

주입 실험 기반 MWCNTs 혼입 그라우트의 수분 침투 감지 특성

성지혜* · 박정준**† · 정동섭* · 유일환*** · 이희업** · 이승정*†

Water Infiltration Detection Performance of MWCNTs-incorporated Grouts based on Injection Experiments

Ji Hye Sung*, Jeongjun Park**†, Dong Seop Jeong*, Ilhwan You***,
Hee Up Lee**, Seung-Jung Lee*†

ABSTRACT: This study experimentally evaluates the applicability of conductive grout incorporating multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) as an embedded self-sensing system for detecting water infiltration in ground structures. The conductive grouts were prepared with water-to-cement (W/C) ratio and MWCNTs content as the main variables, and their injectability was evaluated under both unsaturated and saturated ground conditions. As a result, the mixture with a W/C ratio of 3.0 and 1.0% MWCNTs under saturated Jumunjin sand was found to achieve the most favorable injectability. Based on the selected mix proportion, sensing performance was experimentally analyzed according to different electrode types, spacings, and depths. The incorporation of MWCNTs enhanced the sensing sensitivity and enabled earlier detection of water infiltration, with copper plate electrodes showing the highest responsiveness. Electrode spacing and depth were also identified as additional parameters affecting sensing performance. These results demonstrate that conductive grout can serve as a self-diagnosing material capable of real-time monitoring of water infiltration in ground structures, and suggest its potential applicability in self-sensing and structural health monitoring systems.

초 록: 본 연구에서는 다중벽 탄소나노튜브(MWCNTs)를 혼입한 전도성 그라우트를 활용하여 지반 구조물 내 수분 침투를 감지할 수 있는 자가 감지 시스템의 적용 가능성을 실험적으로 평가하였다. 전도성 그라우트는 물/시멘트비(W/C)와 MWCNTs의 혼입비를 주요 변수로 제작되었으며, 비포화 및 포화 지반 조건에서 그라우트의 주입성을 평가하였다. 그 결과, 포화된 주문진사 조건에서 W/C 3.0 및 MWCNTs 1.0%의 조합이 가장 양호한 주입성을 나타내었다. 선정된 전도성 그라우트의 배합 조건을 기반으로 전극의 형태, 간격, 깊이에 따른 수분 감지 성능을 실험적으로 분석하였다. MWCNTs 혼입은 수분 감지 민감도를 높이고 감지 시점을 앞당기는 효과를 보였으며, 구리판 전극 사용 시 반응성이 가장 우수하였다. 전극 간격과 깊이는 감지 성능에 추가적 영향을 미치는 변수로 확인되었다. 본 연구를 통해 전도성 그라우트가 구조물 내 수분 침투를 실시간으로 감지할 수 있는 자가 진단형 재료로 활용될 수 있음을 확인하였으며, 지반 구조물의 자가 감지 및 모니터링 기술로의 적용 가능성을 제안하였다.

Key Words: 다중벽 탄소나노튜브(Multi-walled carbon nanotubes), 전도성(Electrical conductivity), 그라우트(GROUT), 주입 실험(Injection test), 수분 침투(Water Infiltration)

Received 11 June 2025, received in revised form 12 July 2025, accepted 23 July 2025

*Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University
**†Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute, Corresponding author (E-mail: jjpark@krri.re.kr)
**Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute
***Assistant Professor, Department of Rural Construction Engineering, Jeonbuk National University
*†Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University,
Corresponding author (E-mail: seungjung@inu.ac.kr)

1. 서 론

지반 구조물은 터널, 옹벽, 사면 등 다양한 인프라의 기반 요소로 그 안정성은 인명과 재산 보호에 직결된다. 특히 철도 터널이나 해저 지반 구조물은 수분 침투와 지반 변동에 지속적으로 노출되므로, 시공 이후의 구조 건전성 유지와 모니터링이 중요하다. 이를 위해 일반적으로 시멘트 기반 그라우트가 사용되며 이는 지반 강도 증진과 차수 성능 확보에 효과적이다. 그러나 기존 그라우트는 물리적 보강 기능만 수행하며, 특히 구조물 심부에 주입된 그라우트는 외부에서 상태를 직접 계측하기 어렵고 이상 징후를 사전에 파악하기 어려운 한계가 있다. 실제 현장에서는 육안 점검, 유량계, 습도계 등 간접 계측에 의존해 누수를 감지하고 있다. 최근에는 이러한 한계를 보완하기 위해, 터널 내부의 누수를 열화상 카메라로 탐지하거나 영상 처리 기반의 자동 탐지 기법 등의 비접촉 기반 탐지 기술이 적용되고 있다[1,2]. 비접촉 기반 탐지 기술로는 레이저 스캐닝 데이터와 적외선 열화상 영상을 결합해 터널 내 누수 부위를 식별하는 방법이 제안되었으며 이러한 방법은 표면의 온도 분포 변화를 통해 누수를 진단한다. 또한, 고해상도 카메라로 촬영한 터널 라이닝 영상에서 이미지 처리나 딥러닝을 통해 누수 패턴을 자동 인식하려는 연구도 진행되고 있다[3,4]. 그러나 이러한 기법들은 주로 구조물 표면에 나타난 누수 흔적을 감지하는 데 집중되어 있어 내부에서 시작되는 미세한 수분 침투를 조기에 포착하는 데에는 한계가 있다. 실제로 누수 탐지가 늦어져 구조물이 심각하게 손상된 사례들이 보고되었으며[5,6], 이를 통해 지반 구조물 내부에서 초기 단계에 누수를 발견하고 대응할 수 있는 기술의 필요성이 강조되고 있다[2].

따라서 구조 재료 자체에 감지 기능을 부여하려는 연구가 진행되고 있으며[7-9], 그 중에서도 전도성 나노소재를 활용해 시멘트 복합재에 자가 감지(self-sensing) 기능을 부여하려는 시도가 활발히 이루어지고 있다[10]. 전도성 나노소재를 시멘트 매트릭스에 혼입하면 재료의 전기 전도도가 향상되어, 외부 물리-역학적 자극에 따른 전기적 특성 변화를 감지하는 자가 감지 기능이 구현될 수 있다. 특히, 전도성 나노소재 중 탄소나노튜브(CNT)는 상대적으로 높은 종횡비와 우수한 전기전도성 및 기계적 안정성으로 인해 시멘트 복합재의 감지 기능 부여를 위한 대표적인 소재로 널리 활용되어 왔다[10-13]. 이러한 특성은 여러 선행 연구 결과에서도 반복적으로 확인되고 있다. You 등[14]은 동일한 조건에서 탄소나노튜브, 그래핀(Graphene), 그래핀 나노섬유(Graphene Nanofiber)를 비교한 실험을 통해, 탄소나노튜브가 가장 우수한 전기전도도와 자가 감지 특성을 나타낸다고 보고하였다. 다수의 후속 연구에서도 탄소나노튜브는 높은 감지 민감도와 전기적 특성으로 인해 전도성 복합재의 핵심 소재로 활용되고 있음을 확인할 수 있다

[10,12,15]. 또한, 탄소나노튜브를 첨가한 시멘트 복합재는 재료 내부의 수분 함량 변화에 민감하게 반응하며 수분이 침투할 경우 전기저항이 유의미하게 변화하는 경향이 관찰되었다[16-18]. 이러한 특성은 재료 자체가 구조물 내부 상태를 실시간으로 모니터링할 수 있는 센서로 활용될 가능성을 보여준다.

자가 감지 기술은 시멘트 복합재뿐만 아니라 지반 보강에 활용되는 그라우트 재료에도 적용하려는 시도가 이루어지고 있다. 기존의 그라우트가 물리적 보강 기능만을 수행했다면, 최근에는 전도성 나노소재를 혼입하여 전도성과 감지 기능을 함께 갖춘 전도성 그라우트를 개발하려는 연구가 진행되고 있다. 전도성 그라우트를 사용한 기존 연구에서는 전도성 그라우트 혼탁액이 토양 공극에 완전히 주입된다는 이상적 가정하에 토사와 혼탁액을 직접 혼합한 복합재를 제작해 수분 감지 특성을 분석하였다[18]. 그러나 실제 현장에서 그라우트 주입 시 공극의 불균일성, 여과 현상, 부분적 침투 등과 같은 문제가 발생할 수 있으며[19,20], 이러한 현상은 전도성 그라우트를 적용하여 주입할 경우 전도성 네트워크 형성을 어렵게 만들 수 있고 결과적으로 감지 신호의 신뢰성 저하로 이어질 수 있다. 따라서 감지 기능의 실효성을 확보하기 위해서는 실제 현장 조건을 고려한 주입 실험을 통해 전도성 그라우트 혼탁액이 안정적으로 주입될 수 있는 조건을 사전에 검토하고 이를 반영한 실험체를 제작하여 전도성과 감지 기능이 효과적으로 발현되는지를 확인할 필요가 있다.

본 연구에서는 다중벽 탄소나노튜브(MWCNTs)를 혼입한 전도성 그라우트를 통해, 그라우트 자체가 수분 침투를 감지할 수 있는 내장형 자가 감지 센서 시스템의 가능성을 검토하고자 한다. 본 논문은 전도성 그라우트의 주입성 평가를 위한 사전 실험과 수분 침투에 따른 전기적 감지 성능 분석을 위한 본 실험으로 구성된다. 2장에서는 전도성 그라우트의 적용 배경과 재료 특성, 그리고 실험을 위한 주입 장비 구성과 실험 방법을 기술하였다. 3장에서는 전도성 나노소재의 혼입 여부, 전극 조건(형태, 간격, 깊이) 등에 따른 수분 감지 성능 평가 결과를 제시하고, 각 변수의 영향에 대해 분석하였다. 마지막으로 4장에서는 실험 결과를 바탕으로 전도성 그라우트의 자가 감지 센서로서의 가능성을 고찰하고, 향후 연구 방향을 제시하였다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1 재료 준비 및 배합 설계

2.1.1 실험 재료

본 연구에서는 전도성 그라우트를 구성하기 위해 그라우팅용 미립자 시멘트, 주문진사, 그리고 MWCNTs를 사용하였다. 사용된 시멘트는 비표면적이 6,000~8,000 cm²/g에 달하는 초미세 입자로 구성되어 있으며, 이는 그라우트의

Table 1. Physicochemical properties of fine and ultrafine cement

	Chemical Composition [%]					Blain [cm ² /g]	Average Particle Size [μm]
	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	CaO + MgO	Na ₂ O + K ₂ O	SO ₃		
Fine Cement	28.34	11.9	57.9	0.64	3.07	6,800	6±1
Ultrafine Cement	28.34	12.9	56.1	0.6	2.93	8,600	5±1

Table 2. Main morphological and quality characteristics of MWCNTs

Diameter [nm]	Length [nm]	Aspect Ratio	Purity [%]
15	10,000	666.67	> 99

Table 3. Experimental parameters for evaluating grout injectability

Mix ID	Ground Conditions	Grout Suspension Conditions		
		W/C	MWCNTs Mixing Ratio [%]	Type of Cement
W/C1-CNT0.0	Unsaturated	1	-	Ultrafine Cement
W/C2-CNT0.0	Unsaturated	2	-	Ultrafine Cement
W/C3-CNT0.0	Unsaturated	3	-	Ultrafine Cement
W/C3-CNT1.0	Unsaturated	3	1.0	Ultrafine Cement
W/C3-CNT0.5	Unsaturated	3	0.5	Ultrafine Cement
W/C3-CNT0.3	Unsaturated	3	0.3	Ultrafine Cement
W/C3-CNT0.1	Unsaturated	3	0.1	Ultrafine Cement
W/C3-CNT0.1	Saturated	3	0.1	Fine Cement
W/C3-CNT0.3	Saturated	3	0.3	Fine Cement
W/C3-CNT0.5	Saturated	3	0.5	Fine Cement
W/C3-CNT1.0	Saturated	3	1.0	Fine Cement

경화재로 활용되었다. 사용된 미립자 시멘트(쌍용 마이셈 6000), 초미립자 시멘트(쌍용 마이셈 8000)의 물리-화학적 물성은 Table 1과 같다. 미립자 시멘트는 일반 포틀랜드 시멘트(OPC)에 비해 작은 입자 크기를 가지며, 그로 인해 비표면적이 상대적으로 크고 미세 공극 침투 가능성이 우수한 것으로 보고되었다[21-23]. 그라우트 혼탁액에 전기전도성을 부여하기 위한 목적으로 사용된 MWCNTs는 탄소계 나노소재 중에서 종횡비와 전도성이 우수하여, 시멘트 내에서 낮은 혼입량으로도 연속적인 전도 네트워크를 형성할 수 있다. 또한, 우수한 감도와 경제성을 제공하며, 그라우트의 기계적 강도 저하를 최소화하면서 전기적 특성을 구현할 수 있다[24-26]. MWCNTs(카본나노텍 MWCNT99)의 주요 형상 및 품질 특성은 Table 2와 같다. 전도성 나노소재의 균일한 분산성과 그라우트의 유동 특성을 확보하기 위해 고성능 감수제(SP, 동남기업 3000S)가 사용되었다.

2.1.2 실험 지반의 선정 및 조성

국내 지반보강 연구에서 표준적으로 사용되는 주문진사 ($D_{50} = 0.45 \text{ mm}$, $C_u = 2.1$)를 활용하여 비포화 및 포화 조건에 따른 주입성을 평가하였다. 비포화 조건은 실온 보관된 자연 함수비 상태의 주문진사를 사용하였고, 포화 조건은

충분한 양의 물을 가하여 완전 포화 상태로 조성하였다. 전도성 그라우트 혼탁액은 물/시멘트비(W/C), MWCNTs의 혼입비를 주요 변수로 하여 주입성 평가 실험을 수행하였고, 이를 통해 주입성이 확보되는 조건을 선정하였다. 선정된 토사 및 전도성 그라우트 혼탁액의 조건을 채택하여, 본 실험인 수분 침투에 따른 전기적 특성을 분석하였다. 그라우트 주입성 평가의 실험 변수는 Table 3과 같다.

2.1.3 전도성 그라우트 혼탁액 배합 설계

본 연구에서는 전도성과 주입성을 동시에 확보하기 위하여, 전도성 그라우트 혼탁액의 배합을 최적화하였다. 사용된 주문진사의 밀도는 2.65 g/cm^3 이며, 공극비는 기존 문헌에서 사용한 0.46으로 설정하였다[27]. 전도성 그라우트 혼탁액의 배합은 해당 조건에서 최적 주입성을 확보하기 위해 선행연구의 배합 설계법을 참조하여 결정하였다[18]. 주요 변수는 W/C와 MWCNTs의 혼입비로 설정하였다.

일반적으로 그라우트의 W/C는 구조물용 콘크리트보다 높은 범위로 설계된다. 이는 지반의 미세 공극에 대한 침투성을 확보하고, 현장 주입 작업의 유동성을 개선하기 위함이다. 실제로 초미립자 시멘트나 미립자 시멘트 그라우트의 경우 W/C가 1.5~2.0인 경우에 침투성과 차수효과가 가

장 우수하다는 연구 결과가 있으며[23], 고유동성 또는 침투성 극대화가 필요한 경우 W/C 3.0까지 적용할 수 있다고 알려져 있다[27]. 본 연구에서도 유동성을 확보하는 동시에 다양한 실험 조건에 따른 주입성을 평가하기 위해 W/C 1.0, 2.0, 3.0의 배합을 선정하였다.

전도성 확보를 위한 핵심 변수인 MWCNTs 혼입비는 선행연구에서 제시된 임계 혼입비를 고려하여 0.1, 0.3, 0.5, 1.0%로 증가시키며 실험을 수행하였다[10,12]. 일반적으로 혼입비는 바인더 기준으로 설정되나, 본 연구에서는 주문진사로 채워진 단위부피(0.54 m^3)를 제외한 잔여 공간(0.46 m^3)을 기준으로 혼입비를 산정하였다. 이를 통해 MWCNTs의 절대량이 지나치게 적어지는 것을 방지하고, 균일한 전도성 경로의 형성을 유도하고자 하였다. 또한, MWCNTs의 분산을 위하여 고성능 감수제를 MWCNTs 대비 질량비 1.5~4.0 수준으로 사용할 경우, 시멘트 복합재의 기계적 성능이 유의미하게 향상됨을 보였으며[26], 이는 MWCNTs의 효과적인 분산을 의미한다. 본 연구에 사용된 고성능 감수제는 고형분 30%, 수용액 70%의 조성을 가지며[14], 고성능 감수제 적용 시 수분이 혼합물 내에 추가로 유입되어 단위수량이 증가하게 된다. 예를 들어, W/C3-CNT1.0 배합에서 MWCNTs 질량의 4배에 해당하는 감수제를 첨가하면 수용액에 의해 단위수량이 약 15.4 kg/m^3 증가하여 W/C가 기존 3.0에서 3.12로 높아지게 된다. 이에 따라 혼합물의 점성 및 분산 안정성 저하를 방지하고자, 본 연구에서는 고성능 감수제의 사용량을 MWCNTs 대비 2:1 질량비로 제한하여 적용하였다.

지반 조건이 포화 주문진사인 경우에는 초미립자 시멘트 대신 미립자 시멘트를 적용하였다. 지반 조건이 비포화인 경우보다 상대적으로 포화토 조건에서 주입성이 충분히 확보되는 점을 고려하여, 고가의 초미립자 시멘트 대신 경제성과 자재 수급 측면에서 보다 유리한 미립자 시멘트를 사용하는 것이 적절하다고 판단하였다. 배합조건은 Table 4와 같다.

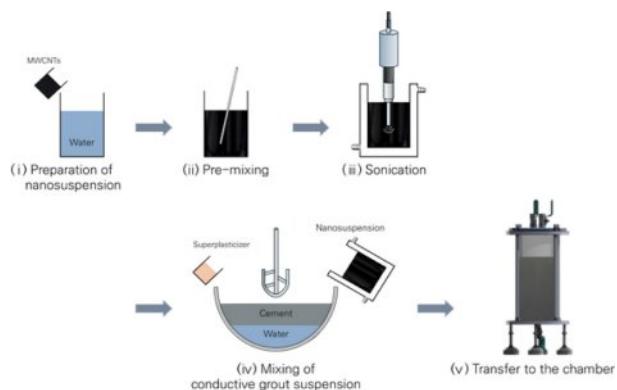


Fig. 1. Preparation of conductive grout suspension

전도성 그라우트 혼탁액의 제조는 Fig. 1과 같이 진행되었다. MWCNTs의 분산성 향상을 위해 초음파 분산기(Qsonica Q500)를 사용하였다. 주파수 20 kHz, 출력 250 W 조건에서, 15초 작동/15초 정지(pulse mode)를 반복하는 방식으로 총 1시간 동안 분산을 수행하였다. 이후, 분산된 MWCNTs 혼탁액에 미립자 시멘트, 물, 감수제를 순차적으로 혼합하여 전도성 그라우트 혼탁액을 제조하였다.

2.2 실험 장치 및 방법

2.2.1 실험 장치 구성 및 수분 침투 실험 방법

본 연구에서 전도성 그라우트 실험체를 제작하기 위해 설계된 그라우트 주입 장비는 Fig. 2(a)와 같이 두 개의 챔버와 공압 공급 및 조절 장치로 이루어져 있다. 챔버는 아크릴 파이프와 이를 지지하는 철재 구조(바닥판과 지지틀)로 형성된 구조이다. 각각의 챔버에는 지반 조건을 모사한 토사와 전도성 그라우트 혼탁액을 채워 Fig. 2(b)와 같이 주입을 준비하였다. 이후 공기 압축기(air compressor)와 압력 조절기(regulator)로 구성된 공압 공급 및 주입 조절 장치를 활용하여 전도성 그라우트 혼탁액 챔버에서 주입관을 지나 토사 챔버로 전도성 그라우트 혼탁액을 주입하였으며, 토

Table 4. Mix proportions of conductive grout suspensions

Mix ID	Unit Mix Proportions [kg/m ³]					
	Grout Suspension			Jumunjin Sand	Superplasticizer (SP)	
	Paste		Conductive Nanomaterial			
	Water	Cement	MWCNTs			
W/C3-CNT1.0	412	137	5.520	1431	11	
W/C3-CNT0.5	414	138	2.760	1431	6	
W/C3-CNT0.3	415	138	1.656	1431	3	
W/C3-CNT0.1	416	139	0.552	1431	1	
W/C3-CNT0.0	416	139	0.000	1431	0	
W/C2-CNT0.0	397	198.49	0.000	1431	0	
W/C1-CNT0.0	349	349	0.000	1431	0	

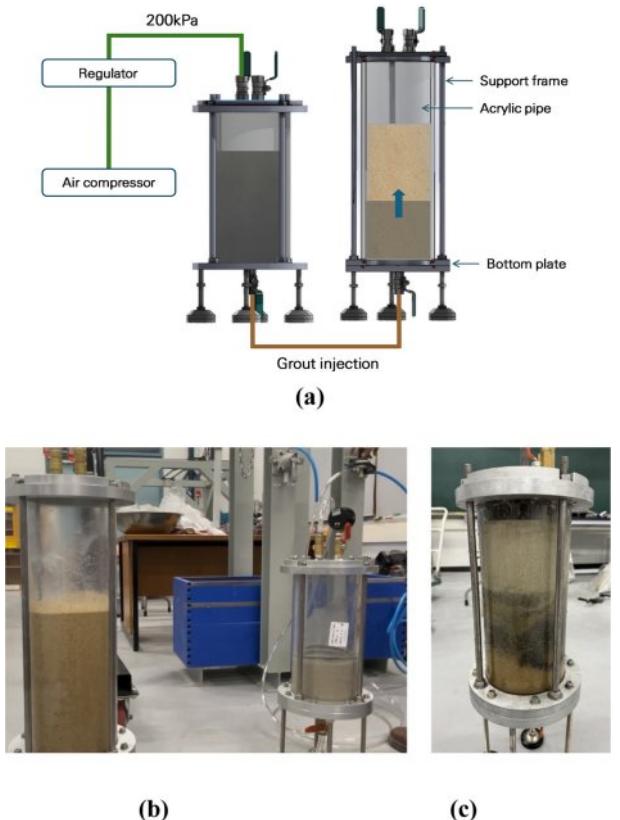


Fig. 2. Grouting injection test apparatus and preparation process: (a) schematic diagram of the injection test; (b) overall view of the injection test setup; (c) example of a soil chamber after injection

사 챔버 내 지반 통과 후 챔버 위쪽 관을 통해서 배출된다. Fig. 2(c)는 전도성 그라우트 혼탁액의 주입이 완료된 토사 챔버의 예이다. 그라우트 주입 장치의 설계압력은 300 kPa이고, 재료의 점도 및 장비 특성을 고려하여 실제 주입 시에는 200 kPa로 조정된 압력으로 주입을 실시하였다. 주입이 완료된 후 챔버의 철재 구조와 아크릴 파이프를 분리하여 전극을 배치한 후 70°C의 건조로에서 5일간 양생을 실시하였다. 그라우트가 경화된 후 아크릴 파이프를 분리하여, 수분 침투 실험을 진행하였다.

2.2.2 수분 침투 감지 성능 비교 실험

전도성 그라우트 실험체의 수분 감지 특성은 전극의 형상 및 배치에 좌우될 수 있다. 본 연구에서는 전극의 형상(판(P) 및 막대(B))과 삽입 깊이(S) 그리고 간격(D)에 따른 전도성 그라우트 실험체의 수분 침투 감지 특성을 측정 및 비교하였다. 실험에 사용된 실험체는 지름 150 mm, 높이 250 mm의 원통형으로 제작된 챔버에서 주입되었으며, 이와 같은 형상에 적합하도록 전극 조건이 설정되었다. 전극의 종류는 구리판($20 \times 200 \times 2$ mm)과 구리막대($\Phi 4 \times 300$ mm)가 사용되었으며, 전극의 삽입 깊이는 실험체의 높

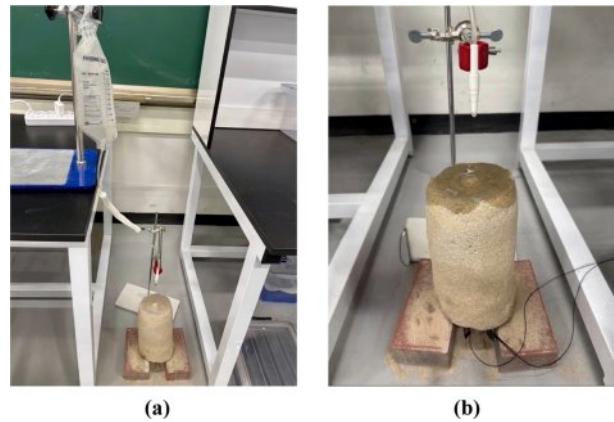


Fig. 3. Overview of the water infiltration test: (a) configuration of the constant-rate water infiltration system; (b) example of the water infiltration test in progress

이의 약 40%, 80%에 해당하는 100 mm와 200 mm로 설정되었다. 전극의 간격은 수분이 침투되는 중앙부에서 수분 침투가 감지되는 전극까지의 거리를 변수로 설정하였다. 실험체의 중심을 기준으로 수평선상에 대칭 배치되었으며 전극 간의 거리, 간격은 21 mm, 64 mm이다.

Fig. 3(a)와 같이 일정한 속도의 수분 침투 조건을 구현하기 위해 시스템을 구성하였고[18], 분당 142 mL의 속도로 전도성 그라우트 실험체 상부에 급수하였다. 또한, Fig. 3(b)와 같이 경화된 전도성 그라우트 실험체의 하부에는 전극이 삽입되어 있으며, 삽입된 전극은 DAQ970A 장비와 연결되어 실시간으로 저항을 측정할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 주입성능 분석

전도성 그라우트의 현장 적용 가능성을 높이기 위해서는 주입성이 확보되어야 한다. 따라서 수분 침투 실험 전에 Table 5의 변수에 따른 주입 성능을 평가하고, 주입성 확보를 위한 최적의 배합 조건을 도출하였다. 먼저 MWCNTs가 혼입되지 않은 혼탁액을 대상으로, W/C에 따른 주입성 평가를 수행하였다.

W/C 조건에 따른 주입성 한계를 검토하기 위해, 지반 조건이 비포화 상태일 때의 순수 시멘트 혼탁액을 대상으로 주입성 평가를 수행하였다. Fig. 4(a)와 같이 W/C 3.0 조건에서는 모든 혼탁액이 성공적으로 주입된 반면, Fig. 4(b)와 같이 W/C 1.0과 2.0의 조건에서는 주입 깊이가 1cm 미만에 불과하여 실질적인 주입이 이루어지지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 W/C가 낮을수록 점성이 증가하고 유동성이 저하되어 공극을 통한 침투가 제한되었기 때문이다. 또한, MWCNTs 혼입 시 혼탁액의 유동성이 더욱 감소할 것을 감안하여 본 연구에서의 혼탁액 W/C는 3.0으로 설정하였다.

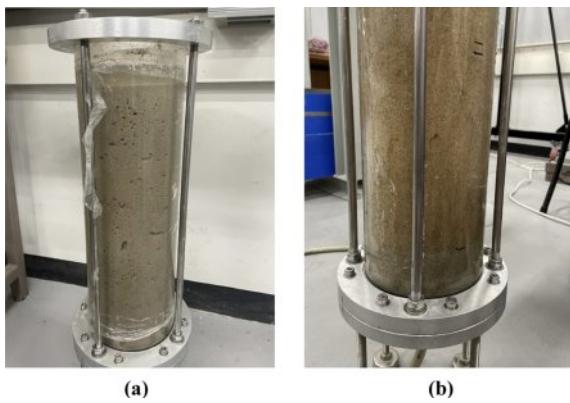


Fig. 4. Evaluation of the injectability of neat cement suspension under unsaturated conditions: (a) $W/C = 3.0$; (b) $W/C = 2.0$

선정된 W/C 3.0 배합에 1.0%의 MWCNTs를 혼입한 혼탁액은 지반 조건이 비포화인 경우 주입이 불가능하였다. 이는 전도성 나노소재의 혼입으로 인해 유동성이 급격히 저하된 결과로 해석된다. 이에 따라, 혼입비를 0.5%, 0.3%, 0.1% 까지 단계적으로 감소시키며 주입성 실험을 수행하였다. 그 결과, MWCNTs가 0.3%, 0.1% 혼입된 경우에도 주입 깊이는 1 cm 미만에 불과하였으며, 소량 혼입 시에도 공극 침투가 어려운 것으로 나타났다. 전도성 확보를 위해 MWCNTs 혼입은 필수적이므로 주입성 확보를 위한 지반 조건의 개선이 필요하였다.

기존 비포화 주문진사 조건에서는 전도성 그라우트 혼탁액의 주입이 제한되었기 때문에 지반 조건을 포화 상태로 변경하였다. 포화토 조건의 설정 근거는 흙의 함수 특성과 관련이 있다. Fig. 5는 일반적인 토양의 함수특성곡선으로 흡인력과 체적 함수비와의 상관관계를 보여준다[28]. 여

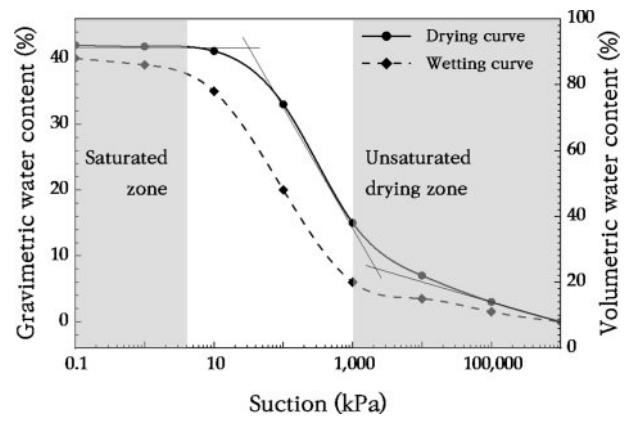


Fig. 5. Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) [28]

기서 흡인력이란 흙이 물을 끌어당기거나 유지하려는 힘이며, 흙 입자와 간극수 사이의 표면장력에 의해 발생한다. 함수비가 증가할수록, 즉, 포화 영역에서는 흡인력이 현저히 감소한다. 반대로 흙의 건조도가 높으면 흡인력이 증가하는데, 이는 본 실험에서의 혼탁액 주입에 부정적 영향을 미칠 수 있다. 따라서 포화토에서 흡인력이 현저히 낮아지고 간극수에 의한 입자 간 마찰 저항 감소 효과로 인해 혼탁액 침투가 더 원활하게 이루어진다. 국내 터널 굴착 현장에서는 연약지반 또는 사질토 지반이 상당 구간에서 확인되며, 지하수위가 굴착면보다 높은 사례가 다수 보고된 바 있다[29]. 따라서 포화토 조건은 실제 현장 조건을 잘 반영한 지반 상태로, 지하수위 하부 지반의 자연 상태를 충실히 모사하는 데 적합하다고 판단되어 실험에 적용하였다.

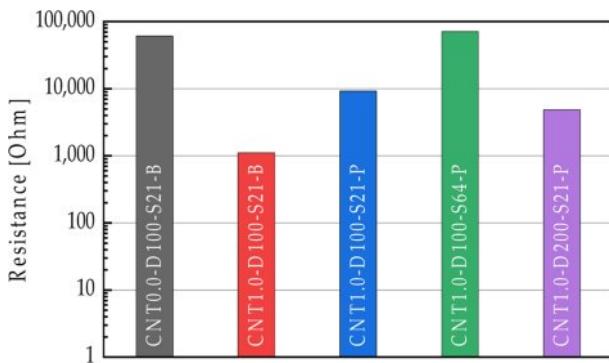
이러한 특성을 반영하여, 포화토 및 W/C 3.0 조건에서 MWCNTs의 혼입비를 단계적으로 증가시키며 주입성을 재평가하였다. 이 과정에서 주입이 성공적으로 이루어졌으며,

Table 5. Experimental variables and results of injectability tests

Ground Conditions	Ground Conditions	Suspension Conditions			Results of Injectability Test
		W/C	MWCNTs Mixing Ratio [%]	Results of Injectability Test	
W/C1-CNT0.0	Unsaturated	1	-	Ultrafine Cement	Partial injection (< 1 cm)
W/C2-CNT0.0	Unsaturated	2	-	Ultrafine Cement	Partial injection (< 1 cm)
W/C3-CNT0.0	Unsaturated	3	-	Ultrafine Cement	Complete injection
W/C3-CNT1.0	Unsaturated	3	1.0	Ultrafine Cement	No injection
W/C3-CNT0.5	Unsaturated	3	0.5	Ultrafine Cement	No injection
W/C3-CNT0.3	Unsaturated	3	0.3	Ultrafine Cement	Partial injection (< 1 cm)
W/C3-CNT0.1	Unsaturated	3	0.1	Ultrafine Cement	Partial injection (< 1 cm)
W/C3-CNT0.1	Saturated	3	0.1	Fine Cement	Complete injection
W/C3-CNT0.3	Saturated	3	0.3	Fine Cement	Complete injection
W/C3-CNT0.5	Saturated	3	0.5	Fine Cement	Complete injection
W/C3-CNT1.0	Saturated	3	1.0	Fine Cement	Complete injection

Table 6. Experimental variables of water infiltration tests

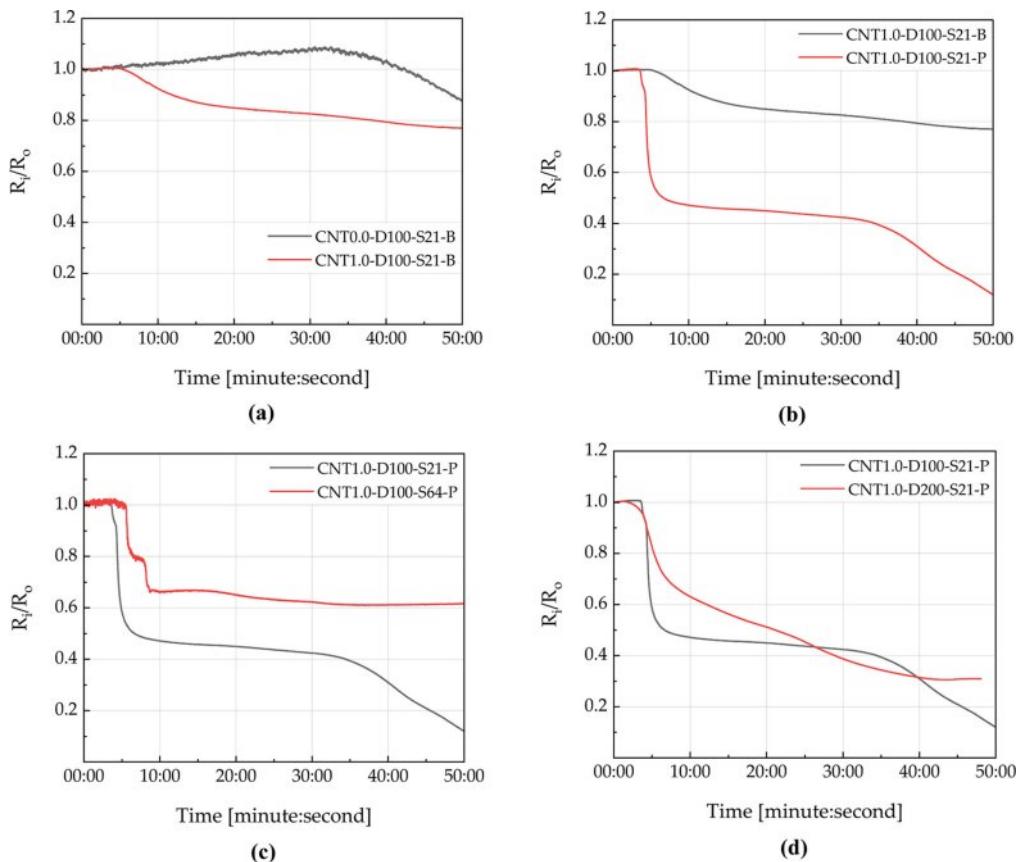
Test ID	W/C	MWCNTs Mixing Ratio[%]	Electrode Type	Electrode Depth(D) [mm]	Electrode Spacing(S) [mm]
CNT0.0-D100-S21-B	3	-	bar	100	21
CNT1.0-D100-S21-B	3	1.0	bar	100	21
CNT1.0-D100-S21-P	3	1.0	plate	100	21
CNT1.0-D100-S64-P	3	1.0	plate	100	64
CNT1.0-D200-S21-P	3	1.0	plate	200	21

**Fig. 6.** Comparison of initial resistance values of conductive grout specimens

이를 통해 MWCNTs 혼입으로 인해 증가한 주입 압력을 포화토 조건을 적용하여 효과적으로 줄일 수 있음을 확인하였고, 전도성 그라우트가 현실적인 지반조건에서 기능할 수 있음이 실험적으로 입증되었다. Table 5는 혼탁액 및 지반 조건의 종류에 따른 사전 주입성 실험 결과를 정리한 것이다. 주입성이 우수한 포화토 조건을 활용하여, 전도성 그라우트 실험체를 제작하였고, 이는 수분 침투 실험의 기준 배합 조건으로 활용되었다.

3.2 수분 침투에 따른 전기적 특성

Fig. 6은 제작된 그라우트 실험체의 초기 저항값을 나타낸 그래프이다. 그라우트 실험체의 W/C는 3.0으로 동일하

**Fig. 7.** Variation of relative resistance (R_t/R_0) with water infiltration time: (a) effect of MWCNTs incorporation; (b) effect of electrode type; (c) effect of electrode spacing; (d) effect of electrode depth

며, Table 6과 같이 MWCNTs 혼입비, 전극 깊이(D), 전극 간격(S), 전극 종류의 순서로 변수 이름을 명명하였다. 예를 들어, CNT1.0-D100-S21-B는 MWCNTs가 1.0% 혼입된 그라우트에 전극 깊이 100 mm, 전극 간격 21 mm로 구리막대가 전극으로 삽입된 경우이다.

CNT0.0-D100-S21-B의 초기 저항은 $60,942 \Omega$ 이며, MWCNTs 가 혼입된 CNT1.0-D100-S21-B의 $1,106 \Omega$ 보다 명확히 높은 저항을 보이며, MWCNTs 혼입에 따른 전도성 증가 효과를 보여주었다. 동일한 조건에서 전극이 구리판인 경우(CNT1.0-D100-S21-P)는 초기 저항값이 $9,237 \Omega$ 으로 구리막대 $1,106 \Omega$ 보다 높은 저항을 보였다. 전극 종류가 구리판인 조건에서 전극 간격 64 mm일 때(CNT1.0-D100-S64-P)는 $71,172 \Omega$ 으로 이는 전극 간격 21 mm(CNT1.0-D100-S21-P)의 초기 저항값인 $9,237 \Omega$ 보다 높은 저항을 보였다. 전극 깊이가 상대적으로 깊은 200 mm인 경우(CNT1.0-D200-S21-P)는 $4,841 \Omega$ 으로 더 낮은 저항을 보였다. 각 실험 조건 간의 초기 저항값에 큰 차이가 나타남에 따라 수분 감지 성능은 상대 저항(R/R_0)으로 표현하여 비교하였다. 여기서 R 는 시간에 따라 변화한 저항값 그리고 R_0 는 초기 저항값을 의미한다.

Fig. 7(a)는 MWCNTs 혼입 여부 및 수분 침투 시간에 따른 상대 저항값의 변화를 나타낸다. 두 실험체의 조건은 MWCNTs 혼입 여부를 제외한 모든 조건이 동일하며, 전극은 구리막대를 사용하였다. MWCNTs가 혼입되지 않은 경우 약 33분 후에 수분 감지로 인한 저항이 감소하기 시작하였으며, MWCNTs 1.0%를 혼입한 그라우트는 7분 11초에 수분을 감지하였다. 여기서 주목할 점은 MWCNTs가 없는 경우, 수분 감지로 인한 저항 감소 폭이 완만하지만 MWCNTs 1.0% 혼입한 경우, 수분 감지로 인한 저항 감소가 가파르게 발생하였다. MWCNTs를 혼입 시 수분 감지 시점이 앞당겨지고, 저항 변화가 급격하게 보이는 양상은 전도성 네트워크 형성에 따른 결과로 해석된다. 이는 그라우트 재료 자체에 센서 기능을 부여할 수 있음을 의미하며, 전도성 나노소재를 혼입하여 내부에서 초기 수분 탐지가 가능한 자가진단형 재료로의 응용 가능성을 시사한다.

Fig. 7(b)에는 전극의 종류와 수분 침투에 따른 그라우트의 상대 저항 변화를 나타내었다. 실험 조건은 전극의 종류를 제외하면 모두 동일하다. 구리막대의 경우, 수분 침투 시작 후 약 7분 후에 수분 감지가 이루어져 저항이 감소하기 시작하였으며, 구리판은 더 이른 시점인 약 5분에 수분 감지가 이루어졌다. 즉, 구리판 형태가 수분 감지에 더욱 용이한 특성을 보였다. 또한, 구리판은 수분 감지로 인한 저항 감소 폭이 현저하게 크며, 이는 전극의 접촉 면적 차이에 의한 것으로 판단된다. 구리막대의 경우 직경 4 mm이며, 구리판의 폭은 20 mm으로 구리막대 보다 구리판을 사용하였을 때 전도성 그라우트가 주입된 공간에서 전극과의 접촉 면적이 크므로 수분 감지 민감도가 증가한 것으로 판단된다.

전극 간격에 따른 그라우트의 상대 저항 변화는 Fig. 7(c)와 같다. 전극 간격이 21 mm인 경우에는 약 5분, 64 mm인 경우에는 약 8분경에 수분 감지가 이루어져 경미한 차이를 보였다. 반면, 상대 저항의 수렴 값에서는 차이를 보였는데, 전극 간의 간격이 넓은 경우에 저항 변화율의 수렴 값이 비교적 높은 것으로 확인되었다. 이는 전극의 간격이 증가함에 따라 전류가 통과해야 하는 경로가 길어지고, 이로 인해 최종 수렴 값이 높아진 것으로 판단된다.

전극의 깊이에 따른 그라우트의 수분 감지 성능은 Fig. 7(d)와 같다. 결과적으로 전극 깊이에 따른 수분 감지 시기에는 뚜렷한 차이는 나타나지 않았으나, 저항 변화의 경향에서는 일부 차이가 관찰되었다. 전극 깊이 200 mm 조건의 경우, 수분 감지 이후 완만하게 저항이 감소하는 것으로 보인다. 이는 전극 깊이가 깊을수록 삽입된 전극이 감지하는 영역이 더 넓고, 해당 구간 전체가 수분에 의해 포화하기까지 더 많은 시간과 침투량이 요구되기 때문으로 해석된다. 반대로 전극 깊이인 100 mm 조건에서는 상대적으로 얕은 구간의 수분 포화 상태에 도달하면 되기 때문에 초기 수분 유입에 따라 빠르게 저항이 감소하여 수렴하는 경향을 보였다.

각 실험 조건에 따른 결과를 비교한 결과, 전극의 종류, 간격, 삽입 깊이 그리고 전도성 나노소재의 혼입 여부가 수분 침투 감지 성능에 유의미한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 특히 MWCNTs의 혼입은 수분 침투 감지 시점을 앞당기고, 저항 변화의 민감도를 증가시키는데 효과적인 요소로 작용하였다. 또한, 전극 접촉 면적이 큰 구리판 전극은 감지 시점이 빠르고 저항 변화 폭도 크게 나타나 감지 효율 향상에 기여하였다. 전극 간격과 깊이는 감지 시점보다는 저항 변화 경향 및 수렴값에 영향을 주는 요인으로 확인되었다. 따라서, 수분 침투 감지를 위한 전극 시스템 설계 시, MWCNTs 1.0% 혼입 조성과 구리판 전극을 적용하는 것이 가장 효과적인 조합으로 판단되며, 향후 실제 구조물에 적용 시에는 전극 배치 형상, 배치 수 및 간격에 대한 추가적인 최적화 연구가 필요하다.

이러한 정성적 분석으로 실험 조건에 따른 수분 감지 성능의 차이를 확인할 수 있었으나 감지 이후 저항 변화의 반응성과 민감도를 명확히 비교하기 위해서는 추가적인 정

Table 7. Detection time of water infiltration and relative resistance change rate

Test ID	Detection Time [min:s]	Rate of Change in Relative Resistance
CNT0.0-D100-S21-B	33:05	-0.01002
CNT1.0-D100-S21-B	06:38	-0.01298
CNT1.0-D100-S21-P	03:42	-0.06781
CNT1.0-D100-S64-P	03:33	-0.04796
CNT1.0-D200-S21-P	02:58	-0.03278

량 지표가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 상대 저항의 최댓값을 기준으로 10% 감소한 시점을 감지 기준으로 정의하였다. 상대 저항이 최댓값에 도달한 이후 감지 기준까지의 평균 변화율을 산정하여, 감지 민감도를 정량화하기 위한 분석 지표로 활용하였다. Table 7은 수분 침투 감지 시점 및 상대 저항의 변화율을 정리한 결과이다. MWCNTs를 혼입하지 않은 경우는 수분 감지 시점이 40분을 초과하였으며, 저항 변화율 또한 완만하게 나타났다. 반면, MWCNTs를 1.0% 혼입한 실험체는 전반적으로 감지 시점이 단축되었고 구리판 전극을 사용한 경우 R/R_0 의 변화율이 -0.06781으로 가장 급격하게 저항이 감소해 수분 감지 반응성이 가장 우수했음을 보여준다.

수분 감지 시점과 상대 저항 변화율을 종합적으로 고려한 결과, MWCNTs를 1.0% 혼입한 전극 깊이 100 mm, 전극 간격 21 mm인 구리판 조건(CNT1.0-D100-S21-P)이 가장 우수한 감지 성능을 나타냈다. 본 조건은 감지 시점이 빠르면서도 상대 저항 변화율이 가장 급격하게 나타나, 수분 감지에 대한 반응성과 민감도가 모두 뛰어남을 입증하였다. 이는 주입된 그라우트 내부에 MWCNTs 혼입으로 인한 전도성 네트워크가 균일하고 연속적으로 형성되어 있음을 의미한다. 이러한 분석을 통해, 본 연구에서 제안한 기준이 감지 반응 속도와 민감도를 동시에 평가하고 정량적으로 비교하는데 효과적임을 확인할 수 있다. 나아가 본 연구는 MWCNTs 기반 전도성 그라우트를 활용한 기존 연구들과 달리, 실제 지반 주입 환경을 반영하여 다양한 전극 조건 및 구조적 제약 요인을 고려한 점에서 차별성을 갖는다. 또한, 제안된 분석 방법은 감지 반응성에 대한 객관적이고 재현 가능한 비교를 가능하도록 하였으며, 이는 향후 자가진단형 그라우트 시스템의 설계 및 적용 기준 마련에 있어 실질적인 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

3.3 현장 적용 시나리오 제안

전도성 그라우트를 실제 지반 구조물에 적용하기 위해서는, 기존의 단순 보강재 개념을 넘어 센서 기능을 하는 전도성 그라우트를 특정 공법과 연계하여 활용하는 방식이 필요하다. 지반 구조물의 시공 과정에서 널리 활용되는 록볼트, 강관 마이크로파일, 그리고 지하수 차수를 위한 커튼 그라우팅 등의 공법은 전도성 그라우트 혼탁액을 기존 주입재 대신 적용할 수 있는 공법이다. 이러한 공법들은 공통적으로 주입공을 통해 일정 압력으로 지중에 주입하고, 경화 후 구조체로서 기능하는 절차로 구성된다. 이때, 전도성 나노소재가 혼입된 전도성 그라우트를 기존 그라우트 대신 사용하고, 추가적인 전극을 삽입하거나 각 공법에서 사용되는 록볼트, 강관, 앵커 등을 전극으로 활용함으로써, 해당 구간이 수분 감지를 위한 내장형 센서 모듈로 사용될 수 있다.

이러한 방식을 사용할 경우 그라우트의 주입과 동시에

수분 침투 감지 시스템이 형성되므로 별도의 부착형 센서 설치가 불필요하고 구조체와 일체화되기 때문에 장기적인 내구성도 확보할 수 있다. 또한, IoT 기반 무선 계측 시스템과 연계할 경우, 전극 간 저항값을 주기적으로 자동 측정하여 데이터를 클라우드 서버로 전송하고 스마트 인프라 관리 플랫폼과 실시간으로 연동할 수 있다. 특히, 누수 위험성이 높은 터널 라이닝 주변, 접근 터널부, 지하차수 구간 등에 본 전도성 그라우트를 적용하면 지속적인 수분 침투 감지 및 초기 경보 체계 구축을 통해 구조물의 성능 유지 및 장기 내구성 확보에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 조성된 지반에 그라우트를 주입하기 위한 장비를 구축하여 전도성 그라우트 혼탁액의 주입성을 평가하고 전도성 그라우트 혼탁액이 주입된 실험체의 수분 감지 성능을 평가하였다.

1. 비포화 상태의 주문진사로 조성된 지반조건은 MWCNTs 가 혼입되지 않을 경우, W/C 3.0에서 우수한 주입성을 보였다. MWCNTs가 혼입될 경우, 혼탁액의 유동성이 현저히 감소하여 그라우트 주입성이 결여되었다. 주문진사를 포화토로 조성할 경우, 혼탁액의 주입성이 크게 개선되었다. 따라서, 본 연구에서는 포화 주문진사 지반 조건을 대상으로 W/C 3.0, MWCNTs 1.0%의 전도성 그라우트 혼탁액을 주입하여 전도성 그라우트 실험체를 제작하였다.

2. MWCNTs의 혼입은 그라우트의 전도성을 크게 개선하였으며, 수분 감지 시기를 앞당길 수 있었다. 또한, 감지 후 저항의 변화 폭이 크고 급격하게 발생하여 전도성 경로의 형성이 원활하게 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

3. 전극의 형태에 따라서는 구리막대보다 구리판을 전극으로 사용했을 때 급격한 저항 감소를 보여, 접촉면적 증가가 감지 민감도 향상에 기여함을 확인하였다. 전극 간격이 증가하면 전기적 통로 형성 구간이 증가하여 비교적 더 많은 수분의 침투가 이루어진 후에 상대 저항값이 감소해 감지 시점이 지연되었다. 전극의 깊이는 감지 시점에 큰 차이를 주지 않았으나, 삽입된 깊이가 깊을수록 포화하는 데 소요되는 시간이 더 길어 저항 변화가 완만하게 진행되었다.

4. 상대 저항이 최댓값에서 10% 감소한 지점을 기준으로 정의한 감지 시점까지의 변화율을 분석함으로써, 정량적 감지 민감도 지표를 제안하였다. MWCNTs를 1.0% 혼입한 전극 깊이 100 mm, 전극 간격 21 mm인 구리판 조건은 빠른 감지 시점과 높은 상대 저항 변화율을 보여, 본 연구에서 고려한 조건 중 가장 우수한 감지 성능을 나타낸 것으로 분석되었다.

5. 전도성 그라우트의 현장 적용 가능성을 구체화하기 위해 록볼트, 강관 마이크로파일, 커튼 그라우팅 등 기존 지반 보강 공법과 연계한 적용 시나리오를 제안하였다. 향후

에는 다양한 지반 조건 및 구조 형식에 따른 전극 배치 최적화와 실규모 실험을 통한 현장 적용성 검증이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(해저철도 시스템 안전 및 경제성 향상 기술 개발, PK2501A3)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Yu, P., Wu, H., Liu, C., and Xu, Z., "Water Leakage Diagnosis in Metro Tunnels by Integration of Laser Point Cloud and Infrared Thermal Imaging," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-3, 2018, pp. 2167-2171.
2. Huang, H., Cheng, W., Zhou, M., Chen, J., and Zhao, S., "Towards Automated 3D Inspection of Water Leaks in Shield Tunnel Linings Using Mobile Laser Scanning Data," *Sensors*, Vol. 20, No. 22, 2020.
3. Chen, J., Yu, X., Liu, S., Chen, T., Wang, W., Jeon, G., and He, B., "Tunnel SAM Adapter: Adapting Segment Anything Model for Tunnel Water Leakage Inspection," *Geohazard Mechanics*, Vol. 2, No. 1, 2024, pp. 29-36.
4. Wang, P., and Shi, G., "Image Segmentation of Tunnel Water Leakage Defects in Complex Environments Using an Improved Unet Model," *Scientific Reports*, Vol. 14, No. 1, 2024.
5. Choi, S.K., Back, S.H., An, J.B., and Kwon, T.H., "Geotechnical Investigation on Causes and Mitigation of Ground Subsidence during Underground Structure Construction," *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 18, No. 2, 2016, pp. 143-154.
6. Cho, S.H., and Lee, K.S., "Analysis of Ground Subsidence Causes and Case Studies in Urban Areas: Focusing on Overseas Examples," *Journal of Disaster Prevention*, Vol. 16, No. 3, 2014, pp. 16-23.
7. Han, D.H., Kang, L.H., Thayer, J., and Farrar, C., "Manufacturing Method for Sensor-Structure Integrated Composite Structure," *Composites Research*, Vol. 28, No. 4, 2015, pp. 155-161.
8. Kwon, D.J., Wang, Z.J., Choi, J.Y., Shin, P.S., and Park, J.M., "A Study of Damage Sensing and Repairing Effect of CNT Nanocomposites," *Composites Research*, Vol. 27, No. 6, 2014, pp. 219-224.
9. Wang, Z.J., Kwon, D.J., Gu, G.Y., Kim, H.S., Kim, D.S., Lee, C.S., and Park, J.M., "Evaluation of Mechanical Properties and Damage Sensing of CNT-Polypropylene Composites by Electro-Micromechanical Techniques," *Composites Research*, Vol. 26, No. 1, 2013, pp. 1-6.
10. Lee, S.-J., You, I., Zi, G., and Yoo, D.-Y., "Experimental Investigation of Piezoresistive Properties of Cement Composites with Hybrid Carbon Fibers and Nanotubes," *Sensors*, Vol. 17, No. 11, 2017, Article No. 2516.
11. Lee, H., Park, S., Park, S., and Chung, W., "Enhanced Detection Systems of Filling Rates Using Carbon Nanotube Cement Grout," *Nanomaterials*, Vol. 10, No. 1, 2019.
12. Yoo, D.-Y., You, I., Zi, G., and Lee, S.-J., "Effect of Carbon Nanomaterial Type and Amount on Self-Sensing Capacity of Cement Paste," *Measurement*, Vol. 134, 2019, pp. 750-761.
13. Lee, S.-J., You, I., Kim, S., Shin, H.-O., and Yoo, D.-Y., "Self-Sensing Capacity of Ultra-High-Performance Concrete Containing Steel Fibers and Conductive Powders in Tension," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 125, 2022, Article No. 104331.
14. You, I., Yoo, D.-Y., Kim, S., Kim, M.-J., and Zi, G., "Electrical and Self-Sensing Properties of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete with Carbon Nanotubes," *Sensors*, Vol. 17, No. 10, 2017, Article No. 2481.
15. Yoo, D.-Y., You, I., Youn, H., and Lee, S.-J., "Electrical and Piezoresistive Properties of Cement Composites with Carbon Nanomaterials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 52, No. 24, 2018, pp. 3325-3340.
16. Hong, G., Choi, S., Yoo, D., Oh, T., Song, Y., and Yeon, J. H., "Moisture Dependence of Electrical Resistivity in Under-percolated Cement-based Composites with Multi-walled Carbon Nanotubes," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 16, 2021, pp. 47-58.
17. Zhang, L., Ding, S., Han, B., Yu, X., and Ni, Y., "Effect of Water Content on the Piezoresistive Property of Smart Cement-based Materials with Carbon Nanotube/nanocarbon Black Composite Filler," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 119, 2019, pp. 8-20.
18. Lee, S., Park, J., Sung, J., Kim, B., Lee, H. U., and You, I., "Conductive Grout with Multiwalled Carbon Nanotubes for Water Cut-off Self-monitoring in Underground Tunnels," *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2025, [online published].
19. Zhou, M., Fan, F., Zheng, Z., and Ma, C., "Modeling of Grouting Penetration in Porous Medium with Influence of Grain Distribution and Grout-Water Interaction," *Processes*, Vol. 10, No. 1, 2021.
20. Zhou, Z., Zang, H., Wang, S., Du, X., Ma, D., and Zhang, J., "Filtration Behaviour of Cement-based Grout in Porous Media," *Transport in Porous Media*, Vol. 125, No. 3, 2018, pp. 435-463.
21. Markou, I.N., Christodoulou, D.N., and Drouidakis, A.I., "Injections of Microfine Cement Grouts into Sand Columns for Penetrability and Effectiveness Evaluation," *Proceedings of the ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement (IS-GI 2012)*, Brussels, Belgium, May 31-June 1, 2012, pp. 291-301.
22. Yoon, I.K., Moon, J.H., and Kim, Y.G., "Evaluation of High-Viscosity Grouting Injection Performance for Reinforcement of Rock Joint in Deep-Depth Tunnels," *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 25, No. 5, 2024, pp. 15-19.
23. Jeoung, J.H., Hwang, S.P., Lee, J.H., and Lee, T.H., "The Study on Evaluation of Injection Performance in Micro Crack Depending on Viscosity of Grouting Material," *Journal of the Korean Society for Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 5, 2016, pp. 239-245.

24. Lee, D.J., Ryu, S.W., and Ku, B.C., "A Review of Carbon-Reinforced Carbon Nanotube Fibers Composites," *Composites Research*, Vol. 32, No. 3, 2019, pp. 127-133.
25. Chhun, K.T., and Yune, C.Y., "Laboratory Evaluation of Grouted Bulb Region Using Cross-Hole Electrical Resistivity Tomography," *Tunnel and Underground Space*, Vol. 32, No. 2, 2022, pp. 105-116.
26. Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., and Shah, S. P., "Highly Dispersed Carbon Nanotube Reinforced Cement Based Materials," *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 7, 2010, pp. 1052-1059.
27. Kim, B.K., *Effect of Oscillatory Injection to Behavior of Cement-Based Permeation Grouting*, Ph.D. Dissertation, Korea University, 2018.
28. Eyo, E. U., Ng'ambi, S., and Abbey, S. J., "An Overview of Soil-water Characteristic Curves of Stabilised Soils and Their Influential Factors," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, Vol. 34, No. 1, 2020, pp. 31-45.
29. Jeong, J.H., Kim, K.H., Song, M.K., and Shin, J.H., "Groundwater Control Measures for Deep Urban Tunnels," *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 23, No. 6, 2021, pp. 403-421.