

현장타설말뚝의 네킹 결함 평가를 위한 전자기파의 적용성 연구

Application of Electromagnetic Wave for Evaluating Necking Defects in Bored Piles

이 종 섭¹ Lee, Jong-Sub
송 정 옥² Song, Jung Wook
유 정 동³ Yu, Jung-Doung

Abstract

The objective of this study is to demonstrate the suitability of electromagnetic waves for evaluating necking defects in bored piles using electromagnetic waves. Experiments are conducted with small-scaled defective model pile with diameter of 150 mm and length of 270 mm. Two necking defects are generated at the upper and lower positions on two different sides of the model pile, respectively. The other two necking defects are generated at the upper and lower positions on the same side of the model pile. Electrical wires are installed alongside the stainless steel wire of a steel cage to configure a two-conductor transmission line. A time-domain reflectometer is used to generate and detect electromagnetic waves. The experimental results show that electromagnetic waves are reflected at the necking defects and the end of the model pile. In addition, calculated defect locations are almost the same as actual defect locations. This study demonstrates that electromagnetic waves can be effective tool for evaluating necking defects in bored piles.

요 지

본 연구의 목적은 현장타설말뚝에 발생한 네킹 결함을 평가하기 위해 전자기파의 적용성을 검증하는데 있다. 본 연구에서는 네킹 결함이 있는 직경 150mm, 길이 270mm의 소형 모형 말뚝에 대해 실험을 수행하였다. 말뚝에 모사된 결함은 총 4개이며, 이 중 두 개의 결함은 모형 말뚝의 서로 다른 면의 상부와 하부에 각각 모사되었으며, 나머지 두 개의 결함은 같은 면의 상부와 하부에 모사되었다. 전선을 철망을 이루고 있는 스테인리스 재질의 철사를 따라 설치하여 두개의 도체로 구성된 전송선로를 구성하였으며, time-domain reflectometer를 이용하여 전자기파를 송·수신하였다. 실험 결과, 모형 말뚝의 결함부와 선단부에서 전자기파의 반사 신호가 나타났다. 측정된 반사 신호로부터 결함의 위치를 산정한 결과, 실제의 결함 위치와 거의 같게 산정되었다. 본 연구의 결과는 전자기파가 현장타설말뚝의 네킹 결함을 평가하는데 있어 유용한 기법이 될 수 있음을 보여준다.

Keywords : Electromagnetic wave, Necking defect, Nondestructive evaluation, Time-domain reflectometer, Pile integrity

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

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

3 정희원, 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 2018년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

현장타설말뚝은 구조물의 하중을 기반으로 전달시키기 위해 지반공학분야에서 널리 사용되고 있다. 기성말뚝은 KS표준에 의해 일정한 품질이 관리되어 공장에서 제작되기 때문에 건전도가 확보된 상태에서 사용되지만, 현장타설말뚝은 지반의 상태나 현장 여건에 따라 말뚝의 품질이 일정하지 않을 수 있다. 시공 장비와 굴착 방법, 시공 관리 방법, 콘크리트 타설 및 관리 방법, 시험관리의 엄격한 정도, 작업자의 숙련도, 지반 조건 및 지하수 조건 등이 말뚝의 품질에 영향을 주는 요인이다(Jung et al., 2004). 현장타설말뚝에 결함이 존재할 경우 지반으로의 하중 전달이 효과적으로 이루어질 수 없기 때문에 시공된 현장타설말뚝에 대한 건전도 평가가 반드시 이루어져야 한다. 또한, 우리나라의 주요 시설물들은 국가의 경제 발전과 함께 1970년도에 비약적으로 증가하였고 현재에는 노후화 단계에 이르고 있어, 노후된 말뚝의 유지·관리를 위한 건전도 평가의 필요성이 대두되고 있다.

최근 전자기파를 이용하여 지반 구조물의 건전도를 평가하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있으며, 적용성에 있어서 우수한 결과물을 제시하고 있다(Lee, 2017; Yu et al., 2018). 따라서, 본 연구에서는 현장타설말뚝에 발생한 네킹 결함(necking defect)을 평가하기 위한 전자기파의 적용성을 연구하기 위하여 네킹 결함이 있는 소형 모형 말뚝을 제작하여 실내실험을 수행하였다. 소형 모형 말뚝 내의 철망(steel cage)과 전선을 이용하여 전자기파가 전파할 수 있는 전송선로(transmission line)를 구성하였으며, 전자기파를 송신하고 수신하기 위하여 time-domain reflectometer(TDR)를 사용하였다. 그리고 측정된 전자기파의 반사 특성을 이용하여 결함의 위치를 산정하였다. 본 논문은 이론적 배경, 실내실험, 분석 및 토의, 그리고 결론으로 구성된다.

2. 이론적 배경

2.1 현장타설 말뚝의 결함 평가 방법 비교

현재 현장타설말뚝에 존재하는 결함을 평가하기 위해 많은 비파괴 기법들이 이용되고 있으며, 이 중 충격 반향 기법(sonic echo method, SE)과 공대공 초음파 검층(crosshole sonic logging, CSL)이 가장 널리 이용되고

있다. 본 연구에서는 기존 기법들의 한계를 보완할 수 있는 전자기파를 이용한 말뚝의 네킹 결함 평가 방법을 제시하고자 한다.

2.1.1 충격 반향 기법

충격 반향 기법은 말뚝 두부에 충격을 가하여 응력파(stress wave)를 발생시키고 결함이나 말뚝 선단에서 반사되어 오는 응력파를 말뚝 두부에 설치한 가속도계나 속도계 등으로 측정하는 기법이다. 충격 반향 기법은 비교적 경제적으로 간단하고 신속하게 말뚝에 발생한 결함을 평가할 수 있다는 장점이 있지만 기법의 적용에 있어 다음과 같은 한계도 존재한다(Liao, 1994; Gassman and Finno, 2000; Rausche, 2004; Ni et al., 2006; White et al., 2008).

- (a) 말뚝 주변의 흙이 말뚝 내에 전파하는 응력파의 에너지를 흡수하기 때문에 말뚝의 길이와 직경 비가 30 이상이면 응력파를 측정하기 어렵다.
- (b) 말뚝 두부에 캡(pile cap)이 설치되었을 경우, 캡과 말뚝과의 임피던스 차이(impedance mismatch)로 인해 응력파의 반사가 발생하고, 이로 인해 적은 에너지의 응력파가 말뚝으로 전달되어 측정에 어려움을 줄 수 있다.
- (c) 현장타설말뚝의 경우 탄성계수를 파악하기 어렵기 때문에 말뚝에 전파하는 응력파의 속도를 가정하게 되어 정확한 결함의 위치를 산정하기 어렵다.
- (d) 결함의 횡방향 길이와 종방향 길이의 비가 0.3보다 작으면 결함을 탐지하기 어렵다.
- (e) 탐지된 결함의 종방향 위치는 파악이 가능하나 횡방향 위치는 파악할 수 없다.
- (f) 다수의 결함이 존재할 경우 응력파의 다중 반사로 인해 결함의 정확한 위치를 파악하기 어렵다.
- (g) 양생이 되지 않은 말뚝에 적용할 수 없다.

2.1.2 공대공 초음파 검층

공대공 초음파 검층은 말뚝 내에 일정한 간격으로 철이나 PVC 재질의 시험관(access tube)을 설치하고 두 개의 시험관에 초음파 발신기와 수신기를 각각 설치하여 말뚝에 발생한 결함을 평가하는 기법이다. 공대공 초음파 검층은 말뚝 길이와 직경 비에 따른 제약이 없고 말뚝의 길이 방향과 수평 방향에 위치한 다수의 결함을 평가할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 다음과 같은 단

점을 지니고 있다(Liao, 1994; Rausche, 2004; White, 2008; Amir, 2009).

- (a) 말뚝 시공 전에 시험관 설치를 위한 별도의 작업을 수행해야 한다.
- (b) 시험관 사이에 존재하는 결함에 대해서만 평가할 수 있다.
- (c) 양생이 되지 않은 말뚝에 적용할 수 없다.
- (d) 결함 크기가 시험관 간격의 약 1/3 또는 말뚝 단면적의 약 10%를 초과 할 때 감지 가능하다.
- (e) 충격 반향 기법에 비해 시간과 비용이 많이 소요된다.

2.1.3 전자기파를 이용한 방법

전송선로를 따라 전파하는 전자기파는 주변 매질에 의한 에너지 감쇠가 탄성파보다 비교적 적기 때문에 적은 에너지로 먼 거리를 전파할 수 있다는 특징이 있다. 말뚝의 철근망은 전자기파가 전파할 수 있는 도체이므로 이를 이용하여 전송선로를 구성한다면 말뚝 내에 전자기파가 전파할 수 있다. 말뚝의 철근망을 이용하여 구성된 전송선로에 전파하는 전자기파를 이용하여 네킹 결함을 평가하는 기법은 다음과 같은 장점을 지니고 있다.

- (a) 말뚝의 길이와 크기에 상관없이 결함을 평가할 수 있다.
- (b) 다수의 결함이 동시에 존재하여도 결함을 평가할 수 있다.
- (c) 결함의 횡방향 및 종방향 위치 정보를 제공할 수 있다.
- (d) 철근망과 전선을 이용하여 전송선로를 구성하기 때문에 매우 경제적이다.
- (e) 시험에 소요되는 시간이 매우 짧으며, 측정에 사용되는 장비의 구성이 매우 간단하다.
- (f) 다수의 결함이 존재하여도 이에 대한 영향 없이 말뚝 선단에서 오는 신호를 측정할 수 있으므로 말뚝의 길이를 산정할 수 있다.
- (g) 양생이 완료되지 않아도 시험을 수행할 수 있다.

2.2 전자기파를 이용한 방법의 원리

2.2.1 전송선로

전송선로는 두 개 이상의 도체로 구성된 회로로 전압과 전류가 전송선로를 따라 파동의 형태(전자기파)로 전파한다. 전송선로 내에 전파하는 전자기파는 전송선로

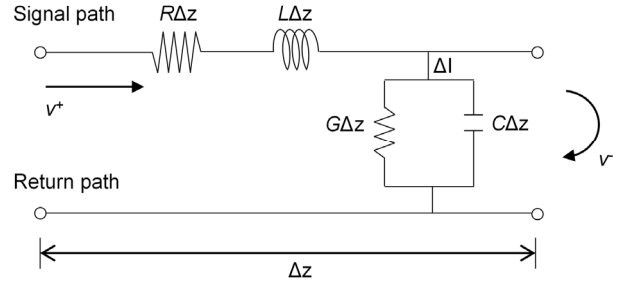


Fig. 1. Ideal circuit model of a two-conductor transmission line

내에 분포하는 매개 변수인 저항(resistance, R), 인덕턴스(inductance, L), 컨덕턴스(conductance, G), 커패시턴스(capacitance, C)에 영향을 받으며, 이상적인 2선식 평행 전송선로(two-conductor transmission line)는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 전송선로에서 저항은 전기 에너지 손실의 가장 중요한 원인이며, 인덕턴스는 전류의 변화를 방해하는 도체의 특성으로 도체의 크기, 도체 사이의 간격, 배열, 재질 등에 영향을 받는다. 컨덕턴스는 저항의 역수로 전송선로에서 발생하는 전기적인 누설 특성을 나타낸다. 커패시턴스는 전송선로 내에 도체 사이에 전하가 모이는 특성으로 도체의 크기, 도체 사이의 간격, 유전율 등에 영향을 받는다.

2.2.2 전송선로에서의 전자기파 전파

키르히호프의 법칙(Kirchhoff's law)을 적용하면 Fig. 1의 전송선로 회로 모델로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다(Heaviside, 2011).

$$V(z,t) = R\Delta z I(z,t) + L\Delta z \frac{\partial I(z,t)}{\partial t} + V(z+\Delta z,t) \quad (1)$$

$$I(z,t) = I(z+\Delta z,t) + G\Delta z V(z+\Delta z,t) + C\Delta z \frac{\partial V(z+\Delta z,t)}{\partial t} \quad (2)$$

여기서, V , I , z , t , 는 각각 전압, 전류, 길이, 시간을 나타낸다. 식 (1)과 (2)에 $\Delta z \rightarrow 0$ 를 적용하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\frac{\partial V(z,t)}{\partial z} = RI(z,t) + L \frac{\partial I(z,t)}{\partial t} \quad (3)$$

$$-\frac{\partial I(z,t)}{\partial z} = GV(z,t) + C \frac{\partial V(z,t)}{\partial t} \quad (4)$$

위 식을 시간 t 에 의존하는 조화 함수로 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(z,t) = \mathbf{Re}[V_s(z)e^{i\omega t}] \quad (5)$$

$$I(z,t) = \mathbf{Re}[I_s(z)e^{i\omega t}] \quad (6)$$

여기서, $V_s(z)$ 와 $I_s(z)$ 는 각각 $V(z,t)$ 와 $I(z,t)$ 의 phasor form이다. 위 식을 식 (3)과 (4)에 대입하면 다음과 같다.

$$-\frac{dV_s}{dz} = (R + j\omega L)I_s \quad (7)$$

$$-\frac{dI_s}{dz} = (G + j\omega C)V_s \quad (8)$$

여기서, j 와 ω 는 각각 허수와 각주파수를 나타낸다. 위의 식을 각각 V_s 와 I_s 로만 이루어진 식으로 나타내기 위해 2차 미분 방정식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^2 V_s}{dz^2} = \gamma^2 V_s = 0 \quad (9)$$

$$\frac{d^2 I_s}{dz^2} = \gamma^2 I_s = 0 \quad (10)$$

여기서, γ 는 주파수의 함수로 나타낸 복소 전파상수 (complex propagation constant)로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (11)$$

여기서, α 와 β 는 각각 감소계수와 위상상수이다. 식 (9)와 (10)의 파동해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z} \quad (12)$$

$$I_s(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z} \quad (13)$$

여기서, $e^{-\gamma z}$ 와 $e^{+\gamma z}$ 를 포함하는 항은 각각 $+z$ 와 $-z$ 방향으로의 파의 진행방향을 나타낸다.

전송선로의 특성 임피던스(characteristic impedance)

Z_0 는 전압파와 전류파의 비이며, 식 (12)와 (13)을 식 (7)과 (8)에 대입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_0 = \frac{V_0^+}{I_0^+} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (14)$$

전자기파의 속도 v_p 는 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Maxwell, 1873).

$$v_p \cong \frac{v_c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (15)$$

여기서, v_c 는 빛의 속도(3×10^8 m/s)이며, ϵ_r 은 매질과 진공의 유전율(electrical permittivity)의 비(ϵ/ϵ_0)로 유전상수(dielectric constant)를 나타낸다.

전자기파가 전송선로를 따라 전파할 때, 전기적인 임피던스 차이로 인해 불연속면에서 반사될 수 있다. 전자기파의 반사 특성은 다음과 같이 반사계수 Γ 로 나타낼 수 있다(Brown et al., 1973).

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{-Z_0 + Z_1}{Z_0 + Z_1} \quad (16)$$

여기서, V_r 와 V_i 는 각각 반사의 입사 전압이며, Z_0 와 Z_1 은 매질 0과 매질 1의 임피던스이다. 만약, $Z_1 > Z_0$ 일 경우 반사된 신호는 양의 극성을 나타내며, $Z_1 < Z_0$ 일 경우에는 음의 값을 나타낸다(Andrews, 1994).

2.3 전자기파를 이용한 방법의 시스템 구성

전자기파를 이용하여 현장타설말뚝에 발생된 네킹 결함을 평가하기 위한 시스템을 Fig. 2와 같이 구성하였다. 전자기파를 송신하고 수신하기 위하여 TDR(HL1101, Hyperlabs)을 사용하였다. TDR을 이용하여 전자기파가 빛의 속도로 전파할 경우 약 400m의 왕복거리를 전파할 수 있는 3 μ s의 펄스폭(pulse width)과 4cm의 분해능을 가질 수 있는 200ps의 상승시간(rise time)을 가지는 step pulse를 송신하였으며, 네킹 결함이나 말뚝 선단과 같은 불연속면에서 반사된 전자기파 신호를 TDR을 이용하여 수신하였다. TDR과 전송선로를 연결하기 위하여 특성 임피던스가 50 Ω 인 동축 케이블(RG-58A/U)을 이용하였으며, 동축 케이블의 내부도체(inner conductor)

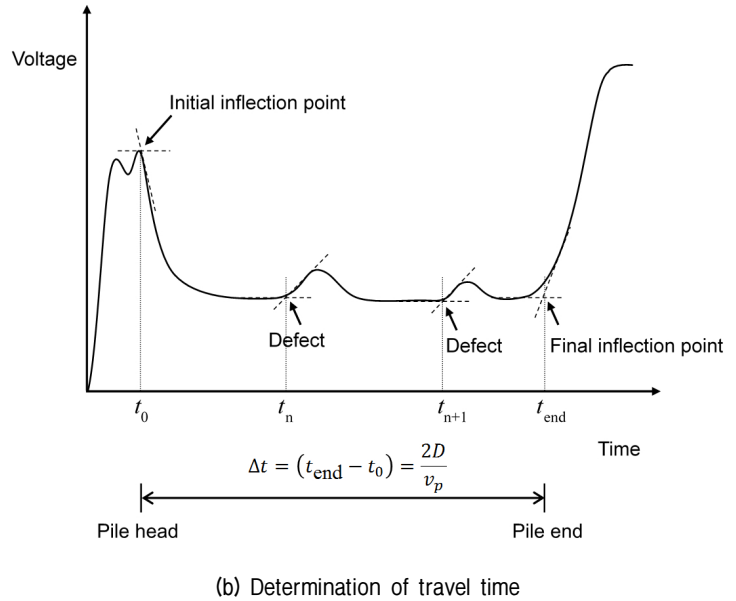
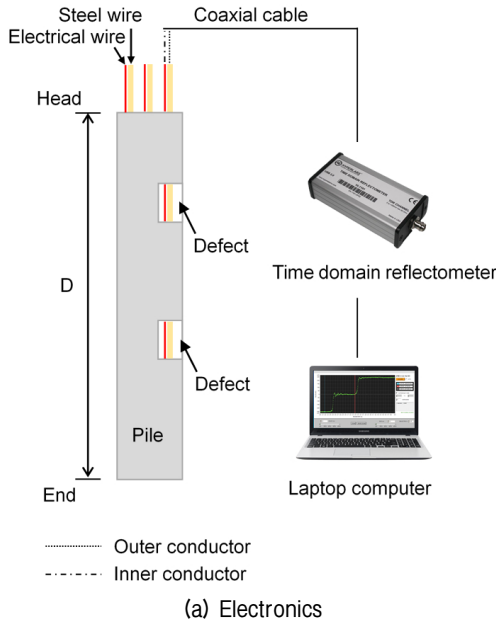


Fig. 2. Measurement system

와 외부도체(outer conductor)는 각각 전선과 주철사에 연결하였다. 전자기파의 도달시간은 선단에서 반사된 전자기파와 두부에서 반사된 전자기파의 시간차($\Delta t = t_{end} - t_0$)로부터 산정하였다.

3. 실내실험

3.1 실내실험 방법

3.1.1 개요

현장타설말뚝의 네킹 결함을 평가하기 위한 전자기파의 적용성에 대한 검증을 하기 위하여 소형 모형 말뚝을 제작하여 실내실험을 수행하였다. 실제 현장타설말뚝의 구조와 유사하게 제작하기 위하여 철사를 이용하여 철근망을 모사한 철망을 제작하였다. 모형 말뚝의 크기와 실험의 용이성을 고려하여 콘크리트 대신 시멘트 페이스트를 이용하여 말뚝을 제작하였다. 모형 말뚝 내에 전자기파가 전파할 수 있도록 철망을 이용하여 전송선로를 구성하였으며, 말뚝의 네킹 결함은 전송선로 주위에 모사되었다. 전자기파의 송신과 수신은 TDR을 이용하였다. TDR을 이용하여 측정된 전자기파의 도달시간과 속도를 이용하여 모형 말뚝에 있는 네킹 결함의 위치와 모형 말뚝의 길이를 산정하였으며, 이를 실제 네킹 결함의 위치와 모형 말뚝의 길이와 비교하였다.

3.1.2 시험체 제작

(1) 말뚝 내 전송선로 구성

일반적으로 현장타설말뚝은 지반에 만들어진 천공홀 내에 철근망을 삽입하고 콘크리트를 타설하여 시공된다. 본 연구에서는 말뚝 내에 2선식 평행 전송선로를 구성하기 위하여 철근망을 모사한 소형 모형 철망과 전선을 이용하였다. Fig. 3과 같이 직경 120mm와 길이 300mm인 철망을 제작하였다. 철망은 철근망의 주철근(main rebar)을 모사한 직경이 2mm인 6개의 스테인리스 재질의 철사(stainless steel wire)와 띠철근(tie rebar)을 모사한 직경이 2mm인 3개의 스테인리스 재질의 띠철사(tie wire)로 구성하였다. 주철사(main steel wire)는 같은 간격으로 원형으로 배열하였고 띠철사는 철망 상부로부터 80mm 간격으로 설치하였다. 철망의 각 접점은 직경이 0.25mm인 나일론 재질의 끈으로 묶어서 고정시켰다. 2선식 평행 전송선로를 구성하기 위하여 전선을 주철사를 따라 나란히 설치하였다. 전선은 단도체(single conductor)와 피복(insulation)으로 구성되었으며, 도체의 직경은 2.1mm로 구리 재질의 연선으로 구성되었다. 피복은 두께가 0.8mm인 PVC 재질이다. 전선과 주철사는 각각 신호경로(signal path)와 귀환경로(return path)로 사용되었다. 철망으로 구성된 전송선로의 특성 임피던스는 75Ω이며, 철망에 전파하는 전자기파의 공기 중 속도는 2.88×10^8 m/s이다.

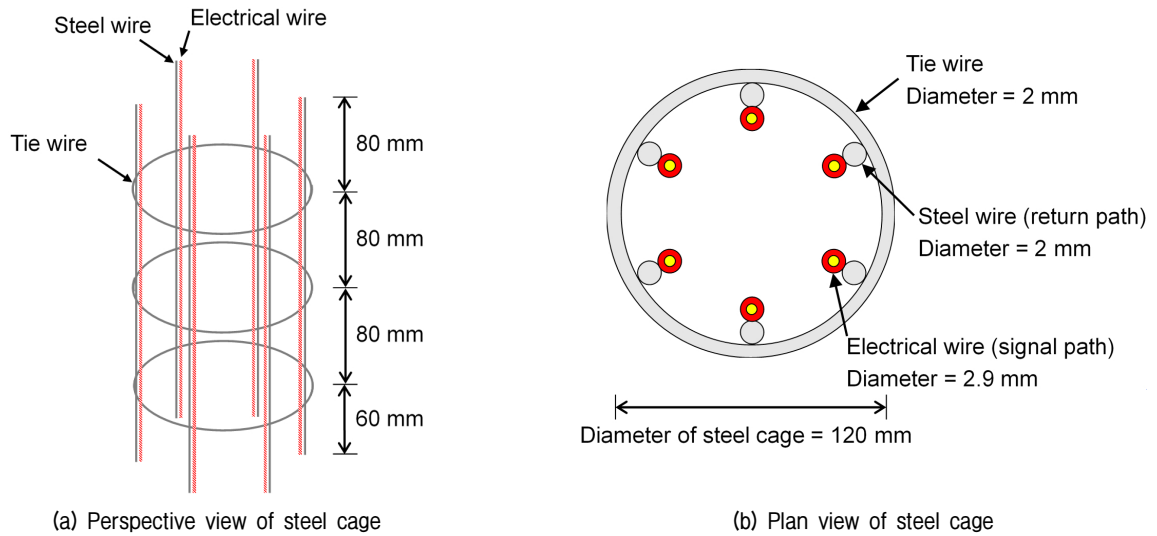


Fig. 3. Configuration of two-conductor transmission line using steel cage

(2) 소형 모형 말뚝 제작

실내실험을 위해 Fig. 4와 같이 직경 150mm, 길이 270mm인 소형 모형 말뚝을 제작하였다. 모형 말뚝 제작을 위해 직경 150mm, 길이 270mm의 PVC 파이프에 Fig. 3에 나타난 전송선로가 구성된 철망을 삽입한 후 시멘트 페이스트(cement paste)를 PVC 파이프 안에 채워 넣었다. 사용된 시멘트 페이스트는 물-시멘트비 50%로 배합되었다. 네킹 결함을 모사하기 위해 30mm×30mm×30mm 크기의 스티로폼을 사용하였다. 네킹 결함은 Fig. 4(a)와 같이 철망 내에 주철사와 전선으로 구성된 6개의 전송선로(T1~T6) 중 T1, T3, T5 주위에 모사하였다.

T1에는 두부로부터 45mm 위치(상부 결함)에 결함을 모사하였고(Fig. 4(b)), T3에는 두부로부터 180mm 위치(하부 결함)에 결함을 모사하였다(Fig. 4(c)). T5에는 두부로부터 45mm와 180mm 위치(상부와 하부 결함)에 결함을 모사하였다(Fig. 4(d)). 모형 말뚝은 30일 동안 양생하였으며, 양생 후 측정된 시멘트 페이스트의 유전상수는 5.5이다. 양생 후에 PVC 파이프와 스티로폼은 제거되었다. 모형 말뚝은 Fig. 5와 같이 270mm×270mm×270mm 크기의 아크릴 토조에 설치되었으며, 토조 속의 흙은 유전상수가 10.76인 실트질 모래를 사용하였다. 결함은 흙으로 채워져 있지 않도록 구성하였다.

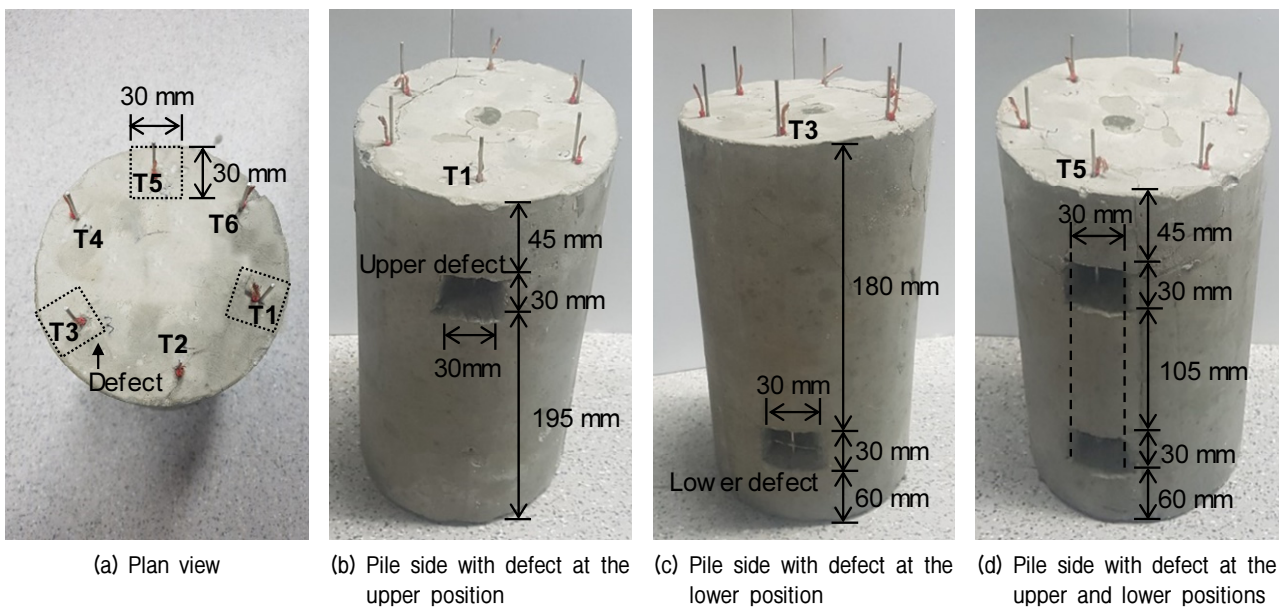


Fig. 4. Small-scale model pile



Fig. 5. Small-scale model pile embedded in soil

3.2 실험결과

제작된 모형 말뚝에 내에 구성한 전송선로에서 측정된 전자기파 신호를 Fig. 6에 나타내었다. 주위에 결함이 없는 전송선로 T2에서 측정된 신호를 보면 모형말뚝의 선단부에서 전자기파의 반사 신호가 나타나는 것을 볼 수 있다(Fig. 6(a)). 선단부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 4.38ns이다. 전송선로 T1에서 측정된 전자기

파 신호를 보면 상부의 결함부에서 전자기파의 반사 신호가 나타나는 것을 볼 수 있다(Fig. 6(b)). 상부 결함부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 0.68ns이다. 선단부에서도 전자기파의 반사 신호를 측정할 수 있었으며, 전자기파의 도달시간은 T2에서 측정된 도달시간보다 빠른 4.20ns이다. 하부에 결함이 있는 전송선로 T3에서 측정된 전자기파 신호를 보면 하부 결함부에서 전자기파가 반사되는 것을 볼 수 있다(Fig. 6(c)). 하부 결함부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 2.77ns이며, 선단부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 4.19ns이다. T3의 선단부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 상부에 결함이 있는 T1에서 측정된 선단부에서 반사된 전자기파의 도달시간과 거의 같고, 결함이 없는 T2에서 측정된 선단부에서 반사된 전자기파의 도달시간보다 빠르다. Fig. 6(d)와 같이 전송선로 T5에서 측정된 신호의 경우, 상부와 하부의 결함에서 모두 전자기파가 반사된 것을 볼 수 있다. 상부와 하부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 각각 0.66ns와 2.68ns이다. T5의 상부 결함에서 반사된 전자기파의 도달시간은 T1의 상부 결함에서 반사된 전자기파의 도달시간과 거의 같다. 하지만, T5의 하부 결함에서 반사된 전자기파의 도달시간은 T3의

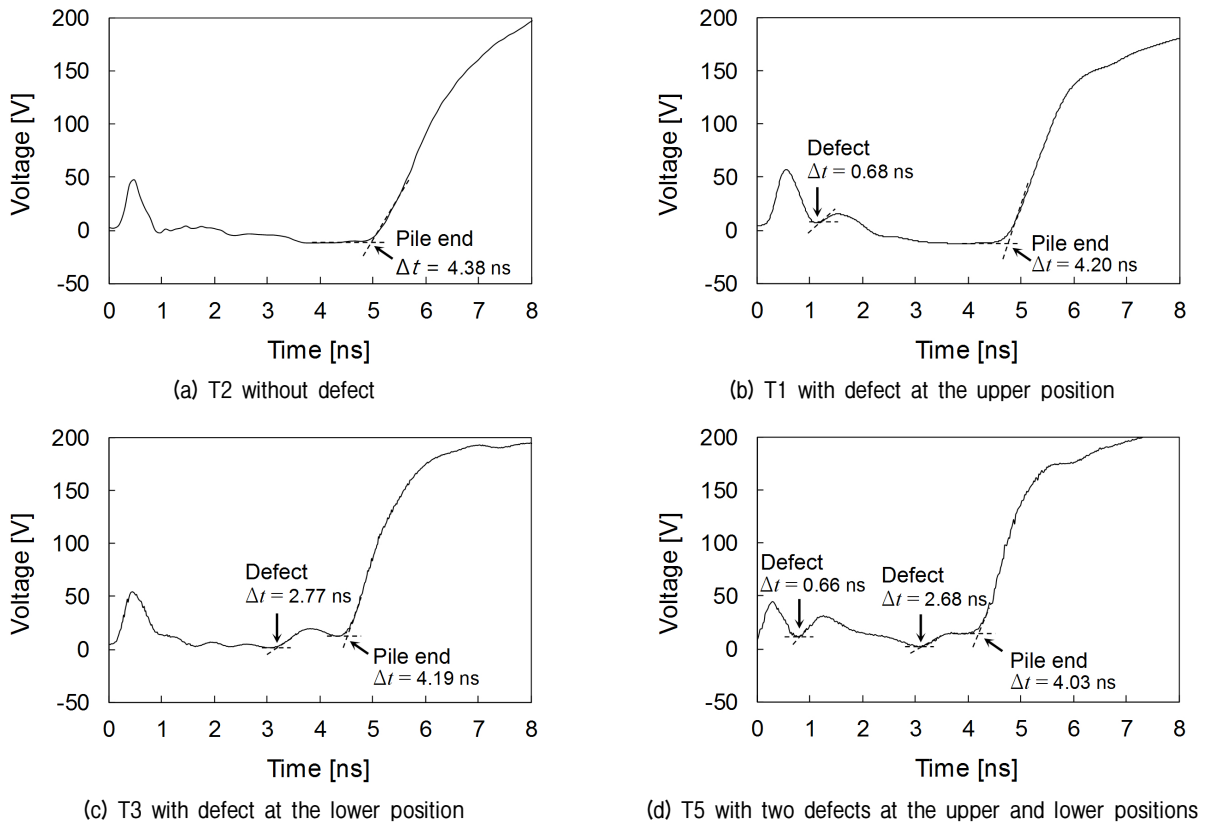


Fig. 6. Measured signals

하부 결합에서 반사된 전자기파의 도달시간보다 빠르게 나타난다. T5에서 측정된 선단부에서 반사된 전자기파의 도달시간은 T1과 T3보다 빠른 4.03ns이다.

4. 분석 및 토의

결합이 없는 전송선로 T2에서 측정된 전자기파 신호를 보면 말뚝의 선단에서만 전자기파의 반사가 나타나는 것을 볼 수 있다. T2의 선단부에서 반사된 전자기파의 도달시간으로부터 산정된 전자기파의 속도는 1.23×10^8 m/s이다. 이는 공기 중 전송선로에 전파하는 전자기파의 속도 2.88×10^8 m/s보다 매우 느리다. 전자기파의 속도는 식 (15)에 나타낸 것과 같이 주변 매질의 유전상수에 영향을 받는다. 본 연구에서는 철망에 전송선로를 구성하였고, 철망은 시멘트 페이스트 안에 설치되어 있다. 실험에 사용한 시멘트 페이스트의 유전상수는 5.5로 공기의 유전상수 1보다 크다. 이와 같은 이유로 시멘트 페이스트로 둘러싸여 있는 T2(모형 말뚝 내에 구성된 전송선로)에 전파하는 전자기파의 속도는 공기 중에 있는 전송선로에 전파하는 전자기파의 속도보다 느리다. 측정된 전자기파의 속도와 도달시간으로부터 결합이 시작하는 위치를 산정하였다. 두부에 노출된 전송선로와 결합부에 노출된 전송선로에 전파하는 전자기파의 속도는 공기 중 전송선로에 전파하는 전자기파의 속도 (2.88×10^8 m/s)를 반영하였고, 결합이 없는 부분에 전파하는 전자기파의 속도는 결합이 없이 시멘트 페이스트로 둘러싸여 있는 전송선로 T2에 전파하는 전자기파의 속도 (1.23×10^8 m/s)를 반영하였다. 상부에 결합이 있는 경우, 전송선로 T1에서 측정된 상부 결합에서 반사된 전자기파의 도달시간은 0.68ns이며, 결합의 위치는 두부로부터 44mm 위치로 산정되었다. 이는 실제 결합의 위치 45mm와 거의 같다. T2에 전파하는 전자기파의 속도 (1.23×10^8 m/s)로부터 T1에서 산정된 말뚝 길이는 259mm로 실제 길이인 270mm보다 짧게 산정되었다. 하부에 결합이 있는 경우, 전송선로 T3에서 측정된 하부 결합에서 반사된 전자기파의 도달시간은 2.77ns이다. 이로부터 산정된 하부 결합의 위치는 두부로부터 181mm로 실제 결합의 위치인 180mm와 거의 같다. T3에서 산정된 말뚝 길이는 258mm로 실제 길이인 270mm보다 짧게 산정되었다. 상부와 하부에 모두 결합이 있는 경우, 전송선로 T5에서 측정된 상부와 하부 결합에서 측정된 전자기파의 도달시간은 각각 0.66ns와 2.68ns이며, 산정

된 결합의 위치는 두부로부터 43mm와 175mm이다. 산정된 상부 결합의 위치는 실제 위치인 45mm와 거의 같게 산정되었지만, 하부 결합의 경우 실제 위치인 180mm보다 다소 작게 산정되었다. 또한, T5에서 산정된 말뚝 길이는 248mm로 실제 길이인 270mm보다 짧게 산정되었다. 이러한 차이는 상부 결합의 영향으로 전자기파의 속도가 빨라졌기 때문이다. 이는 T1과 T5의 상부 결합에서 반사된 전자기파의 도달시간이 거의 같은 반면, T3과 T5의 하부 결합에서 반사된 전자기파의 도달시간이 차이를 보이는 것을 보고도 알 수 있다. 전송선로 T5에 대해 상부 결합의 영향을 고려하여 하부 결합 위치를 다시 산정하였으며, 산정된 결합의 위치는 178mm로 실제 위치(180mm)와 거의 같게 산정되었다. 전송선로 T1, T3, T5의 선단에서 반사된 전자기파의 도달시간으로부터 산정된 전자기파의 속도는 각각 1.28×10^8 m/s, 1.29×10^8 m/s, 1.34×10^8 m/s로 결합이 없는 전송선로 T2에서 산정된 전자기파의 속도 (1.23×10^8 m/s)보다 빠르다. 이는 결합부가 공기 중에 노출되어 있기 때문에 결합부에서는 전자기파가 공기 중 전송선로에서 전파하는 전자기파의 속도 (2.88×10^8 m/s)로 전파하고, 결합이 없는 부분에서는 시멘트 페이스트에 둘러싸여 있는 전송선로에 전파하는 전자기파의 속도 (1.23×10^8 m/s)로 전파하기 때문이다. 이와 같은 이유로 결합이 한 개만 있는 T1과 T3의 경우 전자기파의 속도가 거의 비슷하게 나타나는 반면, 결합이 두 개 존재하는 T5에 전파하는 전자기파의 속도는 T1과 T3보다 빠르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 하지만, 말뚝에 네킹 결합이 발생 할 경우 결합 속에 흠이 있을 수 있다. 이러한 경우 결합에 전파하는 전자기파의 속도는 흠의 유전상수에 영향을 받는다. 만약, 흠의 유전상수가 말뚝보다 크다면 결합이 있는 말뚝을 전파하는 전자기파의 속도는 감소할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 네킹 결합을 평가하기 위한 전자기파의 적용성 검토를 위해 네킹 결합이 있는 소형 모형 말뚝을 제작하여 실내실험을 수행하였다. 네킹 결합은 총 4개로 모형 말뚝의 서로 다른 측면에 모사되었다. 두 개의 네킹 결합은 모형 말뚝의 서로 다른 측면의 상부와 하부에 각각 한 개씩 모사되었으며, 나머지 두 개의 네킹 결합은 모형 말뚝의 같은 측면의 상부와 하부에 모사되었다. 말뚝 내에 전자기파가 전파할 수 있도록 철망을

이용하여 전송선로를 구성하였으며, 철망을 구성하는 철사를 귀환경로 사용하였고, 주철사를 따라 설치된 전선을 신호경로로 사용하였다. 전자기파를 송신하고 수신하기 위해 TDR을 이용하였으며, 측정된 전자기파의 속도와 도달시간으로부터 결함의 위치를 산정하였다.

- (1) 실험결과, 모형 말뚝의 결함부와 선단부에서 전자기파의 반사 신호를 측정할 수 있었다. 또한, 두 개의 결함이 동시에 존재하여도 전자기파의 반사 신호를 명확하게 측정할 수 있었다. 이는 전자기파를 이용한 말뚝의 네킹 결함 평가 기법이 말뚝 내에 다수의 결함이 존재하여 결함의 종방향과 횡방향 위치 정보를 모두 제공할 수 있음을 보여준다.
- (2) 측정된 전자기파의 도달시간과 속도로부터 결함의 위치를 산정하였다. 그 결과, 모형 말뚝의 측면에 결함이 상부나 하부에 한 개만 존재하는 경우 실제 결함의 위치와 거의 같게 산정되었다. 하지만, 모형 말뚝의 측면에 결함이 상부와 하부에 동시에 존재하는 경우 상부 결함의 영향으로 실제 위치와 다소 차이가 발생하였다. 이는 상부 결함의 영향으로 전자기파의 속도가 빨라졌기 때문이다. 따라서, 측정하고자 하는 전송선로 주위에 다수의 결함이 존재할 경우, 결함이 전자기파의 속도에 주는 영향을 고려해야 한다.
- (3) 말뚝 내에 전파하는 전자기파의 속도가 결함의 유무에 따라 달라지는 것은 전자기파의 속도가 주변 매질의 유전상수에 영향을 받기 때문이다. 이와 같은 이유로 공기 중의 전송선로에 전파하는 전자기파의 속도가 시멘트 페이스트로 만들어진 모형 말뚝 내에 있는 전송선로에 전파하는 전자기파의 속도보다 빠르게 나타났다. 또한, 결함이 있는 경우에 결함이 없는 경우보다 전자기파의 속도가 더 빠르게 나타났다. 이처럼 전자기파는 주변 매질의 특성에 따라 전파 특성이 달라질 수 있다. 따라서, 말뚝의 재원과 주변 흙의 물성, 그리고 결함 내에 흙이 존재하는지의 여부 등에 대한 추가 연구는 전자기파를 이용한 말뚝의 결함 평가 기법을 현장에 적용하는데 있어 매우 중요한 자료가 될 것으로 사료된다.

본 연구의 결과는 전자기파가 말뚝의 네킹 결함을 평가하는데 좋은 기법이 될 수 있음을 보여준다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2017R1D1A1B03030814)이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Andrews, J.R. (1994), Time domain reflectometry, *Proceedings of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications*, Evanston, Illinois, pp. 4-13.
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. Brown, R.G., Sharpe, R.A., Hughes, W.L., and Post, R.E. (1973), Lines, Waves, and Antennas, *John Wiley & Sons*, New York.
4. 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.
5. Heaviside, O. (2011), Electrical papers, *Cambridge University Press*, New York.
6. Jung, S.J., Jung, G.J., Kwon, O.S., and Kim, M.M. (2004), Effect of defects on axial resistant behavior drilled shaft, *Civil Expo 2004*, Korean Society of Civil Engineers, Pyeongchang, Korea, pp. 2384-2389.
7. Lee, J.S. (2017), Geo-characterization using waves - principle to application, *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, Korea, pp.245-264.
8. Liao. (1994), Nondestructive testing of piles, *Ph.D. Thesis*, University of Texas at Austin, Texas.
9. Ni, S.H., Lehmann, L., Chang 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.
10. Maxwell, J.C. (1873), A treatise on electricity and magnetism. *Clarendon press*, Oxford.
11. Rausche, F. (2004), Non-destructive evaluation of deep foundations, *Proceedings: Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York, OSP-5.
12. 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.
13. Yu, J.D., Kim, K.H., and Lee, J.S. (2018), "Non-destructive Health Monitoring of Soil Nails Using Electromagnetic Waves", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.55, No.1, pp.79-89.

Received : March 22nd, 2018

Revised : April 9th, 2018

Accepted : April 11th, 2018