

시추공 전기비저항 기법을 활용한 현장타설말뚝의 슬라임층 두께 평가

Estimation of Slime Thickness of Bored Piles by Using Borehole Electrical Resistivity Method

전 옥 현¹ Chun, Ok-Hyun

이 중 섭² Lee, Jong-Sub

박 민 철³ Park, Min-Chul

배 성 규⁴ Bae, Sung-Gyu

윤 형 구⁵ Yoon, Hyung-Koo

Abstract

The slime, deposited in the bored pile due to falling soil particle, reduces the bearing capacity of bored pile and thus the stability of construction also decreases. The weight pendulum and iron have been used for estimating the slime thickness based on the subjective judgment and thus the previous method has a limitation of reliability. The objective of this paper is to suggest the method for estimating the slime thickness by using characteristics of electrical resistivity as scientific method. The temperature-compensation resistivity probe (TRP), which has a conical shape and the diameter of 35.7mm, is applied to the measurement of the electrical resistivity in the borehole during penetration. The field tests are carried out for estimating the slime thickness in the application site of bored pile. The slime thickness is calculated through the difference between excavation depth of borehole and measured data. Furthermore, the laboratory tests are also conducted for investigating effects of casing, time elapsing and relative density by using the specimen of slime. The laboratory test supporting the suggested method is reasonable for determining the slime depth. The paper suggests that the electrical resistivity method may be a useful method for detecting slime thickness and the method is expected to be applicable to various sites of bored piles.

요 지

말뚝 시공 시 선단 부분에 쌓이는 슬라임은 현장타설말뚝의 선단지지력을 감소시켜 구조물의 안정성에 큰 영향을 미친다. 슬라임의 존재 유무는 주로 다짐추 혹은 철근을 낙하시켜 판정하고 있으며, 이와 같은 방법은 주관적인 판단결과로 신뢰성에 한계가 있다. 본 논문에서는 물리탐사기법 중 하나인 전기비저항 특성을 활용하여 슬라임층의 존재 여부와 두께를 과학적이고 객관적으로 평가하는 방법을 제시하고자 한다. 슬라임층의 전기비저항 특성을 평가하기 위하여 기존에 개발된 온도보상형 전기비저항 프로브(TRP)를 활용하였으며, TRP의 형상은 원뿔형태로 직경은 표준 큰 관입실험 장비와 동일하게 35.7mm이다. 현장타설말뚝 공법 중 P.R.D(Percussion Rotary Drill) 방법을 적용하고 있는 현장에서 실험을 수행하였으며 전기비저항의 결과를 이용하여 슬라임층의 두께를 평가하였다. 신뢰성 높은 분석을

1 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University)

2 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Professor, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University)

3 정회원, 백경 GNC 부장 (Department Manager, Geotechnical Engineering Team, Backyoung)

4 비회원, 대한항공 환경건설관리부 과장 (Manager, Department of Environment and Construction Management, Korea Air Line Co., Ltd.)

5 정회원, 대전대학교 지반방재공학과 조교수 (Assistant professor, Department of Geotechnical Disaster Prevention Engineering, Daejeon University, Tel: +82-42-280-2578, Fax: +82-42-280-2576, hyungkoo@dju.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

도모하고자 현장 슬라임층을 이용하여 케이싱 효과, 시간경과 그리고 상대밀도에 따른 실내 실험도 추가적으로 수행하였다. 본 연구에서는 전기비저항을 이용하여 슬라임층 두께를 산정하는 방법이 합리적임을 보여주며, 추후 다양한 지층과 말뚝 시공 공법에 적용성이 기대된다.

Keywords : Bored pile, Electrical resistivity, Field test, Slime, Temperature-compensation Resistivity cone Probe(TRP)

1. 서론

타입말뚝은 가장 경제적이고 지지력을 확실하게 얻을 수 있는 공법으로 알려져 있지만 항타시 발생하는 소음과 진동으로 도심지 지역에서는 적용성이 떨어지고 있다. 이를 개선하고자 타격 없이 천공된 홀에 콘크리트를 타설하는 원리로 시공되는 현장타설말뚝 공법이 각광을 받고 있으며, 이는 타입말뚝의 시공이 어려운 자갈 및 전석층에도 적용성이 높아 활용성은 날로 증가하고 있는 추세이다(Korean Geotechnical Society, 2002). 그러나 현장타설말뚝 시공 시 말뚝의 선단부에는 연약지반인 슬라임이 발생하게 된다. 슬라임의 발생원인으로는 공벽에서 흘러내린 토사입자 혹은 공내혼탁수내에 존재하고 있는 부유물이 침전하여 쌓이는 경우로 나눌 수 있다. 이러한 슬라임은 재하실험시 비이상적인 침하곡선을 나타내어 말뚝의 정확한 지지력을 결정하기 어렵게 하며, 궁극적으로 산정된 지지력을 통하여 설계를 함에 있어서 한계점을 가진다(Cho, 2010). 이와 같은 이유로 슬라임은 시공 후 말뚝의 품질 저하와 더불어 장기적인 침하발생을 야기시켜 구조물의 안정성에 큰 영향을 미치게 된다.

물리탐사는 중력탐사, 자력탐사, 전기탐사 그리고 탄성과 탐사 등으로 구분되어 지층의 개략적인 정보를 위하여 기존에 많이 활용되고 있다. 최근에는 토목 분야에 전기탐사와 탄성과 탐사에 기초한 시추공 탐사가 수행되어 지층의 상세한 주상도를 도출하고 이를 이용하여 실제적으로 지층 분류에 활용되고 있다(Campanella and Weemeees, 1990; Cho et al., 2004; Kwon and Cho, 2005; Yoon and Lee, 2010). 특히 전기탐사 중 전기비저항 탐사는 해상도가 높고 측정 방법이 간편하여 토목 지반 분야에 활용성이 날로 증가하고 있다. 그러므로 Kim et al.(2011a)는 연약지반 현장에 전기비저항을 측정할 수 있는 장비를 개발하여 전기비저항 주상도와 지층의 설계상수인 간극비를 상세하게 도출하였으며, Kim et al.(2011b)은 실내 압밀 실험 및 토조에 적합한 전기비저

항 모듈을 추가적으로 제시하며 시료 특성에 따른 간극비 영향인자를 분석하였다. Yoon et al.(2011)은 직경이 15mm인 소형 콘에 전기비저항 모듈을 선단에 삽입하여 현장에서 콘 관입 저항력과 전기비저항을 동시에 획득할 수 있는 시스템을 제시하였다. 또한 전기비저항 측정시 신뢰성을 향상시키기 위하여 Jung et al.(2011)의 연구팀은 전기비저항 측정시 온도를 보상해야 하는 원리와 결과를 보여주었다. 이와 같은 이유로 물리탐사 기법 중 해상도가 좋은 전기비저항 탐사 방법은 최근 활용성이 상당히 증가하고 있다.

본 연구에서는 현장타설말뚝 시공 시 품질 관리를 저해하고 구조물의 안정성에 부정적인 영향을 미치는 슬라임의 존재 여부 및 두께를 평가하기 위하여 최근 활용성이 높은 전기비저항 탐사 방법을 이용하였다. 그러므로 본 논문은 슬라임층의 정확한 의미와 현재 슬라임층을 평가할 수 있는 방법에 대한 설명으로 시작되며 기존 방법의 한계점을 구체적으로 제시하였다. 현장실험을 통하여 도출된 결과를 토대로 대상 말뚝의 슬라임 존재 여부 및 두께를 평가하였으며 이와 같은 결과는 기존 평가 방법의 결과와 비교하여 신뢰성을 판단하였다. 또한 현장실험 결과로부터 불명확한 부분인 케이싱 효과, 시간 경과 효과 그리고 강도 효과에 대하여 추가적으로 실내실험을 수행하였으며 자세한 설명을 고찰 부분에 수록하였다.

2. 온도보상형 전기비저항 프로브 (Temperature-compensation Resistivity Probe: TRP)

슬라임은 현장타설말뚝 시공 시 공벽에서 붕괴한 토사입자들과 공내 혼탁수에 부유하고 있는 미립자들이 시간 경과에 따라 굴착공 내에 쌓여 있는 상태를 의미한다(Na et al., 2009). 슬라임은 단면결손에 의한 콘크리트 강도의 저하와 말뚝 선단 지반의 침하를 야기시켜 말뚝 지지력을 저하시킨다(Gue et al., 2003; Poulos, H. G., 2005; Cho, 2010). 이와 같은 이유로 슬라임은 반드시

제거 되어 하며 천공 후 말뚝을 타설하기 전에 슬라임층 두께 및 존재 여부를 확실히 파악해야 한다. 슬라임의 제거는 대체적으로 1차와 2차로 구분되며 클리닝 버켓, 수중 펌프, 에어 리프트 그리고 와이어 브러쉬 등의 구체적인 방법이 이용되고 있다(Shin et al., 2005). 하지만 슬라임의 두께와 제거 효과(존재 유무)를 평가하는 방법은 현재 다짐추나 현장의 철근에 줄을 연결하여 장력에 의한 주관적인 판단으로 굴착공 바닥의 슬라임을 평가하고 있다. 이는 상당히 주관적인 방법으로 말뚝 설계 사항에서도 슬라임 평가시 한 사람이 지속적으로 굴착공의 바닥을 평가 해야 한다는 대략적인 방법만을 제시하고 있다(Cho, 2010). 또한 주관적인 판단을 배제한다 하여도 일반적으로 현장에서 사용하고 있는 Fig. 1과 동일한 다짐추의 형상은 크기가 굵고 무더 슬라임 두께 평가에 정확도가 다소 부족하다. 그러므로 말뚝의 품질을 향상시킬 수 있는 과학적이고 객관적인 슬라임 두께 판정 방법이 필요하다.

슬라임 두께와 존재 여부를 과학적이고 객관적으로 평가하기 위하여 본 연구에서는 물리탐사 기법 중 전기비저항 탐사를 활용하였다. 전기비저항 탐사는 한 쌍의 전류전극에 다른 한 쌍의 전위전극을 사용하여 대상체의 전기적인 특성을 평가하는 방법으로 지표탐사와 시추공탐사로 구분하여 활용되고 있다. 본 연구는 말뚝 굴

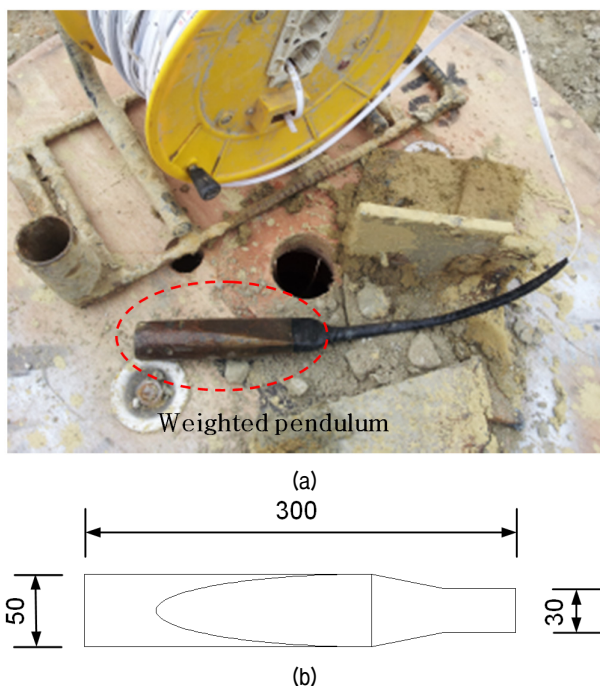


Fig. 1. Weighted pendulum: (a) photograph, (b) schematic drawing. The units are millimeters

착공을 고려하여 시추공탐사 방법을 적용하였으며, 탐사 계측기는 연약지반 특성에 신뢰성 높게 활용되고 있는 온도보상형 전기비저항 프로브(Temperature-compensation Resistivity Probe: TRP)를 이용하였다(Jung et al., 2011). TRP는 Fig. 2와 같이 직경이 35.7mm인 원뿔형태로 콘관입시험(Cone Penetration Test, CPT) 장비와 동일한 형상을 가지고 있어 시추공 탐사에 상당히 효율적이다.

TRP는 전극의 산화-환원 반응과 극성화 성질을 배제

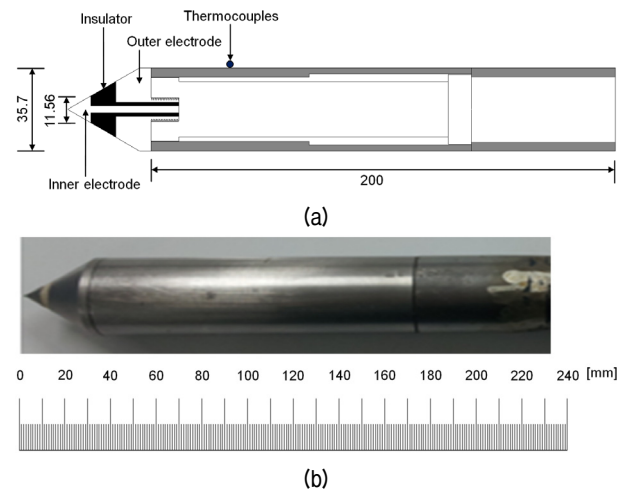


Fig. 2. Temperature-compensated Resistivity Probe(TRP): (a) schematic drawing, (b) photograph. The units are millimeters

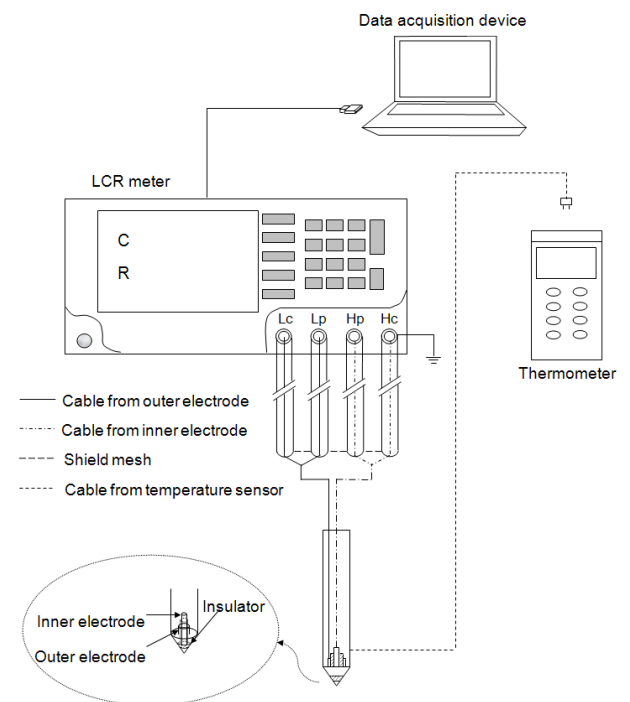


Fig. 3. Measurement module and configuration of TRP. The parameters Hc, Hp, Lc and Lp denote the high current, high potential, low current and low potential, respectively

하고 지층의 정확한 전기적인 특성을 획득할 수 있도록 4단자 쌍 회로(four terminal pair configuration method) 방식으로 전극이 구성되어 있다. 즉 Fig. 3과 같이 총 4개의 전극 중 2개는 중심전극(Inner conductor)으로 High Current(Hc)와 High Potential(Hp), 나머지 2개 전극은 Low Current(Lc)와 Low Potential(Lp)인 외부전극(Outer conductor)으로 구분된다. 또한 전기비저항은 온도 변화에 따라 이온의 활성도가 달라져 지층의 정확한 값을 얻기 위해서는 측정된 지역의 온도를 이용하여 반드시 보정해야 한다(Jung et al., 2011). 이를 위하여 TRP에는 온도측정 센서를 콘 외부에 장착하여 주변온도를 획득하고 보정할 수 있도록 하였다.

3. 보정실험

TRP에서 측정된 전기저항 값을 온도가 보상된 전기비저항으로 환산하도록 다음과 같이 2가지의 보정실험을 사전적으로 실시하였다. 전기저항과 전기비저항 관계 그리고 전기저항과 온도의 관계를 도출하기 위한 보정실험의 방법 및 결과는 다음과 같다.

3.1 전기저항 - 전기비저항 보정실험

전기저항은 대상체의 특성뿐만 아니라 계측에 사용한 프로브 형상, 전극재질, 케이블 길이 등 기하학적 형상에 의해서도 영향을 받게 된다. 주변의 영향을 배제하고 대상체의 고유한 특성을 얻기 위하여 측정된 전기저항은 고유 저항으로 환산해야 된다. 하지만 고유저항은 이론적인 값으로 획득하기 어려워 길보기저항 혹은 전기비저항으로 변환하여 대상체의 특성을 파악하고 있다. 측정된 전기저항 값을 전기비저항으로 환산하는 방법은 전극배열 방법에 따른 형상계수(geometric factor, K) 방법과 농도에 따른 상수(α)를 도출하는 두 가지 방법이 있으며 본 연구에서는 선행연구에서 활용하고 있는 농도에 따른 보정방법을 이용하였다(Jung et al., 2011). 보정상수는 10개의 서로 다른 농도 값에서 TRP를 이용하여 측정된 전기저항과 전기비저항 값의 관계로 도출하였으며, 여기서 전기비저항은 전기전도도와 역수 관계임을 이용하여 획득하였다. 그러므로 전기저항과 전기비저항은 Fig. 4(a)와 같이 선형비례관계로 나타났으며 수식으로는 식 (1)과 같다.

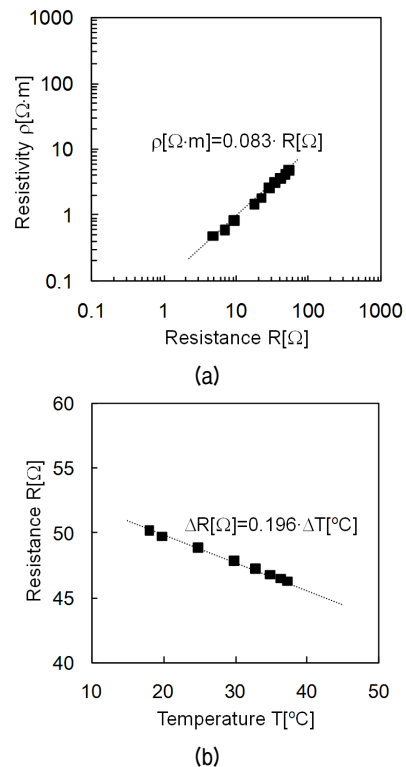


Fig. 4. TRP calibration for field test: (a) electrical resistance–electrical resistivity, (b) electrical resistance–temperature (Input voltage: 1.0V, frequency: 100kHz)

$$\rho = \beta \cdot R \quad (1)$$

여기서, $\rho[\Omega \cdot m]$ 와 $R[\Omega]$ 은 전기비저항과 전기저항을 나타내며 $\beta[m]$ 는 비례상수를 의미한다. 본 연구에서 활용한 TRP의 β 값은 0.083[m]으로 나타났다.

3.2 전기저항 - 온도 보정실험

대상체의 전기전도도는 이론적으로 Faraday 상수, 이온의 움직임(ion mobility), 농도 그리고 원자가에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 온도의 증가 및 감소는 이온의 움직임을 변화시켜 전기전도도에 큰 영향을 주며 Kim et al.(2011a)에 따르면 전기전도도는 온도의 영향으로 약 2%/°C 내외의 값 변화가 발생한다고 하였다. 전기비저항은 전기전도도와 역수관계에 있으므로 전기비저항도 온도에 대한 영향을 고려하여 보정해야 한다. 전기비저항과 온도에 대한 연구는 다양하게 수행되고 있으며 본 연구에서도 온도를 보정할 수 있는 보정실험을 진행하여 온도가 보상된 전기비저항 값을 획득하고자 하였다(Light, 1984; Abu-Hassanein et al., 1996). 1°C부터 38°C까지 8번의 온도를 변화시키며 도출된 전기저

항과 온도간의 관계는 Fig. 4(b)와 같으며, 온도가 증가할수록 이온의 움직임이 활발하여 저항이 작게 나타났다. 이와 같은 관계를 식 (2)와 같다.

$$R_c = R + \Delta R (\alpha \cdot \Delta T) \quad (2)$$

여기서, $R_c[\Omega]$ 는 온도를 보정한 전기저항, $R[\Omega]$ 은 측정된 전기저항, $\Delta R[\Omega]$ 은 온도의 영향으로 발생한 전기저항의 변화량, $\alpha[1/^\circ\text{C}]$ 는 온도계수 그리고 $\Delta T[^\circ\text{C}]$ 는 온도 변화량을 나타낸다. 보정실험 결과 TRP의 온도계수 (α)는 0.196으로 나타났다.

4. 현장실험

4.1 현장개요

현장실험은 인천지역의 OOO현장에서 수행되었으며, 본 현장은 현장타설말뚝 중 P.R.D(Percussion Rotary

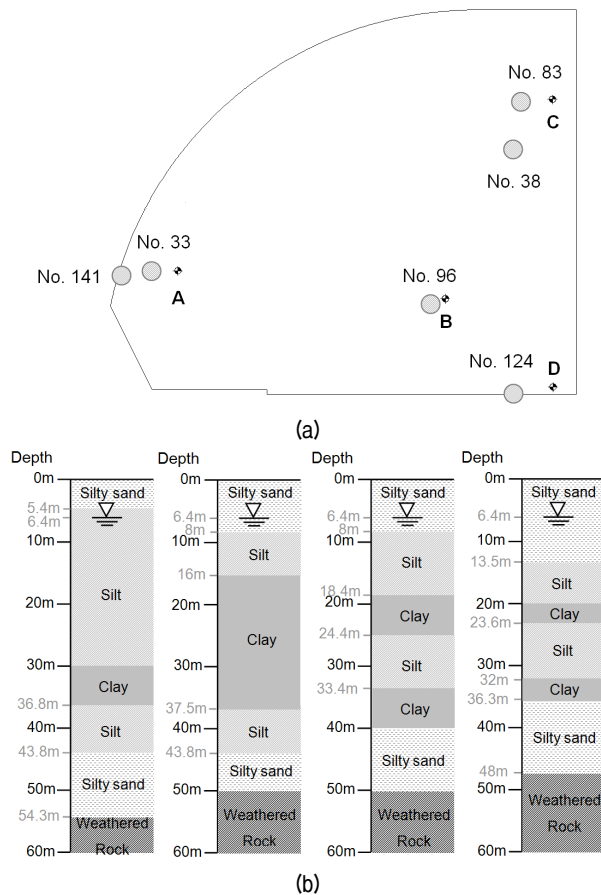


Fig. 5. Subsurface soil profiles: (a) location of field tests, (b) schematic soil profile. The No. denotes bored pile number

Drill) 공법을 실시하여 말뚝을 시공한 현장이다. 현장의 지반조건은 Fig. 5와 같이 크게 매립층(모래와 풍화토), 퇴적층(실트와 점토), 풍화토층(실트질 모래) 그리고 풍화암층으로 구성되어 있으며 지하수위는 2.2m로 나타났다. 따라서 말뚝 시공시 상부 지층의 관입에 의한 슬라임이 충분히 발생할 것으로 사료되어 본 연구를 수행하게 되었다. Fig. 5(a)는 연구가 수행된 현장타설말뚝 시추공(33번, 38번, 96번, 83번, 124번 그리고 141번)의 위치를 보여주며, 인근 지역(A, B, C 그리고 D)의 시추주상도는 Fig. 5(b)에 나타내었다.

4.2 현장실험

TRP를 이용한 현장실험은 현장의 적용성과 효율성을 증대시키고자 관입장비(일반적인 시추장비) 없이 시추공 탐사를 수행할 수 있도록 Fig. 6과 같이 앵글을 이용하여 사다리꼴 형태의 거치대를 제작하였다. 거치대는 말뚝 케이싱 상단에 클램프를 이용하여 탈부착을 용이하게 하였으며 거치대 상부에는 롤러를 설치하여 TRP에 연결된 로프를 지상에서 수평방향으로 조절하며 관입시켰다. 또한 정확한 심도를 평가하기 위하여 TRP

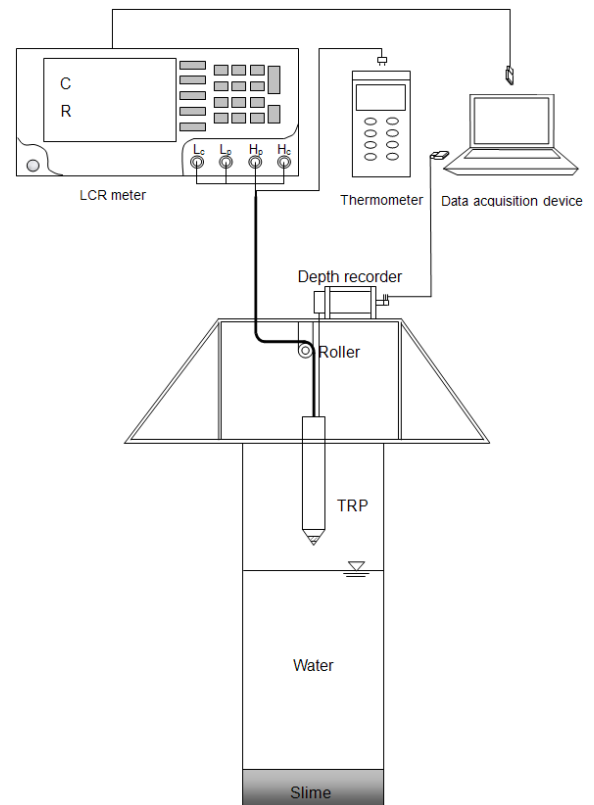


Fig. 6. Schematic diagram of field test

상단에 심도 측정기(Depth recorder)도 설치하였으며 TRP의 길이를 고려하여 총 관입 심도를 보정하였다. 그러므로 Fig. 6과 같이 전기저항, 온도 그리고 심도를 측정하여 슬라임층의 두께와 존재 여부를 평가하였으며 전기저항은 LCR meter, 온도는 온도측정장치 그리고 심도는 심도측정기(PRF19-A1AM5010, SICK)를 이용하였다.

4.3 현장실험 결과

케이싱 설치 이후 경과 시간이 서로 다른 6개의 굴착공에서 전기비저항 측정 현장실험을 수행하였으며, 온도를 보정한 전기비저항 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 측정결과 공내 혼탁수내의 전기비저항 값은 상대적으로 차이는 있지만 일정한 범위 내에서 심도에 따라 유사한 값을 보여준다. 또한 현장 시공 여건상 mechanical

pumping을 수행하고 그 이후에 지하수가 케이싱 내부의 굴착공으로 밀려 들어와 전기비저항 측정이 시작되는 혼탁수 위치의 심도가 모두 상이하게 나타났다. 그러나 슬라임층이 시작되는 경계면 부분에서는 전기적인 특성이 다른 매질로 인하여 전기비저항 값이 Fig. 7과 같이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 이유로 굴착심도와 전기비저항이 급격하게 증가하는 심도 차이를 통하여 슬라임의 두께 및 존재여부를 판단하였으며 이를 Table 1에 정리하였다.

분석 결과 실험이 진행된 지역에 슬라임은 모두 존재하는 것으로 나타났으며 그 두께는 최소 500mm에서 최대 7900mm까지 나타났다. 두께가 작게 나타난 위치는 mechanical pumping을 수행하여 1차 슬라임 처리를 수행한 지역이며, 슬라임을 미처리한 말뚝에서는 상대적으로 두께가 크게 나타났다. 이와 같은 결과를 간접적으로 비교하기 위하여 실제 현장에서 사용하고 있는 다짐

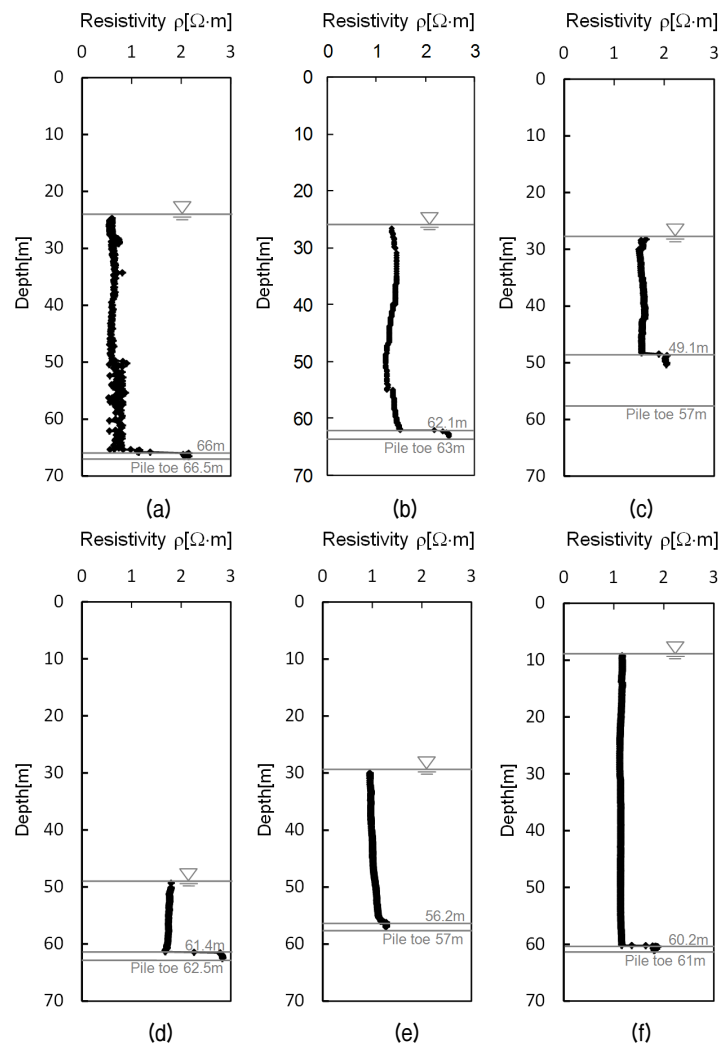


Fig. 7. Field test results: (a) No. 33, (b) No. 124, (c) No. 83, (d) No. 141, (e) No. 96, (f) No. 38. The No. denotes bored pile number

Table 1. Field test results

Pile No.	Elapse time after casing installation (min)	Excavation depth (m)	Measurement depth (m)	Slime thickness (m)		Mechanical Pumping
				TRP	Weighted pendulum	
33	15	66.5	66	0.5	0.4–0.5	after
124	90	63	62.1	0.9	0.5–0.6	after
83	103	57	49.1	7.9	6.9–7.0	before
141	130	62.5	61.4	1.1	0.5–0.6	after
96	150	57	56.2	0.8	0.4–0.6	after
38	240	61	60.2	0.8	0.5–0.6	after

추 방법으로도 슬라임의 두께를 산정하였으며 그 결과 다짐추로 평가한 슬라임 두께는 전기비저항을 이용하여 측정된 결과보다 대체적으로 작게 나타났다. 이는 다짐추가 Fig. 1과 같이 굽고 무더 장력에 의한 촉감이 작아 슬라임층에 일정 깊이가 관입되어야 감지되기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 기법은 슬라임층이 시작하는 부분에서 즉각적인 반응이 나타나는 방법으로 정량적인 지표를 제시할 수 있음을 알 수 있다.

5. 현장실험 영향 인자 분석

TRP의 현장실험 결과를 더욱 구체적으로 평가하고자 Mechanical pumping으로 채취한 시료를 이용하여 다음과 같이 총 3가지의 추가적인 실내실험을 수행하였다. 실내실험에 사용된 슬라임의 물성치는 Table 2와 같다. Fig. 8(a)와 같이 높이와 내경이 각각 400mm 그리고 190mm인 원기둥 형태의 플라스틱 수조에 수중강사 방법으로 슬라임층을 조성하였다. 이때 사용한 혼탁수는 현장실험 결과의 평균 농도 값인 10~12[mS/cm]로 실험용 소금을 이용하여 조절하였다. 실내 실험시 프로브와 토조의 크기로 인한 경계면 효과를 감소시키기 위하여 직경이 4mm인 소형 TRP를 이용하였으며, 소형 TRP는 크기만 다를 뿐 측정 원리와 내부 센서는 현장용 TRP와 모두 동일하다. 소형 TRP의 비례상수(β)는 0.004이며, 온도계수(α)는 1.885로 나타났으며, 실내실험에서는 거

Table 2. Properties of slime

Material property	Slime
Specific gravity G_s	2.674
Maximum void ratio e_{max}	0.981
Minimum void ratio e_{min}	0.779
Unit weight γ [kN/m ³]	13.975

치대의 물러 없이 모터로 관입속도가 조절되는 관입기를 활용하여 실험을 수행하였다. 참고로 관입속도는 1mm/sec로 설정하였다.

5.1 케이싱의 전기비저항 교란효과

현장실험은 철로 구성된 케이싱 내부에 TRP를 관입시켜 전기적 특성을 평가하는 방법으로 진행된다. 하지

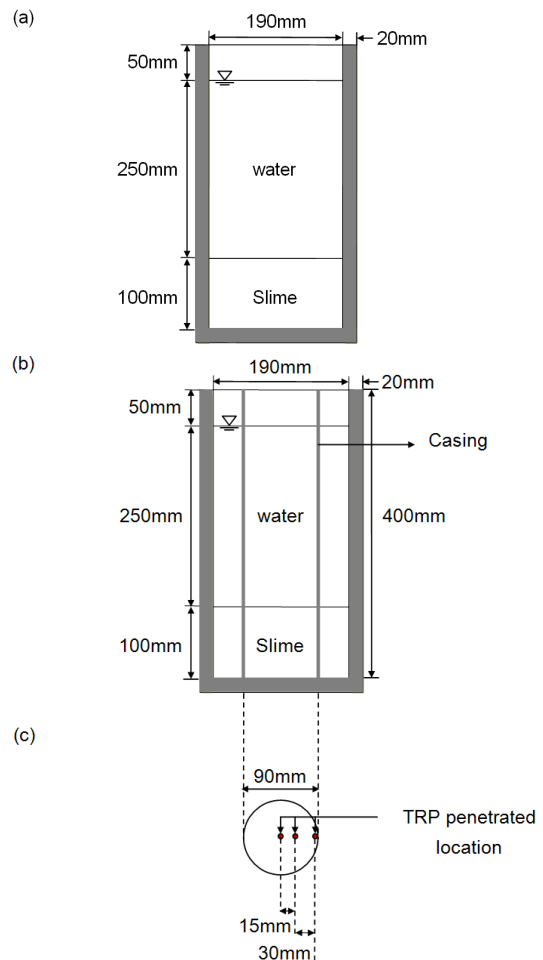


Fig. 8. Schematic diagram of laboratory test: (a) chamber, (b) casing installation, (c) top view

만 도체인 케이싱이 TRP의 전기적인 값 획득에 잡음 혹은 교란을 발생시킬 가능성이 있을 것으로 판단하여 케이싱 영향 실험을 수행하였다. Fig. 8(b)와 같은 토조에 내경이 약 90mm의 철 파이프를 케이싱으로 모사하여 설치하였다. 실제 현장의 케이싱과 TRP의 비율이 약 28배(케이싱 내경: 1000mm, 현장 실험용 TRP 직경: 35.7mm)임을 감안하여 실내 실험에서도 최대한 경계면 효과를 고려하여 약 20배(철 파이프 내경: 90mm, 실내 실험용 TRP 직경: 4.4mm) 차이의 케이싱을 이용하였다. 케이싱 설치 후 관입은 Fig. 8(c)와 같이 중앙 부분, 케이싱의 중심으로부터 15mm 떨어진 영역 그리고 45mm 떨어진 구역으로 나누어서 수행하였다.

측정 결과는 Fig. 9와 같으며 혼탁수가 있는 부분에서 측정값이 다소 차이가 발생하지만 결과적으로 슬라임이 측정된 심도는 유사하게 나타났다. 그러므로 TRP 현장 적용시 케이싱에 대한 데이터 잡음 효과는 거의 없는 것을 측정하였다. 또한 공내 혼탁수의 부유물을 모사하고자 케이싱 설치 후 하부에 있는 슬라임을 재성형한 Fig. 8(c)와 동일한 위치에서 관입실험을 진행하였다. 실

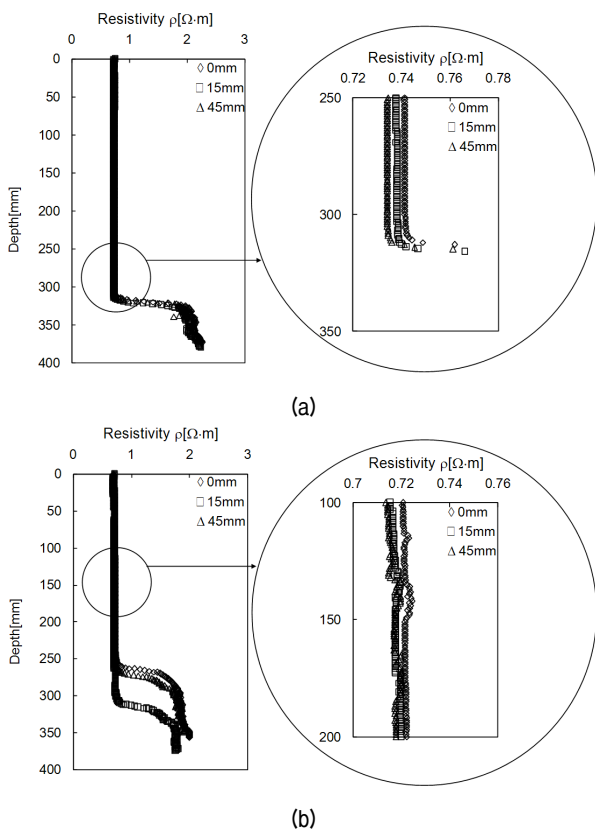


Fig. 9. Casing installation versus electrical resistivity results: (a) casing effect, (b) suspension effect. The 0mm, 15mm, 45mm mean distance from casing center

험결과 슬라임을 재성형하여 관입실험시 부유물이 고르게 침전하지 않아 슬라임의 두께는 모두 불일치 하는 것으로 나타났지만 혼탁수에서는 부유물로 인하여 전기비저항 값이 다소 차이 나는 것을 관찰하였다. 이와 같은 결과는 현장실험 결과 중 케이싱 설치 후 경과 시간이 가장 작은 15분 결과의 혼탁수 부분에서도 유사한 결과가 나타났다. 이와 같은 이유로 Fig. 7(a)의 결과는 부유물이 침전되지 않고 아직 혼탁수 내부에 존재하는 것을 간접적으로 보여준다. 본 연구에서 제안하는 기법은 슬라임층의 정보 외에 부유물 침전 여부 등의 중요한 정보도 함께 제공함을 알 수 있다.

5.2 부유물 침전에 따른 전기비저항 특성 변화

현장실험 결과에서 혼탁수 영역인 데이터 시작점의 전기비저항 값은 다소 차이를 보이고 있다. 이와 같은 이유가 mechanical pumping과 지하수가 케이싱 내부로 밀려들어와 발생한 농도차이에 기인한 현상임을 관찰하기 위하여 시료 조성 후 시간 경과에 따른 전기비저항 탐사를 실시하였다. 시료 조성 후 혼탁수 상태인 0분에서부터 10분, 20분 그리고 40분 경과 후에 관입실험을 진행하였으며, 약 30분 이후부터는 부유물이 모두 침전하여 상부 지하수와 하부 슬라임층이 확연히 구분되어 40분을 최종 시간으로 결정하였다. 여기서 케이싱은 전기비저항 측정에 미치는 영향이 미비하고 시간경과에 따른 시료 내부를 측면에서 면밀히 관찰하기 어려워 시간경과 실험에서는 미 설치하였다.

측정 결과는 Fig. 10과 같으며 시간이 경과됨에 따라 혼탁수에서의 전기비저항 값은 모두 동일하게 나타났다. 이와 같은 결과는 현장 결과 값의 초기 데이터가

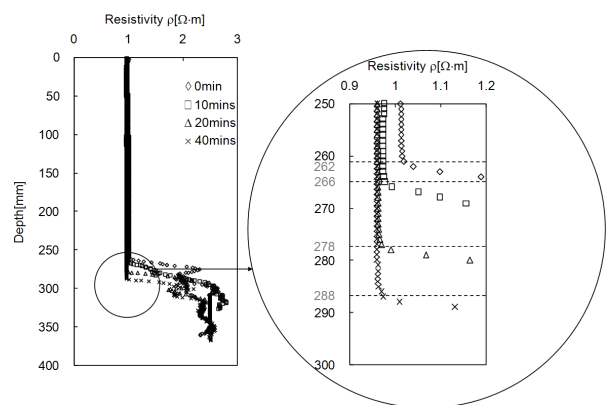


Fig. 10. Elapsed time versus electrical resistivity

mechanical pumping과 지하수로 인하여 현장 혼탁수의 농도 변화에 기인함을 알 수 있다. 또한 시간이 경과 할 수록 하부 슬라임층이 입자 재배열 및 자중압밀과 같은 효과로 두께가 감소하는 것으로 나타났다. 상부 부유물이 침전하면 슬라임층의 두께가 증가 할 것으로 예측하였지만 부유물 침전은 오히려 슬라임층의 자중압밀 현상을 유발시켜 두께가 감소하는 현상이 나타난 것으로 판단된다. 비록 0분과 40분 경과에 따른 슬라임 두께 차이는 약 26mm로 미약하지만 더욱 정밀한 값을 얻기 위해서는 말뚝 시공시 지반 굴착 후 경과 시간을 충분히 고려한 후 슬라임층을 결정해야 할 것으로 판단된다.

고찰 실험의 첫번째 부분인 케이싱 효과의 부유물 측정 부분에서는 혼탁수의 전기비저항이 부유물에 반응하는 것으로 나타났지만 두번째 시간경과 실험에서는 0분에서도 반응이 미비한 것으로 나타났다. 이와 같은 이유는 TRP와 경계면 간의 비율차이로 판단되며, 케이싱이 없는 경우 토조와 TRP의 비율이 약 43배(토조 내경: 190mm, 실내 실험용 TRP 직경: 4.4mm)이므로 부유물의 확장 영역이 커져 측정 결과에 부유물 효과가 나타나지 않은 것으로 사료된다.

5.3 강도변화에 따른 전기비저항 해상도 평가

슬라임층의 강도와 두께 평가간의 관계를 고찰하고자 상대밀도 변화에 따른 관입실험을 진행하였다. 상대

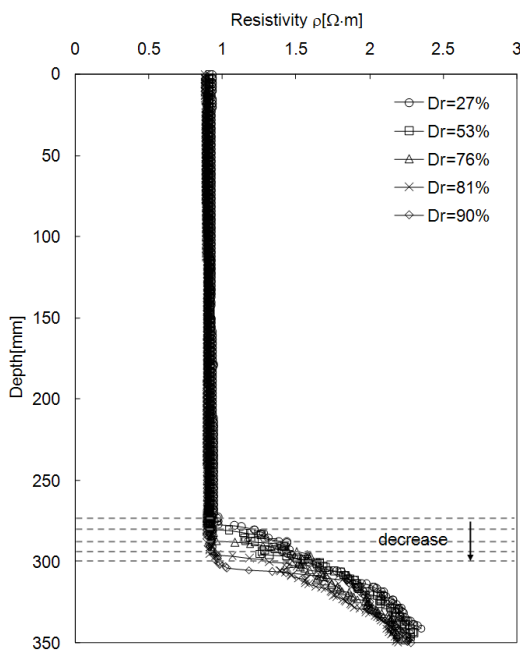


Fig. 11. Relative density versus electrical resistivity

Table 3. Laboratory test results

Relative density (%)	Slime thickness (mm)		
	TRP	Weighted pendulum	Actual thickness
27	104	97-99	105
53	97	92-91	98
76	88	82-84	88
81	84	79-80	85
90	81	75-77	81

밀도는 시료 조성 직후에 가장 느슨한 27%로 나타났으며, 하부를 타격하면서 상대밀도를 53%, 76%, 81% 그리고 90%로 증가시켰다. 강도 증가에 오차를 유발시킬 영향을 최소화 시키기 위하여 전기비저항 측정 결과에 큰 영향이 없는 케이싱은 선행 연구 결과를 토대로 미설치하였다. 측정된 결과는 Fig. 11과 같이 상대밀도가 증가 할수록 지층에 다짐효과가 발생하여 슬라임층의 높이가 감소하는 것을 관찰하였다. 이와 같은 결과는 강도가 증가하여도 전기비저항을 이용한 슬라임층 두께 평가에는 큰 영향이 없는 것을 보여준다. 또한 강도변화에 따른 슬라임두께를 기존 방식인 다짐추로 결정하여 전기비저항 기법의 신뢰성을 검증하였다. 본 연구에서 사용한 다짐추는 현장에서 활용하고 있는 형상과 유사한 원추형태를 선택하였으며, 다짐추에는 줄자를 부착하여 슬라임 두께를 예측하였다. 실험결과는 Table 3에 나타내었으며, TRP를 이용한 결과 값과 비교할 때 슬라임 두께가 다소 작게 나타났다. 이와 같은 결과는 현장 실험결과와 유사한 경향을 보여주며, 다짐추의 민감성이 많이 부족함에 기인한 것으로 판단된다. 또한 플라스틱 수조를 통하여 실제 존재하는 슬라임층의 두께를 측정 후 결과 값을 비교할 때, 다짐추를 이용한 경우보다 전기비저항을 이용한 두께 평가 시 더 높은 신뢰도를 가짐을 보여주었다. 따라서 시추공 전기비저항 탐사를 활용한 기법은 슬라임 두께 평가에 높은 해상도와 신뢰도를 가지는 결과를 도출 할 수 있음을 암시한다.

6. 결론

본 논문에서는 온도보상형 전기비저항 프로브(Temperature-compensated electrical Resistivity Probe, TRP)를 활용하여 현장타설말뚝의 슬라임층 존재여부 및 두께를 과학적이고 객관적으로 평가하고자 하였다. 측정결

과는 기존 방법인 다짐추로 결정된 값과 비교하였으며 추가적인 실내실험을 실시하여 TRP로 측정된 온도보상 전기비저항 값의 신뢰성이 높음을 검증하였다. 본 논문을 통한 최종적인 결론은 다음과 같다.

- (1) 온도가 보상된 전기비저항 값은 공내혼탁수와 슬라임층의 경계면에서 급격하게 증가함을 알 수 있으며, 시추심도를 고려하여 최종적인 슬라임층의 존재 여부 및 두께를 평가하였다.
- (2) 슬라임층 두께는 mechanical pumping으로 슬라임 제거 여부에 따라 차이가 크게 나타나 mechanical pumping의 효과가 큼을 알 수 있다. 하지만, 1차적으로 슬라임을 제거하여도 슬라임은 잔존하는 것으로 나타났으며 실제 현장에서는 수회 반복하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.
- (3) 케이싱의 전기전도도 특성이 전기비저항 측정에 미치는 영향을 평가하고자 케이싱 효과를 고찰해 보았으며, 측정된 전기비저항은 주위 케이싱에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.
- (4) 부유물 침전에 따른 영향을 살펴보고자 시간경과 효과실험을 진행하였다. 측정 결과 시간이 경과됨에 따라 혼탁수 내에 부유물이 침전하여 혼탁수 내의 전기비저항 값은 점점 감소하였으며, 부유물 침전에 따른 자중압밀 현상으로 슬라임층의 두께는 감소하는 것으로 나타났다.
- (5) 슬라임층 강도 변화에 따른 해상도를 고찰하고자 상대밀도를 변화시켜 실내실험을 수행하였으며, 상대밀도가 증가할수록 슬라임층은 낮아져 강도에 대한 해상도는 우수한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 슬라임층의 존재 여부 및 두께 평가를 위하여 전기비저항 기법을 활용하였으며, 이는 기존의 정성적인 방법이 아닌 정량적인 방법으로 지층을 평가할 수 있음에 큰 의의가 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업 10기기술혁신E04 ‘대구경 대수심 해상기초시스템 기술 개발’과제의 지원으로 이루어진 것임을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Abu-Hassanein, Z. S., Benson, C. H., and Boltz, L. R. (1996), "Electrical resistivity of compacted clays", *Journal of Geotechnical Engineering (ASCE)*, Vol.122, No.5, pp.397-406.
2. Campanella, R. G. and Weemee, I. (1990), "Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, No.5, pp. 557-567.
3. Cho, C. W. (2010), *Piling engineering practice*, ENG book, Seoul, pp.414.
4. Cho, G. C., Lee, J. S., and Santamarina, J. C. (2004), "Spatial variability in soils: high resolution assessment with electrical resistivity probe", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, Vol.130, No.8, pp.843-850.
5. Gue, S. S., Tan Y. C., and Liew, S. S. (2003), "A brief guide to design of bored piles under axial compression - a Malaysian approach", *Seminar and Exhibition on Bridge Engineering*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp.8-22.
6. Jung, S. H., Yoon, H. K., and Lee, J. S. (2011), "Application of temperature-compensated resistivity probe in the field", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers (KSCE)*, Vol.31, No.4, pp.117-125.
7. Kim, J. H., Yoon, H. K., and Lee, J. S. (2011a), "Void Ratio Estimation of Soft Soils using Electrical Resistivity Cone Probe", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, Vol.137, No.1, pp.86-93.
8. Kim, J. H., Yoon, H. K., Cho, S. H., Kim, Y. S., and Lee, J. S. (2011b), "Four Electrode Resistivity Probe for Porosity Evaluation", *Geotechnical Testing Journal (ASTM)*, Vol.34, No.6, pp.668-675.
9. Korean Geotechnical Society (2002), *Deep foundation*, Gumi book, Seoul, pp.268-361.
10. Kwon, T. H. and Cho, G. C. (2005), "Smart geophysical characterization of particulate materials in a laboratory", *Smart Structures and Systems*, Vol.1, No.2, pp.217-233.
11. Light, T. S. (1984), "Temperature dependence and measurement of resistivity of pure water", *American Chemical Society*, Vol.56, No.7, pp.1138-1142.
12. Na, K., Park, B. G., and Cho, K. H. (2009), "A study on application of new borehole video profiling measurement system for drilled shafts", *Fall Conference Proceedings on Korean Society for Railway*, Jeju, Korea, pp.2493-2503.
13. Poulos, H. G. (2005), "Pile behavior—consequences of geological and construction imperfections", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, Vol.131, No.5, pp.38-568.
14. Shin, C. K., Baek, S. K., and Park, Y. B. (2005), "A removal method of drilled shaft slime using a wire brush", *Conference of the Korean Society of Civil Engineers*, Jeju, Korea, pp.4312-4315.
15. Yoon, H. K., and Lee, J. S. (2010), "Field velocity resistivity probe for estimating stiffness and void ratio", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.30, No.12, pp.1540-1549.
16. Yoon, H. K., Jung, S. H., and Lee, J. S. (2011), "Characterization of Subsurface Spatial Variability by Cone Resistivity Penetrometer", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.31, No.7, pp.1064-1071.

(접수일자 2013. 1. 22, 심사완료일 2013. 3. 18)