

사질토의 투수계수와 전기전도도 간의 상관관계

Relationship between Hydraulic Conductivity and Electrical Conductivity in Sands

김진욱¹ Kim, Jinwook
이창호³ Lee, Changho

추현욱² Choo, Hyunwook
이우진⁴ Lee, Woojin

Abstract

The aim of this study is to suggest a semi-empirical equation for estimating the hydraulic conductivity of sands using geoelectrical measurements technique. The suggested formula is based on the original Kozeny-Carman equation; therefore varying factors affecting the Kozeny-Carman equation were selected as the testing variables, and six different sands with varying particle sizes and particle shapes were used as the testing materials in this study. To measure both hydraulic and electrical conductivities, a series of constant head permeameter tests equipped with the four electrodes conductivity probe was conducted. Test results reveal that the effects of both pore water conductivity and flow rate in relation between hydraulic conductivity and formation factor (=pore water conductivity / measured conductivity of soil) of tested materials are negligible. However, because the variations of hydraulic conductivity of the tested sands according to particle sizes are significant, the estimated hydraulic conductivity using the formation factor varies with particle sizes. The overall comparison between the measured hydraulic conductivity and the estimated hydraulic conductivity using the suggested formula shows a good agreement, and the variation of hydraulic conductivity with varying Archie's m exponents is smaller compared with varying porosities.

요 지

본 연구에서는 이론적 고찰을 통해 Kozeny-Carman식을 변형하여 전기전도도 측정을 통한 사질토의 투수계수 추정식을 제안하였다. 제안된 예측식에 대한 실험적 검증을 위해 6종류의 사질토에 대하여 4개의 전극을 설치한 정수위 투수시험을 실시하였으며, 다양한 변수들 하에 시험을 진행하였다. 시험 결과, 사질토에서 흙 입자 표면을 통한 전기전도도는 미미하였으며, 간극수의 전기전도도가 투수계수와 formation factor에 미치는 영향은 제한적이었다. 흙 입자의 유효입경이 formation factor에 미치는 영향은 미미하였으나 투수계수에는 큰 영향을 주었다. 제안된 식을 활용하여 투수계수를 예측하기 위해서는 형상계수와 Archie's m에 대한 정보가 필요하여 error norm방법을 사용해 형상계수를 구하였다. 또한, 간극률을 변화시키며 측정된 formation factor를 사용하여 Archie's m을 구하였다. formation factor를 사용하여 계산한 투수계수를 측정값과 같이 도시한 결과, 계산된 투수계수는 측정된 투수계수와 유사한 값을 보여주

1 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 연구교수 (Research Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 정회원, 전남대학교 해양토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Marine and Civil Engrg., Chonnam National Univ., Tel: +82-61-659-7322, Fax: +82-61-659-7329, changho@jnu.ac.kr, Corresponding Author, 교신저자)

4 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 12월 31일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

었다. 기존 Kozeny-Carman식과 본 연구에서 제안하는 전기전도도를 이용한 투수식 간의 정량적인 비교를 위해, 정규화된 투수계수를 사용하여 형상계수, Archie's m , 간극률에 따른 정규화된 투수계수의 변화를 비교한 결과, 형상계수와 Archie's m 의 변화에 따른 정규화된 투수계수의 변화 폭에 비해, 간극률의 변화에 따른 정규화된 투수계수는 매우 큰 폭으로 변하였다. 따라서 본 연구에서 제안하는 전기전도도를 이용한 투수계수 예측식이 기존 Kozeny-Carman식보다 더 높은 신뢰도를 보일 것으로 판단된다.

Keywords : Formation factor, Hydraulic conductivity, Archie's equation, Sand, Constant head permeability test

1. 서론

흙 속에서 흐르는 지하수의 흐름은 침투, 압밀, 안정성 등 여러 지반공학적 문제들과 매우 밀접한 연관이 있으며, 이러한 지하수의 흐름을 평가하는 가장 중요한 인자는 투수계수(hydraulic conductivity)이다(Budhu, 2010). 투수계수는 댐 또는 제방의 설계에 있어서 침투 예방, 압밀침하량의 예측, 지하 공사를 하기 위한 가시철 벽의 치수 결정 등 다양한 토목구조물의 설계 및 시공에 있어서 중요하다(Budhu, 2010; Holtz et al., 2011).

투수계수를 측정하기 위한 실험방법은 크게 실내시험과 현장시험으로 나눌 수 있다. 실내시험은 현장시험보다 적은 시간이 소요되며, 시료 채취 비용을 제외하면 상대적으로 저비용이다. 하지만 실내시험은 시료의 재성형이 필요하기 때문에 실제 현장의 상태(구조, 응력상태, 간극률 등)를 반영하기 어렵고 실내시험 결과로부터 얻은 투수계수는 소형의 시료에 대한 결과로 현장을 대표하는 대표성의 문제가 발생한다(Olson and Daniel, 1981). 현장시험은 현장에서 시험을 진행하기 때문에 크기 효과(scale effect)의 문제가 발생하지 않는다. 하지만 투수계수를 측정하기 위한 현장시험은 관측공의 굴착이 필요하다. 따라서 실내시험과 비교하여 상대적으로 긴 시간과 고비용이 소요되어 경제적이지 못하다. 기존의 투수계수시험의 경우 한 지점에서 측정된 투수계수가 넓은 지역을 대표하는 문제점이 있다(Khalil and Santos, 2009). 그러나 전기전도도 또는 전기비저항 측정 등 물리탐사 방법은 비교적 지반교란효과가 적으며, 넓은 지역을 빠른 시간에 탐사할 수 있는 장점이 있다(Kelly and Frohlich, 1985; Gomez et al., 2010).

포화된 흙의 전기전도도는 흙 입자 자체를 통한 전도, 흙 속의 간극을 통한 전도, 흙 입자 표면을 통한 전도의 합이다. 대부분의 흙 입자는 부도체(nonconductor)이며

사질토의 경우, 점토와 달리 흙 입자의 비표면적이 작기 때문에 흙 입자 표면을 통한 전도는 무시할 수 있다(Choo and Burns, 2014). 따라서 포화된 사질토의 전기전도도는 투수계수와 마찬가지로 흙 속의 간극을 통한 전도가 주를 이루게 되며, 이러한 유사성을 바탕으로 전기전도도(electrical conductivity)와 투수계수(hydraulic conductivity)의 연관성을 예측하고자 하는 많은 연구가 진행되어 왔다(Archie, 1942; Urish, 1981; Kelly and Frohlich, 1985; Gomez et al., 2010; Choo et al., 2014; Kim et al., 2014).

현재까지 투수계수와 formation factor(=간극수의 전기전도도 / 측정된 흙의 전기전도도) 사이의 상관관계를 확인하기 위해 다양한 연구가 진행되어 왔다. 하지만 기존의 일부 연구는 투수계수와 formation factor의 관계를 비례(Kosinski and Kelly, 1981; Kelly and Frohlich, 1985; Abu-Hassanein et al., 1996) 라고 주장한 반면 일부의 연구는 반비례의 관계(Archie, 1942; Rinaldi and Cuestas, 2002; Gomez et al., 2010)를 보인다고 주장하였다. 이는 formation factor가 흙의 종류 및 크기 등 흙의 특징에 영향을 받기 때문이다(Urish, 1981; Yoon et al., 1998). 또한 Khalil and Santos(2009) 및 Gomez et al.(2010)은 흙 입자의 크기나 형상을 고려하지 않아 formation factor를 사용해 투수계수를 예측함에 있어 한계를 보였다.

본 연구에서는 흙 입자의 입경과 형상에 따른 전기비저항과 투수계수의 상관관계를 파악하기 위해 6종류의 사질토를 사용하고 4개의 전극을 장착한 정수위 투수셀을 이용하여 전기전도도와 투수계수를 동시에 관측하였다. 이론적 고찰을 통해 전기전도도를 사용한 사질토의 투수계수 예측식을 제시하였으며, 시험 결과를 바탕으로 제안된 투수계수 예측식의 유효성을 판단하였다.

2. 이론적 배경

2.1 Kozeny-Carman 식

기준에 제안된 투수계수 예측식 중, 사질토에서는 Poiseuille's law 부터 유도된 Kozeny-Carman 식이 널리 쓰이고 있으며, Kozeny-Carman 식은 사질토에서 비교적 정확한 투수계수 예측값을 준다고 알려져 있다(Chapuis and Aubertin, 2003; Mitchell and Soga, 2005). Kozeny-Carman 식은 식 (1)과 같이 투수계수 산정에 있어서 흙의 간극률(n), 구조, 비틀림(T_0), 공극의 형상계수(C_s), wetted surface per unit volume of particle(S_0)과 같은 흙의 물리적 특성을 고려할 수 있으며 물의 단위중량(γ_w) 및 물의 점성계수(μ)를 고려할 수 있다(Carrier 2003).

$$K = \frac{\gamma_w}{\mu} \cdot \frac{1}{C_s \cdot S_0^2 \cdot T_0^2} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot S^3 \quad (1)$$

흙이 완전 포화되어 있다고 가정하면 $S = 1$ 이며 식 (1)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{\gamma_w}{\mu} \cdot \frac{1}{C_s \cdot S_0^2 \cdot T_0^2} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (2)$$

여기서, S_0 는 흙 입자가 물에 젖어있을 때 흙 입자 표면이 물에 젖어있는 면적과 흙 입자의 부피의 비로서 흙 입자의 크기나 흙의 구조에 의해 영향을 받는다. 흙이 완전 포화되어 있다고 가정한다면 S_0 는 흙의 비표면적(total specific surface area = 입자의 면적 / 입자의 부피)과 비교해 작거나 유사한 값을 갖는다(Mitchell and Soga, 2005).

흙 입자가 완전한 구형이라면 $S_0 \approx 6 / \text{입경}(D)$ 로 표현되며 공극의 형상계수(pore-shape factor, C_s)는 2.5의 값으로 가정할 수 있다(Mitchell and Soga 2005). 하지만 흙은 다양한 입도분포(particle distribution)와 형상을 가지므로 흙의 S_0 를 유추하기 위하여 흙의 입도분포를 고려한 유효입경(D_{eff})을 이용해야 한다(Carrier 2003; Chapuis and Aubertin, 2003). 흙 입자의 유효입경은 입도분포를 고려하여 식 (3)과 같이 계산할 수 있다(Carrier, 2003; Mitchell and Soga, 2005).

$$D_{eff} = 100\% / \left[\sum (f_i / (D_{ave,i})) \right] \quad (3)$$

여기서 f_i 는 입도분석 결과를 바탕으로 두개의 연속적인 체에 남아있는 흙의 전체 대비 무게비를 나타내며, D_{ave} 는 두개의 연속적인 체에 존재하는 흙 입자의 평균 직경을 의미하며 입도 분포가 로그선형관계(log-linear)이면 다음과 같이 계산할 수 있다(Carrier, 2003).

$$D_{ave,i} = D_{li}^{0.404} \times D_{si}^{0.595} \quad (4)$$

또한, S_0 를 구하기 위하여 입자의 모양을 고려해야 하며 이는 형상계수로 나타낼 수 있다. 입자의 형상계수(shape factor, SF)는 흙 입자가 구형(sphere)일 때 6.0의 값을 갖으며 입자의 모난(angular) 정도가 커질수록 증가하여 8.4까지의 값을 갖는다고 알려져 있다 따라서 S_0 는 유효입경과 형상계수를 고려하여 식 (5)와 같이 계산할 수 있다(Fair and Hatch, 1933; Loudon, 1952; Carrier, 2003).

$$S_0 = SF / D_{eff} \quad (5)$$

따라서 입자의 형상 및 입경을 고려한 Kozeny-Carman 식은 식 (6)과 같이 정리할 수 있다(Carrier, 2003; Mitchell and Soga, 2005).

$$K = \frac{\gamma_w}{\mu} \cdot \frac{1}{C_s \cdot T_0^2} \cdot \frac{D_{eff}^2}{SF^2} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (6)$$

2.2 흙의 전기전도도(electrical conductivity in soil)

전류가 흐르는 방향과 흙 입자의 배열 방향이 평행하다고 가정을 하면 흙의 전기전도도(σ_{mix})는 흙 입자를 통한 전도(σ_p), 간극수를 통한 전도(σ_w), 흙 표면을 통한 전도(σ_s)의 세 가지 항의 합으로 식 (7)과 같이 정리할 수 있다(Klein and Santamarina, 2003; Choo and Burns, 2014).

$$\sigma_{mix} = \sigma_p \cdot (1-n) \cdot \left(\frac{L}{L_p} \right)^2 + \sigma_w \cdot \frac{n}{T^2} + \sigma_s \cdot \frac{1-n}{T^2} \cdot S_a \cdot G_s \cdot \rho_w \quad (7)$$

여기서 L 은 전류가 흐르는 직선거리, L_p 는 흙 입자 자체를 통한 전류의 총 길이, S_a 는 질량 기준 비표면적 (=면적/질량), G_s 는 흙의 비중, ρ_w 는 물의 밀도를 의미한다. 식 (7)의 첫번째 항은 흙 입자 자체를 통한 전도를 의미하는데 대부분의 흙 입자 자체는 부도체이므로 무시할 수 있어 식 (7)의 첫번째 항을 소거하면 다음과 같이 정리할 수 있다(Choo and Burns, 2014).

$$\sigma_{mix} = \sigma_w \cdot \frac{n}{T^2} + \sigma_s \cdot \frac{1-n}{T^2} \cdot S_a \cdot G_s \cdot \rho_w \quad (8)$$

점토의 경우에는 일반적으로 흙 입자의 비표면적이 매우 커서 입자 표면을 통한 전도를 무시할 수 없으며 (Choo and Burns, 2014), 포화도(degree of saturation), 기본 물성치에 따라 이중층수의 발달 여부가 다르기 때문에 점토의 다짐(compaction) 상태에 따라 동일한 점토에서도 상이한 전기전도도가 관측될 수 있다. 또한 위와 같은 성질로 인하여 사질토에 비해 점토는 간극수의 전기전도도에 더 큰 영향을 받는다(Abu-Hassanein et al., 1996, Rinaldi and Cuestas, 2002).

하지만 사질토와 같이 입자의 비표면적이 매우 작은 경우 흙 입자 표면을 통한 전도는 간극수를 통한 전도에 비해 매우 작다. 또한 간극수의 전기전도도가 높은 경우 흙 입자 표면을 통한 전도는 간극수를 통한 전도보다 매우 작아 무시할 수 있다. 따라서 사질토의 경우 식 (8)의 두번째 항 역시 무시할 수 있어 전기전도도(σ_{mix})는 간극수의 전도도(σ_w) 및 흙의 공극률(n)과 비틀림(T)의 항으로 식 (9)와 같이 간단하게 표현할 수 있다(Choo and Burns, 2014).

$$\sigma_{mix} = \sigma_w \cdot \frac{n}{T^2} \quad (9)$$

식 (9)와 같이, 측정된 흙의 전기전도도는 간극률과 비틀림 외에 간극수의 전도도(σ_w)에도 영향을 받는 것을 알 수 있다. Archie(1942)는 전기전도도 (σ_{mix})와 간극수의 전도도 (σ_w)의 비를 이용하여 formation factor (F)를 제안하였다.

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_{mix}} = F = n^{-m} \quad (10)$$

여기서 지수 m 은 shape factor, cementation factor, 또는 Archie's m 등으로 불리우며(Glover et al., 1997; Salem and Chilingarian, 1999; Jackson et al., 2007), 선행연구에 의하면 m 은 흙 입자의 형상, 입경, 흙의 종류 등에 영향을 받으며(Salem and Chilingarian, 1999), 사질토에서 m 은 일반적으로 1.3에서 1.6의 값을 갖는다고 알려져 있다(Archie, 1942; Jackson et al., 1978). 따라서 흙의 전기전도도 (σ_{mix})와 간극수의 전도도 (σ_w)의 비는 식 (10)과 같이 formation factor를 사용해 간극률의 지수함수로 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_{mix}} = F = \frac{T^2}{n} = n^{-m} \quad (11)$$

2.3 Formation factor를 이용한 투수계수 추정

식 (6)과 식 (11)을 연립하여 사질토에서의 전기비저항과 투수계수의 이론적 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K = \left(\frac{1}{C_{K-C}}\right) \cdot \left(\frac{\gamma_w}{\mu}\right) \cdot (D_{eff})^2 \cdot \left(\frac{1}{SF^2}\right) \cdot \frac{F^{-\frac{3}{m}}}{(1-F^{\frac{1}{m}})^2} \quad (12)$$

여기서 C_{K-C} ($= C_s \times T^3$)는 Kozeny-Carman 상수이다. 선행연구자에 의하면 입자가 구형(sphere)이라면 $C_s \approx 2.5$ 이며 비틀림(tortuosity)은 $T \approx \sqrt{2}$ 로 알려져 있다. 따라서 입자가 구형일 때 $C_{K-C} \approx 5$ 의 값을 갖는다(Carrier 2003; Michel and Soga, 2005). 또한, 입자가 모난(angular) 형상을 갖는 경우에도 입자가 구형인 경우와 마찬가지로 $C_{K-C} \approx 5$ 의 값을 가진다고 알려져 있다(Carman, 1956). 따라서 사질토의 투수계수는 식 (12)와 같이 흙의 유효 입경, 형상계수, 측정된 흙의 전기전도도에서 변환된 formation factor의 함수로 표현가능하다.

3. 실내 투수 실험

3.1 실험재료

사질토에서 투수계수는 흙의 입경, 형상, 공극률 등에 의해 가장 큰 영향을 받는다(Mitchell and Soga, 2005;

Carrier, 2003). 본 연구에서는 입경에 따른 전기비저항과 투수계수의 상관관계를 관찰하기 위해 입경이 다른 규소질 모래인 K-4~K-7의 4개의 시료를 준비하였으며, 흙 입자의 형상에 따른 영향을 파악하기 위해 비교적 원

형(round)의 형상을 갖는 Ottawa 20/30과 Ottawa F-75의 시료를 준비하여 모난(angular) 형상을 갖는 K-series의 시료와 실험결과를 비교하였다. 시험에 사용된 시료의 기본물성치는 Table 1과 같으며 시료의 입도분포는 Fig. 1과 같다(ASTM C136). 각 시료의 기본 물성치를 구하기 위해 비중(specific gravity), 최소간극비(e_{min})와 최대간극비(e_{max})를 구하였다(ASTM D854, ASTM D4254, ASTM D4253). 실험 중 간극수의 전기전도도에 영향을 줄 수 있는 염분이나 유기물을 제거하기 위하여 각 시료는 증류수($\sigma_w < 0.00016$ S/m)로 5회 이상 세척하였다.

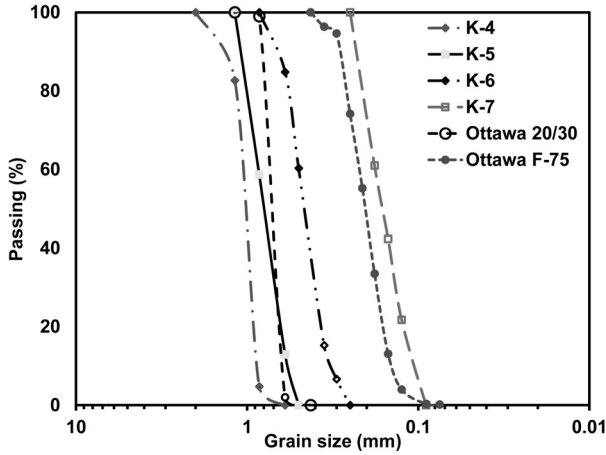


Fig. 1. Particle size distribution of tested sands

3.2 수정 정수위 투수셀 및 투수 시험

정수위 투수시험 (ASTM D2434)을 이용하여 시료의 투수계수를 측정하였다. 플라스틱 재질의 직경 7.5cm, 높이 16.36cm 원통형 정수위 투수셀을 제작하였으며, 투수 시험과 동시에 흙의 전기전도도 측정을 위해 Fig. 2와 같

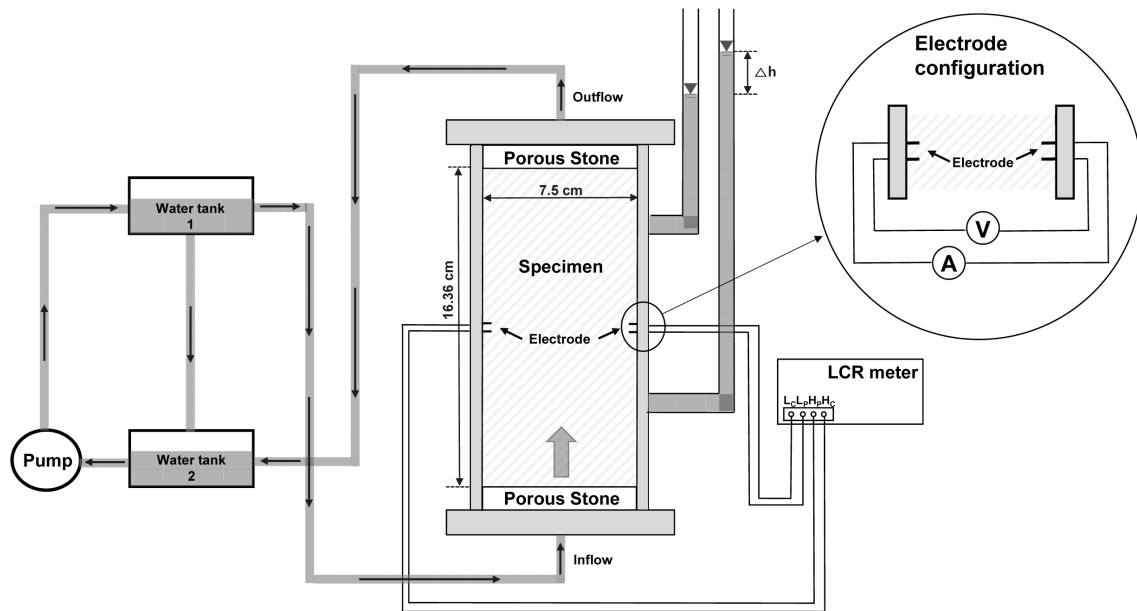


Fig. 2. Modified constant head permeameter equipped with 4 electrode conductivity probe. Note, A (current) and V (voltage)

Table 1. Material properties

Properties	K-4	K-5	K-6	K-7	Ottawa 20/30	Ottawa F-75
G_s	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
e_{max}	1.08	1.07	1.03	1.03	0.74	0.81
e_{min}	0.71	0.69	0.66	0.58	0.50	0.54
D_{50} (mm)	1.04	0.85	0.50	0.16	0.72	0.22
D_{10} (mm)	0.87	0.54	0.33	0.11	0.62	0.15
D_{eff} (mm)	1.01	0.75	0.44	0.15	0.69	0.21

where G_s = specific gravity; e_{max} = maximum void ratio; e_{min} = minimum void ratio; D_{50} = particle size passing 50% weight; D_{10} particle size passing 10% weight; D_{eff} = effective particle size (Eq. (3)).

이 투수셀 벽면에 4개의 전극을 설치하였다. 선행 연구에 따르면 전기전도도 측정 시 4개의 전극(4 electrodes)은 2개의 전극에 비해 전기화학적반응(분극현상)이 발생할 가능성이 적어(Kim et al., 2009) 4개의 전극으로 측정할 전기전도도 값이 2개의 전극을 사용한 측정값 보다 높은 신뢰도를 갖는다.

수세식 낙사법을 이용하여 상대밀도(D_r) 30%~80%의 범위를 가지는 균질하고 포화된 시료를 조성하였다. 조성된 시료의 투수계수(K)는 측정된 유량(Q_w [cm³/sec]) 및 수두차 (Δh [cm])를 이용하여 계산하였다(ASTM D2434).

$$K[cm/sec] = \frac{Q_w L_s}{A_s \Delta h} \quad (13)$$

여기서 L_s는 물이 통과하는 시료 길이(cm), A_s는 시료의 단면적(cm²)이다.

3.3 전극의 교정계수(α) 및 전기비저항(전기전도도) 시험

흙의 전기저항(R)은 전극의 형상, 크기, 재질에 영향을 받을 뿐만 아니라 전극과 연결된 전선의 길이, 재질 등에 의해서도 영향을 받기 때문에 대상체 고유의 특성을 반영하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 흙 고유의 특성만을 반영하기 위해 측정된 흙의 전기저항 값을 전기비저항(λ)값으로 변환하기 위한 교정을 실시하였다.

NaCl(순도 99.9% ; 대정화학)을 사용하여 증류수(σ_w <

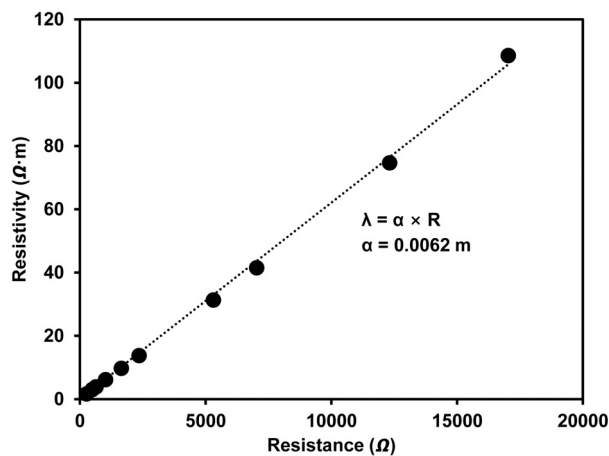


Fig. 3. Relation between electrical resistance and electrical resistivity for the calibration of the probe

0.00016 S/m)의 전기전도도를 3 S/m까지 증가시키며 LCR meter(Agilent 4236B)를 사용해 전기저항을 측정하였으며 동시에 conductivity meter(Accumet Excel XL50, Fisher Scientific)를 사용하여 전기전도도를 측정하였다. Fig. 3은 측정된 전기저항과 전기비저항(λ = 1/σ = 1/전기전도도)의 관계를 보여준다. 측정된 전기저항은 전기비저항과 선형의 관계를 보였으며, 전기저항과 전기비저항의 교정계수(α)는 0.0062m의 값을 보였다.

투수시험과 아울러 전기전도도를 측정하기 위해서 실험에 사용된 물은 Fig. 2와 같이 순환식으로 실험 중간극수의 전기전도도(pore water conductivity, σ_w)를 일정하게 유지하였고 conductivity meter(Accumet Excel XL50, Fisher Scientific)을 사용하여 간극수의 전도도 변화를 연속적으로 측정하였다. 투수시험 중 흙의 전기저항을 측정하기 위해 LCR meter(Agilent 4236B)를 사용하였고 1.0V, 10kHz의 정현파를 입력 신호로 사용하였다. 측정된 흙의 저항과 교정계수(α)로부터 흙의 전기비저항을 구하고 계산된 전기비저항의 역수를 취하여 흙의 전기전도도(σ_{mix} = 1/λ)로 전환하였다.

교류를 사용하여 측정된 전기저항은 주파수에 따른 분극현상(electrod polarization)과 전기공명(electrical resonance) 등의 영향에 따라서 그 값에 차이를 보인다. 실험 중 안정적인 전기저항값을 측정하기 위하여 Fig. 4와 같이 임피던스 분석기(HP 4192A)를 사용하여, 주파수 연속측정(frequency sweeping)을 통해 입력 주파수를 결정하였다(Rinaldi and Cuestas, 2002; Cho et al., 2004; Kim et al., 2009). 실험결과 0.3~20kHz의 범위에서 안정적인

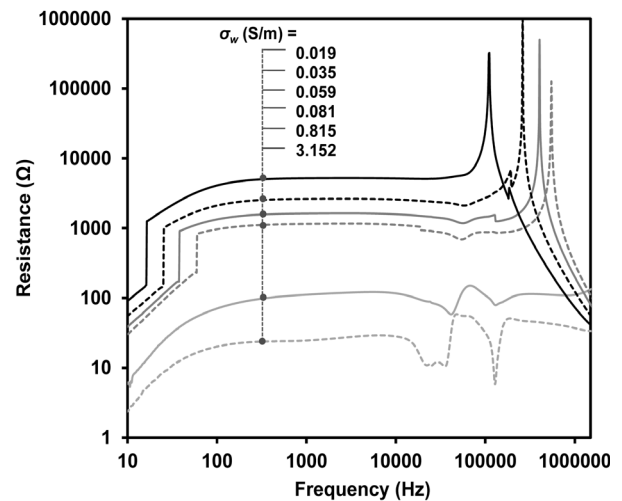


Fig. 4. Relation between resistance and frequency according to pore water conductivity

저항값이 관측되었으며, 100kHz 이상의 주파수 대역에서는 전기저항값이 급격히 증가하는 전기공명 현상을 보였다. 따라서 본 연구에서는 시험 중 안정적인 전기저항값의 측정을 위해 10kHz의 정현파를 입력 신호로 결정하였다.

4. 실험 결과 및 토의

4.1 간극수의 전기전도도 변화에 따른 흙의 전기전도도와 투수계수

선행연구에 의하면 흙 입자 표면을 통한 흙의 전기전도는 흙 입자의 비표면적에 비례하는 경향을 보이며 (Choo and Burns, 2014), 입자의 비표면적은 입자의 크기에 반비례하는 경향을 보인다. 일반적으로 사질토의 경우 흙 입자 표면을 통한 전도는 무시할 수 있으나 사질토의 흙 입자가 매우 작은 경우 흙 입자 표면 통한 전도가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에 사용된 시료의 입자표면을 통한 전기전도 유무를 판단하기 위하여 준비된 시료 중에 가장 입경이 작은 K-7과 Ottawa F-75를 사용하여 시험을 실시하였다. 두 시료의 초기 상대밀도(D_r)는 70%로 조성하여 투수 시 입자의 공극률 변화를 최소화하였다. 각 시료의 전기전도도 측정은 간극수의 전기전도도가 증류수($\sigma_w < 0.00016$ S/m)부터 바닷물($\sigma_w \approx 3$ S/m)에 해당하는 넓은 범위 하에서 이루어졌다.

Fig. 5는 간극수의 전기전도도(σ_w) 변화에 따른 흙의 전기전도도(σ_{mix})와 투수계수(K) 변화를 측정한 시험 결과이다. Fig. 5(a)와 같이 흙 전체의 전기전도도는 간극수의 전

기전도도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하며 y절편 값이 '0'인 것을 확인할 수 있다. 이는 사질토에서 formation factor($=\sigma_w/\sigma_{mix}$)가 간극수의 전기전도도에 영향을 받지 않는 것을 의미하며 동시에 흙 입자 표면을 통한 전도가 미미함을 의미한다. 만약 흙 표면을 통한 전도를 무시할 수 없는 흙의 경우, formation factor는 간극수의 농도가 증가함에 따라 일정하게 증가하지 않을 것이며, 동시에 y절편이 존재하게 된다(Choo and Burns, 2014). Fig. 5(b)는 간극수의 전기전도도에 따른 투수계수의 변화를 도시한 그림이다. Fig. 5(b)에서 Ottawa F-75, K-7의 투수계수는 간극수의 전기전도도가 증가할 때 큰 변화 없이 일정한 투수계수를 보인다. 본 연구에서는 간극수의 전기전도도를 증가시키기 위해 NaCl을 사용하여, 간극수의 전기전도도에 따라 물의 단위중량과 점성계수는 달라진다. 물의 단위중량과 점성계수의 비(γ_w/μ)의 변화율은 25°C에서 본 시험의 농도 범위(0.02mol/kg~0.5mol/kg)에서 1.5%의 변화율을 갖으나(Zang, 1996), 물의 단위중량과 점성계수 비의 변화가 투수계수에 주는 영향이 미미하였다.

4.2 유량변화에 따른 흙의 전기전도도와 투수계수

본 연구에서 사용된 투수셀의 경우 물의 흐름은 Fig. 2와 같이 수직방향인 반면에 전류의 흐름은 수평방향으로 측정된다. 따라서 유량(flow rate)의 변화로 인하여 전류의 흐름이 변화되거나 방해받을 수 있다는 가정 하에 유량 변화에 따른 흙의 formation factor와 투수계수의 상관관계를 확인하기 위하여 비슷한 유효입경을 갖지만 입자의 형상이 다른 K-5($D_{eff} = 0.75$ mm)와 Ottawa

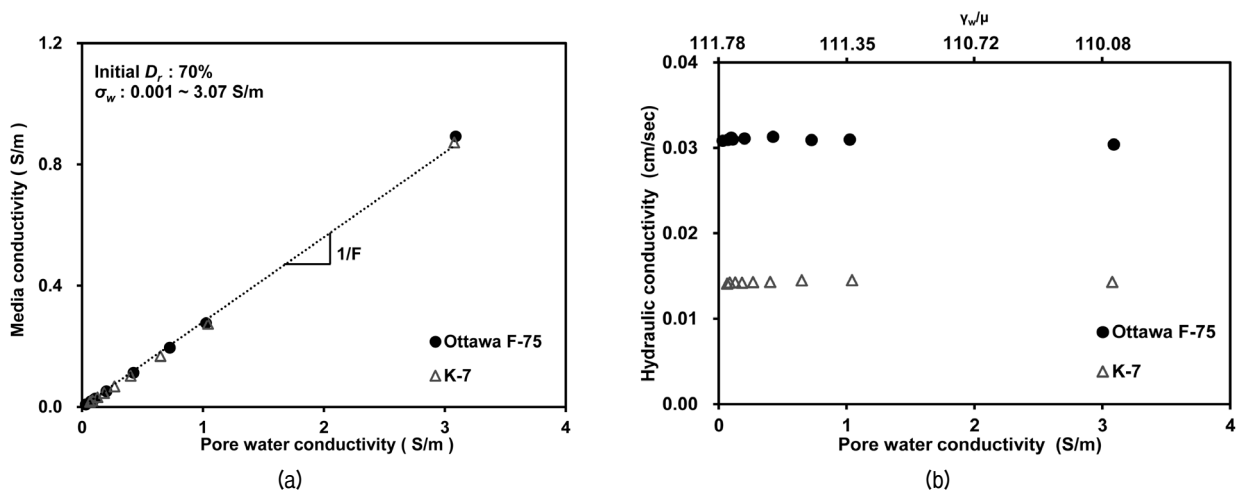


Fig. 5. Variations of electrical and hydraulic conductivities of Ottawa F-75 and K-7 sands as a function of pore water conductivity: (a) variation of electrical conductivity; (b) variation of hydraulic conductivity

20/30($D_{eff} = 0.69mm$) 시료를 사용하여 시험하였다. 흡 속에서 흡입자 사이를 통하는 실제 유속은 투수속도(seepage velocity, V_s)이며 유출속도(discharge velocity, V)와 간극률(porosity, n)을 이용하여 식 (14)와 같이 정리할 수 있다(Budhu, 2010).

$$V_s = \frac{V}{n} \quad (14)$$

따라서 본 시험에서는 상대적으로 큰 투수속도(V_s) 조건을 구현하면서 유량 증가에 따른 간극률의 변화를 최소화 하기 위하여 높은 상대밀도 $D_{r,K-5} = 70\%$, $D_{r,Ottawa\ 20/30} = 60\%$ 로 시료를 조성하였다. 간극수의 전기전도도는 1.8 S/m로 일정하게 유지하여 간극수의 전기전도도의 변화에 따른 영향을 최소화하였으며 유량을 $3.05cm^3/sec$ 부터 $13.7cm^3/sec$ 까지 증가시키며 시험을 수행하였다. Fig. 6(a)에서 보이는 바와 같이 유량 증가에 따른 K-5와 Ottawa 20/30 시료의 측정된 투수계수(기울기)는 일정 하였으며, 이는 본 연구에서 행해진 실험은 모두 층류(laminar flow)상태였음을 의미한다. Fig. 6(b)는 유량을 증가시키며 측정된 formation factor를 나타낸다. Formation factor는 유량이 변화할 때 큰 변동없이 일정한 값을 보여 준다. 따라서 시험에 사용된 유량 범위($3.05 \sim 13.7cm^3/sec$) 내에서는 유량 또는 유속이 전류의 흐름에 영향을 주지 않는 것을 확인하였으며, 이는 전류의 이동속도가 유속에 비해 매우 크기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로 formation factor는 식 (11)과 같이 간극비가 일정할 때 일정한 값을 갖으며 유량과 독립적인 관계를 가진다.

4.3 간극률의 변화에 따른 흙의 전기전도도와 투수계수

간극률의 변화에 따른 흙의 전기전도도와 투수계수 변화를 확인하기 위하여 간극률 0.36~0.49 범위를 갖는 시료를 조성하여 간극률에 따른 투수계수와 전기전도도의 변화를 관측하였다. 0.063 S/m, 0.240 S/m 및 1.000 S/m의 각기 다른 전기전도도를 가지는 3가지 간극수를 준비하고, 각 시료 별로 실험을 진행하였다. Fig. 7(a)는 K-7 시료의 간극수의 전기전도도 및 간극률에 따른 투수계수 값을 보여준다. 간극수의 전기전도도가 변화함에 따라 간극수의 밀도 및 점성이 변화하게 된다. 그러나 간극수의 전기전도도가 변화하더라도 투수계수와 간극률 간의 관계는 매우 유사하여(Fig. 7(a)), 본 연구에서 사용된 사질토의 경우 간극수의 전기전도도의 변화가 투수계수에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단 된다.

각기 다른 3개의 간극수 전도도 하에서 측정된 간극률에 따른 투수계수를 Fig. 7(b)와 같이 동시에 도시하였다. 입경에 따라 측정된 각 시료의 투수계수는 큰 차이를 보였으며, 또한 간극률이 증가함에 따라 투수계수가 증가하는 경향을 보여주었다. 유사한 간극률($n \approx 0.46$)에서 측정된 K-Series 흙의 투수계수는 Table 2와 같으며 시료의 유효입경이 3배 작아짐에 따라서 투수계수는 10배 이상의 큰 차이를 보여준다. Ottawa 20/30, Ottawa F-75는 K-Series와 입자의 형상의 차이로 인하여 간극률의 범위가 다르기 때문에 직접적인 비교는 불가능하다. 하지만 K-Series와 마찬가지로 간극률이 증가함에 따라 투수계수가 증가하였으며 간극률이 0.40일 때

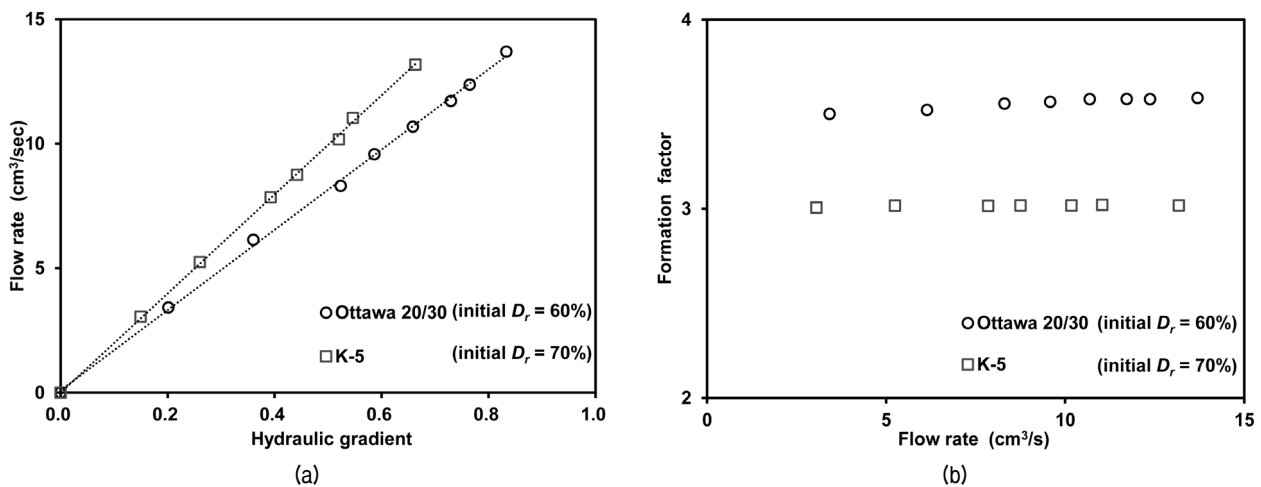


Fig. 6. Effect of flow ratio on hydraulic conductivity and formation factor for Ottawa 20/30 and K-5 sands: (a) variation of hydraulic conductivity; (b) variation of formation factor

$K_{\text{Ottawa 20/30}} = 0.50\text{cm/sec}$, $K_{\text{Ottawa F-75}} = 0.037\text{cm/sec}$ 로서 유효입경에 따라서 투수계수는 10배 이상의 큰 차이를 보인다.

식 (6)과 같이 투수계수는 간극률, 유효입경 및 입자의 형상에 영향을 받는다. 입자 형상에 따른 투수계수의 영향을 관찰하기 위하여 유사한 유효입경을 가지는 K-5($D_{\text{eff}} = 0.75\text{mm}$)와 Ottawa 20/30($D_{\text{eff}} = 0.69\text{mm}$)을 이용하여 실험하였다. 비록 두 시료의 형상 차이로 인하여 조성된

시료의 간극률 범위는 다르지만, 실험한 간극률 범위에서 $K_{\text{K-5}} = 0.44 \sim 0.68\text{cm/s}$ ($0.45 < n < 0.49$), $K_{\text{Ottawa 20/30}} = 0.34 \sim 0.51\text{cm/sec}$ ($0.36 < n < 0.40$)으로 유사한 투수계수를 보였다. 따라서 투수계수는 입자의 형상보다 유효입경에 더 큰 영향을 받는다.

Fig. 8(a)는 3가지 간극수 전기전도도에 따른 간극률과 formation factor의 관계를 보여준다. 간극수의 전기전도도 차이에 따른 formation factor의 변화는 미미하였

Table 2. Hydraulic conductivity of K-Series sands at the same porosity ($n = 0.46$)

Properties	K-4	K-5	K-6	K-7
D_{eff} (mm)	1.01	0.75	0.44	0.15
K (cm/sec)	1.1×10^0	5.2×10^{-1}	1.6×10^{-1}	2.4×10^{-2}

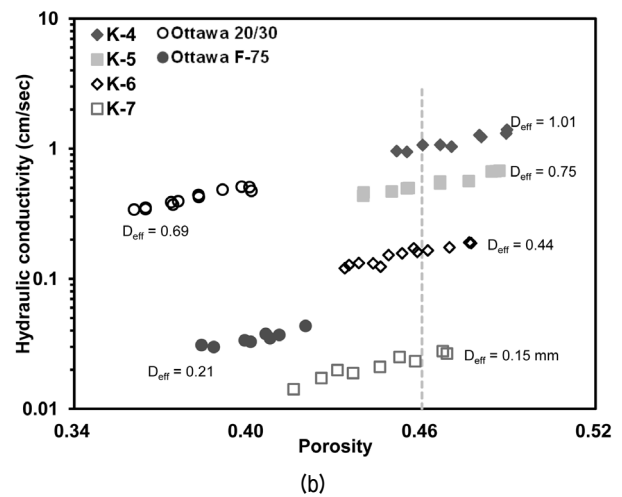
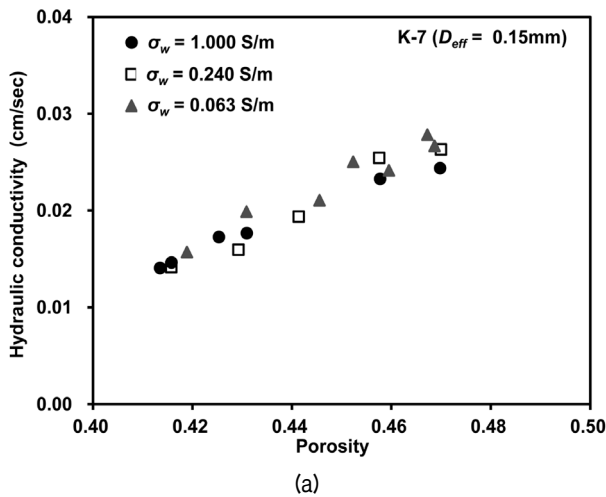


Fig. 7. Variation of hydraulic conductivity of tested materials as a function of pore water conductivity and porosity: (a) hydraulic conductivity of K-7 sands at three different pore water conductivities; (b) relation between hydraulic conductivity and porosity of tested material

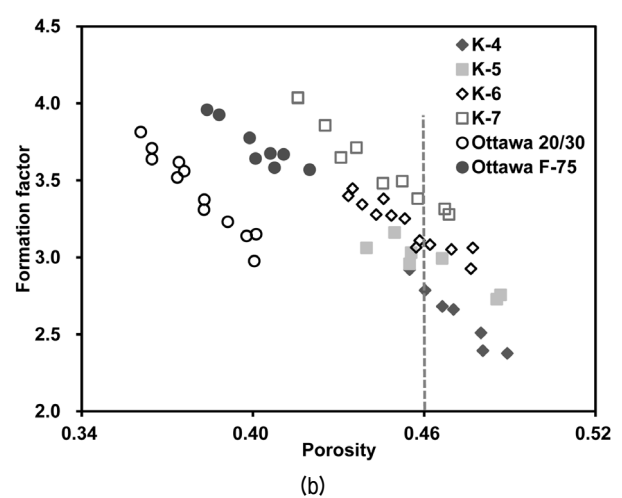
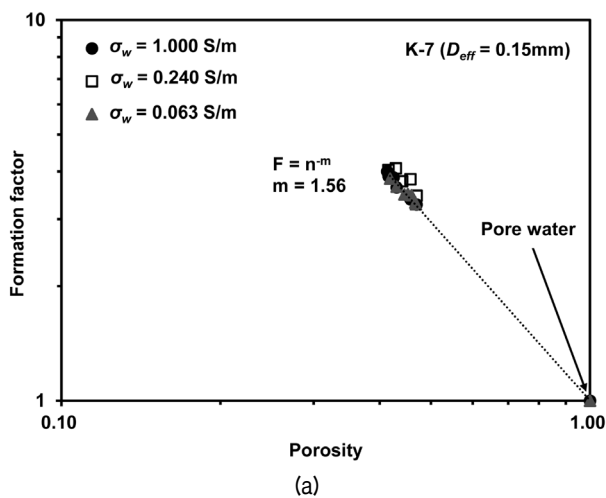


Fig. 8. Variation of formation factor of tested materials as a function of pore water conductivity and porosity: (a) formation factor of K-7 sands at three different pore water conductivities; (b) relation between formation factor and porosity of tested materials

으며, formation factor는 시료의 간극률 변화에 지배받았다. 따라서 3가지 간극률의 전기전도도 하에서 측정된 각 시료의 formation factor를 Fig. 8(b)와 같이 동시에 도시하였다. 간극률을 변화시키며 측정한 formation factor를 이용해 계산된 각 시료의 Archie's m은 Table 3과 같으며 선행연구자가 제시한 사질토에서의 Archie's m 범위인 1.3~1.6의 범위를 갖는다(Archie 1942; Jackson et al., 1978). 식 (10)과 같이 formation factor는 간극률이 증가함에 따라 반비례하는 경향을 보였다. 유사한 간극률($n \approx 0.46$) 하에서 측정된 K-Series 시료의 formation factor는 Table 4와 같다. K-Series 시료는 $n \approx 0.46$ 에서 2.8~3.4 정도의 formation factor의 값을 가졌으며 유효입경이 증가함에 따라 formation factor는 다소 감소하는 경향을 보였다. 하지만 유효입경의 변화에 따라 약 10배 이상의 차이를 보이는 투수계수와 비교해 볼 때, 유효입경 변화에 따른 formation factor의 영향은 상대적으로 미미함을 알 수 있다.

4.4 Shape factor

본 연구에서는 식 (12)와 같이 측정된 전기전도도 값을 바탕으로 입자의 형상계수 및 유효입경을 이용한 투수계수 예측식을 제안하였다. 유효입경의 경우 시료의 입도분석을 통해 구할 수 있으나, 형상계수의 경우 정량적인 평가방법이 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서 측정된 실험값과 Kozeny-Carman 식 (6)을 사용하여 구한 이론적 투수계수를 비교하여 error norms을 사용해 형상계수를 구하였다.

Error norm을 구하기 위하여 식 (15)와 같이 시험을

통해 측정된 투수계수(y^{meas})와 식 (6)으로 계산된 투수계수(y^{pred})의 차를 이용하여 errors를 구했고 식 (16)을 이용하여 sum of squared errors($Z = 2$)를 사용하여 error norm을 구하였다(Santamarina and Fratta, 2005).

$$e_i = y_i^{<meas>} - y_i^{<pred>} \quad (15)$$

$$L_n = \left(\sum_i |e_i|^z \right)^{\frac{1}{z}} \quad (16)$$

Fig. 9(a)는 K-7와 Ottawa F-75의 시료를 사용하여 형상계수에 따른 error norms의 분포이다. Fig. 9(a)와 같이 K-7와 Ottawa F-75의 error norms이 가장 작은 형상계수 값을 본 실험의 형상계수 값으로 정의하였으며, 각 시료의 형상계수는 Table 5와 같다. 각 시료의 형상계수는 6~8.4의 분포를 보이며 이는 기존의 연구자들에 의해 제시된 shape factor 범위와 동일하다(Fair and Hatch, 1933; Loudon, 1952; Carrier, 2003). 기존의 연구자들은 shape factor를 roundness에 따라 제시하였다(Fair and Hatch, 1933; Loudon, 1952). Roundness는 식 (17)을 사용하여 구할 수 있다.

$$roundness = \frac{\sum r_i / N}{r_{max-in}} \quad (17)$$

여기서 r_{max-in} 은 입자 내에서 가장 큰 원의 반지름, r_i 는 입자 내 모서리 부분 원의 반지름이며 이때 N은 원(r_i)의 개수이다(Cho et al., 2006). Fig. 9(b)는 측정된 roundness와 형상계수의 관계를 보여준다. Ottawa 20/30

Table 3. Archie's m exponents of tested materials

Properties	K-4	K-5	K-6	K-7	Ottawa 20/30	Ottawa F-75
Archie's m	1.28	1.35	1.44	1.56	1.27	1.45

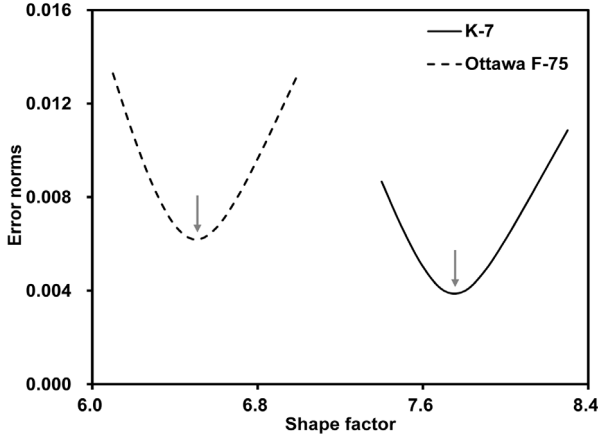
Table 4. Formation factors (F) of K-Series sands at the same porosity ($n = 0.46$)

Properties	K-4	K-5	K-6	K-7
D_{eff} (mm)	1.01	0.75	0.44	0.15
F	2.79	3.02	3.09	3.35

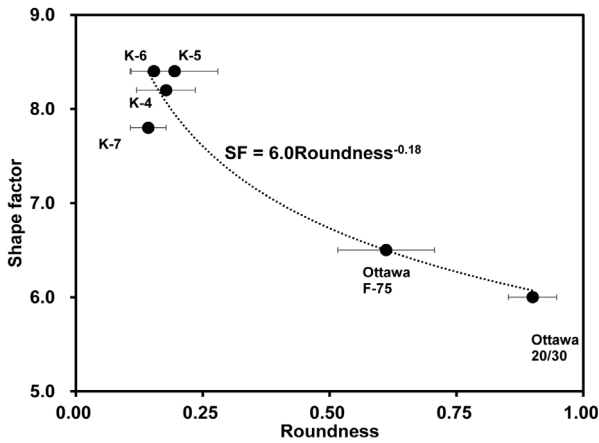
Table 5. Variations of shape factor and roundness of tested materials

Properties	K-4	K-5	K-6	K-7	Ottawa 20/30	Ottawa F-75
Shape factor	8.2	8.4	8.4	7.8	6.0	6.5
Roundness	0.177	0.194	0.153	0.142	0.881	0.564

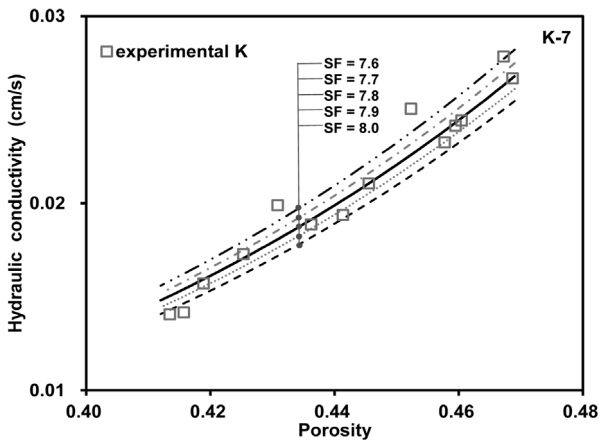
의 roundness는 0.9를 얻었으며 이는 입자가 구형인 것을 의미한다. 모난 입자의 K-Series는 roundness = 0.14~0.19의 분포를 보여 모난 형상을 잘 반영하고 있으며 roundness와 형상계수의 관계는 Fig. 9(b)와 같이 지수함



(a)



(b)



(c)

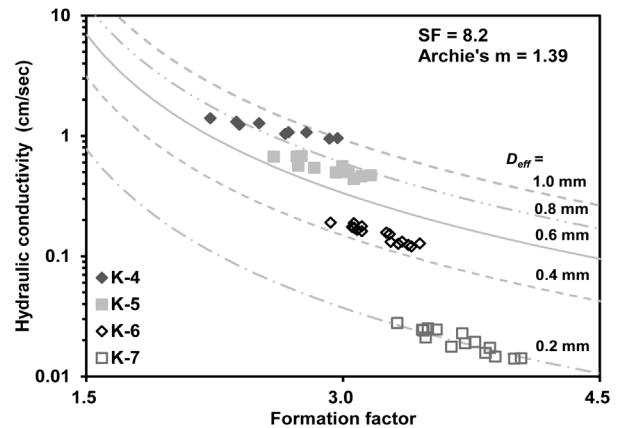
Fig. 9. Determination of shape factors and their effect on hydraulic conductivity: (a) determination of shape factor based on minimum error norm value; (b) relation between shape factor and roundness; (c) variation of hydraulic conductivity according to shape factors

수의 관계인 $SF = 6.0 \times \text{roundness}^{-0.18}$ 로 표현이 가능하다.

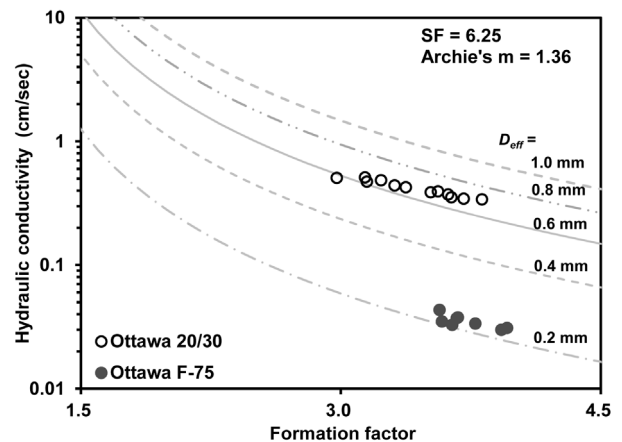
Fig. 9(c)는 K-7 시료의 측정된 투수계수와 형상계수 변화에 따른 투수계수 예측 범위를 보여준다. Error norm 방법을 이용하여 얻은 K-7의 shape factor는 7.8이나, 만약 식 (6)을 이용해 투수계수를 계산시 SF를 7.6 또는 8.0을 사용하여 투수계수를 예측하면 Fig. 9(c)과 같이 투수계수는 5% 정도의 오차가 발생한다.

4.5 Formation factor를 이용한 투수계수 예측

측정된 투수계수와 식 (12)를 이용하여 유효입경에 따라 계산된 투수계수와 formation factor의 관계는 Fig. 10(a), (b)과 같다. 계산된 투수계수는 K-Series 시료의 특성을 반영하기 위해 형상계수와 Archie's m은 각각 K-Series의 평균값인 $SF = 8.2$, $m = 1.39$ 를 사용하였다. 비록 error norm 분석을 통해 각각 얻은 K-4, 5, 6의 경우



(a)



(b)

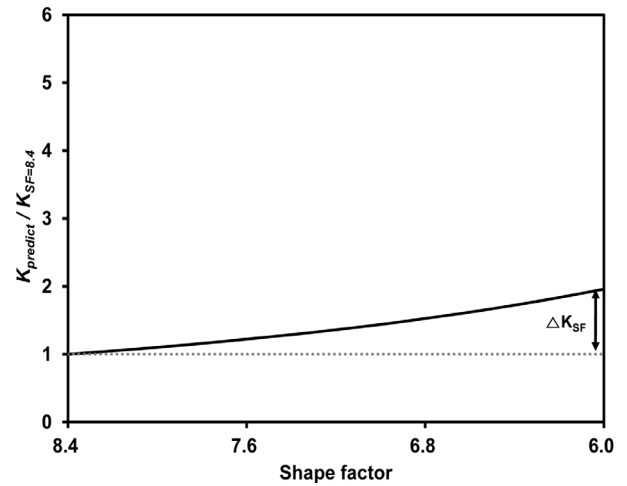
Fig. 10. Design charts for estimating hydraulic conductivity of sands using formation factors: (a) K-series sands with assumed SF = 8.2 and m exponent = 1.39; (b) Ottawa sands with assumed SF = 6.25 and m exponent = 1.36

shape factor는 8.2(K-4), 8.4(K-5), 8.4(K-6)로 K-Series의 평균 shape factor 8.2와 차이를 보이지만, 계산된 투수계수와 측정된 투수계수는 유사한 값을 가진다. K-7의 경우 분석된 shape factor가 7.8로 평균과 약간의 차이를 보여 Fig. 10(a)의 측정치와 예측치가 약 20%의 오차를 보였다. Fig. 10(b)에서는 입자의 형상이 비교적 둥근 Ottawa-Series 시료의 특성을 반영하기 위하여 shape factor는 두 시료의 평균값인 6.25를 사용하였고 Archie's m 또한 두 시료의 평균값인 1.36를 사용하였다. 예측된 투수계수 값은 시료의 유효입경에 따라 유사한 값을 보였다.

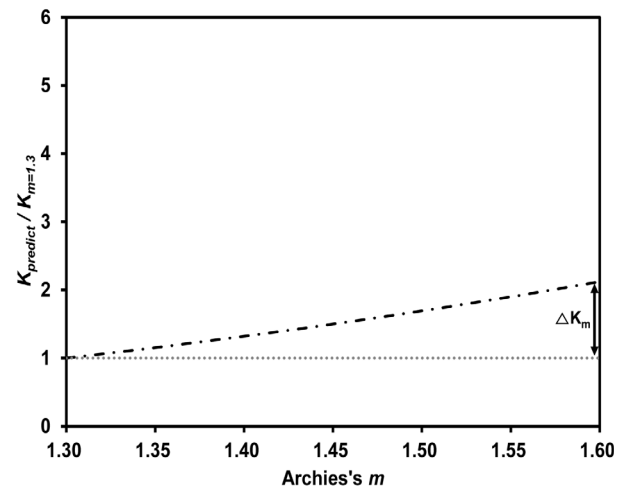
4.6 토의

본 연구에서는 정수위투수실험과 전기전도도 측정을 통해 얻은 formation factor와 투수계수의 상관관계를 바탕으로 식 (12)와 같이 흙 입자의 크기와 형상이 고려된 투수계수 예측식을 제시하였다. 따라서 제안된 식을 사용하기 위해서는 흙의 시료 채취(sampling)을 통한 흙의 형상계수와 Archie's m의 계산이 동반될 때 합리적인 투수계수를 얻을 수 있다. Fig. 11은 본 연구에서 제시한 식 (12)와 기존 투수계수 예측식 (6)을 사용하여 각각 형상계수, Archie's m, 간극률에 따른 정규화된 투수계수(normalized hydraulic conductivity)를 보여준다. 각 조건에 따른 정규화된 투수계수를 보기 위해 투수계수 계산 시, 해당 그림에 해당하는 변수를 제외한 나머지 영향인자들은 일정한 값을 사용하였다.

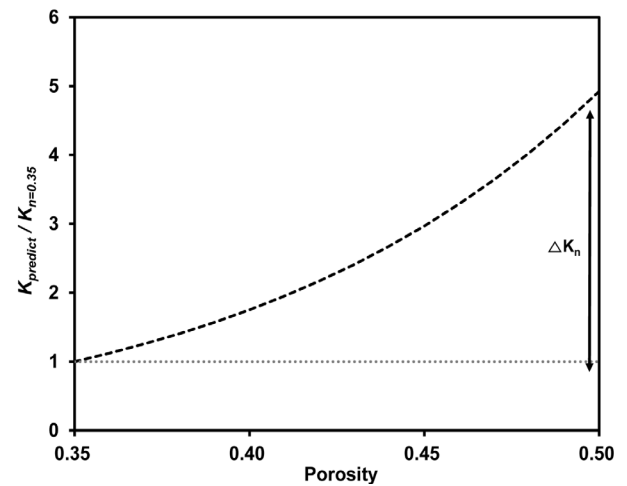
Fig. 11(a)는 형상계수가 8.4일 때의 투수계수를 사용하여 정규화시킨 투수계수를 도시한 그림이다. 형상계수는 본 연구에서 제시한 6.0~8.4 범위까지 도시하였다. 정규화된 투수계수는 형상계수의 범위에 따라 최대 약 2배(ΔK_{SF})의 증감을 보여주고 있다. Fig. 11(b)는 Archie's m이 1.3일 때의 투수계수로 정규화된 투수계수이며 본 연구에서 측정된 Archie's m 범위인 1.3~1.6 범위로 도시하였다. Archie's m에 따른 투수계수의 증감은 주어진 범위에서 형상계수의 변화량과 유사하게 최대 약 2배(ΔK_m)의 증감을 보였다. Fig. 11(c)는 식 (6)을 사용하여 본 연구에서 사용된 간극률의 범위(0.35~0.50)에서 간극률(0.35)일 때 계산된 투수계수로 정규화시켰다. 간극률의 범위에 따라서 최대 약 5배(ΔK_n)의 증감을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 다른 조건은 유사하고 간극률과 Archie's m이 미지수로 남아있다고 가정하였



(a)



(b)



(c)

Fig. 11. Variations of normalized hydraulic conductivity with varying shape factor, Archie's m exponents, and porosities: (a) variation according to shape factors (normalized $K = \text{varying } K / K$ at $SF = 8.4$); (b) variation according to Archie's m (normalized $K = \text{varying } K / K$ at $m = 1.3$); (c) variation according to porosities (normalized $K = \text{varying } K / K$ at $n = 0.35$)

을 경우, 본 식에서 제안한 식 (12)를 이용하여 예측된 투수계수가 기존 투수계수 식 (6)보다 훨씬 더 높은 신뢰도를 보일 것으로 판단된다. 또한 사질토의 경우 비교란된 원지반의 간극률 추정은 매우 어렵기 때문에 본 연구에서 제안하는 전기전도도를 이용한 사질토의 투수계수 예측방법은 더 큰 의미가 있다고 할 수 있다. 하지만 Fig. 11(a) 및 (b)와 같이 본 연구에서 제시한 식 (12)를 사용하여 투수계수를 예측시 형상계수와 Archie's m에 따라 투수계수의 값이 달라진다. 따라서 높은 신뢰도의 투수계수를 예측하기 위해서는 형상계수와 Archie's m을 측정하여 식 (12)를 사용하는 것이 합리적인 방법이라 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 전기전도도 실험을 통한 투수계수의 추정을 위하여 6종류의 사질토에 대하여, 4개의 전극을 갖는 정수위 투수셀을 사용하여 전기전도도와 투수계수의 상관관계를 파악하고 전기전도도를 이용한 투수계수 예측식을 제시하였다.

- (1) 다양한 입경을 가지는 시료를 사용하여 투수계수와 계산된 formation factor를 비교한 결과 유사한 간극률에서 유효입경이 3배 변화함에 따라 투수계수는 10배 이상의 큰 변화를 보여주지만 formation factor의 변화는 미미하였다.
- (2) Error norm방법을 사용해 입자의 Roundness에 따른 형상계수를 구하였으며, 간극률을 변화시키며 측정된 formation factor를 사용하여 Archie's m을 구하였다. 제안된 투수계수식을 사용하여 계산한 투수계수는 측정된 투수계수와 유사한 값을 보여주었다.
- (3) 정규화된 투수계수를 사용해 형상계수, Archie's m 그리고 간극률이 투수계수에 미치는 영향을 검토한 결과, 투수계수는 형상계수와 Archie's m에 비하여 간극률의 변화에 따라 큰 폭으로 변화하였다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 전남대학교 학술연구비 지원과 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(15RDRP-B076564-02)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Abu-Hassanein, Z. S., Benson, C. H., and Blotz, L. R. (1996). "Electrical Resistivity of Compacted Clays", *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(5), pp.397-406.
2. Archie, G. E. (1942), "The Electrical Resistance Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics", *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 146, pp.54-62.
3. ASTM D2434 (2010), "Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)", ASTM International, West Conshohocken, PA.
4. ASTM C136 (2006), "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates", ASTM International, West Conshohocken, PA.
5. ASTM D4254 (2015), "Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density", ASTM International, West Conshohocken, PA.
6. ASTM D4253 (2015), "Standard Test Methods for Maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table", ASTM International, West Conshohocken, PA.
7. Budhu, M. (2010), *Soil Mechanics and Foundation*, J. Wiley & Sons, Chichester, England.
8. Carman, P. C. (1956), *Flow of Gases through Porous Media*, Academic Press Inc., Publication, New York, pp.13-15.
9. Carrier, W. D. (2003), "Goodbye, Hazen; hello, Kozeny-Carman", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(11), pp.1054-1056.
10. Chapuis, R. P. (2004), "Predicting the Saturated Hydraulic Conductivity of Sand and Gravel Using Effective Diameter and Void Ratio", *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5), pp.787-795.
11. Chapuis, R. P. and Aubertin, M. (2003), "Predicting the Coefficient of Permeability of Soils Using the Kozeny-Carman Equation", *École polytechnique de Montréal, EPM-RT-2003-03*, pp.1-35.
12. Cho, G. C., Dodds, J., and Santamarina, J. C. (2006), "Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132, pp.591-602.
13. Cho, G. C., Lee, J. S., and Santamarina, J. C. (2004), "Spatial Variability in Soils: High Resolution Assessment with Electrical Needle Probe", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(8), pp.843-850.
14. Choo, H. and Burns, S.E. (2014), "Review of Archie's Equation through Theoretical Derivation and Experimental Study on Uncoated and Hematite Coated Soils", *Journal of Applied Geophysics*, 105, pp.225-234.
15. Choo, H., Lee, C., Choi, Y., and Lee, W. (2014), "Relation between Hydraulic Conductivity and Geoelectric Measurement for Coarse-grained Materials", *KGS Spring National Conference 2014*, pp.522-529.
16. Duner, W. (1994), "Hydraulic Conductivity Estimation for Soils with Heterogeneous Pore Structure", *Water Resource Research*, 30(2), pp.211-233.
17. Fair, G. M. and Hatch, L. P. (1933), "Fundamental Factors Governing the Stream-line Flow of Water through Sand", *Journal of the American Water Works Association*, 25, pp.1551-1565.
18. Gomez, C. T., Dvorkin, J., and Vanorio, T. (2010), "Laboratory Measurements of Porosity, Permeability, Resistivity, and Velocity

- on Fontainebleau Sandstones”, *Geophysics*, 75(6), E191-E204.
19. Holtz, R. D., Kovacs, W. D., and Sheahan, T. C. (2011), *An Introduction to Geotechnical Engineering Second Edition*, Pearson.
 20. Hong, Y., Lee, J., and Lee, C. (2014), “Application of Geophysical Techniques for Observing the Void Ratio Changes of Dredged Soils”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 30(9), pp.19-28.
 21. Jackson, P. D., Smith, T. D., and Stanford, P. N. (1978), “Resistivity-porosity-particle Shape Relationships for Marine Sands”, *Geophysics*, 43(6), pp.1250-1268.
 22. Jackson, P. D., Williams, J. F., Lovell, M. A., Camps, A., Rochelle, C., and Milodowski, A. E. (2007), “An Investigation of the Exponent in Archie’s Equation: Comparing Numerical Modeling with Laboratory Data: Towards Characterizing Disturbed Samples from the Cascadia Margin: IODP Expedition 311”, *The Society of Petrophysicists and Well Log Analysis 48th Annual Logging Symposium 2007*, June, pp.3-6.
 23. Khalil, M. and Monterio Santos, F. (2009), “Influence of Degree of Saturation in the Electric Resistivity-Hydraulic Conductivity Relationship”, *Surv Geophys*, 30(6), pp.601-615.
 24. Kelly, W. E. and Frohlich, R. K. (1985), “Relations between Aquifer Electrical and Hydraulic-properties”, *Ground Water*, 23(2), pp.182-189.
 25. Kim, J., Choo, H., Lee, C., and Lee, W. (2014), “Estimation of Hydraulic Conductivity of Coarse Grains Using Geoelectric Measurements”, *KGS Fall National Conference 2014*, pp.431-438.
 26. Kim, J. H., Yoon, H. K., Cho, S. H., Kim, Y. S., and Lee, J. S. (2009), “Four electrode resistivity probe for porosity evaluation”, *Geotechnical Testing Journal*, 34(6), pp.668-675.
 27. Kim, J., Yoon, H., Choi, Y., and Lee, J. (2009), “Porosity Evaluation of Offshore Soft Soils by Electrical Resistivity Cone Probe”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 25(2), pp.45-54.
 28. Klein, K.A. and Santamarina, J.C. (2003), “Electrical Conductivity in Soils: Underlying Phenomena”, *Journal of Environmental and engineering geophysics*, 8(4), pp.263-273.
 29. Loudon, A. G. (1962), “The Computation of Permeability from Simple Soil Tests”, *Geotechnique*, 3, pp.165-183.
 30. Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005), *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley & Sons.
 31. Oh, T. M., Cho, G. C., and Lee, C. H. (2014), “Effect of Soil Mineralogy and Pore-water Chemistry on the Electrical Resistivity of Saturated Soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(11), pp.06014012-06014012-5.
 32. Olson, R. E. and Daniel, D. E. (1981), “Measurement of the Hydraulic Conductivity of Fine-grained Soils”, *Permeability and Groundwater Contaminant Transport*, ASTM STP 746, T. F. Zimmie, C. O. Riggs, Eds., American Society for Testing and Materials, 18-64.
 33. Pfannkuch, H. O. (1972), “On the Correlation of Electrical Conductivity Properties of Porous Systems with Viscous Flow Transport Coefficients”, *Developments in Soil Science*, 2, pp.42-54.
 34. Rinaldi, V. A. and Cuestas, G. A. (2002), “Ohmic Conductivity of a Compacted Silty Clay”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(10), pp.824-835.
 35. Salem, H. S. and Chilingarian, G. V. (1999), “The Cementation Factor of Archie’s Equation for Shaly Sandstone Reservoirs”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 23, pp.83-99.
 36. Samouelian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., and Richard, G. (2005), “Electrical Resistivity Survey in Soil Science: a Review”, *Soil & Tillage Research*, 83(2), pp.173-193.
 37. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, A. M. (2001), *Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*, J. Wiley & Sons, Chichester, England.
 38. Santamarina, J. C. and Fratta, D. (2005), *Discrete Signals and Inverse Problems: An Introduction for Engineers and Scientists*, J. Wiley & Sons, Chichester, England.
 39. Urish, D. W. (1981), “Electrical Resistivity-hydraulic Conductivity Relationships in Glacial Outwash Aquifers”, *Water Resources Research*, 17(5), pp.1401-1408.
 40. Yoon, G. L. and Park, J. B. (2001), “Sensitivity of Leachate and Fine Contents on Electrical Resistivity Variations of Sandy Soils”, *Journal of Hazardous Materials B84*, pp.147-161.
 41. Yoon, G., Ryu, C., Lee, Y., Yoon, C., and Lee, Y. (1998), “A Study on the Correlation between Electrical Resistivity and Properties of Contaminated Soils”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 14(2), pp.79-92.
 42. Zhang, H. L. and Han, S. J. (1996), “Viscosity and Density of Water + Sodium Chloride + Potassium Chloride Solutions at 298.15 K”, *Journal of Chemical and Engineering Data*, 41(3), pp.516-520.

Received : April 24th, 2015

Revised : June 5th, 2015

Accepted : June 9th, 2015