 약간 크게 설정되었음과 관계가 있을 것으로 보인다. 즉 2.8°C 낮은 온도의 중류수인 지층수는 0.05% NaCl 수용액인 공내수에 대하여 약간 하향이동 할 성질을 가지고 있음에다 유입량이 많아짐에 따라 상향이동의 흐름이 차단됨으로 하향이동으로 나타난 것으로 설명될 수 있다. 당연히 하향발산의 정도는 상향발산에 비하여 정도가 약할 것으로 예상할 수 있으며 실제 관측결과가 이를 지지하고 있다. 이러한 관점에서 동일밀도 조건보다도 온도차를 크게 하는 것이 뚜렷한 피크를 얻기에 유리할 것으로 예상된다.

유입-유출구의 위치와 전기전도도 곡선

시추공 환경에서 일반적으로 많이 예상되는 흐름, 즉 지층수의 유입과 유출의 위치가 상이한 경

우에 나타날 수 있는 전기전도도곡선의 변화양상을 살피기 위하여 모형시추공의 20cm, 40cm, 60cm 지점에 유입구 또는 유출구를 마련하고 각 유입구와 유출구의 위치 조합에 따른 전기전도도 곡선의 변화를 추적하였다.

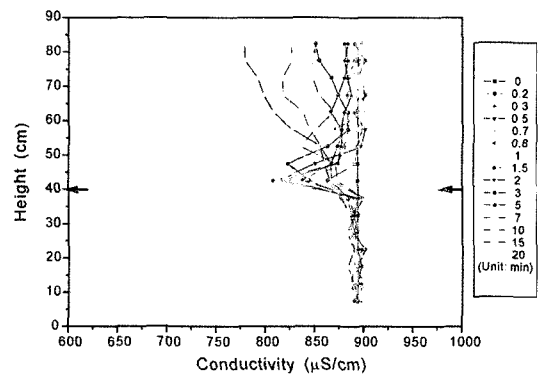


Fig. 6. Conductivity variation curves obtained with the flow rate of 15.12 g/min and 0.05% NaCl solution was used for hole fluid. The temperatures of hole fluid and formation fluid were held at 19.2 °C and 16.4 °C, respectively( $\Delta T=2.8$  °C). Arrows show the location of incoming and outgoing fluid.

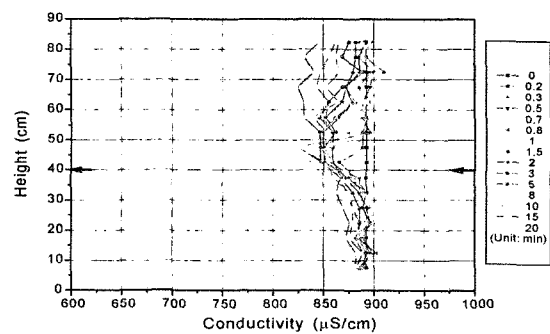
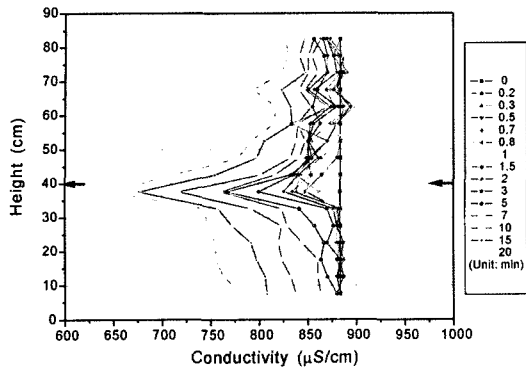
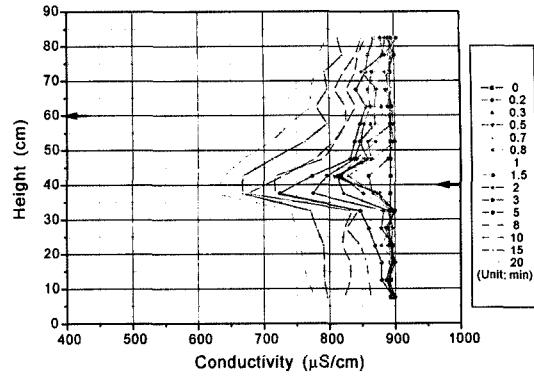


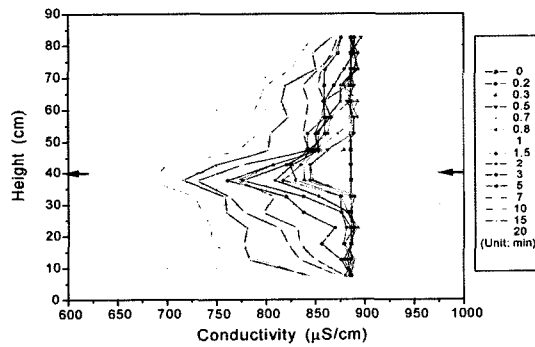
Fig. 7. Conductivity variation curves obtained with the flow rate of 25.16 g/min and 0.05% NaCl solution was used for hole fluid. The temperatures of hole fluid and formation fluid were held at 19.1 °C and 16.3 °C, respectively( $\Delta T=2.8$  °C). Arrows show the location of incoming and outgoing fluid.



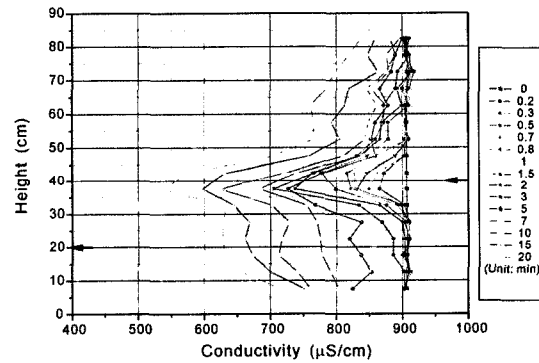
**Fig. 8.** Conductivity variation curves obtained with the flow rate of 34.67 g/min and 0.05% NaCl solution was used for hole fluid. The temperatures of hole fluid and formation fluid were held at 19.2 °C and 16.3 °C, respectively( $\Delta T=2.9$  °C). Arrows show the location of incoming and outgoing fluid.



**Fig. 10.** Conductivity variation curves obtained by inflow at 40cm and outflow at 60cm. 0.05% NaCl solution was used for hole fluid and the flow rate was 37.17 g/min. The temperatures of hole fluid and formation fluid were held at 19.8 °C and 17.1 °C, respectively( $\Delta T=2.7$  °C).



**Fig. 9.** Conductivity variation curves obtained with the flow rate of 51.82 g/min and 0.05% NaCl solution was used for hole fluid. The temperatures of hole fluid and formation fluid were held at 19.2 °C and 16.4 °C, respectively( $\Delta T=2.8$  °C). Arrows show the location of incoming and outgoing fluid.



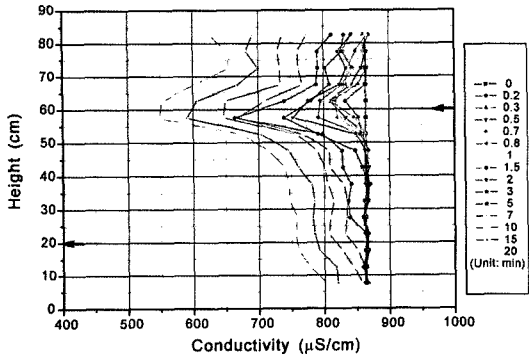
**Fig. 11.** Conductivity variation curves obtained by inflow at 40cm and outflow at 20cm. 0.05% NaCl solution was used for hole fluid and the flow rate was 45.36 g/min. The temperatures of hole fluid and formation fluid were held at 20.5 °C and 17.7 °C, respectively( $\Delta T=2.8$  °C).

Fig. 10은 유입구를 40cm 지점, 유출구를 60cm 지점에 위치시키고 유입량 37.17 g/min의 상태에서 실험한 결과이다. 전기전도도 곡선은 피크에서 대체로 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 감소로 나타났으며, 피크의 위치는 유입구의 위치와 일치되고 있는 반면에 유출구의 위치와는 관계없는 것으로 나타나고 있다. Fig. 11은 유입구를 40cm 지점으로 하고, 유출구를 20cm 지점으로 설정하여 실험한 것이다.

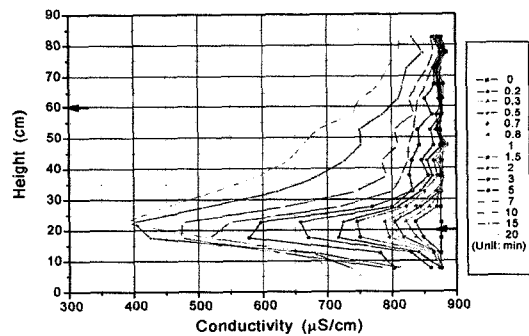
유입량을 45.36 g/min로 한 상태에서 얻어진 것이며 Fig. 10에서와 마찬가지로 유입구가 존재하는 40cm의 위치에 피크가 형성되는 반면에 유출구 부근에서의 전기전도도 변화는 미미하게 나타나고 있다. 이러한 변화는 유입구를 60cm 지점, 유출구 20cm 지점에 두고(유입량 39.89 g/min) 실험한 것(Fig. 12)이나, 반대로 유입구 20cm 지점, 유출구 60cm 지점(유입량 46.64 g/min)에 두고



공내수 전기전도도의 자동측정시스템 구축을 위한 실험



**Fig. 12.** Conductivity variation curves obtained by inflow at 60cm and outflow at 20cm. 0.05% NaCl solution was used for hole fluid and the flow rate was 39.89 g/min. The temperatures of hole fluid and formation fluid were held at 18.3 °C and 15.4 °C, respectively( $\Delta T=2.9$  °C).



**Fig. 13.** Conductivity variation curves obtained by inflow at 20cm and outflow at 60cm. 0.05% NaCl solution was used for hole fluid and the flow rate was 46.64 g/min. The temperatures of hole fluid and formation fluid were held at 18.9 °C and 16.1 °C, respectively( $\Delta T=2.8$  °C).

실험한 경우(Fig. 13) 모두 전기전도도 곡선의 피크는 유입구 부근에서 형성되고 있음을 보인다.

따라서 유입구 부근에 피크가 형성되는 점만으로 본다면 유입구와 유출구가 동일한 심도에 위치한 경우와 큰 차이를 보이지 않는 듯이 나타난다. 그러나 자세히 관찰하면 유입구와 유출구가 동일한 심도에 위치한 경우에 비하여 이 경우는 피크가 유입구에서 유출구에 이르기까지 비교적 완만한 경사를 가지는 전기전도도 곡선의 형태를 보임을 알 수 있다. 이것은 지층수와 공내수의 온

도 차이가 2.7 및 2.9°C로서 비슷한 온도조건을 가지고 있으며 유량 조건도 34 g/min과 37 g/min으로 거의 동일한 조건에서 이루어진 Fig. 8과 Fig. 10을 비교함으로써 그 차이를 알 수 있다. 즉 유입구와 유출구의 위치가 다른 경우(Fig. 10), 20분 경과시의 유입구와 유출구의 위치인 40cm, 60 cm에서의 전기전도도가 각기 630  $\mu\text{S/cm}$ 와 760  $\mu\text{S/cm}$ 의 피크 (130  $\mu\text{S/cm}$ 의 차)를 보이는데 비하여 유입구와 유출구의 위치가 동일한 경우(Fig. 8)에는, 40cm, 60 cm에서의 20분 경과시의 전기전도도가 각기 650  $\mu\text{S/cm}$ 와 820  $\mu\text{S/cm}$ 로서 보다 뚜렷한 피크(170 $\mu\text{S/cm}$ 의 차)를 보이는 것으로 나타난다.

결론

모형시추공을 이용하여 농도를 달리하는 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 유입량과 유출량을 일정하게 유지한 상태에서 전기전도도를 측정하는 방식으로 이루어졌다. 관찰의 주대상은 공내수와 지층수 사이의 농도차, 온도차, 유량 및 유입 유출구의 위치에 따른 공내에서의 전기전도도 변화 양상에 있었다.

지층수와 공내수의 농도차에 의한 영향은 지층수의 유입에 의하여 생성된 이상대의 크기가 사용된 공내수의 농도에 비례하는 것으로 확인되었으며 아울러 공내수의 농도가 커짐에 따른 지층수와의 밀도차 증대로 유입된 지층수가 상승하는 경향을 보인다. 이 상승 경향은 복수의 대수층 모델에서 각 대수층을 확인하기에 장애가 되는 요인으로 나타나므로 별도의 밀도차 저하 방안이 요구되고 있다. 이를 위하여 지층수와 공내수 간에 온도차를 부여함으로써 농도차에 따른 잉여 밀도차를 보상해 주는 실험이 수행되었으며 농도별로 적정 온도차의 범위가 제시되었다.

지층수 유입량의 영향은 유량이 많을수록 피크 값의 크기가 증대하는 경향이 뚜렷하며 농도별

관측한계 값이 구해졌다. 피크 형성을 위한 온도 조절이 수행된 상태에서도 유량이 작은 경우에는 시간경과에 따른 상향발산 현상이 관찰되었으며, 유입량이 증가함에 따라서는 오히려 하향하는 경향이 관찰되었다. 그러나 하향발산의 정도가 미약하기 때문에 유량증가가 관측을 용이하게 하는 또 하나의 요인이 되는 것으로 나타났다. 유입구와 유출구의 위치를 달리한 경우에 비저항 곡선은 유입구 부근에 피크가 형성되어 유입 유출구가 동일한 심도에 위치한 경우와 외전상 비슷한 형태를 보이거나 피크의 경사 또는 규모에서 뚜렷이 구분되는 것으로 나타났다.

## 사 사

이 연구는 한국과학재단의 지원과제(우수과학자 지원연구과제, 과제번호: R05-2002-000-01321-0)에 의한 실험과 연구로 완성되었음을 밝히며 연구비 지원에 감사드린다. 실험을 도와준 강원대학교 지구물리학과 김지훈군과 박수현군에게도 사의를 표한다.

## 참 고 문 헌

김영화, 임헌태, 2003, 시추공 수리전도도 상수를 결정하기 위한 전기전도도검층 기법을 이용한 예비모형실험, 지하수토양환경, 제8권, 제1호, p. 48-56.

임헌태, 2003, 수리전도도결정을 위한 시추공 전기전도도모형연구, 강원대학교 이학석사학위논문, 61p.

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, p. 16.

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, p. GG 1-11.

Coates, G.R., and Dumanoir, J.L., 1974, "A new approach to improved log-derived permeability", Log Analyst, v. 15, n. 1, p. 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, p. B265-B269. 14.

Denicol, P., Petrobrs, S.A., and Jing, X., 1996, "Estimating permeability of reservoir rocks from complex resistivity data", Society of Professional Well Log Analysts Annual Logging Symposium, 37th, New Orleans. La, Transactions, pp. XX1-XX11.

Dziuba, T., 1996, "Improved permeability prediction in carbonates", Society of Professional Well Log Analysts Annual Logging Symposium, 37th, Transactions, p. H 1-13.

Gaur, R.S., and Singh, Inderjit, 1965, "Relationship between permeability and gamma ray intensity for the Oligocene sand of the Indian field", Oil and Natural Gas Commission of Indian Bulletin, v. 2, n. 1, p. 74-77.

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 n. 48, p. 297-302.

Johnson J. W., Oelkers, E. H., and Helgeson, H. C., 1991, SUPCRT92: A software for calculationg the molal thermodynamic properties of minerals, gases, aqueous species, and reactions from 1 to 5000 bars and 0 to 100°C, Univ. Californian, Berkley, USA.

Loew S., Tsang C.F., Hale F.V., Hufschmied P., 2000, "The Application of Moment

공내수 전기전도도의 자동측정시스템 구축을 위한 실험

Methods to the Analysis of Fluid Electrical Conductivity Logs in Boreholes", Nagra-Doe Cooperative Project Report, Earth Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, p.1-44.

Paillet, F.L., 1988, "Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fracture formations". Water Resources Research, v. 34, n. 5, p. 997-1010.

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, v. 25, n. 1, p. 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, p.14.

Tang et al, 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, p. 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, p. 1-21.

김영화  
강원대학교 지구물리학과  
200-701 강원도 춘천시 효자동 강원대학교 지구물리학과  
Tel: 033-250-8582  
Fax: 033-244-8580  
Email: yhkim@kangwon.ac.kr

박정빈  
강원대학교 지구물리학과  
200-701 강원도 춘천시 효자동 강원대학교 지구물리학과  
Tel: 018-242-8594  
Fax: 033-244-8580  
Email: soldex@kwnu.kangwon.ac.kr

임헌태  
강원대학교 지구물리학과  
200-701 강원도 춘천시 효자동 강원대학교 지구물리학과  
Tel: 016-428-1347  
Fax: 033-244-8580  
Email: logging92@yahoo.co.kr

투 고 일 2003년 6월 10일  
심 사 일 2003년 6월 11일  
심사완료일 2003년 7월 19일