

나노소재 혼입 시멘트 복합체의 특성 평가 규격 조사 및 전기적 특성 평가 방법 고찰

A study on the characteristics evaluation standard of nanomaterials incorporated cement composites



최요민 Yomin Choi
한국산업기술시험원 재료기술센터
주임연구원
E-mail : dyals0308@ktl.re.kr



신현규 HyunGyoo Shin
한국산업기술시험원 시스템 에너지
본부장
E-mail : hgshin@ktl.re.kr

1. 서론

현대 건축물은 구조의 다양화, 고층화, 대형화가 가속됨에 따라 안전성에 대한 우려가 증가하고 있고, 이를 해결하기 위해 기계적 강도가 높고 내구성이 뛰어난 구조부재에 관한 관심이 높아지고 있다. 구조부재의 강도 및 내구성을 높일 수 있는 해결책으로는 주목받고 있는 방법은 나노소재를 도입하는 것으로, 나노기술이 발달함에 따라 첨단 나노기술과 건설 재료의 융합을 통한 차세대 건설 재료 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 다양한 연구 결과를 통해 나노소재를 시멘트에 혼입함으로써 수화 반응 촉진, 수화 생성물 제어, 치밀화 및 결합감소 등의 효과가 나타남을 확인하였다. 이를 통해 기계적 강도 및 내구성이 높은 콘크리트 구조물 시공이 가능해지며, 유지관리 요건이나 조기 교체 필요성이 줄고, 시공 시 사용되는 콘크리트 기반 재료의 사용량을 줄일 수 있다. 또한 TiO₂ 및 CNT와 같은 소재를 콘크리트에 혼합할 경우 구조물에 자정 및 자기 감지 기능을 부여할 수 있어, 오염물질의 광촉매 분해와 콘크리트 구조물의 구조적 결합 모니터링에 도움이 될 수 있다. 따라서 나노소재가 도입된 고강도 콘크리트 구조물을 기반으로 한 스마트 인프라 응용에 기대감이 크다.

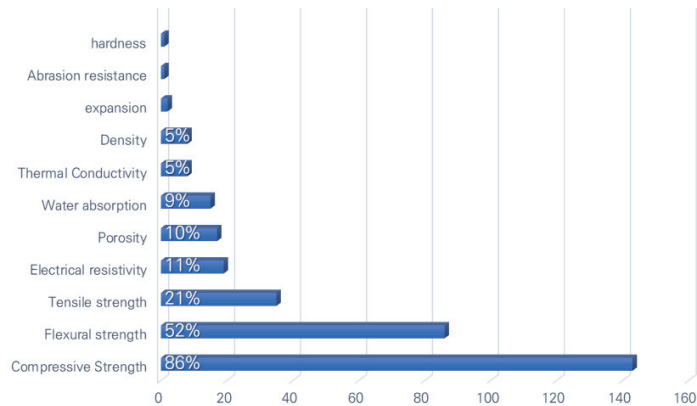


그림 1. 나노소재 활용 시멘트 복합체 문헌에 포함된 평가 항목 빈도

〈그림 1〉은 2000년부터 발행된 나노소재 활용 시멘트 복합체의 연구논문 300건을 조사하여 각 연구에서 평가한 시멘트 복합체의 평가 항목을 조사한 결과를 보여주고 있다. 86%의 연구논문에서 압축강도 평가를 수행하였으며, 그 뒤로 굽힘강도, 쪼갬인장강도, 전기적특성, 기공특성 및 수분흡수율에 대한 평가를 수행하였다. 나노소재를 혼입한 시멘트 복합체의 특성 평가 시 국가 및 국제 규격에 따라 특성을 평가하는 것은 결과의 신뢰성 확보 및 타 연구 결과와의 비교를 위해 중요한 요소이다. 따라서 본 고에서는 규격이 부재한 평가 항목에 대해 적절한 평가 방법을 제안하고, 나노소재 활용 시멘트 복합체의 평가 규격 현황을 소개하고자 한다.

2. 시멘트 복합체 평가 항목 및 평가 방법

2.1 강도

현대 사회는 인구밀집에 따른 거주문제 해결을 위해 구조물의 고층화, 대형화가 가속되고 있다. 이로 인해 구조물 안전성에 대한 우려가 증가하고 있으며, 구조 부재의 고강도화를 위한 연구에 관심이 높아지고 있다. 따라서 구조 부재의 기계적 강도는 구조물의 안전성을 평가하는 중요한 지표로 활용된다. 콘크리트 구조물은 일반적으로 눌러주는 압축력 이외에도 휘어지게 하는 굽힘력, 잡아당기는 인장력 등의 각종 응력을 받으며, 압축강도, 굽힘강도 및 쪼갬인장강도의 평가를 통해 응력에 대한 구조물의 안전성을 예측하고 있다.

Huy Viet Le et al.,¹⁾은 MWCNT를 포함한 섬유 및 입자 형상을 갖는 다양한 전도성 충전제를 콘크리트에 혼입함으로써 압축력에 의한 고장을 예측·진단할 수 있는 Smart ultra-high performance concretes(S-UHPCs)를 제작하였다. 압축강도(Compressive strength) 평가는 KS L 5105에 따라 (50 × 50 × 50) mm³의 큐빅 형태로 시험편을 제작하였으며, 1 mm/min의 압축 속도로 설정된 만능재료시험기(Universal testing machine, UTM)를 이용해 최대 하중을 측정하였다.

Jie Fan et al.²⁾은 MWCNT를 시멘트 페이스트 혼입 시 Styrene-acrylic emulsion(SAE)를 분산안정제로 활용하여 분산성 변화를 관찰하고, MWCNT의 분산성 개선을 통해 시멘트의 기계적 특성을 향상시키는 연구를 진행하였다. 굽힘강도 시험을 위해 3점 굽힘 시험이 수행되었으며, 이를 위해 ISO 679에 따라 (40 × 40 × 160) mm³ 크기로 시험편을 제작되었다. 시험 지지대 간의 거리는 100 mm, 하중 작용대는 시험 지지대 중간에 설치하였으며, (50 ± 10) N/s의 압축 속도로 파괴 시까지의 최대 하중을 측정하였다. 압축 강도 평가 또한 ISO 679에 따라 굽힘강도 시험에 의해 파단된 시험편의 측면 (40 × 40) mm² 면적을 이용하여 (2400 ± 200) N/s의 압축 속도로 파괴 시까지의 최대 하중을 측정하였다.

Morteza Mansouri Sarvandani et al.,³⁾은 MWCNT 혼입을 통한 시멘트 모르탈의 기계적 특성과 내구성에 미치는 영향을 관찰하였다. 압축강도 평가는 ASTM C109에 따라 (50 × 50 × 50) mm³의 큐빅 형태로 시험편을 제작하여, 900 N/s의 압축 속도로 파괴 시까지의 최대 하중을 측정하고 아래 식을 이용해 압축강도를 산출하였다.

$$\text{Compressive strength } (f_m) = \frac{P}{A} \quad \begin{array}{l} P: \text{최대 하중(N)} \\ A: \text{단면적(mm}^2\text{)} \end{array}$$

쪼갬인장강도(Splitting tensile strength) 평가를 위한 시험편은 ASTM C496에 따라 직경 50 mm, 길이 100 mm의 실린더 형태로 제작되었으며, 0.94 kN/s의 압축 속도로 파괴 시까지의 최대 하중을 측정하고 아래 식을 이용해 인장강도를 산출하였다.

$$\text{Splitting tensile strength } (T) = \frac{2P}{\pi dl}$$

P : 최대 하중(N)
 d : 시험편의 직경(mm)
 l : 시험편의 길이(mm)

또한 굽힘강도(Flexural strength) 평가를 위해 4점 굽힘 시험이 수행되었으며, 이를 위해 ASTM C348에 따라 (40 x 40 x 160) mm³ 크기로 시험품을 제작되었다. 시편 지지대 간의 거리는 140 mm, 시편 지지대와 하중 작용대 사이의 거리는 시편 지지대 간 거리의 1/3으로 설정하였으며, 0.3 mm/min의 압축 속도로 파괴 시까지의 최대 하중을 측정하고, 아래 식을 이용해 굽힘강도를 산출하였다.

$$\text{Flexural strength } (\sigma) = \frac{PL}{bt^2}$$

P : 최대 하중(N)
 L : 지지대 간 거리(mm)
 b, t : 시험편의 가로와 세로 길이(mm)

이와 같이 다양한 논문에서 국가 및 국제 규격에 따라 강도를 평가하고 있으며, 이 외에도 [표 1~3]과 같이 모르타르 및 콘크리트의 강도를 측정하는 국가 및 국제 규격이 다양하게 제정되어 있어, 연구개발 혹은 실무에서 해당 규격을 활용함으로써 시험 결과의 신뢰성 및 호환성을 확보하고 있다.

[표 1] 압축강도 평가 국가 및 국제 규격

규격번호	규격명	평가 방법 및 조건	
		시험품 크기	압축 속도
ISO 679	Cement Test methods Determination of strength	굽힘강도시험에 의해 파단된 시험품 측면 (40 x 40) mm ²	(2400 ± 200) N/s
BS EN 1015-11	Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar	굽힘강도시험에 의해 파단된 시험품 측면 (40 x 40) mm ²	(50 ~ 400) N/s
BS EN 196-1:	Methods of testing cement Determination of strength	굽힘강도시험에 의해 파단된 시험품 측면 (40 x 40) mm ²	(2400 ± 200) N/s
BS EN 12390-3	Testing hardened concrete—Part 3: Compressive strength of test specimens	[Cube type] (100, 150, 200, 250, 300) mm cube	(0.2 ~ 1.0) MPa/s
		[Cylinder type] - 지름 d, 직경 2d cylinder - d = [100, 113, 150, 200, 250, 300] mm	(0.2 ~ 1.0) MPa/s
ASTM C109	Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens) ¹	(50 x 50 x 50) mm ³	(900 ~ 1800) N/s
ASTM C39	Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens	- 지름 d, 직경 2d - 권장 : Φ150 mm x 300 mm 또는 Φ100 mm x 200 mm	(0.25 ± 0.05) MPa/s
KS L 5105	수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험방법	(50 x 50 x 50) mm ³	최대 하중이 20~80초 이내에 미치는 속도

[표 2] 굽힘강도 평가 국가 및 국제 규격

규격번호	규격명	평가 방법 및 조건				
		평가방법	시험품 크기(mm)	롤러간 거리 (mm)		압축 속도
				지지롤러	하중롤러	
ISO 679	Cement Test methods Determination of strength	3점 굽힘	160 x 40 x 40	100	-	(50 ± 10) N/s
BS EN 1015-11	Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar	3점 굽힘	160 x 40 x 40	100	-	(10 ~ 50) N/s
BS EN 196-1:	Methods of testing cement Determination of strength	3점 굽힘	160 x 40 x 40	100	-	(50 ± 10) N/s
BS EN 12390-5	Testing hardened concrete – Part 5: Flexural strength of test specimens	4점 굽힘	- 폭, 깊이 d = (100, 150, 200, 250, 300) mm - 길이 L = 3,5 d	3d	d	(0,04~0,06) MPa/s
ASTM C348	Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic- Cement Mortars	3점 굽힘	160 x 40 x 40	120	-	(2640 ± 110) N/s
ASTM C78	Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)	4점 굽힘	- 깊이(d) = L/3 - 길이 ≥ 50 mm & 길이 ≥ L - 폭과 깊이 비율 < 1.5	L	L/3	(0,9~1,2) MPa/min
ASTM C293	Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)	3점 굽힘	- 깊이(d) = L/3 - 길이 ≥ 50 mm & 길이 ≥ L - 폭과 깊이 비율 < 1.5	L	-	(0,9~1,2) MPa/min
KS F 2408	콘크리트의 휨 강도 시험방법	4점 굽힘	- 폭, 깊이 d = (100, 150, 200, 250, 300) mm - 길이 L = 3,5 d	3d	d	(0,06 ± 0,04) MPa/s

[표 3] 쪼갬인장강도 평가 국가 및 국제 규격

규격번호	규격명	평가 방법 및 조건	
		시험품 크기	압축 속도
ASTM C496	Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens	- 지름 d, 직경 2d - 권장 : Φ150 mm x 300 mm 또는 Φ100 mm x 200 mm	(50 ~ 100) kN/min
BS EN 12390-6	Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting strength of test specimens	- 지름 d, 직경 2d cylinder - d = [100, 113, 150, 200, 250, 300] mm	(0,04~0,06) MPa/s
KS F 2423	콘크리트의 쪼갬 인장 강도 시험방법	- 지름 : 골재 최대 치수의 4배 이상 이며 150 mm 이상 - 길이 : 지름의 1배 이상 2배 이하 - 권장 : Φ150 mm x 200 mm	(0,06 ± 0,04) MPa/s

2.2 기공특성

기공률과 기공 크기의 증가는 시멘트 재료의 기계적 특성과 내구성을 감소시키는 요인으로 작용할 수 있다. 따라서 기공률과 기공크기 분포는 시멘트 기반 재료의 중요한 평가 지표로 활용된다.

Jie Fan et al.²⁾은 MWCNT을 시멘트 페이스트 혼입 시 Styrene-acrylic emulsion(SAE)를 분산안정제로 활용하여 분산성 변화를 관찰하고, MWCNT의 분산성 개선을 통해 시멘트의 기계적 특성을 향상시키는 연구를 진행하였다. 개발된 시멘트 페이스트의 기공률은 ISO 15901-1에 따라 수은압입법(Mercury intrusion porosimetry, MIP)을 통해 평가하였다.

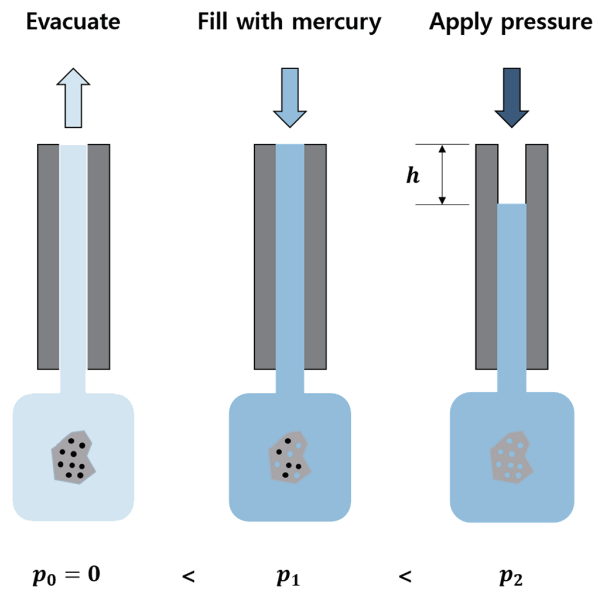


그림 2. 수은압입법을 이용한 기공분석 모식도

Michal Lojka et al.⁴⁾는 옥시염화마그네슘 시멘트(Magnesium oxychloride cement)에 MWCNT 혼입에 따른 특성변화를 관찰하였으며, 부피밀도와 진밀도를 측정하고 이를 통해 기공률을 산출하였다. 부피 밀도(db)는 BS EN 1015-6에 따라 시험품의 건조질량 대비 부피의 비를 통해 측정하였으며, ISO 12154에 따라 Pycnometer를 이용해 진밀도(da)를 측정하였다. 또한 기공률은 측정된 부피밀도와 진밀도를 아래식에 대입하여 산출하였다.

$$Porosity(\psi) = \frac{d_s - d_b}{d_s}$$

José da Silva Andrade Neto et al.⁵⁾은 시멘트 매트릭스 내의 CNT와 metakaolin 상호 작용에 대해 관찰하였으며, 시험품의 겉보기 기공률은 ISO 18754에 따라 시험품의 건조질량(Wd), 침지질량(Ws), 포수액 속 질량(Wi)를 측정하고 아래 식을 이용해 산출하였다.

$$Apperance\ porosity\ (\pi) = \frac{W_s - W_d}{W_s - W_i}$$

이와 같이 다양한 논문에서 아래와 같은 국가 및 국제 규격에 따라 기공특성을 평가하고 있으며, 연구개발 혹은 실무에서 해당 규격을 활용함으로써 시험 결과의 신뢰성 및 호환성을 확보하고 있다.

- ISO 15901-1 Evaluation of pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption - Part 1: Mercury porosimetry
- BS EN 1015-6 Methods of test for mortar for masonry. Determination of bulk density of fresh mortar
- ISO 12154 Determination of density by volumetric displacement - Skeleton density by gas pycnometry
- ISO 18754 Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) - Determination of density and apparent porosity

2.3 흡수율

시멘트 기반 재료의 강도와 내구성은 수분 흡수량과 직결되며, 시멘트 복합재료의 수분 흡수량 감소를 통해 강도 및 내구성을 개선할 수 있다. 따라서 수분 흡수량은 시멘트 기반 재료의 중요한 평가 지표로 활용될 수 있다.

Michal Lojka et al.⁴⁾는 옥시염화마그네슘 시멘트에 MWCNT 혼입에 따른 특성변화를 관찰하였다. 수분흡수율은 BS EN 1015-18에 따라 (160 × 40 × 40) mm³ 프리즘 형태의 시험품을 제작 후 paraffin wax와 같은 밀봉소재를 이용해 4개의 긴 면을 밀봉한 후 반쪽으로 나누어, 깨진 면을 물에 5 ~ 10 mm 깊이로 담그고 물의 높이를 일정하게 유지하며 초기 무게 대비 시간에 따른 무게 변화를 관찰하였다.

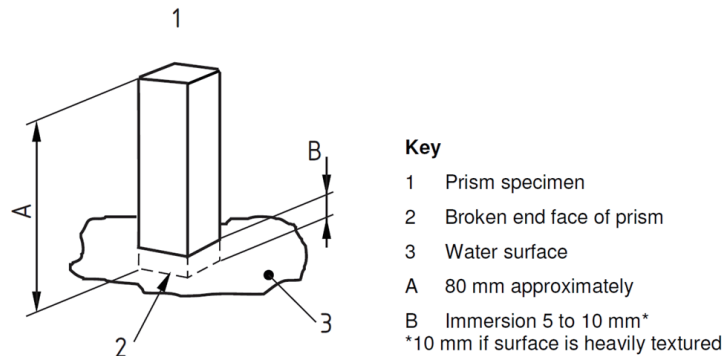


그림 3. EN 1015-18에 따른 수분흡수율 평가 모식도

José da Silva Andrade Neto et al.⁵⁾은 시멘트 매트릭스 내의 CNT와 metakaolin 상호 작용에 대해 관찰하였으며, 시험품의 수분흡수율은 NBR9779에 따라 시험품을 지지대 위에 놓고 시험품 약 5 mm가 잠기도록 물을 채운 후 일정시간 동안 유지하며 초기 무게 대비 시간에 따른 무게 변화를 관찰하였다.

이와 같이 다양한 논문에서 아래와 같은 국가 및 국제 규격에 따라 기공특성을 평가하고 있으며, 연구개발 혹은 실무에서 해당 규격을 활용함으로써 시험 결과의 신뢰성 및 호환성을 확보하고 있다.

[표 4] 수분흡수율 평가국가 및 국제 규격

규격번호	규격명	평가 방법 및 조건	
		시험품 크기	침지방법
BS EN 1015-18	Methods of test for mortar for masonry — Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar	160 x 40 x 40 시험품을 반으로 쪼갬	깨진면을 5~10 mm 깊이로 물에 담겨 시간에 따른 무게 변화 비교
ABNT NBR 5738	Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova	[Prism type] - (100 x 100 x 350) mm ³ - (150 x 150 x 500) mm ³ - (250 x 250 x 800) mm ³ - (450 x 450 x 1400) mm ³	지지대 위에 놓고 시험품 약 5 mm가 잠기도록 물을 채운 후 시간에 따른 무게 변화 비교
		[Cylinder type] - 지름 d, 직경 2d cylinder - d = [10, 15, 20, 25, 30] cm	
ASTM C642	Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete	< 350 cm ³	시험품 전체를 물에 담겨 시간에 따른 무게 변화 비교
ASTM C1403	Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars	(50 x 50 x 50) mm ³	물의 증발을 막기 위해 뚜껑이 있는 용기 안에서 시험품을 지지대 위에 놓고 시험품 약 3 mm가 잠기도록 물을 채운 후 시간에 따른 무게 변화 비교

2.4 전기적 특성

구조물의 갑작스러운 고장을 예측하고 예방하기 위한 구조상태 자가 감지 시스템은 스마트 건설재료(Smart Construction Materials, SCMs)의 중요 요소 중 하나이다. 이러한 자가 감지 시스템은 SCMs 내부의 전기적 특성 변화를 기반으로 작동되며, 따라서 전기적 특성은 SCMs의 성능을 예측하는 중요한 평가 지표로 활용될 수 있다.

Huy Viet Le et al.¹⁾은 MWCNT를 포함한 섬유 및 입자 형상을 갖는 다양한 전도성 충전제를 콘크리트에 혼입함으로써 압축력에 의한 고장을 예측·진단할 수 있는 Smart ultra-high performance concretes(S-UHPCs)를 제작하였다. 전기적 특성 평가를 위한 시험편은 20 mm 간격으로 떨어진 두 개의 구리 메쉬 전극(가로 70 mm, 세로 45 mm)을 포함한 (50 x 50 x 50) mm³의 큐빅 형태로 제작되었으며, AC impedance 측정기를 통해 측정된 전기저항 (R)과 아래의 식을 이용해 고유저항을 산출하였다.

$$\text{Electrical Resistivity } (\rho) = R \frac{A}{L}$$

A: 단면적(mm²)

L: 구리 메시 전극 사이의 거리(mm)

Million Tafesse et al.⁶⁾은 MWCNT의 기계적 분산에 따른 시멘트 복합체의 유동성과 전기적 특성 사이의 관계를 이해하고, 작업성과 전기전도도가 높은 MWCNT/시멘트 복합체의 혼합비를 확인하는 연구를 수행하였다. 전기적 특성 평가를 위한 시험편은 (40 x 40 x 160) mm³ 형태로 제작되었으며, 양 끝에 전극으로 사용되는 Silver paste를 도포하여 AC impedance 측정기를 통해 측정된 전기저항 (R)을 이용해 고유저항을 산출되었다.

Ramanjit Kaur⁷⁾은 polycarboxylate 유동화제를 이용해 개질된 Graphene oxide와 Carbon nanotube 혼입해 시멘트 복합체를 제작하여 특성을 비교하였다. 전기적 특성 평가를 위해 (70.6 x 70.6 x 70.6) mm³의 큐빅 형태 시험편을 제작하였으며, 직류 4전극법(DC four-terminal method)을 이용해 전기저항을 평가하였다.

이 외에도 기존 문헌에 활용된 다양한 방법의 전기적 특성 평가 방법을 [표 4]에 제시하였다. 콘크리트 및 모르타르 관련 전기적 특성 평가에 대한 국가 및 국제 규격이 부재하여 시험자간 측정방법, 조건, 시험품 크기, 전극의 재질, 크기, 전극간 거리 등 대부분의 조건이 서로 다른 것을 알 수 있으며, 이로 인해 시험결과와의 신뢰성이 부족하고, 호환성이 없어 연구 논문 간 결과를 비교할 수 없다. 따라서 전기적 특성 평가 방법에 대한 규격 제정이 시급하다.

[표 5] 기존 문헌의 전기적 특성 평가 방법

Ref.	측정방법 및 조건			시험품 크기 (mm)	전극		
	방법	전압	주파수		재질	크기 (mm)	거리 (mm)
Huy Viet Le et al. ¹⁾	impedance	250 mV	0.1Hz~10MHz	50 mm cubic	Cu wire mesh	70x45	20
Million Tafesse et al. ⁶⁾	impedance	-	20Hz~100kHz	40x40x160	SUS plates	-	160
	DC 2-terminal	-	-				
Myungjun Jung et al. ⁸⁾	DC 4-terminal	19~23 V	-	50 mm cubic	Cu plates coated with silver paint	20x60x0.4	20
		19~23 V	-	40x40x160		10x60x0.4	80
Myungjun Jung et al. ⁹⁾	impedance	-	10kHz	50 mm cubic	Cu plates coated with silver paint	20x20x0.4	20
Weiwen Li et al. ¹⁰⁾	impedance	2V	100kHz	-	Titanium	-	-
Ramanjit Kaur et al. ⁷⁾	DC 4-terminal	-	-	70.6 mm cubic	Cu plates	-	-
Myungjun Jung et al. ¹¹⁾	DC 4-terminal	-	-	50 mm cubic	Cu plates coated with silver paint	20x20	20
G.M. Kim et al. ¹²⁾	DC 4-terminal	-	-	50 mm cubic	Cu plates coated with silver paint	70x30	10
Doo-Yeol Yoo et al. ¹³⁾	impedance	-	100kHz	50 mm cubic	Cu plates	20x75	10

3. 전기적 특성 평가 방법 검토

2.4절을 통해 콘크리트 및 모르타르 관련 전기적 특성 평가 방법이 규격화 되어있지 않음을 확인하였으며, 이로 인해 평가 결과의 신뢰성 및 호환성에 문제가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 다양한 방법의 전기적 특성 평가 방법을 비교하고, 적절한 평가 방법을 제안하고자 한다.

기존 문헌을 통해 전기적 특성을 평가하는 방법을 크게 DC 2-terminal, DC 4-terminal 및 Impedance 방법으로 구분할 수 있으며 해당 방법에 따른 전기적 특성 변화를 관찰하였다. 시험품은 시멘트 대비 CNT 함량을 0.1 wt %로 고정하여 제작하였으며, 시험품의 크기, 전극의 종류 등은 표와 같이 기존 문헌에서 높은 빈도로 사용되는 조건을 선택하여 제작하였다. <그림 4>는 전기적 특성 측정 방법 모식도를 보여주고 있다.

[표 6] 전기적 특성 평가 조건

측정 방법	측정 조건	시험품 크기	전극			
			재질	크기 (mm)	거리 (mm)	깊이 (mm)
DC 2-terminal	-	50 mm cubic	Copper	20 x 70 x 0.1	20	50
DC 4-terminal	(-20, -10, 10, 20) mA					
impedance	(0.25, 0.5, 1, 2) V (0.1, 1, 10, 100) KHz					

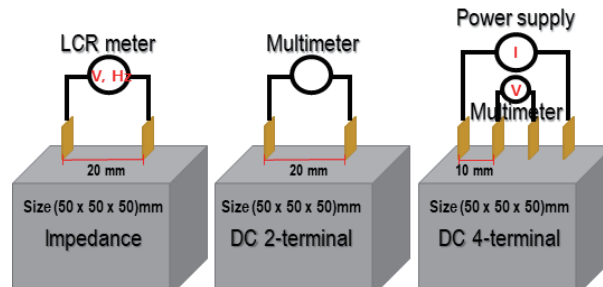


그림 4. 다양한 방법을 이용한 전기적 특성 평가 방법 모식도

<그림 5>는 측정된 저항의 1시간 평균 대비 시간에 따른 저항 변화율을 보여주고 있다. DC 2-terminal 및 DC 4-terminal 방법의 경우 1시간의 전기적 특성을 측정하는 동안 저항 변화율이 각각 최대 24% 및 최대 82%로 높게 나타나며, 안정화되지 않음을 확인할 수 있다. 반면 Impedance 방법의 경우 1시간 동안 저항 변화율이 1.7% 이내로 시간에 따른 변화율이 낮고, 빠르게 안정화됨을 확인하였다. 따라서 측정 방법의 정확성 및 신속성을 고려할 때 Impedance 방법을 통해 전기적 특성을 평가하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

그림은 Impedance 방법을 이용해 0.5V, 100kHz 조건에서 (5, 10, 20) MPa 압축 하중을 인가했을 때 시멘트 복합체의 저항 변화를 보여주고 있으며, 측정결과 압축 하중이 증가함에 따라 저항이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 기존 논문에서 보고한 바와 같이 압축 하중에 의해 CNT 전도성 필러 간 접촉이 많아져 전도도가 증가하기 때문으로 판단되며, 해당 결과를 통해 Impedance 측정 방법이 압축력에 의한 구조물의 고장 예측 및 진단 평가에 적합함을 알 수 있다.

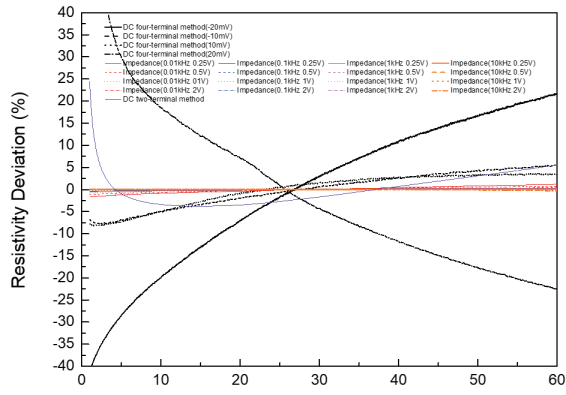


그림 5. 전기적 특성 평가 방법과 시간에 따른 저항 변화율

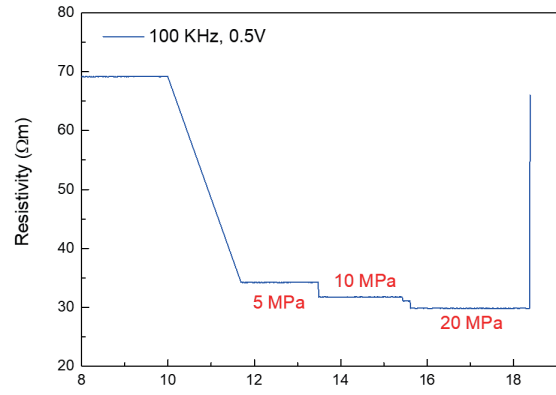


그림 6. Impedance 방법을 이용한 저항 측정 시 압축 하중에 따른 저항 변화

4. 맺음말

본 고에서는 기존 문헌자료에서 평가한 나노소재 활용 시멘트 복합체의 평가 항목을 조사하고, 평가 항목의 국가 및 국제 규격 현황을 소개하였다. 조사 결과 강도, 전기적 특성, 기공 특성 및 수분흡수율이 높은 비율로 평가되고 있음을 확인하였으며, 전기적 특성을 제외한 나머지 항목은 국가 및 국제 규격이 존재하고 연구개발에 활용되고 있음을 확인하였다. 하지만 전기적 특성 평가 방법은 국가 및 국제 규격이 부재하여 연구논문 마다 서로 다른 분석 방법 및 조건이 활용되고 있어 신뢰성 및 호환성 확보에 어려움이 있다.

따라서 시멘트 복합체 전기적 특성 평가에 적합한 측정 방법을 검토하기 위해 문헌에서 제시하는 다양한 측정 방법을 활용하여 CNT 혼입 시멘트 복합체의 저항을 측정하였다. 이를 통해 Impedance 방법이 시간에 따른 편차가 적고 빠르게 안정화됨을 확인하였고, 압축 하중에 의한 저항 감소가 관찰되어 구조물의 고장 예측 및 진단 평가에 적합할 것으로 판단하였다. 해당 결과를 바탕으로 시멘트 복합체의 전기적 특성 평가 방법을 규격화함으로써 시멘트 복합체 특성 평가의 신뢰성 및 호환성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Huy Viet Le et al., Journal of Building Engineering, 44 (2021), 102717
- Jie Fan et al., Materials, 13 (2020), 2807
- Morteza Mansouri Sarvandani et al., Journal of Building Engineering, 41 (2021), 102407
- Michal Lojka et al., Materials, 14 (2021), 484
- José da Silva Andrade Neto et al., Construction and Building Materials, 271 (2021), 121903
- Million Tafesse et al., Construction and Building Materials, 293 (2021), 123436
- Ramanjit Kaur et al., Construction and Building Materials, 202 (2019), 121
- Myungjun Jung et al., Materials and Design, 196 (2020), 109127
- Myungjun Jung et al., Cement and Concrete Research, 131 (2020), 106017
- Weiren Li et al., Science and Engineering of Composite Materials, 27 (2020), 281
- Myungjun Jung et al., Journal of the Korea Concrete Institute, 31 (2019), 69
- G.M. Kim et al., Construction and Building Materials, 177 (2018), 428
- Doo-Yeol Yoo et al., Sensors, 17 (2017), 1064