



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년09월30일
(11) 등록번호 10-2306459
(24) 등록일자 2021년09월23일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C04B 18/14 (2006.01) C04B 14/06 (2006.01)
C04B 14/48 (2006.01) C04B 28/02 (2006.01)
C04B 103/30 (2006.01) C04B 111/94 (2006.01)

(52) CPC특허분류
C04B 18/142 (2013.01)
C04B 14/06 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2019-0140226

(22) 출원일자 2019년11월05일

심사청구일자 2019년11월05일

(65) 공개번호 10-2020-0056305

(43) 공개일자 2020년05월22일

(30) 우선권주장
1020180140120 2018년11월14일 대한민국(KR)

(56) 선행기술조사문헌

CN102493490 A*

KR101888481 B1*

KR1020160028569 A

KR101577605 B1

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

세종대학교산학협력단

서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)

(72) 발명자

김동주

서울특별시 광진구 능동로 209(군자동) 세종대학교 광개토태관 321호

래 휘비엣

서울특별시 광진구 동일로48길 32-3(군자동)

이선열

서울특별시 광진구 능동로 209(군자동) 세종대학교 충무관 706호

(74) 대리인

유병욱

전체 청구항 수 : 총 2 항

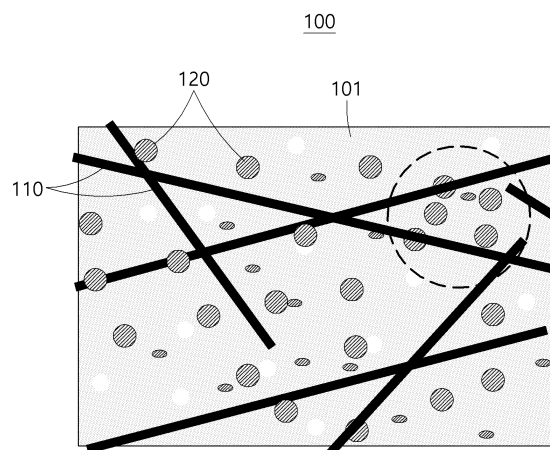
심사관 : 이상원

(54) 발명의 명칭 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물

(57) 요약

본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물은, 시멘트, 실리카 흙, 실리카 파우더, 전도성 재료, 고성능 감수제 및 물을 포함하고, 상기 전도성 재료는 제강 슬래그 및 강섬유를 포함할 수 있다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

- C04B 14/48* (2013.01)
- C04B 18/146* (2013.01)
- C04B 28/02* (2013.01)
- C04B 2103/302* (2013.01)
- C04B 2111/94* (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

| | |
|-------------|------------------------------------|
| 과제고유번호 | 1615010670 |
| 부처명 | 국토교통부 |
| 과제관리(전문)기관명 | 국토교통과학기술진흥원 |
| 연구사업명 | 국토교통기술촉진연구(R&D) |
| 연구과제명 | 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 기술 개발 |
| 기여율 | 1/1 |
| 과제수행기관명 | 세종대학교산학협력단 |
| 연구기간 | 2019.01.01 ~ 2019.12.31 |

명세서

청구범위

청구항 1

자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물에 있어서,

시멘트, 실리카 흙, 실리카 파우더, 전도성 재료, 규사, 고성능 감수제 및 물을 포함하고,

상기 전도성 재료는 제강 슬래그 및 강섬유를 포함하며,

상기 시멘트 100 중량부 기준으로,

상기 실리카 흙 15 중량부, 상기 실리카 파우더 25 중량부, 상기 제강 슬래그 50 중량부, 상기 규사 50 중량부, 상기 고성능 감수제 5.1 중량부 및 상기 물 20 중량부를 포함하고,

상기 실리카 흙은 상기 제강 슬래그 보다 적은 양으로 포함됨으로써 상기 제강 슬래그 또는 상기 강섬유의 뭉침 현상을 방지하여 상기 시멘트 복합 재료 조성물 내에서 상기 제강 슬래그 또는 상기 강섬유가 고르게 분산되게 하며,

상기 제강 슬래그는 직경 0.39 mm 이하의 모래 입자 크기로 가공되어 상기 시멘트 복합재료 조성물 내에 균질하게 분산되는 제강 슬래그 잔골재로 마련되고,

상기 강섬유는 상기 시멘트 복합 재료 조성물 내에 균질하게 분산되도록 길이가 짧은 복수개의 단섬유(short smooth steel fiber)를 포함하고 상기 시멘트 복합 재료 조성물로 형성된 시험체 부피의 2%로 마련되며,

상기 제강 슬래그와 상기 강섬유는 서로 접촉하여 전기적 네트워크를 형성하되, 응력이 변하는 경우 상기 시멘트 복합 재료 조성물 내에 고르게 분산된 복수개의 상기 제강 슬래그 또는 상기 강섬유 중 동일한 상기 전기적 네트워크 내에서 서로 접촉하는 상기 제강 슬래그 및 상기 강섬유의 개수가 늘어나거나 증가함으로써 상기 전기적 네트워크가 확대되고 확대된 상기 전기적 네트워크로부터 응력 변화를 자가 센싱하는 것을 특징으로 하는, 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 제강 슬래그는 크기 또는 입경이 모래 입자 정도인 것이 혼입되며 다른 잔골재와 혼합하여 사용하지 않고 단독으로 혼입되는 것을 특징으로 하는, 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물.

청구항 3

삭제

청구항 4

삭제

청구항 5

삭제

청구항 6

삭제

청구항 7

삭제

청구항 8

삭제

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물에 관한 것으로, 보다 상세하게는 시멘트 복합 재료 자체가 하중 상태를 감지할 수 있는 자가 응력의 변화를 센싱하거나 측정할 수 있는 제강 슬래그와 강섬유를 포함하는 시멘트 복합재료 조성물에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 시멘트와 골재 등의 복합재료를 통해 제조되는 콘크리트 구조물은 도시 건축물 및 사회기반시설 건립에 가장 폭넓게 이용되고 있는 건축 구조물로서, 오랜 기간 동안 안전하고 견고하게 유지될 수 있도록 상기 콘크리트 구조물의 균열 및 손상으로 인한 붕괴 등의 위험을 실시간 혹은 사전에 감지하거나 예측할 수 있는 시스템에 관한 요구가 증가하고 있다.

[0003] 기존의 콘크리트 구조물의 손상을 감지하는 시스템에는 다양한 종류의 변형률 또는 변위 측정장치들을 추가적으로 설치하여 실시간 측정함으로써, 구조물의 손상 및 건전도를 측정하는 모니터링 시스템 및 안전진단 방법 등이 수행되어 왔다.

[0004] 또한, 다양한 전기화학적 방법들이 적용될 수 있는데, 그 중에서도 전기 비저항법은 콘크리트 구조물에 전류를 통전시켜 비저항을 측정하여 철근의 부식 정도를 조사하는 비파괴 부식진단법이 대표적인 예에 해당한다.

[0005] 공개특허 제2011-0010853호에는 철근콘크리트 구조물의 전기비저항을 직접 측정하여 철근의 부식 환경 및 그 상태를 평가할 수 있는 비파괴 부식진단시스템이 제시되어 있으며, 철근 직상부의 콘크리트 표면 외측에 2개의 전류전극과, 내측에 2개의 전압전극을 동일한 간격으로 철근 길이방향과 평행하게 설치하여 전류원에 의해 발생한 응답전압을 측정하여, 철근의 부식환경을 나타내는 철근 표면비저항을 추정하도록 함으로써 콘크리트 구조물의 철근의 부식 및 내구성에 관한 정기검사 및 상시 모니터링을 진행하는 것을 기술적 특징으로 하고 있다.

[0006] 하지만, 이러한 콘크리트 구조물의 철근부식 및 내구성 상시 모니터링 방법은 단순히 콘크리트 내부에 형성된 전기 전도성 재질인 철근의 부식 정도만을 측정할 수 있는 한계가 있고, 전체적인 콘크리트 구조물의 균열과 같은 손상에 관한 정보를 제공할 수 없다는 문제점이 존재한다.

[0007] 별도의 변형률 또는 변위를 측정하는 센서를 구조물에 별도로 부착 또는 매립하는 현재의 모니터링 시스템들은 구조물의 수명과 비교하여 볼 때, 매우 짧은 센서의 내구수명으로 인해 구조물의 전체 수명 동안 계속하여 사용될 수 없다는 문제점이 있다. 또한, 센서를 부착한 모니터링 시스템의 경우, 센서 위치에서만 응답을 가지고 전체 구조물의 건전성을 판단하기에는 다소 무리가 있다.

[0008] 또한, 공개특허 제2005-0018744호에는 시멘트 페이스트 또는 모르타르에 폴리에틸렌(PE) 섬유나 폴리비닐알코올(PVA) 섬유 또는 폴리프로필렌(PP) 섬유를 마이크로 섬유로, 강섬유(SF)나 스틸코드(SC) 또는 폴리비닐알코올(PAV) 섬유를 매크로 섬유로 사용하여 제조된 고인성 시멘트 복합체가 제시되어 있는데, 이러한 고인성 시멘트 복합체는 휨 및 인장하중 작용 하에서 변형 경화특성과 멀티플 크랙 특성을 갖고 있어 높은 휨 및 인장강도, 변형능력 및 에너지 흡수능력을 발휘할 수 있을 뿐만 아니라 균열 폭을 제어함으로써 각종 열화인자의 침투를 억제할 수 있는 장점이 제시되어 있다.

[0009] 최근 폴리비닐알코올 섬유를 사용한 고인성 시멘트 복합체에 전도성이 우수한 카본블랙(Carbon black)을 혼입하여 균열 및 손상을 감지하는 결과를 발표한 바 있으나, 폴리비닐알코올 섬유의 낮은 전기전도성으로 인해 균열이 발생함에 따라 전기저항이 오히려 증가하였다. 따라서, 매우 낮은 전기전도성을 측정할 수 있는 전기저항 측정장치가 필요하다.

[0010] 기존 구조물 손상을 감지하기 위해, 다양한 전도성 재료(Carbon fiber, CNT, Carbon black, Nickel powder 등)가 보강된 자기 감지 시멘트계 복합재료는 균열이 생기기 이전의 선탄성 구간 내에서만 변형 감지 특성을 갖고, 균열 발생 이후 그 감지능력을 잃어버리는 문제점이 존재한다.

[0011] 이러한 단점을 보완하기 위해 강섬유를 혼입한 strain-hardening steel-fiber-reinforced concrete(SH-SFRC)

또는 강섬유와 카본블랙을 함께 혼입한 시멘트계 복합체 자체의 전기전도성을 증가시킴과 동시에 균열 발생 이후에도 감지능력이 유지되는 것으로 알려져 있다.

- [0012] 이와 같이, 종래 기술의 대부분은 높은 전기전도성을 갖는 카본계 나노 재료를 시멘트 복합재료에 사용하여 전기역학적 민감도가 향상된 자가 센싱 시멘트 복합재료를 제시하고 있다.
- [0013] 그러나, 경제적인 측면에서 고가의 카본계 나노 재료를 사용하는 것은 비효율적이다. 또한, 높은 응집력을 가지는 카본계 나노 재료는 그 특성상 균질한 분산이 어렵고 시멘트 복합재료의 역학적 성능을 감소시키는 문제가 있다.
- [0014] 따라서, 경제적인 측면에서 상대적 저비용으로 구현할 수 있고 균질한 분산이 가능하며 시멘트 복합재료의 역학적 성능을 저하시키지 않는 자가 응력 센싱 시멘트 복합 재료의 개발이 필요한 실정이다.
- [0015] 본 출원인은, 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 본 발명을 제안하게 되었다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0016] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 제안된 것으로, 높은 철 함유량을 가지며 전기전도성을 가지는 모래 입자크기로 가공된 제강 슬래그 잔골재와 높은 인장강도와 전기전도성을 가지는 강섬유를 전도성 재료로 사용하여 시멘트 복합 재료에 보강함으로써 종래 기술의 문제점을 해결하고, 자가 응력 감지 능력이 극대화된 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물을 제공한다.
- [0017] 본 발명은 저가의 전도성 재료를 사용하여 자가 응력 센싱 능력을 향상시킬 수 있는 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물을 제공한다.
- [0018] 본 발명은 균질한 분산을 쉽게 확보할 수 있는 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물을 제공한다.
- [0019] 본 발명은 시멘트 복합 재료의 역학적 성능 저하 없이 자가 응력 센싱 능력을 향상시킬 수 있는 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물을 제공한다.
- [0020] 본 발명은 인장 응력으로부터 균열 제어 성능이 확보된 재료를 사용하는 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물을 제공한다.

과제의 해결 수단

- [0021] 상기한 바와 같은 과제를 달성하기 위한 본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물은, 시멘트, 실리카 흙, 실리카 파우더, 전도성 재료, 고성능 감수제 및 물을 포함하고, 상기 전도성 재료는 제강 슬래그 및 강섬유를 포함할 수 있다.
- [0022] 상기 시멘트 100 중량부 기준으로, 상기 실리카 흙 15 중량부, 상기 실리카 파우더 25 중량부, 상기 제강 슬래그 50 내지 100 중량부, 상기 고성능 감수제 5.1 중량부 및 상기 물 20 중량부를 포함할 수 있다.
- [0023] 상기 시멘트 100 중량부 기준으로 상기 제강 슬래그는 100 중량부로 포함될 수 있다.
- [0024] 상기 시멘트 100 중량부 기준으로 모래 50 중량부를 더 포함하고, 상기 제강 슬래그는 50 중량부로 포함될 수 있다.
- [0025] 상기 제강 슬래그는 직경이 0.39 mm 이하인 입자들로 형성되는 제강 슬래그 잔골재로 마련될 수 있다.
- [0026] 상기 강섬유는 상기 시멘트 복합 재료 조성물로 형성된 시험체 부피의 2%로 포함될 수 있다.
- [0027] 상기 제강 슬래그와 상기 강섬유는 서로 접촉하여 전기적 네트워크를 형성하고, 압축 하중이 가해지거나 응력이 변하는 경우 상기 전기적 네트워크에 개입되는 상기 제강 슬래그 또는 상기 강섬유가 증가할 수 있다.
- [0028] 상기 강섬유는 길이가 짧은 단섬유(short smooth steel fiber)를 복수개 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [0029] 본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물은 전기 전도성을 가지는 저가의 제강 슬래그 내지 제강 슬래그 잔골재를 사용하기 때문에 원가를 낮출 수 있고 생산성을 높일 수 있다.

[0030] 본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물은 실리카 흡을 포함하고 제강 슬래그가 모래 입자 크기로 형성되기 때문에 균질한 분산을 확보할 수 있다.

[0031] 본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물은 시멘트 복합 재료의 역학적 성능 저하를 방지할 수 있고 인장 응력으로부터 균열 제어 성능을 확보할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0032] 도 1은 본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료의 전기 저항 변화 원리를 설명하기 위한 도면이다.

도 2는 본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물에 혼입되는 제강 슬래그 및 강섬유의 사진이다.

도 3은 본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료에 압축 하중이 적용할 경우 전기적 네트워크 변화를 설명하기 위한 도면이다.

도 4는 본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물의 시험체 사진이다.

도 5 내지 도 9는 본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물의 전기-역학적 성능을 실험한 결과를 보여주는 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0033] 이하에서, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 실시예들을 상세하게 설명한다. 그러나, 본 발명이 실시예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부재를 나타낸다.

[0034] 도 1은 본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료의 전기 저항 변화 원리를 설명하기 위한 도면, 도 2는 본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물에 혼입되는 제강 슬래그 및 강섬유의 사진, 도 3은 본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료에 압축 하중이 적용할 경우 전기적 네트워크 변화를 설명하기 위한 도면, 도 4는 본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물의 시험체 사진, 도 5 내지 도 9는 본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물의 전기-역학적 성능을 실험한 결과를 보여주는 그래프이다.

[0036] 도 1을 참조하면, 본 발명에 따른 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물(100, 이하 '시멘트 복합 재료 조성물'이라 함)는, 시멘트(Cement), 실리카 흡(Silica fume), 실리카 파우더(Silica powder), 전도성 재료, 고성능 감수제(Superplasticizer) 및 물(Water)을 포함할 수 있다.

[0037] 상기와 같은 조성을 가지는 시멘트 복합 재료 조성물(100)을 이용하여 콘크리트 구조물을 형성하고 상기 콘크리트 구조물에 전기를 흘려줄 수 있는 전극을 형성하고, 상기 전극에 전류를 공급하여 시간에 따른 콘크리트 구조물의 비저항 변화를 측정함으로써 본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물을 포함하는 콘크리트 구조물의 응력을 자가 센싱(self-sensing)할 수 있다.

[0038] 본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물(100)에 함유 내지 포함되는 시멘트, 실리카 흡, 실리카 파우더, 고성능 감수제 및 물은 일반적으로 토목 재료 또는 건설 재료로 사용되는 시멘트, 실리카 흡, 실리카 파우더, 고성능 감수제 및 물이라면 특별히 한정되지 않고 사용될 수 있다. 다만, 본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물을 사용하여 시공하고자 하는 구조물 또는 건축물, 시공시기, 시공방법, 공사기간 등에 따라 시멘트, 실리카 흡, 실리카 파우더, 고성능 감수제 및 물의 함량은 바람직한 양으로 조절하여 사용될 수 있다.

[0039] 여기서, 본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물(100)에 포함되는 상기 전도성 재료는 제강 슬래그(Steel slag, 120) 및 강섬유(Steel fiber, 110)를 포함할 수 있다.

[0040] 상기 제강 슬래그(120)는, 철강 산업의 부산물로서 높은 철 함유량을 가지며 전기 전도성을 가지고 있다. 상기 제강 슬래그(120)는 모래 입자의 형상 또는 크기로 형성될 수 있다. 제강 슬래그(120)를 모래 입자 크기로 가공한 것을 제강 슬래그 잔골재(Steel Slag Aggregate, SSA)라고 한다. 본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물(100)은 제강 슬래그가 함유되거나 제강 슬래그 잔골재(SSA)가 함유될 수도 있다. 이하에서, "제강 슬래그"는 "제강 슬래그 잔골재(SSA)"를 포함하는 개념이다.

[0041] 도 1에 도시된 바와 같이, 제강 슬래그(120)는 전기전도성을 가지며 직경 0.39 mm 이하의 모래 입자 크기로 가

공된 것을 사용하는 것이 바람직하다.

- [0042] 도 2의 (a) 내지 (c)에 도시된 바와 같이, 본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물(100)에는 제강 슬래그 분말이 사용되는 것이 아니고, 제강 슬래그를 모래입자 크기로 만든 것이 배합되어 사용될 수 있다.
- [0043] 상기 제강 슬래그(120)는 크기(입경)가 모래 입자 정도인 것을 사용하며, 다른 잔골재와 혼합하여 사용하지 않고 제강 슬래그 단독으로 사용되는 것이 바람직하다. 즉, 모래 입자 크기로 가공된 제강 슬래그(120)는 기존의 시멘트 복합 재료에 사용되는 모래를 대체하여 혼입되는 것이다.
- [0044] 상기 제강 슬래그(120)는 생석회(CaO), 삼산화철(Fe₂O₃), 수용성 규소(SiO₃), 알루미늄(Al₂O₃), 마그네시아(MgO) 등을 포함할 수 있다. 각 성분의 함유량은 다음 [표 1]과 같다.

표 1

| Component ration (%) | | | | | | Free Lime | Gravity |
|----------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-----------|---------|
| CaO | Fe ₂ O ₃ | SiO ₃ | Al ₂ O ₃ | MgO | Other | | |
| 24.1 | 38.3 | 13.1 | 6.31 | 3.68 | 14.01 | ≤ 0.2% | 3.45 |

- [0045]
- [0046] 한편, 도 2의 (d)에 도시된 바와 같이, 상기 강섬유(110)는 길이가 짧은 단섬유(short smooth steel fiber)를 복수개 포함할 수 있다. 즉, 강섬유(110)는 길이가 짧은 단섬유를 복수개 혼합하여 사용할 수 있다.
- [0047] 본 발명에 따른 시멘트 복합재료 조성물(100)에는 길이가 짧고 인장강도가 우수하며 전기 전도성이 뛰어난 강섬유(110)가 혼입됨으로써, 시멘트 복합재료의 전기-역학적 성능을 평가하여 자가 응력 변화 감지 능력이 우수한 시멘트 복합 재료를 얻을 수 있다.
- [0048] 상기 강섬유(110)는 본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물(100)로 된 구조물(101) 내에 균질하게 분산되기에 적합한 길이로 형성되는 것이 바람직하다.
- [0049] 또한, 상기 제강 슬래그(120)는 모래 입자 크기로 가공된 것을 사용하기 때문에 본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물(100) 내에 균질하게 분산될 수 있다.
- [0050] 여기서, 상기 실리카 흡에 의해서도 상기 제강 슬래그(120) 및 상기 강섬유(110)의 균질한 분산이 가능해질 수 있다. 제강 슬래그(120) 보다 적은 양의 실리카 흡이 포함됨으로써 제강 슬래그(120) 또는 강섬유(110)의 뭉침 현상을 방지하고 시멘트 복합 재료 조성물(100) 내에서 제강 슬래그 또는 강섬유가 고르게 분산될 수 있다.
- [0051] 한편, 도 1 및 도 3에 도시된 바와 같이, 제강 슬래그(120)의 크기는 강섬유(110)의 직경 또는 굵기 보다 큰 것이 바람직하다. 제강 슬래그(120)와 강섬유(110)는 시멘트 복합 재료 조성물(100) 또는 시멘트 페이스트(Cement paste) 내에서 고르게 분산될 수 있다.
- [0052] 본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물(100)에 포함되는 시멘트(Cement), 실리카 흡(Silica fume), 실리카 파우더(Silica powder), 전도성 재료, 고성능 감수제(Super plasticizer) 및 물(Water) 등은 하기 [표 2]의 최적 배합비를 가지는 것이 바람직하다. 여기서, 전도성 재료는 제강 슬래그(SSA) 및 강섬유(Fiber)이다.
- [0053] 하기 [표 2]는 본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물의 최적 배합비를 나타낸다.

표 2

| Notation | Cement | Silica fume | Silica powder | Silica sand | SSA | Diameter of SSA (mm) | Water | SP | Fiber (vol%) | Flow (mm) | f _c (MPa) |
|-------------|--------|-------------|---------------|-------------|-----|----------------------|-------|-------|--------------|-----------|----------------------|
| F2S0.5-0.39 | 1.00 | 0.15 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | ≤ 0.39 | 0.25 | 0.051 | 2.0 | 275 | 179 |
| F2S1-0.39 | | | | - | 1.0 | | | | | 290 | 186 |

SSA: Steel slag aggregate,

SP: Super plasticizer containing 30% solid and 70% water.

[0054]

[0055]

본 출원인은 상기 [표 2]와 같은 최적 배합비를 찾아 내기 위해서, 전도성 재료에 따른 시멘트 복합 재료 조성물의 전기-역학적 성능 평가, 제강 슬래그 크기 및 전도성 재료 혼입량에 따른 시멘트 복합 재료 조성물의 전기-역학적 성능 평가 실험을 진행하였다. 실험에 대해서는 후술하도록 한다.

[0056]

본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물(100)은 전도성 재료로서 제강 슬래그(120)와 강섬유(110)를 모두 포함하기 때문에 우수한 자가 응력 센싱 능력을 가질 수 있다.

[0057]

도 3의 (a)는 본 발명에 따른 시멘트 복합 재료에 압축 하중(P)이 가해지는 경우를 나타낸 도면이고, 도 3의 (b)는 (a)와 같이 압축 하중(P)이 가해질 때 시멘트 복합 재료의 내부에서 발생하는 전기적 네트워크의 변화를 나타낸 도면이다.

[0058]

우선, 도 3(a)를 참조하면, 본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물(100)에 포함된 제강 슬래그(120) 및 강섬유(110)는 서로 접촉되거나 맞닿아 있는 것도 있고 서로 분리되어 있는 것도 있다. 이들 중에서 서로 접촉되거나 맞닿아 있는 제강 슬래그(120a, 120b)와 강섬유(110a, 110b)는 전기적 네트워크(EN; Electric Network)를 형성할 수 있다. 즉, 서로 접촉되거나 맞닿아 있는 제강 슬래그(120a, 120b)와 강섬유(110a, 110b)에는 전류가 흐를 수 있다.

[0059]

도 3(a)의 경우에는 2개의 강섬유(110a, 110b)와 2개의 제강 슬래그(120a, 120b)가 하나의 전기적 네트워크(EN)를 형성하게 된다.

[0060]

이와 같이, 본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물(100)은 서로 접촉하면 전기적 네트워크를 형성하는 제강 슬래그(120) 및 강섬유(110)를 포함할 수 있다.

[0061]

도 3(a)의 상태에서 즉, 2개의 강섬유(110a, 110b)가 서로 접촉되어 있고 이 2개의 강섬유(110a, 110b)에 각각 1개의 제강 슬래그(120a, 120b)가 접촉된 상태에서, 압축 하중(P)이 가해지면, 도 3(b)의 상태로 변하게 된다.

[0062]

본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물(100)로 된 구조물(101)에 압축 하중(P)이 가해지면, 시멘트 복합 재료 조성물(100)에 응력 변화가 생기게 되고 이에 따라 시멘트 복합 재료 조성물(100) 내의 제강 슬래그(120) 또는 강섬유(110)의 이동 또는 위치 변화가 일어날 수 있다.

[0063]

도 3(b)에 도시된 바와 같이, 가해진 압축 하중(P)에 의해서 자가 응력 센싱 시멘트 복합 재료 조성물(100)에 생긴 응력 변화(Δ)에 의해서 서로 접촉하거나 맞닿는 제강 슬래그(120) 또는 강섬유(110)에 변화가 생길 수 있다.

[0064]

도 3(b)를 참조하면, 압축 하중(P)에 의한 응력 변화(Δ)로 인해 서로 접촉하고 있는 2개의 강섬유(110a, 110b)에 각각 접촉하는 제강 슬래그(120a, 120b) 사이에 새로운 제강 슬래그(120c)가 위치하여 2개의 제강 슬래그(120a, 120b)와 동시에 접촉하게 된다. 또한, 2개의 강섬유(110a, 110b)에 각각 추가적으로 접촉하는 제강 슬래그(120e, 120d)가 존재하게 된다. 이에 더하여 새로운 강섬유(110c)와 또 다른 제강 슬래그(120f)도 기존의 2개의 강섬유(110a, 110b)와 전기적으로 연결된 상태가 된다. 따라서, 도 3(b)의 경우에는 3개의 강섬유(110a, 110b, 110c)와 6개의 제강 슬래그(120a~120f)가 하나의 전기적 네트워크(EN)를 형성하게 된다.

[0065]

이와 같이 제강 슬래그(120)와 강섬유(110)는 서로 접촉하여 전기적 네트워크(EN)를 형성하고, 압축 하중이 가해지거나 응력이 변하는 경우 상기 전기적 네트워크에 개입되는 제강 슬래그(120) 또는 강섬유(110)가 증가할 수 있다. 즉, 응력이 변하면 동일한 전기적 네트워크에 관여하는 제강 슬래그(120) 또는 강섬유(110)의 개수가

늘어날 수 있다.

[0066] 상기한 바와 같이, 본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물(100)은, 고르게 분포된 다수개의 제강 슬래그(120)와 강섬유(110)로 인해서 응력이 변하는 경우 확대되는 전기적 네트워크로부터 응력 변화를 자가 센싱할 수 있고 그 감지 능력의 향상을 기대할 수 있다.

[0067] 한편, 상기한 바와 같이, 본 출원인은 상기 [표 2]에 제시된 시멘트 복합 재료 조성물의 최적 배합비를 찾아 내기 위해서, 전도성 재료에 따른 시멘트 복합 재료 조성물의 전기-역학적 성능 평가, 제강 슬래그 크기 및 전도성 재료 혼입량에 따른 시멘트 복합 재료 조성물의 전기-역학적 성능 평가 실험을 진행하였다. 이하에서는 실험 과정 및 결과에 대해서 설명한다.

[0069] 1) 전도성 재료에 따른 시멘트 복합 재료 조성물의 전기-역학적 성능 평가

[0071] 본 출원인은, 제강 슬래그와 강섬유가 보강된 본 발명에 따른 시멘트 복합 재료 조성물과, 전기 전도성이 우수하고 탄성영역에서의 전기-역학적 성능이 우수한 다중벽 탄소 나노튜브 (Multi-walled carbon nanotube, MWCNT)를 보강한 시멘트 복합재료와의 전기-역학적 성능을 비교 평가하였다.

[0072] 이를 위해 (1) 강섬유 2 vol.%를 사용한 매트릭스(MF), (2) 다중벽 탄소 나노튜브(MWCNT) 0.5%와 강섬유 2 vol.%를 사용한 매트릭스(MFMW), (3) 제강 슬래그만 사용한 매트릭스(MS), (4) 제강 슬래그와 강섬유 2 vol.%가 사용된 매트릭스(MSF)로 총 4가지의 매트릭스를 구성하였다. 사용된 4가지 매트릭스의 구성성분 및 압축강도 그리고 전도성 재료 특성은 아래 [표 3] 및 [표 4]에 각각 나타내었다.

표 3

| No. | Cement | Silicasand | SSA | Silicafume | Silicapowder | MWCNT | Defoamer (*) | SP | Water | Fiber (vol.%) | f _c (MPa) |
|------|--------|------------|------|------------|--------------|-------|--------------|-------|-------|---------------|----------------------|
| MF | 1.00 | 1.00 | - | 0.15 | 0.25 | - | - | 0.039 | 0.20 | 2.0 | 190 |
| MFMW | | | | | | 0.5 | 0.25 | 0.098 | | 2.0 | 202 |
| MS | | - | 1.00 | | | - | - | 0.044 | | - | 180 |
| MSF | | | | | | - | - | 0.042 | | 2.0 | 186 |

SSA: Steel slag aggregate, MWCNT: Multi-walled carbon nanotube,

SP: Super plasticizer containing 30% solid and 70% water.

*: Weigh percentage of cement

[0073]

[0074] [표 3]에서 Defoamer는 소포제, f_c는 압축강도를 의미한다.

표 4

| Type | Diameter (μm) | Length (mm) | Tensile strength (MPa) | Elastic modulus (GPa) |
|-------------|---------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| Steel fiber | 200 | 6 | 2104 | 200 |
| SSA | ≤ 390 | - | - | - |
| MWCNT | 0.005-0.020 | 1.0×10 ⁻³ | - | - |

[0075]

[0076] [표 4]는 전도성 재료인 강섬유(Steel fiber), 제강 슬래그(SSA) 및 다중벽 탄소 나노튜브(MWCNT)의 직경, 길이, 인장강도 및 탄성계수를 나타낸다.

[0078] * 시험체 준비

- [0079] 전기-역학적 성능 비교 실험을 위해서 [표 3]의 4가지 매트릭스에 대한 시험체를 제작한다.
- [0080] 전기-역학적 실험에 사용된 시험체는 가로X세로X높이가 50X50X50 mm의 큐브형 압축 시험체를 사용하였으며, 전기-역학적 응답 조사를 위한 전극으로 도 4에 도시된 바와 같이 구리 와이어 메쉬를 매립식 전극으로 사용하였다. 매립식 전극은 20 mm 간격으로 시험체 내부에 매립하였다.
- [0081] 도 4의 (a)에는 구리 와이어 메쉬 전극이 도시되어 있고, 도 4의 (b)에는 상기 구리 와이어 메쉬 전극이 매립된 시험체가 도시되어 있다.
- [0082] 제강 슬래그와 강섬유를 사용한 시멘트 복합 재료(MSF)의 경우, 배합은 물과 감수제(SP, [표 3] 참조)를 제외한 시멘트와 혼화제 및 제강 슬래그를 넣고 건배합을 진행하였다. 그리고 물을 재료의 유동성과 재료 분리 방지를 위해 4회에 걸쳐 나누어 투입하고, 감수제(SP)를 배합의 상태에 따라 조금씩 나누어 투입한 후 강섬유를 혼입하였다. 이렇게 제작된 시험체는 3일간 90±2 °C 고온 수중 양생을 진행하였다.
- [0083] 다중벽 탄소 나노튜브(MWCNT)가 보강된 시멘트 복합재료(MFMW)는 다중벽 탄소 나노튜브를 감수제(SP)와 회석하여 배합수에 넣고, 초음파 분쇄기(sonicator)를 사용하여 진폭(amplitude) 50%, 주파수(frequency) 20s의 분쇄 조건으로 하여 2시간 동안 분산시킨 후 배합에 사용하였다. 배합의 순서는 시멘트, 실리카 샌드(모래) 그리고 실리카 파우더를 넣고 10분간 건배합(A1)을 진행하였다. 건배합 진행 후 A1을 제거하고, 준비된 다중벽 탄소 나노튜브를 실리카 흡과 함께 5분간 배합(A2)을 진행하였다. A2 배합이 완료된 후, 먼저 배합해둔 A1을 A2에 투입하여 5분간 배합을 진행하였다. 이후, 남은 량의 물과 감수제(SP)를 넣어 10분간 배합한 후 소포제(Defoamer)를 넣고 5분간 추가 배합하여 시험체를 제작하였다. 양생이 종료된 시험체를 24 시간 동안 자연 건조 시킨 후 실험을 수행하였다.
- [0085] * 실험 방법
- [0086] 전기-역학적 응답 조사는 전기 저항률 측정 장비로 AC 임피던스 분석기(미도시)를 사용하였으며, 측정 방법은 2 탐침 저항 측정 방법 (2-probe resistance measurement method)을 통하여 실험을 수행하였다.
- [0087] 측정에 사용된 AC 임피던스 분석기의 측정 조건은 1Hz 내지 1MHz의 주파수 범위에서 10 step/decade로 주파수(frequency)를 스위프(sweep)하여 임피던스 변화를 측정하였다. 역학적 조건은 300 ton 용량의 만능재료시험기(Universal Test Machine, UTM)를 이용하여 하중 유지 시험 방법을 통하여 압축 하중 크기(20,40,60,80,100 MPa)에 따른 전기 저항률의 변화를 측정하였다.
- [0089] * 실험 결과
- [0090] AC 임피던스 분석기를 통해 하중 상태에 따라 측정된 임피던스(impedance)를 나이퀴스트 선도(Nyquist diagram)를 통해 x축은 실수부 임피던스 값(Z'), y축은 허수부 임피던스 값(Z'')으로 도 5와 같이 나타내었다. 도 5는 시험체에 가해지는 압축 하중 크기(20,40,60,80,100 MPa)에 따른 4가지 매트릭스 별 임피던스 변화 거동을 나타내는 실험 결과 그래프이다. 도 6은 시험체에 가해지는 압축 하중의 크기에 따른 시멘트 복합 재료의 임피던스 변화 거동을 나타내는 실험 결과 그래프이다.
- [0091] 이때 시험체 별 고유주파수 지점에서의 실수부 임피던스 값을 전기저항 (R_{cusp})로 사용하여 시험체 크기에 영향을 받지 않는 재료 특성인 전기저항률 (ρ)을 [수학식 1]과 같이 계산하였다.

수학식 1

[0092]
$$\rho = R_{cusp} \times \left(\frac{A}{L} \right)$$

[0093] [수학식 1]에서 A는 시험체의 면적, L은 시험체의 길이이다.

[0094] 분석을 위해 크기 20 MPa의 압축 하중을 받고 있는 상태에서의 전기저항률(ρ₂₀)을 기준으로 하중 상태 별 전기저항률(ρ_x)까지의 전기저항률 변화율(Fractional Change in Resistivity, FCR)를 아래 [수학식 2]와 같이 계산하여 도 7과 [표 5]에 나타내었다.

수학식 2

$$FCR(\%) = \frac{\rho_x - \rho_{20}}{\rho_{20}} \times 100 = \frac{\Delta\rho}{\rho_{20}} \times 100$$

[0095]

표 5

| Load step (MPa) | MF | | | MFMW | | | MS | | | MSF | | |
|-----------------|----------|--------------|------------------------|----------|--------------|------------------------|----------|--------------|------------------------|------------|--------------|------------------------|
| | ρ_x | $\Delta\rho$ | $\Delta\rho/\rho_{20}$ | ρ_x | $\Delta\rho$ | $\Delta\rho/\rho_{20}$ | ρ_x | $\Delta\rho$ | $\Delta\rho/\rho_{20}$ | ρ_x | $\Delta\rho$ | $\Delta\rho/\rho_{20}$ |
| | kohm-cm | | (%) | kohm-cm | | (%) | kohm-cm | | (%) | kohm-cm | | (%) |
| 20 | 1659 | - | - | 295 | - | - | 550 | - | - | 396 | - | - |
| 40 | 1613 | 46 | 2.8 | 281 | 14 | 4.7 | 527 | 23 | 4.2 | 388 | 8 | 2.0 |
| 60 | 1552 | 107 | 6.5 | 273 | 22 | 7.5 | 509 | 41 | 7.5 | 366 | 30 | 7.6 |
| 80 | 1510 | 149 | 9.0 | 270 | 25 | 8.5 | 501 | 49 | 8.9 | 355 | 41 | 10.4 |
| 100 | 1455 | 204 | 12.3 | 266 | 29 | 9.8 | 497 | 53 | 9.6 | 336 | 60 | 15.1 |

[0096]

[표 5]는 압축 하중의 크기에 따른 시멘트 복합 재료의 전기저항률 변화율을 나타내고, 도 7은 압축 하중의 크기에 따른 시멘트 복합 재료의 전기저항률 변화 거동을 보여주는 실험 결과 그래프이다.

[0097]

[0098]

도 7과 [표 5]에 제시된 바와 같이, 4가지 매트릭스의 모든 시험체에서 압축 하중이 증가함에 따라 전기저항률이 감소하는 거동을 보인다는 것을 알 수 있다. 이때 제강 슬래그와 강섬유를 복합적으로 사용한 매트릭스(MSF)가 크기 100 MPa이 압축 하중에서 전기저항률 변화율(FCR)이 15.1%로 다른 전기 전도성 재료가 사용된 매트릭스에 비해 가장 높은 전기저항률 변화율을 보였으며, 강섬유만이 사용된 매트릭스(MF)는 12.3%, 다중벽 탄소 나노튜브와 강섬유가 동시에 사용된 매트릭스(MFMW)는 9.8%, 그리고 제강 슬래그만 사용된 매트릭스(MS)는 9.6%의 전기저항률 변화율을 보였다.

[0099]

따라서, 도 7 및 [표 5]의 결과로부터, 제강 슬래그와 강섬유를 복합적으로 사용한 매트릭스(MSF)가 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료로 가장 적합하다는 것을 알 수 있었다.

[0101]

2) 제강 슬래그의 입자 크기 및 전도성 재료의 혼입량에 따른 시멘트 복합 재료의 전기-역학적 성능 평가

[0103]

본 출원인은, 도 7 및 [표 5]에서 가장 우수한 전기-역학적 거동을 나타낸 제강 슬래그와 강섬유가 함께 사용된 매트릭스(MSF)에 대해서, 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물의 최적 배합비를 도출하기 위해 제강 슬래그의 입자 크기 및 전도성 재료의 혼입량에 따른 시멘트 복합 재료의 전기-역학적 성능을 평가하고자 총 8가지의 매트릭스를 구성하였다.

[0104]

8가지 매트릭스는 다음과 같다.

[0105]

(1) 모래(silica sand)가 시멘트 중량 대비 100%와 강섬유가 2 vol.%를 사용한 매트릭스 (F2S0) : 시멘트 100 중량부 기준으로 모래 100 중량부가 포함되고, 강섬유는 시험체 부피의 2%로 포함된 매트릭스

[0106]

(2) 제강 슬래그(직경 ≤ Ø 0.39 mm)가 시멘트 중량 대비 100%와 강섬유 2 vol.%를 사용한 매트릭스(F2S1-0.39) : 시멘트 100 중량부 기준으로 직경이 0.39 mm 이하인 제강 슬래그 100 중량부가 포함되고, 강섬유는 시험체 부피의 2%로 포함된 매트릭스

[0107]

(3) 제강 슬래그(직경 1~2 mm)가 시멘트 중량 대비 100%와 강섬유 2 vol.%를 사용한 매트릭스(F2S1-2) : 시멘트 100 중량부 기준으로 직경이 1~2 mm인 제강 슬래그 100 중량부가 포함되고, 강섬유는 시험체 부피의 2%로 포함된 매트릭스

[0108]

(4) 제강 슬래그(직경 2~5 mm) 시멘트 중량 대비 100%와 강섬유 2 vol.%를 사용한 매트릭스(F2S1-5) : 시멘트 100 중량부 기준으로 직경이 2~5 mm인 제강 슬래그 100 중량부가 포함되고, 강섬유는 시험체 부피의 2%로 포함

된 매트릭스

- [0109] (5) 제강 슬래그(직경 ≤ Ø 0.39 mm)와 모래가 시멘트 중량 대비 각각 50%, 그리고 강섬유를 2 vol.% 사용한 매트릭스(F2S0.5-0.39) : 시멘트 100 중량부 기준으로 직경이 0.39 mm이하인 제강 슬래그 50 중량부와 모래 50 중량부가 포함되고, 강섬유는 시험체 부피의 2%로 포함된 매트릭스
- [0110] (6) 제강 슬래그(직경 ≤ Ø 0.39 mm) 시멘트 중량 대비 150%와 강섬유 2 vol.%를 사용한 매트릭스(F2S1.5-0.39) : 시멘트 100 중량부 기준으로 직경이 0.39 mm이하인 제강 슬래그 150 중량부가 포함되고, 강섬유는 시험체 부피의 2%로 포함된 매트릭스
- [0111] (7) 제강 슬래그(직경 ≤ Ø 0.39 mm) 시멘트 중량 대비 200%와 강섬유 2 vol.%를 사용한 매트릭스(F2S2-0.39) : 시멘트 100 중량부 기준으로 직경이 0.39 mm인 제강 슬래그 200 중량부가 포함되고, 강섬유는 시험체 부피의 2%로 포함된 매트릭스
- [0112] (8) 제강 슬래그(직경 ≤ Ø 0.39 mm) 시멘트 중량 대비 100%와 강섬유 1 vol.%를 사용한 매트릭스(F1S1-0.39) : 시멘트 100 중량부 기준으로 직경이 0.39 mm이하인 제강 슬래그 100 중량부가 포함되고, 강섬유는 시험체 부피의 1%로 포함된 매트릭스
- [0113] 사용된 매트릭스의 구성성분 및 압축강도는 아래의 [표 6]에 나타내었다.

표 6

| Notation | Cement | Silica fume | Silica powder | Silica sand | SSA | Diameter of SSA (mm) | Water | SP | Fiber (vol%) | Flow (mm) | f _c (MPa) | |
|-------------|--------|-------------|---------------|-------------|-----|----------------------|-------|-------|--------------|-----------|----------------------|-----|
| F2S0 | 1.00 | 0.15 | 0.25 | 1.0 | - | ≤ 0.39 | 0.25 | 0.051 | 2.0 | 240 | 178 | |
| F2S1-0.39 | | | | - | - | | | | | 290 | 186 | |
| F2S1-2 | | | | - | 1.0 | 1-2 | | | | 270 | 188 | |
| F2S1-5 | | | | - | - | 2-5 | | | | 260 | 199 | |
| F2S0.5-0.39 | | | | 0.5 | 0.5 | ≤ 0.39 | | | | 275 | 179 | |
| F2S1.5-0.39 | | | | - | 1.5 | | | | | 275 | 192 | |
| F2S2-0.39 | | | | - | 2.0 | | | | | 265 | 194 | |
| F1S1-0.39 | | | | - | 1.0 | | | | | 1.0 | 290 | 187 |

SSA: Steel slag aggregate,
 SP: Super plasticizer containing 30% solid and 70% water.

- [0114] [표 6]은 8가지 매트릭스 별 구성성분 및 매트릭스의 압축 강도를 나타낸다.
- [0117] * 시험체 준비
- [0118] 전기-역학적 성능 비교 실험을 위해서 [표 6]의 8가지 매트릭스에 대한 시험체를 제작한다.
- [0119] 전기-역학적 실험에 사용된 시험체는 가로X세로X높이가 50X50X50 mm의 큐브형 압축 시험체를 사용하였으며, 전기-역학적 응답 조사를 위한 전극으로 도 4와 같이 구리 와이어 매쉬를 매립식 전극으로 사용하였다. 매립식 전극은 20 mm 간격으로 시험체 내부에 매립하였다.
- [0120] 배합은 물과 감수제(SP)를 제외한 시멘트와 혼화재 및 잔골재(제강 슬래그, 모래)를 넣고 건배합을 진행하였다. 그리고 물을 재료의 유동성과 재료 분리 방지를 위해 4회에 걸쳐 나누어 투입하고, 감수제(SP)를 배합의 상태에 따라 조금씩 나누어 투입한 후 강섬유를 혼입하였다. 제작된 시험체는 3일간 90±2 °C 고온 수중 양생을 진행하였다. 양생이 종료된 시험체를 24 시간 동안 자연 건조 시킨 후 실험을 수행하였다.
- [0122] * 실험 방법
- [0123] 전기-역학적 응답 조사는 전기 저항률 측정 장비로 AC 임피던스 분석기를 사용하였으며, 측정 방법은 2탐침 저항 측정 방법(2-probe resistance measurement method)을 통하여 실험을 수행하였다. 측정은 시험체의 고유

주파수에 해당하는 지점에서 AC 임피던스 분석기를 사용해 0.1 seconds/step 속도로 실시간 전기 저항률 변화를 조사하였다. 역학적 조건은 300 ton 용량의 변위제어식 만능재료시험기 (Universal Test Machine, UTM)를 이용하여 압축 하중 상태에 따른 시멘트 복합 재료의 전기 저항률 변화를 측정하였다.

[0125] * 실험 결과

[0126] AC 임피던스 분석기를 통해 측정된 시험체의 고유 주파수 영역에 해당하는 실수부 전기저항률(ρ)를 바탕으로, 하중 상태에 따른 전기 저항률 변화를 나타내고자, 각각의 하중상태에 따른 전기저항률(ρ_x)과 초기 전기 저항률(ρ_0)를 사용하여 전기 저항률의 변화율(Fractional Change in Resistivity, FCR)을 아래의 [수학식 3]과 같이 계산하여 도 8과 같이 나타내었다.

수학식 3

$$FCR(\%) = \frac{\rho_x - \rho_0}{\rho_0} \times 100 = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \times 100$$

[0128] 도 8은 압축 하중 하에서 8가지 매트릭스 별 시멘트 복합 재료의 전기-역학적 응답을 보여주는 실험 결과 그래프이다.

[0129] 도 8을 참조하면, 8가지 매트릭스 별 시험체 모두 최대 압축응력(σ_p)에 도달하기 전에는 압축 하중의 크기가 증가함에 따라 시멘트 복합 재료의 전기 저항률이 감소하였으며, 최대 압축응력(σ_p)에 도달 이후에는 전기 저항률이 유지 또는 증가하는 경향을 나타내었다.

[0130] 이때, [표 7]을 참조하면, 직경 0.39 mm 이하의 제강 슬래그와 규사가 시멘트 중량 대비 각각 50%, 강섬유가 시험체 부피비 2%로 보강된 시멘트 복합 재료(F2S0.5-0.39), 그리고 직경 0.39 mm 이하의 제강 슬래그가 시멘트 중량 대비 100%, 강섬유가 시험체 부피비 2%로 보강된 시멘트 복합 재료(F2S1-0.39)가 8가지 매트릭스 중에서 가장 우수한 전기-역학적 응답을 나타냄을 알 수 있다.

표 7

| Notation | Initial resistivity, ρ_0 (kohm-cm) | Resistivity at peak stress, ρ_p (kohm-cm) | Peak stress, σ_p (MPa) | FCR, (%) | Stress sensitive coefficient, FCR/σ_p (%/MPa) |
|--------------------|---|--|-------------------------------|-------------------|--|
| F2S0 | 3223 (611) | 2477 (533.8) | 156.3 (9.7) | 23.5 (3.5) | 0.150 |
| F2S1-0.39 | 142.3 (25.7) | 93.6 (18.4) | 140.0 (11.8) | 34.4 (1.1) | 0.246 |
| F2S1-2 | 219.7 (29.8) | 192.7 (13.7) | 131.9 (6) | 25.3 (5.4) | 0.192 |
| F2S1-5 | 231.2 (29.5) | 231.2 (29.4) | 155.9 (10.5) | 15.5 (1.1) | 0.099 |
| F2S0.5-0.39 | 205.1 (3) | 117.2 (8.8) | 144 (16.5) | 45.9 (4.0) | 0.298 |
| F2S1.5-0.39 | 127.5 (7.1) | 90.5 (4.3) | 172.6 (14.3) | 29.0 (2.4) | 0.168 |
| F2S2-0.39 | 100 (8.3) | 79.9 (6.4) | 180.5 (1.5) | 20.0 (2.4) | 0.111 |
| F1S1-0.39 | 235.6 (50.7) | 175.2 (49.6) | 133.8 (9.4) | 26.7 (5.3) | 0.200 |

FCR is the fractional change in electrical resistivity at the peak stress. The values in brackets are the standard deviation.

[0132] [표 7]은 압축 하중 하에서 8가지 매트릭스 별 전기-역학적 응답 거동을 나타낸다.

[0134] * 제강 슬래그 입자의 크기에 따른 실험 결과

[0135] 제강 슬래그 입자의 직경 크기에 따른 전기저항률 변화 거동을 분석한 결과, 각 시험체 별 최대 압축응력 도달 시, 도 9의 (a)에 도시된 바와 같이 0.39 mm 직경의 제강 슬래그가 사용된 매트릭스(F2S1-0.39)의 시험체는

34.4%의 전기저항률 변화율(FCR)을 보이고, 1-2 mm 직경의 제강 슬래그가 사용된 매트릭스(F2S1-2)의 시험체는 25.3%의 전기저항률 변화율을 보이고, 그리고 2-5 mm 직경의 제강 슬래그가 사용된 매트릭스(F2S1-5)의 시험체는 15.5%의 전기저항률 변화율을 보였다. 따라서, 제강 슬래그의 입자 크기에 따른 전기-역학적 민감도는 제강 슬래그 입자의 직경 크기가 가장 작은 매트릭스(F2S1-0.39)의 시험체가 가장 우수한 것을 알 수 있다.

[0137] * 입자 직경이 0.39 mm인 제강 슬래그의 사용량에 따른 실험 결과

[0138] 입자의 크기가 0.39 mm 직경인 제강 슬래그의 사용량에 따른 전기저항률 변화 거동을 분석한 결과, 도 9의 (b)에 도시된 바와 같이 제강 슬래그 없이 모래가 시멘트 중량 대비 100% 사용된 매트릭스(F2S0)의 시험체는 23.5%의 전기저항률 변화율을 보이고, 제강 슬래그와 규사가 시멘트 중량 대비 각각 50% 사용된 매트릭스(F2S0.5-0.39)가 45.9%의 전기저항률 변화율을 보이고, 제강 슬래그가 시멘트 중량 대비 100% 사용된 매트릭스(F2S1-0.39)가 34.4%의 전기저항률 변화율을 보이고, 제강 슬래그가 시멘트 중량 대비 150% 사용된 매트릭스(F2S1.5-0.39)가 29.0%의 전기저항률 변화율을 보이고, 제강 슬래그가 시멘트 중량 대비 200% 사용된 매트릭스(F2S2-0.39)가 20.0%의 전기저항률 변화율을 나타내었다. 따라서, 제강 슬래그와 규사가 시멘트 중량 대비 각각 50% 사용된 매트릭스(F2S0.5-0.39)가 가장 우수한 전기-역학적 민감도를 나타내며, 다음으로 제강 슬래그가 시멘트 중량 대비 100% 사용된 매트릭스(F2S1-0.39)가 두 번째로 우수한 전기-역학적 민감도를 나타낸다는 것을 확인할 수 있다.

[0140] * 강섬유의 사용량에 따른 실험 결과

[0141] 강섬유 사용량에 따른 시멘트 복합 재료의 전기저항 변화 거동을 분석한 결과, 도 9의 (c)에 도시된 바와 같이 입자의 크기가 0.39 mm 직경인 제강 슬래그가 시멘트 중량 대비 100% 사용된 경우에 대하여, 강섬유량이 시험체 부피비 2%로 사용된 매트릭스(F2S1-0.39)가 34.4%의 전기저항률 변화율을 보이고, 강섬유량이 시험체 부피비 1%로 사용된 매트릭스(F1S1-0.39)가 26.7%의 전기저항률 변화율을 나타내었다. 따라서, 강섬유가 시험체 부피비 2%로 사용된 매트릭스(F2S1-0.39)가 가장 우수한 전기-역학적 민감도를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

[0143] 3) 결론

[0145] 제강 슬래그와 강섬유를 사용하여 높은 전기-역학적 민감도를 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물의 최적 배합비를 도출하기 위해서 상기 1) 및 2)의 두 가지 실험을 진행하였으며, 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

[0146] (1) 제강 슬래그와 강섬유를 복합적으로 사용한 시멘트 복합재료 조성물의 경우가 강섬유, 다중벽 탄소 나노튜브(MWCNT), 그리고 강섬유와 다중벽 탄소 나노튜브를 동시에 사용한 경우에 비해 우수한 전기-역학적 민감도를 나타낸다.

[0147] (2) 직경 0.39 mm 이하의 입자 크기를 가지는 제강 슬래그와 규사가 시멘트 중량 대비 각각 50%로 포함되고, 강섬유가 시험체 부피의 2%로 보강된 시멘트 복합 재료(F2S0.5-0.39), 그리고 직경 0.39 mm 이하의 입자 크기를 가지는 제강 슬래그가 시멘트 중량 대비 100%로 포함되고, 강섬유가 시험체 부피의 2%로 보강된 시멘트 복합재료(F2S1-0.39)가 제강 슬래그 직경 크기 ($\leq 0.39, 1\sim 2, 2\sim 5$ mm) 및 전도성 재료 혼입량(제강 슬래그 0, 50, 100, 150, 200%; 강섬유 vol 1, 2%)에 따른 배합 중 가장 우수한 전기-역학적 민감도를 나타낸다.

[0148] 최종적으로 도출된 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물의 배합비는 상기 [표 2]와 같다. 즉, 시멘트 100 중량부 기준으로, 실리카 흙 15 중량부, 실리카 파우더 25 중량부, 직경이 0.39 mm 이하인 제강 슬래그 100 중량부, 고성능 감수제 5.1 중량부 및 물 20 중량부를 포함하고, 강섬유는 시멘트 복합 재료 조성물로 형성된 시험체 부피의 2%로 포함되는 시멘트 복합 재료 조성물(F2S1-0.39)과, 시멘트 100 중량부 기준으로, 실리카 흙 15 중량부, 실리카 파우더 25 중량부, 직경이 0.39 mm 이하인 제강 슬래그 50 중량부, 모래 50 중량부, 고성능 감수제 5.1 중량부 및 물 20 중량부를 포함하고, 강섬유는 시멘트 복합 재료 조성물로 형성된 시험체 부피의 2%로 포함되는 시멘트 복합 재료 조성물(F2S0.5-0.39)이 가장 우수한 전기-역학적 민감도를 가진다.

[0149] 상기에서 설명한 두 가지 실험을 통해 제시한 배합을 가지는 시멘트 복합 재료 조성물이 기존 기술에 비해 우수한 감지 성능을 가진다는 것을 확인할 수 있었다.

[0151] 이상과 같이 본 발명의 실시예에서는 구체적인 구성 요소 등과 같은 특정 사항들과 한정된 실시예 및 도면에 의해 설명되었으나 이는 본 발명의 보다 전반적인 이해를 돕기 위해서 제공된 것일 뿐, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상적인 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 따라서, 본 발명의 사상은 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니 되

며, 후술하는 청구범위뿐 아니라 이 청구범위와 균등하거나 등가적 변형이 있는 모든 것들은 본 발명 사상의 범주에 속한다고 할 것이다.

부호의 설명

[0152] 100: 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물

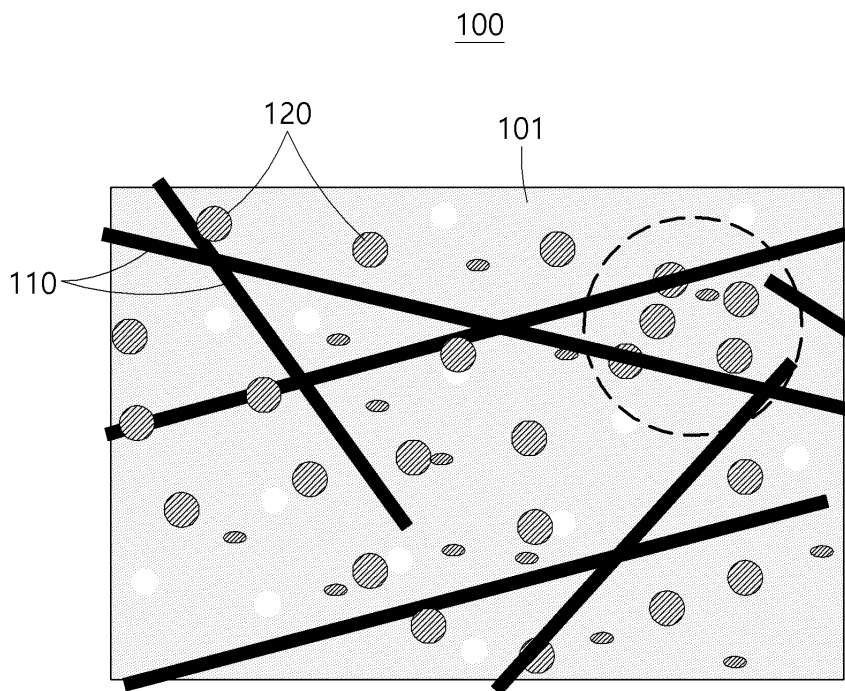
110: 강섬유

120: 제강 슬래그

EN: 전기적 네트워크

도면

도면1



도면2



(a) 제강슬래그
(≤ 0.39 mm)



(b) 제강슬래그
(1~2 mm)

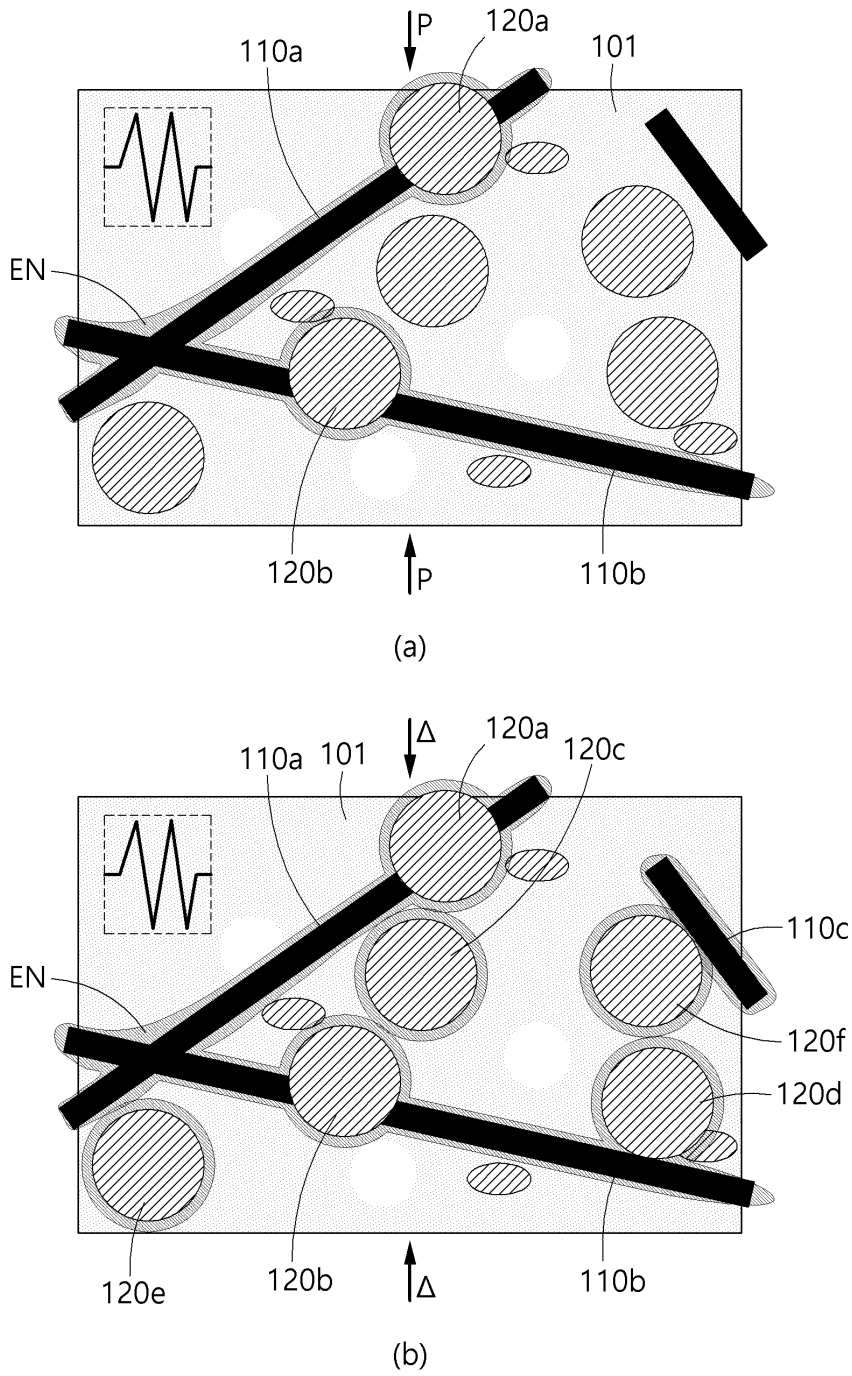


(c) 제강슬래그
(2~5 mm)

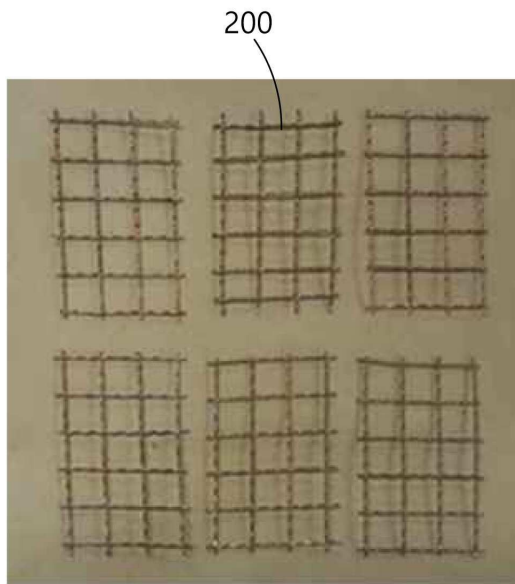


(d) 강섬유

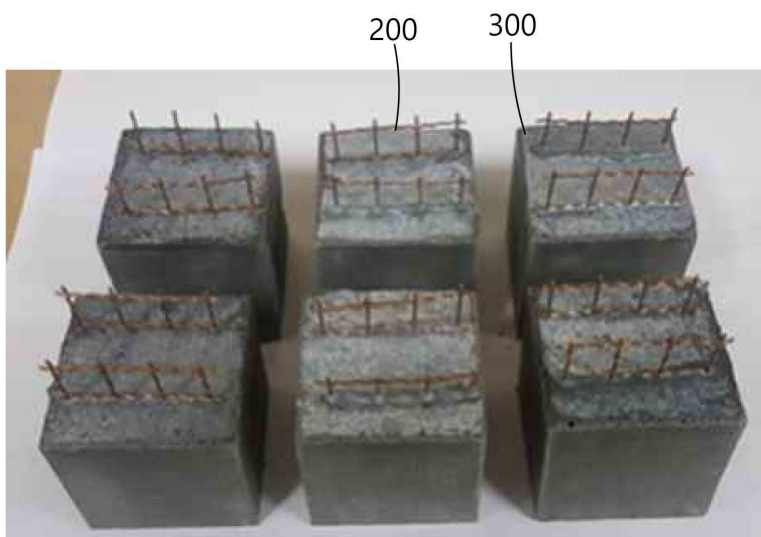
도면3



도면4

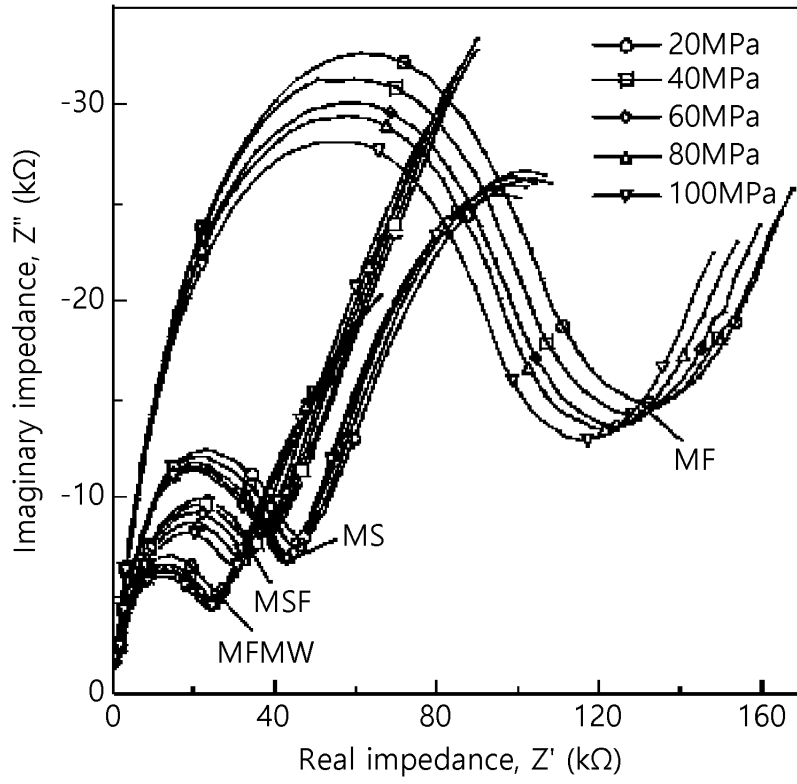


(a)

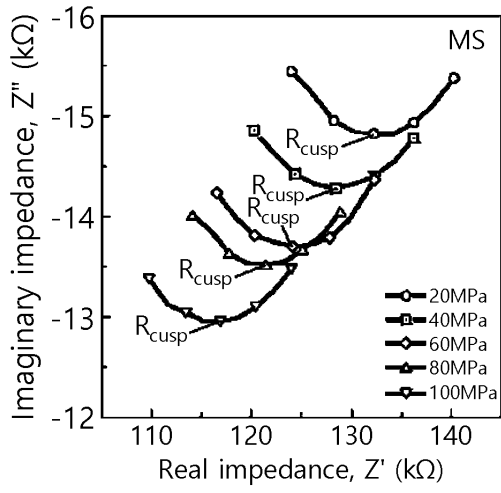


(b)

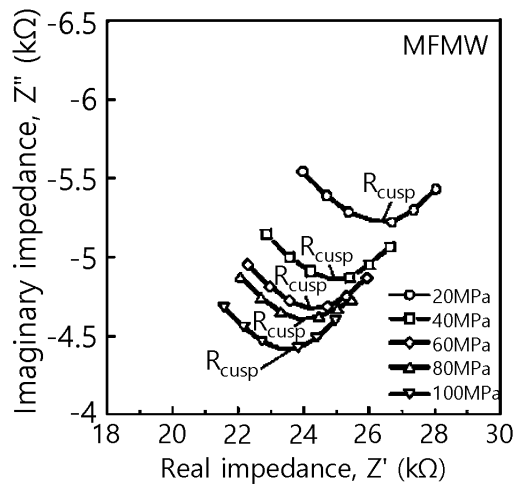
도면5



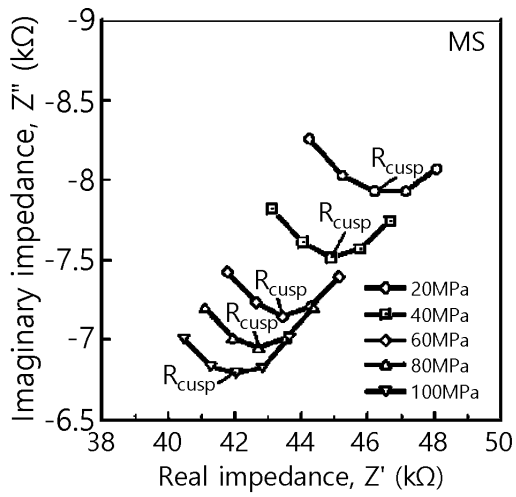
도면6



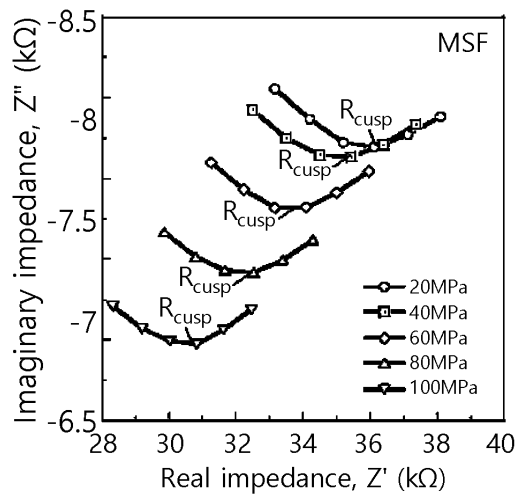
(a)



(b)

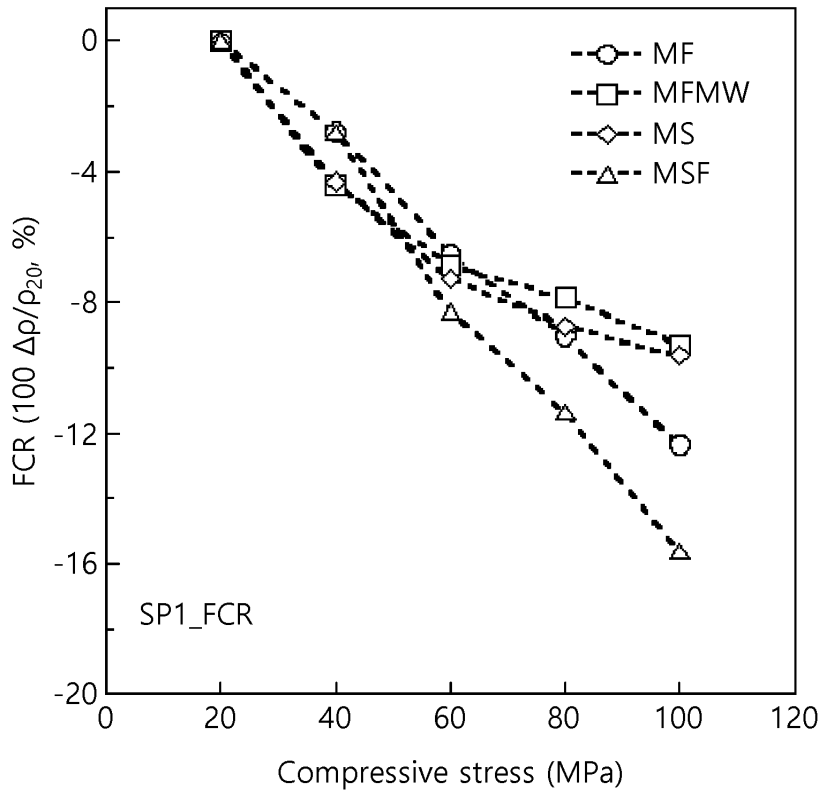


(c)

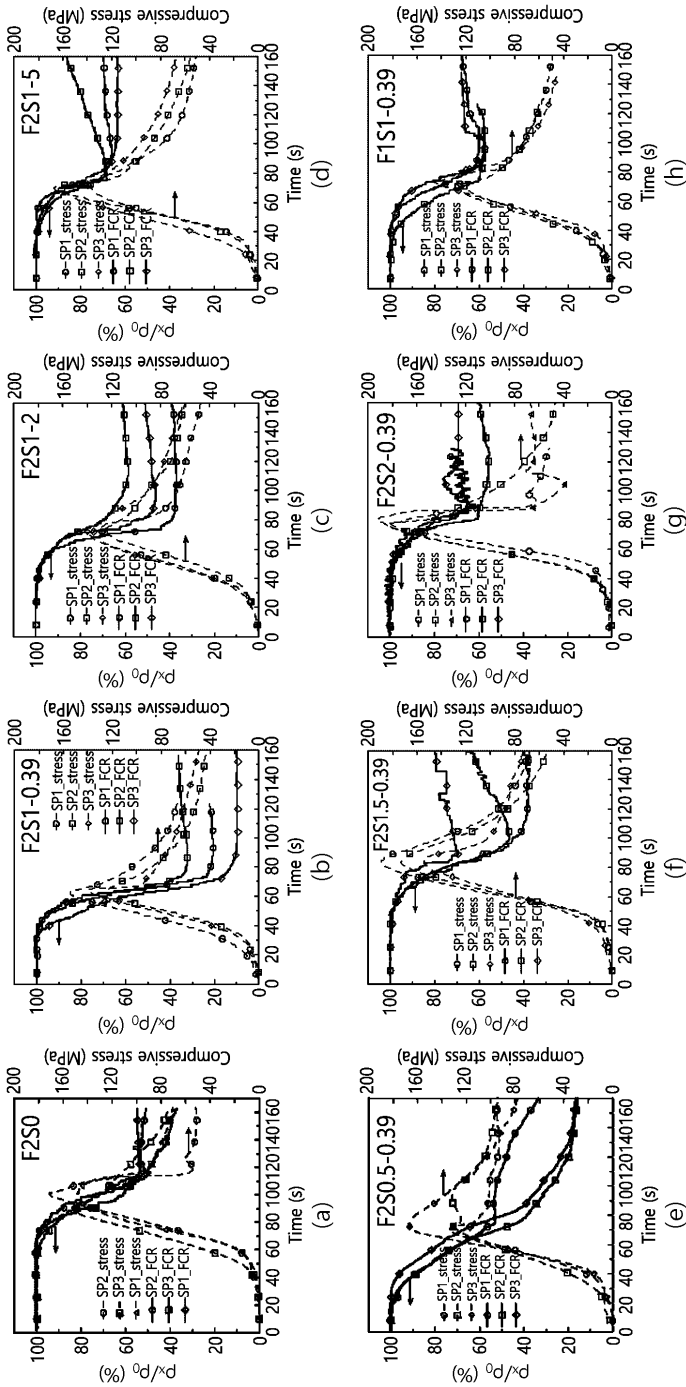


(d)

도면7



도면8



도면9

