TDR을 이용한 세굴 모니터링 시스템 개발을 위한 기초 연구

A Study on the Development of Scour Monitoring System Using TDR

유정동* · 이종섭** · 배명호*** · 박정희**** · 윤형구*****

Yu, Jung-Doung*, Lee, Jong-Sub**, Bae, Myeong-Ho***, Park, Junghee****, and Yoon, Hyung-Koo*****

Abstract

Scour is a critical factor that affects the stability of a bridge. This paper presents a fundamental study on the development of a Time Domain Reflectometry (TDR) system for monitoring scour around a bridge pier. The laboratory experiments were conducted using a small-scale model pier with inner and outer diameters of 70 and 75 mm, respectively and a height of 200 mm. The model pier was embedded in a soil tank. Electrodes were installed in a circular array alongside the model pier to configure two-conductor transmission lines. Electromagnetic waves were generated and detected using the TDR. The experimental results indicate that the round-trip travel time of the electromagnetic waves increase with an increase in the scour depth. In addition, the estimated scour depth is approximately the same as the actual depth. This study demonstrates that the TDR is an effective tool for monitoring scour.

Key words : Bridge, Electromagnetic Wave, Scour, Time Domain Reflectometry

요 지

세굴은 교량의 안정성에 있어 심각한 영향을 줄 수 있다. 본 연구는 TDR을 이용하여 교량에 발생한 세굴을 모니터링하기 위한 기초 연구로 수행되었다. 실내실험을 위해 내·외경이 각각 70 mm와 75 mm이고 길이가 200 mm인 소형 모형 교각을 제작하여 토조에 설치하였으며, 모형 교각에 32개의 전극을 약 7.36 mm의 간격으로 원형으로 배열하여 2선식 전송선로를 구성하였다. 전자기파를 송·수신하기 위하여 TDR을 이용하였다. 실험 결과, 세굴의 깊이가 깊어질수록 전자기파의 도달시간이 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 실제 세굴 깊이와 실험을 통해 측정된 세굴 깊이가 유사하게 산정되었다. 본 연구의 결과는 TDR이 세굴을 모니터링하는데 좋은 기법이 될 수 있음을 보여준다.

핵심용어 : 교량, 전자기파, 세굴, 시간영역반사법

1. 서 론

우리나라는 국토 면적의 70%가 산악 지형으로 이루어져 있다. 이와 같은 이유로 큰 규모의 하천보다는 중·소규모의 하천들이 많이 분포되어 있다. 이러한 중·소규모의 하천들은 하천 경사가 상대적으로 급하고 유속이 매우 빠르며,

특히 집중 호우나 홍수가 발생할 때에는 흐름의 방향이 평상시와 크게 달라지기 때문에 세굴에 대한 위험에 크게 노출되어 있다. 또한 매년 발생하는 태풍과 집중호우는 교량의 안정성을 위협하고 있다. 실제로 1964년에서 2008년까지 7,534개의 도로교가 홍수가 발생하는 시기에 세굴로 인해 손상되었고 이는 연간 약 170개의 교량이 세굴로 피해를

*정회원, 고려대학교 방재과학연구소 연구교수(E-mail: noorung2@korea.ac.kr)

Member, Research Professor, Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea University

**정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

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

***(주)경도기술, 대표이사

Chief Executive Officer, Kyeongdo Engineering

****박사후 연구원, 지구과학공학과, 킹 압둘라 과학기술대학교

Postdoctoral fellow, Earth Science and Engineering, Building 5, King Abdullah University of Science and Technology

*****교신저자, 정회원, 대전대학교 건설안전방재공학과 부교수(Tel: +82-42-280-2578, Fax: +82-42-280-2576, E-mail: hyungkoo@dju.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Construction and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University

입고 있는 수준이다(Park and Jang, 2010). 특히, 1987년에는 태풍 셀마와 연이은 집중호우로 255개의 교량이 세굴로 인해 피해를 입었다. 미국의 경우 1999년 기준 600,000개의 교량 중 1,000개의 교량이 손상되었으며, 이 가운데 60%가 세굴로 인한 붕괴였다. 이는 지진으로 인해 손상된 교량(2%)보다 훨씬 큰 수치이다(Briaud et al., 1999; Shirole and Holt, 1991). 또한 2003년도 기준으로 약 485,000개의 교량 가운데 62.4%가 세굴에 의해 손상될 위험이 있으며, 3.5%인 17,000개의 교량이 100년 빈도의 홍수가 발생할 때 세굴에 의해 붕괴될 위험이 있다고 보고 되었다(Pagan-Ortiz, 1998). 교량의 손상 또는 붕괴는 막대한 경제적인 손실 뿐만 아니라 엄청난 인명 피해까지 동반할 수 있는 재해이다. 따라서, 교량의 손상과 붕괴를 예방하고 적절한 시점에 유지·보수를 위한 계획을 수립하고 시행하기 위해서는 세굴을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 기술의 개발이 반드시 필요하다.

현재까지 국·내외에서는 세굴을 모니터링하는 기술을 개발하기 위한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 국내에서는 2000년에 서울시 도시기반시설본부 수중구조물탐이 수중 카메라를 이용하여 세굴의 발생 여부를 조사하였으며, 2010년에는 수중에 150kg의 낙하추를 떨어뜨려 평상시 하천 바닥의 높이와 비교함으로써 세굴 여부를 추정하는 조사를 수행하였다. Park et al. (2005)과 Kim and Paik (2006)은 GPR을 이용하여 교각 주변에 발생한 세굴을 탐사하였다. Joo et al. (2009)는 정밀온도센서를 이용하여 대기, 수중, 그리고 지중의 온도를 비교함으로써 수면 및 수중 지면의 위치를 추정하여 세굴을 조사하는 연구를 수행하였다. Park and Jang (2010)은 세굴을 모니터링하기 위하여 가속도계 센서를 이용하여 교각의 고유진동수를 측정하였다. 최근에는 해상모노파일에 발생한 세굴을 모니터링하기 위하여 탄성파 속도, 고유진동수, 전기비저항을 이용한 연구도 수행되었다(Park, 2014). 하지만, 수중 카메라나 낙하추를 이용한 방법은 조사자의 주관적인 판단에 의존하기 때문에 객관성이 떨어지며, 실시간으로 모니터링하기가 불가능하다. GPR이나 탄성파를 이용한 기법들은 수치화된 데이터로부터 객관적인 평가가 가능하나 무인으로 실시간 모니터링하기에는 더 많은 연구가 필요한 실정이다. 이를 보완하기 위해 국외에서는 TDR (Time domain reflectometry)을 이용하여 세굴을 모니터링하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다(Yankielun and Zabilansky, 1999; Yu and Yu, 2009; Yu and Yu, 2011; Fisher et al., 2013; Gao and Yu, 2015; Lin et al., 2017). TDR은 장비가 간단하고 수중 지반에 매설할 수 있기 때문에 무인으로 실시간 모니터링이 가능하다. 하지만, 지금까지 TDR을 이용하여 연구된 세굴 모니터링 기법들은 교각에 국부적으로 발생한 세굴에 대해서만 평가가 가능하고, 교각 전면에 대해서는 평가할 수 없다는 단점이 있다. 세굴은 많은 구조적, 환경적 요인에 의해 발생하기 때문에 세굴의 발생 위치와 세굴 깊이를 추정하기 쉽지 않다. 따라서,

교각 전면에 발생하는 세굴의 위치와 깊이를 측정할 수 있는 새로운 TDR 시스템의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 실내실험을 통해 교각의 전면에 발생하는 세굴을 모니터링할 수 있는 TDR 시스템의 개발을 위한 기초 연구를 수행하였다. 소형 모형 교각의 형상에 따라 원형으로 전극을 설치하였으며, 설치된 전극으로 2선식 전송선로를 구성하였다. 모형 교각 주위에 인공적으로 형성된 세굴을 모니터링 하기 위해서 TDR을 이용하여 전자기파를 송·수신하였으며, 세굴 깊이와 전자기파의 상관관계를 분석하였다. 본 논문은 전송선로를 구성하기 위한 이론적 배경, 실내실험, 분석 및 토의, 그리고 요약 및 결론으로 구성된다.

2. 이론적 배경

2.1 전송선로

시간영역반사법(Time Domain Reflectometry, TDR)은 반사된 전자기파의 파형을 관찰하여 전자기파가 전파하는 선로의 특성을 결정하는 데 사용되는 측정 기술이다. TDR 장비(Time Domain Reflectometer)는 계단파(Step Pulse)나 정현파(Sinusoidal Pulse)를 발생시키며, 전기적인 임피던스(Electrical Impedance)가 변화하는 지점에서 반사되는 신호를 측정한다. 전송선로는 전원과 부하를 연결하는 두 가닥 또는 그 이상의 평행한 도체로 이루어져 있으며, 두 도체 사이는 유전체에 의해 격리되어 있다. 전송선로에서 신호가 전원으로부터 부하까지 전달되는 선로를 신호경로(Signal path)라고 하고, 부하에서 전원으로 되돌아오는 선로를 귀환경로(Return path)라고 한다. 본 연구에서는 두 개의 평행한 도체로 구성된 2선식 전송선로에 전파하는 전자기파를 TDR 장비를 이용하여 측정하였다. 이상적인 2선식 전송선로의 회로도 Fig. 1과 같다.

여기서 z 와 t 는 각각 길이와 시간을 나타내며, V 와 I 는 각각 단위 길이당 전압과 전류이다. R 은 단위 길이당 저항(Resistance)으로 도전율, 단면적, 연선 방법, 온도에 따라 결정되며, 전기적 에너지 손실의 중요한 원인이다. L 은 단위 길이당 인덕턴스(Inductance)이다. 전류가 변화하면 이에 따라 도체 주변의 자계도 변하게 되는데 주파수가 높아질수록 주변 자계의 변화 속도가 따라가지 못해 전류의 흐름을 방해하게 된다. 전송선로에서의 인덕턴스는 이러한 성질을 나타내는 파라미터이다. G 는 단위 길이당 컨덕턴스(Conductance)로 누설 전류와 관련이 있다. 만약 도체의 표면이 절연체로 피복되어 있다면 도체 주변에 있는 전도성이 큰 물질에 대한 전기적인 누설이 줄어든다. C 는 단위 길이당 커패시턴스(Capacitance)로 두 도체 사이에 유전체가 존재할 경우 전하를 축적시킬 수 있는 능력의 정도를 나타낸다. 주파수가 높을수록 같은 커패시턴스에서 신호의 손실 없이 신호를 더 많은 신호를 전송할 수 있다.

Fig. 1. Ideal Circuit Model of Two-Conductor Transmission Line

2.2 전송선로에서의 전자기파의 전파 특성

Fig. 1에 나타난 전송선로 회로에 대하여 키르히호프의 전압 법칙과 전류 법칙(Kirchhoff's Voltage and Current Law)을 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

Eqs. (1)과 (2)에 $\Delta z \rightarrow 0$ 의 극한을 취하면 다음과 같다.

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

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

Eqs. (3)과 (4)를 시간 조화함수로 가정한 후 페이저 (phasor) 표현식으로 나타내면 다음과 같다.

$$-\frac{dV_s}{dz} = (R + j\omega L)I_s \quad (5)$$

$$-\frac{dI_s}{dz} = (G + j\omega C)V_s \quad (6)$$

여기서 V_s 와 I_s 는 $V(z, t)$ 와 $I(z, t)$ 의 페이저 표현이다. Eqs. (5)와 (6)을 하나의 식으로 표현해 주기 위해 Eq. (5)에서 V_s 의 2차 미분을 취하고 Eq. (6)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{d^2 V_s}{dz^2} - \gamma^2 V_s = 0 \quad (7)$$

마찬가지로 Eqs. (5)와 (6)을 I_s 에 관한 하나의 식으로 표현해 주기 위해 Eq. (6)에서 I_s 의 2차 미분을 취하고 Eq.

(5)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{d^2 I_s}{dz^2} - \gamma^2 I_s = 0 \quad (8)$$

Eqs. (7)과 (8)은 각각 전압과 전류에 관한 파동방정식이다. 여기서 γ 는 전파상수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (9)$$

여기서 α 는 감쇠상수(dB/m), β 는 위상상수(radians/m)를 나타낸다. 선형 동차 미분방정식 Eqs. (7)과 (8)의 해는 각각 Eqs. (10), (11)과 같다.

$$V_s(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z} \quad (10)$$

$$I_s(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z} \quad (11)$$

여기서, V_0^+ , V_0^- , I_0^+ , I_0^- 는 파의 진폭이고, +와 -는 각각 +z와, -z 방향으로 진행하는 파의 진행 방향을 나타낸다.

전송선로의 특성 임피던스(Z_0 , Characteristic Impedance)는 전송선로의 임의의 점에서 +z 방향으로 진행하는 전압파와 전류파의 비로 그 단위는 Ω 이며, Eq. (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_0 = \frac{V_0^+}{I_0^+} = -\frac{V_0^-}{I_0^-} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (12)$$

전송선로의 특성 임피던스가 일정하다는 것은 입력의 크기와 상관없이 전압파와 전류파의 비가 항상 일정하다는 것을 의미한다. 특성 임피던스는 전송선로의 매질과 물리적 구조에 의해 결정되므로 전송선의 반사 특성을 나타내는 중요한 지표이다. 전송선로의 임의의 점에서의 전압파의 반사계수(Γ , Reflection Coefficient)는 입사 전압파와 반사 전압파의 비로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (13)$$

여기서, V_i 와 V_r 는 각각 입사 전압과 반사 전압을 나타낸다. Z_0 와 Z_1 은 각각 특성 임피던스 또는 매질 0에서의 임피던스와 매질 1에서의 임피던스를 나타낸다. 만약 $Z_1 > Z_0$ 일 경우, 반사계수는 양의 값을 나타내고, $Z_1 < Z_0$ 일 경우에는 음의 값을 나타낸다. $Z_1 = Z_0$ 이라면, 전송선로에서 파의 반사는 발생하지 않는다.

전자기파의 속도(v_p)는 Eq. (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_p \cong \frac{v_c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (14)$$

여기서, v_c 는 진공에서의 광속(3×10^8 m/s)이며, ϵ_r 은 매질의 유전율(permittivity)과 진공의 유전율의 비로 비유전율(relative permittivity) 또는 유전상수(dielectric constant)라고 한다.

3. 실내실험

3.1 개요

TDR을 이용한 세굴 모니터링 시스템 개발을 위하여 실내 실험을 수행하였다. 소형 모형 교각을 제작하여 실내실험을 수행하였으며, 인공적인 세굴이 있는 토조에 모형 교각을 설치하였다. 모형 교각의 형상에 따라 모형 교각과 나란히 전극을 설치하여 전 방향에서 발생하는 세굴을 모니터링 할 수 있도록 하였다. 전자기파의 송·수신을 위하여 TDR 장비를 사용하였으며, 측정된 전자기파 신호로부터 세굴의 발생 깊이를 산정하였다.

3.2 전송선로의 구성

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 소형 모형 교각에 전극을 설치하여 전송선로를 구성하였다. 소형 모형 교각은 MC 나일론(Mono Cast Nylon) 재질로 제작되었으며, 내경, 외경, 높이가 각각 70 mm, 75 mm, 200 mm인 원통형 모형으로 제작되었다. 전극의 재질은 스테인리스 스틸이며, 전극의 직경과 길이는 각각 2 mm와 210 mm이다. 전극은 모형 교각을 따라 나란히 설치되었으며, 약 7.36 mm의 간격으로 총 32개의 전극이 원형으로 배열되었다. 32개의 전극은 E1~E32까지 번호가 부여되었다. 전극은 에폭시를 사용하여 모형 말뚝에 접착되었다. 2선식 전송선로는 인접해 있는 두 개의 전극으로 구성되었다. 예를 들어 E1과 E2가 하나의 전송선로가 되었고, E2와 E3이 또 다른 전송선로가 되었다. E1과 E2로 구성된 전송선로는 T1, E2와 E3으로 구성된 전송선로는 T2로 명명하였다. 이와 같은 방법으로 E31과 E32로 구성된 전송선로는 T31, E32와 E1로 구성된 전송선로는 T32로 명명하였다.

(a) Plan View

(b) Front View

Fig. 2. Small-scaled Model Pier with Electrodes

3.3 실험방법

3.3.1 측정방법

전극이 설치된 모형 교각을 Fig. 3과 같이 토조에 설치하였다. 토조의 재질은 아크릴이며 크기는 265×265×265 mm이다. 토조는 모래와 물로 채워졌으며, 완전히 포화된 상태에서의 모래의 유전상수는 30.5이며, 물의 유전상수는 74.0이었다. 전자기파의 송·수신을 위해 TDR 장비(HL1101, Hyperlabs)를 사용하였으며, ± 250 mV의 전압, 200 ps의 상승시간, 3 μ s의 폭을 가진 계단파를 발생시켰다. 전극과 TDR 장비의 연결을 위해 특성 임피던스가 50 Ω 인 동축 케이블을 사용하였으며, 동축 케이블의 내부도체와 외부도체를 각각 전극에 연결하였다. 실험 시 온도는 20도로 일정하게 유지하였다.

3.3.2 세굴 깊이에 따른 신호 변화

세굴 깊이에 따른 전자기파의 전파 특성을 관찰하기 위한 실험을 수행하였다. 토조에 채워진 모래의 두께는 160 mm이며, 모형 말뚝은 모래의 표면으로부터 120 mm 깊이에 설치하였다. 세굴 깊이는 0 mm~70 mm까지 10 mm간격으로 형성되었으며, 물의 높이는 185 mm로 유지되도록 하였다. 세굴은 전극 E1과 E2 주위에 모사되었다.

3.3.3 세굴 깊이 측정

모형 교각 주위에 인공적인 세굴을 모사하여 실험을 수행하였다. 세굴은 모형 교각의 형상을 따라 전면에 걸쳐 20 mm 깊이로 모사되었다. 토조에 채워진 모래의 두께는 95 mm이며, 모형 교각은 모래의 표면으로부터 55 mm 깊이에 설치되었다. 토조에 채워진 물의 높이는 185 mm이다.

Fig. 3. Small-scaled Model Pier with Electrodes Embedded in Soil Tank

3.4 실험결과

3.4.1 세굴 깊이에 따른 신호 변화

세굴 깊이에 따른 전자기파의 전파 특성을 관찰하기 위한 실험을 수행하였으며, 전송선로 T1에서 측정된 신호를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 측정된 신호를 보면 세굴의 깊이가 증가할수록 전자기파의 도달시간이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 세굴의 깊이가 깊을수록 전자기파의 감쇠도 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 세굴 깊이 0 mm~70 mm에 대해 측정된 전자기파의 도달시간은 4.077~4.435 ns이며, 세굴 깊이에 따른 전자기파의 도달시간을 Fig. 4(b)에 나타내었다. Fig. 4(b)를 보면 세굴 깊이가 증가함에 따라 전자기파의 도달시

(a) Measured Signals

간이 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이로부터 세굴 깊이(S_d)와 전자기파의 도달시간(Δt)과의 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$S_d = 197.86\Delta t - 806.42 \quad (15)$$

3.4.2 세굴 깊이 측정

모형 말뚝 주위에 생성된 세굴의 깊이를 측정하기 위한 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)에 나타나 있는 바와 같이 전송선로 T1~T3에서 측정된 신호를 보면 거의 같은 시간에서 전자기파의 신호가 반사되는 것을 볼 수 있다. 측정된 전자기파의 도달시간은 4.498~4.514 ns로 거의 비슷하였다. 측정된 전자기파의 도달시간으로부터 Eq. (15)를 이용하여 산정된 세굴 깊이를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 산정된 세굴 깊이는 18.8~21.6 mm로 생성된 세굴의 실제 깊이인 20 mm와 유사하게 산정되었다.

4. 분석 및 토의

본 연구에서 수행된 실험의 결과는 세굴의 깊이가 증가할수록 전자기파의 도달시간이 증가하는 것을 보여준다. 이는 전자기파의 속도가 주변 매질의 유전상수에 영향을 받기 때문이다. Eq. (14)에 나타난 바와 같이 전자기파의 속도는 유전상수의 제곱근에 반비례한다. 본 연구에서 사용한 물의 유전상수는 74.0이고 포화된 모래의 유전상수는 30.5이다. 세굴이 발생하면 전극 주위에 모래보다 물의 비율이 높아지기 때문에 물의 유전상수에 대한 영향이 증가하게 된다. 이와 같은 이유로 세굴의 깊이가 증가할수록 전자기파의 도달시간이 증가한다.

실제 현장의 지반 조건은 매우 다양하기 때문에 흙과 물의 유전상수는 본 실험에서 사용한 재료와 크게 다를 수 있다. 흙의 경우, 흙의 종류와 함수비에 따라 유전상수가 달라지며, 물의 경우, 민물과 염수의 유전상수가 크게 다르기

(b) Scour Depth vs. Travel Time

Fig. 4. Characteristics of Electromagnetic Waves According to Scour Depth

(a) Measured Signals

(b) Estimated Scour Depth vs. Actual Scour Depth

Fig. 5. Monitoring Results for Scour Around Model Pier

때문에 이를 고려한 실험과 분석이 이루어져야 한다. 특히 염수의 경우, 전기 전도도가 매우 크기 때문에 전송선로 내에서 누설 전류가 발생하여 전송선로의 두 도체가 합선되는 현상이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 적절한 절연재를 사용하여 전송선로에 사용되는 도체를 피복해야 한다(Fujiyasu et al., 2004; Lee et al., 2018; Lee and Yu, 2018). 온도 또한 전자기파 측정에 있어 중요한 영향 요소이다. 본 연구에서는 온도를 20도로 일정하게 유지하여 온도에 대한 영향을 무시하였다. 하지만, 국내의 기후는 사계절이 뚜렷하고 일교차가 크기 때문에 온도에 대한 영향을 반드시 고려해야 한다. 온도가 전자기파에 주는 영향은 지반의 조건에 따라 달라질 수 있다. Or and Wraith (1999)는 실트질 점토에서는 온도가 증가할수록 유전상수가 증가하지만 모래에서는 온도가 증가할수록 유전상수가 감소하는 결과를 제시하였다. 따라서, 전자기파를 이용한 세굴을 모니터링을 수행할 시 교각이 설치되어 있는 지반의 물리적 특성에 대한 조사가 반드시 이루어져야 한다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 교각에 발생하는 세굴을 TDR을 이용하여 모니터링하는 기법의 개발을 위해 실내실험을 수행하였다. 실내실험을 위해 내경, 외경, 그리고 높이가 각각 70 mm, 75 mm, 그리고 200 mm인 모형 교각을 토조에 설치하였으며, 모형 교각에는 직경 2 mm인 스테인리스 스틸 재질의 32개의 전극을 약 7.36 mm 간격으로 설치하였다. 전자기파의 송·수신을 위하여 서로 인접한 두 개의 전극을 이용하여 2선식 전송선로를 구성하였다.

실내실험을 통해 세굴의 깊이가 증가할수록 전자기파의 도달시간이 증가하는 것을 관찰하였고, 전자기파의 도달시간과 세굴 깊이와의 관계식을 도출하였다. 모형 교각 주변에 깊이 20 mm인 세굴을 인공적으로 형성하여 TDR을 이용하

여 이를 측정하였다. 전자기파의 도달시간과 세굴 깊이와의 관계식으로부터 측정된 전자기파의 도달시간을 세굴 깊이로 환산하였다. 그 결과, 실제 형성된 세굴의 깊이와 관계식으로부터 산정된 세굴의 깊이가 유사하게 나타났다.

본 연구의 결과는 TDR이 세굴을 모니터링하는데 유용한 기법이 될 수 있음을 보여준다. 하지만, 현장에 적용하기 위해서는 온도, 염도, 수면 높이, 지반 조건과 같은 영향인자들에 대한 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2107년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1A2B4008157).

References

- Briaud, J., Ting, F.C.K., Chen, H.C., Gudavalli, R., Perugu, S., and Wei, G. (1999). SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 4, pp. 237-246.
- Fisher, M., Chowdhury, M.N., Khan, A.A., and Atamturktur, S. (2013). An evaluation of scour measurement devices. *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 33, pp. 55-67.
- Fujiyasu, Y., Pierce C.E., Fan, L., and Wong, C.P. (2004). High dielectric insulation coating for time domain reflectometry soil moisture sensor. *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 4, W04602.
- Gao, Q., and Yu, X. (2015). Design and evaluation of a high sensitivity spiral TDR scour sensor. *Smart*

- Materials and Structures*, Vol. 24, No. 8, 085005.
- Joo, B.C., Park, K.T., and Hwang, Y.K. (2009). New measuring method for the scour and the water level by temperature measurement. *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 1, pp. 553-554.
- Kim, Y., and Paik, S. (2006). A study on the safety evaluation of bridge footings using GPR. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 21, No. 1, pp. 105-113.
- Lee, D., Lee, J.S., Hong, W.T., and Yu, J.D. (2018). Development of time domain reflectometry probe for evaluation of copper concentration in saline environment. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 19, No. 3, pp. 15-24.
- Lee, J.S., and Yu, J.D. (2018). Non-destructive method for evaluating the installed length and grouted ratio of soil nail using electromagnetic wave. (Submitted to Journal of Nondestructive Evaluation).
- Lin, C., Wang, K., Chung, C., and Weng, Y. (2017). New types of time domain reflectometry sensing waveguides for bridge scour monitoring. *Smart Materials and Structures*, Vol. 26, No. 7, 075014.
- Or, D., and Wraith, J.M. (1999). Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model. *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 371-383.
- Pagan-Ortiz, J.E. (1998). Status of scour evaluation of bridges over waterways in the United States. *Proceedings of Water Resource Engineering 1998*, ASCE, Memphis, TN, pp. 2-4.
- Park, B.C., and Jang, S.H. (2010). *Development of the bridge scour integrity assessment and monitoring system based on dynamic characteristics*. Research Report NIDP-PR-2010-03, National Disaster Management Research Institute.
- Park, I., Cho, W., and Lee, C. (2005). GPR survey for the assessment of scour depth near bridge piers. *Proceedings of 2005 Conference*, Korea Water Resources Association, pp. 996-1000.
- Park, K. (2014). *Scour monitoring techniques of offshore monopiles*. Master's thesis, Korea University.
- Shirole, A.M., and Holt, R.C. (1991). Planning for a comprehensive bridge safety assurance program. Transportation. Res. Rec. No. 1290, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 137-142.
- Yankielun, N.E., and Zabilansky, L. (1999). Laboratory investigation of time-domain reflectometry system for monitoring bridge scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 12, pp. 1279-1284.
- Yu, X., and Yu, X. (2009). Time domain reflectometry automatic bridge scour measurement system: Principles and potentials. *Structural Health Monitoring*, Vol. 8, No. 6, pp. 463-476.
- Yu, X.B., and Yu, X. (2011) Development and evaluation of an automation algorithm for a time-domain reflectometry bridge scour monitoring system. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 48, No. 1, pp. 26-35.

Received	April 18, 2018
Revised	April 19, 2018
Accepted	April 30, 2018