

전자기파를 이용한 모래 지반에 설치된 현장타설말뚝의 네킹 결함 평가를 위한 실내 모형실험

Laboratory Experiments for Evaluating Necking Defects in Bored Piles Embedded in Sandy Soils Using Electromagnetic Waves

이 중 섭¹ Lee, Jong-Sub
김 영 대² Kim, Youngdae
유 정 동³ Yu, Jung-Doung

Abstract

Studies on nondestructive evaluation methods using electromagnetic waves have been commonly conducted to evaluate necking defects in bored piles. However, the propagation of electromagnetic waves are affected by water contents of surrounding materials. This study aims to investigate a suitability of electromagnetic waves for evaluating necking defects in bored piles embedded in sandy soils through laboratory experiments. Laboratory experiments are performed with a model pile having a necking defect. The diameter and length of model pile are 600 mm and 1 m, respectively, and the model pile is embedded in sandy soils with different water contents of 10%, 20%, and 30%. For the propagation of electromagnetic waves, a transmission line is configured in reinforcement cage using an electrical wire. The generation and detection of electromagnetic waves are conducted using a time domain reflectometer. Experimental results show that the peak amplitude of electromagnetic waves reflected at the necking defect decreases with an increase in the water content in sandy soils. In addition, the velocity of electromagnetic waves reflected from the toe of the model pile decreases with an increase in the water content. However, estimated locations of the necking defects are almost the same to that of the actual location of the necking defect. This study demonstrates that electromagnetic waves may be an effective method for evaluating necking defects in bored piles embedded in sandy soils.

요 지

최근 현장타설말뚝의 네킹 결함을 평가하기 위한 비파괴평가기법으로 전자기파를 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만, 전자기파의 전파는 주변 매질의 함수비에 큰 영향을 받는다. 본 연구에서는 서로 다른 함수비의 모래 지반에 설치되어 있는 현장타설말뚝에 발생한 네킹 결함을 전자기파를 이용하여 평가할 수 있는 방법을 실내 실험을 통해 고찰하고자 한다. 실내 실험을 위해 네킹 결함이 있는 직경 600mm, 길이 1m의 모형 말뚝을 제작하였으며, 건조된 모래와 함수비가 10%, 20%, 30%인 모래에 설치된 조건에서 실험을 수행하였다. 전자기파의 전파를 위해

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

2 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 연구교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3838, Fax: +82-2-3290-5999, noorung2@korea.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 11월 30일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

철근망에 전선을 설치하여 전송선로를 구성하였다. 전자기파의 송신과 수신을 위해 time domain reflectometer를 사용하였다. 실험결과, 모형 말뚝의 두부와 선단부뿐만 아니라 네킹 결합부에서도 전자기파의 반사 신호가 뚜렷이 나타났다. 모래의 함수비가 증가할수록 네킹 결합부에서 반사되는 전자기파 신호의 최대 진폭이 감소하였으며, 모형 말뚝 선단에서 반사된 전자기파의 속도는 네킹 결합 내의 모래의 함수비가 증가할수록 감소하였다. 하지만, 전자기파의 도달시간과 속도를 이용하여 산정된 네킹 결합의 위치와 실제 네킹 결합의 위치가 거의 같았다. 본 연구는 전자기파가 모래 지반에 설치된 현장타설말뚝의 네킹 결합을 평가하는데 유용하게 활용될 수 있음을 보여준다.

Keywords : Bored pile, Electromagnetic wave, Necking, Nondestructive evaluation, Transmission line

1. 서 론

일반적으로 현장타설말뚝은 굴착된 지반에 케이싱을 설치한 후 철근망과 콘크리트를 타설하는 과정을 거쳐 시공된다. 하지만, 굴착, 케이싱 제거, 슬러리, 지하수 유입 등에 의해 현장타설말뚝 주변에 네킹 결합(necking defect)이 발생할 수 있다(O'Neill, 1991). 네킹은 말뚝의 단면적이 국부적으로 축소되는 결함으로 말뚝의 지지력을 감소시킨다. 국내에서는 현장타설말뚝에 발생한 결함을 평가하는 비파괴평가방법으로 충격 반향 기법(sonic echo method, SE)과 공대공 초음파 검층(crosshole sonic logging, CSL)이 널리 사용되고 있다. 충격 반향 기법은 말뚝 두부에 충격을 가해 말뚝의 선단부나 결합부에서 반사되어 오는 탄성파를 두부에 설치한 가속도계나 속도계로 측정하고, 탄성파의 도달시간으로부터 결함의 위치를 평가하는 방법이다. 충격 반향 기법은 시험이 신속하고 간단하다는 장점을 지니고 있다. 하지만, 말뚝의 길이(L)와 직경(D)의 비가 30보다 크면 탄성파의 에너지가 크게 감쇠되어 신호를 측정하기 어려우며(Gassman and Finno, 2000; Rausche, 2004; White et al., 2008), 말뚝 내에 다수의 결함이 존재한다면 탄성파의 다중 반사로 인해 그 위치를 정확히 평가하기 어렵다는 단점이 있다(Rausche, 2004). 또한, 발생한 결함의 횡방향 위치도 알 수 없다. 더욱이 콘크리트가 현장에서 직접 타설되기 때문에 말뚝의 정확한 탄성계수를 알기 어렵다. 이 경우, 탄성파의 속도를 가정하게 되며, 이는 결함의 위치를 부정확하게 판정하게 되는 중요한 원인이 된다(White et al., 2008). 이 외에도 말뚝 두부에 캡이 설치되어 있는 경우, 두부의 캡과 말뚝의 임피던스 차이로 충격에 의해 발생한 탄성파의 일부만 말뚝에 전달되게 되고 더불어 캡과 말뚝 두부의 경계부에서 탄성파가 반사되는 문제가 발생할 수 있다. 이로 인해 적은 에너

가 말뚝에 전달되며, 캡과 말뚝 두부의 경계부와 말뚝의 결합 또는 선단부에서 반사되는 탄성파가 함께 측정되기 때문에 정확한 건전도를 평가하는데 어려움을 준다(Liao, 1994; Ni et al., 2006).

공대공 초음파 검층은 말뚝 내 철근망의 주철근을 따라 다수의 시험관을 설치하고 초음파 발신기와 수신기를 평행하게 위(아래)로 이동시키면서 초음파의 속도와 감쇠정도를 측정하여 말뚝의 건전도를 평가하는 방법이다. 공대공 초음파 검층은 말뚝의 크기나 주변 매질에 의한 제약이 없이 수행할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 초음파 발신기와 수신기의 수평 유지, 시험관의 휨이나 기울어짐 등과 같은 요인으로 인해 측정된 초음파 속도가 15%까지 저감될 수 있다. 또한, 시험관 간격의 약 1/3 또는 말뚝 단면적의 약 10%를 초과하는 결함만 탐지가 가능하다는 단점이 있다. 특히, 말뚝에 발생하는 대부분의 결함이 말뚝 주변에 발생하지만 공대공 초음파 검층은 초음파 발신기와 수신기 사이에 존재하는 결함에 대해서만 평가할 수 있다(Jung et al., 2003; Liao, 1994; Rausche, 2004; White et al., 2008; Amir and Amir, 2009). 따라서, 기존에 사용되고 있는 말뚝의 네킹 결함을 평가하는 기법의 단점을 보완하고 결함의 개수 및 위치, 말뚝의 직경과 길이에 대한 제약 없이 적용될 수 있는 새로운 방법이 요구되고 있다.

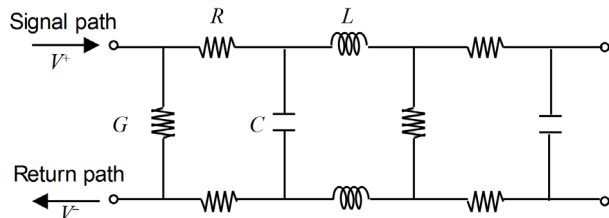
최근 많은 연구들이 지반 구조물의 건전도를 평가하기 위하여 전자기파를 이용하고 있다. Yu et al.(2018)은 쓰일네일을 도체로 사용하여 쓰일네일의 길이와 그라우트의 결함 정도를 평가하는 연구를 수행하였다. Lee and Yu(2019)는 두 개의 쓰일네일을 한쌍으로 전송선로(transmission line)를 구성하였으며, 에폭시로 코팅된 철근을 이용하면 전도성이 큰 흙에서도 전자기파의 반사 신호를 측정할 수 있음을 보였다. Yu et al.(2019)는 교각 주변 발생한 세굴을 평가하기 위하여 전자기파를 사

용하였으며, 전송선로를 우레탄으로 코팅하면 염수 조건에서도 전자기파를 이용하여 세굴에 따라 변화하는 전자기파 신호를 측정할 수 있음을 보였다. 최근 현장타설말뚝에 발생한 네킹 결함을 평가하기 위한 연구도 수행되었다. Lee et al.(2018)은 철근망의 주철근과 전선을 이용하여 전송선로를 구성하면, 말뚝 주변에 발생한 다수의 네킹 결함을 평가할 수 있음을 보였다. 하지만, 현장타설말뚝이 설치된 지반은 전도성이 큰 함수비가 높은 모래일 수 있다. 이러한 지반조건에서는 전도성이 큰 지반으로 전기적인 소산이 발생되기 때문에 전송선로에 전파하는 전자기파 측정에 어려움을 겪을 수 있다.

본 연구에서는 현장타설말뚝에 발생한 네킹 결함을 평가함에 있어 주변 모래 지반의 전기전도도에 영향을 받지 않고 전자기파를 측정할 수 있는 전송선로를 구성하는 방법을 실내실험을 통해 제시하고자 한다. 실내실험은 네킹 결함이 있는 모형 말뚝을 이용하여 수행되었으며, 함수비가 다른 모래를 이용하여 주변 지반을 모사하였다. 모형 말뚝 내의 철근망과 전선을 이용하여 전송선로를 구성하였으며, 전자기파의 송수신을 위해 time domain reflectometer(TDR)을 사용하였다. 본 논문은 전송선로에서의 전자기파의 전파 특성, 전자기파를 이용한 네킹 결함 측정 시스템, 실내실험, 분석 및 토의, 마지막으로 결론으로 구성된다.

2. 전송선로에서의 전자기파의 전파 특성

일반적으로 전송선로는 전기적인 신호를 전송하는 두 개의 도체(conductor)로 구성된다. 두 도체 주위에는 전자기장이 형성되며, 도체는 전자기파가 전파하는 가이드(waveguide) 역할을 한다. 전자기파 신호가 송신되는 도체를 신호경로(signal path), 수신되는 전자기파가 흐르는 도체를 귀환경로(return path)라고 한다. Fig. 1과



R : Resistance (Ω/m)
 L : Inductance (H/m)
 G : Conductance (S/m)
 C : Capacitance (F/m)

Fig. 1. LRGC model of an ideal transmission line

같이 전자기파가 전파하는 전송선로는 저항(resistance, R), 인덕턴스(inductance, L), 컨덕턴스(conductance, G), 커패시턴스(capacitance, C)로 표현된다. 저항은 전류의 흐름을 방해하는 도체 고유의 특성으로 도체의 저항으로 인해 전류의 흐름이 방해받게 되면 전압이 줄어들고 전기적인 손실이 발생한다. 인덕턴스는 전류의 변화를 방해하는 정도를 나타낸다. 전류의 흐름으로 인해 생성된 자기장은 전류의 변화와 함께 변화한다. 전류가 변화하는 속도를 자기장이 따라가지 못하면, 전류의 변화를 방해하게 된다. 자기장이 잘 형성되어 있을수록 큰 인덕턴스를 보인다. 전송선로를 이루고 있는 두 도체 사이에 형성된 전기장 안에서 극성을 지니고 있는 절연체인 유전체(dielectric material)로 전류가 흐를 경우, 이때의 전류를 누설전류(leakage current)라고 하며, 컨덕턴스는 이와 관련된 파라미터이다. 커패시턴스는 도체간의 전위차에 의해 발생하는 전기적인 누설경로(leakage path)이다. 커패시턴스는 도체의 크기와 간격 그리고 도체 사이에 있는 유전체의 전기적인 유전율에 영향을 받는다.

전송선로에 전파하는 전자기파의 속도(v_p)는 식 (1)과 같이 빛의 속도(v_c)와 매질의 유전율(ϵ)로 나타낼 수 있다(Maxwell, 1873).

$$v_p = \frac{v_c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

여기서 빛의 속도는 약 $3.0 \times 10^8 \text{m/s}$ 이다. 전기적으로 중성인 유전체가 전기장에 의해 전하가 (+)와 (-)의 극성을 갖게 되어 전기를 띠게 되는 현상을 유전분극(dielectric polarization)이라고 한다. 이때 유전체 내에서 전하가 얼마나 잘 분극이 되는지에 대한 전기적인 성질을 나타내는 물리량을 유전율이라고 한다. 유전율은 식 (2)와 같이 복소 유전율(complex permittivity)로 표현할 수 있다(Robinson et al., 2003).

$$\epsilon = \frac{\mu_r \epsilon'_r}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \left[\left\{ \epsilon''_{relax} + \left(\frac{\sigma_{dc}}{\omega \epsilon_0} \right) \right\} / \epsilon'_r \right]^2} \right) \quad (2)$$

여기서, μ_r 은 상대 투자율(relative magnetic permeability)로 매질의 투자율과 진공 상태에서의 투자율의 비이다. ϵ'_r 은 매질의 유전율과 진공의 유전율의 비인 상대 유전율(relative permittivity)의 실수부로 전기적 에너지 저장과 관련된다. ϵ''_{relax} 는 분극화에 의한 에너지 손실과 관

려된 허수부 상대 유전율(imaginary relative permittivity)을 나타낸다. σ_{dc} 는 전기전도도(electrical conductivity)이며, ω 는 각주파수(angular frequency)이다. 식 (2)에서 허수부는 전기전도도나 분극화에 따른 전송선로에서 발생하는 전기적 에너지 소산(electrical energy dissipation)과 관련된다. 식 (2)는 유전율이 전기적 에너지의 감쇠(attenuation)를 일으키는 전류의 외란(disturbance)에 의해 영향을 받음을 내포한다. 일반적으로 암석, 콘크리트, 흙과 같은 물질에 대한 상대 투자율은 1에 가깝고, 허수부는 실수부 상대 유전율보다 매우 작기 때문에 식 (2)는 $\epsilon = \epsilon'$ 로 간략히 표현될 수 있다.

매질 내에 전파하는 전자기파는 다른 매질을 만났을 때 두 매질 간의 물리적인 차이로 인해 전기적인 임피던스(impedance) 차이가 발생하고 신호의 반사가 발생할 수 있다. 임피던스는 전압과 전류의 비로 특정 매질에서의 임피던스는 식 (3)과 같다.

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{V_0^+ + V_0^-}{I_0^+ - I_0^-} = Z_0 \frac{V_0^+ + V_0^-}{V_0^+ - V_0^-} \quad (3)$$

여기서, Z_0 와 Z_1 은 매질 0과 1에서의 임피던스, V_1 과

I_1 은 매질 1에서의 전압과 전류, V_0^+ 와 I_0^+ 는 매질 0에서의 입력 전압과 전류, V_0^- 와 I_0^- 는 매질 0에서의 반사 전압과 전류를 나타낸다. 식 (3)에서 반사 전압과 입력 전압의 비는 다음 식 (4)와 같이 반사계수로 나타낼 수 있다.

$$\Gamma_1 = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (4)$$

여기서, Γ_1 은 매질 1에서의 반사계수이다. 만약, $Z_1 > Z_0$ 이면, 입력 신호와 동일한 극성의 반사 신호가 나타나며, $Z_1 < Z_0$ 이면, 입력 신호와 반대의 극성을 지닌 반사 신호가 나타난다. $Z_1 = Z_0$ 이면 반사 신호가 나타나지 않는다. 반사계수가 -1이면, 회로에서 (+)와 (-)의 극성을 띠고 있는 선로가 연결되어 전기적으로 합선 또는 단락(short)되었음을 의미한다.

3. 측정 시스템

본 연구에서는 현장타설말뚝의 네킹 결함을 전자기파를 이용하여 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 측정 시

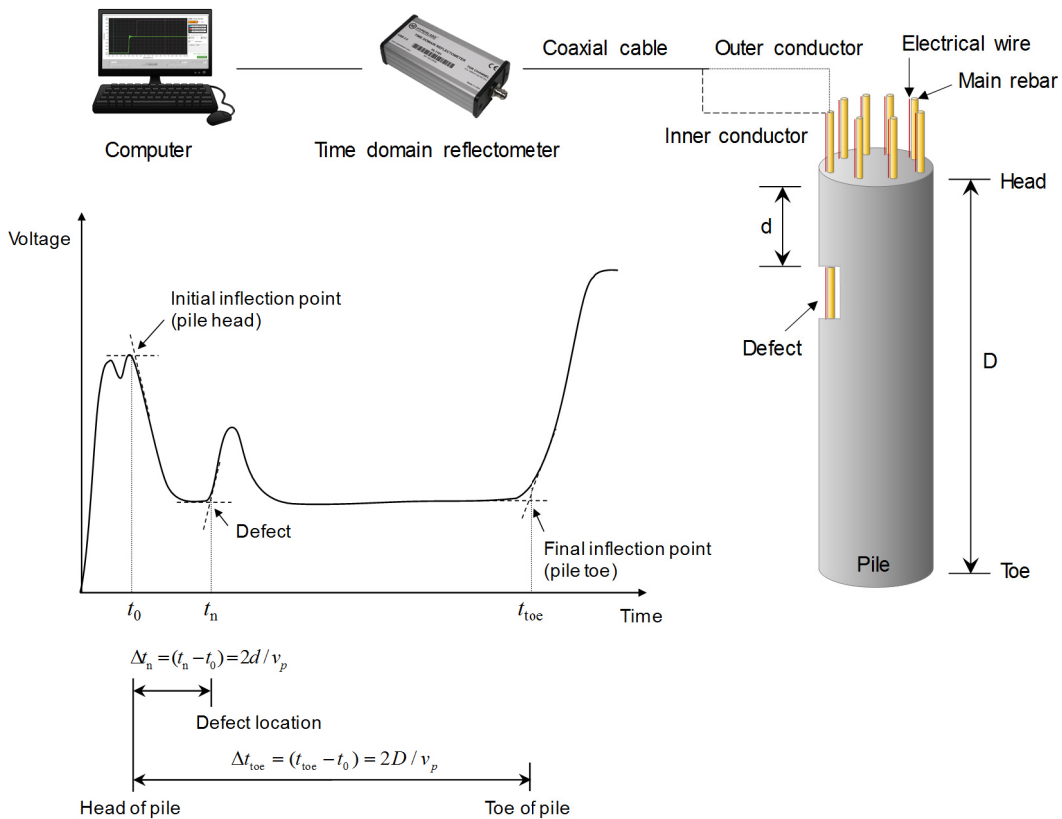


Fig. 2. Measurement system

시스템을 구성하였다. 전자기파의 송·수신을 위하여 time domain reflectometer(TDR)을 사용하였다. TDR(HL1101, Hyperlabs)은 현장에서도 용이하게 사용할 수 있도록 노트북 컴퓨터의 배터리로 전원을 공급할 수 있으며, 휴대가 가능한 것으로 선정하였다. TDR은 펄스폭(pulse width)이 4 μ s, 상승시간(rise time) 200ps의 계단형 펄스(step pulse)를 발생시켰다. TDR은 동축 케이블(coaxial cable)을 이용하여 철근망의 주철근(main rebar)과 전선(electrical wire)으로 구성된 전송선로와 연결되었다. TDR 코넥터와의 임피던스 매칭을 위하여 동축 케이블의 특성 임피던스는 50 Ω 로 선정하였다. TDR의 코넥터 동축 케이블의 내부도체(inner conductor)는 전선과 연결하였으며, 외부도체(outer conductor)는 주철근과 연결하였다. 내부도체와 연결된 전선은 신호경로로 사용되었으며, 외부도체와 연결된 주철근은 귀환경로로 사용되었다. 전송선로를 따라 전파하다 말뚝의 선단이나 결합부에서 반사되는 전자기파는 TDR로 수신되었으며, 컴퓨터에 저장하였다. 반사된 전자기파의 시간은 신호의 변곡점(inflexion point)의 접선으로부터 산정되었다. 반사된 전자기파의 도달시간은 결합이나 말뚝의 선단에서 반사된 전자기파의 시간과 두부에서 반사된 시간의 차로 산정하였다.

4. 실내실험

4.1 모형 말뚝의 제작과 전송선로의 구성

모형 말뚝의 제작을 위해 Fig. 3과 같은 직경 0.4m,

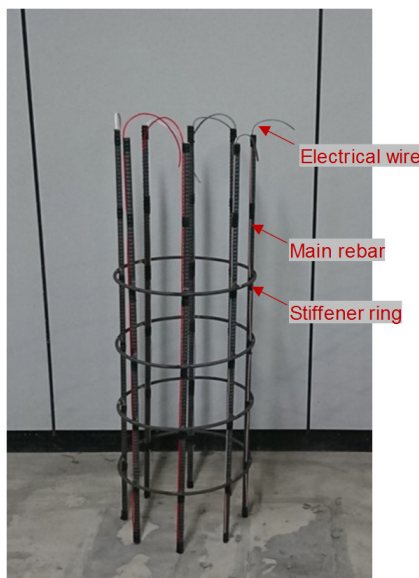


Fig. 3. Reinforcement cages with electrical wires

길이 1.2m의 철근망을 제작하였다. 철근망은 8개의 주철근과 4개의 띠철근(stiffener ring)으로 이루어졌다. 주철근의 직경은 16mm이며 원형으로 배열되었다. 띠철근의 직경은 10mm이며, 철근망의 하부로부터 0.2m 간격으로 설치되었다. 주철근과 띠철근의 접점은 용접하여 고정하였다. 전송선로는 전선을 주철근을 따라 나란히 설치하여 2선식 전송선로로 구성되었다. 전선은 절연테이프를 이용하여 0.2m 간격으로 주철근에 고정되었다. 실험에 사용된 전선의 도체는 직경 2.1mm의 연동선(flexible stranded annealed copper)이며, 두께 0.4mm의 PVC 재질로 피복되었다. 철근망에 구성된 전송선로의 특성 임피던스는 75 Ω 이며, 공기 중에서의 전자기파의 전파 속도는 2.426×10^8 m/s이다. 모형 말뚝 내에 주철근과 전선으로 구성된 전송선로 중 주위에 결합이 없는 전송선로는 T1으로 명명하였으며, 결합이 있는 전송선로는 T2로 명명하였다.

모형 말뚝은 전송선로가 구성된 철근망 주위에 물-시멘트비 50%로 배합된 시멘트 페이스트(cement paste)를 타설하여 제작되었다. 제작된 모형 말뚝을 Fig. 4에 나타내었다. 모형 말뚝의 직경은 600mm이며, 길이는 1m이다. 말뚝의 네킹 결합은 전송선로 T2 주위에 모사하였다. 네킹 결합의 크기는 10cm \times 10cm \times 14cm이며, 말뚝의 두부로부터 30cm 아래의 위치에 모사하였다. 모형 말뚝은 28일간 양생하였으며, 양생 후 측정된 시멘트 페이스트의 유전율은 5.5이다. 실험에 사용된 모래는 규사로 건조상태에서의 유전율은 1.31이며, 전기전도도는 0.02mS/m이다. 함수비가 10%, 20%, 30%인 모래의 유전율은 각각 1.99, 2.67, 3.36이며, 전기전도도는 각각 6.72mS/m, 12.53mS/m, 17.13mS/m이다.

4.2 실험결과

모형 말뚝 내에 설치된 전송선로에 전파하는 전자기파 신호를 측정하였다. 주위에 결합이 없는 전송선로 T1과 결합이 있는 전송선로 T2에 대해 실험을 수행하였으며, T2 주위에 발생한 결합에 대해서는 결합이 공기 중에 노출된 경우, 결합이 건조된 모래로 채워진 경우, 그리고 결합이 함수비가 각각 10%, 20%, 30%인 습윤상태의 모래로 채워진 경우에 대해 실험을 수행하였다. 주위에 결합이 없는 전송선로 T1에서 측정한 전자기파 신호를 Fig. 5에 나타내었다. 측정한 신호를 보면, 말뚝의 두부와 선단부에서만 전자기파의 반사 신호가 나타나는

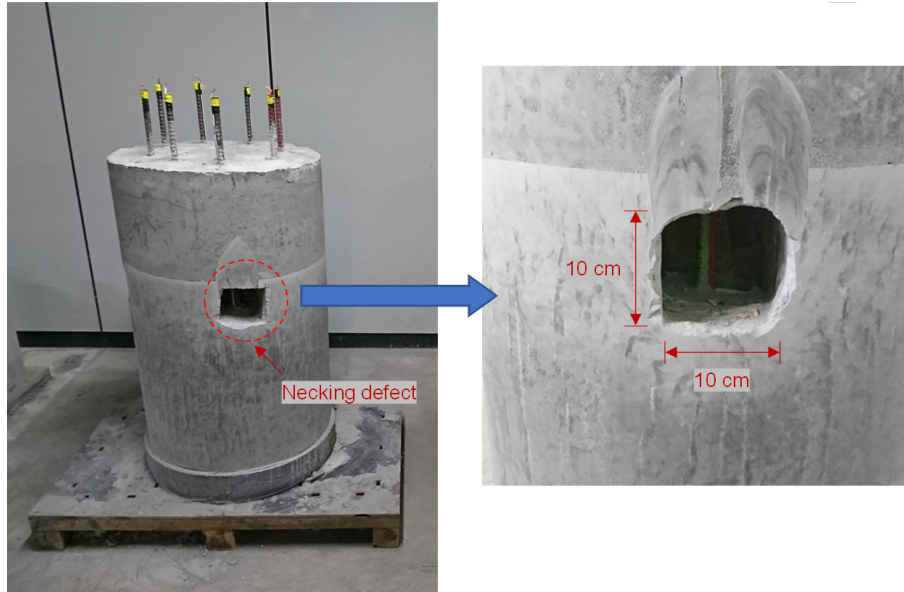


Fig. 4. Model pile

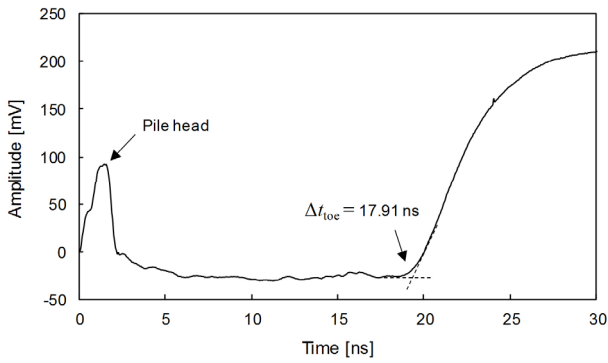


Fig. 5. Measured signal for T1

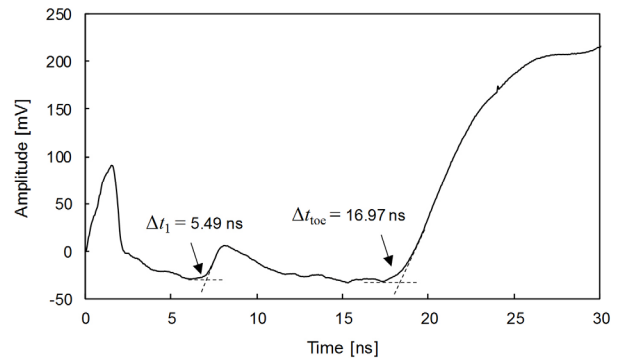


Fig. 6. Measured signal for T2 in air

것을 볼 수 있다. 모형 말뚝 내의 전송선로 T1의 선단부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 17.91ns이다.

주위에 결함이 있는 T2에서 측정된 전자기파 신호를 Fig. 6~8에 나타내었다. 결함이 있는 경우, 말뚝의 두부와 선단부뿐만 아니라 결함부에서도 전자기파 신호가 반사되는 것을 볼 수 있다. Fig. 6과 같이 결함이 공기 중에 노출된 경우, 선단에서 반사된 전자기파의 도달시간은 16.97ns로 결함이 없는 T1에서 측정된 도달시간보다 더 빠르다. 결함부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 5.49ns이다. 결함이 건조된 모래로 채워진 경우에 대해 측정된 신호를 Fig. 7에 나타내었다. 결함이 모래로 채워져 있어도 결함부에서 전자기파의 반사가 뚜렷이 나타나는 것을 볼 수 있다. 결함부와 선단부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 각각 5.59ns와 17.14ns이다. 이는 결함이 공기 중에 노출되어 있는 경우의 전자기파

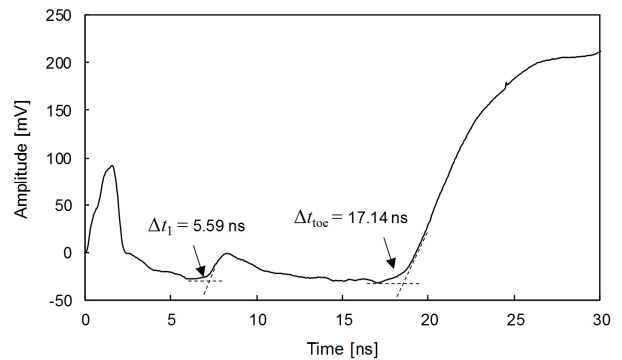


Fig. 7. Measured signal for T2 with dry sandy soils

도달시간보다 조금 느리다.

결함이 함수비 10%, 20%, 30%의 모래로 채워진 경우에 대해 측정된 신호를 Fig. 8(a)~(c)에 각각 나타내었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 결함이 습윤상태의 모래로 채워져 있어도 결함부에서 반사 신호를 획득할 수

있었다. 함수비가 10%의 경우, 결합부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 5.60ns로 결합이 건조된 모래로 채워져 있는 경우보다 더 느리게 나타난다. 함수비 20%와 30%의 경우 결합부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 각각 5.64ns와 5.66ns이다. 함수비가 증가할수록 결합부에서 반사된 전자기파의 도달시간이 조금씩 증가하는 것으로 나타난다. 말뚝 선단부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 결합에 채워진 모래의 함수비가 10%일 경우 17.21ns이며, 함수비가 20%와 30%로 증가할수록 도달시간도 각각 17.34ns와 17.51ns로 증가하는 것으로 나타난다. 또한, 결합이 습윤상태의 모래로 채워져 있으면

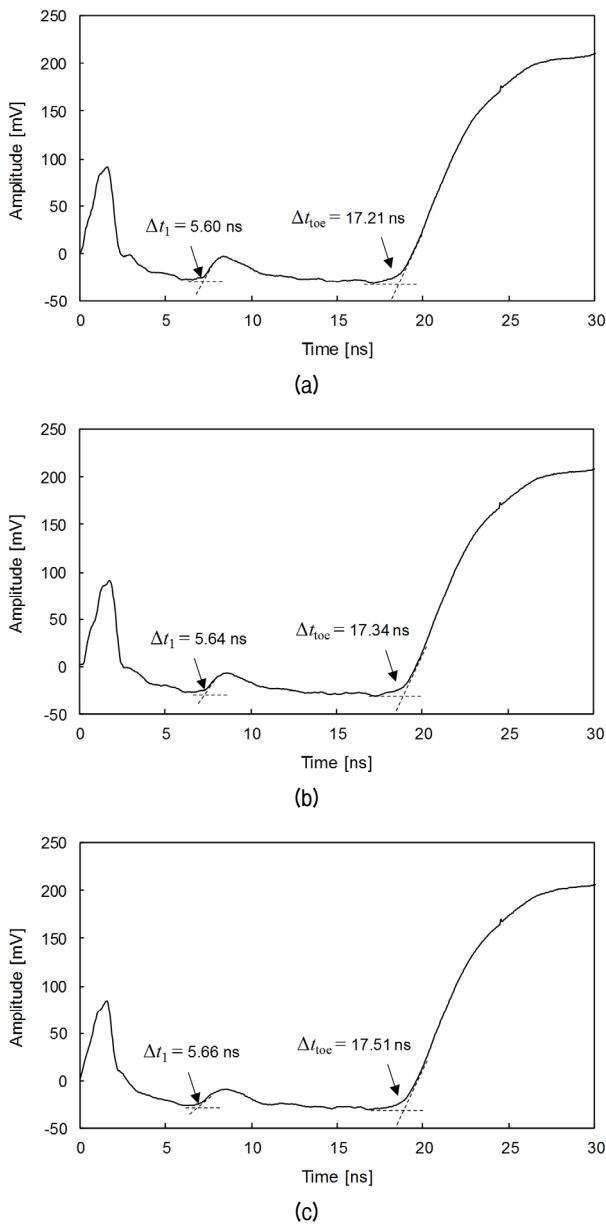


Fig. 8. Measured signals for T2 with wet sandy soils with different water content of (a) 10%; (b) 20%; (c) 30%

건조된 모래로 채워져 있는 경우보다 결합부와 선단부에서 반사되는 전자기파의 도달시간이 더 느리다. 결합부에서 반사된 전자기파 신호의 최대 진폭은 결합부가 공기 중에서 노출되어 있는 경우 16.8mV이며(Fig. 6 참고), 결합이 건조된 모래로 채워지면 최대 진폭은 9.3mV로 더 작게 나타났다(Fig. 7 참고). 결합이 함수비 10%, 20%, 30%인 습윤상태의 모래로 채워지면 최대 진폭은 각각 6.6mV, 2.6mV, 0.5mV로 나타난다(Fig. 8 참고). 결합이 모래로 채워지면 결합부에서 반사되는 전자기파 신호의 최대 진폭이 줄어들며, 모래의 함수비가 증가할수록 반사된 전자기파 신호의 최대 진폭도 줄어드는 것으로 나타난다.

5. 분석 및 토의

5.1 전자기파 속도

말뚝 내에 구성된 전송선로에 전파하는 전자기파가 말뚝 선단부에서 반사되어 돌아오는 속도를 Fig. 2에 나타난 식과 같이 산정하였으며, 산정된 전자기파의 속도를 Fig. 9에 그래프로 나타내었다. 결합이 없는 전송선로 T1에서 측정된 전자기파 신호는 모형 말뚝의 두부와 선단부에서만 반사신호가 나타났다. 선단부에서 반사된 전자기파 신호의 속도는 $1.117 \times 10^8 \text{m/s}$ 로 주철근과 전선으로 구성된 전송선로가 공기 중에 노출되어 있을 때 측정된 전자기파 신호의 속도인 $2.426 \times 10^8 \text{m/s}$ 보다 매우 느리다. 이는 식 (1)에 나타나 있는 것과 같이 전자기파의 속도가 유전율에 반비례하기 때문이다. 전자기파 속도는 전송선로가 모형 말뚝 내에 존재할 경우에는 시멘트 페이스의 유전율에 영향을 받지만, 공기 중에 있을 경우에는 공기의 유전율에 영향을 받는다. 식 (1)에 나

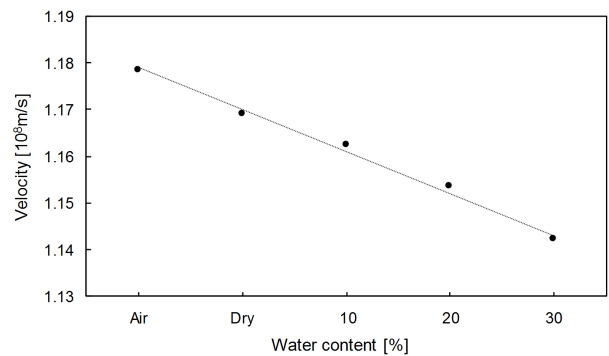


Fig. 9. Variation in velocity of the signal reflected at the toe with different water contents

타나 있는 바와 같이 전자기파의 속도는 매질의 유전율에 반비례한다. 따라서, 유전율이 클수록 전자기파의 속도는 줄어든다. 시멘트 페이스트의 유전율은 공기의 유전율보다 더 크기 때문에 모형 말뚝 내에 있는 전송선로 T1에서 측정된 전자기파 속도가 공기 중의 전송선로 T1보다 더 느리다.

주위에 결함이 있는 전송선로 T2에 대해 전자기파 속도를 산정하였다. 결함이 공기 중에 노출되어 있는 경우의 전자기파 속도는 $1.178 \times 10^8 \text{m/s}$ 로 주위에 결함이 없는 전송선로 T1에 전파하는 전자기파 속도보다 더 빠르다. 이는 공기 중에 노출된 결함부를 전파하는 전자기파의 속도는 공기의 유전율에 영향을 받지만, 시멘트 페이스트로 둘러싸여 있는 결함이 없는 부분에서는 시멘트 페이스트의 유전율에 영향을 받기 때문이다. 결함이 건조된 모래로 채워진 경우의 전자기파 속도는 $1.169 \times 10^8 \text{m/s}$ 로 산정되었다. 이는 결함이 공기 중에 노출되어 있는 경우 산정된 전자기파 속도보다 더 느리다. 건조된 모래의 유전율은 공기의 유전율보다 크다. 전자기파가 결함부에 전파될 시 건조된 모래의 유전율에 영향을 받기 때문에 전자기파의 속도가 더 느리게 나타난 것이다. 결함부가 함수비가 각각 10%, 20%, 30%인 습윤상태의 모래로 채워져 있을 때의 전자기파 속도는 $1.162 \times 10^8 \text{m/s}$, $1.154 \times 10^8 \text{m/s}$, $1.142 \times 10^8 \text{m/s}$ 로 산정되었다. 이는 결함이 건조된 모래로 채워져 있는 경우보다 더 느리며, 결함속에 채워진 모래의 함수비가 증가할수록 전자기파 속도가 감소하는 것으로 나타난다. 물의 유전율은 약 80으로 건조된 모래의 유전율 4.5보다 매우 크다. 이와 같은 이유로 결함 속 모래의 함수비가 증가할수록 유전율도 커지며, 전자기파의 속도도 줄어든다.

5.2 결함부 반사 신호의 진폭

결함부에서 반사된 전자기파 신호의 최대 진폭을 분석하였다. 결함이 공기 중에 노출되어 있을 때의 최대 진폭은 16.8mV로 가장 컸으며, 결함이 건조된 모래로 채워져 있을 경우의 최대 진폭은 9.3mV로 결함이 공기 중에 노출되어 있을 때보다 작게 나타났다. 결함이 습윤상태의 모래로 채워진 경우의 최대 진폭은 결함이 건조된 모래로 채워진 경우보다 더 작게 나타났다. 함수비 10%, 20%, 30%일 때의 최대 진폭은 각각 6.6mV, 2.6mV, 0.5mV이다. 이와 같이 함수비가 증가함에 따라 결함부에서 반사된 전자기파 신호의 최대 진폭도 감소하였다.

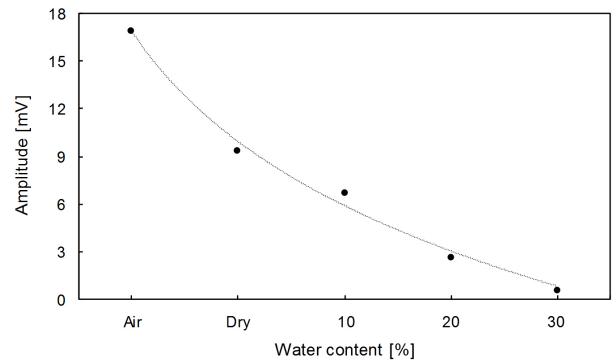


Fig. 10. Variation in peak amplitude of the signal reflected at the defect with different water contents

식 (2)에 나타나 있는 것과 같이 유전율의 허수부는 매질의 전기전도도에 대한 함수이다. 유전율의 허수부는 전기적 에너지 손실에 관여하며, 전기전도도가 클수록 전기적 에너지의 손실이 커진다. 공기의 전기전도도는 $3 \times 10^{-15} \text{S/m} \sim 8 \times 10^{-15} \text{S/m}$ 이며, 건조된 모래의 전기전도도는 약 0.02mS/m 로 공기의 유전율보다 매우 크다(Alberts et al., 1966). 이와 같은 이유로 결함이 공기 중에 노출되어 있을 때보다 결함이 건조된 모래로 채워져 있을 때 결함부에서 반사되는 전자기파의 최대 진폭이 더 작다. 또한, 물의 전기전도도는 83mS/m 로 건조된 모래의 전기전도도보다 매우 크다. 따라서, Fig. 10과 같이 결함 내 모래의 함수비가 증가할수록 결함부에서 반사되는 전자기파 신호의 최대 진폭이 줄어든다.

5.3 결함 위치 산정

Fig. 2에 나타난 식과 같이 모형 말뚝의 결함부에서 반사된 전자기파의 도달시간과 시멘트 페이스트로 둘러싸인 전송선로 T1에 전파하는 전자기파의 속도부터 결함의 위치를 산정하였다. 결함이 공기 중에 노출되어 있는 경우, 결함부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 5.49ns이다. 이로부터 산정된 결함의 위치는 30.7cm이다. 이는 실제 결함의 위치가 모형 말뚝의 두부로부터 30cm 아래에 위치해 있는 것과 거의 같다. 결함부가 건조된 모래로 채워져 있는 경우, 결함부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 5.59ns로 산정된 결함의 위치는 31.2cm이다. 이는 결함부가 공기 중에 노출되어 있는 경우에 대해 산정한 값보다 약 2.2% 더 크다. 결함이 함수비 10%, 20%, 30%인 모래로 채워진 경우, 결함부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 각각 5.60ns, 5.64ns, 5.66ns이다. 이로부터 산정된 결함의 위치는 각각 31.3cm,

31.5cm, 31.6cm이다. 결함부가 건조된 모래나 습윤상태의 모래로 채워진 경우에 대해 산정된 결함의 위치는 결함이 공기 중에 노출되어 있을 때보다 조금씩 더 크게 산정되었다. 이는 결함부에서 반사된 전자기파가 모래를 거쳐 전파하지는 않지만 결함부에 위치한 전송선로 주위에 생성된 전자기장의 영향 범위 내에 모래가 있기 때문으로 사료된다. 하지만, 결함이 건조된 흙이나 습윤상태의 흙으로 채워져 있어도 산정된 결함의 위치는 실제 결함의 위치와 약 5.1% 이내의 오차로 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구는 모래 지반에 설치된 현장타설말뚝의 네킹 결함을 평가하기 위한 전자기파의 적용성을 조사하기 위해 수행되었다. 네킹 결함이 있는 모형 말뚝을 제작하여 실내실험을 수행하였으며, 결함이 공기 중에 노출되어 있는 경우와 건조된 모래와 습윤상태의 모래로 채워져 있는 경우에 대해 실험을 수행하였다. 말뚝 내에 전자기파가 전파할 수 있도록 철근망의 주철근을 따라 전선을 설치하여 전송선로를 구성하였다. 전선은 신호경로로 사용하였으며, 주철근은 귀환경로로 사용하였다. 전자기파의 송수신은 TDR을 이용하였으며, 전자기파의 도달시간과 속도를 이용하여 결함의 위치를 산정하였다. 또한, 결함이 공기에 노출된 경우와 모래로 채워진 경우 네킹 결함에서 반사되는 전자기파 신호의 최대 진폭을 관찰하였다.

실험결과, 모형 말뚝의 두부와 선단부뿐만 아니라 결함부에서 전자기파의 반사 신호를 측정할 수 있었다. 결함부에서 반사된 전자기파 신호의 최대 진폭은 결함이 공기 중에 노출되어 있을 때 가장 컸으며, 결함에 채워진 모래의 함수비가 증가할수록 결함부에서 반사된 전자기파의 최대 진폭이 줄어들었다. 이는 결함 내에 채워진 모래와 물의 전기 전도성이 전자기파 신호의 전기적 에너지를 감소시켰기 때문이다. 하지만, 습윤상태의 모래가 전자기파의 전기적 에너지 손실에 영향을 주었음에도 불구하고, 결함부에서 반사된 전자기파 신호의 진폭은 결함을 구분하기에 충분히 컸다.

전자기파의 도달시간과 속도를 이용하여 산정된 네킹 결함의 위치는 결함이 공기 중에 노출되어 있을 경우에는 실제 네킹 결함의 위치와 약 2.2% 오차로 높은 정확도를 보였다. 네킹 결함이 습윤상태의 흙으로 채워져

있어도 산정된 네킹 결함의 위치와 실제 네킹 결함의 위치는 약 5.1% 이내의 작은 오차를 보였다. 이는 전자기파가 습윤상태의 모래 지반에 설치된 현장타설말뚝의 네킹 결함을 탐지하기에 적용 가능성을 보여준다.

모형 말뚝의 선단부에서 반사된 전자기파의 속도는 네킹 결함이 없는 경우보다 네킹 결함이 발생한 경우에 더 빠르게 나타났다. 하지만, 네킹 결함이 건조된 모래로 채워지면 모형 말뚝 선단에서 반사된 전자기파의 속도가 감소하였다. 또한, 네킹 결함에 채워진 모래의 함수비가 증가할수록 모형 말뚝의 선단부에서 반사된 전자기파의 속도는 감소하였다. 이는 전자기파가 속도 주변 매질의 유전율에 반비례하므로 유전율이 증가할수록 전자기파의 속도는 감소하기 때문이다. 따라서, 현장타설말뚝 내에 구성된 전송선로에 전파하는 전자기파의 속도를 분석할 시에 주변 매질의 유전율을 고려해야 한다. 본 연구의 결과는 전자기파가 모래 지반에 설치된 현장타설말뚝의 결함을 평가하는데 유용하게 적용될 수 있음을 보여준다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2018R1D1A1A02042478)이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Alberts, L., Bohlmann, M., and Meiring, G.L. (1966), The Influence of Low Moisture Content on the Conductivities of a Granular Substance Such as Sand, *British Journal of Applied Physics*, Vol.17, No.7, pp.951-955.
2. Amir, J.M. and Amir, E.I. (2009), Capabilities and Limitations of Cross Hole Ultrasonic Testing of Piles, *International Foundation Congress and Equipment Expo*, Orlando, Florida, GSP 185, pp. 536-543.
3. O'Neill M.W. (1991), Construction Practices and Defects in Drilled Shafts, *Transportation Research Record*, Vol.1331, pp.6-14.
4. Rausche, F. (2004), Non-destructive evaluation of deep foundations, *Proceedings: Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York, OSP-5.
5. White, B., Nagy, M., and Allin, R. (2008), Comparing Cross-hole Sonic Logging and Low-strain Integrity Testing Results, *Proceedings of the Eighth International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles*, Lisbon, Portugal, pp.471-476.
6. Gassman, S.L. and Finno, R.J. (2000), Cutoff Frequencies for Impulse Response Tests of Existing Foundations, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol.14, No.1, pp.11-21.

7. Jung, G., Cho, S.M., Kim, H.J., and Jung, J.H. (2003), Improvements of the Specification for Cross-hole Sonic Logging in the Pile Integrity Test, *Korean Society of Civil Engineers Conference*, Daegu, Korea, pp.4060-4063.
8. Lee, J.S., Song, J.U., Hong, W.T., and Yu, J.D. (2018), Application of Time Domain Reflectometer for Detecting Necking Defects in Bored Piles, *NDT and E International*, Vol.100, pp.132-141.
9. Lee, J.S. and Yu, J.D. (2019), Non-destructive Method for Evaluating Grouted Ratio of Soil Nail Using Electromagnetic Wave, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol.38, No.41, pp.1-15.
10. Liao, S.T. (1994), Nondestructive testing of piles, *Ph.D. Thesis*, University of Texas at Austin, Texas.
11. Ni, S.H., Lehmann, L., Charng J.J., and Lo, K.F. (2006), Low-strain Integrity Testing of Drilled Piles with High Slenderness Ratio, *Computers and Geotechnics*, Vol.33, No.6-7, pp.283-293.
12. Maxwell, J.C. (1873), *A treatise on electricity and magnetism*. Clarendon press, Oxford.
13. Robinson, D.A., Jones, S.B., Wraith, J.M., Or, D., and Friedman, S.P. (2003), A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry, *Vadose Zone Journal*, Vol.2, No.4, pp.444-475.
14. Yu, J.D., Kim, K.H., and Lee, J.S. (2018), Nondestructive Health Monitoring of Soil Nails Using Electromagnetic Waves, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.55, No.1, pp.79-89.
15. Yu, J.D., Lee, J.S., and Yoon, H.K. (2019), Circular Time-domain Reflectometry System for Monitoring Bridge Scour Depth, *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol.38, No.3, pp.312-321.

Received : April 16th, 2020

Revised : May 25th, 2020

Accepted : May 25th, 2020