

시추공 수리전도도 상수를 결정하기 위한 전기전도도검증 기법을 이용한 예비모형실험

김영화* · 임현태

강원대학교 지구물리학과

A Preliminary Conductivity Model Experiment for Determining Hydraulic Constants in Physical Model Borehole

Yeonghwa Kim* · Huntae Lim

Dept. of Geophysics, Kangwon National University

ABSTRACT

A geophysical conductivity logging technique has been adopted to determine hydraulic constants using a simplified physical model that depicts the borehole condition. An experiment has been made by monitoring the conductivity change within the model hole using borehole environment water and incoming-outgoing water of different salinity, under the state of constant flow rate by maintaining balance between inflow and outflow. Conductivity variation features were observed that depended on flow rate, salinity contrasts between fluid within the hole and incoming-outgoing fluid, and density contrasts between fluid conductivity within the hole and incoming fluid. The results of the experiment show the uniform change of fluid conductivity within the hole with time, a fairly good correlation between the flow rate and the conductivity change rate. The geophysical conductivity logging technique can be an efficient tool for determining hydraulic constants if the model equation is verified by henceforward experiments.

Key words : electric conductivity, hydraulic constant, borehole, model experiment

요약문

간단한 모형시추공을 이용한 전기전도도 측정실험을 실시하고 이로부터 시추공에서의 수리상수 결정에 관련된 제반 기초 환경을 검증하고 실험에 의한 모델방정식을 유도하였다. 실험은 상대적으로 높은 염도를 공내수로 하고 종류수를 지하수를 사용하여, 지하수의 유입과 유출되는 유량을 일정하게 유지한 상태에서 전기전도도를 측정하는 것으로 이루어졌다. 관찰의 주 대상은 지하수의 유량, 공내수와 지하수 사이의 염도차 및 밀도차에 따른 공내에서의 전기전도도 변화 양상에 있었다. 실험결과, 공내에서의 시간에 따른 전기전도도 변화가 매우 일정한 양상으로 나타남을 보였으며, 유량과 전기전도도 변화 사이에 양호한 상관관계가 얻어졌다. 이 결과는 향후 추가될 일반적인 수리상수와 검증수리 상수들의 비교연구로 모델방정식에 대한 검증이 이루어진다면, 희석모델에 근거한 전기전도도검증 기법이 수리 상수 결정을 위한 효과적인 방법이 될 수 있음을 보여 주었다.

주제어 : 전기전도도, 수리상수, 시추공, 모형실험

1. 서 론

시추공 환경에서 대수층의 분포와 그 수리학적인 특성을 규명하는 일은 지하수, 석유, 환경 문제를 해결하는 데

있어서 매우 중요하다. 지금까지 많은 연구자들에 의해 대수층에서의 수리전도도를 구하기 위한 방법들이¹⁻⁵⁾ 제시되어 왔다. 일반적으로 지구물리학적 방법은 수리전도도 유도란 측면에서는 불리한 조건을 가진다. 동일한 물성반

*Corresponding author : swchang@kyonggi.ac.kr

원고접수일 : 2003. 1. 22 계재승인일 : 2003. 3. 3

응을 이용하는 지구물리검증 또한 불리한 조건일 수밖에 없지만 표준화되고 해상도 높은 자료를 얻을 수 있으며, 특히 시추공 속의 다른 수리학적 자료들과 직접 자주 접한다는 점에서 대수층의 수리상수를 결정하는 잠재적인 방법의 하나로 주목을 받아왔다. 실제로 전기비저항, 자연전위, 음파, 자연감마, 감마감마, NMR, 유체 검증 등, 다양한 종류의 검증기법들이⁶⁻⁸⁾ 이러한 목적으로 적용되어 왔다.

수리전도도와 연관된 물리검증 연구의 많은 부분은 공극률과 수리전도도⁹⁻¹¹⁾ 사이의 관계에 기초를 둔 간접적인 방법이라고 할 수 있으며 지층계수(Formation Factor)를 중심으로 한 이 분야 연구의 역사는 길고 그 기반은 넓다. 반면에 텔레뷰어¹²⁾와 NMR¹³⁻¹⁴⁾ 및 음파검증 특히 tube 파¹⁵⁻¹⁶⁾를 이용한 투수성 연구들은 비교적 최근에 시도되고 있는 대표적인 접근방법들이다. 전기전도도검증, 유속검증, 온도검증 등 소위 유체검증으로 불리는 검증들은 유체의 흐름이 그대로 반영되며 수리전도도를 측정하는 직접적인 계측방법이라는 측면에서 주목의 대상이 되고 있으며 특히, 유속검증은 최근에 측정장비의 개선에 의하여 그 적용 가능성이 점차 높아지고 있다¹⁷⁾.

전기전도도 검증기법은 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 있다. 대수층의 수리 상수를 결정하는데 있어서 전기전도도검증 기법의 이용은 희석방법(Dilution Method)으로부터 그 유래를 찾을 수 있지만⁵⁾, 대수층의 수리상수 결정을 위한 정량적 접근은 Tsang 등에 의하여 이루어졌다¹⁸⁻¹⁹⁾. 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 공내수를 고염도로 한 일종의 희석모델의 적용을 시도하였는데 이는 시추이수에 약간의 NaCl 첨가만으로도 이온농도에서 지하수와 현저히 대비되는 공내수 조건이 충족될 수 있다는 점에서 유리하다. 여기에서는 예비연구의 차원에서, 수리조건이 알려져 있는 단순 모형실험을 이용하여 대수층의 수리상수 결정을 위한 전기전도도 측정의 기본적인 조건과, 가능성 내지 한계를 찾는데 초점을 맞추었다.

2. 전기전도도 결정 원리

양끝에 고정된 두 개의 판전극으로부터 전류를 보내고 그 내부에 위치한 임의의 두 전위전극에서의 전위를 측정 하므로써 저항과 비저항을 구하고 궁극적으로 전기전도도를 얻는 방법을 차택하였다. 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(ρ) 사이의 관계는 다음과 같다²⁰⁾.

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

이를 다수의 전위전극 조합이 직렬로 연결된 다수의 전극 조합인 상태로 확장시키면 다음 식으로 표현 할 수 있다.

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

이를 단면적이 일정하고, 동일한 비저항의 유체를 사용한 실험 모형공 조건(ρ , S 은 상수)에 적용하면,

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

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

이 방정식은 정밀하게 만들어지지 못한 전극 배치, 즉 전극간격 및 전극 형태에서 수반되는 오차를 무시하고 사용된 유체의 비저항을 구할 수 있게 한다. 일단 유체 비저항이 얻어지면, 이번에는 기존의 저항-비저항 관계로부터 각 전극에서의 전극배치계수($F(i)$)를 구할 수 있다.

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

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(σ)이 구해진다.

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

3. 측정장치 및 방법

앞서 소개된 측정원리에 입각하여 시추공으로 유체(이하 지하수)가 유입, 유출되는 것을 모형화한 모형시추공과 모형시추공 내에 들어있는 유체(이하 공내수)의 전기

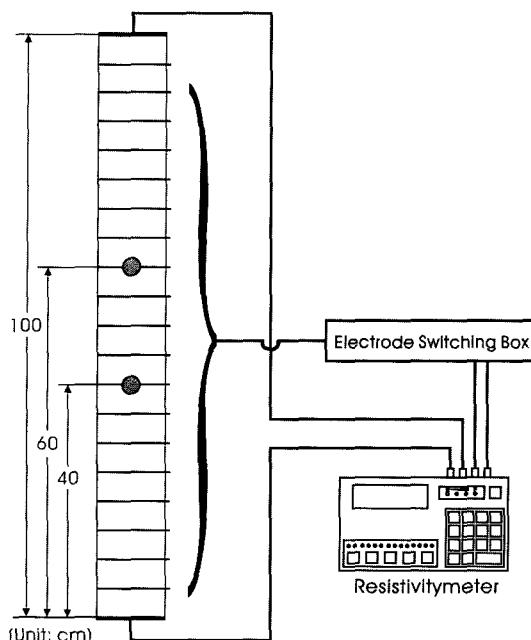


Fig. 1. Schematic diagram of apparatus setup for conductivity measurement.

전도도 측정장치 및 유출수의 유체특성 특성 측정장치로 구성되어 있다(Fig. 1). 모형 시추공은 투명한 원통의 플라스틱 관과 유입수와 유출수의 양을 조절하기 위한 장치로 구성된다. 투명 플라스틱 관은 높이가 약 1.1 m이며 직경이 6.3 cm인 것을 주로 사용하였다. 지하수의 공급은 10리터 부피의 1차 증류수 통과 타이콘 튜브, 테프론 콕(cock)을 이용하여 이루어졌으며 수두 조절에 의하여 시추공에서의 유입되고 유출되는 물(이하 유입수와 유출수)의 양을 동일하게 유지하게 하였다.

공내수의 전기전도도의 측정을 위하여 플라스틱 관의 매 5 cm 마다 20개의 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. 전극교환 장치는 수동식교환장치(Fig. 1)와 National Instrument사의 CB-68LP 터미널 블록을 이용한 Labview 시스템을 함께 사용하였으며 여기에서 자료의 많은 부분은 수동식전극교환장치를 통하여 이루어졌다. 유출수의 전기전도도, 밀도 및 수량을 측정하고 비교하기 위해, 휴대용 전기전도도계와, 상명저울 등이 사용되었다. 전기전도도는 비저항과의 역수 관계에 의하여 얻어졌다.

실험의 핵심은 시추공 안으로 지하수가 들어올 때, 시

간에 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 밀도 차는 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%로 구성되는 4가지 종류의 염화나트륨 용액을 사용하였고, 지하수로는 공통적으로 0%의 염화나트륨 용액에 균일하는 증류수가 사용되었다. 그 중에서도 염도 이외의 효과 비교를 목적으로 제시된 모든 자료들은 0.05% 염화나트륨 용액을 공내수로 하여 얻어진 것이다.

4. 전극배치계수와 균질 공내수의 전기전도도곡선

이 실험에서 두 개의 전극으로부터 전류를 보내고 그 내부에 위치한 두 전극으로부터 전위를 측정하여, 저항과 비저항을 구하고 궁극적으로 전기전도도를 얻는 방법을 채택하였으므로 연구의 첫 단계는 제작된 각 전극 배치조합에 대한 배치계수(F)를 결정하는 일이다. 이를 위하여 염도를 달리하는 4가지 종류의 염화나트륨 수용액을 공내수로 사용하여 지하수의 유입이 없는 상태에서의 배경측정 실험을 실시하였다. 위에서의 식 (4)에 의하여 사용된 공내수의 비저항을 구하고, 이 비저항 값과 각 전극배치에서 얻어진 저항 값을 사용한 식 (5)의 적용에 의하여 계

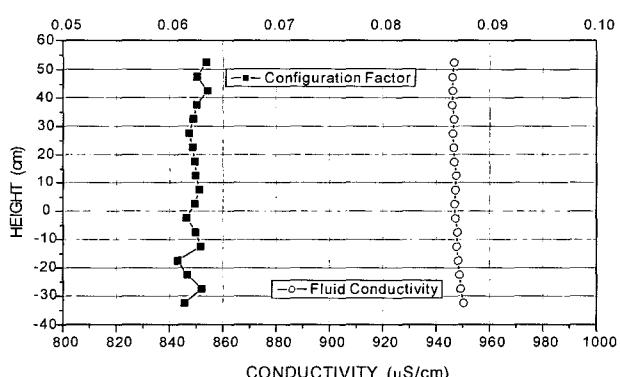


Fig. 2. Electrode configuration factors obtained for every potential electrode pair and conductivity of non-flowing fluid deduced from the configuration factors.

작된 각 전극 배치조합에 대한 배치계수(F)를 결정하였다.

Fig. 2는 이러한 과정을 거쳐 얻어진 모든 전위 전극쌍에 대한 전극배치계수를 보여주고 있다. 배치 계수들은 4회 중복 측정하여 얻어진 값의 평균값을 사용하였다. 측정장치 제작과정에서 전극간격을 동일하게 배치하도록 한 노력에 비하여 각 전극 쌍에서의 배치계수의 변화는 상당히 큰 것으로 나타나고 있다. 농도를 균일하게 유지한 상태에서 측정되고 유도된 각 높이별 전기전도도 값의 분포는 어느 경우이나 동일한 값으로 수렴함을 보였으며 Fig. 2에서 제시된 바와 같이 하부로 갈수록 극히 미약한 전도도의 일률적인 상승만을 보이고 있어 이것으로 안정적인 공내수 전기전도도 측정이 가능함이 검증되었다.

5. 측정조건에 따른 전기전도도곡선의 변화특성

먼저 지하수와 공내수의 농도 차이가 주는 영향을 알아내기 위해 공내수로 0.01%, 0.03%, 0.05%, 0.08% 농도의 NaCl 수용액을 사용하고, 그 속에 1차 종류수인 지하수를 흘러보내면서 전기전도도의 변화양상을 관찰하였다. 이 실험에서는 유입부와 유출부의 위치는 0 지점에 있으며, 지하수와 공내수의 온도는 동일하게 유지한 상태에서 측정이 이루어졌다. 지하수 유입량은 실험마다 약간의 차이가 있으나 12-14 g/min의 범위 내에서 일정하게 유지되도록 노력하였다.

Fig. 3에서 Fig. 6까지의 그래프는 그 측정 결과를 제시한 것으로 우선 비전해질 지하수가 전해질용액의 공내수 속으로 유입됨에 따른 전기전도도 감소 경향이 잘 나

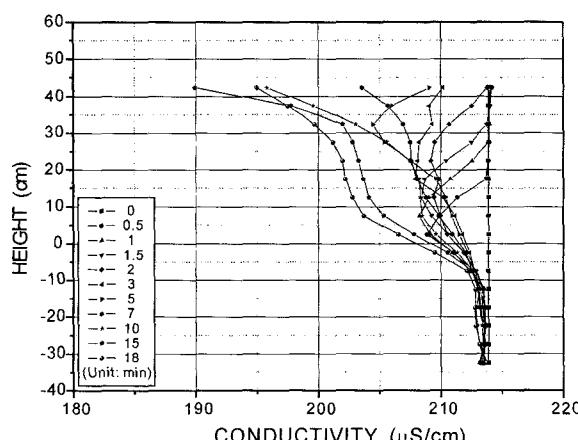


Fig. 3. Conductivity variation curves with time since formation fluid began to flow into hole fluid of 0.01% NaCl solution. Flow rate was 11.9 g/min. Temperatures of hole fluid and formation fluid were held constant without temperature difference between the two. Zero height shows the location of incoming and outgoing fluid.

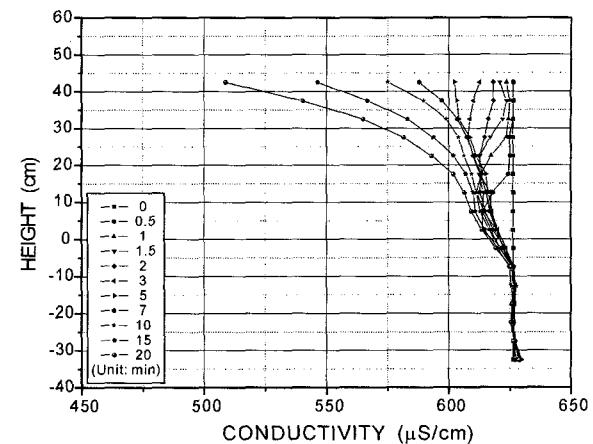


Fig. 4. Conductivity variation curves with time since formation fluid began to flow into hole fluid of 0.03% NaCl solution. Flow rate was 14.0 g/min. Temperatures of hole fluid and formation fluid were held constant without temperature difference between the two. Zero height shows the location of incoming and outgoing fluid.

타나고 있다. 약 20분간의 주입에 의하여 0.01%의 경우에는 214 $\mu\text{S}/\text{cm}$에서 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$으로 최대 24 $\mu\text{S}/\text{cm}$의 전기전도도 감소가 나타난다(Fig. 3). 0.03%의 경우에는 625 $\mu\text{S}/\text{cm}$에서 510 $\mu\text{S}/\text{cm}$로 115 $\mu\text{S}/\text{cm}$의 감소(Fig. 4), 0.05%의 경우에는 1030 $\mu\text{S}/\text{cm}$에서 860 $\mu\text{S}/\text{cm}$로 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$의 감소(Fig. 5), 0.08%의 경우에는 1620 $\mu\text{S}/\text{cm}$에서 1370 $\mu\text{S}/\text{cm}$로 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$의 감소 폭이 나타났다(Fig. 6). 이와 같은 전기전도도 감소 폭은 유량에 따라 차이가 있으나 주어진 조건에서 15% 내외의 감소 폭에 해당되고 있다. 따라서 지하수에 의한 전기전도도 감소 효과는 예상된 바

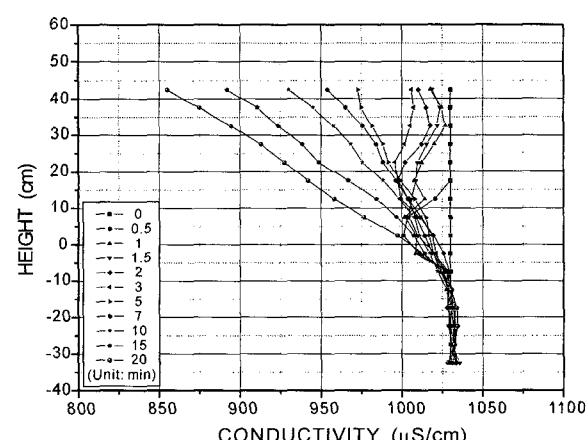


Fig. 5. Conductivity variation curves with time since formation fluid began to flow into hole fluid of 0.05% NaCl solution. Flow rate was 14.3 g/min. Temperatures of hole fluid and formation fluid were held constant without temperature difference between the two. Zero height shows the location of incoming and outgoing

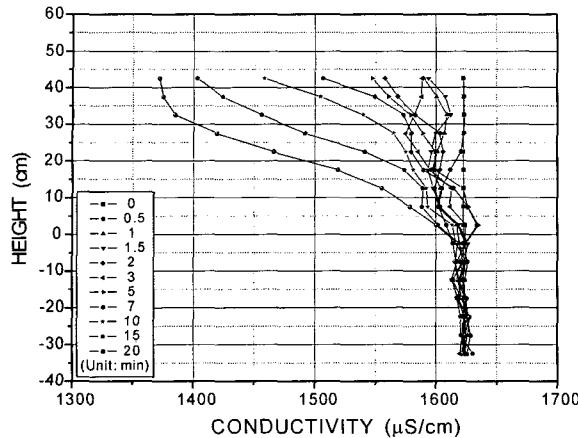


Fig. 6. Conductivity variation curves with time since formation fluid began to flow into hole fluid of 0.08% NaCl solution. Flow rate was 13.7 g/min. Temperatures of hole fluid and formation fluid were held constant without temperature difference between the two. Zero height shows the location of incoming and outgoing fluid.

와 같이 사용된 공내수의 농도에 비례하여 커지고 있음이 확인되었다.

또 하나의 특징은 전도도 감소 경향이 유입구 위쪽으로 집중되는 현상이다. 이는 상대적으로 저염도-저밀도의 지하수가 고염도-고밀도의 공내수 위로 상향함에 따른 결과로 나타나고 있으며, 이와 같은 경향은 농도가 큰 공내수를 사용할수록 현저하게 나타나고 있다. 따라서 이 실험 결과는 공내수의 농도가 클수록 지하수 유입에 의한 전기 전도도 감소 폭이 크게 나타나며 아울러 그 이상대가 그 만큼 유입구에서 떨어진 위쪽으로 확산되는 것으로 요약된다. 이는 지하수 유입효과를 잘 감지하기 위해 염도차를 크게 해야 할 필요성이 지하수의 유입, 유출구 부근에서의 이상 확인을 위한 밀도차 저감 필요성과 서로 상치되는 문제점을 제시하고 있다. 이러한 문제점 해결을 위해서는 지하수와 공내수의 온도 조절에 의한 밀도차 저하방안²¹⁾이 요구되고 있다.

본 연구에서는 이러한 조건에 비교적 잘 부합할 적절한 농도로서 0.05%를 결정하고 공내수와 지하수간의 온도차가 전기전도도 곡선에 미치는 영향을 측정, 분석하였으며 그 결과가 Fig. 7, 8, 9에 제시되어 있다. Fig. 7은 지하수의 온도를 공내수 보다 2도 높게 한 상태에서 얻어진 전기전도도 곡선의 형태를 보여주고 있다. 온도차가 없이 측정된 Fig. 5의 경우에 비하여 지하수의 온도가 2도 상승한 것인데 피크의 형태가 완전히 없어지고 상향 발산하는 모습을 보이고 있다. 이 경우는 복합 대수층 모형의 각 구간별 수리상수를 규명하는 데에 있어서 불리한 조건으

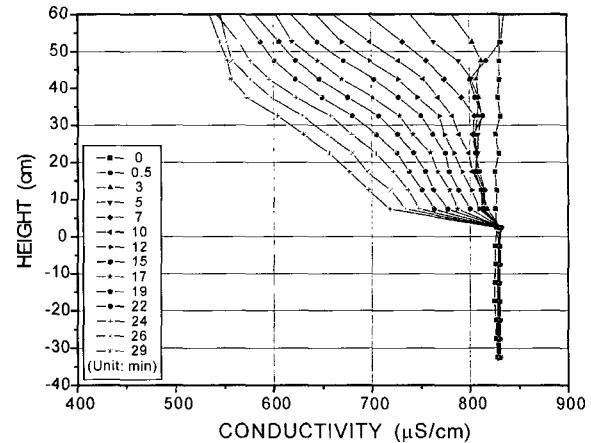


Fig. 7. Conductivity variation curves with time showing high density contrast caused by lower hole fluid (22°C) and higher formation fluid (24°C) temperature. Data were obtained from salinity difference between formation fluid (0% NaCl solution) and hole water (NaCl solution a little higher than 0.05%) with the flow rate of 18.5 g/min.

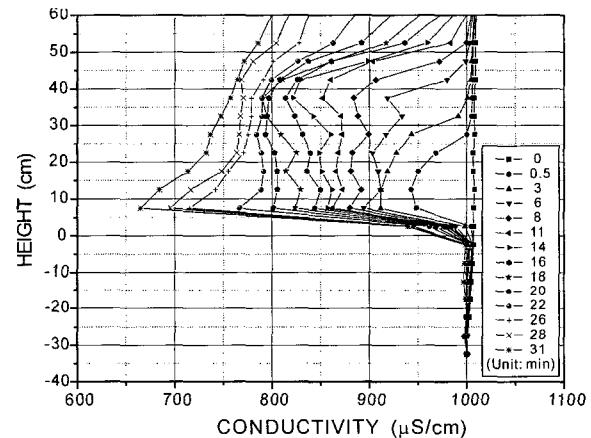


Fig. 8. Conductivity variation curves with time showing medium density contrast caused by higher hole fluid (24°C) and lower formation fluid (21°C) temperature. Data were obtained from salinity difference between formation fluid (0% NaCl solution) and hole water (0.05% NaCl solution) with the flow rate of 20 g/min.

로 나타나나, 유체의 유입구 위치 판단의 정보만은 충분히 제시되고 있다. Fig. 8은 반대로 지하수의 온도를 공내수 보다 2.5도 낮게 조절하여 흘러보내어 측정된 전기 전도도 곡선으로 유입구 직상부 구간에서 전기전도도 감소가 수렴하면서 특징적인 피크를 보이고 있다. 이는 지하수의 온도를 공내수보다 2.5도 낮게 조절함에 의하여 0.05% 내외의 염도 증가에 의한 잉여 밀도차가 상당히 보상되었음을 보이는 것으로 온도차에 조절의 중요성을 보여주고 있다. Fig. 9는 공내수에 비하여 유입수의 온도

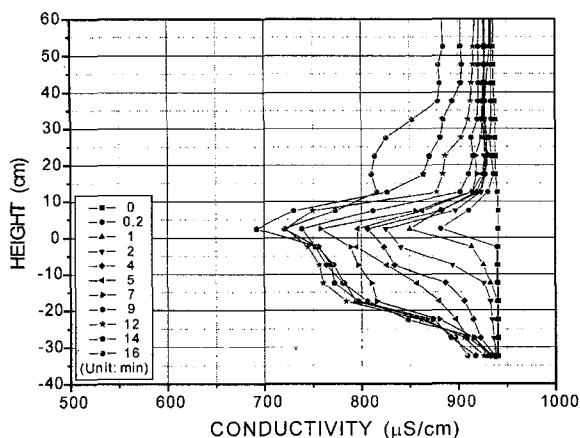


Fig. 9. Conductivity variation curves with time showing reversed density contrast caused by lower hole fluid (20.2°C) and much lower formation fluid (14°C) temperature. Data were obtained from salinity difference between formation fluid (0% NaCl solution) and hole water (NaCl Solution a little higher than 0.05%) with the flow rate of 34 g/min.

를 6.5°C 낮게 조절함으로써 얻어진 결과로서 지하수의 하향이동이 뚜렷하나 유입구를 중심으로 여전히 피크의 형태를 잘 유지하고 있음을 보인다.

6. 유입량과 전기전도도곡선의 변화특성

Fig. 10은 전기전도도 곡선에 있어서 지하수의 시추공 내 유입량이 미치는 영향을 보여준다. 여기에서의 두 자료는 거의 동일한 0.05%의 염화나트륨 수용액을 공내수

로 사용하고 온도가 1.8°C 낮은 종류수를 지하수로 사용하였으며, 유입량은 서로 달리하여 측정된 결과이다. 이 결과는 유입량이 작은 경우($5.1 \text{ g}/\text{min}$)에는 얻어진 전기전도도곡선의 시간에 따른 전도도 감소폭이 작을 뿐만 아니라 피크 또한 뚜렷하지 못함(Fig. 10A)에 비하여, 유입량이 증대된 경우($16.6 \text{ g}/\text{min}$)에 얻어진 전기전도도곡선은 그 감소의 폭이 크고 피크 또한 상대적으로 더 뚜렷해졌음을 보인다(Fig. 10B). 유입량과 전기전도도 변화와의 밀접한 관계는 여기에 제시되지 못한 다른 전기전도도 분포곡선들의 비교에서도 잘 확인될 수 있었다.

이 연구에서는 유입량과 전기전도도 변화와의 정량적인 관계 모색을 위하여 모형시추공 전체를 대상으로 하여 시간에 따라 변화하는 전도도 값의 평균값을 구하여 플롯하는 방법을 사용하였다. 즉 Fig. 11에서 제시된 것이 그 결과로서, 유입량을 달리하는 여러 개의 실험결과로부터 각 시점에서의 시추공내 평균 전기전도도 값의 분포가 각 시간대 별로, 유입량 별로 구분 도시되어 있다. 이 결과는 우선 평균 전기전도도 값이 단순한 직선 선형으로 감소하는 경향을 나타내고 있어, 공내수가 유입된 지하수에 의해서 회색되는 현상이 시간에 비례하여 일어나고 있음을 잘 나타내고 있다. 또 하나의 현상은 지하수 유입량이 작은 경우에 시간 경과에 따른 전기전도도 감소율, 즉 경사가 작게 나타나는 반면에 유입량이 커짐에 따라 경사가 커지는 경향이다. 이 결과는 지하수 유입량이 전기전도도 감소률과 비례 관계를 가지고 있음을 시사하고 있다.

이와 같은 예상은 유입량 값과 시간에 따른 전기전도도

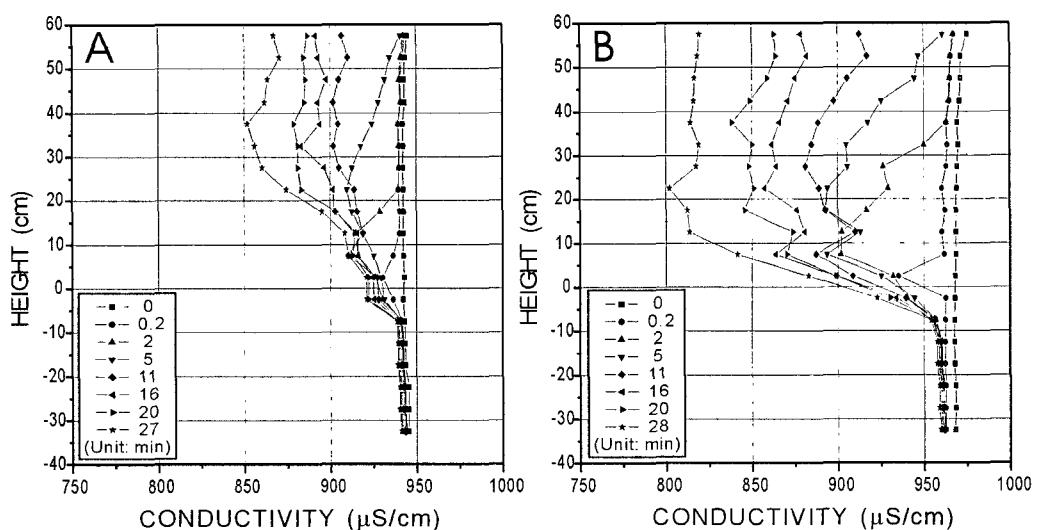


Fig. 10. Comparison of small amplitude of conductivity decrease with lower flow rate (A: $5.1 \text{ g}/\text{min}$) and large amplitude of conductivity decrease with higher flow rate (B: 15.5). Salinity of hole fluid was about 0.05% NaCl solution and temperature difference between hole and formation fluids was about 2°C .

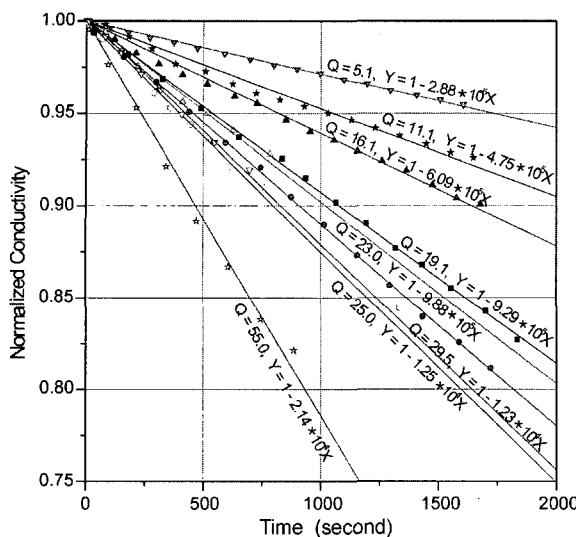


Fig. 11. Average conductivity values of borehole fluid plotted in terms of time since incoming flow began. Linear decrease in conductivity is observed throughout all experiments, and gradients of conductivity change with time have been deduced by linear polynomial fit. Conductivity was normalized as initial conductivity to be unity.

감소률 값을 Cross plot한 Fig. 12의 결과에서 보다 뚜렷하게 확인할 수 있었다. 즉 모든 자료들이 높은 상관 ($R^2=0.94$)을 가지면서 회귀 직선 상으로 수렴하고 있으며

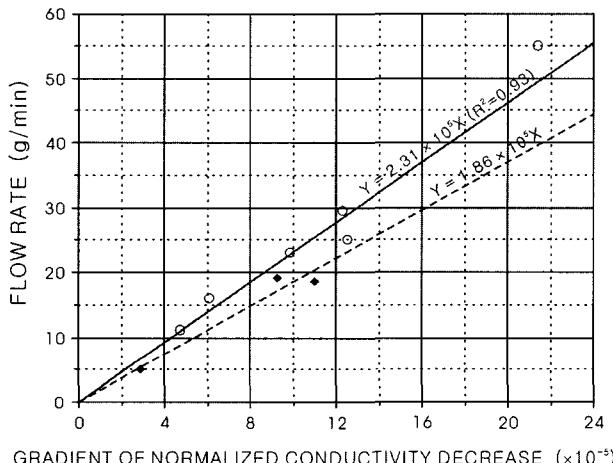


Fig. 12. Cross plot of flow rate and gradient of conductivity change obtained in Fig. 11. Fairly good correlation is observed between flow rate and gradient of conductivity. Result obtained from high density contrast between hole and incoming fluid fall on lower part of regression line (solid), while results in small contrast fall on upper part. Results obtained from high density contrast seem to coincide with the model equation line (dotted) obtained under the assumption that outgoing fluid conductivity is the same as initial condition.

특히 이를 실험 환경에 따라 원과 네모로 표시된 두 가지 유형으로 구분하는 경우에 거의 완벽한 상관관계를 보이고 있다. 원형으로 표시된 자료들은 밀도조절에 의하여 전기전도도곡선이 비교적 유입 및 유출구 위치 가까이 수렴하는 유형에 속하는 것들이며 네모꼴의 자료는 비교적 큰 밀도 차이로 전기전도도곡선이 발산하는 형태를 보이는 경우에 해당된다. 발산형에서 얻어진 자료들은 전기전도도가 시추공 내에 존재하는 염의 양에 비례하여¹⁸⁾ 유출구를 통해서 빠져나가는 유체의 전기전도도가 초기 공내 수와 같은 상태라는 두 가지 가정 하에서 구한 이론곡선과 거의 일치하고 있다. 수렴형의 경우는 발산형 자료에 비하여 유량이 약간 크게 나타나는 경향을 보이나 전체적으로 동일한 범위 안에 포함됨을 보인다. 이는 희석 모델에 의한 전기전도도 측정자료가 지하수 유량의 판단, 나아가 시추공 주변 지반의 수리상수 결정에 매우 효과적일 수 있음을 보이며, 따라서 모든 자료의 회귀분석 결과로부터 그림 12에서 제시된 바와 같은 지하수 유량결정을 위한 모델방정식이 구해졌다.

7. 토의 및 결언

전기전도도 측정방식에 의한 수리상수 결정을 위한 모형시추공 시스템을 만들고 이를 이용하여 유체의 농도차이가 미치는 영향, 온도 차이가 미치는 영향 및 유입량이 미치는 영향을 측정하고 분석하였다. 공내수와 지하수간의 농도차이는 지하수의 유입을 확인할 수 있는 가장 기본적인 조건으로 그 차이는 이상대 탐지라는 관점에서 가능한 클수록 좋은 것으로 나타나고 있으나 농도 차이가 클수록 저염도-저밀도의 지하수가 고염도-고밀도의 공내수 위로 상향함에 따른 전기전도도곡선 분포상의 상향확산이 문제점으로 나타났다. 본 연구에서는 온도 조절에 의하여 효과적으로 이 문제를 해결할 수 있음을 보였다.

전반적으로 시추공 내의 유체는 지하수의 유입과 유출이 있는 동안, 시간에 따라 매우 일률적으로 변화하는 전기전도도 분포 양상을 나타냈다. 특히 임의의 한 시점에서 구한 전기전도도의 평균값이 시간의 경과에 따라 일차함수의 형태로 감소하는 경향을 보여, 공내수가 일정한 비율로 희석되고 있는 모델을 제시하였다. 이로부터 지하수 유입량과 전기전도도 감소율 사이에서 현저한 상관성을 얻었으며, 이 상관성으로부터 수리 상수를 결정하는 데 필요로 하는 모델방정식이 얻어졌다. 이 모델 방정식은 용존이온의 농도가 높은 유체가 용존이온의 농도가 0인 유체에 의하여 치환되는 소위 단순 이온치환을 전제하여 얻어지는

이론방정식에서 크게 벗어나지 않는다. 이것은 전기전도도 감소의 변화율로부터 시추공 주변 지반의 수리상수를 정확히 예측할 수 있음을 보여주고 있다.

물론 이 결과는 향후 추가될 다른 많은 환경조건에서의 모형실험 자료들에 의하여 보강, 검증되고, 특히 현장 시추공에서의 공내수 균질화를 위한 방안 등이 효과적으로 강구되어야 하겠지만 지금까지의 결과는 시추공 내에서의 전기전도도 측정기법이 수리전도도 상수를 결정하는 데 있어서 매우 유용한 방안이 될 수 있음을 시사하고 있으며 기존의 수리상수 결정 방법들에 비하여 측정 오차가 작을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 국립강원대학교의 지원으로 미국 캔사스대학을 방문한 1년간의 연구 기간 동안에 주로 이루어졌다. 그동안 유익한 토의를 해주신 Univ. of Kansas, Kansas Geological Survey의 John Doveton 박사와 James Butler 박사께 사의를 표한다. 아울러 이 연구의 일부는 한국과학재단의 지원과제(우수과학자 지원연구과제, 과제번호: R05-2002-000-01321-0)에 의한 실험과 연구로 완성되었음을 밝히며 연구비 지원에 감사드린다. 끝으로 실험을 도와준 강원대학교 지구물리학과의 박정빈 석사, 유선아양, 이형섭군, 박상현군에게 감사한다.

참 고 문 헌

- Theiss, C. V. "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 (1935).
- Cooper, H. H. Jr. and Jacob, C. E. "A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history", *Trans. Amer. Geophy. Union*, vol. 27, pp. 526-534 (1946).
- Lambe, T. W. "Soil Testing for Engineers", John Wiley & Sons, New York, pp. 165 (1951).
- Todd, D. K., "Groundwater Hydrology", John Wiley & Sons, New York, pp. 525 (1959).
- Drost *et al.* "Point dilution methods of investigating groundwater flow by means of radioisotopes", *Water Resources Research*, Vol. 4 (no.1), pp. 125-145 (1968).
- Gaur, R.S. and Singh, Inderjit "Relationship between permeability and gamma ray intensity for the Oligocene sand of the Indian field", *Oil and Natural Gas Commission of Indian Bulletin*, vol. 2 (no. 1), pp. 74-77 (1965).
- Paillet, F.L. "Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fracture formations". *Water Resources Research*, vol. 34(no. 5), pp. 997-1010 (1988).
- Denicol, P., Petrobrs, S.A., and Jing, X., "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 (1996).
- Croft, M.G. and Dak, N. "A method of calculating permeability from electric logs", in Geological Survey Research 1971: U.S. Geological Survey Professional Paper 750-B, pp. B265-B269. 14 (1971).
- Coates, G.R. and Dumanoir, J.L. "A new approach to improved log-derived permeability", *Log Analyst*, v. 15 (no. 1), pp. 17-31 (1974).
- Dziuba, T. "Improved permeability prediction in carbonates", Society of Professional Well Log Analysts Annual Logging Symposium, 37th, Transactions, pp. H 1-13 (1996).
- Brereton, N.R. and Skinner, A.C. "Groundwater flow characteristics in the Triassic sandstone in the Fylde area of Lancashire", *Water Services*, August, 7 pp. 16 (1974).
- Seevers, D.O. "A nuclear magnetic method for determining the permeability of sandstone", Society of Professional Well Log Analysts Annual Logging Symposium, 7th, Tulsa. Okla, Transactions, pp. 14 (1966).
- Tang, X.M., Altunbay, M. and Shorey, D. "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, pp. KK 1-14 (1998).
- Goldberg, D., Speed, D., Wilkinson, C., and Scholz, E. "A correlation of hydraulic conductivity from pulse tests with sonic log amplitude", Geological Applications of Wireline Logs Geological Soc. Special Publication No. 48, pp. 297-302 (1990).
- Buffin, A. "Permeability from wave form sonic data in the Otway basin", Society of Professional Well Log Analysts Annual Logging Symposium, 37th, New Orleans. La, Transactions, pp. GG 1-11 (1996).
- Paillet, F. L., Hess, A. E., Cheng, C. H. and Hardin, E. "Characterization of fracture permeability with high-resolution vertical flow measurements during borehole pumping": *Ground Water*, v. 25 (no. 1), pp. 28-40 (1987).
- Tsang, C. F. and Hale, F. "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 (1989).
- Simon Loew, Chin-Fu Tsang, Frank V. Hale, Peter Hufschmied, "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, pp.1-44 (2000).
20. Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. and Keys, D. A. "Applied Geophysics" Cambridge University Press (1976).
21. Johnson J. W., Oelkers, E. H. and Helgeson, H. C. "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 (1991).