

나노재료가 초고성능 섬유보강 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향 조사

Effect of Nanoparticles on Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete: A Review

당반피* · 노현우** · 조수성*** · 김동주****

Dang, Van Phi · Noh, Hyeon Woo · Jo, Su Sung · Kim, Dong Joo

본 논문에서는 지난 5년간 수행된 나노재료 (nanoparticles, NPs)가 초고성능 섬유보강 콘크리트 (ultra-high-performance fiber-reinforced concrete, UHPFRC)의 재료-역학적 특성에 미치는 영향에 대해 조사한 연구 결과를 요약하였다. 일반 콘크리트의 역학적 특성을 증진시키기 위해 NPs의 영향을 조사하는 연구는 지속적으로 수행되어왔지만, NPs가 UHPFRC의 역학적 특성에 미치는 영향에 대해 수행한 연구는 매우 제한적임에 따라 NPs가 UHPFRC의 재료-역학적 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. NPs의 혼입은 UHPFRC의 역학적 특성을 상당히 증가시켰다: (1) NPs는 UHPFRC의 섬유-매트릭스 영역 (fiber-matrix zone, FMZ)의 경도와 탄성계수를 각각 13.04%와 10.17% 증가시켰으며, (2) nano-CaCO₃가 3 wt.% 혼입된 UHPFRC (NC3)의 섬유-매트릭스 간 최대부착강도는 나노재료를 혼입하지 않은 UHPFRC와 비교하여 37.13% 증가되고, (3) 높은 최대부착강도를 보인 NC3의 압축강도와 인장강도는 각각 205.80, 17.73 MPa로 다른 NPs를 혼입한 UHPFRC에 비해 더욱 높은 강도를 보이고, (4) NPs는 UHPFRC의 파괴강도를 최대 20%까지 증가시켰다. UHPFRC에 NPs를 혼입할 경우, NPs의 섬유-매트릭스 간 계면 충전 효과와 수화반응 생성물의 증가로 인해 UHPFRC의 역학적 특성 증진을 개선시켰다.

핵심용어 : 나노재료, 초고성능 섬유보강 콘크리트, 압축강도, 인장강도, 부착강도, 경도

1. 서 론

충격, 지진, 그리고 폭발과 같은 극한 하중으로 인한 구조물 붕괴 및 사회기반시설의 손상을 방지하기 위해 높은 인장 저항성과 에너지 흡수능력을 갖춘 고성능 건설 재료의 개발이 지속적으로 증가하고 있다 [1]. 초고성능 섬유보강 콘크리트 (ultra-high-performance fiber-reinforced concrete, UHPFRC)는 일반 콘크리트에 비해 역학적 특성이 상당히 뛰어나지만, 섬유와 매트릭스 사이에 상대적으로 취약한 부분이 존재한다 [1]. UHPFRC에 나노재료 (nanoparticles, NPs)를 혼입하면 섬유와 매트릭스를 둘러싼 섬유-매트릭스 영역 (fiber-matrix zone, FMZ)에서 경도와 탄성계수가 향상되어 UHPFRC의 역학적 특성을 향상시킬 것으로 예상하였다 [2]. 하지만, 기수행된 연구들은 NPs가 일반 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향에만 초점을 두고 있다. 따라서, 본 논문에서는 지난 5년간 수행된 NPs의 혼입이 UHPFRC의 압축 및 인장강도, 인발 저항성, 그리고 경도와 탄성계수에 미치는 영향에 대한 연구 결과를 정리하였다 [1-4].

2. 실험 프로그램

나노재료가 UHPFRC의 역학적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 압축 및 인장 시험, 섬유 인발 시험, 그리고 nano-indentation 시험을 수행하였다 [1-4]. 본 실험에 사용된 매트릭스는 일반 UHPFRC와 UHPFRC에

* 정희원 · 세종대학교 건설환경공학과, 공학박사 (E-mail:dangvanphi06x8@gmail.com)

** 정희원 · 세종대학교 건설환경공학과, 박사과정 (E-mail:po98166@naver.com) - 발표자

*** 정희원 · 세종대학교 건설환경공학과, 석박통합과정 (E-mail:susung1996@sju.ac.kr)

**** 정희원 · 교신저자 · 세종대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · E-mail:djkim75@sejong.ac.kr)

nano-CaCO₃가 3 wt.% 혼입된 NC3, nano-SiO₂가 1 wt.% 혼입된 NS1, 그리고 nano-CNT가 1 wt.% 혼입된 CNT1으로 총 4가지로 구성하였다. 또한, 4개의 매트릭스에 각각 직선형 강섬유를 부피비 1.5% 혼입하였다.

3. 실험 결과

나노재료의 혼입은 UHPFRC 매트릭스 내 수화반응 생성물인 C-S-H 함량을 증가시키고, 섬유-매트릭스 간 취약 부위의 공극을 메우는 충전효과를 보임으로써 역학적 특성을 증진시켰다. 압축 및 인장 시험 결과, NC3, NS1, 그리고 CNT1의 압축강도는 각각 205.80, 200.50, 그리고 189.30 MPa로 조사되었으며 [3], 인장강도는 각각 17.73, 17.19, 그리고 13.99 MPa로 나타났다 [1]. 또한, 섬유 인발 시험 결과, 일반 UHPFRC의 최대부착강도는 10.80 MPa인 반면, NC3, NS1, 그리고 CNT1의 매트릭스에서 최대부착강도가 각각 14.81, 13.64, 그리고 10.84 MPa로 증가하였다 [3]. 나노재료의 혼입이 FMZ의 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 nano-indentation 시험을 수행한 결과, 일반 UHPFRC와 비교하여 NPs를 혼입한 NC3, NS1, 그리고 CNT1 매트릭스의 경도는 각각 13.04, 4.78, 그리고 0.87% 증가되었으며, 탄성계수는 각각 10.17, 3.55, 그리고 1.18% 증가되었다 [3]. 게다가, NC3, NS1, 그리고 CNT1의 인장 파괴강도는 각각 18.34, 17.91, 그리고 16.32 MPa로 NPs를 혼입하지 않은 UHPFRC의 파괴강도 (15.33 MPa) 보다 증가되었다 [4]. NPs에 따른 C-S-H 함량 증가는 NC3의 경우, nucleation 효과에 기인하고, NS1은 포졸란 반응에 기인하였다. 하지만, CNT1은 수화반응 없이 나노 크기의 재료가 섬유-매트릭스 계면의 취약부를 메우는 충전 효과로 역학적 특성에 영향을 미쳤다.

4. 결 론

1. UHPFRC에 혼입된 나노재료는 매트릭스 내 수화반응을 촉진시켜 C-S-H의 함량을 증가시키고, 섬유-매트릭스 간 취약 부위의 공극률을 감소시켜 UHPFRC의 역학적 특성을 상당히 개선시켰다.
2. Nano-CaCO₃를 3 wt.% 혼입한 UHPFRC는 인장 하중 하에서 다른 매트릭스에 비해 가장 높은 인장강도를 나타냈다. NPs의 혼입으로 인한 UHPFRC의 인장강도 증진은 섬유-매트릭스 간 부착강도에 기인하는 것으로 조사되었다.
3. 게다가, NPs의 혼입은 UHPFRC의 섬유-매트릭스 간 계면의 충전 효과와 매트릭스 내 화학적 반응을 활성화시켜 UHPFRC의 압축강도를 상당히 증가시켰다.
4. 나노재료의 혼입은 섬유와 매트릭스를 둘러싼 FMZ의 역학적 특성 (경도, 탄성계수)을 상당히 증가시킴으로써 UHPFRC의 섬유 인발 저항성을 더욱 증가시키는 것으로 조사되었다. 결과적으로, NPs의 혼입은 일반 UHPFRC의 파괴강도를 약 20% 증가시켰다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2022R1A2C2005234)

참고문헌

1. Dang, V.P. and Kim, D.J. (2023). "Effects of nanoparticles on the tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates." *Journal of Building Engineering* Vol. 63, 105513.
2. Dang, V.P. Le, H.V. Kim, D.J. (2021). "Loading rate effects on the properties of fiber-matrix zone surrounding steel fibers and cement based matrix." *Construction and Building Materials* Vol. 283, 122694.
3. Dang, V.P. and Kim, D.J. (2023). "Rate-sensitive pullout resistance of smooth-steel fibers embedded in ultra-high performance concrete containing nanoparticles." *Cement and Concrete Composites* Vol. 140, 105109.
4. Dang, V.P. and Kim, D.J. (2023). "Fracture resistance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete containing nanoparticles at high strain rates." *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 283, 109436