

# 전기비저항 콘 프로브를 이용한 해안 연약 지반의 간극률 산정

## Porosity Evaluation of Offshore Soft Soils by Electrical Resistivity Cone Probe

김 준 한<sup>1</sup> Kim, Joon-Han

윤 형 구<sup>2</sup> Yoon, Hyung-Koo

최 용 규<sup>3</sup> Choi, Yong-Kyu

이 중 섭<sup>4</sup> Lee, Jong-Sub

### Abstract

The electrical characteristics of soils have been used for investigating soil properties. The purpose of this study is the development and application of the electrical resistivity cone probe (ERCP) for the evaluation of the porosity in the field with high precision. The shape of the probe tip is a cone shape to minimize the disturbance during penetration. In addition, the four terminal pair configuration is adopted to minimize the electrical interference. The electrical resistances are continuously measured during penetration of the ERCP using penetration rigs with 0.33 mm/sec penetration rate at Incheon and Busan sites. With the measured resistance profile and electrical resistivity of electrolyte of undisturbed samples, soil porosity profiles are obtained by using Archie's law. The empirical coefficients for the Archie's law are obtained based on the electrolyte extracted from the undisturbed samples. The estimated porosity profiles show similar trends to those of in-situ penetration tests such as SPT, CPT, and DMT. This study suggests that the ERCP may be an effective tool for the porosity estimation in the field with minimum disturbance.

### 요 지

흙의 전기적 특성은 지반 상태를 평가하는 방법으로 사용되어 왔다. 본 논문의 목적은 현장 지반의 간극률을 우수한 정밀도로 평가하기 위한 현장 관입용 전기비저항 콘 프로브의 개발 및 적용성 평가이다. 전기비저항 콘 프로브는 관입에 따른 교란을 최소화 시키기 위해 콘 모양으로 제작 되었다. 또한 전기적 간섭을 최소화 시키기 위해 외부전극과 중심전극이 4 단자 쌍 회로 방식으로 구성되어 있다. 개발된 장비의 현장 적용성 평가를 위하여 인천과 부산에서 현장실험을 수행하였으며, 콘관입장비를 이용하여 0.33mm/sec의 속도로 관입하면서 선단부에서 전기비저항 값을 측정하였다. 측정된 전기비저항 값과 비교란 시료로부터 얻은 간극수의 전기비저항 값을 Archie에 의해 제안된 경험식에 적용하여 대상지반의 간극률을 계산하였다. Archie 경험식의 실험상수는 비교란시료로부터 추출한 간극수에 근거하여 결정하였다. 산정된 간극률의 프로파일을 동일 지역에서 수행된 SPT, CPT, 그리고 DMT의 지반조사 결과와 비교한 결과 경향성이 상당히 유사한 것으로 나타났다. 본 논문에서 제안된 ERCP는 대상 지반의 교란을 최소화 시키며 현장의 국부적인 간극률 산정에 효과적인 장비일 것으로 나타났다.

**Keywords :** Archie's law, Electrical resistance, Penetration test, Porosity

1 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ.)

2 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (Ph.D Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ.)

3 정회원, 경성대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engr., Kyungung Univ.)

4 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ., jongsu@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

전기비저항 탐사는 인위적으로 지반에 전류를 흐르게 하여 발생하는 전위차를 이용하여 각 층의 고유 비저항을 산출하고 지하지층에 대한 정보를 측정하는 탐사 기술이다. 전기비저항은 물질의 고유정수로서 흙의 종류, 흙 입자의 조성, 체적 함수비, 포화도, 간극의 구조, 지반의 온도, 입자의 모양, 방향에 따른 이방성, 그리고 간극수의 특성 등에 영향을 받는다(Santamarina et al., 2001). 윤춘경 등(1998)은 다양한 조건을 변화시키며 흙의 구성광물과 간극수의 성분이 전기비저항에 미치는 영향을 평가하기도 하였으며, 김영진(2003)은 온도변화에 따른 전기비저항의 특성, 황세호 등(2007)은 전기비저항과 염분도와의 관계 그리고 오명학 등(2004)은 체적함수비와의 관계등을 규명하여 전기비저항 탐사법의 영향 인자들을 평가하였다. 전기비저항은 다양한 전극 배열방법을 이용하여 산정되며, 상호비교를 통해 신뢰성을 확보할 수 있다(김정호 등 2001a; 김정호 등 2001b; Reynolds, 1997). 특히 조인기 등(1996)은 전기비저항 탐사 방법들의 감도분석 연구를 수행하여 다양한 조건에 맞는 탐사 방법을 제시하였다.

1900년대 초에 개발된 전기비저항탐사(Electrical resistivity survey)는 지하수위치, 지하 공동, 지하 단층 조사 그리고 지하수 오염여부 등의 분야에 활용되고 있다(오명학 2005; 오명학 등 2006; 김용성 등 2008; 김재진 2008). 또한 유동주 등(2006)은 벤토나이트 함량에 따른 연구를 수행하여 세립분 함량에 따른 전기비저항 특성도 평가하였다. 현재는 3차원 영상화로 지질구조 특성을 파악 할 수 있도록 개발되고 있으며, 해양 지구물리학자들은 해저 퇴적층의 비교란 간극비와 밀도를 측정하기 위해 전기비저항탐사법에 기초한 원위치 탐사장비나 실내실험장비들을 사용하여 왔다(Jackson et al., 1978).

기존의 전기비저항 측정 방법은 여러 개의 전극을 지표에 설치하고 전극 간격을 조절하여 측정하거나 CPT 콘의 마찰관(friction sleeve)에 웨너 형태의 전극을 배열하여 측정되었다(Campanella, 2008). 지표에 전극을 설치하여 측정하는 방법은 주로 지하수 오염을 감지하기 위해 사용되었으며, 오염 지반과 비오염 지반사이의 전기적 분포의 차이가 5~10% 이상이 되어야 신뢰성 높은 결과를 도출 할 수 있다는 제한이 있다(Benson et al., 1985). 또한 전극 사이의 간격이 커질수록 지반의 포괄적인 특성만을 평가하여 민감도가 떨어진다는 단점이

있다. 콘의 경우는 고해상도의 비저항 분포와 지층의 변화를 민감하게 탐지할 수 있는 장점이 있지만 전극이 마찰관에 위치하여 콘 선단 관입에 의해 이미 교란된 지반의 전기비저항을 측정하게 되어 신뢰성이 많이 떨어지는 한계가 있다(Campanella and Weemecs, 1990). 따라서 지반의 국지적인 전기비저항 특성을 신뢰성 높게 평가하기 위해 새로운 측정 방법이 필요한 실정이다.

본 논문에서는 전기비저항을 이용하여 해안의 포화된 지반에 대한 공간적분포(spatial variability) 파악을 위한 전기비저항 콘 프로브(Electrical Resistivity Cone Probe, ERCP)를 개발하고 현장실험과 실내실험을 통하여 그 적용성을 검증하려 하였다. 탐침의 선단 형상, 탐침 재료의 강도 및 전기화학적 특성, 관입 속도, 작동 주파수 등을 고려하여 현장용 탐침을 설계하였다. 본 논문은 전기비저항과 지반의 간극률의 관계에 대한 이론적 배경으로 시작하며 전기비저항콘 프로브(ERCP)의 설계와 보정, 실내실험, 현장실험과 실험결과를 이용한 간극률 산정에 대한 내용으로 구성되었다.

## 2. 전기비저항과 포화된 흙의 간극률 관계

지반 내 전류의 흐름은 유전전도(dielectric conduction), 전자전도(electronic conduction), 그리고 전해전도(electrolytic conduction)에 의해 결정된다(Reynolds, 1997). 유전전도는 교류전류로 인해 부도체 원자의 핵과 원자간의 거리를 변화시켜 발생하고 전자전도는 도체에서 전자가 이동하여 발생하므로 부도체인 흙에서는 영향 정도가 미미하다. 전해전도는 지반에서 공극사이의 전해질 이온의 운동을 통해 발생하는 것으로 포화된 지반에서 전류의 흐름을 결정한다. 포화된 해안 지반의 공극은 주로 물로 구성되며, 이는 대체적으로 주변 바닷물과 비슷한 성질의 간극수로 채워져 있다. 따라서 포화된 흙의 전기전도도는 흙 입자의 전기전도도, 간극률, 그리고 간극을 채우고 있는 전해질 용액의 전기전도도로 정의할 수 있으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\zeta_{mix} = (1-n)\zeta_p + n\zeta_{el} + (1-n)\frac{\gamma_p}{g}\lambda_{dat}S_a \quad (1)$$

여기서,  $\zeta_{mix}$ 는 흙 전체의 전기전도도,  $\zeta_p$ 는 흙입자 자체의 전기전도도,  $\zeta_{el}$ 는 간극수의 전기전도도,  $n$ 은 간극률,  $\gamma_p$ 는 흙입자의 단위중량,  $g$ 은 중력가속도,  $\lambda_{dat}$ 은 흙 표면 전기전도도, 그리고  $S_a$ 는 흙 입자의 비표면적이다. 식 (1)

의 우변은 순서대로 흙 입자의 전기전도도, 간극수의 전기전도도, 그리고 점토 입자의 이중층(double layer)효과에 대한 함수이다. 일반적으로 흙 입자 자체의 전기전도도는 전해질 용액의 전기전도도보다 상대적으로 매우 작아 다른 두 항에 비해 무시할 수 있다. 또한 이중층 효과가 없는 모래 또는 실트의 경우나 해안 점성토의 경우 바닷물인 전해질 용액의 농도가 상대적으로 높아 이중층 효과(double layer effect)가 작아져 포화된 흙의 전기전도도는 식 (2)으로 표현할 수 있다 (Lee et al., 2008).

$$\zeta_{mix} = n\zeta_{el} \quad (2)$$

실제 흙 입자는 크기가 유한하고 입자의 구조가 평행하지 않으므로 전기전도 경로(conduction path)에서 발생하는 비틀어짐으로 인해 식 (2)는 식 (3)과 같이 표현된다(Archie, 1942).

$$F = \rho_b / \rho_f = a \cdot n^{-m} \quad (3)$$

여기서, F는 흙의 비저항과 간극수의 비저항간의 관계를 나타내는 변수(formation factor),  $\rho_b$ 와  $\rho_f$ 는 각각 흙과 간극수의 전기비저항, n은 간극률, a와 m은 흙에 따라 주어지는 상수이다. a값의 경우, 비압밀 지반의 경우 대략  $a \approx 1$ 의 값을 갖는 것으로 알려져 있다(Jackson et al., 1978). m값의 경우 많은 연구자들에 의해 다양한 종류의 지반재료에 대하여 여러가지 값이 제시되었다: Jackson 외 (1978)는 모래에서  $m \approx 1.5$  그리고 점토에서  $m \approx 1.8 \sim 3$ 을 제시하였으며, Timur 외.(1972)는 sandstones는  $m=1.73$ , Salem과 Chilingarian(1999)은 다공질 돌로마이트에서  $m=1.09$ , 글라스비드에서  $m=1.3$ , 균질하고 깨끗한 모래는  $m=1.3 \sim 1.6$ , 불균질한 침전물에서  $m=1.5 \sim 2.3$ 을 제시하였다.

### 3. 설계 및 제작

#### 3.1 형상

전기비저항 콘 프로브(ERCP)는 해안 연약지반을 대상으로 관입에 따라 프로브 주변에 발생하는 국부적인 전기저항을 측정하는 장비이다. 전기화학적, 강도적, 그리고 기하학적 특성을 고려하여 설계 및 제작 되었으며 ERCP의 전체적인 모식도와 관입기 로드(rod)와의 연결

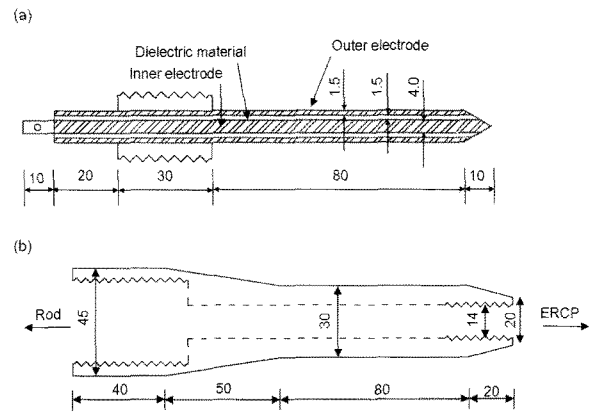


그림 1. 전기비저항 콘 프로브 모식도: (a) 전기비저항프로브(ERCP); (b) 컨넥터. 그림내 숫자의 단위는 mm 임

방식은 그림 1과 같다. 프로브는 중심전극과 외부전극 그리고 그 사이를 채우고 있는 폴리에틸렌으로 구성된다. 중심전극과 외부전극의 전기적인 누전을 방지하기 위해 폴리에틸렌을 이용하여 중심전극을 절연하였다. ERCP는 해안 연약지반의 간극률 평가에 사용 됨에 따라 부식을 방지하고 강도를 증가 시키기 위해 스테인레스 스틸을 사용하여 제작되었다(Hulbert et al., 1982).

프로브 관입시 교란에 의한 영향을 최소화 시킬 수 있도록 프로브의 총 길이는 130mm, 중심전극의 외경은 4mm, 외부전극의 외경은 10mm 두께는 1.5mm로 제작하였다. 프로브의 선단 형상은 관입에 따라 대상지반의 전자기장과 교란 영역을 발생 시키며, 이와 같은 영향을 최소화 시키기 위해 프로브 선단을 콘 형상으로 설계하였다.

#### 3.2 전기회로 구성

ERCP의 구성방식은 전기적인 간섭 및 영향을 최소화 시켜 신뢰성 높은 데이터를 측정하기 위해 그림 2(a)와 같이 High Current(Hc)와 High Potential(Hp)은 중심전극, Low Current(Lc)와 Low Potential(Lp)은 외부전극에 연결되는 4단자 쌍 회로 방식을 사용하였다. Hp와 Lp는 전위차를, Hc와 Lc는 전류를 각각 측정하여 옴의 법칙을 이용해 두 전극 사이에 존재하는 흙의 저항( $R=V/I$ )을 도출한다. 또한 전선간의 전자기장 형성을 억제 하기 위하여 실드 도선망의 신호 간섭 차단 효과가 있는 동축전선(coaxial cable)이 사용되었으며, 동축전선과 전극간의 연결 부분이 간극수에 의해 누전되지 않도록 에폭시를 이용하여 코팅처리하였다.

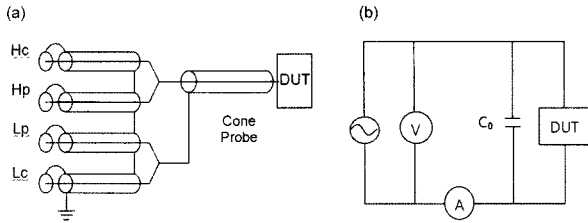


그림 2. 4단자 쌍 회로방식: (a) 접속도; (b) 회로도. Hc, Hp: 중심전극; Lc, Lp: 외부전극; DUT(Device under Test): 관입시 프로브 주변의 흙

### 3.3 작동주파수 선정

주파수에 따라 비저항이나 유전율 같은 전기적 성질은 공명 및 이완 현상이 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 전기비저항 콘 프로브를 사용하기 위한 안정적인 주파수 영역을 결정하여야 한다. 이를 위하여 여러가지 농도의 소금 용액에 대하여 임피던스 애널라이저(HP4192A, 입력전압: 1V)를 사용하여 1Hz~10MHz의 주파수 범위에서 전기저항을 측정하였다. 소금물의 농도는 0.1M(7.84ms/cm), 0.2M(15.91ms/cm), 0.3M(21.16ms/cm), 0.5M(35.0ms/cm), 1.0M(63.1ms/cm), 1.5M(88.7ms/cm)이 있으며, 온도는 15.8°C로 유지하였다. 주파수에 따른 전기저항의 측정값을 그림 3에 나타내었다. 그림 3과 같이 측정된 전기저항은 1kHz 근처와 400kHz 이상에서 공명 현상이 발생하였다. 공명현상이 발생한 주파수대역에는 전기비저항으로 환산시 신뢰도가 낮아질 수 있으므로 공명현상이 발생하지 않는 주파수 대역을 선택하여야 한다. 본 연구에서 개발된 장비는 10~300kHz의 주파수 범위에서 공명현상이 나타나지 않고 일관성 있는 전기저항을 보여주므로 100kHz를 작동 주파수로 선정하였다.

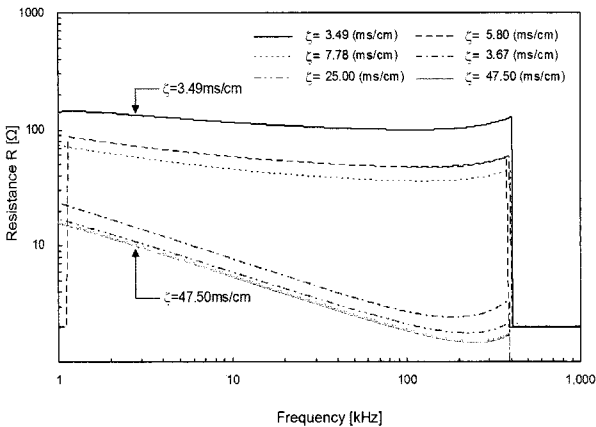


그림 3. Frequency sweeping (HP4192A Impedance analyzer; 1V, 15.8°C)

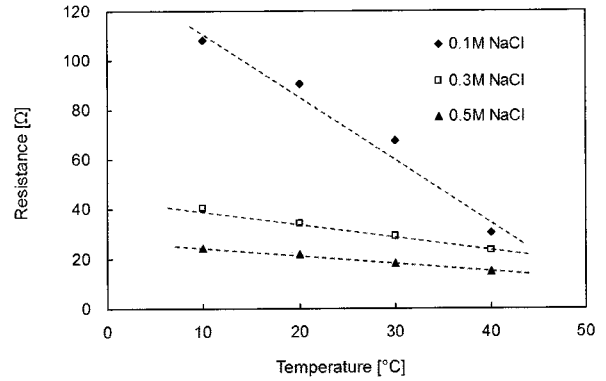


그림 4. 온도변화에 따른 전기저항(HP4192A Impedance analyzer; 1V, 100kHz)

### 3.4 온도에 따른 전기저항 보정

전기전도도는 온도 변화에 대해 2%/°C 정도로 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 지중내의 온도는 깊이와 계절에 따라 달라진다. 깊이 10m 미만(특히 1~2m)의 경우 계절에 따라 지중내 온도가 변화하고, 깊이 10~20m에서는 계절에 따른 영향을 받지 않는다. 또한 깊이 20m 이상에서는 지구 평균 기온상승률인 1km당 20~30°C 정도씩 증가하는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 이유로 지반에 관입하면서 전기저항을 측정하는 ERCP는 계절이나 깊이에 따른 온도 보정이 필요하다. 온도 변화에 따른 전기저항의 변화를 관찰하기 위해 0.1M, 0.3M, 0.5M의 NaCl의 용액에 대하여 10°C, 20°C, 30°C, 40°C의 온도에 대하여 주파수 Sweeping을 실시하였다. 전기비저항 콘 프로브의 사용 주파수를 100kHz를 선정하였기 때문에 이 주파수에서 온도와 농도에 따른 전기저항 값의 변화를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서와 같이 동일농도에서 온도가 증가함에 따라 전류의 전달 매체인 이온의 움직임의 증가하므로 전기저항은 감소하였다. 또한 용액의 소금농도가 감소할수록 전기저항은 온도에 더 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

### 3.5 전기비저항 콘 프로브의 보정

지반 특성이 동일하여도, 프로브의 모양, 전극 길이, 재질, 그리고 연결케이블 등에 의해 측정되는 저항값은 달라지게 된다. 따라서 전기저항을 이용하여 직접적으로 대상 지반의 특성을 파악하는 것은 부적합하며, 물질의 고유 저항인 전기비저항으로 환산되어야 한다. 측정된 전기저항은 그 물질의 전기비저항과 선형 관계를 가

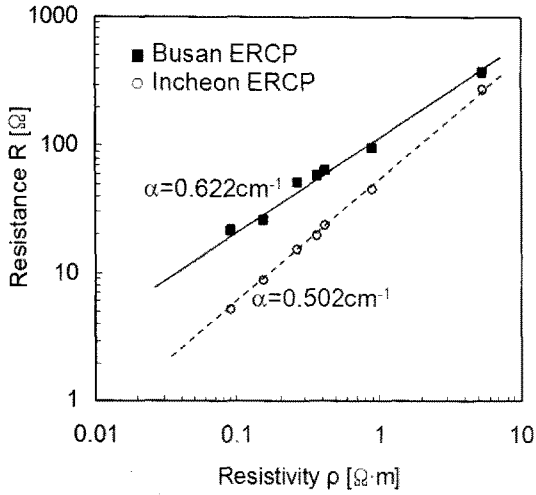


그림 5. 전기비저항 프로브의 보정(INTEC LCR-819, 1V, 100kHz, 15°C)

지며 식 (4)와 같이 표현된다.

$$R = \alpha \cdot \rho \quad (4)$$

여기서,  $\rho$ 는 전기비저항,  $R$ 은 전기저항, 그리고  $\alpha$ 는 프로브 특성을 나타내는 상수로 프로브마다 다른 값을 나타낸다.  $\alpha$ 는 서로 다른 농도의 소금물에서 측정된 전기전도도에 역수를 취해 산정된 전기비저항과 ERCP로 측정된 전기저항의 관계를 이용하여 계산 할 수 있다. 그림 5는 측정된 전기저항과 전기비저항 관계를 이용하여 기울기 값( $\alpha$ ) 도출을 나타낸다. 인천 현장(Incheon-ERCP)에 적용한 ERCP의 경우  $\alpha$ 는  $0.502\text{cm}^{-1}$ 으로 나타났으며, 부산현장(Busan-ERCP)의 경우는  $\alpha$ 값이  $0.622\text{cm}^{-1}$ 으로 나타났다.

### 3.6 전기비저항 콘 프로브의 측정영역

ERCP의 측정 가능 영역을 그림 6과 같이 실내 실험을

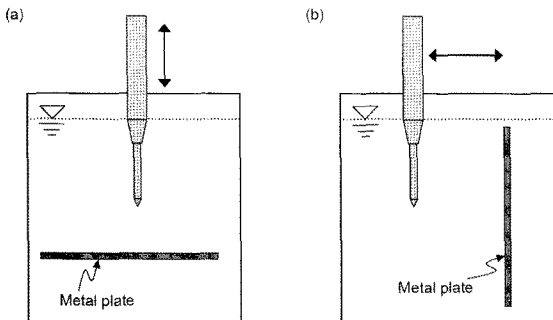


그림 6. 전기비저항 콘 프로브의 측정영역 파악(INTEC LCR-819, 1V, 100kHz, 15°C): (a) 하부 측정영역; (b) 측면 측정영역

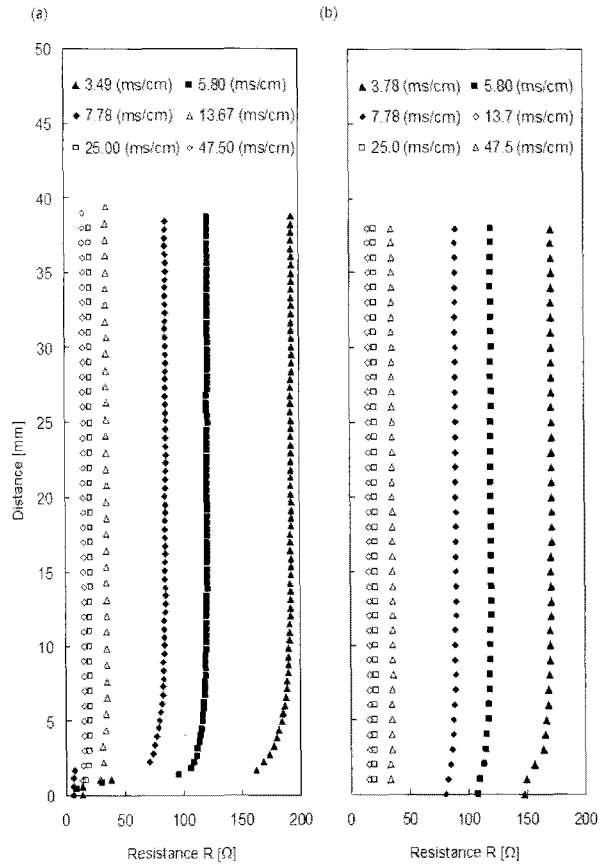


그림 7. 전기비저항 콘 프로브 측정영역 범위 (INTEC LCR-819, 1V, 100kHz, 15°C): (a) 하부 측정영역; (b) 측면 측정영역

이용하여 평가하였다. 경계조건(boundary condition)에 대한 영향을 최소화 시키기 위해  $25\text{cm} \times 25\text{cm} \times 25\text{cm}$  수조에서 여러가지 농도( $3.49\text{ms/cm}$ ,  $5.80\text{ms/cm}$ ,  $7.78\text{ms/cm}$ ,  $13.67\text{ms/cm}$ ,  $25.00\text{ms/cm}$ ,  $47.50\text{ms/cm}$ )의 소금물을 이용하여, 금속판(metal plate)과 프로브 사이의 상·하 및 측면 거리를 조절하면서 저항 변화를 측정하였다. 측정된 전기저항 변화는 하부 방향과 측면 방향 순서대로 그림 7에 나타내었다. ERCP의 측정 가능 영역은 금속판 거리에 따라 저항값이 변화하는 구간으로 정의 할 수 있다 하부방향과 측면방향 모두 용액의 전기전도도가 감소함에 따라 금속판의 영향범위가 증가하였다. 즉, 대상물의 전기전도도가 낮을수록 프로브가 측정하는 영역은 넓어짐을 의미한다. 전기전도도가 작으면 하부 및 측면 방향의 영향범위는 각각 약  $9\text{mm}$ 와  $5\text{mm}$ 정도로 나타났다. 프로브의 형상이 콘의 형상이고 전극이 콘에 설치되어 있기 때문에 전류의 흐름은 측면보다 상대적으로 콘의 전면부로 흐르기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다. 실험결과 ERCP는 상당히 국부적인 영역을 측정하는 것으로 나타났다.

#### 4. 실내실험

현장에 적용에 앞서 실내실험을 통해 전기비저항 콘 프로브의 신뢰성에 대한 실험을 실시하였다. 높이가 150mm 이고 직경이 150mm인 원기둥형 플라스틱 수조에 0.5M의 소금용액을 채우고 입경 0.21mm의 글래스비즈를 수중강 하하여 그림 8(a)와 같은 높이 70mm의 시료를 조성하였다. 실내실험에서는 직경이 2mm인 소형 전기비저항 프로브(SERP: Small Electrical Resistivity Probe)와 직경이 10mm인 현장용 전기비저항 콘 프로브(ERCP)를 적용하였다. 두 전기비저항 프로브는 크기만이 다를 뿐 전극의 재질이 유사하고 회로의 구성은 동일하다.

매 심도 1mm 관입에 따라 LCR미터(Intec LCR-819)와 컴퓨터를 이용하여 전기저항을 측정하였으며, 측정된 전기저항은 그림 8(b)와 같다. 시료 조성이 균질하여 심도에 따른 각각의 측정 값은 거의 유사하게 도출되었지만, 직경 2mm의 소형 전기비저항 프로브(SERP)는 약 200Ω 그리고 ERCP는 약 30Ω으로 상대적인 값은 상당히 큰 차이를 나타냈다. 이는 앞서 언급하였듯이, 프로브 직경등에 영향을 받는 전기저항 값으로 효율적인 비교를 수행하기 위해서는 고유 저항 값인 전기비저항 값으로 환산되어야 한다. 따라서 보정 실험으로 결정된  $\alpha$  값을 이용하여 전기비저항 값으로 환산 후 그림 8(c)에 나타내었으며, 고유 값인 전기비저항 값은 상당히 유사하게 산정되었다. 식 (3)에서 m값은 1로 산정되었으며 이를 이용하여 간극률을 산정하여 그림 8(d)에 나타내었다.

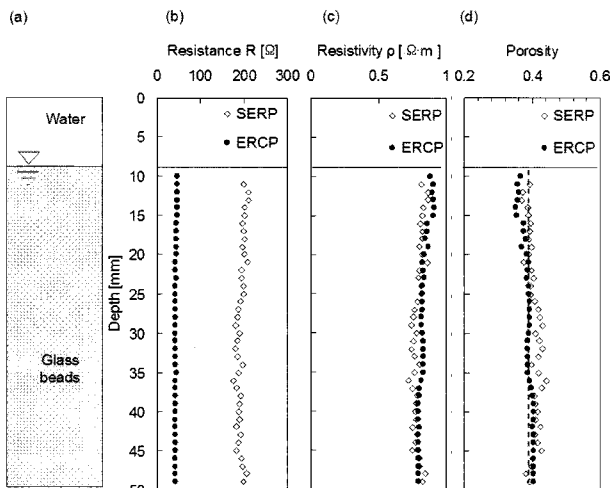


그림 8. 전기비저항 보정에 따른 적용성 평가: (a) 시료 조성; (b) 전기 저항; (c) 전기비저항; (d) 간극률(m=1 적용, 점선은 부피비로 산정한 전체 간극률)

#### 5. 현장실험

개발된 ERCP의 현장 적용성 평가를 수행하기 위해 인천과 부산에서 실험을 수행하였다. 실험이 수행된 인천 현장은 조수간만의 차가 심한 지역으로 점토질 실트와 실트질 점토로 이루어져 있다. 인천 현장은 과거 갯벌지역이었으나 1980년대, 1990년대의 간척사업으로 인해 육지로 변경되어 농경지로 사용되어 왔다. 실험이 수행된 부산 현장의 경우 상부모래층, 실트질 점토층 그리고 하부에 모래층으로 구성되어 있는 지역이다.

##### 5.1 현장실험 장비 구성

현장실험에 사용된 장비는 ERCP, 유압식 시추기, LCR meter(Intec LCR-819), 그리고 컴퓨터이다. ERCP는 룯드(Rod)와 결합된 후 유압 시추기를 통해 측정 심도까지 0.33mm/sec의 속도로 관입되었으며 그림 9에 실험 전경과 측정 시스템을 나타내었다. 관입에 따른 전기저항은 신뢰성을 향상시키기 위해 10개의 전기저항 값을 평균하여 초당 2회 측정하였다. LCR meter는 회로의 안정화를 위하여 임피던스 애널라이저(HP4192A Impedance Analyzer)로 결정된 입력 전압(1V)과 주파수(100kHz)를 사용하였다.

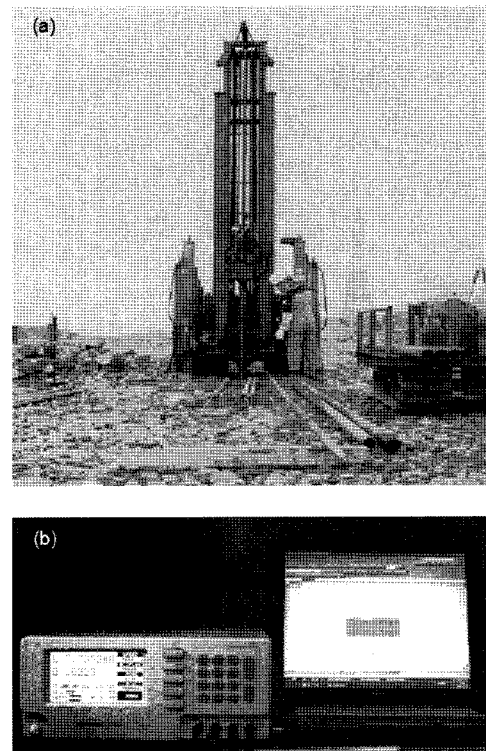


그림 9. 전기비저항 콘 프로브 현장 실험: (a) 실험 전경; (b) 측정 장치

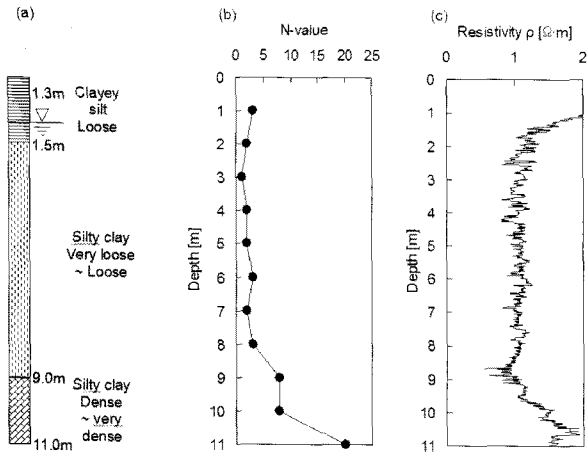


그림 10. 인천현장시험 결과: (a) 주상도; (b) 표준관입저항치 프로파일; (c) 전기비저항 프로파일

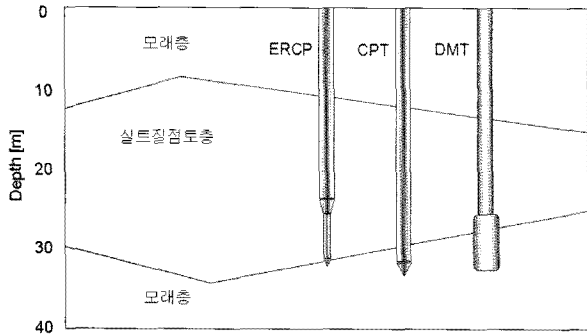


그림 11. 부산현장 주상도 및 현장시험 위치

## 5.2 현장시험 결과

인천현장은 11m이후 매우 단단한 지층이 나타나 관입시험은 1~11m사이에서만 수행되었다. 부산현장은 14m까지 선굴착 후 14~34m 구간에서 시험을 수행하였

다. 그림 10 및 11에는 각 현장의 관입깊이에 따른 주상도를 나타내었다.

인천 현장에서 수행된 결과를 이용하여 계산된 전기비저항 값은 그림 10에 나타내었다. 상부에서 지하 수위(1.3m)까지는 포화도가 1미만 이므로 간극내 공기로 인해 포화도 1인 지층보다 큰 비저항값이 얻어졌다. 또한 심도에 따라 전기비저항 값은 일정한 범위의 값을 나타내고 있으며, 약 9m 이후부터는 단단한 지층으로 인하여 측정값이 증가하였다. 이는 시추 주상도의 견고한 실트질 점토층과 SPT-N치와 비슷한 경향을 보여준다.

부산현장 시험결과를 그림 12에 나타내었다. 측정된 전기비저항값은 14m에서 18m까지 변화가 심하게 나타났으며 이는 지층의 형상이 복잡한 것으로 사료된다. 관입깊이 18m 이상에서는 전기비저항값이 감소하다가 관입깊이 약 27m에서부터 증가하였으며, 약 31m 지점에서 전기비저항 값이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 한편 동일 지역에서 수행된 CPT 측정 결과인 그림 12(b)와 같은 원추관입저항력  $q_c$  값은 18~25m 사이에서는 조금씩 감소하는 경향을 보이며, 관입깊이 25m 이후에는 증가한다. DMT 실험으로부터 산정된 재료지수( $I_d$ ), 수평응력지수( $K_d$ ) 역시 그림 12(d)와 (e)에 나타내었다. 측정된  $I_d$  값은 전기비저항 값과 동일하게 약 29m까지 감소하는 경향을 보이며 29m 이후에는 증가하는 것으로 나타났다. ERCP, CPT 및 DMT 실험결과를 종합하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) ERCP는 14m~16m구간, CPT는 18m~20m구간, DMT는 18m~21m구간에서 측정값에서 변화가 크게 나타

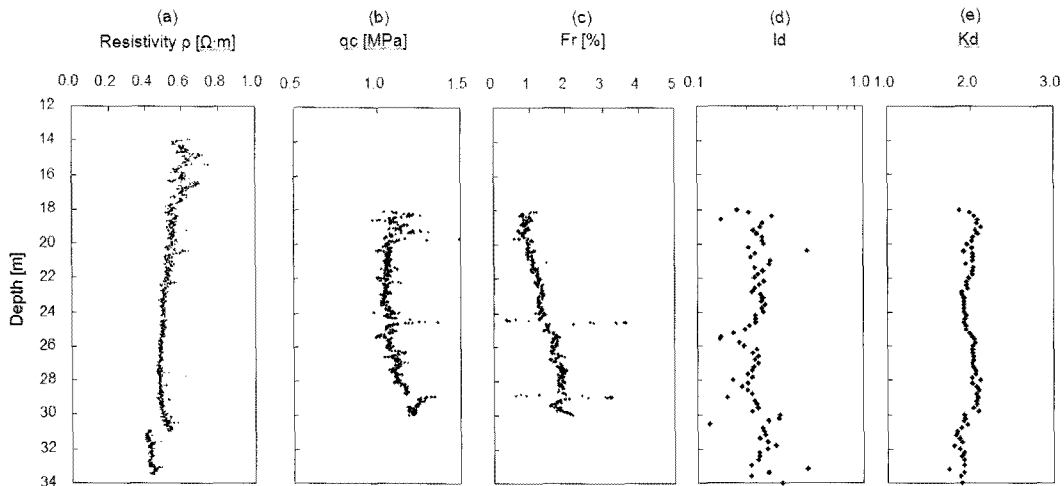


그림 12. 부산현장시험 결과: (a) 전기비저항 프로파일; (b) CPT  $q_c$ ; (c) CPT Fr; (d) DMT  $I_d$ ; (e) DMT  $K_d$

났다. 이와 같은 결과는 토질주상도와 비교한 결과 모래층과, 실트층, 그리고 점토층이 혼재하여 있는 구간 때문에 판단된다.

- (2) ERCP의 16m~31m구간, CPT의 20m~29m구간, DMT의 22m~30m구간에서는 측정값에서 변화폭이 크지 않은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 이 구간에서 지층이 비교적 균일하였기 때문에 판단된다. 그러나 20m~21m(ERCP), 24m~26m(CPT), 24m~26m(DMT)과 같이 비교적 얇은 구간에서 측정치의 변동이 발생하는데 이 구간에서는 실트질 점토층에서 실트질의 함량이 높은 구간으로 사료된다.
- (3) ERCP의 31m, CPT의 29m 지점에서 전기비저항은 급격히 감소하고, 원추관입저항력이 크게 증가하였으며, 주변마찰력비율에서 큰 변동이 발생하였다. 토질주상도와 비교한 결과 이와 같은 이유는 지반의 특성이 점토층에서 모래층으로 바뀌는 경계지점이었기 때문에 판단된다.

ERCP결과 관입깊이 29m를 경계로 지반구성성분이 변화되었음을 알 수 있다. 전기전도도와 지층변화에 대하여 Campanella 외(1990)는 모래층 내 세립분의 특성에 따라 전혀 다른 변화가 나타날 수 있다고 하였다. 첫째, 모래입자사이의 간극을 전기전도도가 낮은 세립분이 채워 간극률을 감소시키므로 전기비저항이 증가한다. 둘째, 모래입자사이를 전기전도도가 큰 점토가 채워 전기비저항이 감소한다. 본 실험에서는 후자의 메커니즘이 작용한 결과로 사료된다. Roberston 등(1986)이 제안한 흙의 분류에 의해 약 18m~20m구간, 24m~26m, 29m 이후는 모래질 실트~점토질 실트(sandy silt to clayey silt)이며 그 이외의 영역은 점토질 실트~실트질 점토(clayey silt to silty clay)로써 지층이 변화하는 구간에서 점토성분이 혼재되었기 때문에 판단된다. 즉, ERCP는 지층의 성분이 바뀌는 변이지역의 변화를 탐지하고 있음을 알 수 있다. 주변마찰력이 증가하는 지층에서는 전기비저항이 감소한다는 연구결과(Campanella et

al., 1990)와도 일치하는 결과 그림 12(c)가 얻어졌다.

### 5.3 현장 간극률 산정

본 연구에서는 간극률 산정을 위해 앞서 언급한 식 (3)을 사용하였으며, 필요한 상수(m) 값을 산정하기 위해 각 현장에서 비교란 시료를 채취하였다. 인천 현장의 경우 심도 1.5~9.0m 사이에서 채취한 시료 중 심도 3m와 6m의 시료를 사용하였으며, 부산 현장은 심도 12~30m 사이에서 16m와 25m의 시료를 이용하였다. 간극수는 매 심도별 25g 정도의 시료를 사용하여 원심분리기에서 추출하였으며 신뢰성 높은 간극수를 얻기 위해 각각의 깊이에서 3개의 시료를 추출한후 평균값을 사용하였다. 측정된 간극수의 전기 전도도, 전기비저항 그리고 실내 실험을 통해 도출된 각각의 대상 지반 물성치는 표 1과 같다. 측정된 간극수의 전기비저항은 서로 다른 깊이에서도 매우 유사한 값으로 나타났다. 각 심도에 따른 시료의 간극률은 식 (5)을 이용하여 추정하였다.

$$S \cdot e = \omega \cdot G_s \quad (5)$$

여기서, S는 포화도, e는 간극비, w는 함수비, 그리고 G<sub>s</sub>는 비중이다. 대상 지반은 지하 수위보다 심도가 깊어 포화도는 1로 가정하였으며, 함수비 및 비중 값은 실내 실험을 이용하여 심도별로 측정된 물성치 값을 사용하였다. 초기 간극률, 간극수의 전기비저항과 동일심도에서 측정된 지반의 전기비저항을 이용하여 상수 값인 m값은 인천 현장에서는 1.69, 부산 현장은 1.59로 평가되었다.

전기비저항 콘 프로브를 통하여 산정된 인천현장과 부산현장의 간극률을 각각 그림 13과 14에 나타내었다. 인천 현장의 경우 측정된 전기비저항 결과와 유사하게 관입깊이 1.5~9m구간의 실트질 점토층에서 관입깊이 9~12m구간의 실트질 점토층보다 상대적으로 큰 간극률이 산정되었다. 이와 같은 결과는 표준관입저항치가 관입깊이 1~8m에서는 5회 미만 이지만, 관입깊이 9m 이후에는 약 20회까지 증가하는 결과와 유사하다.

표 1. 현장 비교란 시료 및 간극수 특성

위치	깊이	함수비 (%)	비중	초기간극비 (e <sub>0</sub> )	간극수 전기전도도 (s/m)	간극수 비저항 (Ω·m)
인천	3.0m	26.0	2.64	0.69	4.56	0.219
	6.0m	26.8	2.58	0.69	4.47	0.223
부산	16.0m	49.6	2.7	0.57	4.00	0.250
	25.0m	58.9	2.7	0.61	4.17	0.239



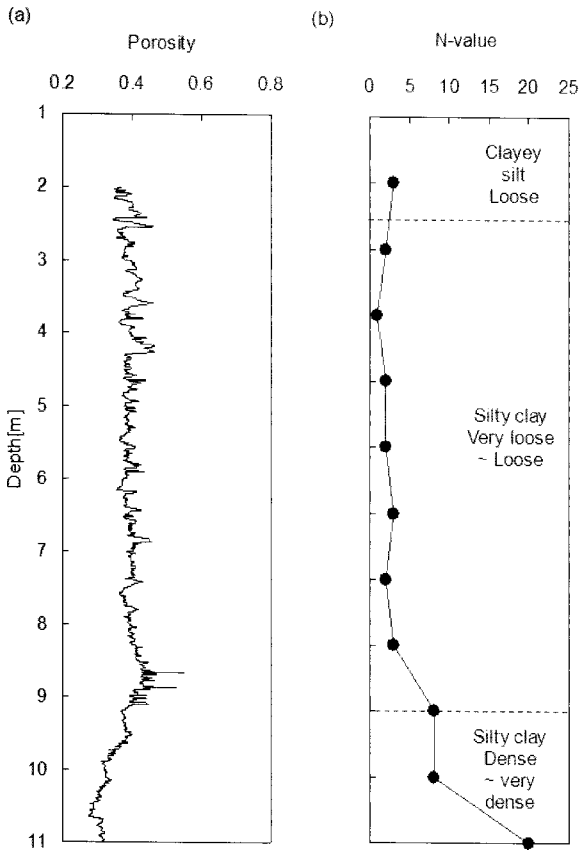


그림 13. ERCP를 이용한 산정한 인천 현장 간극률: (a) 간극률; (b) SPT - 표준관입저항치

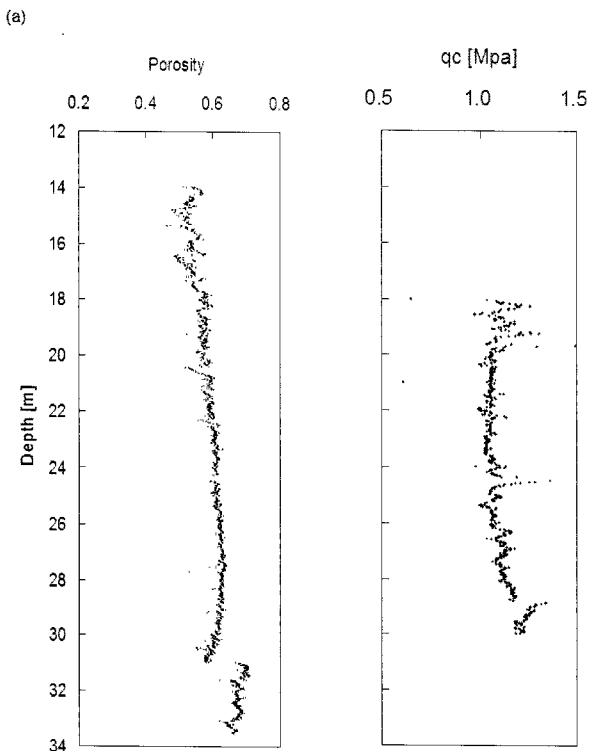


그림 14. ERCP를 이용한 산정한 부산 현장 간극률: (a) 간극률; (b) CPT - 원추관입저항치

부산현장의 경우 간극률은 심도 14m에서 27.5m 깊이 까지는 완만하게 증가하였다. 이 위치에서는 원추관입 저항력  $q_c$  값도 완만하게 감소하는 것으로 나타나 간극률이 증가함에 따라 원추저항값이 감소하는 것과 일치하는 경향을 보인다. 또한 깊이 27.5m 이후에는 간극률이 감소하는 것으로 나타났으며 원추관입저항력  $q_c$  값 또한 증가하는 것으로 나타났다. 인천현장과 부산현장에서 산정한 간극률은 표준관입저항치 N 값 또는 원추관입저항력  $q_c$  값과 같은 강도적인 특성과 반비례 관계가 있음을 보여주고 있다.

## 6. 요약 및 결론

해안 연약지반의 신뢰성 높은 간극률 산정을 위해 현장관입용 전기비저항 콘프로브(Electrical Resistivity Cone Probe, ERCP)를 개발하고 실내시험 및 현장시험을 통해 그 적용성을 평가하여 다음과 같은 요약 및 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) ERCP는 관입에 따른 교란 효과를 최소화하기 위해서 선단은 콘 모양이며 전기적 간섭을 최소화하기 위해 동축케이블을 적용한 4단자 쌍회로 방식을 적용하였다. 프로브는 선단 주변의 국지적인 전기저항을 측정하며 관입시 전기저항은 LCR미터에 의해 측정되고 컴퓨터에 자동 저장되도록 하였다.
- (2) ERCP의 크기 및 형상의 차이 때문에 발생하는 서로 다른 전기저항 값은 보정 과정을 통하여 동일한 전기비저항으로 환산된다. 글라스비즈를 이용한 실내시험을 통하여 전기비저항이 간극률로 효과적으로 환산되는 것으로 나타났다.
- (3) 인천과 부산의 두 현장에서의 현장관입시험을 통하여 측정된 전기비저항 프로파일, 비교란시료 및 간극수의 전기비저항값을 Archie 경험식에 대입하여 현장 지반의 간극률 추산도를 얻을 수 있었다.
- (4) 인천현장과 부산현장에서 전기비저항 콘 프로브를 이용하여 산정한 간극률은 표준관입시험과 콘관입시험으로 측정된 강도적 특성과 매우 일치하는 프로파일을 제공하였다.
- (5) Archie 경험식의 적용에 있어 상수  $m$ 을 현장비교란시료를 이용하여 산정하였다. 기존의  $m$ 값에 대한 연구를 바탕으로 현장에서 더욱 효율적으로  $m$ 값을 산정할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2005년도 지역특성화 연구개발사업(과제번호:B04-01)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 김영진 (2003), “온도변화에 따른 동결토의 전기비저항과 초음파 속도 실험연구”, *한국지반환경공학회 학술발표회*, pp.135-142.
2. 김용성, 김재진, 박준범 (2008), “전기저항센서가 부착된 주상실험기에서 측정된 전기저항값을 이용한 용질의 이동해석”, *대한토목학회 논문집*, 28(4), pp.231-238.
3. 김정호, 이명중, 송윤호, 정승환 (2001-a), “2차원 전기비저항 탐사를 위한 변형된 전극배열법에 관한 연구”, *한국물리탐사학회 논문집*, 4(3), pp.59-69.
4. 김정호, 이명중, 송윤호, 정승환 (2001-b), “2차원 전기비저항 탐사를 위한 전극배열법의 비교”, *한국자원공학회 논문집*, 38(2), pp.116-128.
5. 오명학 (2005), “흙의 전기적 특성 평가를 통한 지반오염 감지시스템 개발”, 박사학위논문, 지구환경시스템공학부, 서울대학교, 서울.
6. 오명학, 김용성, 박준범 (2006), “지반 오염도 조사를 위한 전기비저항/정전용량 측정론의 적용성 평가”, *한국지반공학회 논문집*, 22(7), pp.45-54.
7. 오명학, 이기호, 박준범 (2004), “함수비와 간극수 오염이 불포화 사질토의 전기비저항에 미치는 영향”, *대한토목학회 논문집*, 24(1), pp.27-34.
8. 유동주, 오명학, 김용성, 박준범 (2006), “벤토나이트 슬러리의 전기적 특성에 대한 영향인자 분석”, *한국지반공학회 논문집*, 22(10), pp.21-32.
9. 윤춘경, 유찬, 윤길림 (1998), “흙의 구성광물과 간극수의 성분이 비저항값에 미치는 영향에 관한 연구”, *한국환경농학회 논문집*, 17(1), pp.59-64.
10. 조인기, 정승환, 김정호, 송윤호 (1996), “시추공-시추공 전기비저항 탐사의 감도분석”, *한국자원공학회 논문집*, 33(6), pp.519-526.
11. 황세호, 박권규, 신제현, 이상규 (2007), “국내 서남해 해안지역 지하수의 전기비저항과 등가 NaCl 염분도와의 관계”, *한국물리탐사학회 논문집*, 10(4), pp.361-368.
12. 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.
13. Benson, R. C., Tumer, M. S., Volgelson, W. D., and Tumer, P. P. (1985), “Correlation between field geophysical measurements and laboratory water sample analysis”, *National Water Well Association, Conference on Surface and Borehole Geophysical Methods in Groundwater Investigation*, pp.178-197.
14. Campanella, R. G. (2008), “Geo-environmental site characterization”, *Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Proceedings of the Third International Conference on Site Characterization ISC'3*, Taiwan, pp.3-15.
15. Campanella, R. G., and Weemees, I. (1990), “Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies”, *Canadian Geotechnical Journal*, 27, pp.557-567.
16. Hulbert, M. H., Bennett, R. H., and Lambert, D. N. (1982), “Seabed geotechnical parameters from electrical conductivity measurements”, *Geo-Marine Letters*, 2, pp.219-222.
17. Jackson, P. D., Taylor-Smith, D., and Stanford, P. N. (1978), “Resistivity-porosity-shape relationships for marine sands.” *Geophysics*, 43(6), pp.1250-1268.
18. Lee, C., Lee, J. S., Lee, W., and Cho, T. H. (2008), “Experiment Setup for Shear Wave and Electrical Resistance Measurements in an Oedometer”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 31(2), pp.149-156.
19. Reynolds, J. M. (1997), *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley and Sons, New York.
20. Robertson, P.K., R.G. Campanella, D. Gillespie, and J. Gresg (1986), “Use of Piezometer Cone Data”, *Proceedings of ASCE Specialty Conference on In Situ '86 Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, Blasburg, Virginia, pp.1263-1280.
21. Salem, H. S., and G. V. Chilingarian (199b), “The cementation factor for Archie's Equation for shaly sandstone reservoirs”, *J. Pet. Sci. Eng.*, 23, pp.83-93.
22. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001), *Soils and Waves - Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*, John Wiley and Sons, New York.
23. Timur, A., Hempkins, W.B., Worthington, A.E. (1972), “Porosity and Pressure dependence of formation resistivity factor for sandstones”, *Presented at Form. Eval. Symp. Can. Well Log. Soc.*, 4<sup>th</sup>, Calgary (paper, D).

(접수일자 2008. 9. 18, 심사완료일 2009. 2. 24)