

표준사와 유리구슬을 이용한 수리전도도와 전기비저항의 관계

김수동¹ · 박삼규^{2*} · 함세영¹

¹부산대학교 지구환경시스템학부, ²한국지질자원연구원

Relationship between Hydraulic Conductivity and Electrical Resistivity of Standard Sand and Glass Bead

Soodong Kim^{1,2}, Samgyu Park^{2*} and Se-Yeong Hamm¹

¹Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, 609-735

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350

We estimated the hydraulic conductivity of the sediments using constant-head permeability tests and electrical resistivity measurements with Jumoonjin standard sand of a uniform size and glass beads of different grain sizes. In this study, we determined the variations of the porosity, the hydraulic conductivity, and the resistivity in case 1 (changing the packing of the Jumoonjin standard sand) and in case 2 (varying the size of the glass beads). The results of case 1 showed that the hydraulic conductivity decreased with an increase in the electrical resistivity. This occurred because the sand grain while packing became rhombohedral with the a decrease of both the pore size and porosity. The results of the case 2 showed that the hydraulic conductivity increased due to the increase in the pore size as caused by the increased glass bead size. In addition, the porosity decreased and the electrical resistivity increased. Therefore, the relationship between the hydraulic conductivity and the electrical resistivity is negatively proportional as regards the grain packing with a change from cubic to rhombohedral whereas this relationship is positively proportional to the increase in the grain size.

Key words : hydraulic conductivity, electrical resistivity, Jumoonjin standard sand, glass bead, constant head permeability test

자유면대수층의 수리전도도와 전기비저항 사이의 상관관계를 도출하기 위하여 입자크기가 비교적 균일한 주문진표준사와 여러 가지 입자크기의 유리구슬을 대상으로 정수위 투수 시험과 전기비저항 측정을 실시하였다. 첫 번째 실험에서는 주문진표준사의 입자배열의 변화에 따라서 그리고 두 번째 실험에서는 유리구슬의 입도 변화에 따라서 공극률, 수리전도도, 전기비저항간의 변화를 파악하였다. 그 결과, 첫 번째 실험에서는 주문진표준사의 다짐정도가 커질수록 공극의 크기와 공극률은 감소하기 때문에, 수리전도도는 작아지고 전기비저항은 커지는 경향을 보였다. 두 번째 실험에서는 유리구슬의 입자크기가 커질수록 공극의 크기는 커지지만 공극률은 작아졌으며, 수리전도도와 전기비저항은 모두 증가하는 경향을 보였다. 따라서 입자배열이 입방체 배열에서 능면체 배열로 변화할 때 수리전도도와 전기비저항은 반비례관계를 나타내는 반면, 입자 크기가 커지면 수리전도도와 전기비저항은 비례관계를 나타내는 것으로 밝혀졌다.

주요어 : 수리전도도, 전기비저항, 주문진표준사, 유리구슬, 정수위 투수 시험

1. 서 론

수리전도도는 대수층 내에서 지하수를 통과시키는 정도를 나타내는 수리지질학적 인자로서 양수시험, 순

간충격시험(slug test), 추적자시험 등 여러 가지 현장 수리시험으로 구할 수 있다. 현장시험들은 광범위한 지역의 수리전도도를 파악하기 위한 것들로서 여러 지역의 지하수관정 설치와 시험을 위해서 많은 비용과 시

*Corresponding author: samgyu@kigam.re.kr

간이 요구된다. 또한 오랫동안 제대로 관리되지 않은 지하수공은 공벽 붕괴로 수리시험을 할 수 없거나, 케이싱에 점토나 금속산화물이 끼어서 왜곡된 수리 정보를 얻는 경우도 발생한다(Lee *et al.*, 2011).

한편 지반의 전기비저항은 체적함수율(공극률×포화도)에 크게 좌우되며, 지하수위 및 지하수 분포상태와 같은 수리지질학적 정보를 얻기 위한 목적으로 전기비저항 탐사가 적용되고 있다. 전기비저항 탐사는 지표에서 슬럼버저 배열(schlumberger array)이나 웨너 배열(wenner array), 쌍극자 배열(dipole-dipole array) 등 탐사목적에 맞는 전극배열법을 적용하여 광범위한 지역에 대한 지반의 전기비저항을 구할 수 있으므로, 전기비저항과 수리전도도 사이의 상관관계를 밝혀낸다면 전기비저항 탐사를 통하여 적은 비용으로 간편하게 대수층의 수리전도도를 구할 수 있을 것이다.

이러한 수리전도도와 전기비저항의 관계에 대해서 지난 수십 년간 많은 연구가 이루어져 왔다. Archie (1942)는 지층비저항계수(Formation factor)라는 개념을 도입하여 공극률과의 관계를 밝힘으로써 최초로 수리전도도와 전기비저항의 연관성을 보여주었다. Kelly (1977), Kosinski and Kelly (1981)는 New England의 빙하성 유수 평원을 대상으로 수리전도도와 전기비저항이 비례한다는 결과를 제시하였고, Croft (1971) 또한 Jones and Bufford (1951)의 자료를 사용하여 수리전도도와 전기비저항이 비례한다는 결과를 보여주었다. 그 외에도 Alessandrello and Lemoine (1983) 등 많은 연구자들이 현장 양수시험과 전기비저항 탐사 자료를 바탕으로 수리전도도와 전기비저항이 비례한다는 결과를 제시하였다. 반면에 Heigold *et al.* (1979)는 Illinois의 빙하성층을 대상으로 수리전도도와 전기비저항이 반비례한다는 결과를 보여주었다. 그 외에도 Mazac and Landa (1979), Worthington (1975) 등의 연구자들이 현장 탐사자료를 바탕으로 수리전도도와 전기비저항이 반비례한다는 결과를 제시하였다. Urish (1981)는 지층비저항계수와 수리전도도에 영향을 미치는 요인을 분석하여 Archie (1951)의 경험식을 토대로 수리전도도가 전기비저항과 비례함을 이론적으로 밝혔다. Niwas (2003)는 이전의 연구를 바탕으로 매질의 규모, 공극률의 전기전도도, 매질의 전기전도도가 수리전도도와 전기비저항에 미치는 영향을 검토하였으며, Khalil (2009)는 포화도에 따라서 수리전도도와 전기비저항의 세 가지 관계를 제시하였다.

국내에서는 수리지질구조나 해수침투, 지하수 부존 등을 파악하기 위해 전기비저항 탐사를 적용한 연구들

이 있었으나(Song *et al.*, 2000, Hwang *et al.*, 2000, Park *et al.*, 2005, Choi., 2008, 2009) 수리전도도와 전기비저항의 직접적인 상관관계에 대한 연구는 미흡한 실정이다. Lee *et al.* (1995)가 가남지역 대수층을 대상으로 양수시험과 전기비저항 탐사를 수행하여 수리전도도와 전기비저항의 상관성을 제시하였고, Song *et al.* (2003)이 실내에서 유리구슬과 표준사를 이용하여 변수 위 투수 시험과 전기비저항 측정을 실시한 바 있다. 그러나 현장 실험 결과는 다른 지역에 적용하기 어렵고, 실내실험에서는 공극률과 전기비저항의 관계만 제시하고 수리전도도와 직접적인 상관관계를 밝히지는 않았다.

지금까지 수리전도도와 전기비저항의 상관관계에 관한 모든 연구들에서 공통적으로 언급하는 내용 중 하나는 수리전도도와 전기비저항의 관계가 항상 일정하지 않다는 것이다. 대수층에 점토 등의 세립질이 포함되어 있으면 그 함량이 높을수록 낮은 전기비저항을 나타내기 때문에(Park, 2004) 공극률이나 공극수의 전기전도도뿐만 아니라 매질의 전기전도도에 따라서 전체의 전기비저항이 다르며 전류가 흐르는 통로도 달라진다. 또한 점토와 같은 세립질의 입자들은 공극률은 크지만 공극의 크기가 작아서 수리전도도가 낮다. 즉, 수리전도도와 전기비저항에 영향을 미치는 요인이 다양하며 지질학적 퇴적환경에 따라서 특정 대수층의 수리전도도와 전기비저항의 상관관계가 달라지기 때문에 수리전도도와 전기비저항의 상관관계가 항상 일정하지 않다. 따라서 이 연구에서는 점토와 같은 세립질의 영향을 제거하기 위하여 실내에서 균질한 석영질의 주문진표준사와 유리구슬을 대상으로 한정된 조건하에 수리전도도와 전기비저항의 정확한 상관관계를 제시하고자 하였다. 이를 위하여 공극의 크기에 따른 정수위 투수 시험을 통하여 수리전도도의 변화를 구하고, 수리전도도 측정과 동시에 전기비저항의 변화도 측정하여 수리전도도와 전기비저항 사이의 상관관계식을 도출하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 실험 준비

대수층의 수리전도도가 서로 다른 가장 큰 이유는 구성하고 있는 입자들의 크기나 배열 또는 분급의 차이에 따라 지하수가 이동할 수 있는 통로인 공극의 크기가 달라지기 때문이다. 이 연구에서는 입자의 크기와 배열을 달리하는 두 가지 실험 (Case 1, Case 2)으로 공극의 크기에 따른 정수위 투수 시험(constant head permeability test)을 통하여 수리전도도를 측정

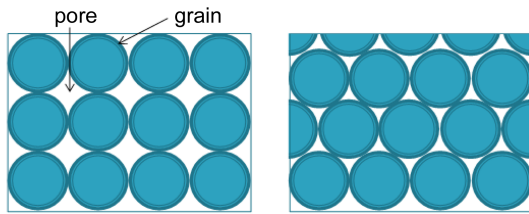


Fig. 1. Diagrams of cubic packing (left) and rhombohedral packing (right).

했으며, 동시에 전기비저항을 측정하여 수리전도도와와의 상관관계를 파악하였다.

첫 번째 실험(Case 1)은 동일한 입자크기의 시료를 사용하여 입자배열에 따른 차이를 고려하였으며, 강원도 주문진을 향호리산 시멘트 모르타르(mortar) 압축강도 시험용 주문진표준사를 사용하였다. 주문진표준사는 입자의 크기가 0.6 mm ~ 0.85 mm로 대체로 일정하고, 다른 모래에 비하여 석영의 품위가 높아 불순물이 거의 없어서 이 실험에 적합하였다. Fig. 1은 크기가 같은 입자들의 서로 다른 배열 상태를 보여주는 것으로 오른쪽 그림처럼 입자배열이 능면체(rhombhedron)를 형성할수록 조밀하게 배열되어 공극의 크기와 공극률이 감소하며, 입자크기가 일정할 때 입자배열은 단위부피당 질량인 밀도로 제시할 수 있다. 포화시료의 질량에서 건조시료의 질량을 빼줌으로써 공극수의 질량을 구하고 시료원통의 부피로 나누어 공극률을 구하였다. 시료원통의 길이는 17.5 cm이고 직경은 10 cm이다. 시료원통에 주문진표준사를 넣고 시료원통 벽면을 고무망치로 가볍게 두드리는 방법으로 입자배열을 변화시켰으며, 그 때 각각의 밀도를 측정하여 간접적으로 나타난 총 네 가지 배열(5.2, 5.5, 5.7, 5.9 g/cm³)에서 정수위 투수 시험과 전기비저항 측정을 수행하였다.

두 번째 실험(Case 2)은 입자크기에 따른 차이만 고려한 것으로, 입자크기가 제한적인 주문진표준사를 대신하여 SiO₂로 이루어진 유리구슬을 이용하였다. 이론상으로는 모래 범위에서 입자의 크기가 커지면 공극의 크기가 따라서 커지고, 공극률은 일정해야 하지만, 실제로는 입자의 크기가 커지면 반대로 공극률은 작아지는 경향성을 보인다. 실험 목적에 따라서 네 가지(0.25 mm ~ 0.5 mm, 0.75 mm ~ 1.0 mm, 1.25 mm ~ 1.55 mm, 1.7 mm ~ 2.0 mm) 입자크기의 유리구슬을 이용하여, 각 실험마다 시료원통에 동일 입도의 유리구슬을 넣고 정수위 투수 시험과 전기비저항 측정을 수행하여 수리전도도와 전기비저항을 구하였다.

또한 포화시료의 전기비저항은 간극수의 전기비저항

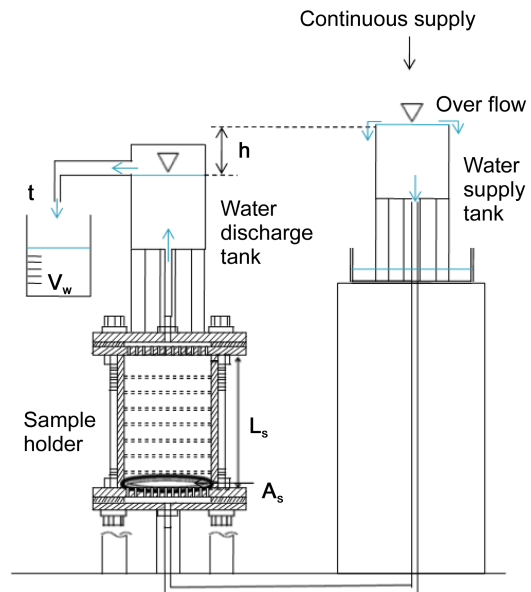


Fig. 2. Diagram of constant head permeability test.

에 영향을 받기 때문에 두 Case에서 공통적으로, 공급수의 온도를 25 °C로 보정했을 때 전기전도도가 134 μS/cm가 되도록 하여 실험을 진행하였다.

2.2. 정수위 투수 시험

수리전도도를 측정하는 방법으로는 사질토양에 적용되는 정수위 투수 시험법을 이용하였다. Fig. 2는 Todd (2005)의 정수위 투수 시험법에 의하여 직접 제작한 실험 장치로, 우선 주문진표준사 또는 유리구슬을 시료원통에 넣고 공급수조에 물을 공급하면 물이 호스를 통하여 시료원통을 통과한 후 배출수조에서 일정수두를 형성한 후 메스실린더로 배출된다(Fig. 2). 실험이 진행되는 동안 공급수조에 물을 지속적으로 공급하여 물이 넘치는 상태를 유지함으로써 공급수조와 배출수조의 수두차를 일정하게 유지할 수 있다. 시료의 길이 L_s 와 시료의 단면적 A_s , 수두차 h 는 일정한 값이며, 메스실린더에 일정 수량 V_w 가 유입되는 동안 걸린 시간 t 를 측정하여 아래 식에 대입하여 수리전도도를 계산하였다.

$$K = \frac{V_w L_s}{A_s t h} \tag{1}$$

여기서, K 는 수리전도도(cm/sec), V_w 는 t (sec) 시간 동안 배출된 수량(cm³), L_s 는 물이 통과하는 시료의 길이(cm), A_s 는 시료의 단면적(cm²), h 는 수두차(cm)이다.

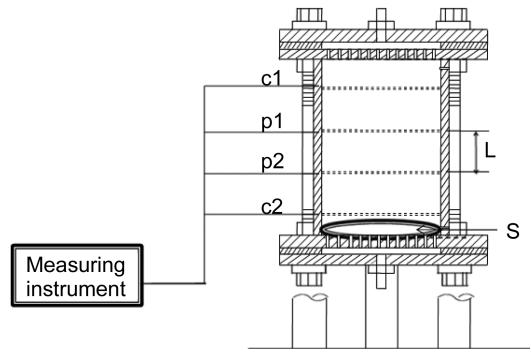


Fig. 3. Diagram of resistivity measurement system.

2.3. 전기비저항 측정

Fig. 3은 전기비저항 측정시스템으로, 시료원통에 담긴 시료의 전기비저항을 측정하기 위해서, 시료원통 안쪽 벽에 4 cm의 간격으로 수평하게 환(ring) 형태의 구리선이 들어가도록 홈을 파서 전류전극과 전위전극을 설치하였으며, 각 전극을 측정기에 연결하였다. 측정기로는 Handy Viewer Mini-OHM(OYO Co.) 송·수신기를 사용하여, 전류전극으로 1 mA의 DC 전류를 주입하고 전위전극에서 전위차를 측정하였으며, 아래 식을 이용하여 전기비저항을 계산하였다.

$$\rho = \frac{S \Delta V}{L I} \quad (2)$$

여기서 ΔV 는 전위전극 사이의 전위차(mV), I 는 흘려준 전류의 세기(μA), S 는 전류가 흐르는 단면적(cm^2), L 은 전위전극 사이의 거리(cm)이다.

3. 실험결과

3.1. Case 1의 입자배열의 차이에 따른 결과

첫 번째 실험에서는 입자배열을 달리하여 공극의 크기에 변화를 주는 방법으로 수리전도도를 변화시켰고, 이때의 전기비저항 변화를 측정해서 수리전도도와 전기비저항의 상관관계를 파악하고자 하였다. 주문진표준사를 시료원통에 넣고 벽면을 두드리는 횟수를 달리하

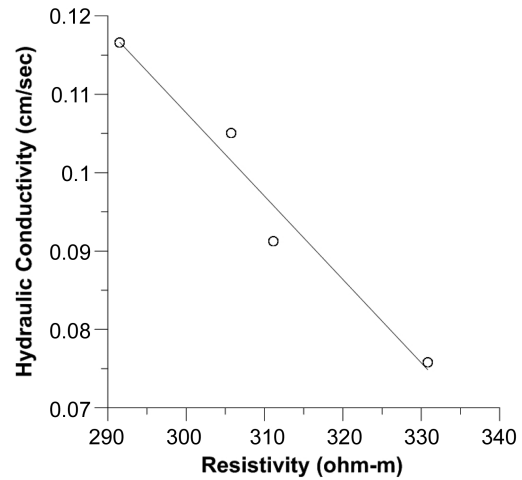


Fig. 4. Relationship between resistivity and hydraulic conductivity in case 1.

여 입자배열을 총 네 번 변화시켰을 때 밀도와 공극률, 수리전도도, 전기비저항의 측정결과를 Table 1에 나타내었다. 수리전도도와 전기비저항은 총 5회씩 측정하여 평균값과 표준편차를 구하였다. 포화시료의 전기비저항은 공극을 채우고 있는 물의 전기전도도에 영향을 받기 때문에 이에 따른 차이를 없애기 위하여 매 실험 때마다 물의 전기전도도를 일정하게 유지시켜 주었다. 실험에서 사용한 물은 탈이온수에 NaCl을 넣어서 25°C로 온도 보정을 실시했을 때 전기전도도가 134 $\mu S/cm$ 가 되도록 하였다. 한편 입자의 배열은 수직으로 정확하게 나타내기 어렵기 때문에 밀도의 차이로 입자배열의 차이를 대신하였다. 다짐횟수를 늘려 시료 전체의 밀도를 증가시킬수록 입자배열은 입방체(cubic packing)에서 능면체(rhombohedral packing)로 가까워지기 때문에 입자사이의 간격은 더 조밀해진다. 그 결과, 물이 이동하는 통로인 공극의 크기가 작아져 수리전도도가 작아지고, 공극률은 낮아져서 전기비저항이 높아지는 결과가 나타난다. Fig. 4는 이때의 수리전도도와 전기비저항의 관계를 도시한 그래프로서, 동일한 크기의 입자를 이용하여 입자배열을 변화시켰을 때 수리전도도

Table 1. The results of experiment in case 1

Density (g/cm^3)	Porosity (%)	Hydraulic Conductivity (cm/sec)	Standard Deviation	Resistivity (ohm-m)	Standard Deviation
1.52	43.3	0.117	5.70E-04	291.54	0.350
1.55	42.4	0.105	5.15E-04	305.77	0.370
1.57	41.9	0.091	6.03E-04	311.11	0.697
1.59	41.2	0.076	6.71E-04	330.84	1.598

와 전기비저항은 반비례관계를 가지는 사실을 알 수 있었다. 두 변수 사이의 상관관계의 정도를 나타내는 상관계수를 제공한 값인 결정계수는 약 0.963이고, 관계식은 다음과 같다.

$$K = -0.0011\rho + 0.4266 \quad (3)$$

여기서 K는 수리전도도이고, ρ 는 전기비저항이다.

3.2. Case 2의 입자크기에 따른 결과

두 번째 실험에서는 입자크기를 달리하여 공극의 크기에 변화를 주어 수리전도도를 변화시켰으며 이때의 전기비저항 변화를 측정해서 수리전도도와 전기비저항의 상관관계를 파악하고자 하였다. 입자크기별(0.25 mm ~ 0.5 mm, 0.75 mm ~ 1.0 mm, 1.25 mm ~ 1.55 mm, 1.7 mm ~ 2.0 mm)로 유리구슬을 시료원통에 넣고 각 크기별 공극률과 수리전도도, 전기비저항을 측정하였다 (Table 2). Case 1과 마찬가지로 공극을 채우고 있는 물의 전기전도도 차이에 영향을 받지 않도록 하기 위하여 실험에 사용한 물은 탈이온수에 NaCl을 넣어서 25 °C로 보정했을 때 134 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 일정하게 하였다.

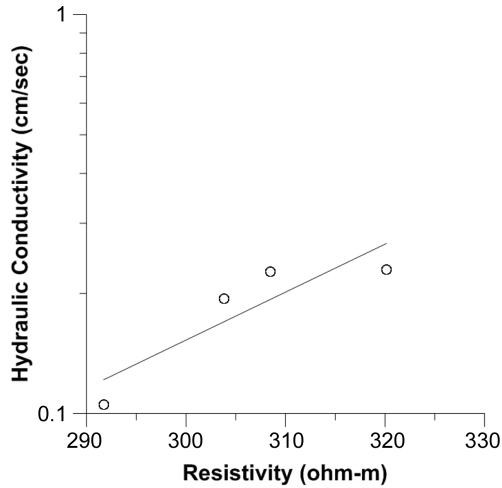


Fig. 5. Relationship between resistivity and hydraulic conductivity in case 2.

Table 2. The results of experiment in case 2

Grain size (mm)	Porosity (%)	Hydraulic Conductivity (cm/sec)	Standard Deviation	Resistivity (ohm-m)	Standard Deviation
0.25 - 0.5	38.2	0.105	6.68E-04	291.73	0.187
0.75 - 1.0	37.7	0.194	1.58E-03	303.83	0.229
1.25 - 1.55	36.8	0.227	2.45E-04	308.48	0.286
1.7 - 2.0	35.7	0.230	2.47E-03	320.16	0.187

입자크기가 커질수록 물이 이동하는 통로인 공극의 크기도 커지기 때문에 수리전도도가 커지고, 공극률은 낮아졌으며 전기비저항은 높아지는 결과가 나타났다. 입자가 완벽한 구의 형태이고 분급이 아주 좋아서 동일한 크기로 이루어져 있다면 이론상으로 입자의 크기에 관계없이 공극률은 일정해야하지만, 본 실험에서는 입자의 크기가 작아질수록 공극률이 크게 나타나는 결과를 보였다. 입자배열에는 변화를 주지 않고 입자크기를 변화시켰을 때 수리전도도와 전기비저항은 비례관계를 가지는 사실을 알 수 있었다(Fig. 5). Fig. 5의 결정계수는 약 0.788이고, 수리전도도(K)와 전기비저항(ρ)의 관계식은 다음과 같다.

$$K = 3.77 \times 10^{-5} e^{0.0277\rho} \quad (4)$$

4. 토의 및 결론

미고결 대수층에서 수리전도도를 결정하는 가장 중요한 인자는 공극의 크기이고, 공극의 크기는 입자배열과 입자크기, 분급에 따라서 변하며 이들이 변하면 결국 공극률도 변하기 때문에 공극률에 의해 크게 좌우되는 전기비저항 또한 변하게 된다. 따라서 이 연구에서는 입자배열과 입자크기 변화에 따른 정수위 투수 시험과 전기비저항 측정을 실시하여 수리전도도와 전기비저항의 상관관계를 규명하였다.

첫 번째 실험(Case 1)에서 주문진표준사의 입자배열을 입방체 배열로부터 능면체 배열로 변화시켰을 때 전기비저항은 증가하였고 수리전도도는 감소하여 반비례 관계를 보였고, 두 번째 실험(Case 2)에서 입자크기를 증가시켰을 때 전기비저항과 수리전도도 둘 다 증가하여 결과적으로 비례 관계를 보였다.

결국 수리전도도와 전기비저항은 대수층을 구성하는 입자의 배열과 크기에 따라 그 상관관계가 달라졌으며, 또한 이 연구에서는 다루지 않았지만 분급에 따라서도 상관관계가 다르게 나타날 것을 예상할 수 있다. 그러나 같은 퇴적환경에서 형성되어 입자의 크기가 거의 동일한 대수층에 대해서는 첫 번째 실험 방법을 적용

해서 전기비저항과 수리전도도의 관계식을 구하여 현장 전기비저항 탐사 결과에 적용한다면 입자배열에 따른 수리전도도 분포를 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

이 연구에서는 대수층의 수리전도도와 전기비저항 사이의 상관관계를 명확히 밝혀 비교적 비용이 적게 들고 간편한 전기비저항 탐사로 대수층의 수리전도도를 구할 목적으로, 실내에서 주문진표준사와 유리구슬을 이용해서 입자배열과 입자크기를 변화시켜 정수위 투수 시험과 전기비저항 측정을 실시하였다. 그 결과, 입자크기가 동일하고 입자배열이 달라질 때 수리전도도가 증가함에 따라 전기비저항은 선형적으로 감소하고, 입자배열의 변화 없이 입자크기가 달라질 때 수리전도도가 증가함에 따라 전기비저항은 증가하나 그 증가 폭은 줄어드는 경향이 있었다. 이러한 결과로부터, 대수층의 수리전도도와 전기비저항의 관계는 입자크기와 입자배열 등 여러 가지 요소들로 인하여 복합적인 상관성을 가진다는 사실을 알 수 있었다.

최근 3차원 전기비저항 탐사가 일반화 되었고, 해석 및 영상화 기술이 발달되어 공간적인 전기비저항 분포를 도출할 수 있어, 대수층의 전기비저항 분포로부터 공간적인 수리전도도의 분포뿐만 아니라 대수층의 저류량을 평가하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(20112010300050)입니다.

참고문헌

- Allessandro, E. and Lemoine, Y. (1983) Détermination de la perméabilité des alluvions à partir de la prospection électrique. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, v.26, n.27 p.357-360.
- Archie, G.E. (1942) The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. Tech. Rep., 1422.
- Choi, S.H., Kim, H.S. and Kim, J.S. (2008) IP Characteristics of Sand and Silt for Investigating the Alluvium Aquifer. The Korean Society of Engineering Geology, v.18, n.4, p.423-431.
- Choi, S.H. (2009) IP characteristics of sand and clay for investigating the alluvium aquifer. M. Sc. Thesis Chungbuk Nat'l Univ. Korea.
- Heigold, P.C., Gilkeson, R.H., Cartwright, K. and Reed, P.C. (1979) Aquifer transmissivity from surficial electrical methods. Ground Water, v.17, p.338-345.
- Hwang, H.S., Lee, S.K., Ko, D.C., Kim Y.S. and Park I.H. (2000) Detection of sea-water intrusion caused by tidal action using DC resistivity monitoring. Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa, v.3, n.1, p.1-6.
- Jones, P.H. and Bufford, T.B. (1951) Electric logging applied to ground-water exploration. Geophysics, v.16 n.1 p.115-139.
- Kelly, W.E. (1977) Geoelectric sounding for estimating aquifer hydraulic conductivity. Ground Water, v.15, n.6, p.420-425.
- Khalil, M.A. and Santos, F.A.M. (2009) Influence of degree of saturation in the electric resistivity-Hydraulic conductivity relationship. Surveys in Geophysics, v.30, p.601-615.
- Kosinski, W.K. and Kelly, W.E. (1981) Geoelectrical soundings for predicting aquifer properties. Ground Water, v.19, n.2, p.163-171.
- Lee, J.H., Hamm, S.Y., Han, S.J., Ok, S.I., Cha, E.J., Cho, H.N., Choo, C.O. and Kim, M.J. (2011) Verifying rehabilitation and evaluation of bedrock wells using air-brush surging and explosive methods. The Korean Society of Engineering Geology, v.21, n.4, p.369-379.
- Lee, K.H., Choi, B.S. and Han, W.S. (1995) Relations between electrical and hydraulic properties of aquifer in the Ganam area. Korean Society of Soil and Groundwater Environment, v.2, n.2, p.78-84.
- Mazac, O. and Landa, I. (1979) On determination of hydraulic conductivity and transmissivity of granular aquifers by vertical electric sounding. Journal of Geological Sciences, v.16 p.123-139.
- Niwas, S. and Lima, O.A.L (2003) Aquifer parameter estimation from surface resistivity data. Ground Water, v.41, n.1, p.94-99.
- Park, S.G. (2004) Physical property factors controlling the electrical resistivity of subsurface. Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa, v.7, n.2, p.130-135.
- Park, S.G., Kim, J.H. and Seo, G.W. (2005) Application of electrical resistivity monitoring technique to maintenance of embankments. Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa, v.8, n.2, p.177-183.
- Song, S.H., Chung, H.J. and Kwon, B.D. (2000) An interpretation of hydrogeologic structure using geophysical data from Chungwon area, Chungcheongbuk-Do. The Korean Society of Economic and Environmental Geology, v.33, n.4, p.283-293.
- Song, S.H., Kim, K.J., Park, S.G., Yong, H.H. and Cho, I.K. (2003) The result of laboratory test for investigating the relationship between hydraulic properties and electrical resistivity of soil. Annual autumnal Conference of Korean Society of Soil and Groundwater Environment, Jeju-island, Korea.
- Todd, D.K. and Mays, L.W. (2005) Groundwater hydrology. John Wiley & Sons, Inc., 636p.
- Urish, D.W. (1981) Electrical resistivity-hydraulic conductivity relationships in glacial outwash aquifers. Water Resources Research, v.17, n.5, p.1401-1408.
- Worthington, P.F. (1975) Quantitative geophysical investigations of granular aquifers, Geophysical Surveys, v.3, p.313-366.