

낙동강변 실트질 모래의 수리전도도와 전기적 물성과의 관계

김수동¹ · 박삼규^{2*} · 함세영¹ · 오윤영¹

¹부산대학교 지구환경시스템학부

²한국지질자원연구원

A Relationship between Hydraulic Conductivity and Electrical Properties of Silty Sand on the Riverside of the Nakdong River

Soo-Dong Kim¹ · Samgyu Park^{2*} · Se-Yeong Hamm¹ · Yun-Yeong Oh¹

¹Division of Earth Environmental System, Pusan National University

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT

Hydraulic conductivity is an important parameter, representing permeable property of the groundwater in aquifers, in the issues of groundwater development, groundwater contamination, and groundwater flow, etc. We estimated a relationship between hydraulic conductivity and electrical properties (formation factor, chargeability, and time constant) of silty sand in the laboratory. For this study, we conducted grain size analysis, constant head permeameter test, and measured electrical resistivity and spectral induced polarization of silty sand samples collected from the riverside alluvium of the Nakdong River in Nogok-ri area, Dasan-myeon, Goryeong-gun in Gyeongbuk Province, Korea. In the laboratory test, we used soil samples of approximately uniform porosity with 0.5% error range, and kept the electrical resistivity of pore water with 100 ohm-m. As a result, the relationship between effective particle size and hydraulic conductivity agrees fairly well with the existing empirical formulas. Hydraulic conductivity was correlated with formation factor, chargeability, and time constant: hydraulic conductivity increased with increasing formation factor and time constant as well as with decreasing chargeability.

Key words : Hydraulic conductivity, Formation factor, Spectral induced polarization (SIP), Chargeability, Time constant

1. 서 언

대수층의 수리전도도 분포 파악은 지하수 유동과 오염원의 이동을 예측하기 위해서 매우 중요하다. 최근에는 강변여과 및 인공함양과 관련하여 충적 대수층에서의 수리전도도 분포를 파악하는 것이 수자원의 효율적 이용을 위한 중요한 사안으로 주목 받고 있다.

일반적으로 대수층의 수리전도도는 현장수리시험(양수시험, 순간충격시험, 수압시험, 추적자시험 등)과 실내투수시험으로 구할 수 있다. 현장수리시험은 비교적 넓은 지역의 수리전도도를 파악하기 위한 것들로서, 다수의 관정 설치와 많은 비용 그리고 시간이 요구된다. 또 다른 방법으로 핵자기공명(Nuclear Magnetism Resonance(NMR))

등의 지구물리검층 방법을 이용하여 수리전도도를 구할 수 있다(Tong et al., 2004).

한편 지하의 전류 흐름과 관계되는 특성을 파악하기 위한 전기탐사에는 전기비저항탐사, 유도분극탐사 등이 있으며, 지표에서 웨너(wenner) 배열이나 단극(pole-pole) 배열, 쌍극자(dipole-dipole) 배열 등 탐사 목적에 맞는 전극 배열법을 적용하여, 광범위한 지역에 대한 지반의 전기적 물성을 비교적 적은 비용으로 빠른 시간 내에 파악할 수 있다는 장점이 있다. 지하수는 대수층 내에서 연결된 공극을 통해 흐르고, 포화대의 연결된 공극을 통해 전류가 잘 흐르기 때문에 포화대의 수리전도도와 전기적 물성 사이에는 높은 상관성을 가진다. 따라서 수리전도도와 전기적 물성의 정량적인 상관관계를 규명하면, 전기탐사를 통

*Corresponding author : samgyu@kigam.re.kr

Received : 2014. 2. 17 Reviewed : 2014. 4. 16 Accepted : 2014. 4. 16

Discussion until : 2014. 8. 31

해 적은 비용과 시간으로 대수층의 수리전도도를 구할 수 있을 것이다. 지금까지 공극의 크기나 비표면적과 같은 수리전도도와 관련된 중요한 요소들과 전기적 물성의 관계에 대한 많은 연구가 이루어졌으며, 특히 유도분극(Induced Polarization, IP), 광대역 유도분극(Spectral Induced Polarization, SIP) 탐사는 수리전도도를 추정하는데 유용한 탐사법이 될 수 있다(Borner et al., 1996; Slater and Lesmes, 2002; Kemna et al., 2004; Binley et al., 2005; Slater, 2007; Jougnot et al., 2010).

우리나라에서는 현재까지 충적층의 수리전도도와 전기적 성질의 관련성에 대한 연구가 많지 않으며, 특히 수리전도도와 광대역 유도분극의 관련성에 대한 연구는 전무하다. 다만 Kim et al.(2013)은 표준사와 유리구슬을 이용하여 수리전도도와 전기비저항의 관계를 연구한 바 있다. 표준사와 유리구슬은 대부분이 SiO₂로 이루어져 있기 때문에 공극을 채우고 있는 전해질 수용액을 따라 전류가 흐른다. 이와 같이 일정한 전기전도도의 수용액으로 포화된 시료의 전기비저항은 공극률에 의해 크게 좌우된다(Park, 2004). 그러나 점토나 실트가 섞여 있는 경우에는 입자를 통해서도 전류가 잘 흐르기 때문에, 공극률뿐만 아니라 입자의 크기와 점토의 함량에 의해서 전기비저항이 달라질 수 있다. 따라서 공극률에 영향을 받을 때는 전기비저항과 수리전도도가 반비례관계를 보이지만, 점토나 실트의 함량이 많을 때는 전기비저항과 수리전도도가 비례관계를 나타낸다. 유도분극 반응 측정에 의한 전기적 물성인 충전율(chargeability)과 시간상수(time constant)는 공극률에 영향을 받지 않고 입자크기와 점토의 함량에 영향을 받으므로(Revil and Florsch, 2010; Reynolds, 2011), 점토나 실트의 함량이 많을 때는 수리전도도와 충전율 및 시간상수와의 관계가 중요하다. 비광화대에서 분극현상은 점토에 의해 크게 발생하며(Reynolds, 2011), 점토가 없는 모래에서도 전해질과 입자 사이의 전기 이중층

(electrical double layer)에 의하여 분극현상이 발생할 수 있다(Revil and Florsch, 2010). 그러나 점토가 없는 규질 모래에서는 입자 크기에 따라 비표면적이 변하기 때문에 유도분극 효과도 달라진다(Koch et al., 2011).

본 논문에서는 경북 고령군 다산면 노곡리의 낙동강 본류에 인접한 충적층의 실트질 모래를 대상으로 정수두 투수시험, 전기비저항과 광대역 유도분극 반응 측정 등의 실내실험을 수행하여 수리전도도와 전기적 물성(전기비저항, 충전율, 시간상수) 사이의 상관관계를 밝히고자 하였다.

2. 실험 절차

2.1. 시료 채취

본 연구를 위하여 경상북도 고령군 다산면 노곡리 일원(위도 35° 50' 16.5"~35° 50' 56.4", 경도 128° 24' 21.32"~128° 26' 21.92")의 낙동강 본류에 가까운 연구지역에서 실트질 모래를 채취하였다(Fig. 1). 연구지역은 낙동강이 남쪽 방향으로 흐르다가 지형에 의하여 급격하게 동쪽으로 방향이 꺾이는 지역으로서 낙동강변에 동서 방향으로 약 4 km 그리고 남북 방향으로 약 1 km 정도 발달된 충적층 지역이다. 시료는 총 여섯 지점(NG-1 ~ NG-6)에서 지표의 성토층을 걷어낸 후 1 m 심도에서 채취하였다. 시료채취 지점은 서로 약 50 m 떨어져 있다.

2.2. 입도분석

전기비저항뿐만 아니라 충전율과 시간상수는 점토의 함량과 입자크기에 영향을 받기 때문에, 비교 및 검증하기 위한 입도분석을 실시하였다. 입도 분석은 Malvern Instruments 사의 Mastersizer 2000을 이용하였다. 이 장비는 광회절법을 이용하여 0.02~2,000 μm의 범위를 가지는 입자에 대하여 분석이 가능하다. 데이터의 신뢰도를 높이기 위하여 각 시료당 6 회 측정 후 평균값을 이용하였

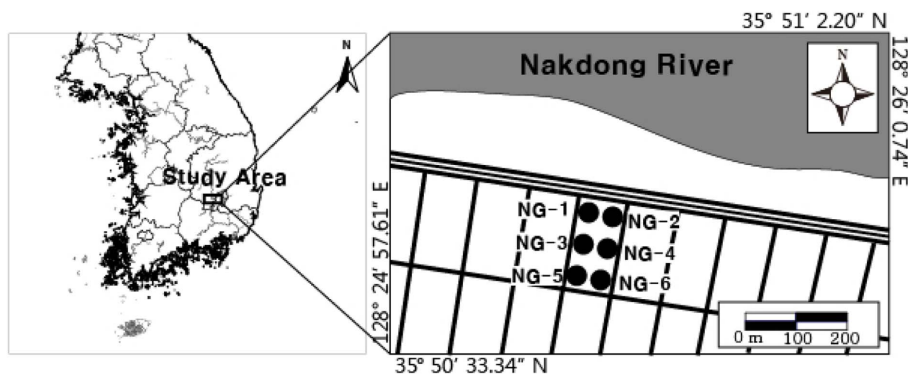


Fig. 1. Locations of the soil samples.

으며, 점토나 실트와 같은 작은 입자에 영향을 많이 받기 때문에 누적 통과 백분을 10%에 해당하는 유효입경(d_{10})을 구하여 제시했다.

2.3. 정수두 투수시험

본 연구에서 수리전도도는 사질토에 적용되는 정수두 투수시험을 이용하였다. 정수두 투수시험장치는 Todd and Mays(2005)의 정수두 투수시험방법을 바탕으로 직접 제작하였다(Fig. 2). 정수두 투수시험을 위하여, 우선 교란된 시료를 시료통에 넣고 공급수조에 물을 공급하면 물이 호스를 통하여 시료통을 통과한 후 배출수조에서 일정수두를 형성한 후 메스실린더로 배출시킨다. 실험이 진행되는 동안 공급수조에 물을 지속적으로 공급하여 물이 넘치는 상태를 유지함으로써 공급수조와 배출수조의 수위차를 일정하게 유지시킨다. 수리전도도 $K(\text{cm}/\text{sec})$ 는 $t(\text{sec})$ 시간 동안 시료통을 통과한 유량 $V_w(\text{cm}^3)$ 을 측정하여 식 (1)에 대입하여 계산하였다.

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

이때, 시료의 길이 $L_s(\text{cm})$ 와 시료의 단면적 $A_s(\text{cm}^2)$, 수위차 $h(\text{cm})$ 는 일정값이며, 수리전도도는 각 시료 별로 총 5회씩 실시하여 평균값을 구하였다.

투수시험을 위하여 시료통에 시료를 채울 때, 모든 시료에 대해 동일하게 층다짐을 실시하여 공극률의 오차를 $\pm 0.5\%$ 이내로 조절하였다. 또한 물의 단위중량이 $1 \text{ ton}/\text{m}^3$ 이라는 점을 이용하여, 건조 시료의 무게와 포화 시료의 무게 그리고 시료통의 부피를 측정하여 식 (2)에 적용시켜 공극률을 구하였다.

$$\frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{total}} = \frac{V_{pore}}{V_{total}} \tag{2}$$

여기서 W_{sat} 는 포화 시료의 무게이고, W_{dry} 는 건조 시료의 무게, W_{total} 은 시료통을 가득 채우는 물의 무게이며, V_{pore} 는 공극의 부피, V_{total} 은 시료통 전체의 부피이다.

2.4. 전기비저항 및 광대역 유도분극 반응 측정

시료의 전기비저항과 광대역 유도분극 반응을 측정하기 위하여 측정장비를 직접 제작하였다(Fig. 3). 이 측정시스템은 원통에 담긴 시료의 전기비저항과 광대역 유도분극을 측정하기 위한 것으로, 시료원통 안쪽 벽 중앙에 5 cm의 간격으로 수평하게 원형의 구리선이 들어가도록 홈을 파서 전위전극 한 쌍(p_1, p_2)을 설치하였으며, 시료 원통

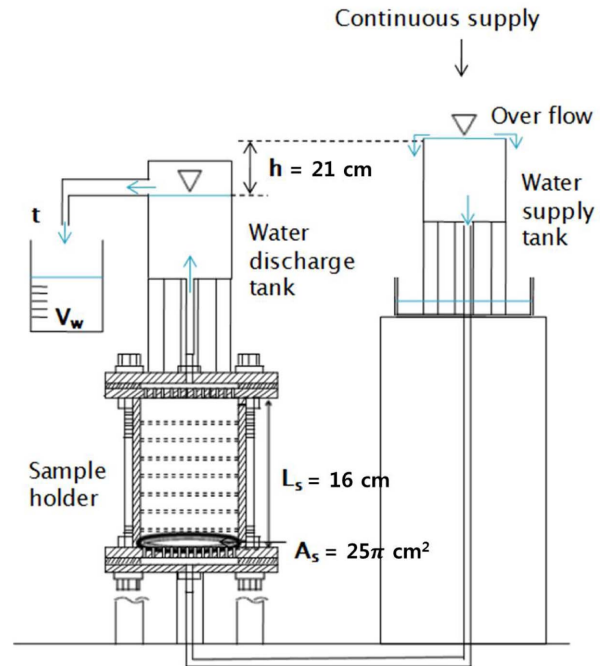


Fig. 2. Scheme of constant head permeameter (Kim et al., 2013).

의 양 끝에 직경 125 μm 인 Stainless steel mesh를 설치하여 전류 전극(c_1, c_2)으로 사용하였다. 시료를 포화시키는 수용액은 탈이온수에 NaCl을 용해시켜서 만들었으며, 수용액의 전기비저항은 일반적인 지하수의 범위 내에 있는 100 ohm-m로, 수용액의 온도는 21.9°C로 일정하게 유지하였다. Handy Viewer Mini-OHM(OYO Co.) 송·수신기를 장착한 전기비저항 측정기는 10~1,000 μA 범위의 정전류 방식으로 직류 구형과 전류를 송신한다. 그리고 LCD화면으로 전류 및 전위 파형을 확인하면서 송신 전류와 전위차(mV)를 기록한다. 이 실험에서는 전류 전극을 통하여 1 mA의 직류 전류를 보내고 전위 전극에서 전위차를 측정하였으며, 식 (3)을 이용하여 전기비저항 ρ_l 을 계산하였다.

$$\rho_l = \frac{A}{L} \cdot \frac{\Delta V}{I} \tag{3}$$

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

광대역 유도분극의 측정 시스템은 전기비저항 측정 시스템과 동일하며 측정 장비는 Solartron Analytical사의 Impedance Analyzer이다. 이 장비는 정전류 방식으로 $10^{-2} - 10^6 \text{ Hz}$ 주파수 대역의 교류를 송신할 수 있다. 본 실험에서는 0.1 mA의 전류를 보내고 $10^{-1} - 10^6 \text{ Hz}$ 주파수대역에서 임피던스와 위상차를 측정하였다.

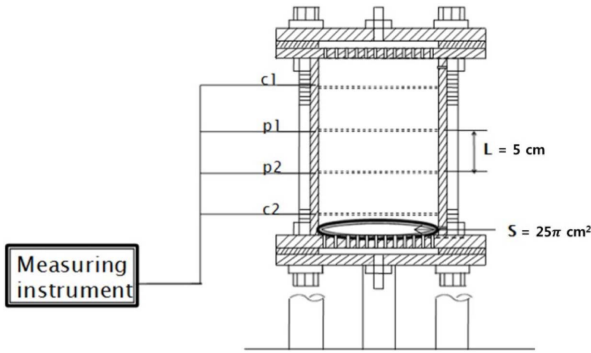


Fig. 3. Scheme of electrical property measurement system (Kim et al., 2013).

3. 실험 결과

3.1. 수리전도도와 형상계수

채취한 시료로 입도분석을 실시한 후(Fig. 4), 유효입경 (d_{10})을 구하였다. 정수두 투수시험으로 구한 시료의 수리 전도도(K)는 $4.39E-04 \sim 6.24E-03$ cm/sec의 범위를 가지며, 유효입경(d_{10})은 $0.00532 \sim 0.01492$ mm의 범위를 가진다. Hazen이 제시한 수리전도도(K)와 유효입경(d_{10})의 관계식 (식 (4))으로부터(Hazen, 1972, as cited in fetter, 2001) 형상계수 C 는 다음의 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$K = Cd_{10}^2 \tag{4}$$

$$C = \frac{K}{d_{10}^2} \tag{5}$$

본 연구에서 실트질 모래의 형상계수 C 는 23.69로 산정되었다(Fig. 5). 형상계수 C 는 입자의크기, 분급, 다짐 정도에 따라 달라지게 되며, 일반적으로 분급이 불량한 세립질 모래에서 분급이 양호한 조립질 모래에 이르기까지 약 40~150의 값을 가진다(Fetter, 2001). 본 연구에서는 C 값이 23.69로 나타났으며, 이는 실트질 모래에 합리적인 값으로 판단된다.

한편 모든 시료의 다짐을 동일하게 실시한 결과, 공극률은 NG-1부터 NG-6까지 순서대로 각각 37.42%, 37.38%, 37.23%, 37.32%, 36.94%, 37.11%으로 나타났으며, 0.5% 이내의 매우 작은 차이를 보여, 공극률에 의한 영향은 거의 없거나 아주 미세할 것으로 판단된다.

3.2. 지층비저항계수, 총전성 및 시간상수 산정

추정된 포화 시료의 전기비저항과 공극수의 전기비저항을 식 (5)에 적용시켜 지층비저항계수 F 를 구할 수 있다

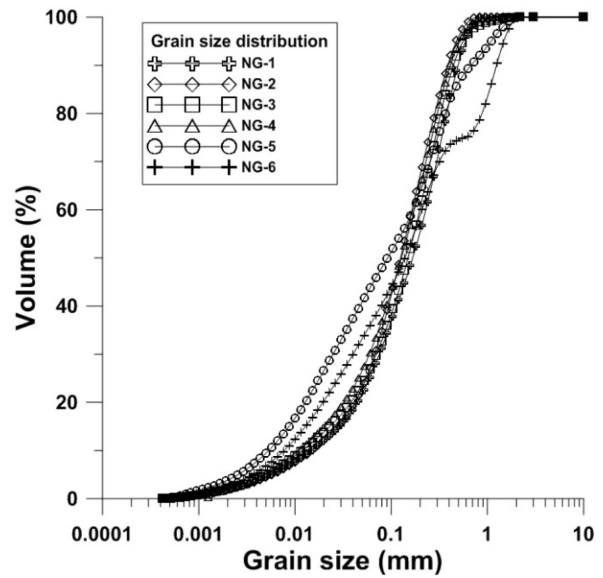


Fig. 4. Grain-size distribution curves of the samples.

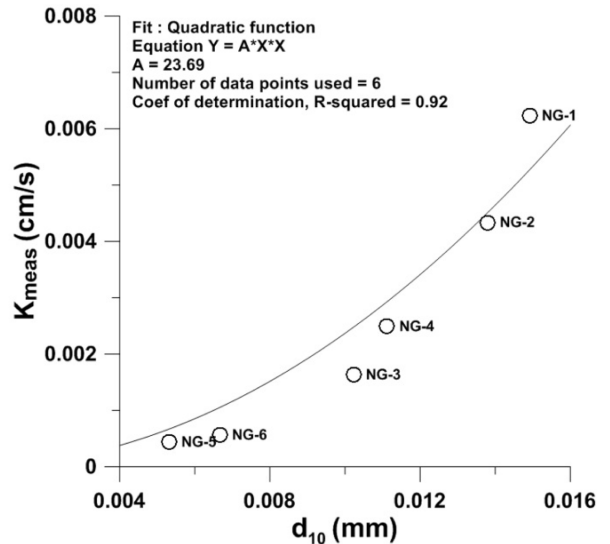


Fig. 5. Plot of hydraulic conductivity (K) vs. effective grain size (d_{10}).

(Archie, 1942).

$$F = \frac{\rho_t}{\rho_w} = an^{-m} \tag{6}$$

여기서 ρ_t 는 포화시료 전체의 전기비저항, ρ_w 는 공극수의 전기비저항, a 와 m 은 각각 왜곡도(tortuosity factor)와 고결계수(cementation factor)로 공극의 기하학적 형태와 고결의 정도에 따라 달라지는 계수이며, n 은 지층의 공극률이다.

다음으로 광대역 유도분극 반응을 측정하여 Dias

model에 적용시켜 포화 시료의 충전성과 시간상수를 구하였다. 교류 전류를 흘려보낼 때 시료 전체의 전기저항을 나타내는 임피던스 ρ 는 식 (7)으로 나타낼 수 있고, 유도분극 효과의 영향력을 나타내는 충전율 m 은 R 과 R_s 를 이용한 식 (8)으로 구할 수 있으며, 시간상수 τ 는 유도분극 효과에 의해 충전된 전하가 완전히 방전되는데 걸리는 시간경과를 나타내는 상수로서 식 (9)와 같다(Dias, 1972, 2000).

$$\rho = \rho_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{1 + i\omega\tau(1 + \mu^{-1})} \right) \right] \quad (7)$$

$$m = \frac{(\rho_0 - \rho_\infty)}{\rho_0} = \frac{R}{R + R_s} \quad (8)$$

$$\tau = rC_{dl} \quad (9)$$

여기서, ρ_0 는 교류 주파수가 0일 때의 전기저항(ohm)이고, ρ_∞ 는 교류 주파수가 무한대일 때의 전기저항(ohm)이다. 그리고 R 은 연결된 공극을 통해 흐르는 전류에 대한 전기저항(ohm)이고, R_s 는 전기이중층의 전기저항(ohm)을 나타낸다. 또한, $i = \sqrt{-1}$ 이고, ω 는 각속도로 $2\pi f$, $\mu = i\omega\tau[1 + \eta(i\omega)^{-1/2}]$ 이다. 그리고 r 은 충전성을 가지는 성분의 전기저항(ohm)이고, C_{dl} 은 이 성분의 전기용량이다.

Dias model은 광석 및 점토와 전기이중층에 의해 발생하는 유도분극 반응을 해석하는데 유용한 모델로서, 기존의 연구에 많이 이용된 Cole-Cole model(Cole and Cole, 1941)에 비하여 광대역 주파수에 따른 위상차의 변화 양상이 계산된 model값에 보다 잘 일치하는 결과를 보였다.

계산된 포화 시료의 지층비저항계수는 1.37~2.36, 충전성은 0.146~0.206의 범위를 가지고, 시간상수는 2.31E-06~1.81E-05이다(Table 2). 또한 유효입경이 클수록 대체로 지층비저항계수는 커지고, 충전성은 작아지며, 시간상수는 커지는 것으로 나타났다.

3.3. 수리전도도와 전기적 물성의 상관관계

정수두 투수시험을 통해 측정된 포화된 실트질 모래의

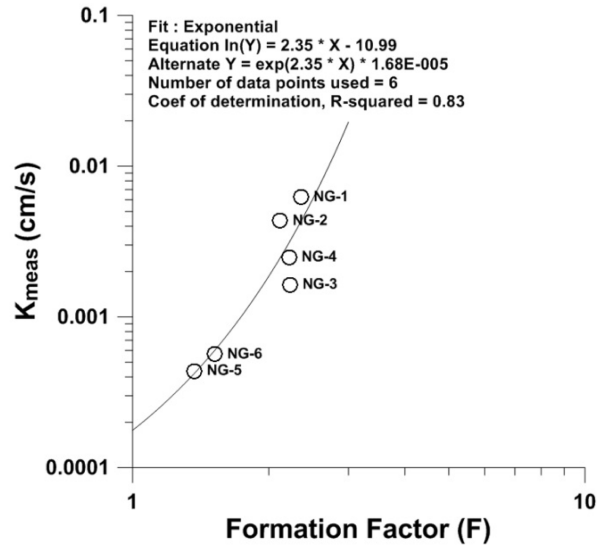


Fig. 6. Relation of hydraulic conductivity (K) and formation factor (F).

수리전도도와 지층비저항계수의 상관관계를 그래프로 나타낸 결과(Fig. 6), 지층비저항계수가 증가할수록 대체로 수리전도도가 지수함수적으로 증가하는 비례관계를 보였고, 결정계수는 $R^2 = 0.83$ 으로 비교적 높은 상관성을 나타냈다.

$$K = 1.68 \cdot 10^{-5} e^{2.35F} \quad (10)$$

그러나 그래프 상에서는 지층비저항계수의 값이 2가 넘는 그룹(NG-1~NG-4)과 2 이하의 그룹(NG-5, NG-6)으로 분리되는 양상을 보인다. NG-5, NG-6은 유효입경의 크기가 나머지 시료에 비하여 작고 점토의 함량이 많기 때문에 다른 양상을 보이는 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 Kelly(1977)와 Kosinski and Kelly (1981), Urish(1981), Alessandrello and Lemoine(1983)의 현장의 충전 대수층에 대한 수리전도도와 지층비저항계수가 비례하는 결과와 유사하다. 그러나, Heigold et al.(1979)는 현장의 충전 대수층의 수리전도도와 지층비저

Table 1. Measurement results of hydraulic conductivity, porosity, and effective grain size for the soil samples

Sample no.	Measured K (cm/sec)	Standard Deviation	Porosity (%)	d_{10} (μ m)	Coordinates
NG-1	6.24E-03	6.68E-05	37.42	14.92	35° 50' 41.93" N 128° 25' 27.65" E
NG-2	4.35E-03	6.20E-04	37.38	13.80	35° 50' 41.67" N 128° 25' 29.77" E
NG-3	1.64E-03	8.00E-05	37.23	10.23	35° 50' 42.97" N 128° 25' 27.55" E
NG-4	2.49E-03	7.60E-05	37.32	11.12	35° 50' 42.50" N 128° 25' 29.72" E
NG-5	4.39E-04	1.93E-04	36.94	5.32	35° 50' 44.55" N 128° 25' 27.55" E
NG-6	5.66E-04	2.20E-05	37.11	6.67	35° 50' 43.63" N 128° 25' 33.12" E

Table 2. Measurement results of electrical properties for the soil samples

Sample	Formation Factor	Chargeability	Time constant
NG-1	2.36	0.146	1.81E-05
NG-2	2.12	0.156	1.67E-05
NG-3	2.23	0.186	1.08E-05
NG-4	2.22	0.171	8.46E-06
NG-5	1.37	0.196	5.79E-06
NG-6	1.52	0.206	2.31E-06

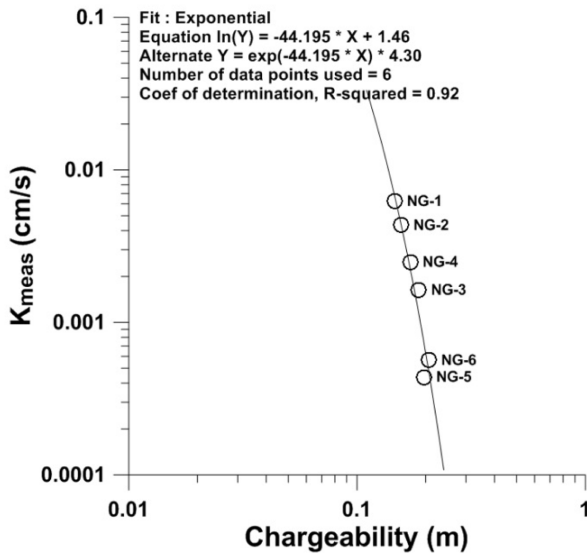


Fig. 7. Relation of hydraulic conductivity (K) and chargeability (m).

항계수가 반비례한다는 연구결과를 제시하기도 하였다. 이렇게 상이한 결과가 나타나는 이유는 Heigold et al.(1979)의 연구에서는 동일한 지역 내에서도 상이한 퇴적환경에 의한 퇴적물의 분급 차이가 커서 공극률이 26~39%로 큰 차이를 보여 공극의 영향을 많이 받았기 때문이다. 반면, 본 연구를 포함하여 수리전도도와 지층비저항계수가 비례관계를 나타내는 기존의 연구들은 비슷한 정도의 분급에서 입자크기의 영향을 많이 받았기 때문인 것으로 판단된다.

실트질 모래의 수리전도도와 광대역 유도분극 반응 측정을 통해 산정한 충전성의 상관관계를 보면(Fig. 7), 충전성이 증가할수록 수리전도도는 지수함수적으로 감소하는 반비례관계를 보이며, 결정계수는 $R^2 = 0.92$ 로 상관성이 높게 나타났다.

충전성은 수리전도도와 직접적인 연관성은 없지만, 점토함량이 많을수록 수리전도도는 감소하며, 충전성은 증가하는 것으로 해석된다.

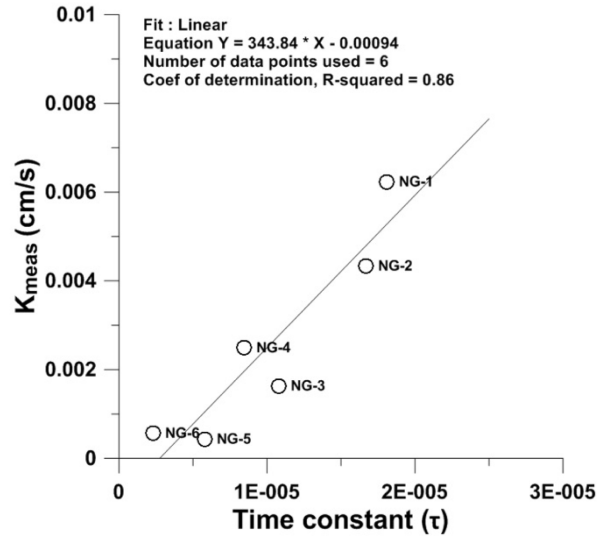


Fig. 8. Relation of hydraulic conductivity (K) and time constant (τ).

실트질 모래의 수리전도도와 광대역 유도분극 반응 측정으로 산정한 시간상수의 상관관계를 보면(Fig. 8), 시간상수가 증가할수록 대체로 수리전도도 또한 선형적으로 증가하는 비례관계를 보였으며, 결정계수는 $R^2 = 0.86$ 으로 높은 상관성을 나타냈다.

$$K = 343.84 \tau - 0.00094 \quad (12)$$

Binley et al.(2005)는 사암을 이용하여 수리전도도와 시간상수의 상관관계를 연구하여 비례관계를 보이는 결과를 제시하였고, Koch et al.(2011) 또한 입자 크기 별 규사를 이용하여 수리전도도와 시간상수 사이에 비례관계를 나타내는 결과를 제시하였다.

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 100 ohm-m의 간극수로 포화시킨 낙동강변 충적층의 일정한 공극률($\pm 0.5\%$ 이내의 오차)을 가지는 실트질 모래의 수리전도도와 전기비저항, 광대역 유도분극 반응에 대한 실내실험을 통하여 수리전도도-지층비저항계수, 수리전도도-충전성, 수리전도도-시간상수의 상관관계를 분석하였다.

수리전도도와 지층비저항계수는 일정한 공극률을 가지는 실트질 모래에서 지수함수적 비례관계를 가지는 사실을 확인할 수 있었다. 기존의 연구에 의하면 미고결 지층의 수리전도도와 지층비저항계수의 상관관계는 일정하지 않으며 입도와 공극률, 간극수의 전기전도도 등에 따라 달라진다(Kelly, 1977; Heigold et al., 1979; Urish, 1981;

Kosinski and Kelly, 1981; Ponzini et al., 1983; Alessandrello and Lemoine, 1983; Frohlich et al., 1996). 따라서 수리전도도와 지층비저항계수의 관계는 분 급도, 다짐정도, 원마도 등에 의해 차이를 보일 수 있으며, 전기비저항을 통해 수리전도도 값을 추정하기 위해서는 퇴적환경과 간극수의 전기전도도 등이 동일한 조건에서만 가능할 것으로 판단된다.

유효입경의 크기에 따른 실트질 모래의 광대역 유도분 극 반응에서 수리전도도는 충전성과 지수함수적인 반비례 관계를 보였고, 수리전도도와 시간상수는 선형적인 비례 관계를 나타냈다. 충전성이나 시간상수는 공극률과 간극 수의 전기전도도보다는 입자의 비표면적과 유효입경에 더 큰 영향을 받으며, 따라서 전기비저항 보다는 수리전도도 와의 연관성이 높은 것으로 판단된다. 기존 연구에서는 수 리전도도와 충전율의 상관관계에 대한 직접적인 비교는 없었다. 다만, 입자크기에 따른 규사를 이용한 실험에서 수리전도도와 시간상수는 지수함수적 비례관계를 가지는 연구 결과가 있으며(Koch et al., 2011), 또한, Binley et al.(2005)는 28개의 사암 시료를 이용하여 수리전도도와 시간상수의 상관관계를 연구한 결과 지수함수적인 비례관 계를 보인 점이 본 연구 결과와 차이를 보인다. 실험에 사용한 시료의 종류가 다르기 때문에 서로 차이는 있지만 기존의 두 연구결과와 본 연구결과 모두 공통적으로 비례 관계를 나타내는 결과를 보였다.

본 연구에 의하면, 광대역 유도분극 측정을 통해 산정 되는 충전율과 시간상수는 점토의 함량 및 입자의 크기와 밀접한 관련이 있으며, 이는 수리전도도와 연관성을 가진 다. 또한, 지층비저항계수와 수리전도도의 상관성보다 충 전성 및 시간상수와 수리전도도의 상관성이 더 큰 것으로 나타나며, 따라서 충전성 및 시간상수가 수리전도도를 추 정하는데도 유용한 인자라고 판단된다. 그러나, 보다 정확 한 수리전도도와 전기적 물성의 상관관계를 규명하기 위 해서는 더 많은 시료에 대한 실험과 함께 다양한 변수(분 급도, 다짐정도, 원마도 등)를 고려해야 할 것이다.

사 사

이 논문은 2013년도 교육부의 재원으로 한국연구재단 의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2013R1A1A 2058186)이며, 또한 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연 구 과제(20112010300050)입니다.

References

- Alessandrello, E. and Lemoine, Y., 1983, Determination de la permeabilite des alluvions a partir de la prospection electrique, *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, **26**(27), 357-360.
- Archie, G.E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. AIME*, **146**, 54-62.
- Binley, A., Slater, L., Fukes, M., and Cassiani, G., 2005, Relationship between spectral induced polarization and hydraulic properties of saturated and unsaturated sandstone, *Water Resour. Res.*, **41**(12), W12417
- Borner, F.D., Schopper, J.R., and Weller, A., 1996, Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements, *Geophysical Prospecting*, **44**, 583-602.
- Cole, K.S. and Cole, R.H., 1941, Dispersion and absorption in dielectrics. I. Alternating current characteristics, *J. Chem. Phys.*, **9**, 341-352.
- Dias, C.A., 1972, Analytical model for a polarizable medium at radio and lower frequencies, *J. Geophys. Res.*, **77**(26), 4945-4956.
- Dias, C.A., 2000, Developments in a model to describe low-frequency electrical polarization of rocks, *Geophysics*, **65**(2), 437-451.
- Fetter, C.W., 2001, Applied Hydrogeology, 4th edition, Prentice Hall, 598 p.
- Frohlich, R.K., Fisher, J.J., and Summerly, E., 1996, Electric-hydraulic conductivity correlation in fractured crystalline bedrock: Central Landfill, Rhode Island, USA, *J. Appl. Geophys.*, **35**(4), 249-259.
- Heigold, P.C., Gilkeson, R.H., Cartwright, K., and Reed, P.C., 1979, Aquifer transmissivity from surficial electrical methods, *Ground Water*, **17**(4), 338-345.
- Jougnot, D., Ghorbani, A., Revil, A., Leroy, P., and Cosenza, P., 2010, Spectral induced polarization of partially saturated clay-rocks: a mechanistic approach, *Geophys. J. Int.*, **180**, 210-224.
- Kelly, W.E., 1977, Geoelectric sounding for estimating aquifer hydraulic conductivity. *Ground Water*, **15**(6), 420-425.
- Kemna, A., Binley, A., and Slater, L., 2004, Cross-borehole IP imaging for engineering and environmental applications, *Geophysics*, **69**, 97-107.
- Kim, S., Park, S., and Hamm, S.-Y., 2013, Relationship between hydraulic conductivity and electrical resistivity of standard sand and glass bead, *Econ. Environ. Geol.*, **46**(3), 215-220.
- Koch, K., Kemna, A., Irving, J., and Holliger, K., 2011, Impact of changes in grain size and pore space on the hydraulic conduc-
- J. Soil Groundw. Environ. Vol. 19(3), p. 39~46, 2014**

- tivity and spectral induced polarization response of sand, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **15**, 1785-1794.
- Kosinski, W.K. and Kelly, W.E., 1981, Geoelectrical soundings for predicting aquifer properties, *Ground Water*, **19**(2), 163-171.
- Park, S.G., 2004, Physical property factors controlling the electrical resistivity of subsurface, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa.*, **7**(2), 130-135.
- Ponzini, G., Ostroman, A., and Molinari, M., 1983, Empirical relation between electrical transverse resistance and hydraulic transmissivity, *Geoexploration*, **22**(1), 1-15.
- Revil, A. and Florsch, N., 2010, Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media, *Geophys. J. Int.*, **181**, 1480-1498.
- Reynolds, J.M., 2011, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd edition, WILEY, 709 p.
- Slater, L. and Lesmes, D.P., 2002, Electrical-hydraulic relationships observed for unconsolidated sediments, *Water Resour. Res.*, **38**(10), 31-1 - 31-13.
- Slater, L., 2007, Near surface electrical characterization of hydraulic conductivity: From petrophysical properties to aquifer geometries-A review, *Surv. Geophys.*, **28**, 169-197.
- Todd, D.K. and Mays, L.W., 2005, *Groundwater hydrology*, 3rd edition, John Wiley & Sons Inc., 636 p.
- Tong, M., Wang, W., Li, L., Jiang, Y., Shi, D., 2004, Estimation of permeability of shaly sand reservoir from induced polarization relaxation time spectra, *J. Petrol. Sci. Eng.*, **45**, 1-10.
- Urish, D.W., 1981, Electrical resistivity-hydraulic conductivity relationships in glacial outwash aquifers, *Water Resour. Res.*, **17**(5), 1401-1408.