

Determination of sedimentary depth using electromagnetic waveform

김동주, 백두성, 박민수

1. Introduction

홍수시 하상의 교각주위에서 일어나는 세굴현상은 토목구조물의 기초를 약화시켜 그 기능을 저해하므로써 최근 큰 관심을 모으고 있다. 일반적으로 세굴현상 (local scouring)은 flow boundary의 변화에 기인하며 2차원 혹은 3차원적 세굴현상으로 구분된다. Chabert and Engeldinger (1956)에 의하면 국부적 세굴현상 (local scouring)은 clear-water scour와 live-bed scour로 나누어지며 전자는 세굴지역의 상류부에서의 하상퇴적물이 정지상태에 있을 때 교각주위의 세굴지역에서 나타나는 세굴작용을 의미하며 세굴심도는 시간에 따라 점근적으로 증가하게 된다. 한편, 후자에 의한 세굴은 유수에 의한 하상퇴적물의 운송이 활발할 때 일어나는 세굴작용으로서 세굴심도는 시간에 따라 급격히 증가하였다가 평균심도 부근에서 변화하는 양상을 보이며 평형상태의 세굴심도는 유수에 의하여 'scour hole'로부터 제거된 퇴적물의 양이 상류로부터 운송집적된 양이 같아질 때 일어난다 (li ligeng, 1989). 그 동안 세굴현상에 대하여 여러 가지의 이론 및 실험적 연구가 진행되어왔으나 대부분이 등류 및 정상류상태의 흐름, 매끄러운 주상교각, 하상퇴적물은 non-cohesive, uniform grain size, density 등의 가정하에서 이루어져왔다.

윤 등 (1997)은 남한강에서 홍수시 교각주위에서 발생하는 세굴현상을 음향측심기를 이용하여 실측하였으며 1차원과 2차원 수리모형에 의한 계산치와 비교분석하였다. 그 결과 계산치는 실측치보다 훨씬 과대평가 되었으며 이는 크게 두 가지 원인에 기인한다고 보고하였다. 첫째, 최대세굴이 발생하는 지점의 선정상의 문제점과 이에 따른 세굴깊이의 부정확성 둘째, 수치모형과 실제상황의 상이성, 즉, 정상류흐름과 비정상류흐름 그리고 침두유량후의 퇴매움효과 등으로 요약된다.

최근 국내외적으로 시간영역 광전자파 분석기 (time domain reflectometry: TDR)를 이용하여 다공성매질체의 수분함량이나 오염물질의 농도를 경시적으로 탐지하는 기술이 개발되었다 (Dalton, 1992; Kim, 1996; Kim et al., 1998). 이 기법은 다공성 매질체가 가지고 있는 고유의 유전상수에 따라 탐침의 깊이를 따라 운송하는 광전자파의 이동시간이 다르게 나타나는 점을 이용

하는 것으로서 불포화 토양에서의 수분함량을 정확하게 측정할 수 있을 뿐아니라 탐침주위의 매질체가 가지고 있는 전기전도도를 저항치로 표시하는 기능도 있어 보존성화학물질을 이용하여 오염물질의 이송 및 확산현상 규명에도 응용되고 있다.

TDR기법은 비파괴적이고 설치가 비교적 용이하며 시간에 따른 현장측정이 용이하므로 특히 홍수시 교각주위의 국부적 세굴심도를 모니터링하는데 활용가능하리라 예견된다. 따라서 본 연구에서는 교각주위 하상에 연직으로 설치된 탐침길이를 따라 세굴과 퇴메움현상을 퇴적물과 물의 유전상수를 이용하여 실내실험을 통하여 TDR기법의 적용가능성을 알아보고자 한다.

2. Theory

시간영역 광전자파 분석기 (time domain reflectometry: TDR)는 광전자파를 발생시켜 동축 케이블로 연결된 탐침으로 파를 보내어 반향된 파형을 LCD화면에 나타내는 장치로서 파의 형태는 탐침을 둘러싸고 있는 매질체의 성질에 따라 다르게 나타난다. 그림 1은 탐침이 물과 퇴적물로 구성된 매질체에 설치되어 있을 때의 파형을 나타낸 것이다. 광전자파가 매질체 내부에 설치된 탐침을 따라 이동할 때 전송시간은 그림에서 보는 바와같이 첫 번째 변곡점 (first inflection point)과 두 번째 변곡점 (second inflection point)의 차이로 나타나며 이는 매질체가 가지고 있는 유전상수로 표현될 수 있다. 즉, 파의 전자기적 (electrodynamic)인 성질에 의한 파의 속도는 역학적인 (mechanical) 성질에 의한 파의 속도와 일치한다.

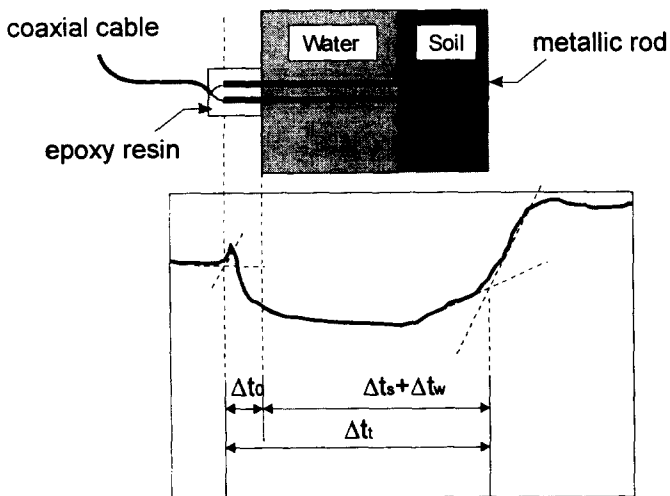


그림 1: Schematic presentation of components of travel time of electromagnetic waveform displayed in LCD of cable tester for a porous medium equipped with a parallel TDR probe

$$\text{electrodynamic pulse velocity: } v = c/(\epsilon)^{1/2} \quad (1)$$

$$\text{mechanical pulse velocity: } v = L/\Delta t \quad (2)$$

여기서 c 는 진공상태에서의 빛의 속도 (3×10^8 m/sec), ϵ 는 유전상수 (dielectric constant), L 은 탐침의 길이, 그리고 Δt 는 파가 탐침을 통과할 때 소요되는 전송시간 (travel time)이다. 위의 두 식으로부터 유전상수, ϵ 는

$$\epsilon = (c \Delta t / L)^2 \quad (3)$$

로 표현된다. 그러나, 그림 1에서 보는 바와같이 탐침의 총길이는 epoxy resin과 매질체내부에 분포되어 있으므로 광전자파가 탐침의 전체길이를 따라 이동한 전송시간, Δt_t 은,

$$\Delta t_t = \Delta t_0 + \Delta t_s + \Delta t_u \quad (4)$$

로 된다. 여기서 Δt_0 , Δt_s , Δt_w 는 각각 epoxy resin과 퇴적물부분 그리고 물부분에 있는 탐침을 따라 파가 이동한 전송시간이다. Epoxy resin에서의 전송시간, Δt_0 는 동일 탐침에 대하여 물과 공기에서의 파의 전송시간을 측정함으로써 구할 수 있다. 즉,

$$\Delta t_{tw} = \Delta t_0 + \Delta t_w = \Delta t_0 + L n_w / c \quad (5)$$

$$\Delta t_{ta} = \Delta t_0 + \Delta t_a = \Delta t_0 + L n_a / c \quad (6)$$

여기서 Δt_{tw} , Δt_{ta} 는 각각 물과 공기에서의 파의 총전송시간 그리고 n_w , n_a 는 파의 물과 공기에서의 반향지수 (refraction index)로서 물과 공기에서의 유전상수의 제곱근, $(\epsilon_w)^{1/2}$ 및 $(\epsilon_a)^{1/2}$ 와 같으며 약 9 와 1에 해당된다. 따라서 (5), (6)식으로부터 Δt_0 와 L 을 정확히 구할 수 있다. 그리고 식 (3)을 퇴적물과 물부분에 대한 유전상수로 표현하여 식 (4)에 대입하면,

$$\Delta t_t = \Delta t_0 + (\epsilon_s)^{1/2} L_s / c + (\epsilon_w)^{1/2} L_w / c \quad (7)$$

이 된다. 여기서 탐침의 총길이 중 매질체에 속한 부분 즉, 퇴적물과 물의 총 깊이를 L_{sw} 라 하고

$k = L_s / L_{sw}$ 라 하면 식 (7)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta t_i &= \Delta t_0 + (\epsilon_s)^{1/2} k L_{sw} / c + (\epsilon_w)^{1/2} (1 - k) L_{sw} / c \\ &= \Delta t_0 + (L_{sw} / c) [(\epsilon_s)^{1/2} k + (\epsilon_w)^{1/2} (1 - k)] \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 퇴적물의 유전상수만 구하면 식 (8)로부터 퇴적물의 경시적 변화량을 계산할 수 있게 된다.

3. Materials and Methods

퇴적물 깊이에 따른 광전자파의 전송시간 변화상태를 분석하기 위하여 간단한 실내실험을 다음과 같이 수행하였다. 두 개의 아크릴 용기(길이: 25cm, 직경: 8cm)에 물로 가득 채운다음 parallel TDR 탐침(길이: 25 cm, 간격: 2 cm, 두께: 0.5 cm)을 연직으로 설치하여 우선 순수한 물에서의 광전자파의 파형을 실측하였다. 그런 다음 사질토를 침강시켜 퇴적물 깊이가 5 cm 씩 증가할 때마다 파형을 측정하였으며 마지막에는 아크릴 원통에 퇴적물을 가득 채워 퇴적물 깊이 변화에 따른 파형을 측정하였다. 탐침을 따라 이동한 파의 전송시간, Δt_i , 은 그림 1에서 도시한 바와 같이 첫 번째 변곡점과 두 번째 변곡점 사이의 시간으로 구하였다. Epoxy resin부분에 있는 탐침을 따라 이동하는 전송시간, Δt_0 , 은 동일 탐침에 대하여 공기와 물에서의 총전송시간을 측정 한 후 식 (5), (6)으로부터 구하였다. 식 (8)에서 퇴적물의 유전상수, ϵ_s , 만 구하면 k 치 즉, 퇴적물의 상대적인 깊이를 구할 수 있다. 퇴적물의 유전상수는 실험의 마지막 단계인 아크릴 원통이 퇴적물로 가득 찼을 때의 조건 즉, 식 (8)에서 우변의 세 번째 항이 소거되고 L_{sw} 는 25 cm가 되는 조건으로부터 구하였다. 또한 퇴적물에서만 전송시간과 식 (8)에서 구한 퇴적물깊이와의 상관관계식을 구하였다.

4. Results and Discussion

그림 2는 퇴적물심도의 변화에 따른 파형의 변화를 보여준다. 퇴적물의 심도가 증가할수록 탐침을 따라 이동하는 파의 전송시간이 단축됨을 알 수 있으며 이는 TDR기법을 이용하여 퇴적물심도의 경시적 변화를 모니터링할 수 있다는 가능성을 제시해주고 있다. 퇴적물깊이의 증가에 따른 파의 전송시간의 감소는 퇴적물의 유전상수가 물의 유전상수보다 작은 것에 기인하며 본 연구에서 사용된 퇴적물의 경우 약 25.5로 나타났다.

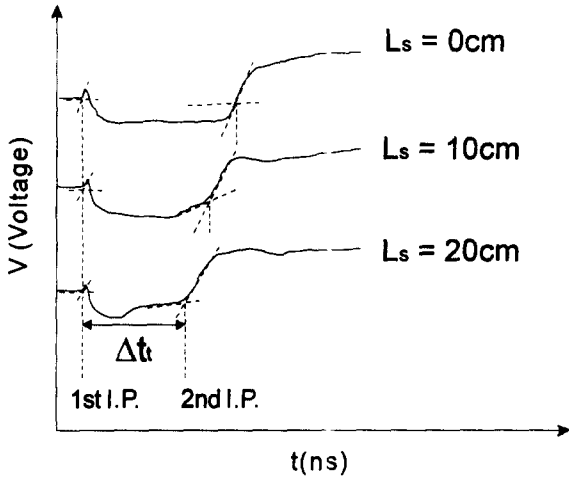


그림 2: 퇴적물의 심도와 광전자파 전송시간과의 관계

그림 3은 식 (8)에서 구한 퇴적물심도의 추정치를 실측치와 비교한 결과를 나타내주고 있다. 두 개의 중복 시료 중 첫 번째 시료는 퇴적물 심도가 10cm 이상이 되었을 때 추정치가 실측치에 아주 가깝게 나타났으며 시료별 추정치에 대한 오차는 최대 약 14%로 나타났다. 따라서 식 (8)은 퇴적물의 심도 추정에 적용될 수 있는 수학적 모델로 제시되며 탐침의 총길이에 대한 총전송시간의 자료, Δt ,는 경시적 모니터링에서 구득되며 이에 앞서 퇴적물의 유전상수 결정이 중요한 선행

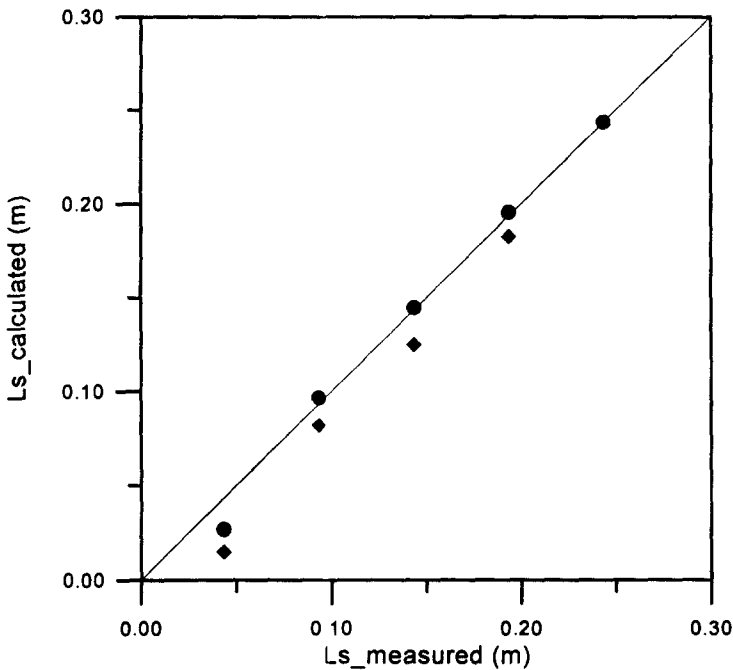


그림 3: 퇴적물심도의 추정치와 실측치와의 비교

조건이 된다. 이는 실내에서 퇴적물 심도별 파형측정을 통해 예비실험을 하거나 혹은 현장상태에서 탐침을 설치할 때 퇴적물과 유수의 심도를 측정하여 식 (8)로부터 산정될 수 있다.

5. Conclusion

홍수시 부정류상태에서 난면의 축소나 교각 등의 장애물에 의하여 발생하는 하상퇴적물의 국부적 세굴현상에 대한 정확한 자료는 이론적 모델의 개발과 세굴현상에 대한 이해의 증진, 그리고 교각의 붕괴현상을 방지하기 위하여 필수적이다. 본 연구에서는 유량과 유속이 급격히 변화하는 홍수시 하상의 교각주위에서 일어나는 국부적 세굴현상을 모니터링하는 새로운 기법을 개발하고자 간단한 실내실험을 수행하였다. 실내실험은 광전자파가 탐침을 따라 이동할 때 탐침주위를 구성하고 있는 매질체의 유전상수에 따라 그 파형이 어떻게 변화하는가에 주안점을 두어 수행되었다. 실험결과 광전자파의 파형이 퇴적물의 심도변화에 따라 일관성있게 변화되었으며 물과 퇴적물의 유전상수와 각각의 구성심도의 변화로부터 퇴적물의 변화심도를 추정하는 모델의 계산결과 실측치와 아주 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에 사용된 TDR기법은 음파세굴측정기가 지니고 있는 단점들 즉, 홍수시 음파 센서의 수중설치상의 난제, 설치위치나 각도의 부정확성, 장기간 사용시 발생하는 센서의 수중식물의 부착, 측정간격의 고려 (이 등, 1998)등이 없으며 일단 비홍수기때 교각주위의 원하는 지점에 탐침을 설치만 하면 언제든지 원하는 시간에 광전자파의 측정이 용이하므로 향후 실제 하천에서 홍수시 국부적 세굴심도의 변화량을 측정하는데 유용하게 사용되리라 기대된다.

6. References

- Chabert, J., and P. Engeldinger. (1956). Etude des affouillements autour des piles des ponts - Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou, France.
- Dalton, F. N. (1992). Development of Time-Domain Reflectometry for Measuring Soil Water Content and Bulk Soil Electrical Conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., Special Publication, no. 30, pp. 143-167.
- Kim, D. J. (1996). Application of an Automated Time Domain Reflectometry to Solute Transport Study at Field Scale: Experimental Methodology and Calibration of TDR. Econ. Environ. Geol. Vol.29, No. 6. pp. 699-712.
- Kim, D. J., M. Vanclooster, J. Feyen, and H. Vereecken. (1998). Simple Linear Model for Calibration of Time Domain Reflectometry Measurements on Solute Concentration. Soil Sci. Soc. Am. J. 62:83-89.
- li ligeng. (1989). Morphological time scales in hydraulic models. PhD dissertation, Katholieke Universiteit Leuven, pp. 6-64.
- 윤용남, 이재수, 호정석, (1997). "교량에서의 세굴깊이 산정 및 산정치와 실측치와의 비교분석". 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제30권, 제5집, pp. 477-485.
- 이종국, 여운광, (1998). 연구와 방재목적의 현장세굴 측정기술, 한국수자원학회지. pp. 16-20.