

유도분극을 활용한 해저터널 굴착면 전방 지반상태 예측: 실내실험

박진호¹ · 이강현² · 이성원³ · 유영무⁴ · 이인모^{5*}

¹정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료

²정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 안전연구실 선임연구원

³정회원, 한국건설기술연구원 SOC 성능연구소 Geo-인프라 연구실 연구위원

⁴정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석박통합과정

⁵정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

Utilization of induced polarization for predicting ground condition ahead of tunnel face in subsea tunnelling: laboratory test

Jinho Park¹, Kang-Hyun Lee², Seong-Won Lee³, Young-Moo Ryu⁴, In-Mo Lee⁵

¹Ph. D Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

²Senior Researcher, Korea Expressway Corporation Research Institute, Disaster & Safety Research Division

³Research Fellow, SOC Research Institute, Korea Institute of Construction Technology

⁴Ph. D Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

⁵Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

ABSTRACT: In subsea tunnelling, prediction of the fractured zone (or water bearing zone) ahead of tunnel face saturated by seawater with high water pressure has been a key factor for safe construction. This study verified the feasibility of utilizing induced polarization (IP) survey at tunnel face for predicting the ground condition ahead of the subsea tunnel face. A pore model was proposed to compute chargeability in granular material, and the relationship correlating chargeability with the variables affecting the chargeability was derived from the model. Parametric study has been performed on the variables to figure out the most influential factors affecting the chargeability. The results of the parametric study show that the size of narrow pores (r_1) and the salinity of pore water are the most influential factors on chargeability. Laboratory tests were conducted on various types of ground condition by changing the salinity of pore water, the thickness of the fracture zone and the existence of gouge (weathered granite) within the joints of the fractured zone to figure out the effect of the ground characteristics on the IP phenomenon. Test results show that the chargeability of the fractured zone saturated by seawater increases if the joints in the fractured zone are filled with gouge since the infilled gouge will decrease the size of narrow pores (r_1).

Keywords: Subsea tunnel, Induced polarization, Chargeability, Tunnel face, Fractured zone

초 록: 해저터널 건설 중 터널 굴착면 전방에 존재하는 고수압 조건의 함수대 (또는 포화상태의 파쇄대)의 상태를 정확히 예측하는 것은 터널 안전시공의 핵심적인 요소이다. 이 연구는 해저터널 굴착면에서 전방지반의 상태를 예측하기 위해 유도분극(Induced Polarization, IP) 탐사의 활용 가능성을 입증하였다. 모래지반에서의 충전성(chargeability)을 산정하기 위해 간극모델을 제안하고, 충전성과 이에 영향을 미치는 변수들 사이의 관계식을 유도하였다. 관계식을 사용하여 매개변수 분석을 실시하였으며 그 결과 입자 사이의 간극 중 좁은 간극(r_1)의 크기와 간극수의 염도가 충전성에 가장 큰 영향을 미쳤다. 또한, 실내실험으로 유도분극 현상에 영향을 미치는 지반조건을 파악하기 위해 간극수의 염도와 파쇄대의 두께 변화 그리고 가우지(gouge) 존재 여부에 따른 충전성과 전기비저항의 변화 추이를 규명하고자 하였다. 그 결과 파쇄대의 절리 사이에 가우지가 충전된 경우, 해수조건에서도 충전성이 높게 나타났다. 이는 가우지가 좁은 간극(r_1)의 크기를 감소시키기 때문이라고 판단된다.

주요어: 해저터널, 유도분극, 충전성, 터널 굴착면, 파쇄대

*Corresponding author: In-Mo Lee

E-mail: inmolee@korea.ac.kr

Received May 8, 2015; Revised May 18, 2015;

Accepted May 20, 2015

Copyright ©2015, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

해저터널 건설에서 지반조사는 대부분의 경우 해상 시추를 실시하여 이루어진다. 그러나 해상시추는 시추 수행 지점의 정확한 위치를 파악하기가 어려우며 해상 작업으로 인해 기본적으로 작업시간이 크게 소요된다. 뿐만 아니라 근해에서는 어선이나 군함을 피해 시추 작업을 해야 하며, 수심이 깊은 곳은 작업 효율성이 떨어지고 기상조건에 따라 작업이 제한되는 어려움이 있다. 그럼에도 불구하고 해저터널 건설 중 지반상태를 신속하고 정확히 파악할 수 있는 적절한 기술이 없어 해상시추에 의존하여 시추지점에 국한된 불연속적인 지반정보로부터 지반분포를 개략적으로 추정하고 있는 실정이다. 노르웨이에서는 해상에서 시추와 함께 탄성과 탐사를 실시하고 있으나, 터널 노선이 해저면 아래 깊게 위치하는 경우 정밀한 탐사가 가능한 깊이의 한계로 인해 탐사 결과의 신뢰도가 매우 떨어진다는 문제가 보고되고 있다.

따라서 해저터널은 공사 중에 실시되는 지반조사의 필요성이 높을 수밖에 없으며, 터널공사를 진행하면서 터널 내부에서 터널 굴착면 전방의 지반상태를 정확히 파악할 수 있는 기술이 개발된다면 지반특성에 적합한 터널 굴착방법 및 굴진속도, 지반 보강방법 등을 사전에 합리적으로 결정할 수 있어 공사의 안정성 및 경제성을 크게 높일 수 있을 것이다(Lee et al., 2002). 특히 해저터널 시공 중 가장 큰 위험이라고 할 수 있는 해수의 유입을 방지하기 위해 터널 굴착 중 전방의 함수대(또는 해수로 포화된 파쇄대)의 존재 여부를 미리 예측하는 것은 해저터널 공사에서 매우 중요한 과제로 부각되고 있다.

터널 내부에서 굴착면 전방 지반을 예측하기 위한 기법 가운데 전기비저항이 지반 고유의 상태를 나타낸다는 점을 이용하여 터널 굴착면에서 전기비저항 탐사를 실시하여 이상지반 및 파쇄대를 예측하는 연구가 이루어져 왔다. 그러나 고수압이 작용하는 해저 지반의 경우 파쇄대에 해수가 침투되어 있을 가능성

이 높으며 해수가 침투된 지반은 극히 낮은 전기비저항을 나타내므로 전기비저항의 대비만을 이용하여 해수 침투 지반의 정확한 상태를 구분하는 것은 한계가 있다(Park et al., 2015). 이러한 경우 전기비저항 탐사와 함께 유도분극(Induced Polarization, IP) 탐사를 실시하면 해수 침투지반의 경계 및 상태를 더욱 명확히 파악할 수 있다(Roy and Elliott, 1980; Seara and Granda, 1986).

이 연구에서는 해저터널에서 굴착면 전방의 지반상태를 예측하기 위한 유도분극 탐사의 활용 가능성을 실내실험을 통해 검증하고자 하였다. 모래지반에서 충전성(chargeability)을 산정하기 위한 간극모델을 제안하고 충전성과 이에 영향을 미치는 변수를 연관 짓는 관계식을 유도하였다. 유도된 관계식을 사용하여 매개변수 분석을 실시하여 충전성에 영향을 미치는 주요 인자를 파악함으로써 실험에서 나타난 결과에 대한 원인을 규명하고자 하였다. 실내실험으로 포화시킨 여과사의 간극수 염도 변화 및 사암으로 굴착면 전방의 다양한 조건의 파쇄대를 모사하여 충전성과 전기비저항을 측정하였다.

2. 이론

2.1 시간영역 유도분극

시간영역 유도분극(time domain IP) 탐사(Wait, 1982)는 지반에 흐르는 전류를 순간적으로 차단한 후 감소하는 전위를 시간의 함수로 측정하여 겉보기 충전성(apparent chargeability, m)을 계산(식 (1))하여 지반의 분극(polarization) 특성을 나타내는 방법이다(Fig. 1). 전류를 차단하여도 전위전극 사이의 전위차는 전류가 끊어지는 순간에 완전히 사라지지 않고 서서히 감소한다. 이는 과전압(over-voltage)에 의해 나타나는 현상이며 과전압은 외부 전류가 없어도 지반 내부에 집적된 양전하(charged cation)에 의해 발생한다. 유도분극 탐사를 이용한 지반조사는 지반상태

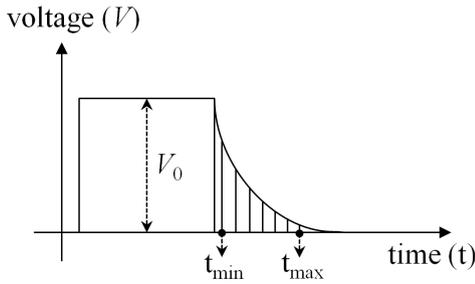


Fig. 1. Voltage decay curve in time domain IP

에 따라 양전하가 집적되는 현상이 다르게 나타나기 때문에 이러한 과전압 특성을 이용하여 지반상태를 구분하는 것이다.

$$m = \frac{1}{t_{\max} - t_{\min}} \frac{1}{V_0} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} V(t) dt \quad (1)$$

2.2 모래지반에서의 유도분극 생성 메커니즘

모래지반과 같이 입자성을 띄고 있는 이온 전도성 매질에서의 유도분극 효과를 설명하기 위한 이론으로 간극 크기의 변화에 의해 양이온의 집적이 야기된다는 모세관 모델(capillary model)(Fridrikhsberg and Sidorova, 1961; Kormiltsev, 1963)이 제안되었다. 이 모델은 전류가 흐르는 통로인 간극의 크기가 줄어드는 부분(pore throats)에 양이온이 집적되고 양이온의 농도가 증가함에 따라 분극현상이 발생한다는 이론이다(Fig. 2).

Fridrikhsberg and Sidorova (1961)은 모세관 모델

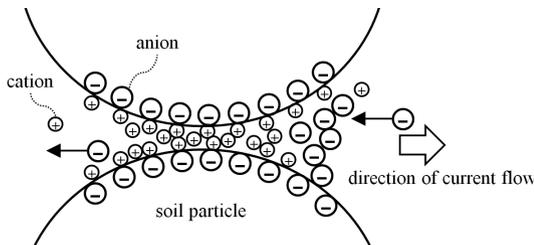


Fig. 2. Conceptual view of capillary model

로부터 측정되는 충전성(m)을 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$m = \frac{4(\Delta t)^2}{\left(\frac{l_2}{S_2} + \frac{l_1}{\alpha S_1}\right)\left(\frac{S_2}{l_2} + \frac{S_1}{l_1}\right)} \quad (2)$$

식 (2)에서 Δt 는 좁은 간극과 넓은 간극 사이에서의 양이온 통과을 차이이며, l_1, l_2, S_1, S_2 는 각각 좁은 간극과 넓은 간극의 길이와 단면적을 나타낸다. α 는 좁은 간극의 효율계수로 전체 간극수의 전기전도도에 대한 모세관에서의 평균적인 전기전도도의 비율을 나타내며, 입자 표면의 전기전도도에 의해 영향을 받는다.

Titov et al. (2004)는 양이온 운반율(Δt)을 정의하기 위해(식 (3)), 지반 내 입자의 모양을 직사각형 형태로 가정하고, 입자들 사이의 좁은 간극과 넓은 간극의 반경(r_1, r_2)을 일정한 간격의 슬릿(slot)과 같이 단순한 현상으로 나타내었다(Fig. 3).

$$\Delta t = \frac{\frac{\delta}{r_1}(1 - \frac{r_2}{r_1})(a^+ - a^-)}{2\left[1 + \frac{\delta}{r_1}(a^+ + a^-)\right]\left[\frac{r_2}{r_1} + \frac{\delta}{r_1}(a^+ + a^-)\right]} \quad (3)$$

여기서 δ 는 이중층의 두께(debye length)를 나타내며 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. r_1, r_2 는 좁은 간극과 넓은 간극의 반경을 나타내며, a^+, a^- 는 양이온과 음이온의 유효전하를 나타낸다.

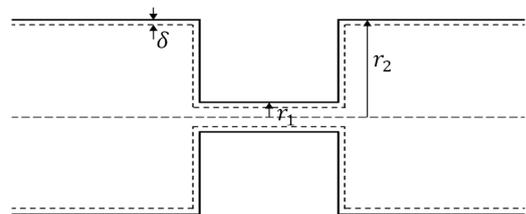


Fig. 3. Schematic view of a 'slit' sequence representing interconnected pores

$$\delta = \frac{1}{zF} \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon RT}{2C_0}} \quad (4)$$

식 (4)에서 z 는 이온가(ionic valence)를 나타내며, $F = 9.65 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$ 는 패러데이 상수(faraday constant)이다. $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ 는 유전율 상수(dielectric constant), ϵ 는 상대유전율(relative permittivity)을 나타낸다. $R = 8.31 \text{ J mol}^{-1}$ 은 기체 상수이며, $T(\text{K})$ 는 절대온도를 나타낸다. 그러나 식 (2)를 사용하여 실제로 좁은 간극과 넓은 간극의 길이 (l_1, l_2)와 면적(S_1, S_2)을 산정하기 위해서는 좁은 간극과 넓은 간극에 해당하는 각각의 영역을 어디까지로 고려해야할지를 합리적으로 판단할 수 있는 기준이 필요하다. 또한, 식 (3)에서 입자의 배열을 직사각형 배열로 단순화하여 표현하는 경우 매우 낮은 밀도를 가지는 입자 배열(loose packing)을 가지므로 모래 입자가 조밀하게 배열된 경우(간극률이 낮은 경우) 제안된 모델을 적용하는 것은 한계가 있다. 따라서 이러한 문제점들을 해결하고자 이 연구에서는 Fig. 4와 같이 원형의 모래 입자가 조밀하게 배열된 경우, 좁은 간극과 넓은 간극의 길이와 반경을 정의하고 면적을 산정하기 위한 모델을 제안하였다.

이 모델은 모래 입자 내 간극의 면적을 하나의 정육면체와 세 개의 사다리꼴 면적의 합으로 근사하여 나타내었다. 좁은 간극의 면적을 세 개의 사다리꼴

면적의 합(S_1)으로 고려하고 넓은 간극의 면적을 정육각형의 면적(S_2)으로 고려하여 나타내었으며, 식 (5), 식 (6)과 같이 좁은 간극과 넓은 간극의 면적(S_1, S_2)을, 좁은 간극과 넓은 간극의 반경(r_1, r_2)과 좁은 간극의 길이(l_1)에 관한 함수로 표현할 수 있다. 간극 면적의 산정 시 곡선형태의 흙 입자 표면을 직선으로 고려함에 따라 발생하는 오차는 매우 미소하다고 가정하였다. 넓은 간극의 길이(l_2)와 반경 사이(r_2)의 관계는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_1 = (2r_1 + r_2) \times \frac{3}{4} l_1 \quad (5)$$

$$S_2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} r_2^2 \quad (6)$$

$$l_2 = \sqrt{3} r_2 \quad (7)$$

식 (5), 식 (6), 식 (7) 및 식 (3)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 모래지반에서의 충전성(m)을 산정하는 이론식을 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m = \frac{\frac{3}{4} \left[\frac{\delta}{r_1} \left(1 - \frac{r_2}{r_1}\right) (a^+ - a^-) \right]^2}{\left\{ 1 + \frac{2r_1 + r_2}{2r_2} + \frac{1}{\alpha} \left(1 + \frac{2r_2}{2r_1 + r_2} \right) \right\} \left\{ \left[1 + \frac{\delta}{r_1} (a^+ + a^-) \right] \left\{ \frac{r_2}{r_1} + \frac{\delta}{r_1} (a^+ + a^-) \right\} \right\}^2} \quad (8)$$

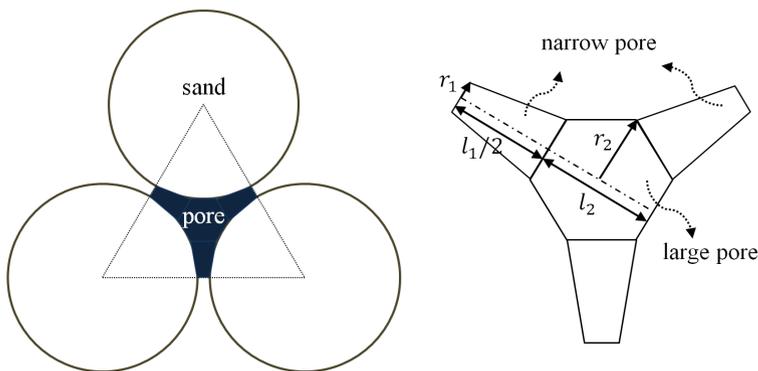


Fig. 4. Conceptual view of proposed pore model in water saturated sands

식 (8)에서 이중층의 두께(δ)는 식 (4)와 같이 표현할 수 있으며, 모래지반에서의 충전성(m)과 이에 영향을 미치는 변수들과의 함수관계를 나타내면 식 (9)과 같다.

$$m = f(r_1, r_2, z, \alpha, a^+, a^-, C_0, T) \quad (9)$$

이로부터 모래지반에서의 충전성에 영향을 미치는 변수는 모래입자 내 간극 크기(r_1 : 좁은 간극의 반경, r_2 : 넓은 간극의 반경)에 관한 것과 간극수의 화학적 특성(z : 이온가, α : 좁은 간극의 효율계수, a^+ : 양이온 유효전하, a^- : 음이온 유효전하, C_0 : 염도, T : 온도)에 관한 것으로 구분된다고 할 수 있다. 또한 좁은 간극과 넓은 간극의 길이(l_1, l_2)는 충전성에 영향을 미치지 않는다는 사실을 알 수 있다.

2.3 매개변수 민감도 분석

모래지반에서 충전성에 영향을 미치는 변수들을 나타낸 식 (9)에서, 좁은 간극의 반경(r_1), 넓은 간극의 반경(r_2), 간극수의 염도(C_0), 온도(T) 값의 변화에 따른 충전성(m)의 변화양상을 살펴보기 위해 매개변수 민감도 분석(parametric study)을 실시하였다(Fig. 5). 변수들의 초기값(v_{ref})을 설정하고(Table 1), 각 변수를 0.1배에서 100배까지 변화(v)시켰을 때의 충전성(m)을 식 (8)을 사용하여 계산하였다. 충전성은 변수들이 초기값을 가질 경우에 계산되는 충전성(m_{ref})을 기준으로 정규화(normalize)하여 나타내었다.

Table 1에서 좁은 간극(r_1)과 넓은 간극(r_2)의 크기에 대한 초기값은 모래입자 사이의 간극에서 나타날 수 있는 좁고 넓은 간격의 크기를 고려하여 설정

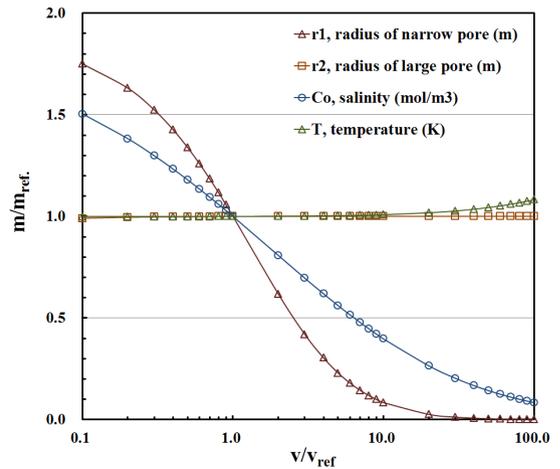


Fig. 5. Parametric study for the variables affecting on chargeability

(Tuller et al., 1999)하였으며, 염도(C_0)는 초기값(6 mol/m^3)이 담수의 농도 범위에 해당하고 초기값의 100배가 되는 농도(600 mol/m^3)가 해수의 농도가 되도록 설정하였다.

분석 결과 좁은 간극의 반경(r_1)이 작아질수록 충전성(m)이 증가하는 경향을 보였으며, 넓은 간극의 반경(r_2)은 작아질수록 충전성이 매우 미세하게 감소하나 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 또한, 간극수의 염도(C_0)가 증가할수록 충전성이 감소하였다. 온도(T)는 섭씨온도를 기준으로 $0.1^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 사이의 변화에 따라 절대온도(T)로 환산하여 매개변수 분석을 실시하였으며, 결과적으로 온도가 충전성에 미치는 영향은 매우 작다는 사실을 알 수 있다. 각 변수가 충전성에 영향을 미치는 정도의 상대적인 크기를 나타내면 식 (10)과 같다.

$$r_1 > C_0 \gg T \geq r_2 \quad (10)$$

Table 1. Initial values (v_{ref})

Radius of narrow and large pore (m)		Salinity (mol/m ³)	Temperature (K)
r_1	r_2	C_0	T
3×10^{-9}	2.0×10^{-5}	6	274.15 (1°C)

유도분극 현상은 식 (3)에서 나타난 것과 같이 넓은 간극(r_2)과 좁은 간극(r_1) 사이의 양이온 운반율(Δt) 차이에 의해서 야기되며, 이것은 입자표면의 이중층(double layer)에 의해 그 차이가 확대된다(Krutz, 1952). 이것은 음극의 입자 표면이 전하의 균형을 유지하기 위해 양이온을 끌어당겨 양이온 집적을 야기하기 때문이다. 좁은 간극(r_1)이 감소하게 되면 상대적으로 이중층에 의한 효과가 증가하기 때문에 양이온의 집적을 야기하여 충전성이 증가된다(Titov et al., 2002). 반대로 간극수의 염도(C_0)가 증가할수록 충전성이 감소하는 현상은 식 (4)로부터 알 수 있듯이 이중층이 감소하기 때문이라고 할 수 있다. 이 연구에서는 해저터널 시공 조건을 고려하여 해수에 초점을 맞추어서 다음 절에서는 간극수의 염도(염도 0%~35%)에 따른 전기비저항과 충전성의 변화 추이를 실험적으로 밝히고자 한다. 또한 해수조건에서 파쇄대의 두께와 가우지(gouge) 존재 여부에 따른 충전성과 전기비저항의 변화 추이를 규명하고자 하였다. 특히, 파쇄대의 절리 사이에 풍화토 가우지를 모사함으로써 좁은 간극(r_1) 크기의 감소에 따른 충전성 영향 또한 실험적으로 규명하였다.

3. 실내실험 준비

3.1 토조 제작과 전극 설치

두 가지 형태의 토조를 제작하여 실험을 수행하였다(Fig. 6). Type 1은 간극수의 염도에 따라 모사지반의 전기비저항 및 충전성의 변화를 파악하기 위한 것으로 균질하게 조성된 지반 내 판형 전극을 삽입하여 수평 방향으로 전류가 흐르도록 유도하였다. 전류 전극(AB) 사이에 수평 방향의 전류흐름이 발생하면 전위 전극(MN)으로 전위차를 측정하였다. Type 2는 실제 터널에서 굴착면에 전극을 부착하여 전방 예측 탐사를 수행하는 상황을 실내 실험으로 모사한 것으로, 해수로 포화된 파쇄대의 두께 및 형상에 따른 전기비저항과 충전성의 변화를 살펴보았다. 실제 터널에서 굴착면 전방의 반무한 지반(semi-infinite ground)을 통해 전류가 흘러나가는 현상을 실내 실험에서는 수직 방향으로 바꾸어 모사하였다. 모사지반의 상단에 원형 전극(10 mm 직경)을 부착하여 전류가 하방향으로 흐르도록 하였으며, 지반 내에 여러 가지 두께의 파쇄대를 손쉽게 모사하기 위해 토조의 상단과 하단이 분리되도록 제작하였다. 반무한 지반을 모

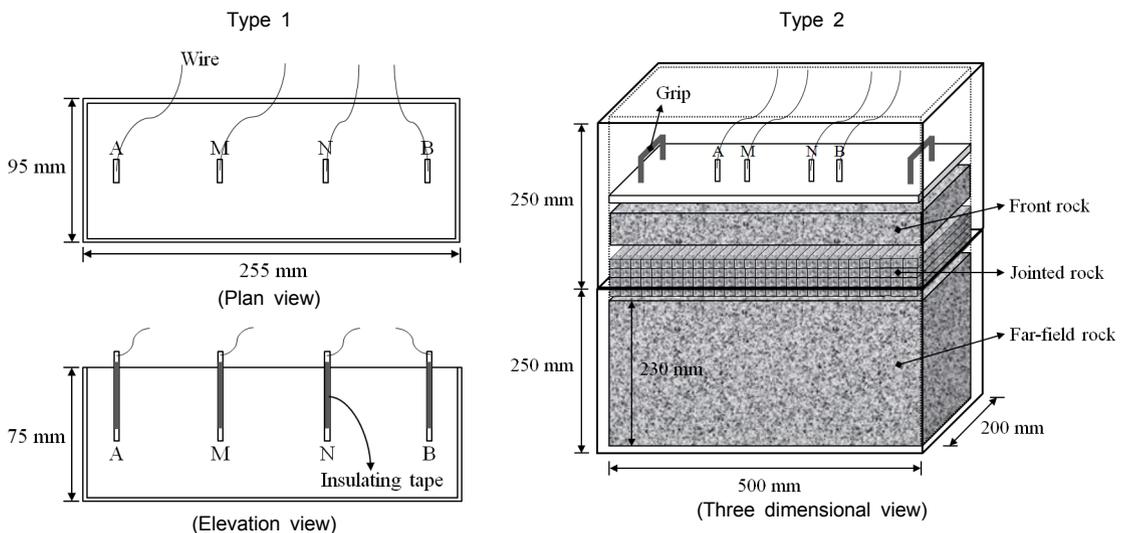


Fig. 6. Two types of experiments for measuring chargeability with various ground conditions

사하기 위해 탐사 거리를 충분히 초과하는 두께(탐사 심도의 2.3배)의 지반(far-field rock)을 토조 하단에 두었다.

3.2 토조 경계조건 영향 검토

Type 2 실험에서 토조 경계조건에 대한 영향을 살펴보기 위해 원형 전극의 직경과 위치 및 전극 사이의 간격을 변화시키며 전기비저항을 측정하였다. 각각의 조건에 대해 토조 내부에 물을 채우고 전극을 토조 내 정중앙을 기준점으로 세로방향과 가로방향으로 일정 간격(2 cm)으로 옮겨가며 전기비저항을 측정하였다. 그 결과 전극의 위치가 토조 벽면에 가까워지면 경계조건의 영향으로 인해 전기비저항이 증가하였으며, 전극의 직경과 전극 사이의 간격이 클수록 경계조건의 영향을 받는 범위가 크다는 것을 알 수 있었다. 전극의 직경이 10 mm이며 전류 전극(AB)의 간격이 20 cm인 경우, 정중앙 지점으로부터 세로방향으로 4 cm 이내, 가로방향으로 10 cm 이내의 범위에서는 전극의 위치를 변화시켜도 전기비저항의 변화가 나타나지 않고 일정하게 유지되었다. 따라서 10 mm 직경의 전극으로 전류 전극(AB)의 간격을 20 cm로 설정하여 토조 내 정중앙 지점에서 측정하면 경계조건의 영향을 받지 않을 것이라고 판단되어 암석의 중심부에서 실험을 수행하였다.

3.3 전극 배열과 모사지반 조건

Type 1 실험은 웨너 배열을 사용하여 측정 전위가

크게 형성되어 충분한 유도분극 효과가 발현되도록 하였다. 간극수의 염도를 다섯 가지 경우(0% (증류수), 0.01% (수돗물), 5% 염분, 15% 염분, 35% 염분)로 나누고, 간극수만 존재하는 경우와 모래를 포화시킨 경우에 대해 전기비저항과 충전성을 측정하였다. 실험에서 모래는 주문진 여과사를 사용하였다. Type 2 실험은 탐사 거리가 길고 비교적 전위가 크게 형성되는 슬러퍼져 배열을 사용하였다. 사암을 해수로 포화시켜 지반을 모사하였으며, 파쇄대를 모사하기 위하여 사암을 균등한 간격으로 잘게 절단(30 mm × 30 mm × 200 mm)하여 암반 내 절리를 모사(mated joint)한 경우와, 여기에 일정량의 화강풍화토를 첨가하여 가우지(gouge)를 모사한 경우 그리고 오로지 해수만 존재하는 경우로 나누어 각각의 경우에 대해 파쇄대의 두께에 따른 전기비저항과 충전성을 측정하였다. 두 가지 실험에 대한 조건을 나타낸 표는 Table 2와 같다.

3.4 측정 장비와 설정

측정 장비로는 Advanced Geoscience Inc.의 Supersting R8/IP를 사용하였다. 전기비저항과 시간영역 충전성을 함께 측정할 수 있도록 측정모드를 RES/IP로 설정하였다. 모든 실험은 3회를 측정하여 그 평균값을 사용하였는데, 측정 장비의 설정을 자동적으로 2회를 측정하고 그 평균값을 나타내도록 했기 때문에 실질적으로는 6회 측정값을 평균한 것과 같다. 축소 실내 실험이므로 작은 전류 흐름만으로도 전위차 측

Table 2. Two types of experimental condition

	Type 1	Type 2
Electrode array	Wenner ($\overline{AM}=\overline{MN}=\overline{NB}=7.83$ cm)	Schlumberger ($\overline{AB}=20$ cm, $\overline{MN}=10$ cm)
Ground condition	Water, sand	Water, jointed sand stone, jointed sand stone with gouge
Salinity	0%, 0.01%, 5%, 15%, 35%	35%
Degree of saturation	Fully saturated	
Measured data	Resistivity and chargeability (time domain IP)	

정이 가능하여 최대 전류는 20 mA로 낮게 설정하였으며, IP 측정은 2초 동안 지속하였다. Total IP 값을 충전성 수치로 활용하였다.

4. 실내실험 결과

실내실험을 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다. 간극수 염도에 따른 실험 결과(Type 1), (Fig. 7) 전기비저항은 간극수의 염도가 5%에만 도달하여도 간극수가 염도가 0.01%인 경우의 4.1% 이하로 매우 크게 감소하였다. 간극수가 해수조건인 35% 염도의 경우 물과 모래의 전기비저항 차이는 3.2 Ωm으로 매우 작았다. 충전성은 물의 경우 5%의 염도까지는 감소하

였으나, 그 이후부터는 염도가 증가하여도 일정하게 유지되었다. 포화된 모래의 경우에는 염도가 증가함에 따라 지속적으로 충전성이 감소하였다. 모래는 전기비저항과 충전성이 염도의 증가에 따라 같이 감소함을 보여주었다.

파쇄대의 두께 및 가우지 존재 여부에 따른 실험 (Type 2) 결과는 Fig. 8과 같다. 파쇄대의 두께가 증가함에 따라 세 가지 조건 모두에서 대체적으로 전기비저항이 감소하였다. 사암 내 절리가 존재하는 경우에 전기비저항이 가장 높게 나타났으며, 절리 사이에 풍화토를 충전시키면 전기비저항이 낮아졌다. 오로지 해수(염도 35%)만 존재하는 경우 상대적으로 전기비저항이 가장 낮게 나타났다. 충전성은 절리 사이에

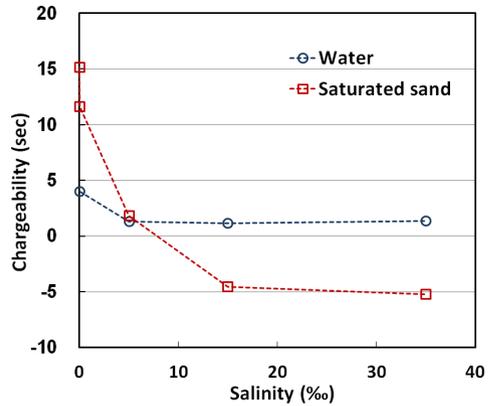
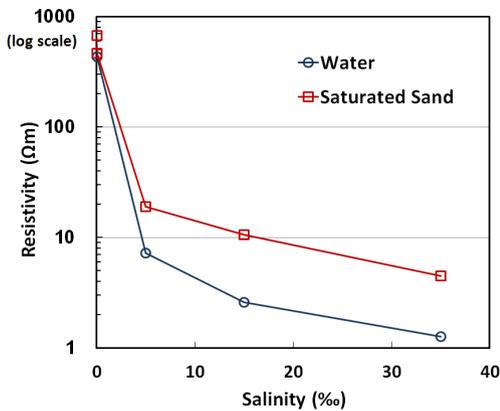


Fig. 7. Results of the type 1 experiment

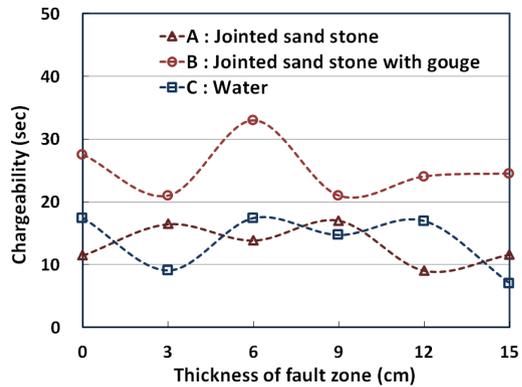
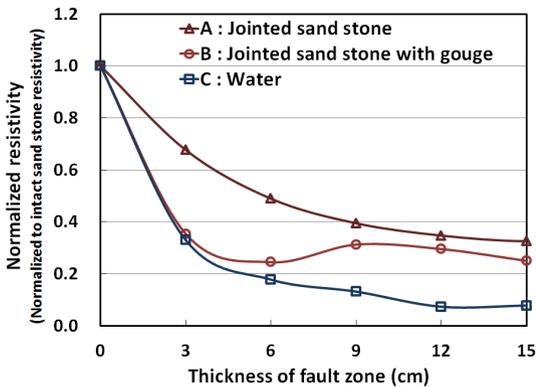


Fig. 8. Results of the type 2 experiment

가우지를 모사한 조건에서 대체적으로 가장 높게 나타났다. 이는 식 (10)에서 보여주는 바와 같이 좁은 간극(r_1)이 작아질수록 충전성이 커진다는 이론과 일치한다. 파쇄대의 두께가 증가함에 따른 충전성 변화의 경향성은 나타나지 않았으며, 사암 내 절리가 존재하는 경우와 해수만 존재하는 경우 이 둘 사이에서 충전성 차이는 거의 나타나지 않았다.

5. 결론

1. 염분의 농도 변화에 따른 평가 실험으로부터 포화된 모래는 염도가 증가함에 따라 충전성이 지속적으로 감소하였다. 이는 매개변수 분석 결과에서 나타난, 염도가 증가함에 따라 충전성이 감소하는 경향과 일치하였다. 이에 반하여 물은 염도가 증가함에 따라 충전성의 변화가 거의 나타나지 않았다. 이로부터 입자적 특성을 가지는 것은 충전성의 발현을 위한 중요한 요소라고 판단된다.
2. 파쇄대 두께와 형상에 따른 평가 실험으로부터 오로지 해수(염도 35 ‰의 경우)만 존재하는 경우와 사암 내 절리를 모사한 경우, 나타나는 충전성의 범위가 서로 유사하다는 점을 미루어 보았을 때, 절리(틈새) 자체는 충전성에 영향을 미치는 요인이 아니라고 판단되었다. 반면, 절리 사이에 채워진 가우지는 충전성의 증가에 기인하였다. 이는 풍화토를 첨가하면 좁은 간극(r_1)의 크기가 감소하여 간극 내 상대적인 이중층의 부피가 증가하고 이에 따라 양전하 집적 효과가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 좁은 간극(r_1)의 크기가 감소하면 충전성이 증가하는 것은 매개변수 분석 결과에서 잘 나타나고 있다.
3. 해수의 높은 전기전도도로 인해 해수로 포화된 파쇄대는 형상에 관계없이 전기비저항이 매우 낮게 나타나 전기비저항의 대비가 뚜렷하지 않을 가능성이 있다. 반면, 충전성은 해수조건에서도 암반 절리 내 가우지 충전 특성을 잘 나타낸다는

점을 미루어보았을 때, 해수조건에서 지반상태를 예측하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 이 연구에서 제안된 유도분극 탐사기술이 향후 터널 전방 예측에 실제로 활용되기 위해서는, 시공 중인 해저터널 현장에서 실험을 통한 적용성 검증이 필수적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다. 특히, TBM으로 시공되는 터널의 경우 굴착면으로의 접근이 매우 제한되므로 유도분극 탐사를 실시하기 위해서는 전극을 굴착면에 부착할 수 있는 장치의 개발도 함께 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 “고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발” 과제 연구비지원(13건설연구T01)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Fridrikhsberg, D.A., Sidorova, M.P. (1961), “Issledovanie svyazi yav-lenii vyzvannoi polarizatsii s electrokineticheskimi svoystvami kapi-llarnykh sistem (A study of the relationship between the induced polarization phenomenon and the electrokinetic properties of capillary systems)”, (In Russian.) Vestnik Leningradskogo Universiteta. Seria Chimia 4, pp. 222-226.
2. Kormiltsev, V.V. (1963), “O vzbuzhdenii i spade vyzvannoi polarizatsii kapillarnoi srede (On the excitation and decay of induced polarization in a capillary medium)”, (In Russian) Seria Geofizicheskaya (Solid Earth Phys). Vol. 11, pp. 1658-1666.
3. Kruyt, H.R. (1952), Colloid Science, Vol. 1. Elsevier, New York, pp. 115-193.
4. Lee, I.M., Choi, S.S., Kim, S.T., Kim, C.K., Jun, J.S. (2002), “3D analysis of fracture zones ahead

- of tunnel face using seismic reflection”, *Tunnelling Technology*, Vol. 4, No. 4, pp. 301-317.
5. Park, Jinho, Lee, K.H., Lee, S.W., Han, E.S., Lee, I.M. (2015), “Utilization of chargeability for predicting ground condition ahead of tunnel face during subsea tunnelling”, *Korean Tunnelling and Underground Space Association Annual Spring Conference*, pp. 179-181.
 6. Roy, K.K., Elliott, H.M. (1980), “Resistivity and IP survey for delineating saline water and fresh water zones”, *Ge exploration*, Vol. 18, pp. 145-162.
 7. Seara, J.L., Granda, A. (1987), “Interpretation of I.P. time-time domain/resistivity sounding for delineating sea-water intrusions in some coastal areas of the northeast of Spain”, *Ge exploration*, Vol. 24, pp. 153-167.
 8. Titov, K., Kemna, A., Tarasov, A., Vereecken, H. (2004), “Induced polarization of unsaturated sands determined through time domain measurements”, *Vadose Zone Journal*, Vol. 3, pp. 1160-1168.
 9. Titov, K., Komarov, V., Tarasov, V., Levitski. (2002), “Theoretical and experimental study of time domain-induced polarization in water-saturated sands”, *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 50, pp. 417-433.
 10. Tuller, M., Or, D., Dudley, L.M. (1999), “Adsorption and capillary condensation in porous media: liquid retention and interfacial configurations in angular pores”, *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 7, PP. 1949-1964.
 11. Wait, J.R. (1982), *Geo-electromagnetism*, Academic Press, San Diego, CA.