

## 포화도에 따른 흙의 전기전도도 변화에 대한 실험적 연구

### Experimental Study on the Effect of Degree of Saturation on the Electrical Conductivity of Soils

고 효 정<sup>1</sup> Ko, Hyojung

추 현 옥<sup>2</sup> Choo, Hyunwook

#### Abstract

The degree of saturation determines the connectivity of void space and the particle surface. Thus, it greatly affects the electrical conductivity of soils. This study aimed to analyze the electrical conductivities of coarse grains with a high relevance of pore water conduction and fine grains with a high relevance of surface conduction based on the degree of saturation. It also aimed to express the electrical conductivity of unsaturated soils as a combination of surface and pore water conductions using the modified Archie's equation. Samples were prepared in a plastic cell equipped with four electrodes, and the electrical conductivity was measured based on the porosity at various degrees of saturation (40%~100%). The results demonstrate that Archie's equation can be used to express the electrical conductivity of coarse grains, with a saturation exponent of ~1.93 regardless of the pore water conductivity. However, the saturation exponent of fine grains varied considerably with pore water concentration. This variation can be attributed to the relative magnitude of surface conduction with respect to the electrical conductivity of soils at different pore water concentrations. Thus, the degree of saturation has varying effects on pore water conduction and surface conduction. Therefore, different saturation exponents must be used for pore water conduction and surface conduction to predict the electrical conductivity of unsaturated soils using the modified Archie's equation.

#### 요 지

흙은 간극수와 이중층수를 통해 전기적 흐름이 발생하기 때문에 간극수 및 이중층수의 연결성, 즉 포화도에 따라 전기전도도가 변화한다. 본 연구에서는 간극수 전도가 지배적인 사질토와 표면 전도 효과가 두드러진 세립토에서 포화도에 따른 전기전도도를 분석하고, 수정된 Archie의 방정식을 통해 불포화토의 전기전도도를 표면 전도와 간극수 전도의 합으로 표현하고자 한다. 4개의 전극이 설치된 플라스틱 셀에 다양한 포화도(40%-100%)와 간극률(0.45-0.82)을 갖는 시료를 조성하였으며, 간극수의 농도를 조절하기 위해 시료 조성에 사용된 간극수는 0M(증류수)-0.5M NaCl 용액을 사용하였다. 시험 결과, 사질토의 전기전도도는 포화도의 지수함수로 표현되었으며, 포화도의 지수는 간극수의 농도와 관계없이 1.93로 결정되었다. 반면 세립토의 경우, 포화도의 지수는 간극수의 농도에 따라 큰 차이를 보였다. 이는 각 간극수의 농도에서 흙의 전기전도도에 대한 표면전도의 상대적인 크기가 다르기 때문이다. 다시 말해, 포화도

1 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

2 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ., Tel: +82-2-2220-0394, choohw@hanyang.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

가 간극수전도와 표면전도에 미치는 영향이 다르며, 수정된 Archie의 방정식으로 흙의 전기전도도를 예측하기 위해서는 간극수 전도와 표면 전도에 각각 다른 포화도의 지수를 사용해야함을 의미한다.

**Keywords :** Degree of saturation, Electrical conductivity, Modified Archie's equation, Pore water conduction, Surface conduction, Unsaturated soils

## 1. 서론

물리탐사 기술은 정밀도가 높고 다량의 데이터를 짧은 시간 안에 측정 가능케 하여 지반 조사에 많이 사용되고 있다. 특히 지반 내 전류 흐름의 정도를 평가하는 전기전도도 또는 전기비저항 탐사는 연속적인 측정이 가능하며, 미세한 물성변화에도 민감하게 반응하여 산악터널, 교량 기초 및 댐 건설현장 등 다양한 지반 구조물 설계에 필요한 지반 정보를 제공하기 때문에 많이 사용되고 있다(Samouëlian et al., 2005; Besson et al., 2008; Basso et al., 2010).

흙의 전기전도도는 포화도, 간극률, 토양 내 온도, 세립분의 함량, 간극수의 농도, 입자의 모양과 배열, 간극구조, 양이온 교환능력(cation exchange capacity, CEC) 등 다양한 흙의 특성이 반영된 복잡한 흙의 물리적 특성이다(Choo et al., 2016; Keller and Frischknecht, 1966). 특히 흙 입자 내 간극수의 연결성은 전기전도도를 결정짓는 주요 인자인데, Archie는 전기전도도와 해당 요소들 간 관계를 정량적으로 표현하기 위하여 아래 식 (1)을 제안하였다(Archie, 1942). 세립분이 높지 않은 지반 내의 전기적 흐름은 간극수 내 이온의 이동에 기반을 두고 있으므로, 흙의 전기전도도는 간극수의 전기전도도에 비례하며 간극수와 포화도의 멱함수로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{mix} = \sigma_w n^m S^a \quad (1)$$

여기서  $\sigma_{mix}$ 는 흙의 전기전도도,  $\sigma_w$ 는 간극수의 전기전도도,  $n$ 은 간극률,  $m$ 은 Archie의  $m$ (형상계수),  $S$ 는 포화도,  $a$ 는 포화계수(saturation factor)를 나타낸다. Archie의  $m$ 은 입자의 형상, 간극구조, 비표면적 등에 영향을 받으며, 기존 연구에 따르면 일반적으로 1.4 ~ 2.2 값을 나타낸다(Abu-Hassanein et al., 1996; Salem and Chilingarian, 1999; Schön, 2015). 포화도 지수  $a$ 는 경험적 상수로서 Archie는 2 정도의 값을 갖는 것으로 제안하였으나, 이

후 연구자에 따르면 습윤/건조 과정 및 흙의 종류에 따라 1.4 ~ 2.3 정도의 값을 갖는 것으로 보고하였다(Abu-Hassanein et al., 1996; Keller and Frischknecht, 1966; Rinaldi and Cuestas, 2002; Schön, 2015).

그러나 식 (1)은 오직 간극수를 통한 전기적 흐름을 고려한 식이므로 사질토 또는 간극수의 농도가 높은 해성점토에 적용이 가능하며, 그 외의 지반의 경우 간극수 전도 외에 이중층수를 통한 특별한 형태의 이온의 흐름인 표면 전도를 추가로 고려해야한다(Choo and Burns, 2014).

현재까지 불포화상태인 흙의 전기전도도를 예측하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔으나(Friedman, 2005; Gorman and Kelly, 1990; Li et al., 2016), 기존의 연구는 식 (1)을 수정하거나 입자 표면을 통한 전기전도도를 고려하지 않는 등의 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 표면전도의 크기에 따라 전체 전기전도도의 포화도에 따른 영향 정도를 평가하기 위해 사질토인 K-5 sand와 점성토인 kaolin clay에 대해 포화도에 따른 전기전도도를 평가하고자 한다. 4개의 전극이 설치된 플라스틱 셀에 다양한 포화도(40%-100%)와 간극률(0.45-0.82)을 갖는 K-5 sand와 kaolin clay 시료를 조성하였으며, 0M(중류수) - 0.5M NaCl 용액을 간극수로 활용하였다. 측정된 결과를 활용하여, 전체 전기전도도를 간극수전도와 표면전도의 합으로 표현하였으며, 간극수전도와 표면전도를 각각 포화도의 멱함수로 표현하고, 별개의 포화도 지수를 제안하였다.

## 2. 이론적 배경

포화상태인 흙의 전기전도도는 간극수를 통한 전기전도(간극수 전도, pore water conduction  $K_w$ )와 입자 표면(이중층수)을 통한 전기전도(표면전도, surface conduction  $K_s$ )의 합으로 표현할 수 있다(Glover, 2000):

$$\sigma_{mix} = K_w + K_s = \sigma_w n^m + \sigma_s (1 - n^m) \quad (2)$$

여기서  $\sigma_s$ 는 입자 표면의 전기전도도로, 확산 이중층(diffuse double layer, DDL) 내 이온의 이동으로 발생하는 전기적 흐름이다.  $\sigma_s$ 는 DDL 내 이온의 농도와 이동성, 양이온 교환능력, DDL의 두께, 표면 전하 밀도와 같은 요인에 영향을 받는다(Revil et al., 1998; Mojid, 2012; Choo et al., 2016).

선행 연구에 따르면, 흙 입자 표면을 통한 흙의 전기전도도는 비표면적에 비례하는 경향을 보이며, 입자의 비표면적은 입자의 크기에 반비례하는 경향을 보인다(Choo and Burns, 2014; Kim et al., 2015). 따라서 비표면적이 작은 사질토의 경우, 간극수를 통한 전기전도도에 비해 입자 표면을 통한 전기전도도가 무시할 수 있을 만큼 매우 작기 때문에 식 (1)과 같이 흙의 전기전도도를 표현할 수 있다. 반면, 상대적으로 비표면적이 큰 세립토의 경우, 입자 표면을 통한 전기전도의 효과를 무시할 수 없기 때문에, 식 (1)로 예측된 불포화상태에서의 전기전도도는 실제 값과 상당한 차이가 나타난다. 따라서, 식 (2)를 불포화상태에서도 적용할 수 있도록 식을 발전시킬 필요가 있다.

전류의 흐름을 위한 간극수의 연결성과 이중층수의 연결성은 모두 포화도의 영향을 받으며, 따라서 식 (2)의  $K_w$ (간극수전도)와  $K_s$ (표면전도)는 포화도의 함수로 표현이 가능하다. 일반적으로 입자 표면과 간극수를 통한 전기적 흐름에 대한 비틀림(Tortuosity)과 연결성(connectivity)이 동일하지 않으므로 포화도에 대한 영향이 다를 수 있다. 따라서  $K_w$ 의 포화도 의존성은 Archie가 제안한 식 (1)의 형태로 표현하였으며, 이와 유사하게  $K_s$  역시 포화도의 멱함수로 아래와 같이 표현하였다:

$$\sigma_{mix} = \sigma_w n^m S^a + \sigma_s (1 - n^m) S^b \quad (3)$$

여기서 a, b는 각각 간극수와 입자 표면을 통한 전기적 흐름에서의 포화도 지수를 뜻한다.

### 3. 실험 구성

#### 3.1 시료 특성

입자의 크기는 전기전도도의 크기를 결정하는 중요 요소 중 하나이다. 따라서 본 연구에서는 사질토인 K-5 sand와 세립토인 kaolin clay을 채택하여 실험을 진행하였다. 두 시료의 기본 물성치는 Table 1과 같으며 시료의 입도 분포는 Fig. 1과 같다(ASTM D422, ASTM D1140). K-5 sand의 경우, 기본 물성치를 구하기 위하여 비중(specific gravity,  $G_s$ ), 최대간극비( $e_{max}$ ), 최소간극비( $e_{min}$ )를 구하였다(ASTM D854, ASTM D4254). Kaolin clay의 경우, 비중, 액성한계(liquid limit, LL), 소성한계(plastic limit, PL)를 구하였다(ASTM D854, ASTM D4318). 또한, 두 시료의 비표면적(specific surface area,  $S_a$ )은 기존 논문에서 제시된 방법을 통해 구하였다(Santamarina et al., 2002). 실험 중 전기전도도에 영향을 줄 수 있는 염분이나 유기물, 이온 등을 제거하기 위하여 증류수로 5회 이상 세척하였으며, 이 과정을 통해 상층액(supernatant)의 전도도가 0.001S/m 미만이 되도록 하였다.

#### 3.2 전기전도도 시험

포화도에 따른 흙의 전기전도도 측정을 위해 Fig. 2와

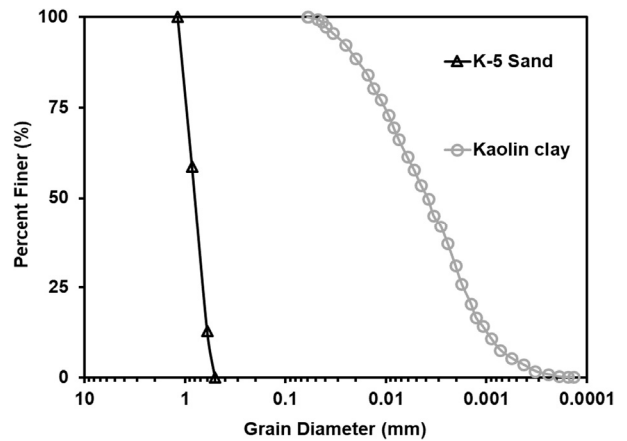


Fig. 1. Grain size distribution

Table 1. Properties of tested materials

Type	$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$C_u$	$G_s$	$S_a$ ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	$e_{max}$	$e_{min}$	LL (%)	PL (%)
K-5 sand <sup>1)</sup>	800.0	1.47	2.65	0.03	1.07	0.69	-	-
Kaolin clay <sup>2)</sup>	3.96	6.580	2.53	10.92	-	-	36.4	23.6
Testing method	ASTM D422	ASTM D854	<sup>1)</sup> Empirical equation (Santamarina et al., 2002) <sup>2)</sup> Methylene blue spot test (Santamarina et al., 2002)		ASTM D4254	ASTM D4253	ASTM D4318	

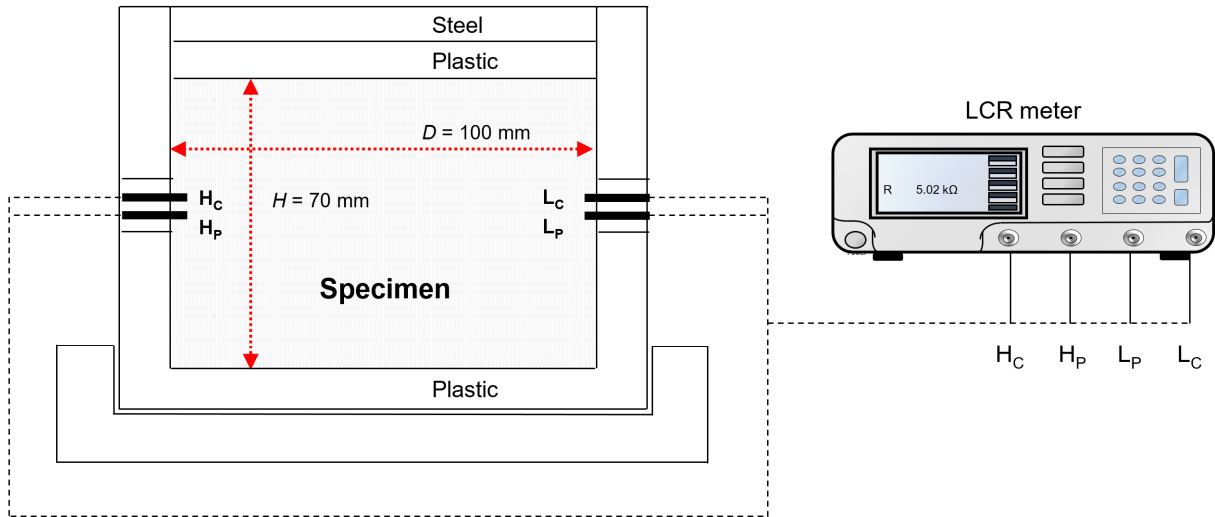


Fig. 2. Test setup for electrical conductivity measurement. Note that  $H_c$  = high current,  $H_p$  = high potential,  $L_c$  = low current,  $L_p$  = low potential

같이 직경 100mm, 높이 70mm인 플라스틱 재질의 원통형 셀과 덮개를 제작하였다. 또한, 셀 벽면에 4개의 전극을 설치하였다. 선행 연구에 따르면 전기전도도 측정 시 4개의 전극(4 electrodes)은 2개의 전극에 비해 전기 화학적반응(분극현상)이 발생할 가능성이 적어 4개의 전극으로 측정한 전기전도도 값이 2개의 전극을 사용한 측정값보다 높은 신뢰도를 갖는다(Kim et al., 2009; Kim et al., 2015).

실험 중 흡의 전기적 흐름은 전류가 높은 곳( $H_c$ )에서 전류가 낮은 곳( $L_c$ )으로 흐르며, 두 전위( $H_p$ 와  $L_p$ ) 사이의 전기저항(Resistance,  $R$ )을 LCR미터(Keysight E4980A)를 사용하여 측정하였다. LCR미터의 입력전압은 1V로 설정하였으며, 공진현상 및 분극현상을 피하기 위하여 주파수 10kHz에서의 전기저항을 측정하였다(Kim et al.,

2009). 전기저항은 셀을 구성하는 물질의 종류, 도선의 길이와 단면적 등에 영향을 받기 때문에 전기비저항(전기전도도)으로 나타내기 위한 보정계수가 필요하다. NaCl (대정화학)을 사용하여 증류수의 전기전도도를 약 2S/m 까지 점진적으로 증가시키며 LCR미터를 사용해 전기저항을, 동시에 conductivity meter(13-636-XL50C, Fisher Scientific)를 사용해 전기전도도( $\sigma$ )를 측정하였다. Fig. 3은 측정된 전기저항과 전기비저항( $\rho$ ,  $1/\sigma$ )의 관계를 보여준다. 측정된 전기저항은 전기비저항과 선형 관계로 나타났으며, 보정계수는 0.0174m의 값을 보였다.

### 3.3 실험 과정

포화도와 간극률에 따른 전기전도도의 특성평가를 위하여 시료의 포화도를 40%에서 100%까지 변화시키며 전기저항을 측정하였는데, 포화 유무와 시료 종류에 따라 실험방법을 다르게 설정하였다.

포화상태인 사질토의 경우, 상대밀도(relative density,  $D_r$ ) 30%와 60%을 기준으로 수증낙사법(water pluviation)을 통하여 시료를 조성하였다. 이후 하중증가비(load increment ratio, LIR)를 1로 설정하고 정하중(1.85 ~ 416.39kPa)을 가하여 간극률이 변화하는 동안 전기저항을 측정하였다. 포화상태인 세립토의 경우, 액성한계에 1.5배 ~ 5배인 함수비에서 슬러리혼합법(slurry mixing)으로 각각 시료를 조성한 후 전기저항을 측정하였다.

불포화상태인 사질토의 경우 포화도가 20, 40, 60, 80%이고 상대밀도가 30%, 60%인 상태가 될 수 있도록

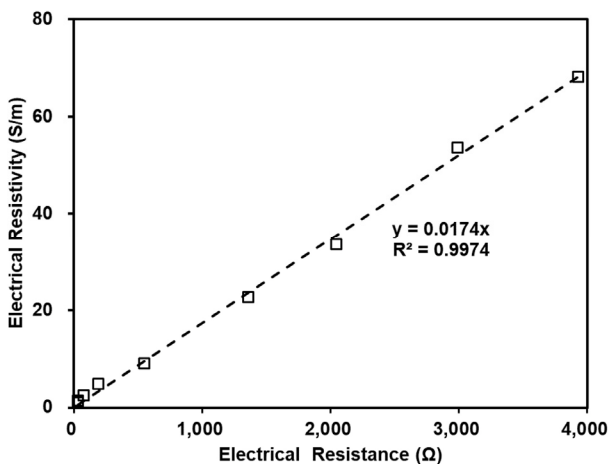


Fig. 3. Calibration of the tested 4 electrodes system

Table 2. Test matrix for evaluating the effect of saturation on electrical conductivity

Type		K-5 Sand	Kaolin clay
Saturated condition	Sample preparation	Water pluviation	Slurry mixing
	Initial porosity	0.45( $Dr = 60\%$ ), 0.49( $Dr = 30\%$ )	0.47(1.5LL) - 0.82 (5LL)
	$\sigma_v'$ (kPa)	1.85 - 416.39 (LIR = 1)	
	$\sigma_w$ (S/m)	0.51, 1.88, 4.20	0.12 - 4.20
Unsaturated condition	Sample preparation	Compaction	
	Initial porosity	0.45( $Dr = 60\%$ ), 0.49( $Dr = 30\%$ )	0.408 - 0.820
	$\sigma_v'$ (kPa)	1.85 - 416.39 (LIR = 1)	-
	$\sigma_w$ (S/m)	0.51, 1.88, 4.20	0.012 - 4.200

$Dr$  = relative density;  $LL$  = liquid limit;  $\sigma_v'$  = applied vertical effective stress; LIR = loading increment ratio;  $\sigma_w$  = pore water conductivity

다짐에너지를 가하여 시료를 조성한 뒤, 정하중(1.85 ~ 416.39kPa, LIR = 1)을 가하여 포화도와 간극률이 변화하는 동안 전기저항을 측정하였다. 세립토의 경우, 50 ~ 80% 범위 내에서 목표 포화도를 설정하고 함수비와 다짐에너지를 변화시켜 각 포화도에서의 간극률에 따른 전기저항을 측정하였다.

또한, 다양한 간극수의 전기전도도(0.012 ~ 4.200 S/m) 하에서 시료를 조성하기 위해 0M(증류수) - 0.5M의 NaCl 수용액을 간극수로 사용하여 시험을 수행하였다(Table 2).

#### 4. 실험 결과 및 분석

##### 4.1 포화도에 따른 사질토의 전기전도도

Fig. 4는 포화상태인 K-5 sand에서 간극률에 따른 간극수의 전기전도도로 정규화된 흙의 전기전도도 ( $\sigma_{mix}/\sigma_w$ )를 나타낸 것이다. 우선, 간극률이 증가함에 따라 정규

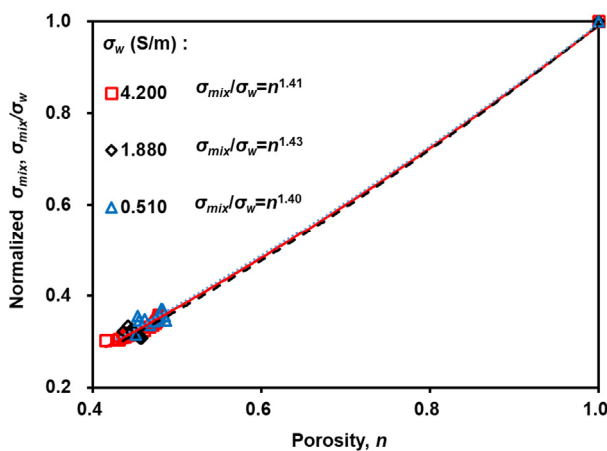


Fig. 4. Normalized electrical conductivity  $\sigma_{mix}/\sigma_w$  a function of porosity for saturated K-5 sand under three different pore water conductivities

화된 전기전도도가 증가하였다. 이는 상대적으로 입자의 크기가 큰 K-5 sand의 경우 간극수를 통한 전기적 흐름이 지배적인데, 간극률이 증가함에 따라 간극수를 통한 전기적흐름이 더욱 용이해진다는 것을 의미한다(식 (1)). 또한, 간극수의 농도와 관계없이 측정된  $\sigma_{mix}/\sigma_w$ 를 하나의 간극률의 함수로 표현할 수 있었다. 즉, 다양한  $\sigma_w$ 에 대하여  $\sigma_{mix}/\sigma_w$ 는 지수가 약 1.41로 유사한 간극률의 지수함수로 나타났다. 이를 통해 K-5 sand와 같이  $\sigma_{mix}/\sigma_w$ 를 간극률의 단일 지수함수로 표현할 수 있을 경우, 식 (1)과 같이 Archie의 식으로 표현 가능하며, 이때 Archie의  $m$ 은 간극수의 농도에 영향을 받지않는다는 것을 확인하였다.

간극수의 흐름이 지배적인 사질토의 전기전도도에 포화도가 미치는 영향을 평가하고자, 간극률의 함수로 정규화된  $\sigma_{mix}/\sigma_w$ 를 포화도의 함수로 Fig. 5와 같이 나타내었다. 간극률의 함수로 정규화된  $\sigma_{mix}/\sigma_w$ 는 Fig. 4를 통해 결정하였으며, 포화도가 증가함에 따라 측정된  $(\sigma_{mix}/\sigma_w)/n^{1.41}$ 가 비선형적으로 증가하였다. 이는 포화도가 증가할수록 흙입자 사이 공극을 채우고 있던 공기의 감소로 간극내 이온들이 흐를 수 있는 연속적인 통로가 형성되기 때문이다. 특히  $(\sigma_{mix}/\sigma_w)/n^{1.41}$ 가 간극수의 농도와 관계없이 포화도에 따라 하나의 지수함수로 증가하였는데, 이는 시험에 사용된 K-5 sand의 경우 측정된 전기전도도를 식 (1)과 동일한 형태로 표현할 수 있음을 의미한다. 즉, 간극수의 농도와 관계없이 측정된  $(\sigma_{mix}/\sigma_w)/n^{1.41}$ 가 약 1.93으로 유사한 포화도 지수(식 (1)의  $a$ 값)를 갖는 것으로 나타나며, 이 때 결정된 포화도 지수는 기존 Archie가 제안한 값과 유사함을 확인하였다. 따라서 간극수 전도도가 주를 이루는 사질토인 K-5 sand의 경우 간극수의 농도와 관계없이 하나의 식으로 간극률의 영향(Fig. 4)과 포화도의 영향(Fig. 5)을 고려할 수 있음을 확인하

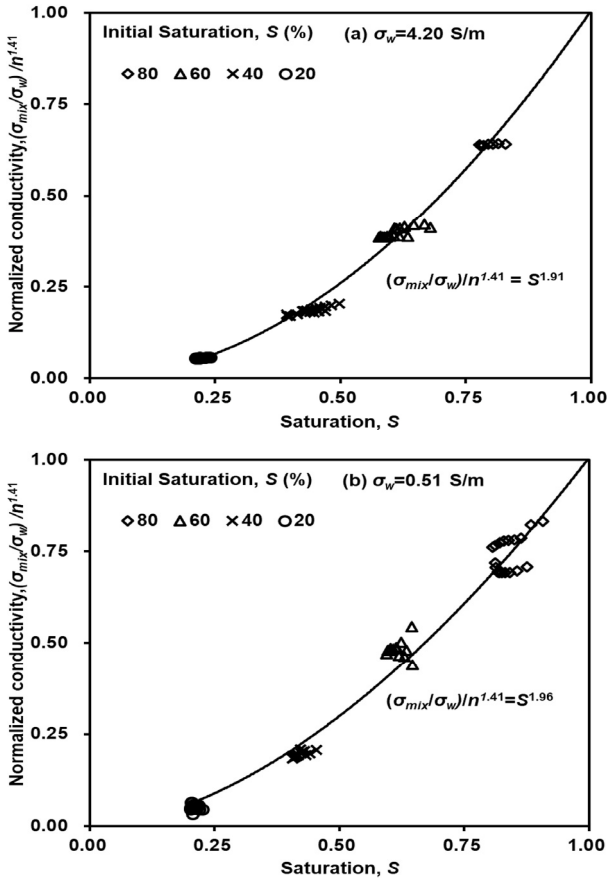


Fig. 5. Electrical conductivity normalized in terms of pore water conductivity and porosity  $(\sigma_{mix}/\sigma_w)/n^{1.40}$  as a function of degree of saturation: (a)  $\sigma_w = 4.20$  S/m; (b)  $\sigma_w = 0.51$  S/m

였다. 시험에 사용된 사질토의 전기전도도는 다음 식으로 표현 가능하다:

$$\sigma_{mix} = \sigma_w n^{1.41} S^{1.93} \quad (4)$$

#### 4.2 포화도에 따른 세립토의 전기전도도

간극수를 통한 전도가 지배적인 사질토와는 달리 세립토는 입자 표면을 통한 전기전도가 존재하기 때문에 측정된 전기전도도는 식 (1)보다는 식 (2)로 표현해야한다. 이를 확인하고자 포화상태에서 간극수의 농도가 다양할 때 간극수에 따른  $\sigma_{mix}/\sigma_w$ 를 Fig. 6에 나타내었다. 간극수의 전기전도도  $\sigma_w$ 에 관계없이 주어진 간극물에서 매우 유사한  $\sigma_{mix}/\sigma_w$ 을 나타냈던 Fig. 4와는 달리, 주어진 간극물에서  $\sigma_w$ 이 증가함에 따라  $\sigma_{mix}/\sigma_w$ 가 감소하였다. 즉, 모든  $\sigma_w$ 에 대하여 식 (1)로 표현한다고 하였을 때, -1.07에서 2.15까지 서로 다른 Archie의  $m$ 을 가지게 된다. 이러한 차이는 입자 표면을 통한 전기전도의 존재를

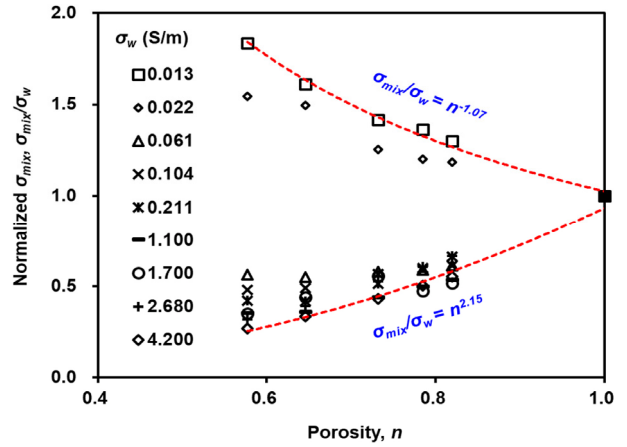


Fig. 6. Electrical conductivity normalized in terms of pore water conductivity  $\sigma_{mix}/\sigma_w$  with varying pore water conductivity as a function of porosity in kaolin clay

의미한다. 간극수의 농도가 낮을수록 입자 표면을 통한 전기전도도의 상대적인 크기가 증가하므로, 동일한 세립토에서도 간극수의 농도에 따라 Archie의  $m$ 이 달라져 식 (1)으로의 표현이 어려워지는 것이다.

또한,  $\sigma_w \sim 0.061$ S/m를 기준으로 간극물에 따른  $\sigma_{mix}/\sigma_w$ 의 변화 경향이 상이하게 나타났다.  $\sigma_w$ 이 0.061S/m보다 작은 경우, 간극물이 증가함에 따라  $\sigma_{mix}/\sigma_w$ 가 점차 감소하였고,  $\sigma_w$ 이 0.061S/m 보다 큰 경우,  $\sigma_{mix}/\sigma_w$ 가 증가하였다. 이는 표면전도와 간극수전도가 간극물에 따라 서로 다른 변화 양상을 나타내기 때문이다. 표면전도( $K_s, \sigma_s(1-n^m)$ )는 간극물에 따라 작아지는 반면, 간극수전도( $K_w, \sigma_w n^m$ )는 간극물에 따라 커진다. Fig. 6에서 표면전도의 상대적인 크기가 가장 큰  $\sigma_w \sim 0.013$ S/m에서 간극물이 증가할수록  $\sigma_{mix}/\sigma_w$ 가 급격히 감소하는 것도 이러한 이유에 의한 것이다. 결국 세립토의 전기전도도는 식 (2)와 같이 표면전도와 간극수전도의 합으로 표현되어야 한다. 이 때, Fig. 6에서  $\sigma_w$ 가 점차 증가함에 따라  $m$ 이 2.15으로 안정적으로 수렴하는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 세립토일지라도  $\sigma_w$ 가 매우 높을 경우 간극수전도가 지배적일 수 있음을 의미한다. 결국 주어진 세립토에 대하여  $\sigma_w$ 에 관계없이 전기전도도를 표현하기 위해서는 수렴된 ( $m$ ) 값을 식 (2)에 대입하는 것이 가장 타당하며, 식 (5)와 같다.

$$\sigma_{mix} = \sigma_w n^{2.15} + \sigma_s (1 - n^{2.15}) \quad (5)$$

다만, 식 (5)를 통해 포화상태에서의 전기전도도만을 예측할 수 있기 때문에 불포화상태에서도 적용 가



능하도록 식을 일부 수정한 식 (3)을 발전시킬 필요가 있다.

#### 4.2.1 고농도 간극수 하 세립토의 전기전도도

간극수의 전기전도도  $\sigma_w \sim 4.20\text{S/m}$  일때 다양한 포화도로 조성된 kaolin clay에 대해 측정된 정규화된 전기전도도 ( $\sigma_{mix}/\sigma_w$ )를 간극률의 함수로 Fig. 7에 도시하였다. 고농도의 간극수 하에서 조성된 점성토는 표면전도의 효과를 무시할 수 있으며, 따라서 측정된 전기전도도는 간극률이 증가함에 따라 증가하였다. 특히, Fig. 7는 포화도가 증가함에 따라 동일 간극률에서 측정된 정규화된 전기전도도가 증가함을 나타내며, 이는 포화도가 증가함에 따라 흡입자 사이 공극 내의 간극수 간 연결성이 증가하여 이온들의 원활한 이동이 가능해지기 때문이다. 연결성이 증가할수록 이온들의 흐름 경로의 비틀림 정도가 줄어들고, 보다 효율적으로 이동할 수 있는 경로가 제공된다. 이로 인해 흙의 전기전도도가 증가하는 것이다.

포화도에 대한 전기전도도의 영향을 확인하기 위하여 Fig. 7에서 유사한 간극률( $n \sim 0.53$ )을 가지는 데이터를 채택하여 간극률의 함수로 정규화된 전기전도도 ( $\sigma_{mix}/\sigma_w/n^{2.15}$ )를 포화도의 함수로 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 간극률의 함수는 Fig. 7을 통해 계산하였다. 포화도의 변화에 따라 간극률로 정규화된 전기전도도는 증가하였으며, 기존 Archie가 제안한 값과 유사한 약 2.08을 지수(식 (3)의  $a$ 값)로 갖는 포화도의 멱함수로 표현되었다. Fig. 7과 Fig. 8의 실험 결과를 바탕으로 시험에 사용된 세립토의 간극수전도(또는 높은 간극수 농도

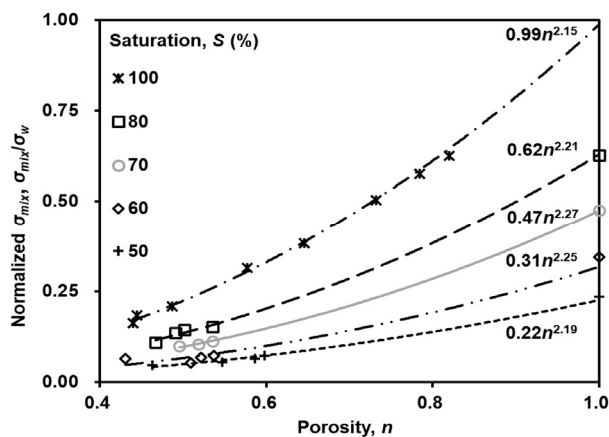


Fig. 7. Normalized electrical conductivity in terms of pore water conductivity  $\sigma_{mix}/\sigma_w$  with varying degree of saturation for kaolin clay as a function of porosity at  $\sigma_w = 4,20\text{ S/m}$

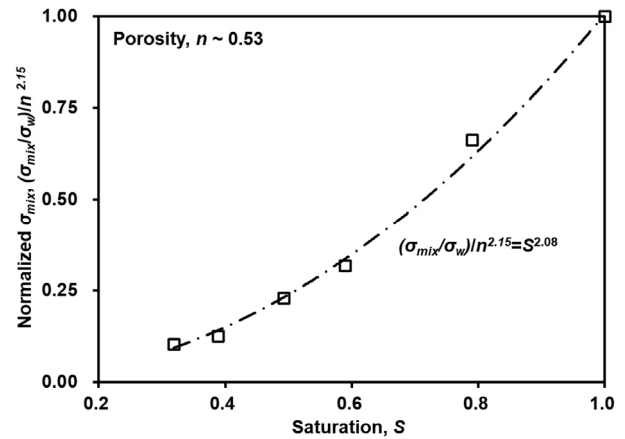


Fig. 8. Normalized electrical conductivity in terms of pore water conductivity and porosity  $\sigma_{mix}/\sigma_w/n^{2.15}$  kaolin clay as a function of degree of saturation at  $\sigma_w = 4,20\text{ S/m}$

하의 전기전도도)는 다음과 같이 표현된다:

$$K_w = \sigma_w n^{2.15} S^{2.08} \quad (6)$$

#### 4.2.2 저농도 간극수 하 세립토의 전기전도도

간극수의 농도가 낮은 경우, 흙의 전체 전기전도도( $\sigma_{mix}$ )에서 표면전도  $K_s$ 의 상대적인 중요성이 두드러지게 나타난다. 이에 포화도가  $K_s$ 에 미치는 영향을 구체화하기 위하여  $\sigma_w \sim 0.012\text{S/m}$ 일 때, 다양한 포화도에서 간극률에 따른  $\sigma_{mix}$ 를 측정하여  $\sigma_w$ 에 대하여 정규화한 후, Fig. 9에 시각화하여 나타내었다. 그 결과, 각 포화도에 대하여 간극률이 증가할수록  $\sigma_{mix}/\sigma_w$ 가 감소하였다. 이는 Fig. 5에서  $\sigma_w$ 이  $0.061\text{S/m}$ 보다 작은 경우와 동일한 결과로, 흙의 전기전도도에서  $K_w$ 와 비교하였을 때  $K_s$ 가 상대적

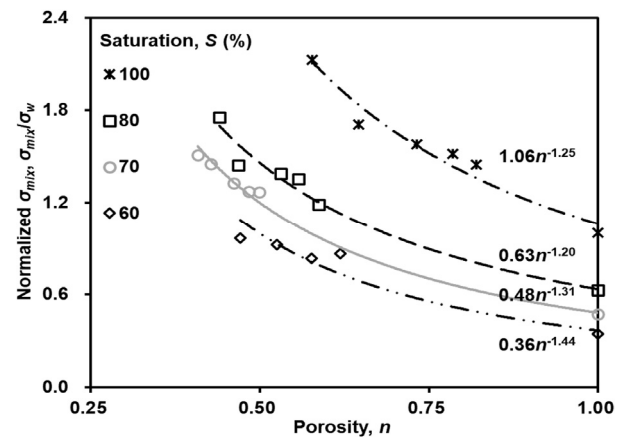


Fig. 9. Normalized electrical conductivity in terms of pore water conductivity  $\sigma_{mix}/\sigma_w$  with varying degree of saturation for kaolin clay as a function of porosity at  $\sigma_w = 0,012\text{ S/m}$

으로 크기 때문이다. 간극률의 증가에 따라  $K_s$ 가 감소하기 때문에 전체적으로  $\sigma_{mix}$ 는 감소하게 된다. 특히 간극률에 따라  $\sigma_{mix}$ 는 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타내었는데, 간극률의 지수인  $m$ 이 -1.20에서 -1.44 사이에 비교적 유사한 값으로 나타났다. 다만, Fig. 7에서  $m$ 이 2.15으로 표현되었던 것과 Fig. 9에서의  $m$ 을 비교하였을 때, 큰 차이를 보인다. 주어진 세립토에 대하여  $\sigma_w$ 에 따라  $m$ 이 변화하는 것은 표면전도의 영향 때문이며, 표면전도와 간극수전도는 별도로 고려되어야 한다. 따라서  $K_s$ 를 고려해야하는 경우, 식 (1)이 아닌 식 (3)을 통하여 전기전도도를 나타내야 한다.

한편 저농도에서 측정된 결과 역시 간극률이 유사할 때, 포화도가 증가할수록  $\sigma_{mix}/\sigma_w$ 가 증가하였다(Fig. 9). 이는 표면전도  $K_s$  또한 포화도에 영향을 받는 것을 뜻하는데, 흙 입자 내의 수분함량이 증가함에 따라 확산 이중층이 점차 확장되기 때문이다(Mojid, 2006). 확산 이중층의 두께가 증가할수록 전기가 흐를 수 있는 연속적인 경로가 형성되기 때문에  $K_w$ 와 마찬가지로  $K_s$  또한 포화도의 함수로 표현되어야 한다.

$K_s$ 를 포화도에 대한 함수로 표현하고자 Fig. 9에 도시한 각 포화도와 간극률에서의  $\sigma_{mix}$ 에서 식 (6)을 적용시켜  $K_s$ 를 계산하였다. 즉,  $K_s$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$K_s = \sigma_{mix} - \sigma_w n^{2.15} S^{2.08} = \sigma_s (1 - n^{2.15}) S^b \quad (7)$$

식 (7)에서  $K_s$ 에 포화도가 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 10에 간극률에 대해 정규화된  $K_s(K_s/(1-n^m))$ 를

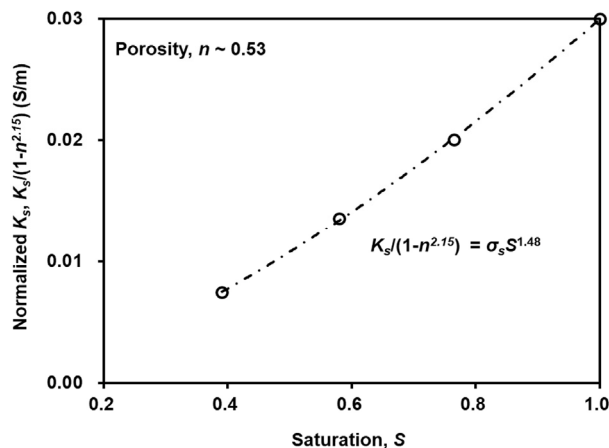


Fig. 10. Normalized surface conduction in terms of porosity  $K_s/(1-n^{2.15})$  for kaolin clay as a function of degree of saturation at  $\sigma_w = 0.012$  S/m

포화도에 따라 나타내었다. 그 결과  $K_s$ 가 포화도에 따라 지수함수적 증가하였는데, 결정된 포화도 지수(식 (3)의  $b$ 값)는 1.48로 나타났다. 이는 포화도에 따른  $K_w$ 의 변화를 나타낸 Fig. 8과는 다소 큰 차이를 보였다. 이는 불포화상태인 세립토에 대하여 식 (4)를 사용하여  $K_w$ 와  $K_s$ 를 예측하는 경우, 서로 다른 포화계수가 적용되어야 함을 의미한다.

저농도와 고농도의 간극수를 이용하여 측정된 kaolin clay에 대한 전기전도도 측정결과(Fig. 8과 Fig. 10), 식 (1)과 같이 측정된 전기전도도( $\sigma_{mix}$ )를 나타낼 경우, 포화도 지수  $a$ 가 간극수의 전도도( $\sigma_w$ )에 따라 다르게 나타났다. 앞서 간극수전도가 지배적인 사립토에 대해  $a$ 가 간극수의 농도에 영향을 받지않는다는 것을 Fig. 5를 통해 확인되었다. 그러나 표면전도가 존재하는 세립토의 경우, 입자 표면과 간극수를 통한 전기적 흐름의 비틀림 정도와 그에 따른 연결성이 다르기 때문에 포화도에 대한 영향이 다를 수 있다. 그렇기 때문에 다양한  $\sigma_w$ 에서 식 (1)을 통해 세립토인 kaolin clay의 전기전도도를 표현함으로써  $a$ 의 변화를 확인할 필요가 있다. 각각의  $\sigma_w$ 에서 간극률에 대한 영향을 최소화하고자 약 0.50로 유사한 값을 가지도록 하였고, 포화도만을 변화시켜 전기전도도를 측정하여 식 (1)에서의  $a$ 를 구하여 Fig. 11에 나타내었다.  $\sigma_w$ 가 증가함에 따라  $a$ 가 1.67에서 2.08까지 비선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 특히,  $a$ 는  $\sigma_w$ 가 매우 작은 구간인 0 ~ 0.515S/m에서 급격히 증가하다가 이후에는 증가폭이 점차 감소하여 최종적으로 2.08에 수렴하였다. Fig. 11에서의  $\sigma_w$ 에 따른  $a$ 의 변화는 Fig. 5와는 다른 결과를 보여주는데, 이는 표면과 간극수에

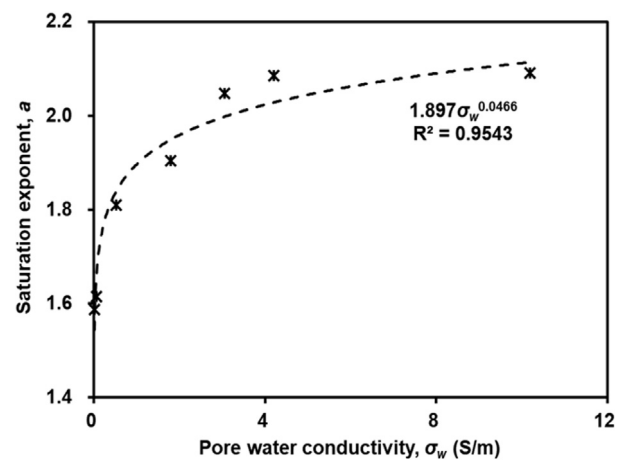


Fig. 11. Variations of  $a$  exponent in Archie's equation for kaolin clay as a function of pore water conductivity  $\sigma_w$



서 이온들의 흐름에 포화도에 따른 의존도가 다른 것을 의미한다. 앞서 언급한 바와 같이 간극수의 농도가 낮을수록 세립토에서 표면전도의 중요성이 더욱 강조된다.  $K_w$ 와  $K_s$ 의 상대적인 크기에 따라 식 (1)로 구한 kaolin clay의  $a$ 는 다르게 나타나고, 불포화상태인 흙의 전기전도도를 나타내기 위해서는 간극수전도  $K_w$ 와 표면전도  $K_s$ 에 각각 별개의 포화도 지수가 고려되어야 한다.

#### 4.3 포화도에 따른 표면전도와 간극수전도

본 연구에 활용된 kaolin clay의 전기전도도는 다음과 같은 식으로 표현 가능하다(Fig. 8과 Fig. 10):

$$\sigma_{mix} = K_w + K_s = \sigma_w n^{2.15} S^{2.08} + \sigma_s (1 - n^{2.15}) S^{1.48} \quad (8)$$

$K_w$ 와  $K_s$ 의 포화도에 대한 민감도를 상대적으로 비교하기 위해 각각  $\sigma_w n^{2.15}$ 와  $\sigma_s (1 - n^{2.15})$ 에 대하여 정규화한 다음 포화도에 따른 전도변화를 Fig. 12에 나타내었다. 이 때, 포화상태에서의  $\sigma_s$ 의 크기는 선행 연구(Choo et al., 2022)에서 제시된 액성한계와  $\sigma_s$  간 관계식을 통해 예측되었다.  $\sigma_s$ 는 세립토의 고유 물성치인 CEC와 밀접한 관련이 있는데, CEC를 측정하기 위한 많은 실험 방법들이 개발되었지만(Aprile and Lorandi, 2012), 이는 실험 방법이 복잡하여 수행하기에 다소 어려움이 있다. 반면, 액성한계는 비교적 쉽게 측정 가능하며, CEC와 밀접한 관련이 있으므로(Spagnoli and Shimobe, 2019)

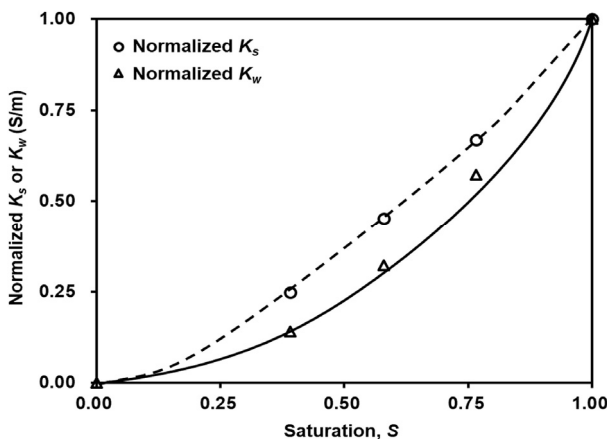


Fig. 12. Normalized pore water conduction in terms of porosity and pore water conductivity  $K_w/\sigma_w n^{2.15}$  and normalized surface conduction in terms of porosity and surface conductivity  $K_s/(1 - n^{2.15})$  for kaolin clay as a function of degree of saturation at  $\sigma_w = 0.012$  S/m. Note both  $K_w/\sigma_w n^{2.15}$  and  $K_s/(1 - n^{2.15})$  are equal to 1.0 at  $S = 1.0$

액성한계를 통한  $\sigma_s$  추정이 가능하다.  $K_w$ 와  $K_s$ 가 포화도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해서는  $K_w$ 와  $K_s$  각각에 대하여  $\sigma_w$ 와  $\sigma_s$ 에 대하여 정규화할 필요가 있다. 그 결과, 포화상태인 세립토의  $\sigma_s$ 는 약 0.03S/m로 나타났으며, 이를 바탕으로  $\sigma_w \sim 0.012$ S/m 일 때,  $\sigma_w n^{2.15}$ 와  $\sigma_s(1 - n^{2.15})$  각각에 대하여 정규화한  $K_w$ 와  $K_s$ 를 포화도에 따라 나타낸 것이 Fig. 12이다.

Fig. 12에서 정규화된  $K_w$ 와  $K_s$  모두 포화도가 증가함에 따라 지수함수적으로 증가하였는데, 포화도에 대한 지수가 각각 2.08과 1.48으로 나타났다. 포화도가 점차 증가함에 따라  $K_w$ 에 비하여  $K_s$ 가 더욱 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 포화도가 0에 가까운 초반 부분( $S < 0.25$ )에서 포화도 변화에 따른  $K_s$ 의 변화가  $K_w$ 의 변화에 비하여 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 이는 건조상태인 세립토에 대하여 포화도의 증가는 확산 이중층과 간극 내 수분 형성의 속도가 다르기 때문이다. 세립토 내 수분함량이 증가함에 따라, 먼저 확산 이중층이 형성되고, 이중층 내의 이온 수가 증가하게 된다. 이중층의 두께는 초기에 증가하며, 이중층 내의 이온 수가 포화 상태에 이르면 더 이상 두께를 증가시킬 수 없는 최대 두께에 도달하게 된다. 이 때, 확산 이중층 바깥의 영역인 간극에 존재하는 간극수가 형성된다. 다시 말해, 세립토 내 수분함량의 증가는 초기에는 확산 이중층의 형성과 관련이 있으며, 그 이후에 이르러 간극수가 형성되는 것이다(Mojid, 2006; Khalil and Monterio Santos, 2009; Fan et al., 2020).

#### 4.4 검증

본 연구에서는 제시한 식 (8)의 정확도를 검증하기 위하여 식 (8) 개발에 사용되지 않은 다양한  $\sigma_w$ (0.012 ~ 10.20 S/m)를 가지는 불포화상태인 흙의 전기전도도를 측정하여 식 (8)로 예측된 값과 비교하였다. 대표적인 평가 지표인 평균절대비오차(Mean Absolute Percentage, MAPE)를 사용하였는데, 이는 예측값에서 오차가 차지하는 정도를 나타내는 지표로, 식 (9)를 통해 구할 수 있다.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\text{measured value} - \text{estimated value}}{\text{measured value}} \right| \quad (9)$$

여기서 N은 비교할 데이터의 개수다. 일반적으로 MAPE 이 20%보다 작을 경우, 예측값이 상대적으로 높은 정

확도를 가지고 있다는 것을 의미한다. 주어진 세립토의 MAPE는 10.31%로,  $\sigma_{mix}$ 와 측정된  $\sigma_{mix}$ 가 상당히 유사하다는 것을 나타낸다. 즉, 서로 다른 포화계수를 적용시킴으로써 수정된 Archie의 방정식으로 불포화토의 전기전도도를 예측하는 것은 합리적인 방법이라 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 포화도가 표면전도와 간극수전도에 미치는 영향을 변화를 분석하고, 포화상태에서 적용 가능한 변형된 Archie의 방정식을 불포화상태에서도 적용할 수 있도록 식을 발전시키기 위하여 사질토와 세립토에 대하여, 4개의 전극을 갖는 셀을 사용하여 포화도와 간극률에 따른 전기전도도를 측정하였다.

- (1) 포화도와 간극률의 증가는 모든 흙 입자 내 연결성을 높이므로 전기전도도가 증가하였다.
- (2) Archie의  $m$ 은 간극수의 전기전도도나 포화도의 변화에 따른 차이가 매우 작기 때문에, 수정된 Archie의 방정식을 사용하여 흙의 전기전도도를 예측할 때는 포화상태에서의  $m$  값을 사용해도 무관하다.
- (3) 상대적으로 입자의 크기가 큰 사질토나 고농도 간극수를 갖는 세립토의 경우, 간극수전도가 지배적이기 때문에 Archie의 방정식으로 불포화상태에서의 전기전도도 예측이 가능하다.
- (4) 저농도 간극수를 갖는 세립토의 경우, 표면전도의 영향으로 수정된 Archie의 방정식을 통해 전기전도도를 표현해야 하는데, 표면전도와 간극수전도의 포화계수가 서로 다르게 나타났다. 포화도 변화에 따른 이중층과 간극 내 수분 형성이 형성되는 속도가 다르기 때문이다. 건조상태인 흙의 경우, 포화도가 증가함에 따라 확산 이중층이 형성되고, 그 두께가 최대치에 도달할 때, 간극내 수분 형성이 시작된다.
- (5) 표면전도가 존재하는 불포화상태인 시료에 변형된 Archie의 방정식을 적용하여 전기전도도를 예측하기 위해서는 표면전도와 간극수전도의 포화계수를 각각 고려해야 한다.

## 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한

국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며, 이에 깊은 감사를 드립니다(RS-2023-00221719).

## 참고문헌 (References)

1. Abu-Hassanein, Z. S., Benson, C. H., and Blotz, L. R. (1996), Electrical Resistivity of Compacted Clays, *Journal of geotechnical engineering*, Vol.122, No.5, pp.397-406.
2. Aprile, F. and Lorandi, R. (2012), Evaluation of Cation Exchange Capacity (CEC) in Tropical Soils Using Four Different Analytical Methods, *Journal of Agricultural Science*, Vol.4, No.6, p.278.
3. Archie, G. E. (1942), The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, *Transactions of the AIME*, Vol.146, No.1, pp.54-62.
4. Atkins Jr, E. and G. H. Smith (1961), "The Significance of Particle Shape in Formation Resistivity Factor-porosity Relationships", *Journal of Petroleum Technology*, Vol.13, No.3, pp.285-291.
5. Basso, B., Amato, M., Bitella, G., Rossi, R., Kravchenko, A., Sartori, L., Carvahlo, L., and Gomes, J. (2010), "Two Dimensional Spatial and Temporal Variation of Soil Physical Properties in Tillage Systems Using Electrical Resistivity Tomography", *Agronomy Journal*, Vol.102, No.2, pp.440-449.
6. Besson, A., Cousin, I., Dorigny, A., Dabas, M., and King, D. (2008), "The Temperature Correction for the Electrical Resistivity Measurements in Undisturbed Soil Samples: Analysis of the Existing Conversion Models and Proposal of a New Model", *Soil Science*, Vol.173, No.10, pp.707-720.
7. 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*, Vol.105, pp.225-234.
8. Choo, H., Kim, J., Lee, W., and Lee, C. (2016), Relationship between Hydraulic Conductivity and Formation Factor of Coarse-grained Soils as a Function of Particle Size, *Journal of Applied Geophysics*, Vol.127, pp.91-101.
9. Choo, H., Park, J., Do, T. T., and Lee, C. (2022), Estimating the Electrical Conductivity of Clayey Soils with Varying Mineralogy Using the Index Properties of Soils, *Applied Clay Science*, 217.
10. Fan, Y., Pan, B., Guo, Y., and Lei, J. (2020), "Effects of Clay Minerals and Pore-Water Conductivity on Saturation Exponent of Clay-Bearing Sandstones Based on Digital Rock".
11. Friedman, S. P. (2005), Soil Properties Influencing Apparent Electrical Conductivity: a Review, *Computers and electronics in agriculture*, Vol.46, No.1-3, pp.45-70.
12. Glover, P. W., Hole, M. J., and Pous, J. (2000), A Modified Archie's Law for Two Conducting Phases, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.180, No.3-4, pp.369-383.
13. Gorman, T. and Kelly, W. (1990), Electrical-hydraulic Properties of Unsaturated Ottawa Sands, *Journal of Hydrology*, Vol.118, No. 1-4, pp.1-18.
14. Keller, G. V. and Frischknecht, F. C. (1966), *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*.
15. Khalil, M. A. and F. A. Monterio Santos (2009), "Influence of Degree of Saturation in the Electric Resistivity-hydraulic Conductivity Relationship", *Surveys in geophysics*, Vol.30, pp.601-615.

16. Kim, J., Choo, H., Lee, C., and Lee, W. (2015), Relationship between Hydraulic Conductivity and Electrical Conductivity in Sands, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.6, pp.45-58.
17. Kim, J. H., Yoon, H. K., Cho, S. H., Kim, Y. S., and Lee, J. S. (2009), Four Electrode Resistivity Probe for Porosity Evaluation, *Journal of Geotech Test*, Vol.34, No.6, pp.668-675.
18. Kim, J.-H., Yoon, H.-K., Choi, Y.-K., and Lee, J.-S. (2009), Porosity Evaluation of Offshore Soft Soils by Electrical Resistivity Cone Probe, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.2, pp.45-54.
19. Li, Q., Xu, S., and Zeng, Q. (2016), The Effect of Water Saturation Degree on the Electrical Properties of Cement-based Porous Material, *Cement and Concrete Composites*, Vol.100, No.70, pp.35-47.
20. Mojid, M. and H. Cho (2006), "Estimating the Fully Developed Diffuse Double Layer Thickness from the Bulk Electrical Conductivity in Clay", *Applied Clay Science*, Vol.33, No.3-4, pp.278-286.
21. Revil, A., Cathles III, L. M., Losh, S., and Nunn, J. A. (1998), "Electrical Conductivity in Shaly Sands with Geophysical Applications", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.103, No.B10, pp.23925-23936.
22. Rinaldi, V. A. and Cuestas, G. A. (2002), Ohmic Conductivity of a Compacted Silty Clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.10, pp.824-835.
23. Salem, H. S. and G. V. Chilingarian (1999), "The Cementation Factor of Archie's Equation for Shaly Sandstone Reservoirs", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol.23, No.2, pp.83-93.
24. Santamarina, J.C., Klein, K.A., Wang, Y.H., and Prencke, E. (2002), Specific Surface:Determination and Relevance, *Can. Geotech. J.*, Vol.39, No.1, pp.233-241.
25. Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., and Richard, G. (2005), "Electrical Resistivity Survey in Soil Science: a Review", *Soil and Tillage Research*, Vol.83, No.2, pp.173-193.
26. Schön, J. H. (2015), Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics, Elsevier.
27. Spagnoli, G. and Shimobe, S. (2019), A Statistical Reappraisal of the Relationship between Liquid Limit and Specific Surface Area, Cation Exchange Capacity and Activity of Clays, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol.11, No.4, pp.874-881.

Received : June 19<sup>th</sup>, 2023

Revised : August 20<sup>th</sup>, 2023

Accepted : August 20<sup>th</sup>, 2023