

시계열반사계를 이용한 시멘트계열 지반보강재의 양생과정 평가

Application of Time Domain Reflectometry to Estimate Curing Process of Cementitious Grout

전 민 우¹ Jun, Minu 조 현 묵² Cho, Hyunmuk
이 은 상³ Lee, Eun Sang 홍 원 택⁴ Hong, Won-Taek

Abstract

To realize stable use of ground treated with cementitious materials, the curing process must be evaluated. In this study, a time domain reflectometry (TDR) measurement system was employed to evaluate the curing process of cementitious grout based on the electromagnetic property. A coated probe was manufactured to prevent electrical connection between the electrodes by the electrically conductive cementitious grout, and a calibration process was performed to estimate the actual relative permittivity using the coated probe. To assess the curing process of cementitious grout using the TDR measurement system, cementitious grout with added retarder was prepared with a water-to-cement ratio of 45%. A preliminary measurement was conducted immediately after pouring the cementitious grout into the mold to test the applicability of the coated probe, and TDR signals and relative permittivity were measured at 3~288 hours of curing time. The experimental results demonstrate that the relative permittivity of the cementitious grout immediately after pouring was greater than 100, decreased rapidly over time, and converged to approximately 13.8 at 144 hours, which is considered the fully cured time. This findings of this study demonstrate that the TDR measurement system with a coated probe is applicable to electrically conductive materials. In addition, the TDR measurement system can be used effectively to monitor the curing process of cementitious grout based on electromagnetic properties.

요 지

시멘트계열 재료를 이용한 지반보강 시 처리지반의 안정적 이용을 위하여 해당 재료의 양생과정 평가가 요구된다. 본 연구에서는 전자기적 물성 기반 시멘트 그라우트의 양생과정 평가를 위하여 시계열반사계(TDR) 측정시스템을 적용하였다. 시멘트 그라우트의 높은 전도성으로 인한 프로브 내 전극간 전기적 연결을 방지하기 위하여 코팅 프로브를 제작하였으며, 코팅 프로브로부터 실제 비유전율 평가를 위한 보정실험이 수행되었다. 코팅 프로브가 적용된 TDR 측정시스템으로부터 시멘트 그라우트의 양생과정을 평가하고자 지연제가 첨가된 물시멘트비 45%의 초속경시멘트 그라우트가 준비되었으며, 몰드 내 타설 직후 예비측정 및 배합 후 3~288시간 경과 시점에서 TDR 신호를 수집, 비유전율을 평가하였다. 실험 결과, 타설 직후의 시멘트 그라우트는 100 이상의 높은 비유전율 상태를 나타내었으나 양생 시간이 경과함에 따라 급격한 감소 경향을 보였으며, 양생 144시간 시점부터의 비유전율은 약 13.8로 수렴하여 해당

1 정희원, 가천대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Gachon Univ.)

2 정희원, 가천대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Gachon Univ.)

3 정희원, 가천대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Gachon Univ.)

4 정희원, 가천대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. Civil & Environmental Engineering, Gachon Univ., Tel: +82-31-750-5375, Fax: +82-31-750-5344, wthong@gachon.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 12월 31일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

시간을 양생 완료시점으로 판단하였다. 본 연구에서 이용된 코팅 프로브 TDR 측정시스템은 전도성 재료에 대한 적용성과 더불어 전자기적 물성 기반 시멘트계열 지반보강재 양생과정 모니터링에 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

Keywords : Cementitious grout, Curing process, Electromagnetic wave, Relative permittivity, Time domain reflectometry

1. 서론

교통인프라 하부 및 도심지 포장 하부, 댐의 코어 등 지반재료로 구성된 인프라시설에 이상구간이 발생하는 경우 해당 인프라시설의 이용자 및 인접 거주자에 대한 인명피해와 막대한 경제·사회적 손실을 유발하므로 신속한 복구·보수·개량 공법의 적용이 요구된다(Cambefort, 1977). 그라우팅 공법은 강도 증진, 차수 효과 증대, 공동 충전 등을 목적으로 지반에 주입재를 주입하는 지반 개량 공법으로, 시멘트계열 그라우트가 가장 범용적인 주입재로서 이용된다. 그러나 그라우팅에 의해 보수·보강 처리된 지반의 품질 관리가 이루어지지 않을 경우 2차 지반 재해 발생의 우려가 있으므로(Xie et al., 2021), 그라우팅 공법에 의해 개량 및 처리된 지반의 품질 관리와 조속한 이용 재개를 위하여 해당 그라우팅재의 양생도 평가가 요구된다(Kim et al., 2007; Nonveiller, 2013).

지반 및 공동부 등 개·보수 대상구간에 주입된 그라우트의 양생 경과 및 품질 확인을 위하여 대상지반의 물성 평가가 적용될 수 있다. 코어링에 의해 채취된 시료의 강도, 투수시험을 통하여 평가된 투수계수, 보어홀을 이용하여 평가된 대상지반의 탄성과 속도 등이 주입 품질 평가에 이용될 수 있으나, 해당 방법들은 대상지반 및 시료에 별도의 변형을 가하는 바 양생 시간에 따른 물성변화 관찰 시 일관된 결과를 획득하기 어렵다는 한계가 있으며(Kikuchi et al., 1997; Hong et al., 2015), 개착식 물성평가에 의한 지반의 변형은 일정기간 동안의 인프라시설 기능 상실 및 이용 제한을 동반한다. 그러므로 대상구간에 주입된 그라우팅재의 변형을 최소화하며 양생과정을 평가할 수 있는 방법으로서 역학적, 전기적, 전자기적 물성에 기반한 비파괴 모니터링 기법의 적용이 고려될 수 있다(Chung et al., 2016; Secanellas et al., 2019).

시멘트계열 그라우트는 양생 중 전기적, 전자기적 물성이 급격히 변화하므로 해당 물성 계측을 통해 양생과정을 모니터링할 수 있다(Chen et al., 2012). 전기비저

항 탐사 및 지하투과레이더(GPR)은 전기적, 전자기적 물성을 이용하는 대표적인 지구물리탐사 방법이다. 전기비저항 탐사의 경우 전극과 접촉하는 면적 및 매질의 균질성에 따라 일관된 결과 획득이 힘들다는 한계가 있으며, 지하투과레이더의 경우 고유전율 매질에서 투과심도가 매우 낮아 양생 초기 시멘트계열 그라우트의 물성 평가에 한계가 있다(Venkateswarlu and Tewari, 2014). 시계열반사계(time domain reflectometry, TDR)는 도파관(waveguide)을 따라 전파하는 전자기파의 전파시간을 바탕으로 도파관과 접촉한 대상 재료의 전자기적 물성에 해당하는 비유전율을 평가한다. 시계열반사계는 전기비저항 탐사 및 지하투과레이더 탐사 등 전기적, 전자기적 물성을 이용하는 타 물리탐사방법과 비교할 때 요구되는 측정원리 및 해석절차가 간소하며(Cataldo et al., 2017), 동일 재료에 대해 우수한 반복성을 나타내므로 시멘트계열 그라우트의 양생과정 모니터링 기법으로서 활용될 수 있다(Karlovshek et al., 2016).

본 연구에서는 시계열반사계(TDR)를 이용하여 시멘트계열 지반보강재의 양생도를 평가하고자 양생시간에 따른 시멘트 그라우트의 유전율을 평가하였다. 본 논문은 시계열반사계 측정 시스템에 대하여 소개하며, TDR 측정 시스템의 시멘트 그라우트 적용을 위한 코팅 TDR 프로브 제작 및 코팅 TDR 프로브 측정값을 바탕으로 실제 유전율 도출을 위한 보정실험에 대하여 기술한다. 이후 TDR 측정시스템 기반 시멘트 그라우트의 양생과정 모니터링을 위한 실내실험 구성 및 결과, 분석 내용을 다룬다.

2. 시계열반사계(time domain reflectometry)

시계열반사계(time domain reflectometry, TDR) 측정 시스템은 Fig. 1과 같이 파형발생기와 오실로스코프 기능을 동시에 포함하는 TDR unit, 동축케이블 및 세 개의 전극으로 구성된 TDR 프로브를 포함한 도파관으로 구성된다. 프로브의 중앙 전극과 두 개의 외부 전극은 각각

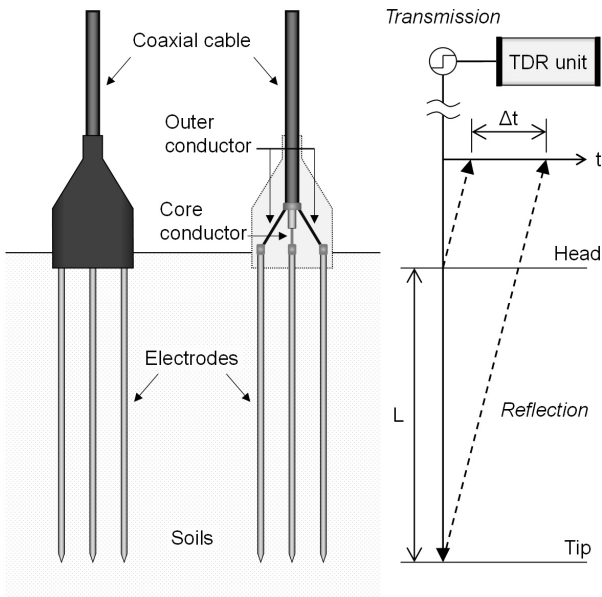


Fig. 1. Schematic drawing of time domain reflectometry (TDR) probe and measurement system

동축케이블의 내부도체(core conductor)와 외부도체(outer conductor)에 연결된다(Zeglin et al., 1989). TDR unit에서 발생된 전자기파는 동축케이블을 통과한 후 프로브 구간에서 전극간 전자기장을 형성하며 전파한다. 도파관 내에서 전자기파가 전파할 때, 해당 전자기파의 에너지는 전파구간상 전자기적 임피던스가 상이한 경계면에서 일부 반사되며, 도파관 구간 중 프로브의 두부(head) 및 선단부(tip)에서 특징적으로 큰 에너지가 반사된다(Hong et al., 2015). 이때, 프로브 두부 및 선단부에서 반사된 전자기파의 전파시간 차(Δt)는 프로브 구간 내 전자기파의 왕복 전파시간에 해당한다.

공기중, 습윤토 및 증류수에서 측정된 대표적인 프로브 구간 TDR 신호를 Fig. 2에 도시하였다. 상기와 같이 TDR unit에서 발생된 전자기파는 프로브 구간에서 전극간 전자기장을 형성하며 전파하는 바 프로브 구간 내 전자기파의 전파속도는 프로브와 인접한 매질의 전자기적 물성에 따라 달라진다. 해당 매질에서의 전자기파 전파속도는 접선해석법으로 결정된 전자기파의 왕복 전파시간(Δt)을 바탕으로 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$v = \frac{2L}{\Delta t} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

여기서, v 는 전자기파의 전파속도, L 은 프로브의 길이, c 는 진공에서의 전자기파 전파속도(2.998×10^8 m/s),

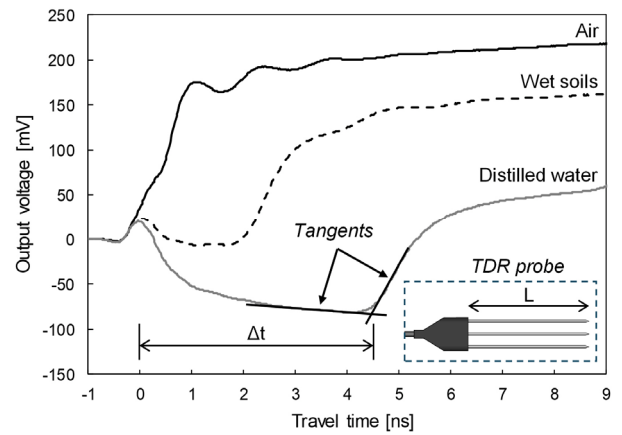


Fig. 2. TDR signal measured in air, wet soils, and distilled water

ϵ_r 은 프로브와 인접한 매질의 비유전율이다. 그러므로 식 (1)을 통하여 프로브와 인접한 매질의 비유전율을 평가할 수 있다.

공기, 흙 입자, 물 삼상구조(3-phase)로 이루어진 흙의 각 구성요소의 비유전율은 약 1, 3~5, 81이므로 다공성 매질에 해당하는 흙의 비유전율 전체 부피 중 물이 차지하는 부피비에 해당하는 체적함수비(volumetric water content, θ_v)에 지배적인 영향을 받는다(Mojid et al., 1998; Jol, 2008; Jones et al., 2002). 그러므로 지반공학 분야에서 TDR 측정시스템은 흙의 함수량 평가 기법으로서 주로 이용된다(Topp et al., 1980). 시멘트 그라우트의 경우, 배합 후 양생 완료단계까지 급격한 전자기적 물성변화가 예상되므로(Balayssac, 2002) 양생과정 평가를 위한 TDR 측정시스템 적용이 가능할 것으로 판단된다.

3. 시멘트 그라우트에 대한 TDR 시스템 적용

3.1 시멘트 그라우트 내 TDR 신호 수집

TDR 측정시스템은 도파관의 내부도체와 외부도체 및 중앙전극과 외부전극 사이에 전기적 연결이 없도록 구성되는 바 도파관의 제작상 결함 및 프로브 구간 내 전도성 매질에 의한 합선이 발생하는 경우 해당 합선위치 이후의 전자기파 반사신호 수집이 불가능하며, 도파관 구성요소간 직접적인 전기적 연결이 발생하지 않더라도 전자기파 에너지의 높은 감쇠율을 야기하는 매질의 경우 명확한 반사신호 수집에 한계가 있다(Hoekstra and Delaney, 1974; Hansson and Hansson, 1985; Cheng, 1989; Heimovaara, 1993). 시멘트성 매질에 대한 TDR 시

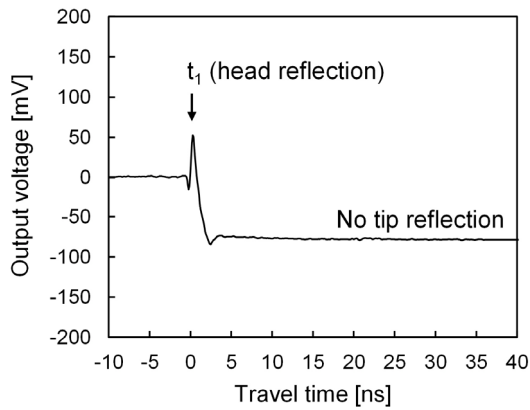


Fig. 3. TDR signal failure in a cementitious grout

시스템의 적용 예시로서, 배합 직후의 시멘트 그라우트에 대하여 표준 TDR 프로브(CS645-L, Campbell Scientific, Inc.) 설치 및 TDR unit(HL1101, Hyperlabs, Inc.)을 이용하여 수집된 신호를 Fig. 3에 나타내었다. TDR 신호는 도파관 구간 중 프로브 두부에서의 반사신호를 명확히 나타내었으나 선단부에서의 반사신호는 감지되지 않았다. 특히, Fig. 3의 TDR 신호는 프로브 구간 내 중앙 전극과 외부전극에 합선이 발생하였을 때의 신호 형상과 매우 유사하며, 이는 배합 직후 시멘트 그라우트 내에 존재하는 알칼리 이온에 의한 전극간 전기적 연결에 기인하는 것으로 판단된다(Mojid et al., 1998; Saha et al., 2020).

전도성 매질 및 고유전율 매질에 대한 TDR 시스템의 적용을 위하여 절연 처리된 TDR 프로브의 사용이 제안되었다(Mojid et al., 1998; Staub et al., 2008; McIsaac, 2010). 본 연구에서는 시멘트 그라우트에 대한 TDR 시스템의 적용 및 프로브 선단부 반사를 포함한 TDR 신호를 획득하고자 전극 역할을 하는 직경 2.5mm 스테인리스봉 세 개로 구성된 TDR 프로브를 제작하였으며, 전극간 전기적 차폐를 위하여 중앙 전극에 우레탄페인트를 이용하여 0.275mm 두께로 코팅처리 하였다. 해당 코팅 프로브의 중앙전극 및 2개의 외부전극은 각각 동축케이블의 내부도체 및 외부도체와 연결하여 표준 TDR 프로브와 동일한 측정시스템을 구성하였다.

3.2 유전율 보정

코팅 프로브의 코팅재는 전극 주변부에 형성되는 전자기장 영역 내에 존재하므로 해당 코팅 프로브를 이용하여 비유전율을 평가할 시 실제 유전율과 상이한 결과

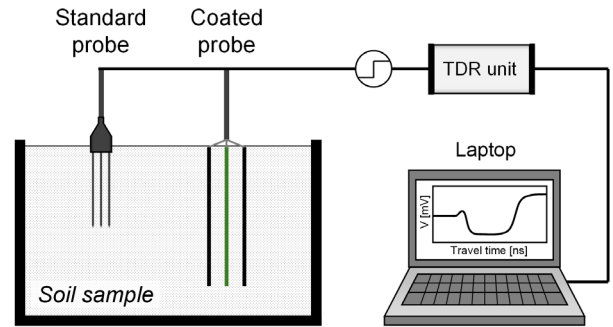


Fig. 4. Setup for calibration of coated probe with standard probe

를 나타낼 것으로 예상되는 바 코팅 프로브를 이용하여 실제 유전율 평가를 위한 보정실험을 Fig. 4와 같이 구성하였다. 주문진표준사로 채워진 토조 내에 길이 75mm의 표준 프로브 및 길이 150mm의 코팅 프로브를 설치하였으며, 해당 주문진표준사의 체적함수비를 0%부터 35%까지 5% 간격으로 조절하며 각 함수상태의 주문진표준사 시료를 대상으로 TDR 신호를 수집하였다.

표준 프로브 및 코팅 프로브를 이용하여 수집된 TDR 신호 중 체적함수비 0%, 10%, 20%, 30% 및 공기중에서 수집된 신호를 각각 Fig. 5(a) 및 5(b)에 도시하였다. 두 개의 프로브를 이용하여 수집된 TDR 신호 모두에서 두부 반사 및 선단부 반사가 명확히 감지되었으며, 해당 반사시간을 바탕으로 프로브 구간 내 전파시간을 산정할 수 있다. 프로브 구간 내 전파시간은 공기중에서 가장 짧았으며, 주문진표준사의 체적함수비가 증가함에 따라 신호의 진폭 및 전파시간 모두 증가하는 경향을 보인다.

각 함수상태에서의 전파시간(Δt)과 각 프로브의 길이(L) 및 식 (1)을 이용하여 비유전율을 계산하였으며, 주문진표준사 시료의 체적함수비에 따라 표준 프로브 및 코팅 프로브로부터 결정된 비유전율을 Fig. 6에 나타내었다. 보정실험 결과, 각각의 프로브로부터 결정된 비유전율의 상관관계는 아래의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_r = 1.09 \cdot \epsilon_{r(a)} \quad (2)$$

여기서, ϵ_r 은 표준 프로브를 이용하여 결정된 실제 비유전율이며, $\epsilon_{r(a)}$ 는 코팅 프로브를 이용하여 결정된 겉보기 비유전율이다. 본 연구의 보정실험에서 코팅 프로브와 표준 프로브의 상관계수는 1.09로 결정되었으나, 코팅 재료의 종류 및 코팅 두께에 따라 상관계수는 달라질 수 있다.

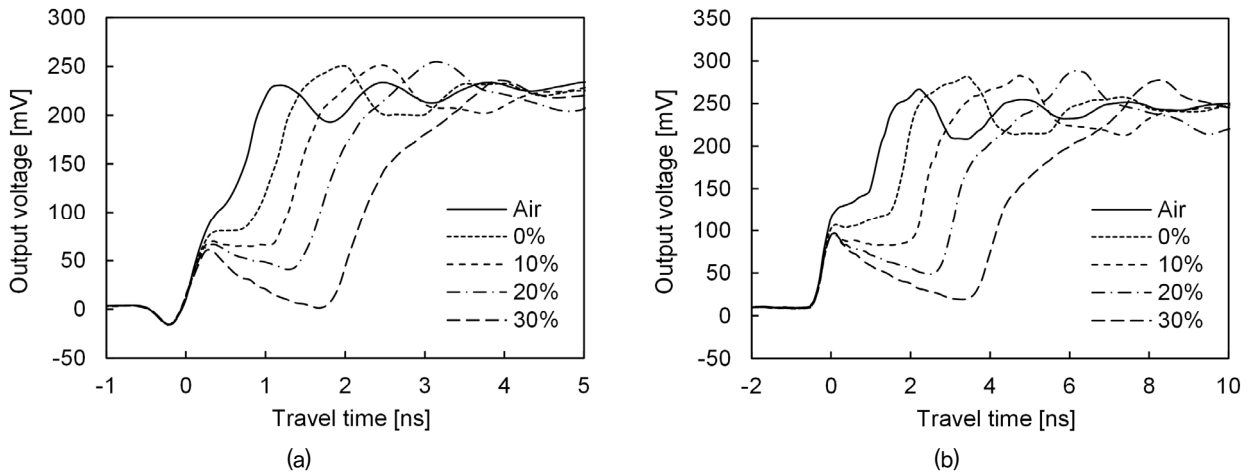


Fig. 5. TDR signals measured in air and soils with different volumetric water contents: (a) standard TDR probe; (b) coated TDR probe

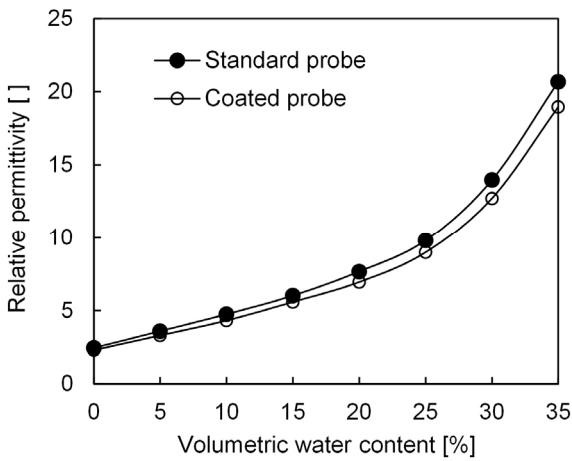


Fig. 6. Relationship between relative permittivities evaluated using coated and standard TDR probes

4. 실험구성

시멘트 그라우트에 대한 TDR 측정시스템의 적용 및 양생 경과에 따른 비유전을 평가를 위하여 Fig. 7과 같이 실내실험을 구성하였다. 실제 현장에서는 보정실험에서 이용된 코팅 프로브의 길이보다 장구간에 걸친 시멘트 그라우트 시공이 예상되는 바 가로, 높이, 길이가 각각 100mm, 100mm, 950mm인 몰드를 제작하였으며,

몰드 중앙부에 950mm 길이의 코팅 프로브를 배치하였다. 시멘트 그라우트 배합을 위하여 초속경시멘트가 이용되었으며, 물시멘트비($R_{w/c}$)는 45%로 조절되었다. 또한, 양생과정 중 충분한 양의 TDR 신호 수집을 위하여 초속경시멘트 10kg당 60g의 중량비율로 유기지연제를 첨가하였다. 배합된 시멘트 그라우트는 몰드 내에 타설되었으며, 타설 직후 신호 정상수집여부 평가를 위한 예비측정 및 배합 3시간 12시간, 24~288시간(24시간 간격) 경과 시점에서 TDR 신호를 수집하였다. 이때, 각 시점에서 TDR 신호 획득 시 불규칙 잡음을 제거하기 위하여 64개 신호 측정 후 중첩하였다.

5. 결과 및 분석

시멘트 그라우트의 양생 3~288시간 시점에서 획득된 TDR 신호를 Fig. 8에 도시하였다. 양생경과 3시간에서의 코팅 프로브 구간 내 전자기파의 왕복전파시간(Δt)은 약 40.9ns로 측정되었으며, 12시간 시점에서 약 28.9ns로 급격한 감소를 보인 후 양생시간이 경과함에 따라 점진적인 감소경향을 나타내었다. 시멘트 그라우트 배합 후 10일 이상의 양생시간이 경과함에 따라 TDR 신

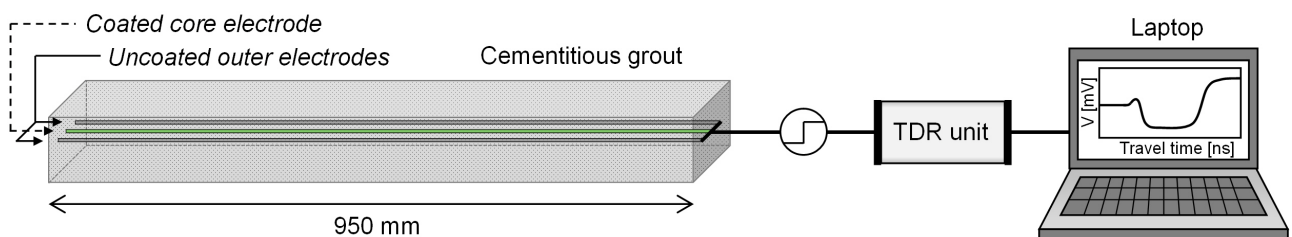


Fig. 7. Experimental setup

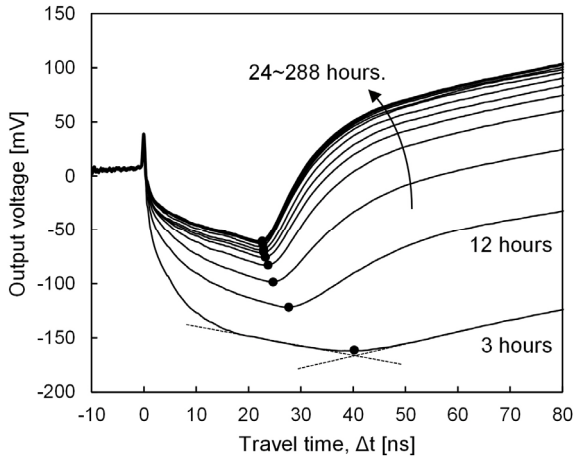


Fig. 8. TDR signals measured in cementitious grout using coated TDR probe

호의 진폭 및 전자기파의 왕복전파시간이 약 23.6ns로 수렴하였으며, 이에 더 이상의 전자기적 물성 변화는 관찰되지 않는 것으로 판단하였다.

TDR 신호로부터 결정된 전자기파의 왕복전파시간을 바탕으로 식 (1)을 통해 겔보기 비유전율($\epsilon_{r(a)}$)을 계산하였으며, 식 (2)의 계수 1.09를 취하여 실제 비유전율(ϵ_r)로 보정 및 양생 경과시간과 함께 Fig. 9에 나타내었다. 예비측정에서 평가된 비유전율은 100 이상의 높은 값을 나타내었으며, 양생시간 12시간까지 급격한 감소경향 보인다. 이후 시멘트 그라우트의 비유전율은 양생 경과시간에 따라 완만한 감소경향을 보인 후 양생 경과시간 144시간부터 약 13.8로 수렴하였다. 해당 비유전율은 선행연구(Liu et al., 2017; Hasan and Yazdani, 2014)로부터 보고된 양생 완료된 시멘트성 재료의 비유전율과 상응하는 바 본 연구에서 비유전율이 수렴하는 144시간을 시멘트 그라우트의 양생 완료시점으로 판단하였다.

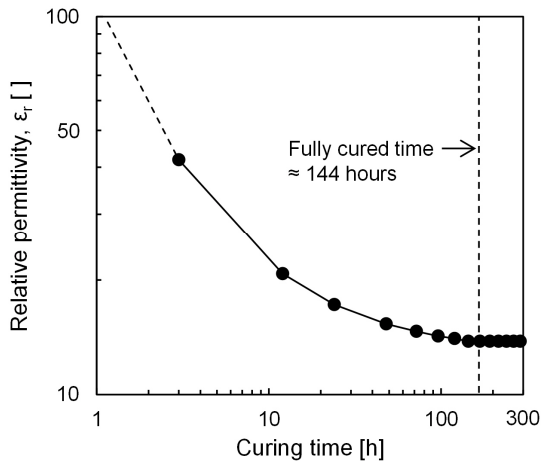


Fig. 9. Relative permittivity of cementitious grout with curing time

6. 요약 및 결론

시멘트계열 보강재를 이용한 지반개량 및 긴급 보수 보강 시 해당 시설의 안정적인 이용과 운영재개시점 결정을 위하여 양생과정 평가가 요구된다. 본 연구에서는 시계열반사계(time domain reflectometry, TDR) 측정시스템을 이용하여 비유전율 기반 시멘트계열 지반보강재의 양생과정을 평가하였다. 배합 초기 높은 전도성의 시멘트재료에 대한 TDR 측정시스템의 적용을 위하여 중앙 전극을 우레탄 페인트로 코팅처리한 TDR 프로브를 구성하였으며, 코팅 프로브를 이용하여 측정된 TDR 신호로부터 실제 유전율 평가를 위하여 서로 다른 체적함수비의 사질토 시료를 대상 보정실험을 수행하였다.

본 연구의 대상재료인 시멘트 지반보강재 조성을 위하여 지연재가 첨가된 물시멘트비 45%의 초속경시멘트 그라우트가 배합되었으며, 해당 시멘트 그라우트 내 코팅 프로브 설치 및 양생 경과시간에 따라 TDR 신호를 수집하였다. 양생 경과시간에 따라 측정된 TDR 신호로부터 프로브 구간 내 전자기파의 왕복전파시간을 결정하였으며, 해당 전파시간을 바탕으로 비유전율을 도출하였다. 배합 초기 시멘트 그라우트는 100 이상의 높은 비유전율을 나타내었으나 양생시간 경과에 따른 민감한 감소경향을 나타내었으며, 일정 비유전율로 수렴하는 양생 경과시간을 바탕으로 양생 완료시점을 판단하였다. 본 연구에서 적용된 TDR 시스템은 대상 재료에 대한 별도의 파괴 및 변형을 가하지 않으므로 동일 재료에 대한 일관된 물성변화 관찰이 가능하다. 그러므로 TDR 시스템 및 이를 이용하여 측정된 비유전율의 변화양상 및 수렴시간은 시멘트계열 지반보강재 및 건설재료의 양생과정 모니터링 및 양생 완료시점 결정에 효과적으로 이용될 수 있을 것이라 기대된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00337686).

참고문헌 (References)

1. Cambefort, H. (1977), "The Principles and Applications of Grouting", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol.10, No.2, pp.57-95.
2. Cataldo, A., De Benedetto, E., Cannazza, G., Piuze, E., and Pittella,

- E. (2017), "TDR-based Measurements of Water Content in Construction Materials for in-the-field Use and Calibration", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.67, No.5, pp.1230-1237.
3. Chen, W., Shen, P., and Shui, Z. (2012), "Determination of Water Content in Fresh Concrete Mix based on Relative Dielectric Constant Measurement", *Construction and Building Materials*, Vol.34, pp. 306-312.
 4. Cheng, D. K. (1989), *Field and wave electromagnetics*, Pearson Education India.
 5. Chung, C. C., Lin, C. P., Wang, K., Lin, C. S., and Ngui, Y. J. (2016), "Improved TDR Method for Quality Control of Soil-nailing Works", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.142, No.1, 06015011.
 6. Hasan, M. I. and Yazdani, N. (2014), Ground penetrating radar utilization in exploring inadequate concrete covers in a new bridge deck, *Case Studies in Construction Materials*, 1.
 7. Heimovaara, T. J. (1993), "Design of Triple-wire Time Domain Reflectometry Probes in Practice and Theory", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.57, No.6, pp.1410-1417.
 8. Hoekstra, P. and Delaney, A. (1974), "Dielectric Properties of Soils at UHF and Microwave Frequencies", *Journal of Geophysical Research*, Vol.79, No.11, pp.1699-1708.
 9. Hong, W. T., Kang, S., and Lee, J. S. (2015), "Application of Ground Penetrating Radar for Estimation of Loose Layer", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.11, pp.41-48.
 10. Hong, W. T., Jung, Y. S., Lee, J. S., and Byun, Y. H. (2015), "Development and Application of TDR Penetrometer for Evaluation of Soil Water Content of Subsoil", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.2, pp.39-46.
 11. Karlovšek, J., Schwing, M., Chen, Z., Wagner, N., Williams, D. J., and Scheuermann, A. (2016), "Dielectric Measurement Method for Real-time Monitoring of Initial Hardening of Backfill Materials Used for Underground Construction", *Journal of Geophysics and Engineering*, Vol.13, No.2, S19-S27.
 12. Kikuchi, K., Igari, T., Mito, Y., and Utsuki, S. (1997), "In Situ Experimental Studies on Improvement of Rock Masses by Grouting Treatment", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.34, No.3-4, 138-e1.
 13. Kim, J. H., Yi, M. J., Park, S. G., and Farooq, M. (2007), "Resistivity Monitoring for Assessing Cement Grouting Effect", Near Surface 2007-13th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (pp. cp-30). European Association of Geoscientists & Engineers.
 14. Liu, J. L., Xu, J. Y., and Lu, S. (2017), Investigations on microwave deicing effects on graphite-modified concrete, *RSC advances*, Vol.7, No.62, pp.39237-39243.
 15. McIsaac, G. (2010), Time domain reflectometry measurement of water content and electrical conductivity using a polyolefin coated TDR probe (Master's thesis, University of Waterloo).
 16. Mojid, M. A., Wyseure, G. C., and Rose, D. A. (1998), "The Use of Insulated Time-domain Reflectometry Sensors to Measure Water Content in Highly Saline Soils", *Irrigation Science*, Vol.18, pp. 55-61.
 17. Secanellas, S. A., Hernandez, M. G., Segura, I., Morata, M., and Anaya, J. J. (2019), "A System Designed to Monitor in-situ the Curing Process of Sprayed Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.224, pp.823-834.
 18. Nonveiller, E. (2013), *Grouting theory and practice*, Elsevier.
 19. Saha, O., Boulfiza, M., and Wegner, L. D. (2020), "Tracking the Hydration of Antifreeze Treated Cement Paste at Subfreezing Temperatures Using the TDR Technique", *Construction and Building Materials*, Vol.262, 119915.
 20. Staub, M., Laurent, J. P., Morra, C., Stoltz, G., Gourc, J. P., and Quintard, M. (2008), "Calibration of Time-domain Reflectometry Probes to Measure Moisture Content in Municipal Solid Waste in Laboratory-scale Cells", *Geo-Environmental Engineering*, pp.199-205.
 21. Venkateswarlu, B. and Tewari, V. C. (2014), "Geotechnical Applications of Ground Penetrating Radar (GPR)", *Jour. Ind. Geol. Cong.*, Vol.6, No.1, pp.35-46.
 22. Xie, X., Zhai, J., and Zhou, B. (2021), "Back-fill Grouting Quality Evaluation of the Shield Tunnel Using Ground Penetrating Radar with Bi-frequency Back Projection Method", *Automation in Construction*, Vol.121, 103435.
 23. You, S. K., Ahn, H., Kim, Y. H., Han, J. G., Hong, G., and Park, J. J. (2019), "A Numerical Study on the Occurrence Scope of Underground Cavity and Relaxation Zone Considering Sewerage Damage Width and Soil Depth", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.1, pp.43-53.
 24. Zegelin, S. J., White, I., and Jenkins, D. R. (1989), "Improved Field Probes for Soil Water Content and Electrical Conductivity Measurement Using Time Domain Reflectometry", *Water Resources Research*, Vol.25, No.11, pp.2367-2376.

Received : May 29th, 2024

Revised : June 4th, 2024

Accepted : June 5th, 2024