creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000266198

2017년 2월

석사학위 논문

탄소나노뉴브 혼입 고전도성 시멘트 복합재료를 활용한 콘크리트 구조물의 균열 및 염소 침투 센싱 가능성 검토

조 선 대 학 교 대 학 원

건 축 공 학 과

임 민 주

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

탄소나노뉴브 혼입 고전도성 시멘트 복합재료를 활용한 콘크리트 구조물의 균열 및 염소 침투 센싱 가능성 검토

Feasibility study on application of high-conductive carbon nanotube/cement composites as crack and chloride sensing for reinforced concrete

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

건 축 공 학 과

임 민 주

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

탄소나노뉴브 혼입 고전도성 시멘트 복합재료를 활용한 콘크리트 구조물의 균열 및 염소 침투 센싱 가능성 검토

지도교수 김 형 기

이 논문을 건축공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

건 축 공 학 과

임 민 주

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

임민주의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교 부교수	조 규 만 (인)
위 원	조선대학교 조교수	황 태 연 (인)
위 원	조선대학교 조교수	김 형 기 (인)

2016년 11월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

제1장 서 론 ····· 1
제1절 연구 배경 ····· 1
제2절 연구 목적 및 범위 ····· 2

제2장 문헌 조사 ····· 6
제1절 콘크리트 균열 ····· 6
제2절 콘크리트 내 염소 이온 침투로 인한 문제점 ····· 10
제3절 기존 첨단 건저도 모니터링 기술 및 한계점 ····· 13
1. 기존 첨단 건저도 모니터링 기술 ····· 13
2. 기존 첨단 건저도 모니터링 기술 한계점 ····· 16
제4절 탄소나노튜브 혼입 고전도성 시멘트 복합재료 ····· 17

제3장 CNT/시멘트 복합재료를 활용한 염소 침투 모니터링 가능성 검토 ····· 20
제1절 철근 매립에 의한 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 영향 ····· 20
1. 실험 개요 ····· 20
2. 사용 재료 및 배합비 ····· 20
3. 실험 방법 ····· 21
가. 프리즘형 CNT/시멘트 복합재료 시험편 제작 ····· 21
나. 철근 매립에 의한 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

영향 ····· 23
4. 실험 결과 ····· 26
제2절 CNT/시멘트 복합재료를 활용한 염소 침투 모니터링 가능성 검토 ····· 28
1. 실험 개요 ····· 28
2. 사용 재료 및 배합비 ····· 28
3. 실험 방법 ····· 28
가. CNT/시멘트 복합재료를 활용한 염소 침투 모니터링 ····· 28
4. 실험 결과 ····· 31

제4장 CNT/시멘트 복합재료를 활용한 균열 모니터링 가능성 검토 ····· 39
제1절 실험 개요 ····· 39
제2절 실험 설계 ····· 39
1. 사용 재료 및 배합비 ····· 39
2. 실험 방법 ····· 39
가. CNT/시멘트 복합재료를 활용한 균열 모니터링 ····· 39
제3절 실험 결과 ····· 48

제5장 결 론 ····· 58

참 고 문 헌 ····· 59

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 차례

[표 2-1] 여러 요인에 따른 콘크리트 균열 분류 ····· 7
[표 2-2] 철근 콘크리트 구조물의 허용균열폭 ····· 8
[표 2-3] 염화물 상대 평가 기준 ····· 12
[표 2-4] 기술 기존 탄소재료 vs 탄소계 나노재료 혼입 시멘트 복합재료 ····· 17
[표 3-1] 프리즘형 CNT/시멘트 복합재료 배합비 ····· 21

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 차례

[그림 1-1] 연구 개념도 ····· 2
[그림 1-2] 연구 흐름도 ····· 5
[그림 2-1] 노후화된 콘크리트 구조물에서 발생된 균열 ····· 8
[그림 2-2] 철근부식으로 인해 콘크리트 탈락된 구조물 ····· 11
[그림 2-3] 전기전도도 Scale ····· 18
[그림 3-1] CNT/시멘트 복합재료 몰드 ····· 22
[그림 3-2] 프리즘형 CNT/시멘트 복합재료 시편 ····· 22
[그림 3-3] 철근매립에 의한 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 영향 평가 시편 도식 (Schematics) ····· 23
[그림 3-4] CNT/시멘트 복합재료 및 철근을 매립시킨 시편 제작 과정 ····· 24
[그림 3-5] 철근매립에 의한 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 영향 평가 시편 ····· 25
[그림 3-6] 휴대용 멀티미터 ····· 25
[그림 3-7] 철근 매립에 의한 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 ····· 27
[그림 3-8] 분극(ρ_p)과 탈분극(ρ_{dp})에 의한 전기전도도 변화 도식 ····· 29
[그림 3-9] 염화나트륨이 혼입된 CNT/시멘트 복합재료의 양생 과정 및 측정 ····· 30
[그림 3-10] 염화나트륨 함량에 따른 CNT시멘트 복합재료의 전도성 ····· 31
[그림 3-11] 다양한 염화나트륨 함량의 CNT/시멘트 복합재료의 분극 요소 ····· 35
[그림 3-12] 다양한 염화나트륨 함량의 CNT/시멘트 복합재료의 탈분극 요소 ····· 37
[그림 4-1] CNT/시멘트 복합재료에 인공적인 균열 발생 ····· 40
[그림 4-2] 균열난 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 측정 ····· 41
[그림 4-3] 휴대용 USB 현미경을 사용한 CNT/시멘트 복합재료의 균열폭 측정 ····· 42
[그림 4-4] CNT/시멘트 복합재료를 심은 철근 모르타르 빔, 도식(Schematics) ····· 43
[그림 4-5] CNT/시멘트 복합재료를 매립시킨 철근 모르타르 빔 시편 제작 및 양생 과정 ····· 44
[그림 4-6] CNT/시멘트 복합재료가 매립된 철근 모리타르 빔 균열에 따른 전기전도도 변화 실험 ····· 46
[그림 4-7] 균열이 있는 CNT/시멘트 복합재료가 매립된 철근 모르타르 빔의 프리스트레스 실험 ····· 47

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[그림 4-8] 포화 상태일 때 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도와 균열폭의 관계 ·····49
[그림 4-9] 건조 상태일 때 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도와 균열폭의 관계 ·····50
[그림 4-10] 포화 상태일 때 전기전도도에 따른 균열폭 확률 ·····52
[그림 4-11] 건조 상태일 때 전기전도도에 따른 균열폭 확률 ·····53
[그림 4-12] PSC 실험 시편 및 현장균열과 프리즘형 실험 시편 균열의 차이 ·····54
[그림 4-13] 철근 모르타르에 매립된 CNT/시멘트 복합재료의 균열폭에 따른 전기전도도 ·····55
[그림 4-13] 측정상황에 따른 철근 모르타르에 매립된 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 차이 ·····56
[그림 4-13] [그림 4-7]에 나타난 것과 같이 압축 후 철근 모르타르에 매립된 CNT/시멘트 복합재료의 균열 ·····57

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Abstract

Feasibility study on application of high-conductive carbon nanotube/cement composites as crack and chloride sensing for reinforced concrete

Lim, Minju

Advisor : Prof. Kim hyeongki, Ph,D

Department of Architectural Engineering,

Graduate School of Chosun University

Preliminary study on the utilization of CNT/cement composite as a sensor for chloride penetration and concrete crack monitoring in reinforced concrete structures was carried out. CNT/cement composite has higher electrical conductivity than normal water and has less electrical conductivity than chloride solution. When the CNT/cement composite is embedded or attached to the concrete structure, the electrical conductivity of the CNT/cement composite is not influenced by the surrounding humidity of the structure. However, the electrical conductivity of the CNT/cement composite is likely to change by the penetrated chloride solution and cracks of it.

In the present study, CNT/cement composite were prepared by the different chloride contents. The changes of electrical conductivity of CNT/cement composites induced by chloride contents were measured. In addition, the changes of electrical conductivity of CNT/cement composite induced by the crack widths in CNT/cement composite with no chloride content were measured.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제1장 서 론

제1절 연구 배경

20세기 이후 건설재료와 구조해석이론의 발달에 힘입어 건축·토목 구조물의 설계 및 시공기술은 급속한 발전을 이루었다. 특히, 철근 콘크리트 구조는 공사비가 저렴하고 시공이 용이하면서도 강도와 내구성이 우수한 장점으로 인해, 전 세계적으로 수많은 구조물들이 이 구조를 적용하였다. 그러나 설계 및 시공, 운영 중의 여러 요인들로 인해, 콘크리트 구조물에 여러 종류의 손상이 발생할 수 있다.

콘크리트 구조물에 발생된 균열에 의해 구조물의 내력, 방수성, 내구성 및 미관 등에 악영향을 미친다. 또한 발생된 균열을 통해 콘크리트에 염소가 침투하게 된다면, 철근 부식과 같은 문제가 발생된다. 또한 철근부식으로 인해 철근은 산화되지 않는 철근보다 부피가 크기 때문에 팽창되면서, 그 팽창압에 의해 철근 주변의 콘크리트가 추가적으로 균열이 발생할 수 있다.

이러한 구조물 건전성 평가를 위한 여러 방법들이 존재한다. 육안 검사 및 슈미트 햄머 등의 재래식 비파괴법이 있으며, 첨단 건전도 모니터링 방법이 존재한다. 그러나 재래식 비파괴법은 육안 검사이기에 눈에 보이지 않는 구조 내부의 손상을 발견하기 어렵다 (오주. 정병열. 2010). 또한 첨단 건전도 모니터링은 복합 구조에 사용하기 위해 개발된 것으로, 일반적인 콘크리트 구조에 실제로 적용하기에는 어려움이 있다. 또한 센서 수, 가격, 분석이 복잡하고 모니터링 할 수 있는 범위 등의 한계적인 문제점들이 존재한다.

탄소나노튜브를 혼입한 고전도성(10 mS/m 이상) 시멘트 복합재료(CNT/시멘트 복합재료)를 구조물 건전성 평가 중 하나인 균열과 염화 이온 침투 모니터링에 활용한다. 이 CNT/시멘트 복합재료를 활용하면 현재 존재하는 첨단 건전도 모니터링 방법들의 여러 단점(센서 수, 범위 등)을 보완할 수 있는 가능성이 존재한다.

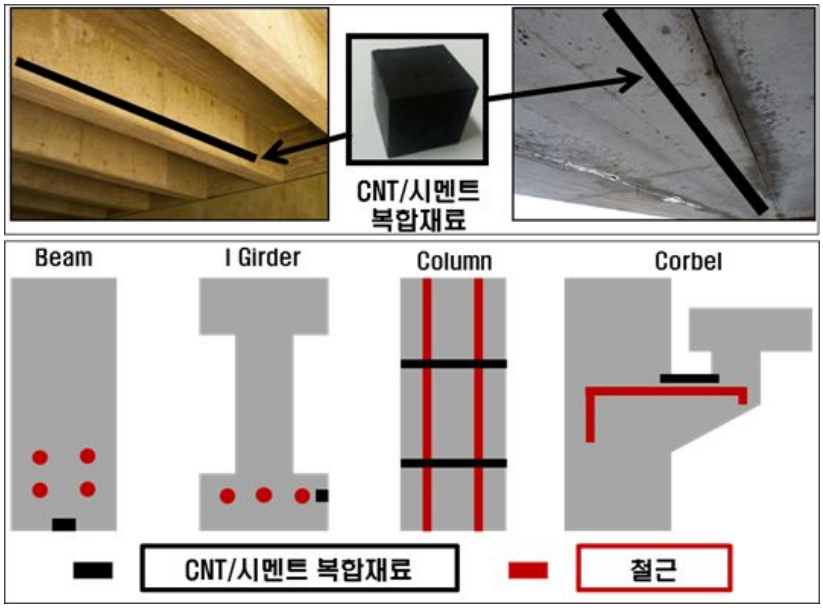
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절 연구 목적 및 범위

본 연구는 탄소나노튜브 혼입 고전도성 시멘트 복합재료를 센서로 이용하여 콘크리트 구조물의 균열, 균열폭 및 염소 침투 모니터링 가능성에 대해 연구하였다. CNT/시멘트 복합재료가 일반 모르타르에 매립 시 철근에 대한 영향을 받는지에 대해 연구하였다. 또한 CNT/시멘트 복합재료를 콘크리트 구조물의 균열 및 염소 침투 모니터링 센서로서의 가능성에 대해 검토하였다. 이는 CNT/시멘트 복합재료에 염화나트륨을 혼입시켜 CNT/시멘트 복합재료의 전도성 변화에 대해 측정하여 분석하였다. 또한 CNT/시멘트 복합재료에 균열을 발생시킨 후, 균열폭에 따른 전기전도도의 변화를 측정하였다. 측정된 값을 통해 균열폭과 전기전도도의 관계를 분석하였다. 구체적으로 연구의 범위 및 방법을 연구 진행 순서에 따라 정리하면 다음과 같다.

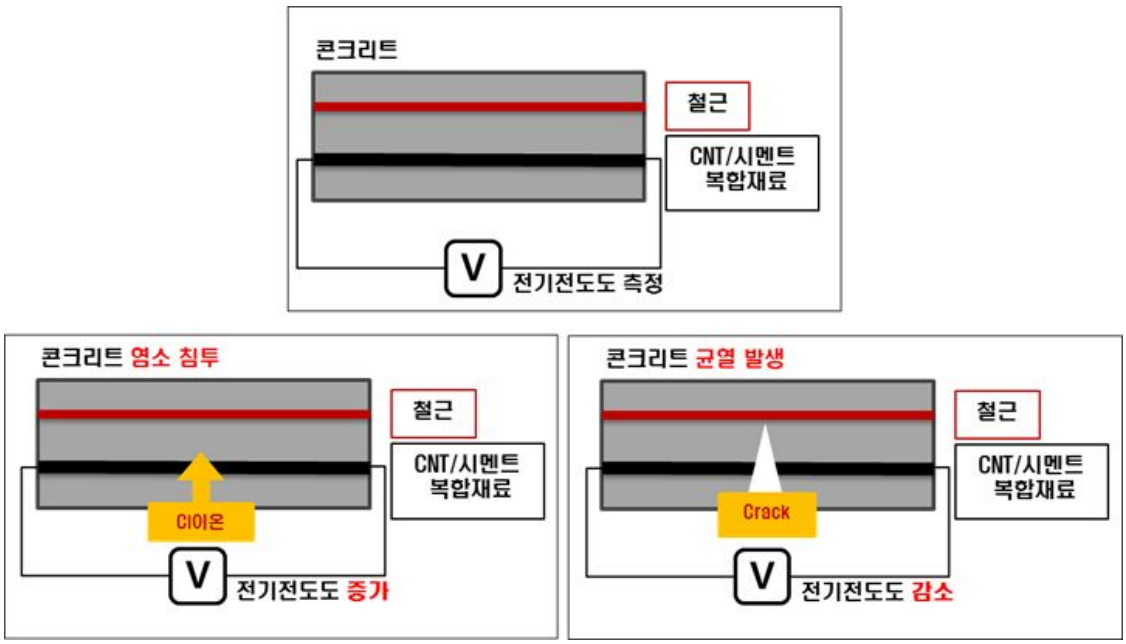
모니터링 방법 : 고전도성 CNT/시멘트 복합재료를 콘크리트에 매설하여 설치한 후 전기전도도를 모니터링 한다. CNT/시멘트 복합재료는 콘크리트와 동일한 재료를 바탕으로 제작되었기 때문에 동일 거동한다. 이는 콘크리트 구조물에 균열이 발생하였을 때, CNT/시멘트 복합재료에도 균열이 발생한다. 연구 개념도는 [그림 1-1]과 같다.



(a)

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(b)

[그림 1-1] 연구 개념도 : (a) 콘크리트 구조 내 CNT/시멘트 복합재료 설치 위치, (b) 콘크리트 염소 침투 및 균열 모니터링 개념도

1. CNT/시멘트 복합재료를 활용한 염소 침투 모니터링 가능성 검토

가. 철근 매립에 의한 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 영향

CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도가 비록 시편의 함수량에 의해 변화하지 않는다 하더라도, 철근 콘크리트 구조에 매설된 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도가 주변 철근 혹은 형상 등에 의해 변화할 가능성이 있다. 그러하여, 일반 모르타르 내의 철근 근방에 CNT/시멘트 복합재료를 매립한 후, 매립된 CNT/시멘트 복합재료의 전도성이 매립된 철근에 대해 얼마나 영향을 받는지에 대해 조사하였다.

나. CNT/시멘트 복합재료를 활용한 염소 침투 모니터링 가능성 검토

콘크리트 구조에서 철근이 부식되기 전에 염화 침투 모니터링을 하기 위한 방법이

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

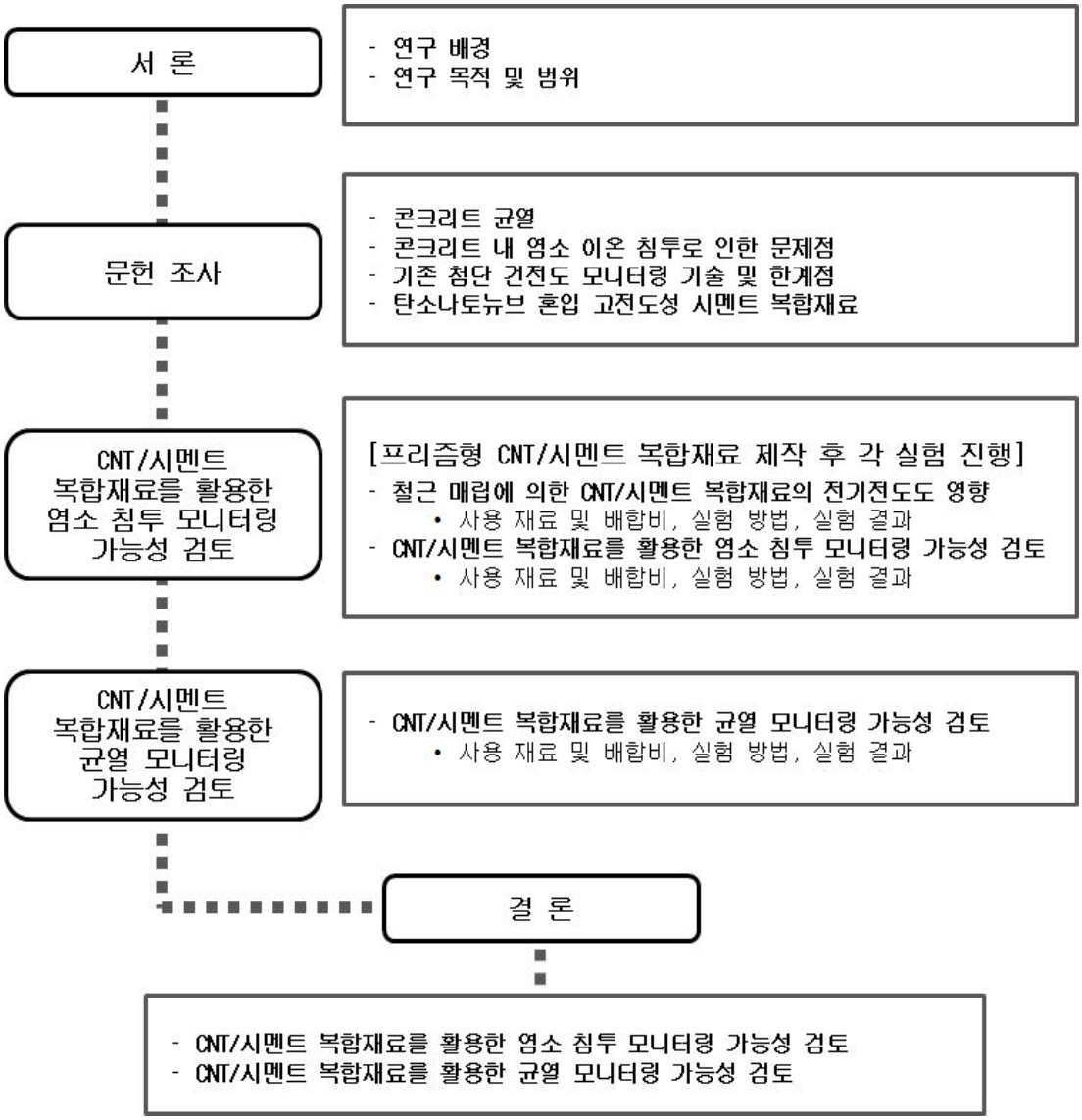
필요하다. CNT/시멘트 복합재료의 전도성 범위는 일반적으로 염화 이온을 포함한 바닷물보다 낮게 나타난다. 또한 물의 전도성은 염화 함량에 의해 민감하게 변화할 것이다. 이러한 이유로 수분 함량에 상관없이 염화 함량이 증가할수록 CNT/시멘트 복합재료 전도성 또한 증가할 것이다. 이에 따라, CNT/시멘트 복합재료를 콘크리트 구조에서 염화 침투 모니터링을 위한 염화 센서로서 적용한다. 콘크리트 구조물에 매립시킨 CNT/시멘트 복합재료의 전도성을 측정함으로써, 구조물의 염화 침투를 실시간으로 모니터링 할 수 있을 것이다. CNT/시멘트 복합재료를 사용한 콘크리트 구조에서 염화 침투 모니터링의 가능성에 대해 조사하였다.

2. CNT/시멘트 복합재료를 활용한 균열 모니터링 가능성 검토

CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도가 균열폭에 따라 얼마나 감소하는지 확인하기 위하여 전기전도도-균열폭 간의 관계를 측정한 후, 이 관계가 시편의 함수 상태에 따라 어떻게 변화하는지 확인하였다. 또한 측정된 전기전도도를 통해 균열의 크기를 예측할 수 있는 가능성에 대해 확인하였다. 이후, 콘크리트 매설상황을 묘사하기 위해 철근 모르타르 빔에 복합재료를 매설하여 구조적 휨 균열 발생에 따라 전기전도도 변화량을 확인한다. 마지막으로 프리스트레스 콘크리트 구조(prestressed concrete, PSC)를 묘사하기 위해, 휨균열이 발생한 모르타르 빔에 압축을 가하여 균열을 최대한 제거한 후 전기전도도가 어떻게 변화하는지 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 1-2] 연구 흐름도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2장 문헌 조사

제1절 콘크리트 균열

철근콘크리트 구조물에서 가장 자주 일어나는 손상의 형태는 균열이다. 허나 콘크리트 구조물에서 발생되는 균열을 완전히 제어하는 것은 매우 어렵다. 그래서 어느 정도의 균열을 허용하고 있다. 균열에 대한 여러 문제점들로부터 구조물을 보호하기 위한 방안으로 콘크리트 표준시방서에는 철근 콘크리트 구조물에서 발생되는 균열폭이 외부 환경조건에 따른 허용균열폭을 넘지 않게 규정하고 있다 [표 2-2]. 이 균열은 여러 가지 요인에 의해 발생되는데, 콘크리트 재료 자체의 시간적 부피, 형상, 조성 변화에 의해 발생하는 경우도 있으며 그 이외의 구조적, 화학적 외부 요인에 의해 성능이 저하되어 발생하는 경우도 있다.

콘크리트 구조물에서 발생하는 균열의 원인은 무수히 많으나 실제적인 구조물의 안전성 측면에서 균열은 구조적 균열과 비구조적 균열로 분류할 수 있다. 구조적 균열은 구조물이나 구조부재가 사용하중을 지지하기에 안전하지 못하는 구조적 기능을 발휘할 수 없는 단계로 진행되었거나 도달한 균열을 의미한다. 구조적 균열은 설계 오류, 설계 하중을 초과한 외부하중의 작용, 시공 불량, 물리적 손상, 폭발, 충격, 철근의 부식 등이 원인이다. 이러한 원인을 제외한 다른 원인에 의해 발생되는 균열을 비구조적인 균열이라 한다. 비구조적 균열이라 하여 오랜 시간 방치하면 철근의 부식이 점차 진행되어 구조물 불안정한 단계까지 이르게 된다 (안동열. 조현준. 2013).

구조적 균열과 비구조적 균열 외의 다른 원인으로 설계 조건, 시공 조건, 재료 조건, 사용 환경이 있으며, 발생 시기에 따른 균열로 경화 중, 경화 후로 분류할 수 있다. 여러 요인에 따른 콘크리트 균열은 [표 2-1]에 나타나 있다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[표 2-1] 여러 요인에 따른 콘크리트 균열 분류 (김진근. 1994)

분류		발생 원인
발생 원인	설계 조건에 의한 균열	설계 기준 미비, 오류, 구조에 대한 이해 부족, 내구성 무관심 등에 기인
	시공 조건에 의한 균열	시공 부주의, 시공시 초과하중, 거푸집 오류, 피복 두께 오류 등에 기인
	재료 조건에 의한 균열	시멘트, 혼화재료, 골재 등의 품질관리 미비에 기인
	사용 환경에 의한 균열	온습도 변화, 동결융해, 중성화, 염해, 화재 등에 기인
내력 영향	구조적 균열	사용하중의 작용으로 발생 -설계 오류에 의한 균열, 외부하중에 의한 균열, 단면 및 철근량 부족에 의한 균열
	비구조적 균열	구조물의 안전성 저하는 없지만 내구성, 사용성을 저하시킬 수 있는 균열 -소성수축균열, 침하균열, 온도 균열, 건조수축 균열, 미세균열 등
발생 시기	경화 중 균열	재료분리, 소성수축균열, 침하균열, 자기수축균열, 온도균열 등
	경화 후 균열	건조수축균열, 화학 반응에 의한 균열, 동결융해에 의한 균열 등

콘크리트의 재료 및 콘크리트 구조 자체가 시간 의존적으로 미세한 변동성을 갖으며 이를 예측하는 것은 불가능하기 때문에, 콘크리트의 균열은 일반적으로 아무리 주의를 기울여도 막을 수 없을 때가 존재한다. 콘크리트 구조의 설계는 기본적으로 콘크리트 구조물의 균열 발생을 어느 정도 허용하는 범위에서 이루어진다. 0.1㎜ 이하의 미세한 균열의 경우 주변의 수분에 의해 자기치유가 가능한 경우도 존재한다. 하지만 일부의 균열은 시간이 지남에 따라 그 폭과 깊이가 증가하기도 하며, 균열폭이 증가하지 않는 경우라도 균열을 통해 꾸준히 수분 및 철근의 부식을 유발하는 물질들이 침투된다. 이렇게 될 경우 작은 균열폭임에도 불구하고 시간이 지남에 따라 큰 문제를 일으키기도 한다. 따라서 철근 콘크리트의 균열을 발견하고 이를 바탕으로 구조물의 유지관리 계

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

획을 세우는 과정은 매우 중요하다.

[그림 2-1] 노후화된 콘크리트 구조물에서 발생된 균열
(아파트 관리. http://www.apt-total.com/xe/?mid=aptm020203&l=en)

콘크리트 균열을 검사하는 방법은 다양하게 개발되어 왔다. 대표적인 사례가 가시적 균열폭 측정이다. 검침자가 콘크리트 구조물의 외관을 확인한 후 균열된 부분을 탐색하여 그 균열의 분포 및 폭을 기록하는 것이다. 이 때 균열폭에 대한 유지관리 기준은 일반적으로 콘크리트 구조물 시방서 등에 제시되어 있다.

[표 2-2] 철근 콘크리트 구조물의 허용균열폭(㎜)
(한국콘크리트학회 구조기준. 2012)

강재의 종류	강재의 부식에 대한 환경조건			
	건조 환경	습윤 환경	부식성 환경	고부식성 환경
철근	0.4㎜와 0.006Cc 중 큰 값	0.3㎜와 0.005Cc 중 큰 값	0.3㎜와 0.004Cc 중 큰 값	0.3㎜와 0.0035Cc 중 큰 값
긴장재	0.2㎜와 0.005Cc 중 큰 값	0.2㎜와 0.004Cc 중 큰 값		

* Cc 는 최외단 주철근의 표면과 콘크리트 표면 사이의 콘크리트 최소 피복 두께

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가시적 검사방법은 검사자가 일정한 기간에 콘크리트 구조물 전체를 일일이 확인해야한다는 단점이 있다. 소형구조물, 혹은 대부분의 구조부재들이 노출되어 있는 경우라면 가시적 검사방법만으로 충분하다. 그러나 최근 시간이 지남에 따라 노출되지 않는 곳에서 균열이 발생하여 확인해야하는 경우가 있다. 특히, 구조물의 손상은 갑작스럽게 발생하는 경우도 있기 때문에 실시간으로 균열 발생을 확인해야 하는 경우도 있다. 이를 균열 모니터링이라 한다. 예를 들어 원전구조물의 내외벽, 콘크리트 LNG 탱크의 격벽, 매스 콘크리트 기초, 부유식 해양구조물 혹은 침수구조물의 콘크리트 부재 등에서 균열이 발생한 경우, 모니터링 개념의 유지관리 방법이 필수적이라 할 수 있다. 이 때 사용 할 수 있는 여러 가지 방법 중 가장 많이 사용되는 것은 FBG 등의 광섬유를 사용하는 것이다. 콘크리트의 균열 발생은 기본적으로 인장변형률에 기인하기 때문에 콘크리트 내부에 광섬유를 매설하여 변형률 등을 분석할 경우 균열을 간접적으로 분석할 수 있다. 단, 광섬유 자체를 단순히 콘크리트 타설 시 매설하게 되면 광섬유가 파괴되기 쉬우므로 광섬유를 플라스틱 관에 넣거나 철근에 부착시키게 된다. 이 경우 변형률은 측정이 가능하나 균열의 위치는 정확히 탐색할 수 없다. 그 밖에도 콘크리트 표면에 부착하는 경우가 있으나 탈락(Delamination)의 위험이 크다 (제 2장 제 3, 4절에서 설명).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절 콘크리트 내 염소 이온 침투로 인한 문제점

철근콘크리트 구조는 콘크리트와 철근으로 존재하는 복합형 구조이다. 이 복합재료는 구성 재료의 열팽창계수가 동등하고 시멘트 경화제중 알카리성으로 인하여 철근이 부식되지 않는 내구적인 특성이 있으며, 내화성, 경제성에서도 우수하여 전 세계적으로도 광범위하게 사용되고 있다.

이러한 철근 콘크리트 구조물은 중성화, 염화, 알칼리 골재 반응 등에 의해 철근이 부식되고, 열화 현상이 발생하게 된다 (김동훈. 임남기. 이상범. 2002). 철근콘크리트 구조의 심각한 변질중 하나는 염화 침투에 의한 보강제인 철근의 부식이다. 이는 알칼리 환경에서도 염화 이온이 존재할 경우 철근은 부식된다.

이러한 염화 이온 문제가 발생한 이유는 신도시 건설 및 경제 발전에 따른 건설 수요의 증가로 인해 주요 골재자원으로 사용되고 잇는 하천 골재 및 육상 골재 등은 점차 고갈되고 있는 실정이다. 이에 따라 바다 모래 사용의 필요성이 높이지고 있기만 해사에 함유된 염화물에 대한 대책 없는 해사의 무분별한 사용은 콘크리트 중의 염화물량을 증가시키게 된다. 해사 내에 함유된 염화물로 인해 철근콘크리트 구조물 내부의 철근을 부식시키며, 균열 증가 및 조기 노후화 등으로 철근콘크리트 구조물의 내구성에 크게 영향을 준다. 또한 한정된 육상골재 뿐만 아니라 우리나라의 경우 3면이 바다로 접해있어 외부에서 유입되는 염화물에 영향을 받는다 (김정섭. 2005).

철근콘크리트 구조물에 외부적으로 염화 이온이 침투하는 과정은 다음과 같다. 1)콘크리트 내부에 염화이온(Cl^-)이 침투하여, 2)콘크리트 내부에 있는 철근까지 침투하여 철근의 부동태 피막을 파괴한다. 3)이 후 수식 (1)과 같은 철근의 전기 화학적 반응이 일어나며 철근이 부식된다. 그리고 4)수식 (2)를 보면 염화이온이 촉매 역할을 수행하므로 끊임없이 부식이 진행 된다.

$$Fe + 2Cl^- \rightarrow FeCl_2 + 2e^- \quad \cdots\cdots (1)$$

$$FeCl_2 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)^2 + 2H + 2Cl^- \quad \cdots\cdots (2)$$

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

철근콘크리트 구조물 내의 철근이 염화 이온에 의해 부식이 끊임없이 진행될 경우 그림 1과 같이 부식에 의해 생성된 철근의 농근 원래 철근 체적의 3~8배 정도로 팽창하게 된다. 앞서 발생된 팽창으로 피복 콘크리트에 균열이 발생하게 된다 (한국도로공사 도로교통연구원. 2013).

이와 같이 발생된 균열에 의해 콘크리트 탈락까지 발생하게 되며, 그로 인해 내부에 있는 철근이 외부에 노출되게 된다 [그림 2-2].

[그림 2-2] 철근부식으로 인해 콘크리트 탈락된 구조물
(한국도로공사 도로교통연구원. 2013)

철근의 부동태 피막을 파괴하고 철근을 부식 시키는 최소 염소이온농도를 임계염화물량이라한다. 임계염화물량은 콘크리트 배합비, 시멘트, 혼화재료, 주변 환경, 철근 표면 조건 등의 여러 요인들로 인해 결정된다. 콘크리트 시방서 기준에서 굳지 않는 콘크리트의 염화물량은 0.3kg/㎡ 이하를 원칙으로 하며, 0.6kg/㎡ 이하까지 허용하고 있다. 외부 환경작용에 의해 침투된 염화물 함유량을 포함할 경우 현재 콘크리트 시방서에서 제시한 기준은 없지만 연구결과(콘크리트 구조물의 염해 내구성에 관한 국제 심포지엄. 2006)에 의하면 1.2kg/㎡ 정도를 임계염화물 함유량으로 하고 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[표 2-3] 염화물 상대 평가 기준 (한국시설안전공단. 2011)

전염화물 이온량	철근부식의 가능성
염화물 ≤ 0.3kg/㎡	염화물에 의한 부식이 발생할 우려가 없음
0.3kg/㎡ < 염화물 < 1.2kg/㎡	염화물이 함유되어 있으나 부식 발생 가능성 낮음
1.2kg/㎡ ≤ 염화물 < 2.5kg/㎡	향후 염화물에 의한 부식 발생 가능성이 높음
염화물 ≥ 2.5kg/㎡	철근 부식 발생

염화물 함유량 분석은 철근까지 깊이별로 단계를 구분하여 염화물 분포를 파악함을 원칙으로 하고 있으며, 염화물 이온농도의 분포를 도시하도록 하고 있다. 콘크리트 중의 염화물량을 측정하는 과정은 시료의 채취 및 분쇄, 염화물 추출, 염소이온 적정의 단계로 이루어진다 (한국시설안전공단. 2011).

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3절 기존 첨단 건저도 모니터링 기술 및 한계점

1. 기존 첨단 건저도 모니터링 기술

기존에는 구조물 건전성 평가를 위해 육안검사 및 슈미트 햄머 등을 이용한 재래식 비파괴 기법을 사용하였다. 그러나 이러한 재래식 방법은 평가자의 숙련도에 의해 정확도가 크게 영향을 받으며 동시에 눈에 보이지 않는 구조내부의 손상을 발견하여 구조물의 건전성을 평가하는 것이 불가능하다 (오주. 정병열. 2010).

최근 기술의 발달로 인해 다양한 종류의 첨단 건전도 모니터링 기법이 개발되고 있다. 대표적으로는 압전(Piezoelectric) 센서를 활용한 균열탐사, 광섬유의 일종인 FBG (Fiber bragg grating) 센서를 이용한 변형률 측정 등이 있다. 그러나 이들 첨단기술은 주로 강구조 (Steel structure) 혹은 복합구조 (Composite structures)에 사용하기 위해 개발될 것들로서, 콘크리트 구조에 실제로 적용하기에는 어려움이 존재한다. 첨단기술의 내용과 각각의 기술의 한계를 다음과 같다 (김형기. 2016 연구 최종보고서).

가. 압전(Piezoelectric) 센서를 활용한 균열탐사

압전 소자(Piezoelectric Materials)는 외부에서 힘을 가하면 전하가 발생한다. 이러한 특성을 이용하여 미세 진동을 발생시키면 균열 건너편에서 또 다른 압전소자가 그 미세진동을 감지(Sensing)할 수 있다. 콘크리트 구조물에 균열이 있을 경우 미센 진동의 파장이나 진동 에너지가 변화한다. 변화한 파장 및 진동 에너지를 측정하여 균열의 유무를 판단하는 것이다 (조영돈. 2002).

압전 센서를 활용하여 균열 탐사를 할 경우 이와 같은 한계점을 가지고 있다. 콘크리트에 적용이 곤란하며, 균열이 발생할 위치를 예측하여야 한다. 또한 균열의 크기가 클 경우에만 측정이 가능하다. 압전 소자가 온도에 따른 오류 발생이 많으며, 센서 부착 지점 및 개수의 제한이 있다. 압전 소자 자체의 수명이 대략 1년으로 짧다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. FBG (Fiber bragg grating) 센서를 이용한 변형률 측정

광섬유의 측면에 248㎚ 근방의 자외선 레이저를 이용하여 간섭무늬를 형성하면 광섬유 코어에 주기적으로 굴절률이 변화하는 격자를 만들 수 있다. 브래그 격자라고 불리는 이 격자는 입사된 광폭 스펙트럼에서 브래그 조건(Bragg condition)에 의해서 결정된 파장 성분만을 격자부분에서 반사시키고 나머지 파장 성분은 통과시키는 특성을 갖는다 (이창우. 이승재. 주기수. 2007). 다음과 같은 특성을 이용하여, 격자형 광센서를 콘크리트 구조물에 매립, 콘크리트 구조물의 변형률을 기반으로 콘크리트 구조물의 균열 여부를 확인하는 것이다.

그러나 FBG 센서를 이용하여 측정하는 방법은 변형률을 기반으로 콘크리트 구조물의 균열 여부를 추측하는 방법이기 때문에 균열이 발생했는지 정확히 알기 어렵다. 또한 센서의 빈번한 고장 및 오작동이 있고, 센서가 탈락될 가능성도 존재한다.

다. 음향방출 (Acoustic emission, AE)를 이용한 균열 센싱

음향방출 측정법은 재료가 외적 하중을 받아 재료 내부에서 미세한 균열 및 손상과 소성변형이 발생할 때에 방출되는 탄성파를 재료 혹은 구조물표면에 장착한 센서로 실시간으로 검출하여 해석하는 비파괴진단법을 말한다. 재료의 상태와 물성연구 및 구조물이 파괴예측을 가능하게 함으로써, 다방면에 걸쳐 공학 분야에 응용되고 있는 방법이다 (최낙삼. 김영복. 이덕보. 2003).

소음이 큰 실제 현장에서는 적용이 불가능하며, 마이크 및 음향정보처리장치가 매우 복잡하다. 또한 마이크의 손상위험이 큰 단점을 가지고 있다.

라. CT or X-ray, Lazer 스캔을 통한 균열 파악

휴대용 CT 및 X-ray, Lazer 스캔을 이용하여 콘크리트 구조물의 내부 균열을 파악하는 것이다.

그러나 이와 같은 방법들은 콘크리트 균열의 폭이 매우 가늘 경우에는 고가의 CT, X-ray, Lazer 장비를 사용하여야만 균열 측정이 가능한 단점을 가지고 있다. 또한 콘크리트의 실시간 균열 발생 여부를 알기 어려우며, CT or X-ray, Lazer 스캔 장비를 가지고 균열 스캔을 할 수 있는 위치에서만 적용이 가능하다. 균열을 측정하는데 제한적인 면(측정 위치 및 범위 등)이 많이 존재한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

마. 분극저항법 (철근부식 모니터링을 위한 매립센서)

소형 전기전도도 Probe를 철근에 매립하여 철근 콘크리트의 분극저항을 측정함으로써 철근의 부식 여부를 판단하는 방법이다.

철근콘크리트 구조 내에 철근이 부식되었을 경우는 측정이 불가능하며, 내부 염소량을 측정할 수 있는 방법이 없다. 염화 이온에 노출된 콘크리트의 전기전도도는 염화 이온량, 내부 수분량, 경계 조건 및 구조 형상 등에 의해 변화하기 때문에 일반화하기 어렵다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 기존 첨단 건저도 모니터링 기술 한계점

앞서 말한 것과 같은 첨단 모니터링 기술 한계를 요약하면 다음과 같다.

가. 균열의 직접 모니터링이 불가능 : 대부분의 모니터링 방법이 균열자체를 측정하는 것이 아닌 변형률을 기반으로 균열을 유추하는 방법이므로 신호와 정보의 처리가 곤란하다.

나. 염화 이온 침투량 모니터링 방법의 부재 : 철근콘크리트 구조물에서 가장 심각한 파괴를 유발하는 염소침투의 경우, 단면을 파쇄하여 염소량을 측정하는 방법을 통해 모니터링 하고 있으며 비파괴식 모니터링 기법은 부재함, 현재 대부분 철근이 염소에 의해 부식된 후 부식여부를 모니터링 하는 방법만 존재한다.

다. 센싱 위치 및 센서 개수의 제한 : 구조물의 경우 모니터링이 요구되는 범위가 넓기 때문에 제한된 지점에 설치된 센서의 계측만으로는 구조물 전체의 건전성을 평가하기 곤란하며, 가격 문제로 인해 센서 개수에도 제한을 받는다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제4절 탄소나노튜브 혼입 고전도성 시멘트 복합재료

1. 탄소나노튜브

[표 2-3] 기술 기존 탄소재료 vs 탄소계 나노재료 혼입 시멘트 복합재료
(김형기. 2016 연구 최종보고서)

비교지표	기존 전도성 탄소재료	탄소나노튜브 (CNT)
혼입량 (시멘트 무게대비)	- 일반흑연 분말: ~50 % - 토상흑연 입자: ~ 80% - 코크스 분말/입자: ~100%	- ~1.0 % (본 연구진 개발)
전기저항 (Ω · cm)	- 최소 10^1~10^3	-최소 10^1~10^3
강도	- 압축강도 20~60 % 저감	- 압축강도 저감 없음 (경우에 따라 증가)
압저항특성 (Piezoresistivity)	- 부족 혹은 전무	- 우수
동일전기전도도를 고려한 탄소재료가격	- 단위시멘트량 (kg) 당 640원 (토상흑연 80% 혼입기준)	- 단위시멘트량 (kg) 당 400~600원 (탄소나노튜브 0.6% 혼입기준) - 소니케이션 절차가 필요없으므로 제조 자체에 추가적인 비용발생 없음

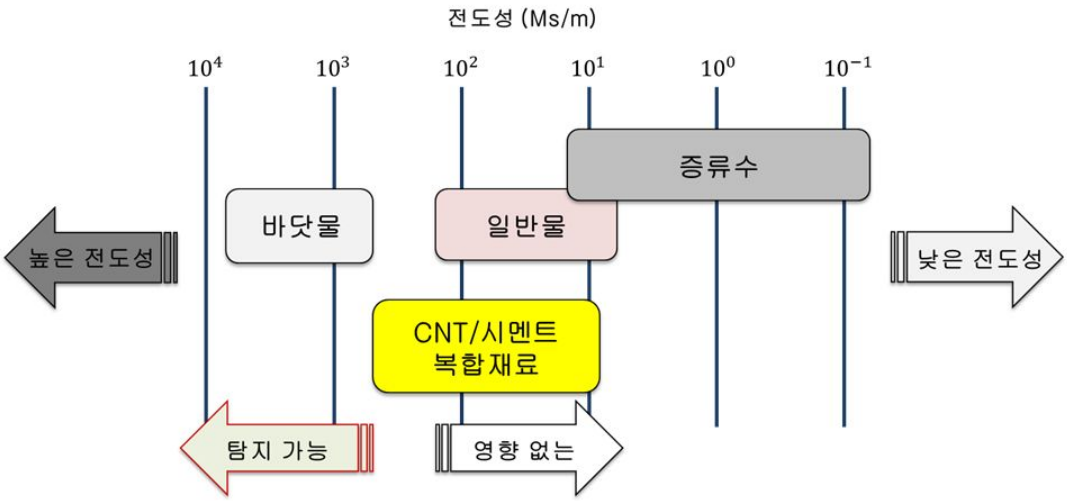
참고: 재료 가격 - 토상 흑연: 800원/kg, 다중벽 탄소나노튜브 6~10만원/kg (이후 4만원대 까지 떨어질 것으로 보임)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 탄소나노튜브 혼입 고전도성 시멘트 복합재료

고전도성(10 mS/m 이상) : 물은 콘크리트 내에서 전기를 전도 할 수 있기 때문에, 시멘트 복합재료는 물에 의해 전기전도도가 크게 변화한다. 그러나 물보다 높은 전기전도도를 가진 CNT를 혼입할 경우, 물이 아닌 CNT를 통해서 전기가 전달되므로 CNT/시멘트 복합재료는 물에 의한 영향을 적게 받는다. 그렇게 때문에 CNT/시멘트 복합재료를 고전도성인 10 mS/m 이상으로 높일 경우 물에 의한 영향을 받지 않게 된다. 물에 전해질 이온이 용해될 경우 전기전도도는 증가된다. 해수와 같은 전해질 용액은 일반적인 물에 비해 전기전도도가 약 100 ~ 10,000배 수준으로 높다. 만약, CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도가 일반적인 수분과 해수의 가운데 수준일 경우, 복합재료 내 단순히 물이 침투하면 전기전도도에 영향이 없으나 염분이 침투하면 전기전도도가 증가하게 된다 [그림 2-3]. 이 때 일반 물과 해수 사이의 전기전도도 값이 약 10 mS/m 수준이다. 따라서 고전도성(약 10 mS/m) CNT/시멘트 복합재료를 이용하여 전기전도도가 증가하는 정도를 측정한다. 측정된 값을 통해 물에 의해 영향을 받지 않고, 콘크리트의 이상(염소 침투)을 추정할 수 있는 모니터링 방법이다 (Kim, H.K., Nam, I.W.. Lee, H.K., 2013).



[그림 2-3] 전기전도도 Scale (박일성, 2013/ 이철호. 2010)

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

균열 모니터링 : 일반 콘크리트는 건조 상태 일 때와 수분포화상태일 때 전기저도도가 약 10^7배 이상 차이가 발생한다 (Kim, H.K.. Nam, I.W.. Lee, H.K.. 2013). 따라서 전기전도도가 급격하게 줄어드는 것을 측정한다 하더라도 그것이 건조로 인한 것인지 균열로 인한 것인지 판단하기가 매우 어렵다. 그러나 탄소나노튜브 혼입 고전도성 시멘트 복합재료는 수분에 의해 전기전도도 영향을 받지 않기 때문에, 고전도성 복합재료의 전기전도도가 급격하기 줄어드는 것은 오로지 균열 때문이다.

탄소나노튜브 혼입 고전도성 시멘트 복합재료는 콘크리트와 동일한 재료를 바탕으로 제작되었다. 그렇게 때문에 CNT/시멘트 복합재료는 콘크리트와 동일 거동을 하여, 콘크리트와 동일한 위치에서 균열이 발생한다. 이는 콘크리트의 균열을 정확하게 파악하는 것이 가능하다. 또한 균열에 의한 전기전도도 소멸은 매우 확실한 값의 형태로 나타날 것이기에 신뢰도가 높은 측정 방법이다. 그리고 철근에 균열이 도달하기 전, 균열을 모니터링 할 수 있다.

변형 측정(Strain sensing) : 구조물에 대한 변형측정이 가능할 것으로 예상된다. CNT를 혼입한 복합재료는 CNT의 Tunnelling effect로 인해 변형에 따라 저항이 변화하는 특성(압저항특성, Piezoresistivity)을 갖는다. 고전도성 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 변화를 측정할 경우 상당히 정확한 수준으로 변형률을 계산 할 수 있음을 확인되었다 (Kim, H.K.. Nam, I.W.. Lee, H.K.. 2013). 따라서 본 연구에서 콘크리트에 일정한 형태로 설치된 고전도성 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 변화 측정을 통해 콘크리트 구조물의 변형률을 계산할 수 있는 가능성이 존재한다. 특히 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도는 앞서 언급한 것과 같이 수분에 의해 변화하지 않기 때문에 상당히 효과적인 방법이다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3장 CNT/시멘트 복합 재료를 활용한 염소 침투 모니터링 가능성 검토[1)]

제1절 철근 매립에 의한 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 영향

1. 실험 개요

CNT/시멘트 복합재료가 철근 근방에 매립하였을 경우, CNT/시멘트 복합재료의 전도성이 일반 모르타르에 매립된 철근에 대해 얼마나 영향을 받는지에 대해 조사하였다. 이는 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도가 비록 시편의 함수량에 의해 변화하지 않는다 하더라도 철근 콘크리트 구조에 매설되었을 경우, 매설된 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도가 주변 철근 혹은 형상 등에 의해 변화 할 가능성이 있기 때문이다. 이러한 점을 고려하여 CNT/시멘트 복합재료를 철근과 수평으로 일정한 거리를 두어 일반강도 모르타르에 매설한 후, 매설된 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도가 어떻게 변화하는지를 확인하였다.

2. 사용 재료 및 배합비

가. 프리즘형 CNT/시멘트 복합재료의 사용재료 :

결합재로써 제 1종 포틀랜드 시멘트 및 실라카퓸(EMS-970D, Elkem Inc.)을 사용하였다. 다중벽 탄소나노튜브(Carbon nanotube, CNT)는 열화학증착법(Thermal chemical vapor deposition) 과정에 의해 생산된 국내제품을 사용하였다. CNTs의 순도는 95%보다 높았다. 이들의 직경과 길이는 각각 12 - 40㎚ 범위와 약 10㎛이다 (Kim et al. (2014a). 폴리카르본산계 초유동화제(Superplastisizer, SP)는 복합재료의 워커빌리티를 향상시키기 위해 사용되었다. 증류수는 복합 재료의 혼합과 경화를 위해 사용하였

---

1) 본 장의 내용은, Kim, Hyeong-Ki. "Chloride penetration monitoring in reinforced concrete structure using carbon nanotube/cement composite." Construction and Building Materials 96 (2015): 29-36. 논문이 제출됨.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. CNT는 시멘트 무게에 따라 CNT 0%, CNT 0.3%, CNT 0.6% 세 가지 다른 양을 사용하였다. CNT/시멘트 복합재료의 배합비는 [표 3-1]에 나타나 있다.

[표 3-1] 프리즘형 CNT/시멘트 복합재료 배합비

시편	무게비*					전기 전도성 (mS/m)	
	증류수	시멘트	실리카퓸	초유동화제	CNT	포화 상태	건조 상태
CNT 0%	0.275	1	0.2	0.003	0	0.24	0.025
CNT 0.3%				0.006	0.003	0.95	0.4
CNT 0.6%				0.009	0.006	53.6	43.7

*시멘트 무게의 질량비

나. 프리즘형 CNT/시멘트 복합재료를 매설하기 위한 일반 모르타르의 사용재료 :

결합재로써 제 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 비중 2.65, 흡수율 0.5% 강모래를 잔골재로써 사용하였다. 일반 모르타르에 매립하기 위한 철근은 D10 보강철근(SD400)을 사용하였다.

일반 모르타르에서 물, 시멘트, 잔골재의 질량비는 1:2:5 이다.

3. 실험 방법

가. 프리즘형 CNT/시멘트 복합재료 시험편 제작

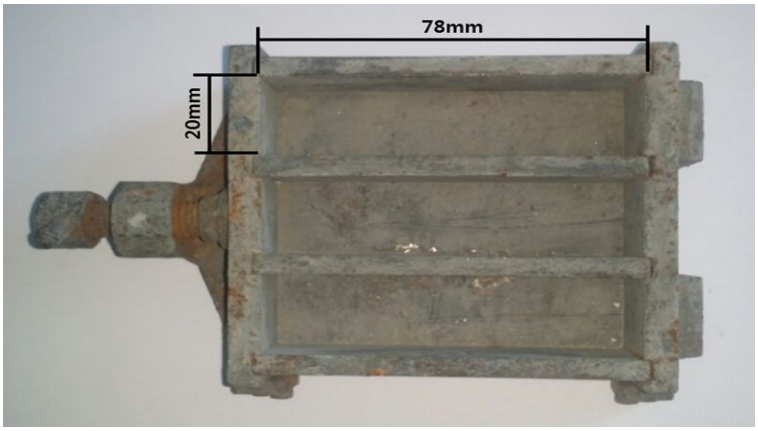
증류수와 초유동화제를 뺀 모든 고체재료인 시멘트, 실리카퓸, CNT를 10L 용량의 전기믹서로 1분간 혼합하였다. 이 후, 증류수 및 초유동화제를 넣은 후 5 ~ 10분 동안 혼합하였다. CNT/시멘트 복합재료의 전기 전도성을 측정하기 위해, 그림 1과 같은 20×20×78㎜의 각기둥 형상의 몰드에 혼합물을 부었다. 시편의 가장자리에 직격 10㎜

Collection @ chosun

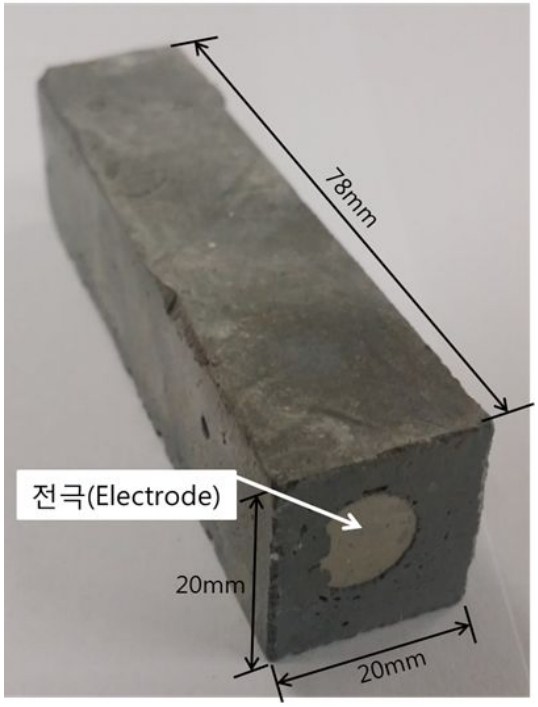
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

및 두께 1mm 강판을 전극(전극: Electrode)으로서 매립시켰다.

제작된 시편은 탈형 후, 28일 동안 증류수에 침수 시켰다. 양생수에 침수된 시편은 25 ± 0.1℃의 일정 온도에서 28일 동안 온도 조절 챔버에서 양생시킨 후 각 실험에 사용되었다.



[그림 3-1] CNT/시멘트 복합재료 몰드



[그림 3-2] 프리즘형 CNT/시멘트 복합재료 시편

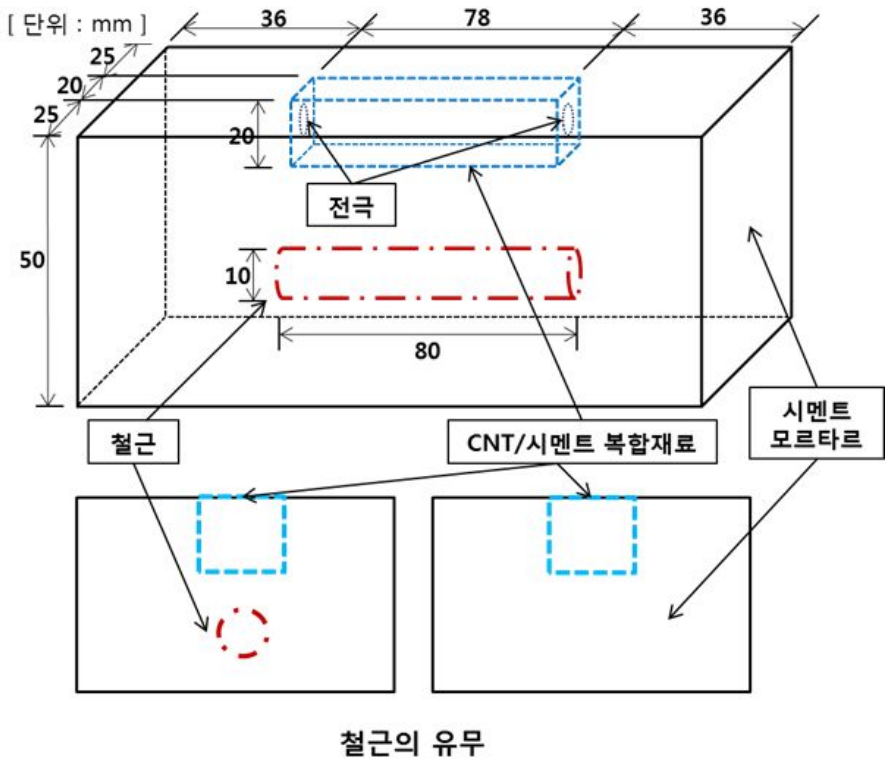
dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 철근 매립에 의한 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 영향

철근 근방에 매립된 CNT/시멘트 복합재료의 전도성이 일반 모르타르에 매립된 철근에 의해 어떤 영향을 받는지에 대해 조사하기 위해, 다음 그림과 같은 시편을 준비하였다.

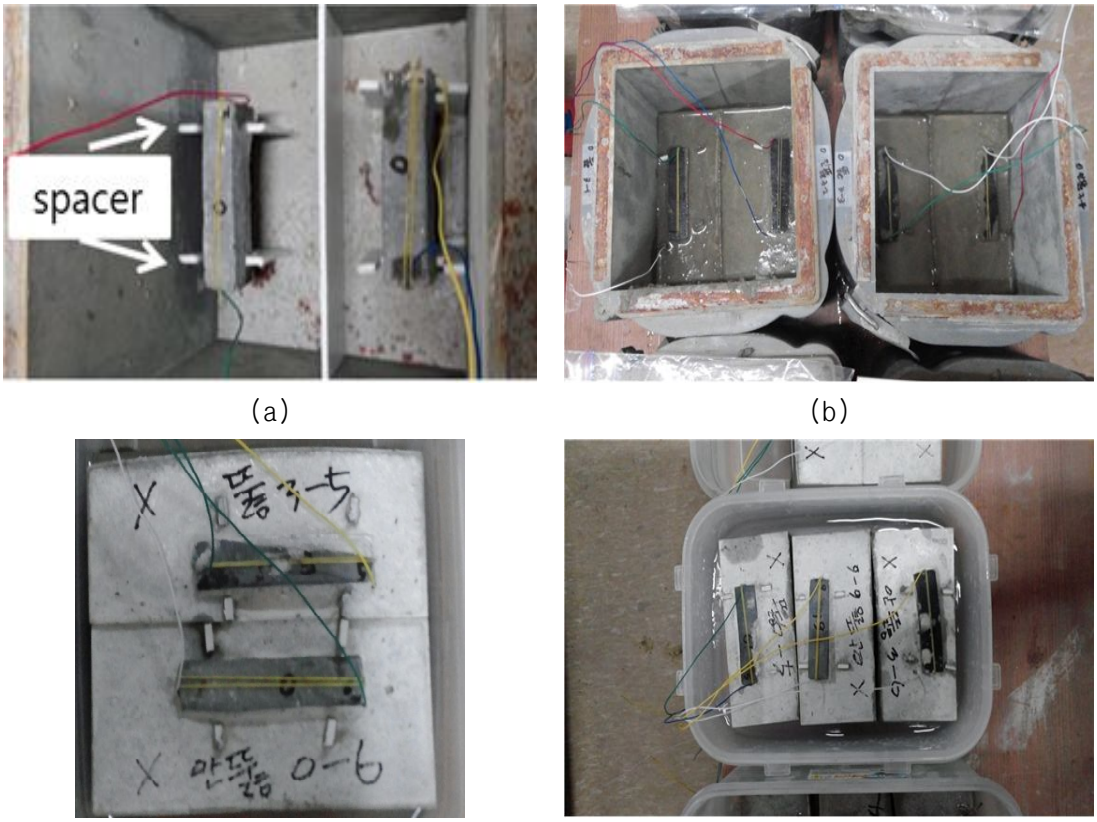
시편은 프리즘형 CNT/시멘트 복합재료 근방에 철근을 매립한 시편과 철근을 매립하지 않는 시편 두 종류로 제작하였다. 일반 모르타르에 매립하는 프리즘형 CNT/시멘트 복합재료 및 철근은 플라스틱 spacers(폼보드)로 인해 원하는 위치에 매립시키고 고정하였다. 앞서 제작 및 양생한 프리즘형 CNT/시멘트 복합재료에 전선을 연결한 후, 일반 모르타르에 매립하기 전 프리즘형 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도를 측정 후, 70×150×50mm 몰드에 넣고 일반 모르타르를 부었다. 시편 제조 후 7일 양생, 시편을 탈형한 후 28일 동안 수조에서 침수시켰다.



[그림 3-3] 철근매립에 의한 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 영향 평가 시편 도식(Schematics)

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



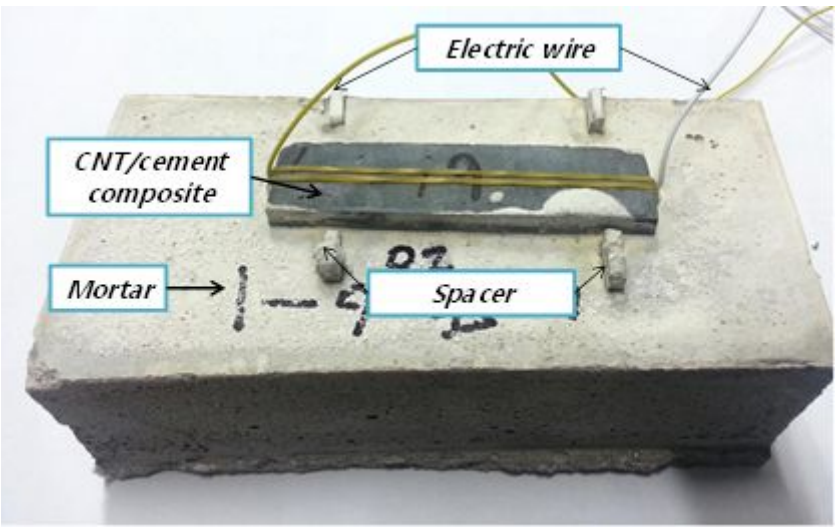
(a) (b)

(c) (d)

[그림 3-4] CNT/시멘트 복합재료 및 철근을 매립시킨 시편 제작 과정 : (a) spacers에 의해 고정된 CNT/시멘트 복합재료, (b)철근 및 CNT/시멘트 복합재료를 매립 후 일반 모르타르를 부어 시편 제작, (c)철근 및 CNT/시멘트 복합재료를 매설한 일반 모르타르 시편 7일 양생 후 탈형된 시편, (d)철근 및 CNT/시멘트 복합재료를 매설한 일반 모르타르 시편을 28일 동안 수조에 침수

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 3-5] 철근매립에 의한 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 영향 평가 시편

28일 동안 수중 양생 후, 휴대용 멀티미터를 이용해 측정하였다. 이 때 휴대용 멀티미터의 전류값은 93nA 였다 [그림 3-6].

[그림 3-6] 휴대용 멀티미터

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 실험 결과

철근이 있는 모르타르와 철근이 없는 모르타르에 매립된 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도는 CNT 0% 혼입된 시멘트 복합재료는 여러 조건에 따라 차이가 크게 나타났다. 조건으로는 철근의 유무, 일반 모르타르에 매립 전 후, 프리즘형 CNT/시멘트 복합재료와 철근과의 간격차이 이다. 그러나 CNT 0.3%와 CNT 0.6% 혼입된 시멘트 복합재료의 전기전도도는 여러 조건에 상관없이 차이가 거의 없었다.

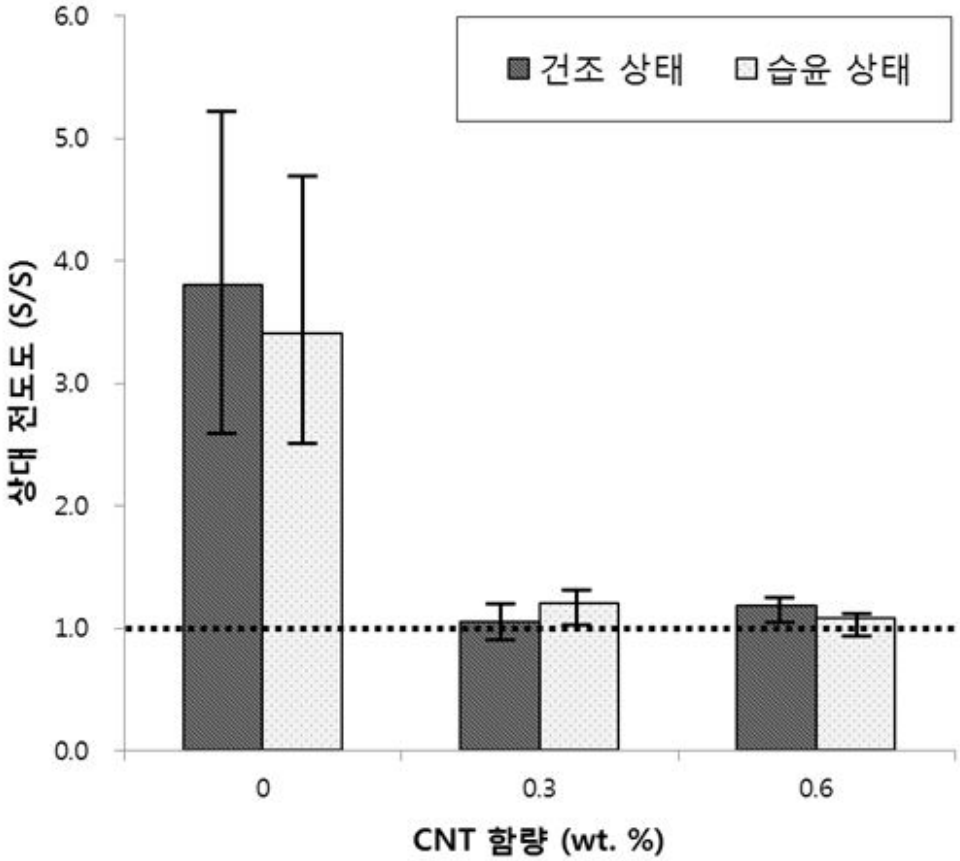
[그림 3-7]은 철근 유무에 따른 모르타르에 매립된 CNT/시멘트 복합재료의 상대 전도도를 나타낸 것이다. 그림에서 오차 바는 실험 결과의 표준 편차를 나타낸다. 상대전도도가 1에 가까울수록 철근에 최소한의 영향만 받았다는 것을 나타낸다. CNT 0% 시편에서는 상대전도도가 약 4에 가깝지만, CNT 0.3%와 CNT 0.6%를 혼입한 시편의 상대전도도는 1에 가깝게 나타났다. 이는 CNT가 혼입되지 않은 시멘트 복합재료는 약 2.5 - 5.5배 가까이 철근에 영향을 받았다는 것을 나타낸다. 그러나 시멘트 무게의 CNT 0.3% 이상 혼입된 시멘트 복합재료는 철근의 유무에 상관없이 일정하게 나타났다.

CNT가 혼입되지 않은 시멘트 복합재료의 전도성은 일반 모르타르와 비슷하지만 철근보다는 훨씬 낮았다. 철근의 전도성은 7~10 × 10^9 mS/m 범위이다. 따라서 복합재료 근방의 모르타르와 철근 모두 전류의 경로를 추가로 제공하는 것이다. 그러나 CNT/시멘트 복합재료는 일반 모르타르보다 높은 전도성을 가지고 있기에, CNT/시멘트 복합재료 주변의 모르타르는 전류의 추가경로를 만들 수 없다.

실험 결과를 통해 CNT/시멘트 복합재료를 철근 콘크리트 구조물에 설치하더라고 CNT/시멘트 복합재료의 전도성은 거의 변동이 없다는 것으로 간주된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 3-7] 철근 매립에 의한 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절 CNT/시멘트 복합재료를 활용한 염소 침투 모니터링 가능성 검토

1. 실험 개요

CNT/시멘트 복합재료의 전도성 범위는 일반적으로 염화 이온을 포함한 바닷물보다 낮게 나타나며, 물의 전도성은 염화 함량에 의해 민감하게 변화할 것이다. 이를 통해 수분 함량에 상관없이 염화 함량이 증가한다면 CNT/시멘트 복합재료 전도성 또한 증가할 것 이다. 이에 따라, CNT/시멘트 복합재료를 사용한 콘크리트 구조에서 염화 침투 모니터링 가능성에 대해 조사하였다. 염화 센서로서 CNT/시멘트 복합재료의 사용가능성에 대해 평가하기 위해, 탄소나노튜브 및 규산나트륨의 다양한 양을 포함하는 시멘트 복합재료를 제작한 후, 전기적 특성에 대해 측정하였다.

2. 사용 재료 및 배합비

프리즘형 CNT/시멘트 복합재료에 사용된 재료와 동일하다. 추가로 염화 원료로써 순수 99% 염화나트륨을 사용하였다. CNT/시멘트 복합재료의 전도성에서 염화 함량의 영향에 대해 평가하기 위해, 염화나트륨의 양은 시멘트 무게의 0, 1, 2, 3, 4, 5%를 사용하였다.

3. 실험 방법

가. CNT/시멘트 복합재료를 활용한 염소 침투 모니터링

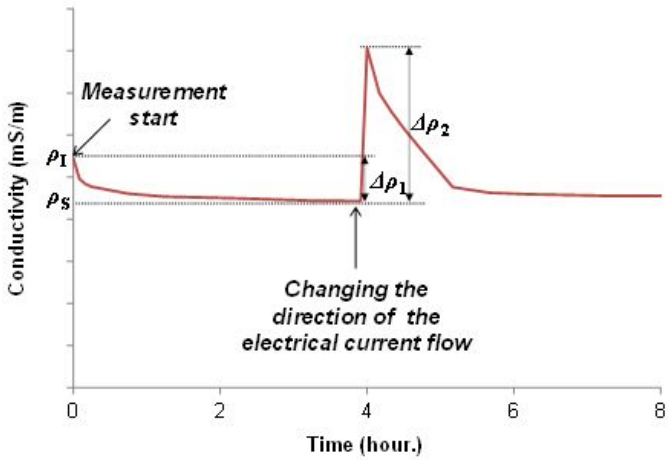
앞서 제작한 것과 같은 CNT/시멘트 복합재료를 배합 후, 시멘트 무게의 0, 1, 2, 3, 4, 5% 양의 염화나트륨을 추가로 첨가하여 배합하였다. 앞서 제작된 형태의 20×20×78㎜의 각기둥 형상 시험편을 제작하였다. 시편의 가장자리에 직경 10㎜ 및 두께 1㎜ 강판을 전극(전극: Electrode)으로서 매립시켰다. 제작된 시편은 플라스틱 필름(지퍼락) 안에 밀봉하여 5일 동안 양생하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

시편 양생 후, 28일 동안 염화나트륨을 포함한 물에 침수 시켰다 [그림 3-8]. 증류수를 양생수로서 사용할 경우, 시편에 염소 이온이 양생수로 확산될 수 있다. 그렇기 때문에 양생수는 혼합물과 같은 염화나트륨 농도로 맞춰서 사용하였다. 따라서 양생수의 염화이온 농도가 시멘트 매트릭스에서 결함된 염소화 수화에 의한 순분의 손실로 인해 경화된 혼합물에서와 약간 다를지라도, 실험에서는 양생수에서 경화된 시편으로 염화이온이 대규모 확산하는 것을 방지하기 위해 만들어졌다. 양생수에 침수된 시편은 25 ± 0.1℃의 일정 온도에서 28일 동안 온도 조절 챔버에 두었다. 양생 후, 각 시편이 포화생태일 때 전기전도도를 측정하였고, 건조 상태일 때의 전기전도도를 측정하기 위해 20℃ 진공 챔버에서 3일간 건조하였다.

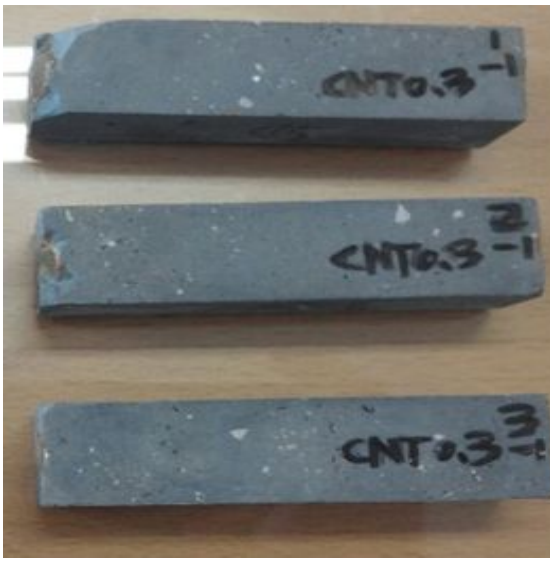
시편 양생 후 테이프 및 고무 밴드를 이용하여 시편의 전극에 전선을 연결하였다. 시편의 직류(DC) 전도성은 디지털 데이터 로거(Agilent Technologies 34972A)를 이용한 2단자 법으로 측정하였다. 분극에 의한 전기전도도의 변화를 조사하기 위해 4시간 동안 연속적으로 측정한 후, 탈분극에 의한 전기전도도의 변화를 측정하기 위해 시편의 전류방향을 변경하였다. [그림 3-8]과 같이 ρ_{dp}로서 표시된 탈분극에 의한 전도성의 변동을 측정하기 위해서 시편의 전류 방향을 변경하여 측정하였다. 이 현상은 탈분극 및 분극 외에, 이온의 흐름에 의해서도 발생한다.



[그림 3-8] 분극(ρ_p)과 탈분극(ρ_{dp})에 의한 전기전도도 변화 도식

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)

(b)

(c)

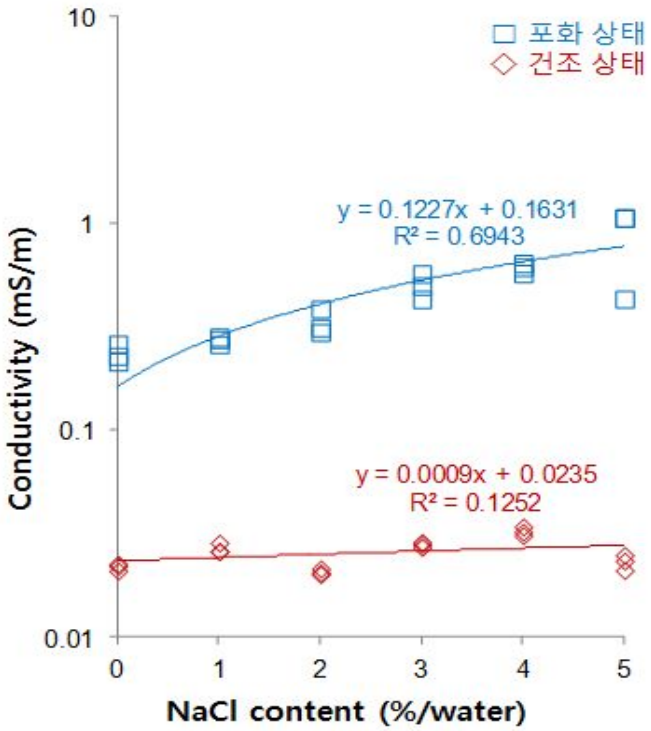
[그림 3-9] 염화나트륨이 혼입된 CNT/시멘트 복합재료의 양생 과정 및 측정 : (a)제작된 CNT/시멘트 복합재료 시편, (b)혼합물과 같은 농도의 염화나트륨을 넣은 양생수, (c)디지털 데이터 로거를 이용하여 시편의 전기전도성 측정

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 실험 결과

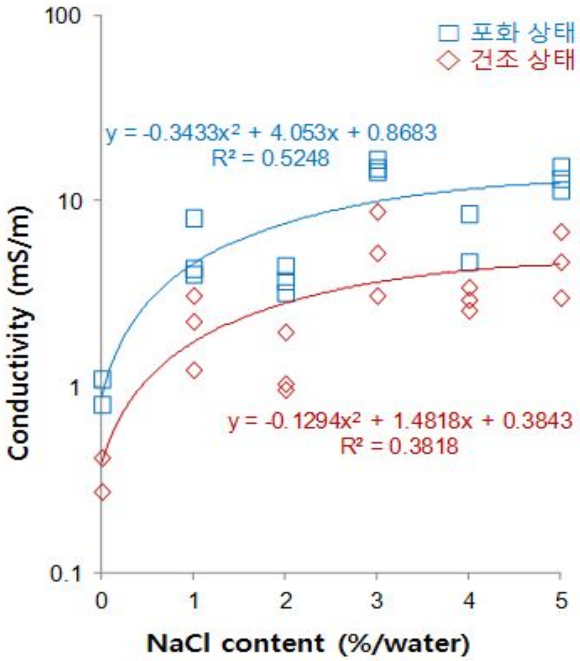
일반적으로 시멘트 복합재료의 전도성은 염화나트륨 함량이 증가함에 따라 같이 증가하는 경향이 있었다. 그러나 염화나트륨 함량이 1-2% 및 3-4% 증가할 때, CNT 0.3% 시편의 전도성은 감소되었다 [그림 3-10(b)]. 재료, 혼합비, 제작 과정이 동일할 때, CNT/시멘트 복합재료의 전도성이 2~3배 변동될 수 있음을 유의해야한다. [그림 3-10]에서 염화나트륨 함량에 따라 CNT/시멘트 복합재료의 전도성이 변화하는 것을 확인 할 수 있다.



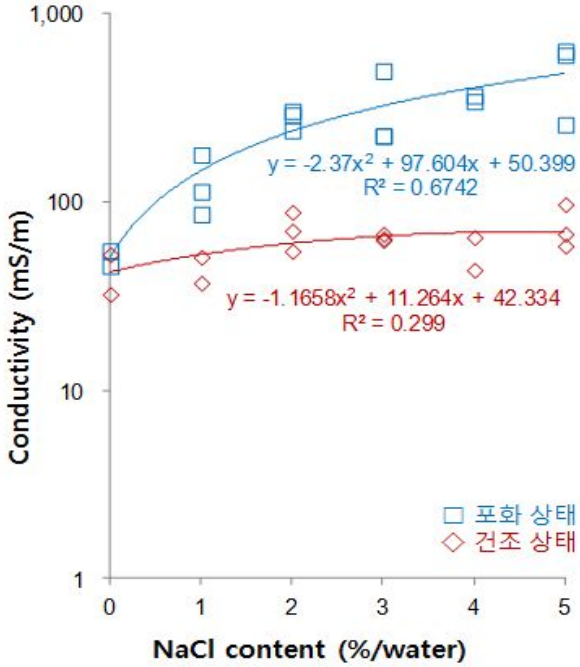
(a) CNT가 혼입되지 않은 시멘트 복합재료(CNT 0%)

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(b) 시멘트 무게의 CNT 0.3% 혼입된 시멘트 복합재료(CNT 0.3%)



(c) 시멘트 무게의 CNT 0.6% 혼입된 시멘트 복합재료(CNT 0.6%)

[그림 3-10] 염화나트륨 함량에 따른 CNT시멘트 복합재료의 전도성

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

CNT/시멘트 복합재료의 전도성 증가는 복합재료 내의 물의 함량과 CNT에 영향을 받는다. [그림 3-10]에서 염화나트륨 함량이 증가함에 따라 CNT/시멘트 복합재료의 전도성이 증가하는 경향이 나타났다. CNT가 없는 시멘트 복합재료(CNT 0% 시멘트 복합재료)에서 포화 상태일 경우, 염화나트륨 함량이 증가할수록 전도성도 증가하는 경향이 나타났다. 그러나 CNT 0% 시멘트 복합재료에서 건조 상태일 경우, 전도성 변화가 적게 나타났다[그림 3-10(a)]. 여기서 CNT 0% 시멘트 복합재료의 경우, 수분 함량 상태에 따라 변화하는 전도성이 염화나트륨 함량에 의한 것보다 더 의미가 있다.

시멘트 무게의 CNT 0.3% 혼입한 시멘트 복합재료(CNT 0.3% 시멘트 복합재료)를 보면 건조 상태에서 염화나트륨 함량에 따른 전도성이 증가하는 것이 나타났다. CNT 0.3% 시멘트 복합재료의 전도성 변화는 수분 함량에 따른 것 보다 염화나트륨에 의한 것이 크게 나타났다. 또한 시멘트 무게의 0-1.2% 범위의 염화이온 함량일 때, 전도성의 변화는 가장 두드러졌다 [그림 3-10(b)]. 염화물 함량의 임계점이 일반적으로 시멘트 무게의 0.5-1.5% 범위인 것을 고려하면, CNT 0.3% 시멘트 복합재료를 센서로 사용했을 때 이 범위 내의 염화물 함량의 모니터링 감도가 높았다.

시멘트 무게의 CNT 0.6% 시멘트 복합재료(CNT 0.6% 시멘트 복합재료)를 보면 포화상태의 경우 염화나트륨 농도에 따라 전도성이 증가하는 것이 확연하게 보였지만, 건조 상태일 경우는 그러지 않았다. 이는 시편 자체의 전도성이 이미 높기 때문에 염화나트륨에 의해서 전도성이 증가하지 않은 것이다. CNT 0.6% 시멘트 복합재료는 염화나트륨 농도가 증가함에 따라 함수상태에 대한 차이가 CNT 0.3% 시멘트 복합재료보다 크게 발생하였다.

그래프 내의 R^2은 결정계수로 1에 가까울수록 100% 만족하는 값을 나타내지만, 0에 가까울 경우 아무런 개선점이 없다는 것을 나타낸다. 시편이 포화 상태일 경우 R^2은 0.5 이상의 값이 나왔지만 건조 상태의 경우 0.2 ~ 0.3으로 낮은 값이 나왔다. 이는 시편에 많은 변수(염화나트륨의 분포 상태, 믹싱, 건조 방법 등)가 존재하기 때문이라 생각된다. 그러나 염화나트륨 함량이 증가할수록 전도성이 증가하는 경향은 존재한다.

이 현상들의 메커니즘은 다음과 같이 예상된다. CNT가 없는 시멘트 복합재료(CNT 0% 시멘트 복합재료)를 보면, 포화 상태의 전도성은 공극수에서 염화 이온의 정도에 따라

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

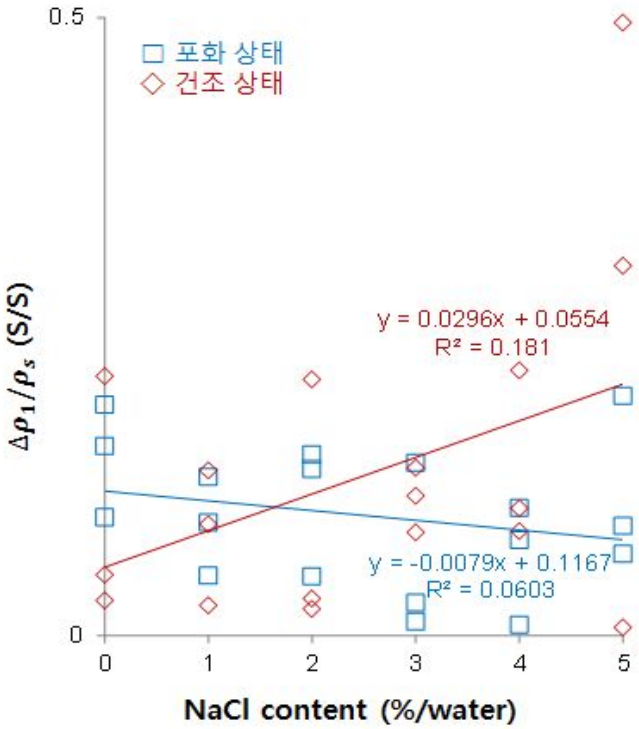
증가된다. 그러나 시편이 건조 상태일 때, 염화 이온이 시멘트 매트릭스에 존재할지라도 전류의 경로로서 공극수의 연결이 분산될지도 모른다. 한편 작은 양의 CNT를 사용한 시멘트 복합재료(CNT 0.3% 시멘트 복합재료)를 보면 전류가 염화이온을 포함한 공극수뿐만 아니라 CNT 연결(네트워크)을 통해 흐를 수 있었다. 복합재료의 물이 건조되었을 때, 염화나트륨을 포함한 염화물 기반의 결정이 CNT 네트워크 사이에 침전될지도 모른다. 수용액에서 염화나트륨보다 낮은 전도성을 가질지라도, 염화나트륨 결정도 전도성 물질이다. CNT 네트워크 사이의 결정은 CNT 네트워크들의 전도율을 증가시킬 수 있다. 그러나 CNT 함량이 더 증가했을 때(CNT 0.6% 시멘트 복합재료), 복합재료의 전도성은 염화물 기반의 결정에 의해 영향을 받아 너무 높게 되었다. 그러나 이것은 수용액의 염화이온에 의해 영향을 받을 것이다.

다양한 염화나트륨 함량의 CNT/시멘트 복합재료의 분극 및 탈분극 요소는 다음의 [그림 3-11] 및 [그림 3-12]에 나타낸다. 분극 요소는 분극, 에 ρ_p의한 전도성 변화 사이의 비율로서 정의되고 분극 후 전도성은 안정화된다. 마찬가지로 탈분극 요소는 탈분극, ρ_{dp}에 의한 전도성 변화 사이의 비율로서 정의되고 탈분극 후 전도성은 안정화된다.

CNT/시멘트 복합재료에서 분극과 탈분극은 전도도 및 수분함량에 의한 영향을 받는 경향이 있다. 따라서 본 연구에서는 분극 및 탈분극 요소는 상이한 수분 함량을 가진 복합재료에서 염화 함량을 조사하는데 사용될 수 있다고 생각하였다. 그러나 CNT와 수분 함량에 상관없이 분극 요소와 염화나트륨의 관계가 거의 없었다. 또한 복합재료의 탈분극 요소는 CNT 함량이 증가할 때 감소되는 경향이 있지만, 탈분극 요소와 염화나트륨 함량 간의 관계가 없었다. 이는 분극과 탈분극 요소는 CNT/시멘트 복합재료에서 염화 함량을 추정하는 것에 적용할 수 없다는 것을 나타낸다.

Collection @ chosun

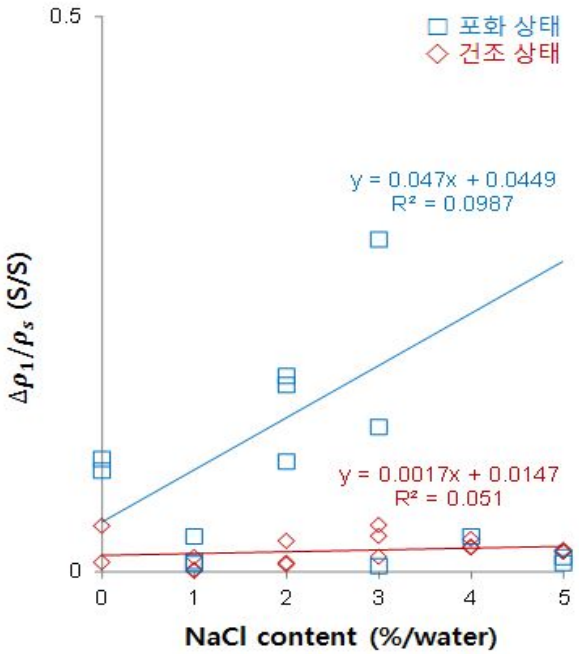
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



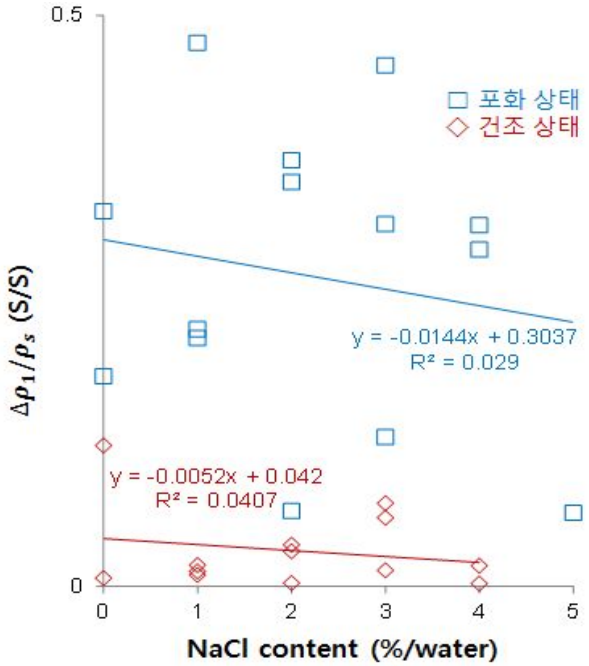
(a) CNT가 혼입되지 않은 시멘트 복합재료(CNT 0%)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(b) 시멘트 무게의 CNT 0.3% 혼입된 시멘트 복합재료(CNT 0.3%)

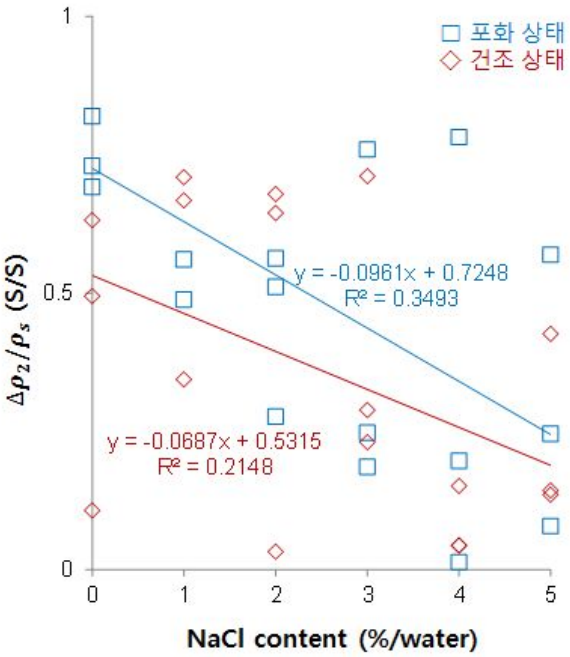


(c) 시멘트 무게의 CNT 0.6% 혼입된 시멘트 복합재료(CNT 0.6%)

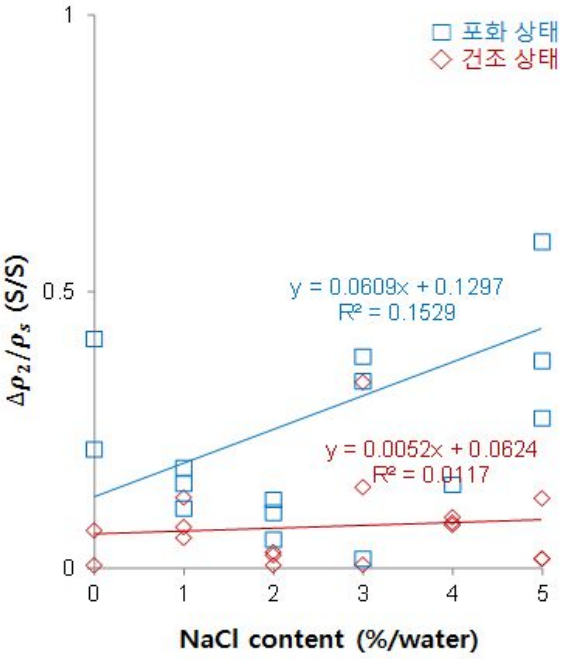
[그림 3-11] 다양한 염화나트륨 함량의 CNT/시멘트 복합재료의 분극 요소

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



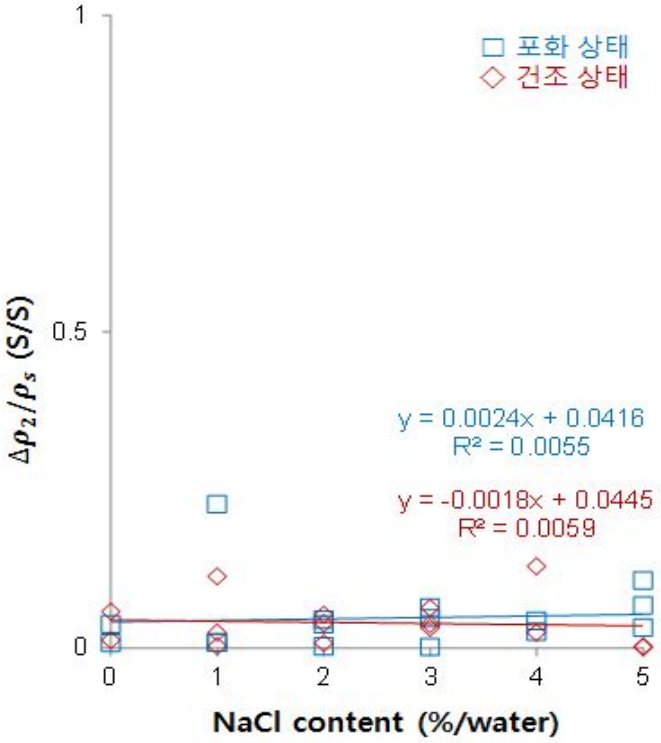
(a) CNT가 혼입되지 않은 시멘트 복합재료(CNT 0%)



(b) 시멘트 무게의 CNT 0.3% 혼입된 시멘트 복합재료(CNT 0.3%)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(c) 시멘트 무게의 CNT 0.6% 혼입된 시멘트 복합재료(CNT 0.6%)

[그림 3-12] 다양한 염화나트륨 함량의 CNT/시멘트 복합재료의 탈분극 요소

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제4장 CNT/시멘트 복합재료를 활용한 균열 모니터링 가능성 검토

제1절 실험 개요

CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도가 균열폭에 따라 얼마나 감소하는지 확인하기 위하여 전기전도도-균열폭 간의 관계를 측정한 후, 이 관계가 시편의 함수 상태에 따라 어떻게 변화하는지 확인한다. 이후, 콘크리트 매설 상황을 묘사하기 위해 철근 모르타르 빔에 복합재료를 매설하여 구조적 휨 균열 발생에 따라 전기전도도 변화량을 확인한다. 마지막으로 프리스트레스 콘크리트 구조(prestressed concrete, PSC)를 묘사하기 위해, 휨균열이 발생한 모르타르 빔에 압축을 가하여 균열을 최대한 제거한 후 전기전도도가 어떻게 변화하는지 확인하였다.

제2절 실험 설계

1. 사용 재료 및 배합비

본 장에서는 앞서 제작된 것과 동일한 재료 및 형태의 CNT/시멘트 복합재료를 제작하였다. 철근 모르타르 빔에 CNT/시멘트 복합재료를 매설하여 실험을 진행하였다. 이때 사용한 모르타르는 물, 시멘트, 모래 1:2:5의 비율이다. 철근은 D10 (SD400)을 사용하였다.

2. 실험 방법

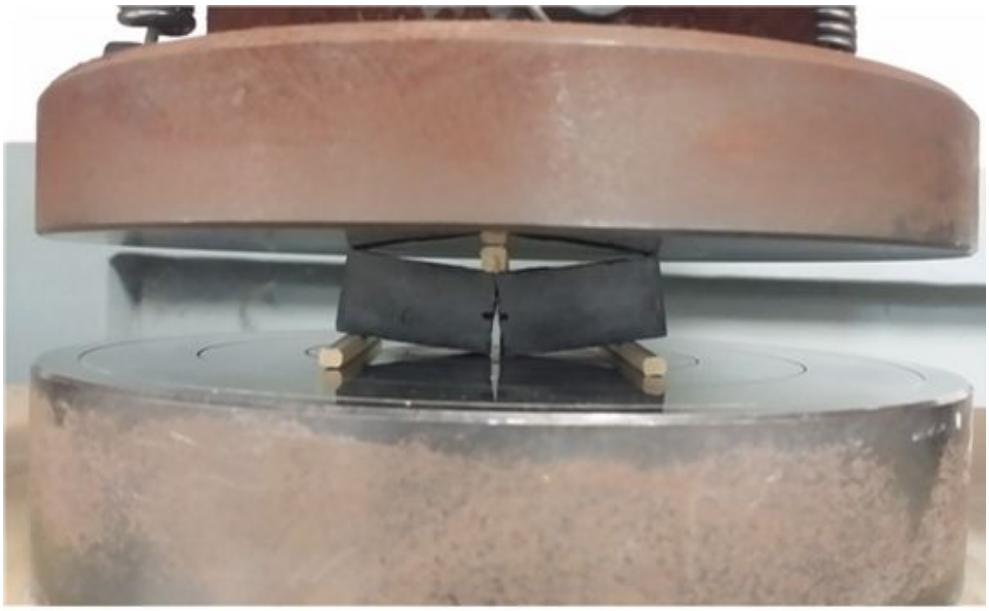
가. CNT/시멘트 복합재료를 활용한 균열 모니터링

앞서 제작한 것과 동일한 재료 및 형태의 CNT/시멘트 복합재료를 제작하였으며, 전극의 설치 및 전선의 연결 과정도 모두 동일하게 통일하였다. 이렇게 제작된 CNT/시멘

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

트 복합재료는 28일 이상 수중양생 하였다. 수중 양생 후 균열이 없는 상태인 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도를 측정하였고, 24시간 건조 후 균열이 없는 상태인 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도를 측정하였다. 이 후 아래 [그림 4-1]과 같이 인공적으로 휨균열을 발생시켰다. 균열이 발생한 시편은 균열 발생 후, 시편이 어긋나지 않도록 [그림 4-2]과 같이 케이블 타이로 묶어 고정하였다. 시편을 고정하고 있는 케이블 타이를 이용하여 시편의 균열폭을 점차 줄였다. 줄어드는 균열폭에 따른 전기전도도를 측정하였다. 시편은 건조 상태와 습윤 상태로 나눠 측정하였다. 이 시편의 전기전도도는 앞에서 사용했던 것과 동일한 휴대용 멀티미터를 이용해 측정하였다. 이 때 휴대용 멀티미터의 전류값은 93nA 였다.

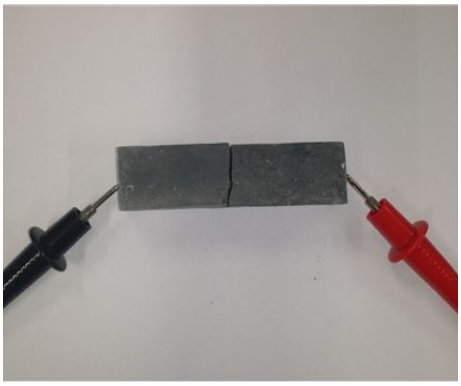


[그림 4-1] CNT/시멘트 복합재료에 인공적인 균열 발생

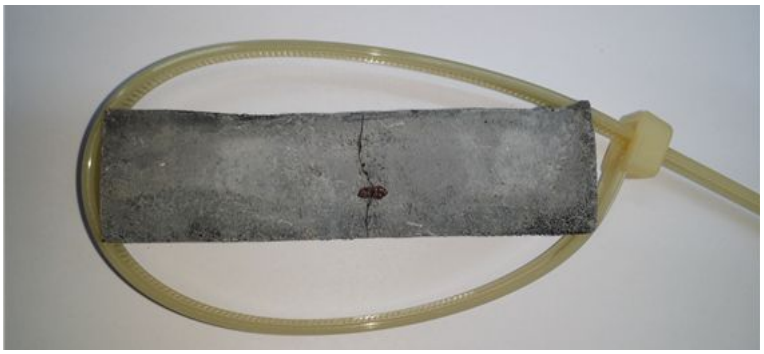
dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a)



(b)



(c)

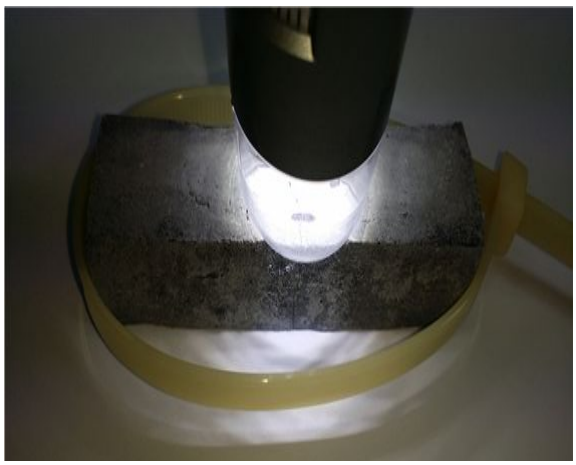
[그림 4-2] 균열난 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 측정 : (a)휴대용 멀티미터, (b)휴대용 멀티미터를 이용하여 시편 전기저항 측정, (c)케이블타이를 이용해 균열폭 조절

균열폭은 휴대용 USB 현미경을 사용하였는데, 연동 프로그램을 이용하여 균열 폭을 자동적으로 측정하였다. 시편에 발생된 균열에서 균열폭은 다양하게 발생하므로, 시편의 앞면과 뒷면 여러 점의 균열폭을 측정하였다. 따라서 이후 측정된 하나의 전기전도도 값에 대해 다양한 균열폭이 발생하였고 이에 대한 관계를 나타낸 것이다. 균열의 발생 및 균열이 발생된 시편의 고정정도가 매우 다르기 때문에, 본 실험에서는 동일 배합에 대한 시편을 30개 제작하였다. 또한 케이블의 고정 장력에 따른 균열폭과 전기전도도를 측정하여 두 개의 관계를 조사하였다.

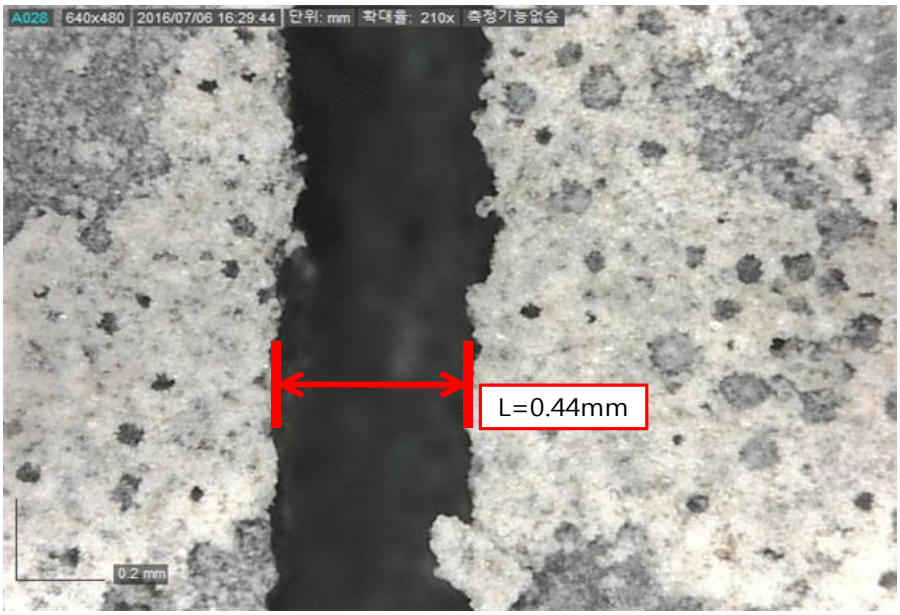
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a)



(b)



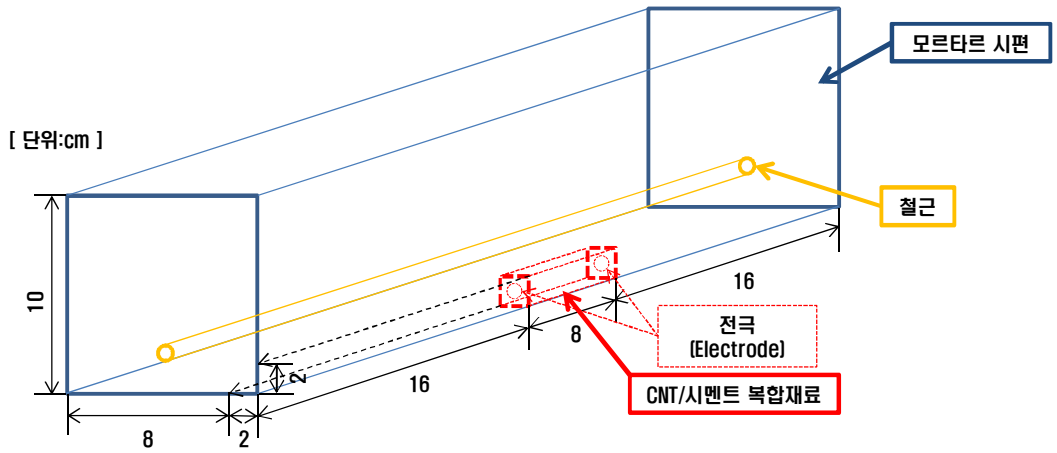
(c)

[그림 4-3] 휴대용 USB 현미경을 사용한 CNT/시멘트 복합재료의 균열폭 측정 : (a)USB 현미경, (b)USB 현미경을 이용하여 균열폭 측정, (c)프로그램을 통해 측정된 균열폭

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

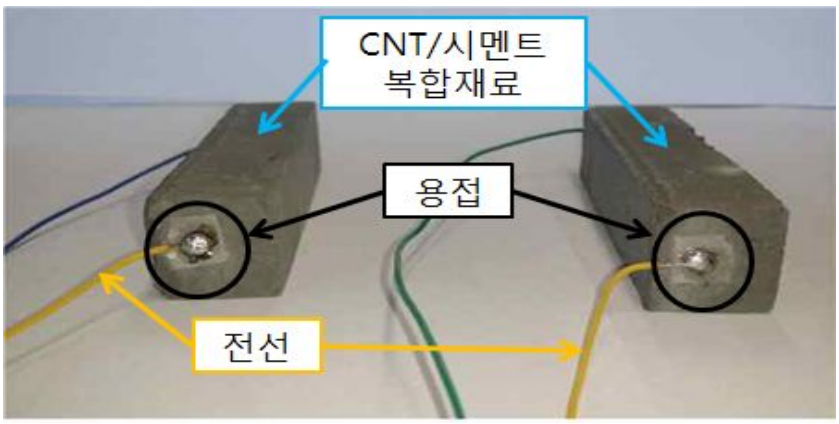
그 다음으로 콘크리트 매설 상황을 묘사하기 위해 철근 모르타르 빔에 CNT/시멘트 복합재료를 매설하여 구조적 휨 균열 발생에 따라 전기전도도 변화량을 확인하기 위한 실험을 진행하였다. 시멘트 무게의 CNT 0.6% 혼입 시멘트 복합재료 시편을 철근 보강 모르타르 휨시편에 매설하였다. 28일 이상 재령 CNT/시멘트 복합재료 및 철근을 설치한 후, 그 위에 굳지 않은 모르타르를 타설 하였다. 모르타르 타설 전 CNT/시멘트 복합재료의 전극에는 전선을 용접하여 이후 전기전도도 측정을 가능하도록 하였다. 전기전도도는 1) 모르타르 타설 및 전선 용접 전, 2) 모르타르 타설 전 CNT/시멘트 복합재료의 전극(전극: Electrode)에 전선 용접 후, 3) 모르타르 타설 및 경화 후 세 차례에 걸쳐 측정되었으나, 전선 용접 전 후 전기전도도 측정결과 차이는 계기로 측정되지 못할 만큼 미미하였다. 모르타르를 타설한 시편은 7일 후 탈형하여 재령 28일까지 수중 양생 하였다. 이렇게 제조된 시편은 28일 후 휨실험을 수행하였으며, 이 때 실험은 포화 상태, 건조 상태로 나눠서 실험을 진행하였다. 시편의 건조 상태를 만들기 위해 7일간 50℃에서 건조 하였다.



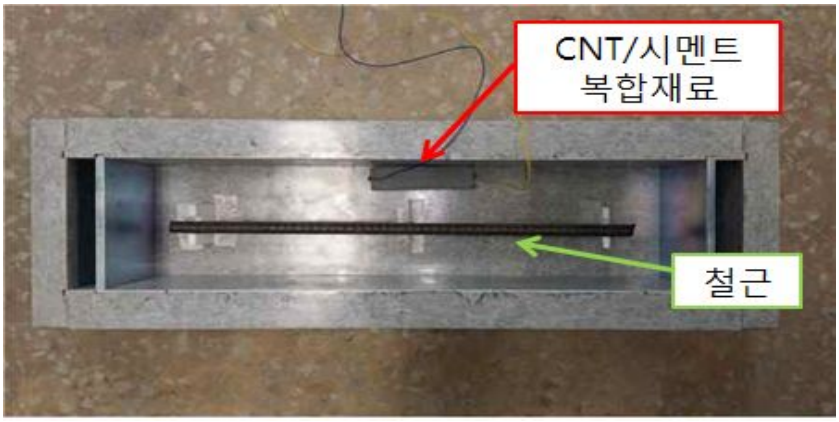
[그림 4-4] CNT/시멘트 복합재료를 심은 철근 모르타르 빔 치수, 도식(Schematics)

Collection @ chosun

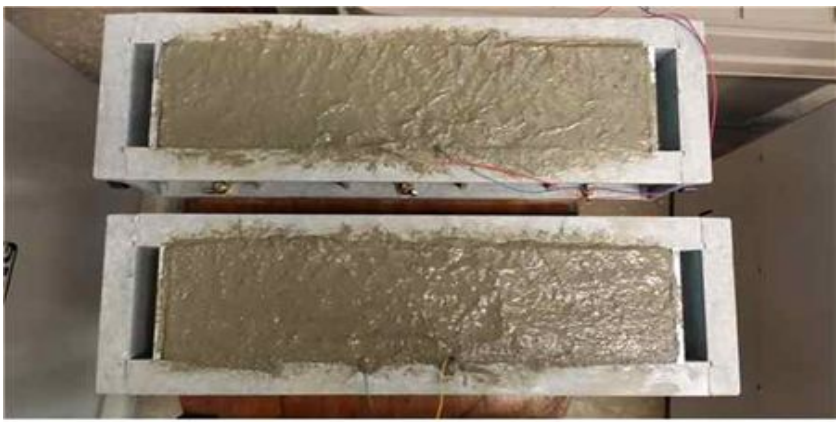
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) CNT/시멘트 복합재료에 전선을 연결



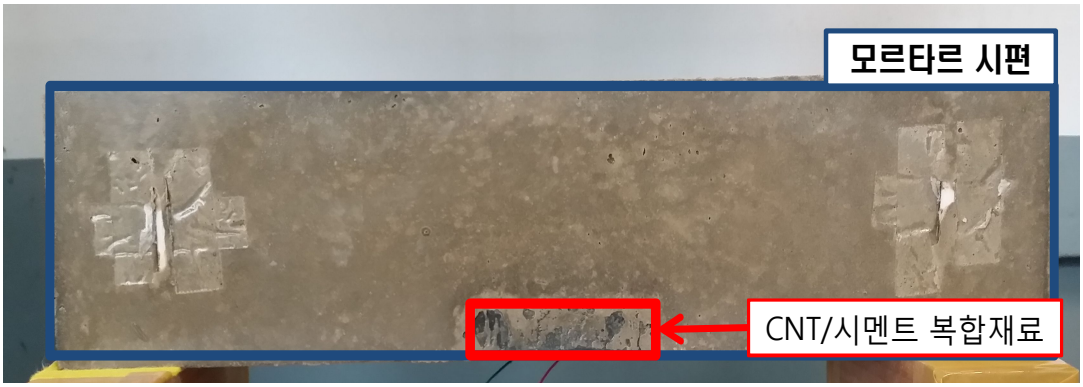
(b) 철근 모르타르 빔 몰드에 배치



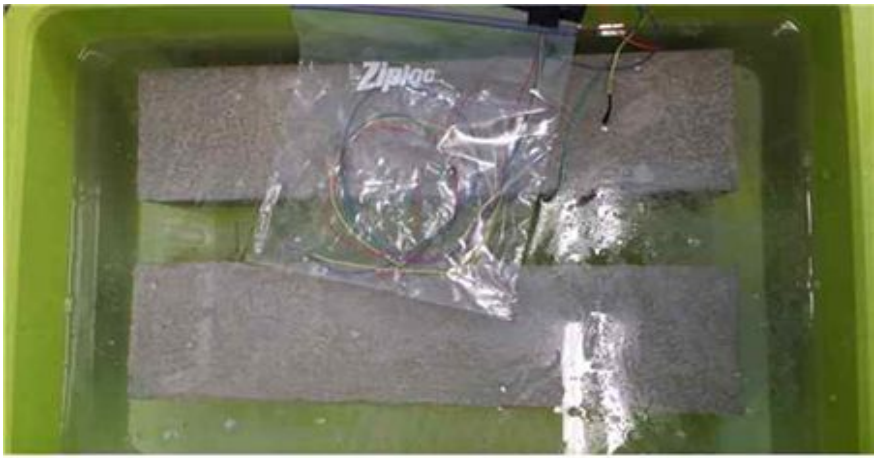
(c) 굳지않는 모르타르 타설

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(d)CNT/시멘트 복합재료를 심은 철근 모르타르 빔 시편

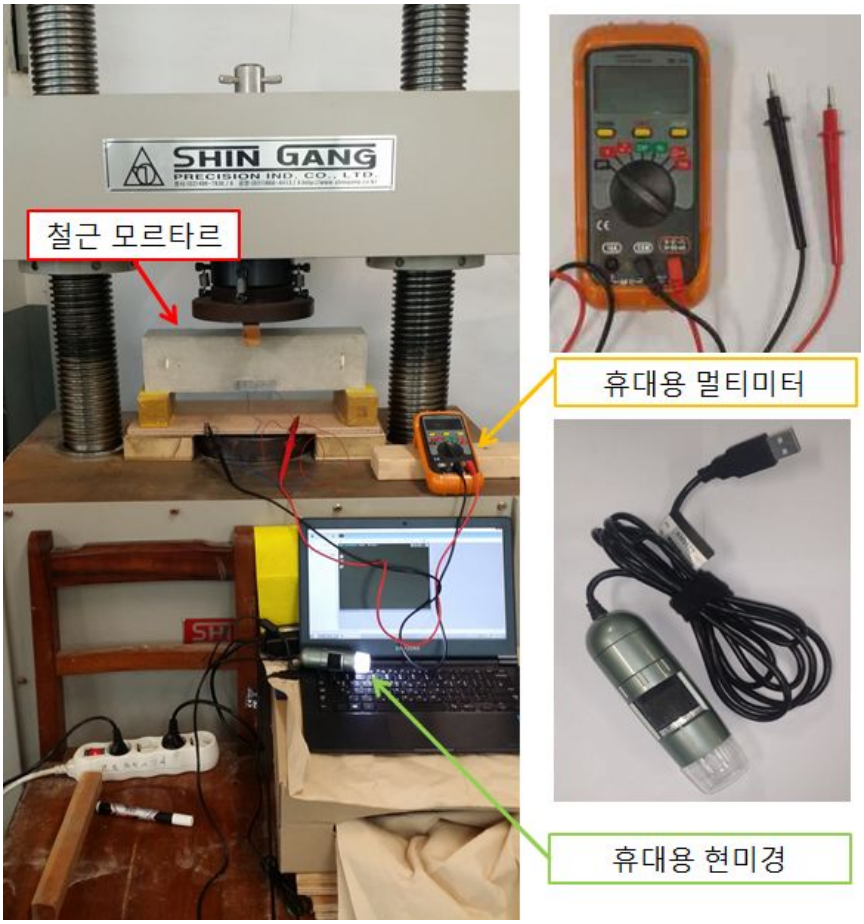


(e) 수중 양생

[그림 4-5] CNT/시멘트 복합재료를 매립시킨 철근 모르타르 빔 시편 제작 및 양생 과정 : (a)CNT/시멘트 복합재료에 전선을 연결, (b)철근 모르타르 빔 몰드에 배치, (c)굳지않는 모르타르 타설, (d)CNT/시멘트 복합재료를 심은 철근 모르타르 빔 시편, (e)수중 양생

dCollection @ chosun

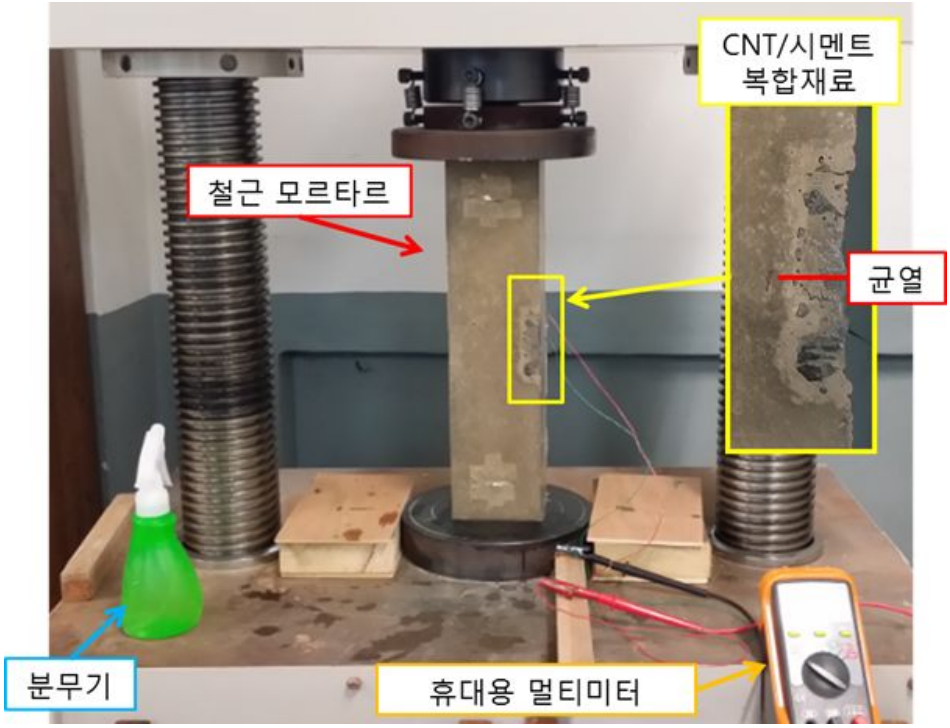
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 4-6] CNT/시멘트 복합재료가 매립된 철근 모리타르 빔 균열에 따른 전기전도도 변화 실험

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 4-7] 균열이 있는 CNT/시멘트 복합재료가 매립된 철근 모르타르 빔의 프리스트레스 실험

위 [그림 4-5]과 [그림 4-6]은 철근 모르타르에 매설된 복합재료의 전기전도도가 구조의 휨균열시 어떻게 변화 하는지를 확인하기 위한 실험이다. 시편의 가운데 부분만 힘이 가해지도록 막대를 놓은 후 서서히 균열이 발생하도록 하였다. 어느 정도 힘을 가한 후 초기 균열은 육안으로 보이지 않을 정도로 미세하여 USB현미경을 통해 균열이 발생한 것을 확인한 후 균열폭 및 휴대용 멀티미터기를 통해 전기전도도를 측정하였다. [그림 4-6]는 [그림 4-7]의 실험에 의해 균열이 발생한 시편이 압축에 의해 균열이 닫힌 경우 전기전도도가 어떻게 변화하는지를 확인한 실험이다. 균열이 있는 시편을 압축기기에 세로로 세워 프리스트레스와 같은 정도의 힘을 가하였다. 힘을 가한 후 USB현미경을 사용하여 균열폭을 측정하고, 휴대용 멀티미터기를 이용하여 균열폭에 따른 전기전도도를 측정하였다. 특히, 위 [그림 4-6]는 [그림 4-7]와 같이, 포화시편 실험중 시편의 건조를 막기 위해 분무기를 이용해 꾸준히 시편을 포화상태로 유지하였다. 이때도 전기전도도는 휴대용 멀티미터, 그리고 균열폭은 휴대용 현미경을 사용하였다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3절 실험 결과

[그림 4-8], [그림 4-9]는 철근 모르타르 빔에 매설하지 않은 프리즘형 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도를 균열폭에 따라 측정한 결과이다. 그래프에서 전기전도도 100%는 균열이 없는 상태를 나타낸다. 포화상태 [그림 4-8] 시편을 보면, 균열 폭에 의해 전기전도도가 어느 정도 감소하며, 이 동일 전기전도도를 기준으로 균열 폭이 일정 이상 발생 할 수 있음을 확인하였다. 이는 전기전도도가 감소하지 않더라도 균열일 존재할 수 있다는 것을 의미한다. 이는 CNT 혼입률에 따라 약간 다를 수 있다.

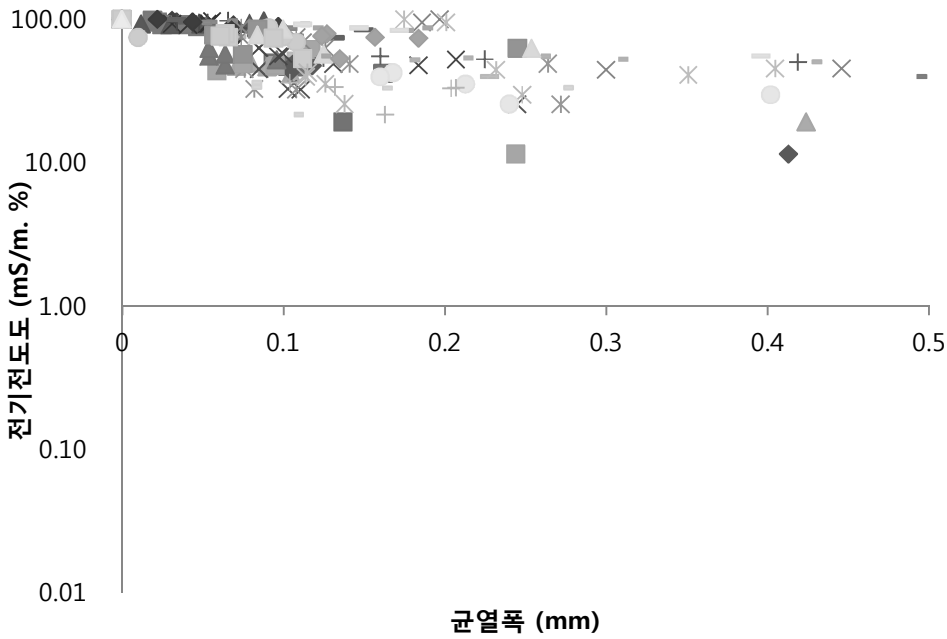
균열 발생한 후 시편이 포화 상태일 때, 전기전도도가 일정 값 이하로 떨어지지 않을 경우에는 어떠한 형태로든 시편이 맞물려 있을 가능성이 있다. 그러나 전기전도도가 명확히 감소한다면, 이 점을 고려하여 균열이 발생하였음을 확인할 수 있다. 동시에 확률론적 측면에서 균열의 최소 폭을 알 수 있을 것이다.

한편 시편이 건조한 경우 [그림 4-9], 균열 발생 시 전기전도도가 급격하게 감소한 것을 확인 수 있었다. 시편의 설치 특성상 일부 면이 부착되어 있음에도 불구하고, 시편에 균열을 발생하면 전기 전도가 일어나지 않는다고 할 수 있다. 이 두 가지 결과를 통해, 시편 균열부에 물이 존재할 경우 CNT의 터널링 효과(Tunnelling effect)를 발생시켜 전기 전도가 되지만, 건조시에는 터널링 효과와 같은 현상이 거의 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다.

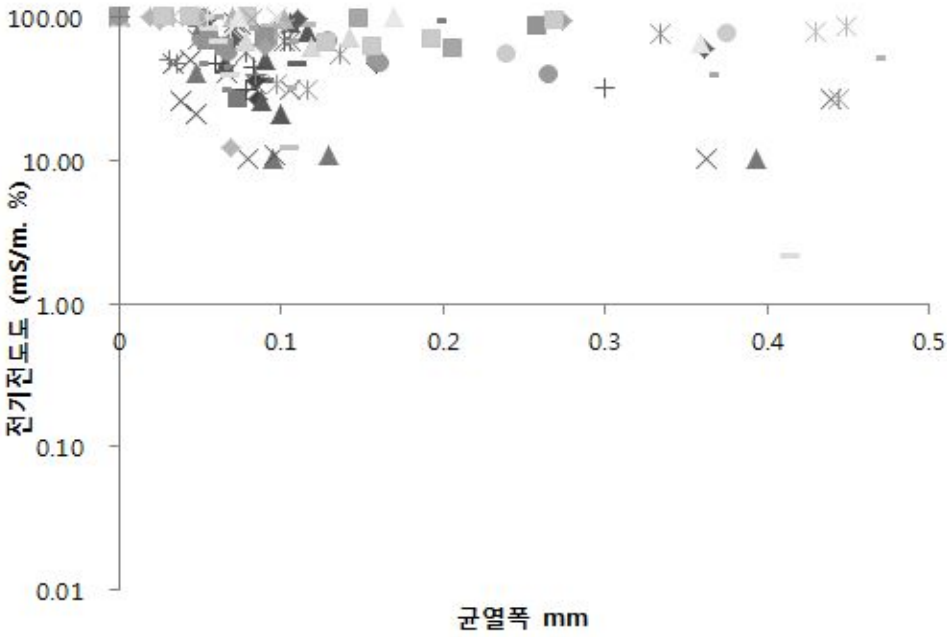
이와 같은 점을 고려할 때, CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도는 균열전 소폭 수분량에 의해 증가 및 감소 할 수 있으나, 균열시에는 경우에 따라 급격한 감소가 발생할 수 있다. 즉 모니터링 시 시편의 건조 및 포화상태를 고려하여 균열폭을 예측하여야 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)시멘트 무게의 CNT 0.3% 혼입한 시멘트 복합재료

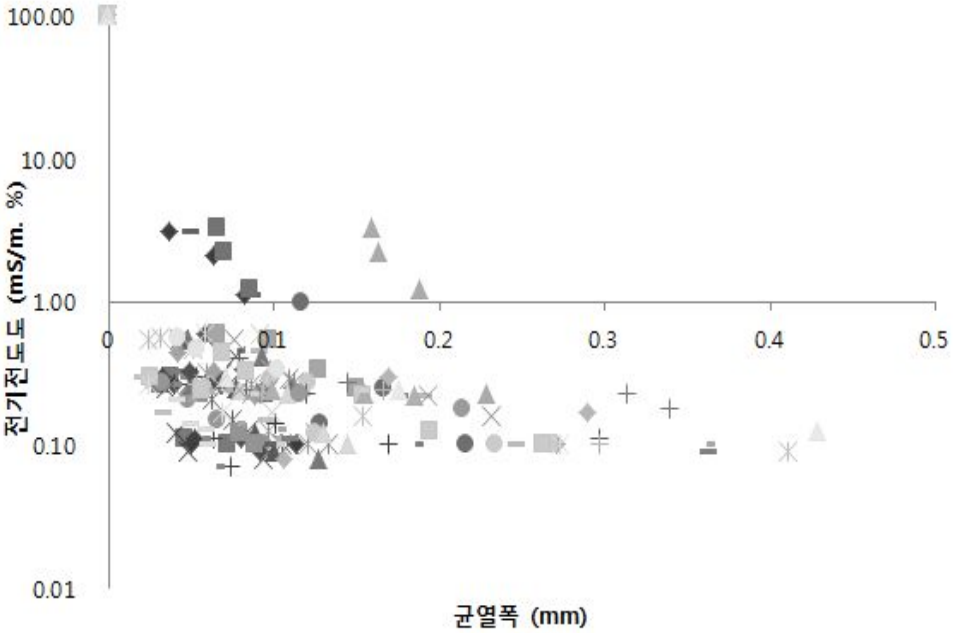


(b)시멘트 무게의 CNT 0.6% 혼입한 시멘트 복합재료

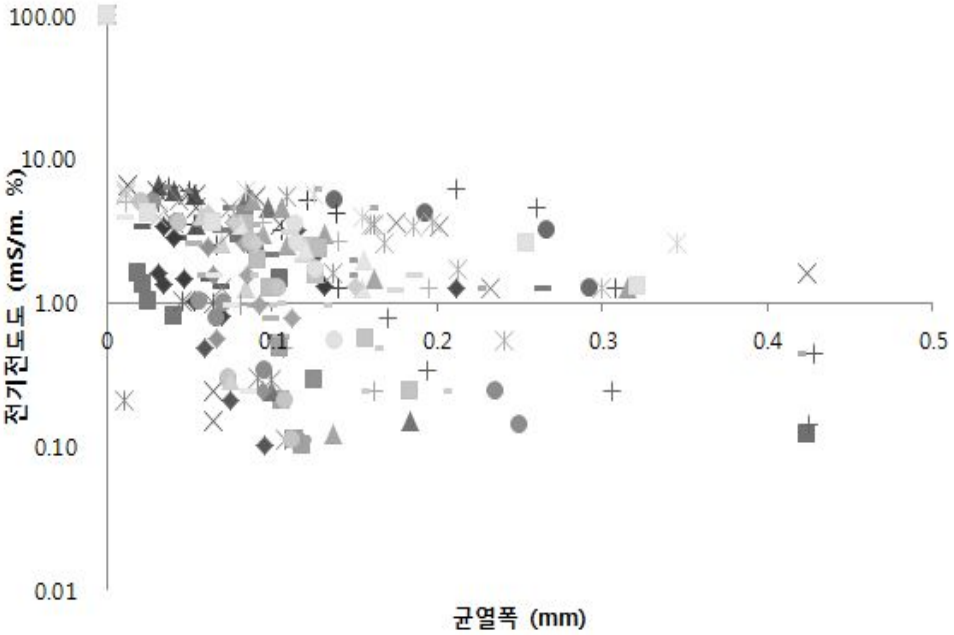
[그림 4-8] 포화 상태일 때 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도와 균열폭의 관계

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)시멘트 무게의 CNT 0.3% 혼입한 시멘트 복합재료



(b)시멘트 무게의 CNT 0.6% 혼입한 시멘트 복합재료

[그림 4-9] 건조 상태일 때 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도와 균열폭의 관계

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

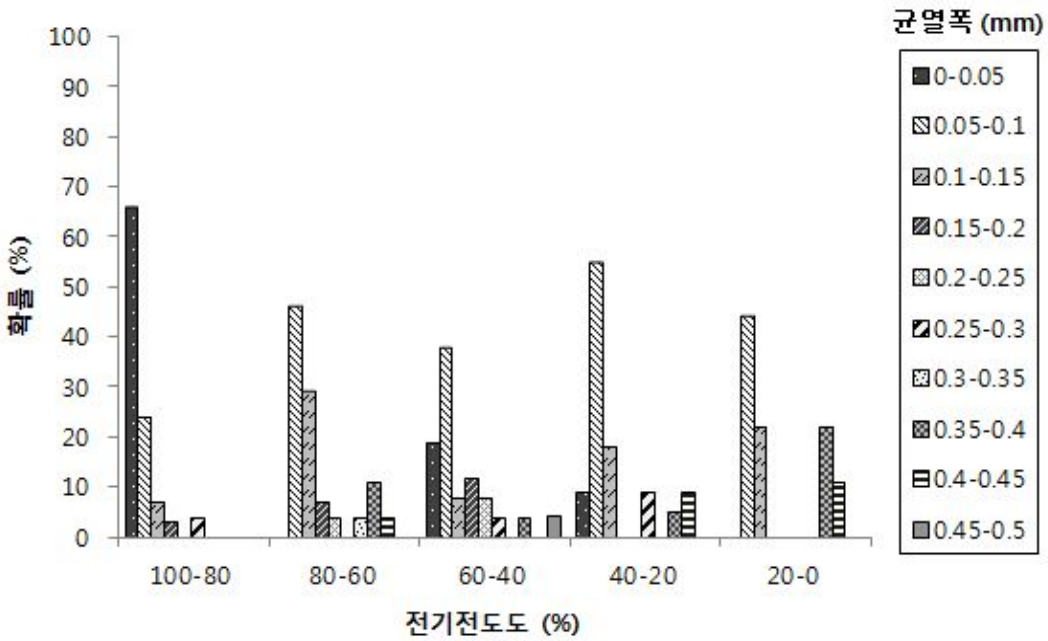
[그림 4-10], [그림 4-11]는 측정된 전기전도도에 따라 균열의 크기를 확률로써 나타낸 그래프이다. 그래프에서 전기전도도가 낮음에도 불구하고 균열폭이 작을 확률이 나타나는 이유는 앞서 말한 것과 같은 균열부분에 어떠한 형태로든 맞물려 있을 가능성이 존재하기 때문이다.

포화 상태의 경우 [그림 4-10]과 같이 나타난다. 시편의 전기전도도가 100-80%일 때, 균열폭은 0.05㎜ 이하일 확률이 제일 높게 나타났다. 또한 최대 균열폭은 0.2 ~ 0.3㎜ 이하인 걸로 나타났다. 전기전도도가 80% 이하로 떨어지면서 균열폭이 0.05㎜ 이상이거나 0.15㎜이하일 확률이 급격하게 늘어났다. 전기전도도가 60% 이하로 떨어지면서 균열폭은 다양하게 나타났으며, 최대 균열폭인 0.5㎜도 나타났다. 이는 전기전도도가 60% 이하로 떨어졌을 경우에도 균열폭이 최대치를 넘겼을 가능성이 있다. 전기전도도가 40% 및 20%이하일 때, 0.3㎜ 이상의 균열폭일 확률이 증가하였다.

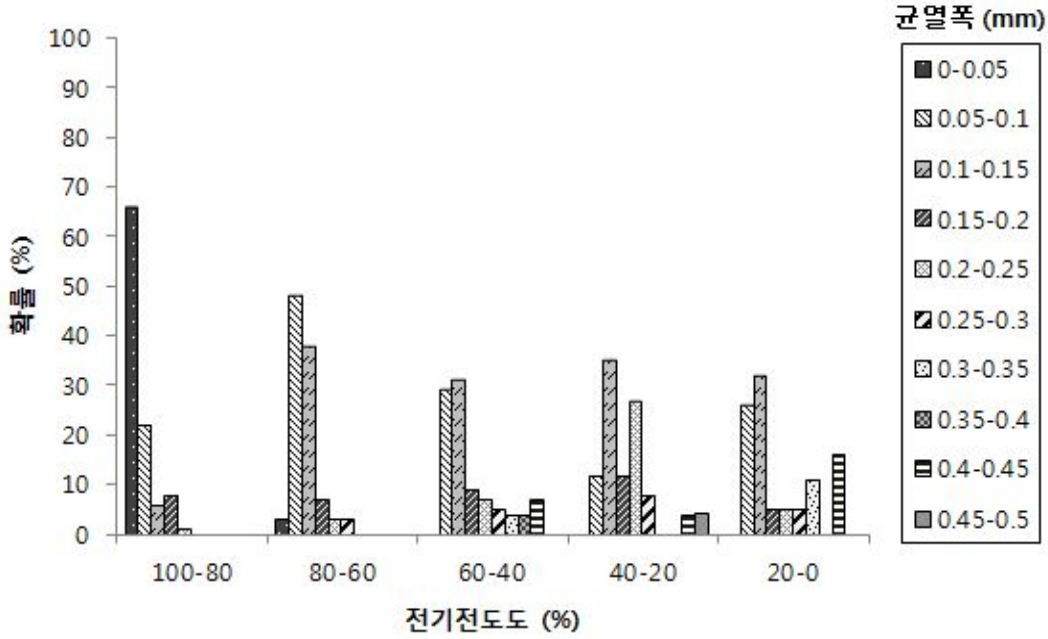
건조 상태는 전기 전도가 잘 되지 않아서, 시편에 균열이 발생될 때 급격하게 전기전도도가 떨어지는 것을 확인 할 수 있었다. 건조 상태 또한 습윤 상태와 비슷하게 전기전도도가 높을 경우 균열폭이 0.05㎜ 이하로 작을 확률이 높다. 전기전도도가 낮을 경우 균열폭이 0.2㎜ ~ 0.3㎜ 이상일 확률이 증가하며, 전기전도도가 0%에 가까울 때 균열폭 또한 0.4㎜ ~ 0.5㎜ 이상일 확률이 증가하였다. 전기전도도에 따른 균열폭 신뢰도는 좀 더 분석이 필요하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)시멘트 무게의 CNT 0.3% 혼입한 시멘트 복합재료

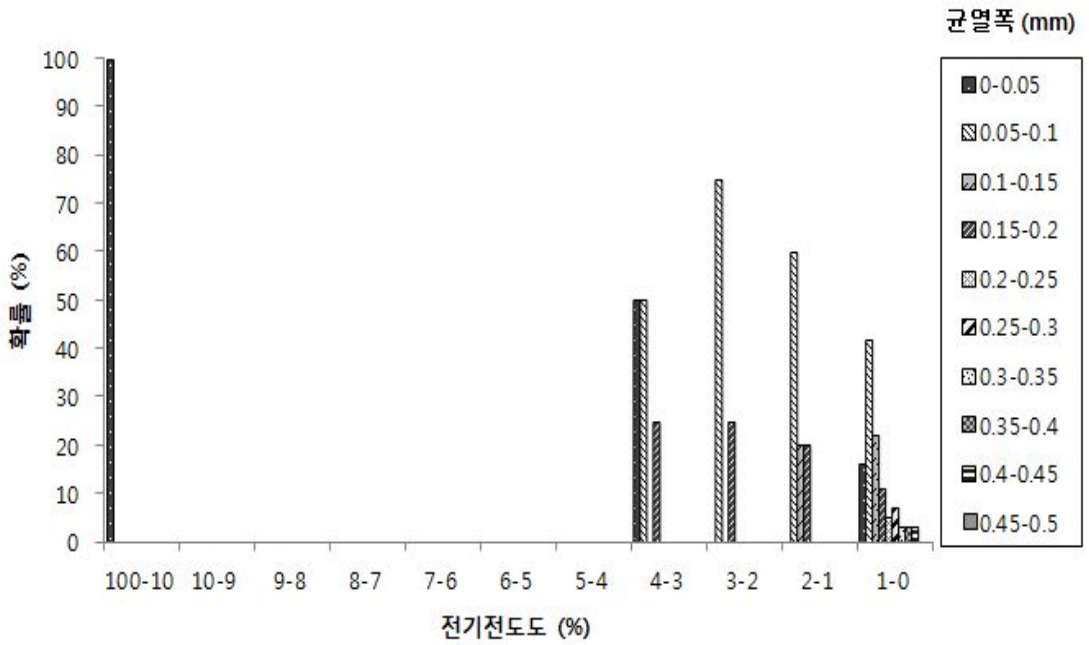


(b)시멘트 무게의 CNT 0.6% 혼입한 시멘트 복합재료

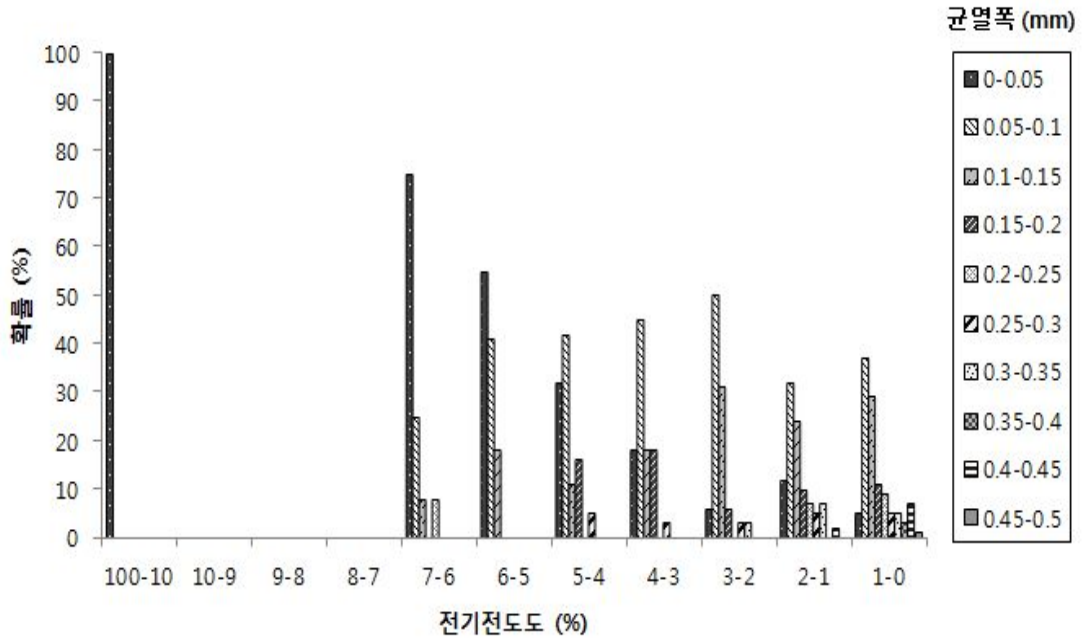
[그림 4-10] 포화 상태일 때 전기전도도에 따른 균열폭 확률

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)시멘트 무게의 CNT 0.3% 혼입한 시멘트 복합재료



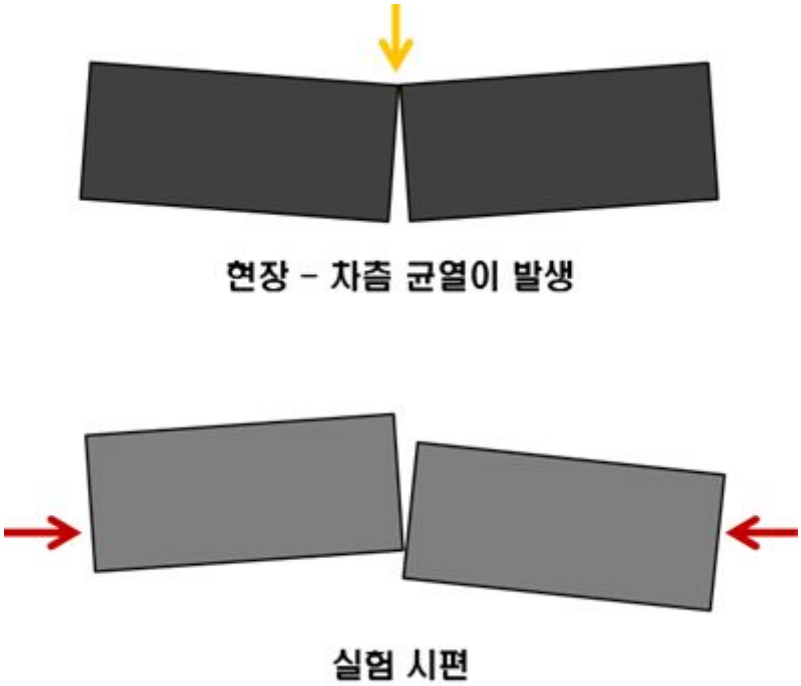
(b)시멘트 무게의 CNT 0.6% 혼입한 시멘트 복합재료

[그림 4-11] 건조 상태일 때 전기전도도에 따른 균열폭 확률

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

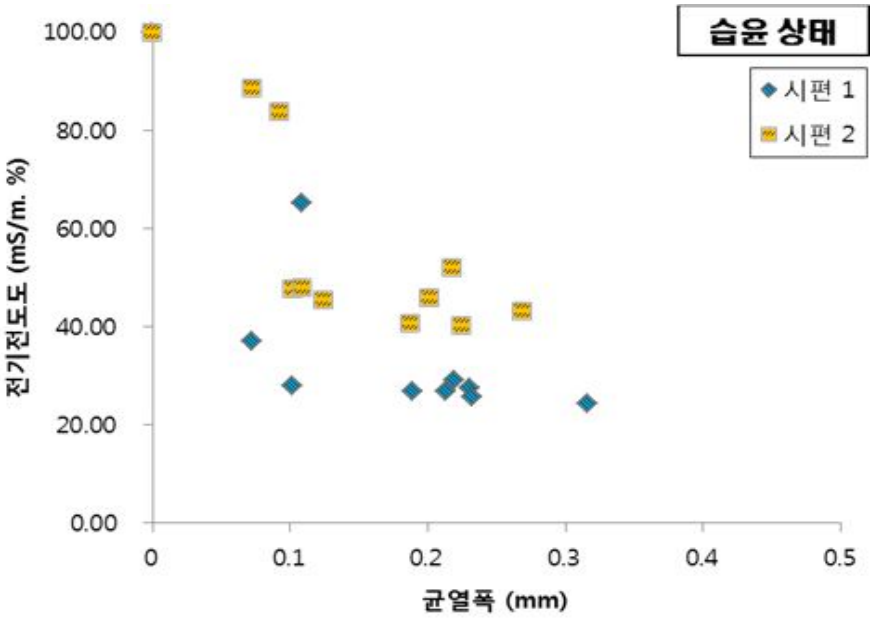
철근 모르타르에 매설된 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도를 [그림 4-13]에 나타나 있다. CNT/시멘트 복합재료의 균열폭이 증가할수록 전기전도도가 일정하게 감소하는 것을 알 수 있다. 특히, 이 경우 매설된 복합재료의 전기전도도는 매설 전과 크게 변화하지 않았다. 또한 본 결과는 위의 [그림 4-8], [그림 4-9]의 실험결과와 달리, 케이블 타이가 아닌 모르타르에 고정된 상태로 얻어진 것이다. 케이블 타이의 경우 균열을 인공적으로 발생한 후 균열폭을 차츰 줄이는 것으로, 균열폭이 큼에도 불구하고 어떤 형태로든 맞물려 있을 확률이 높다. 하지만 본 실험의 경우에는 CNT/시멘트 복합재료 시편이 모르타르에 고정되었으며 균열이 차츰 발생하기 때문에 시편이 부분적으로 연결되지 않았을 수 있다[그림 4-12]. 또한 휨 균열 하단부에 CNT/시멘트 복합재료가 존재하므로 균열 시편간 부착이 잘 되지 않았을 가능성이 더 크다.



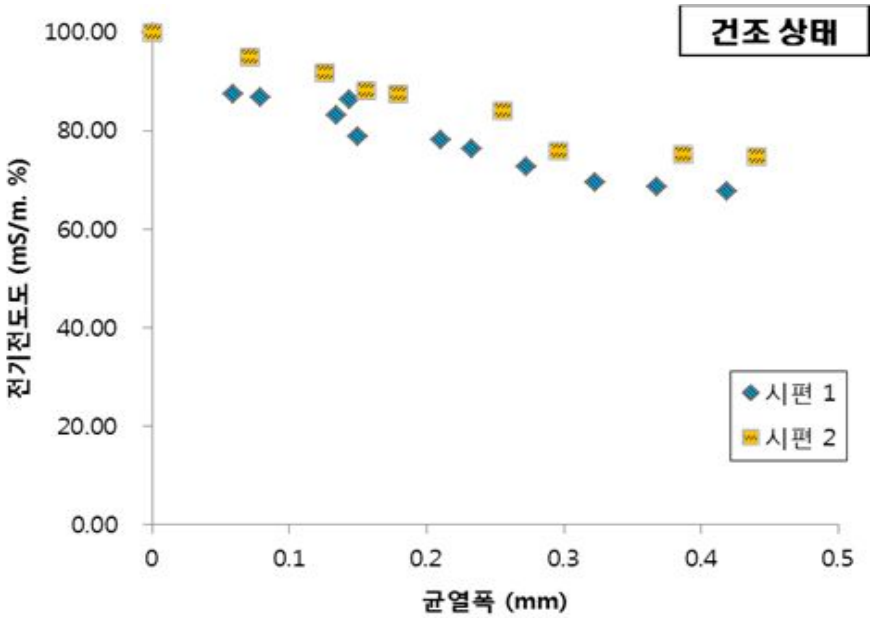
[그림 4-12] PSC 실험 시편 및 현장균열과 프리즘형 실험 시편 균열의 차이

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 습윤 상태



(b) 건조 상태

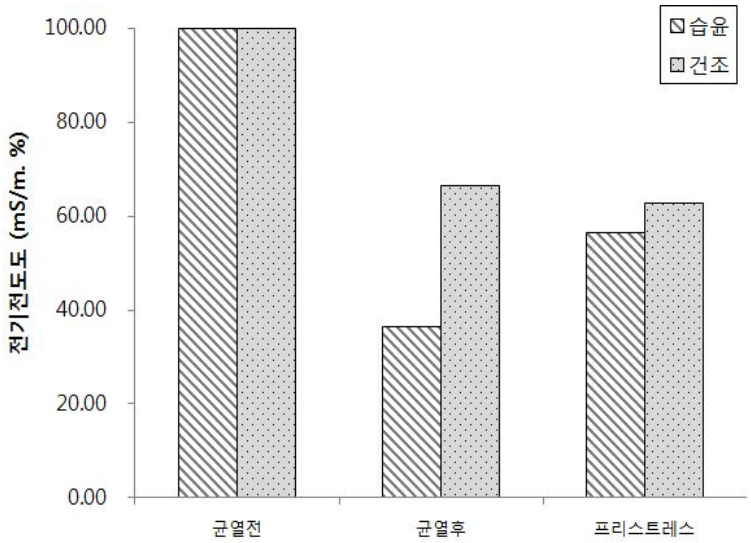
[그림 4-13] 철근 모르타르에 매립된 CNT/시멘트 복합재료의 균열폭에 따른 전기전도도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

시편이 포화된 경우 0.1 ㎜ 이상의 균열폭이 발생하면 전기전도도는 20~80% 이상 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 균열발생을 정확히 모니터링 할 수 있다는 것을 의미한다.

한편, 건조된 시편에서는 오히려 이러한 현상이 나타나는 것 같지 않은데, 그 이유는 다음과 같다. 본 연구에서 전기전도도의 레퍼런스는 균열 발생 전(전기전도도 100%)인데, 건조시편의 경우 균열 발생 전 시편을 건조만 시켰음에도 불구하고 전기전도도가 1/100 이하로 감소하였다. 이는 건조 시 복합재료 부분 혹은 전극부 등에 문제가 발생하였다는 것을 의미한다. 즉, 본 연구 결과 이러한 모니터링 기법은 건조시 특별한 주의를 기울여야 한다는 것을 알 수 있었다.

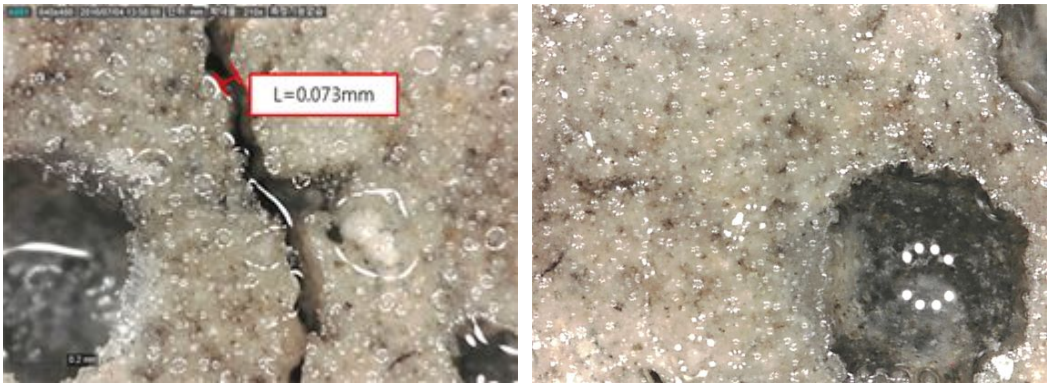


[그림 4-14] 측정상황에 따른 철근 모르타르에 매립된 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 차이

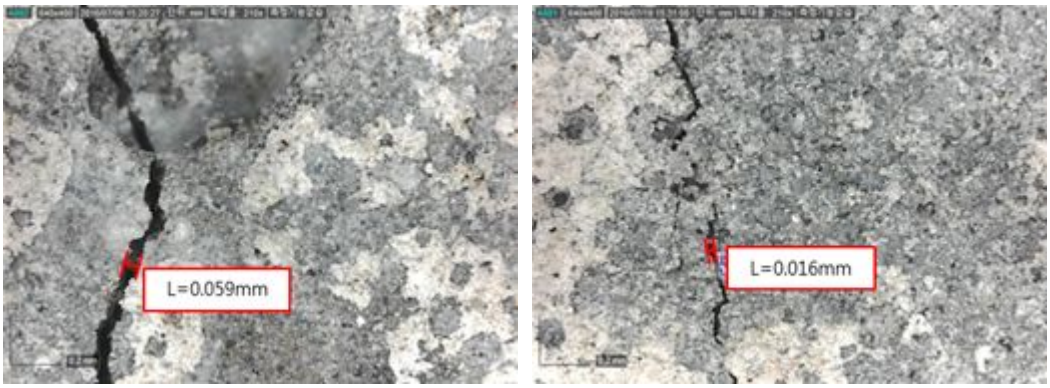
[그림 4-14]는 [그림 4-13]에서 나타낸 균열 발생 실험 전과 후의 복합재료 전기전도도 차이, 그리고 [그림 4-7]의 프리스트레스의 긴장력 회복을 모사한 압축가력 시 전기전도도 변화를 나타낸 것이다. 그림과 같이 균열된 시편을 프리스트레스를 통해 긴장력을 회복한 상황에서 전기전도도가 다시 원래상태로 돌아가지 않았음을 알 수 있다. 실제로 압축 후에도 0.02 ㎜ 이하의 균열은 존재한다. 이러한 초미세 균열은 포화 시편에서는 거의 가시적으로 확인이 불가능했다 [그림 4-15].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)



(b)

[그림 4-15] [그림 4-7]에 나타난 것과 같이 압축 후 철근 모르타르에 매립된 CNT/시멘트 복합재료의 균열 - 오른쪽 압축 전, 왼쪽 압축 후 : (a)습윤상태, (b)건조상태

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제5장 결론

탄소나노튜브 혼입 시멘트 복합재료는 고전도성(10 mS/m 이상)으로 내부 수분에 영향을 받지 않는다. 이를 통해 콘크리트 구조물의 균열, 균열폭 및 염소 침투 모니터링 가능성에 대해 연구하였다.

앞서 실험을 통해서 CNT/시멘트 복합재료는 철근에 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있었다. 또한 CNT/시멘트 복합재료 내에 염소 이온이 침투시 복합재료의 전기전도도 변화를 모니터링하여 염소 이온 침투에 대한 것을 모니터링 할 수 있는 가능성이 존재한다. CNT/시멘트 복합재료에 균열이 발생될 경우 복합재료의 전기전도도가 변화하는 것을 모니터링 함으로써 균열이 발생하는 것을 알 수 있다.

1. CNT/시멘트 복합재료를 활용한 염소 침투 모니터링 가능성 검토

   측정 결과를 통해 혼입된 염소량에 따라, CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도가 증가하는 경향을 확인하였다. 염소에 의한 전기전도도 변화폭은 시편의 함수율 및 CNT 혼입량에 따라 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 즉, CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도 변화를 확인 할 경우, 시편 내부에 염소이온이 침투하는 것에 대한 모니터링 가능성이 있음을 확인하였다.

2. CNT/시멘트 복합재료를 활용한 균열 모니터링 가능성 검토

   프리즘형 CNT/시멘트 복합재료 시편의 결과를 통해 균열이 발생함에 따라 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도가 변화하는 것을 확인하였다. 측정 결과에서 균열폭이 크지만 전기전도도는 낮게 나타났다. 그 이유는 어느 부분에서 시편이 맞물려 있을 가능성이 존재하기 때문이다. 그러나 전반적인 측정 결과를 통해서 CNT/시멘트 복합재료의 균열폭이 넓어질수록 전기전도도가 감소하는 것을 확인하였다. 그리고 철근모르타르 빔에 CNT/시멘트 복합재료를 매설하여 현장과 가장 유사한 실험을 진행하였다. 이 실험의 결과를 통해 모르타르에 매설된 CNT/시멘트 복합재료의 전기전도도가 균열폭에 따라 감소하는 것을 확인하였다. 이는 프리즘형 CNT/시멘트 복합재료에서 발생되는 오류값이 없기 때문이다. 이를 통해 시편에 균열이 발생하였을 경우, CNT/시멘트 복합재료를 통해 균열 발생 유무 및 균열폭 예측에 대한 가능성이 있는 것을 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참 고 문 헌

1) 오주. 정병열. 콘크리트 구조물 진단 및 유지관리. (2010).

2) 안동열. 조현준. 구조물의 균열 원인과 사례. 건설기술 쌍용 가을 기술정보II. (2013): 20-31.

3) 김진근. 콘크리트 균열의 원인. (1994).

4) 아파트 관리. http://www.apt-total.com/xe/?mid=aptm020203&l=en

5) 한국콘크리트학회 구조기준. (2012).

6) 김동훈. 임남기. 이상범. 철근콘크리트의 염해와 중성화 피해 사례 연구. 한국건축시공학회지 2.2 (2002): 165-172.

7) 김정섭. 염화물이 철근콘크리트의 부식에 미치는 영향. 한국구조물진단유지관리공학회 논문집 9.2 (2005): 147-154.

8) 한국도로공사 도로교통연구원. 해상교량 염해 내구성 평가 및 내염성능 향상방안 연구. (2013).

9) 한국시설안전공단. 교량구조물의 염화물 피해 사례 분석. (2011).

10) 조영돈. 압전형 센서의 종류와 특성. (2002).

11) 이창우. 이승재. 주기수. 광섬유센서를 이용한 대공간 구조물의 상시 모니터링. 한국공간구조학회지 7.3 (2007): 49-55.

12) 최낙삼. 김영복. 이덕보. 열-음향방출기법을 이용한 복합재료의 미세손상 검출 및 평가. Composites Research (구 한국복합재료학회지) 16.1 (2003): 26-33.

13) 김형기. 고전도성(10 mS/m 이상) 탄소나노튜브/시멘트 복합재료을 활용한 콘크리트 구조물의 균열 및 염소침투 센서의 원천기술 개발. 2016년 국토교통기술촉진연구사업(창조형모험) 최종보고서. (2016).

14) 박상준. 원철. 이상수. 권영호. 박칠림. 흑연을 혼합한 발열모르타르의 전기적 특성에 관한 연구. 한국콘크리트학회 1997년도 가을학술발표회 논문집. vol. 9 no. 2. (1997): pp.137-142.

15) 최길섭. 소양섭. 전기전도성 재료를 혼입한 시멘트 모르타르의 전기적 특성에 관한 연구. 한국콘크리트학회 2000년도 가을 학술발표회 논문집(II). vol. 12 no. 2. (2000):

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

pp.933-938.

16) 손영정. 전도성 재료를 혼입한 모르타르의 물리적 특성에 관한 연구. 한서대학교 토목공학과 석사졸업논문. (2010).

17) Wang, Q.. Wu, N.. A review on structural enhancement and repair using piezoelectric materials and shape memory alloys. Smart Materials and Structures. 21(1). (2012). 013001.

18) Lee, H.K.. Park, I.S.. Manufacturing method of carbon nanotube-graphene/cement composite improved in eletrical conductivity. December12, patent pending. (Application No. 10-2012-0148434). (2012).

19) Kim, H.K.. Smart construction materials: Current research on advanced an eco-friendly construction materials. The Eighth KAIST - Tongji Universit Symposium on Civil Engineering, Aug.9. (2013).

20) Kim, H.K.. Nam, I.W.. Lee, H.K.. Enhanced effect of carbon nanotube on mechanical and electrical properties of cement composites by incorporation of silica fume. Composite Structures, accepted. (2013).

21) 박일성. 탄소나노튜브/그래핀 혼입 모르타르 복합체의 전기적 특성. KAIST 석사학위논문. (2013).

22) 이철호. 수질측정에서의 전기전도도 계측, 2010년 제어계측분야별 동향과 기술변화. C&I, 2010.1. (2010).

23) Kim, H.K.. Nam, I.W.. Lee, H.K.. Overview of electrical performance of cement composites incorporating carbon nano-materials. Autumn Conference (2013).

24) Kim, Hyeong-Ki.. Chloride penetration monitoring in reinforced concrete structure using carbon nanotube/cement composite. Construction and Building Materials 96 (2015): 29-36.

25) Kim, H. K.. I. S. Park.. H. K. Lee.. Improved piezoresistive sensitivity and stability of CNT/cement mortar composites with low water-binder ratio. Composite Structures 116 (2014): 713-719.

26) 임민주. 김형기. 탄소나노튜브 혼입 고전도성 시멘트 복합재료의 규열폭과 전기전도도 간의 관계. 한국콘크리트학회 2016년 봄 정기학술대회 (2016).

Collection @ chosun