

나노실리카 혼입률이 실리카폼 및 고로슬래그 미분말을 혼입한 4성분계 고강도 순환잔골재 모르타르의 역학적 성능에 미치는 영향

Investigation on the Mechanical Properties of High-Strength Recycled Fine Aggregate Mortar Made of Nanosilica Dispersed by Sonication

김성우¹ · 문래교² · 조은비² · 정철우^{3*}

Seong-Woo Kim¹ · Rae-Gyo Moon² · Eun-Bi Cho² · Chul-Woo Chung^{3*}

(Received January 4, 2023 / Revised June 11, 2023 / Accepted June 13, 2023)

In order to maximize the utilization of recycled fine aggregate, high strength mortar made of 100 % recycled fine aggregate was prepared, and its physical properties were evaluated to determine the possibility of using recycled fine aggregate as structural aggregate. The effect caused by the amount of nanosilica on the physical properties of w/b 0.2 recycled fine aggregate mortar consisting of cement, silica fume, and blast furnace slag. To improve the dispersion of nanosilica inside mortar, an aqueously dispersed nanosilica solution by ultrasonic tip sonication was prepared, and incorporated into the mortar to evaluate changes in mortar flow, porosity and compressive strength depending on nanosilica content. According to the experimental results, mortar flow decreased as the replacement ratio of nano-silica increased. As the replacement ratio of nanosilica increased up to 0.75 %, the porosity decreased and the compressive strength increased, but, at a replacement ratio of 1 %, the porosity increased and the compressive strength decreased. It was confirmed that the nano-silica replacement ratio of 0.75 % was optimum proportion to maximize the mechanical performance of high-strength recycled fine aggregate mortar.

키워드 : 순환잔골재, 나노실리카, 초음파분산, 고강도 모르타르

Keywords : Recycled fine aggregate, Nanosilica, Ultrasonic tip sonication, High-strength mortar

1. 서론

1.1 연구의 배경

전 세계 건설산업에서 가장 많이 사용되는 콘크리트는 사용성과 경제성 측면에서 다른 재료로 대체할 수 없을 정도로 압도적이기 때문에, 미래 건설 산업에서도 친환경의 트렌드에 맞게 변화된 형태로 활발히 사용될 것으로 예측된다. 현재 시점에서는 탄소중립 및 폐자원 재활용에 의한 환경보호 등이 콘크리트가 나아가야 할 방향으로 지목되고 있는데, 특히 천연 골재 자원의 고갈 및 폐기물 골재 자원의 재활용에 대응하기 위한 순환골재의 재활용량 증

가는 미래 건설산업의 화두가 될 중요한 사안 중 하나이다.

대한민국에서 발생하는 연간 폐기물 중 건설 및 철거 폐기물은 약 50 %를 차지하며, 이는 재건축과 국토 개발로 인해 더욱 증가할 것으로 예상된다(Kim 2021). 따라서 건설 및 철거 폐기물 처리와 골재 공급의 문제를 동시에 해결하기 위한 방안으로 순환골재의 재활용률을 높이는 것이 시급한 상황이다. 대한민국의 순환골재에 대한 정책은 2000년대 초부터 제정, 시행 및 개정을 거듭하였고, 2016년에는 순환골재를 공공기관, 국책연구기관, 공기업, 사회적 반시설 건설 시 의무적으로 사용하도록 명시하는 자원순환기본계획을 수립하여(Kim 2021), 건설 폐기물 재활용과 순환골재 사용량이 증가하는 효과를 거두었지만(SLC 2019), 현재까지도 순환골재

* Corresponding author E-mail: cwhung@pknu.ac.kr

¹부경대학교 건축·소방공학부 석사과정 (Department of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea)

²부경대학교 건축공학과 학사과정 (Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea)

³부경대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea)

의 활용분야는 공공기관 건물과 도로포장용에만 제한되어 있는 상황인데, 이는 순환골재를 콘크리트 구조체용 골재로 쓰기에는 우리가 따른다는 일반적인 인식에 기인한다. 유럽의 각국에서 2030년을 기점으로 순환골재의 전면재활용을 시작하기(Schimek et al. 2023) 위한 노력을 하고 있다는 점을 감안하면, 우리나라에서도 순환골재에 대한 인식을 시급히 개선할 필요가 있으며, 순환골재의 재활용을 위한 제도적 장치를 마련하여 국제적 흐름에 동참할 필요가 있다.

1.2 이론적 고찰

순환골재의 가장 큰 특징은 생산 공정에서 발생하는 미세 균열 및 골재 표면에 존재하는 시멘트 페이스트로 볼 수 있다. 골재 표면에 부착된 시멘트 페이스트 성분은 (구)콘크리트에서 골재와 시멘트 페이스트 간의 계면전이영역(Interfacial Transition Zone, ITZ)에 해당되는 것으로, 순환골재의 높은 공극률의 원인이 된다(Poon et al. 2004). 순환골재 내부에 존재하는 미세균열은 (신)콘크리트 제조 후 하중을 받게 될 때, 골재의 하중분담능력을 줄이게 되므로, 콘크리트 강도 저하의 원인이 된다. 공극률이 높고 미세균열이 많다는 것은 곧 흡수율이 높다는 의미와 상통하므로, 콘크리트 배합 시 일반 천연골재 콘크리트 배합에 비해 현저하게 낮은 작업성을 보이게 된다.

이러한 순환골재의 치명적인 단점을 보완하기 위해 수많은 연구와 개발이 진행되었으며, 그 노력으로 인해 현재 순환골재 품질은 상당히 많이 개선되었다. 특히 순환굵은골재는 제조 기술이 이미 정착단계에 도달하였다(Moon and Choi 2009). 하지만 순환잔골재의 경우는 사용 시 압축강도 저감의 문제가 완벽히 해결되지 못한 상황인데, 이는 잔골재로부터 시멘트 페이스트를 떼어내는 것이 굵은 골재에 비해 어렵기 때문이다. 이러한 이유로 구조용 콘크리트의 경우 순환잔골재는 잔골재로서 기준에 부적합하여 골재로 사용하는 것은 아직 이르다는 평가가 이어지고 있다.

순환잔골재의 재활용률을 높이기 위해서는 순환잔골재 품질에 대한 인식의 개선 및 혼합골재의 형태로 활용을 허용하는 규정의 재정비 등이 필요하다. 순환잔골재 품질에 대한 인식 개선을 위한 많은 연구 노력이 있었으나(Kim et al. 2016; Lee et al. 2016), 천연잔골재와의 혼합이 아닌 순환잔골재만 사용하여 모르타르를 제조하고 물성을 평가한 사례는 거의 없었고, 혼합골재로 사용한 경우에도 역학적 성능의 저하가 관찰된 경우가 대부분이었다(Kaarthik and Maruthachalam 2021; Kirthika and Singh 2020). 그러나 본 연구의 선행 연구에서 순환잔골재를 전량 사용하고 2단계 배합을

활용하였을 때, 고강도 콘크리트의 물시멘트비 영역인 0.25~0.3에서는 천연골재 혼입 모르타르와 거의 유사한 강도를 보이는 것을 확인하여(Kim et al. 2020; Park et al. 2022), 순환잔골재의 잠재적 활용가능성을 확인할 수 있었는데, 이는 55 MPa급의 고강도 영역에서 순환골재 콘크리트와 천연골재 콘크리트간의 강도 차이가 적어진다는 기존의 결과와도 일치한다(Ju et al. 2019).

1.3 연구의 목적 및 범위

본 연구의 선행 연구에서는 반응성 포졸란재료의 활용이 없었기 때문에(Kim et al. 2020; Park et al. 2022), 본 연구에서는 시멘트, 고로슬래그 미분말 및 실리카폼을 사용한 3성분계 배합에 최근 건축재로서 많은 연구가 진행되고 있는 나노실리카를 추가하여 순환잔골재와 시멘트 페이스트의 계면을 보강하고, 이를 통해 순환잔골재 사용 시의 문제를 최소화 시켜 60 MPa급 이상의 고강도 모르타르의 제조가 가능한지를 확인해보고자 한다. 나노실리카(NS)는 입자 크기가 나노미터(nm) 단위인 실리카로, 소량의 혼입만으로도 미세공극에 효과적으로 침투하고 수산화칼슘과의 포졸란 반응을 극대화시켜(Fu et al. 2022) 콘크리트의 강도와 내구성을 증가시킨다(Carmo et al. 2017). 따라서 나노실리카의 혼입을 통해 Fig. 1과 같이 나노 필러 효과, 계면전이영역의 밀실화 등의 효과를 발생시키고, 이를 통해 순환잔골재 표면과 시멘트 페이스트 사이의 ITZ를 개선하여(Du et al. 2015) 순환잔골재 사용 시의 단점을 보완하면, 순환잔골재 혼입 모르타르의 역학적 성능을 더욱 높여 60 MPa급 고강도 모르타르를 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

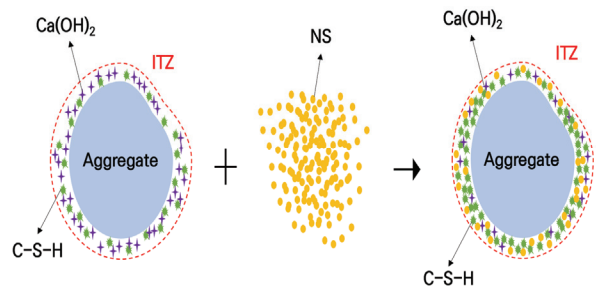


Fig. 1. Schematic illustration on the effect caused by nanosilica on interfacial transition zone

2. 실험재료 및 계획

2.1 실험재료

나노실리카를 혼입한 순환잔골재 시멘트 모르타르 제조에 사용된 순환잔골재는 국내 H사에서 생산된 잔골재이며, 벌크 밀도 (bulk specific gravity)는 2.23 g/cm³, 흡수율은 8.24 %로 측정되었다. 나노실리카는 국내 S사에서 생산한 입경 15 nm의 미분말을 사용하였으며, 광물학적 성상은 XRD(X-Ray Diffractometer, UltimaIV, Rigaku, Japan)로 분석하여 Fig. 2에 나타내었다. 나노실리카의 화학 성분은 100 % SiO₂로 구성되어 있으며, Fig. 2에 따르면 나노실리카는 실리카폼과 유사한 형태의 비결정질로 나타나, 100 % 비결정질 실리카로만 구성되어 있음을 확인하였다.

모르타르 제조에 사용된 시멘트는 KS L 5201 규준을 따르는 국내 A사의 제1종 보통 포틀랜드 시멘트이다. 고로슬래그는 국내 M사, 실리카폼은 국내 D사의 미분말을 사용하였으며, 고성능 감수제는 국내 T사의 PCE계 액상형 감수제를 사용하였다. 각 재료의 화학적 조성은 X-Ray Fluorescence Spectrometer(XRF-1800,

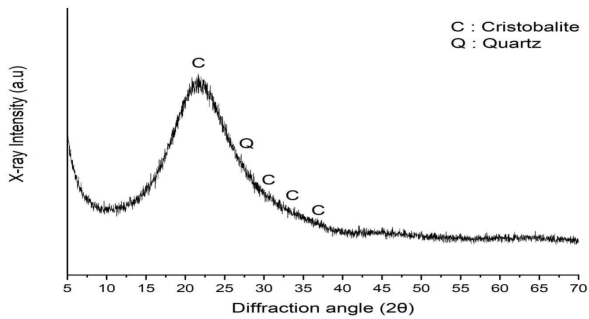


Fig. 2. X-ray diffraction pattern of nanosilica

Table 1. Chemical compositions of type I ordinary portland cement, blast furnace slag and silica fume (wt.%)

Type I ordinary portland cement						
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O
66.61	18.32	4.37	2.95	2.66	2.63	1.19
TiO ₂	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	ZnO	Cl	SrO
0.30	0.28	0.26	0.18	0.13	0.07	0.05
Blast furnace slag						
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
48.44	29.07	14.29	3.61	2.55	0.62	0.61
Silica fume						
SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	—
96.53	2.03	0.51	0.41	0.33	0.18	—

SHIMADZU, Japan)을 이용하여 분석하였으며, 이는 Table 1에 나타내었다.

2.2 나노실리카 분산용액 제조

나노실리카는 매우 작은 입자 크기로 인한 넓은 비표면적을 가지며, 이로 인해 입자간의 반데르발스 힘이 크기 때문에(Kong et al. 2015), 나노실리카를 시멘트에 미분말 상태로 그대로 혼입하게 되면, 높은 알칼리성의 복잡한 이온환경에서 응집체를 형성하게 된다. 이는 시멘트 공극 용액 내의 Ca²⁺ 이온이 나노실리카에 흡착되어 입자들을 연결시키며, 쉽게 나노실리카 응집체가 형성되도록 유도하기 때문이다(Bagheri et al. 2013). 따라서 나노실리카를 시멘트계 재료에 활용하기 위해서는, 응집을 줄일 수 있는 적절한 방법을 이용하여 분산을 미리 진행한 후 활용하는 것이 적절하다.

본 연구에서는 5 % 나노실리카 수용액에 초음파 처리를 가하여 나노실리카의 균질 분산을 시도하였다. 나노실리카 분산용액 제조를 위한 초음파 처리 과정은 탄소나노튜브의 분산에 사용되는 것과 같은 과정(Kim et al. 2020)을 적용하였으며, Fig. 3에 나타난 VC-505(SONICS & MATERIALS, USA) 초음파 분산장치를 사용하였다. 초음파 처리는 200watt 출력으로 3초간 에너지를 가하고 1초간 휴지기를 주면서 10분간 진행하였고, 이후 3분간의 휴지기를 거친 뒤, 다시 10분간 초음파 처리를 진행하여 분산과정을 종료하였다.

제작한 용액의 나노실리카 분산 정도를 파악하기 위해 Zeta-Potential & Nano Particle Size Analyzer(Litesizer500, Anton Paar, Austria)를 사용하여 입도 분포를 측정하였다. 나노실리카 분산용액의 입도 분포는 Fig. 4에 나타내었으며, 비교를 위해 초음파 처리를 진행하지 않은 일반 나노실리카 수용액도 함께 나타내었다. 입도 분포 분석 결과, 초음파 처리를 한 용액의 나노실리카 입도는 98~307 nm 영역에 집중적으로 분포하지만, 초음파



Fig. 3. Photographic images of equipments used for ultrasonic tip sonication process

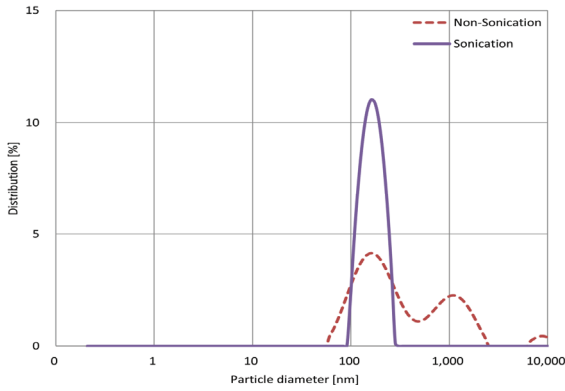


Fig. 4. Particle size distribution of nanosilica in solution before and after ultrasonic tip sonication

처리를 진행하지 않은 용액은 61~587 nm 영역을 제외하고, 636~2325 nm 및 6663~10832 nm 영역에서 별도의 응집체를 형성하는 것이 확인되어, 초음파 처리를 진행하는 것이 나노실리카 입자의 분산에 더욱 효율적임을 알 수 있다.

2.3 모르타르 배합

순환잔골재를 이용한 고강도 모르타르의 제조를 위해 물결합재비 0.2, 시멘트:고로슬래그:실리카퓌ムの 비율은 70:18:12로 고정하여, 일반적인 결합재:잔골재 비율인 1:3보다 낮은 1:1의 부배합 모르타르를 제조하였다. 부배합을 사용한 이유는 단위수량 증가에 의한 작업성 개선이 주요한 목적이었으며, 순환잔골재와 시멘트 페이스트간의 결합력을 높이기 위한 목적도 있다. 모르타르의 배합 상세는 Table 2에 나타내었으며, 이때, 나노실리카는 결합재 대비 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%의 비율로 시멘트량을 대체하여 혼입하였다(고로슬래그 및 실리카퓌ム 혼입량은 고정됨).

순환잔골재의 유효흡수율을 고려한 추가 수량을 더하여 1분간 건비빔 한 후, 시멘트, 고로슬래그, 및 실리카퓌ム을 넣고, 일정량의 5% 나노실리카 수용액을 투입하여, 나노실리카 혼입량을 조절하

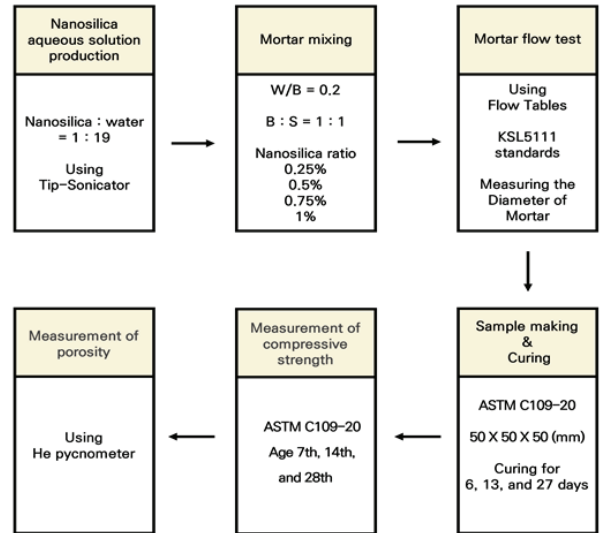


Fig. 5. Flow chart of experiment procedure

였다. 이후 배합수량 추가시 나노실리카 수용액 내부에 존재하는 물의 량을 차감하여 물결합재비를 0.2로 일정하게 유지시켰다. 이후 planetary paddle mixer(Kitchen aid, USA)를 활용하여 1분간 배합을 진행하고, 작업성 개선을 위해 액상형 PCE를 결합재 중량 대비 0.58% 투입한 후 30초간 배합을 추가로 진행하였다. 순환잔골재를 이용한 고강도 모르타르 배합의 전체 과정은 아래의 Fig. 5에 플로우차트 형태로 정리하였다.

2.4 플로우

굳지 않은 순환잔골재 고강도 모르타르의 플로우 측정은 KS L 5111 규준에 따라 Fig. 6과 같은 플로우 테이블을 이용하여 1회 진행하였다. 플로우 테이블 위 황동 틀에 모르타르를 1/3씩 넣고 25회 다지는 것을 3회 반복한 후, 틀을 제거하고 규준에 따라 25회 낙하시킨 후 버니어 캘리퍼스로 굳지 않은 모르타르의 지름을 측정하여 플로우값을 구하였다.

Table 2. Mix proportion of cement mortar

Specimen	W/B	S/B	W (kg/m ²)	Binder (kg/m ²)				S (kg/m ²)	SP (Bx%)
				C	NS	BFS	SF		
Plain	0.2	1	200.73	702.54	0	180.66	120.43	1003.63	0.58
NS 0.25			200.73	700.03	2.51	180.66	120.43	1003.63	0.58
NS 0.5			200.73	697.52	5.02	180.66	120.43	1003.63	0.58
NS 0.75			200.73	695.01	7.53	180.66	120.43	1003.63	0.58
NS 1			200.73	692.51	10.04	180.66	120.43	1003.63	0.58



Fig. 6. Example of mortar flow test

2.5 공극률

모르타르의 공극률은 절건밀도와 진밀도의 차이를 이용하여 아래의 식 (1)에 따라 계산하였다. 28일 양생이 완료된 모르타르 시편 3개를 대상으로 24시간 이상 105 °C의 오븐에서 무게변화가 없을 때 까지 두어 절건상태를 만들고, 절건중량 및 버니어 캘리퍼스를 이용하여 절건부피를 측정하여 절건밀도를 얻었다. 진밀도는 He 가스를 이용한 AccuPyc II 1345 Pycnometer(Micromeritics, USA)를 사용하여 측정하였다.

$$\text{(진밀도 - 절건밀도)/진밀도} \times 100 (\%) \quad (1)$$

2.6 압축강도

배합이 완료된 모르타르를 ASTM C109-20 규준에 따라 50 X 50 X 50 (mm)의 큐브 시험체를 제작하였다. 타설이 완료된 후 몰드는 투명 비닐로 감싸 수분의 증발을 막으며 하루 동안 보양하였고, 하루가 지난 후 몰드에서 탈형시킨 모르타르 시편을 21 ± 2 °C의 포화수산화칼슘 수용액에 넣어 6일, 13일 및 27일간 수중양생을 진행하였다. 압축강도는 재령 7일과 14일, 28일에 각각 3개 시편을 이용하여 ASTM C109-20 규준에 따라, S1-1471D 디지털 전동식 압축강도 시험기를(S1 industry Co, Ltd., Korea) 사용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 플로우

나노실리카 치환율 변화에 따른 순환잔골재 모르타르의 플로우 값은 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에 따르면, 나노실리카를 혼입하지 않은 샘플의 플로우 값은 151.82 mm로 나타났으며, 나노실리카

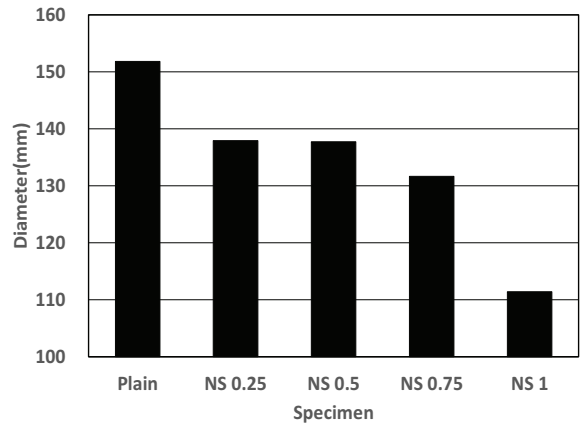


Fig. 7. Mortar flow of cement mortar

치환율이 0.25 %, 0.5 %, 0.75 %, 및 1 %로 증가함에 따라 각각 137.91 mm, 137.22 mm, 131.66 mm, 및 111.41 mm로 감소하는 값을 보였다. 이는 나노실리카의 높은 분말도 때문으로, 물과 고성능 감수제 등을 흡착하여 시멘트 모르타르의 유동성에 불리하게 작용하였기 때문이다.

3.2 공극률

마이크로미터 및 나노미터 단위의 실리카는 시멘트 입자 및 기타 재료 사이에 존재하는 공극을 채우는 데 효과적이며, 이를 나노필러 효과라고 한다(Oertel et al. 2014). 시멘트 매트릭스는 나노필러 효과에 의해 상당히 조밀해지는데, 공극이 용해되지 않은 실리카 입자로 채워지고, 수화로 형성된 C-S-H 상의 핵생성이 충전재 표면에서 발생하기 때문이다(Lee et al. 2018). Fig. 8에 따르면, 나노실리카를 혼입하지 않은 순환잔골재 모르타르의 공극률은 18.5 %로 나타났으며, 나노실리카를 혼입한 순환잔골재 모르타르

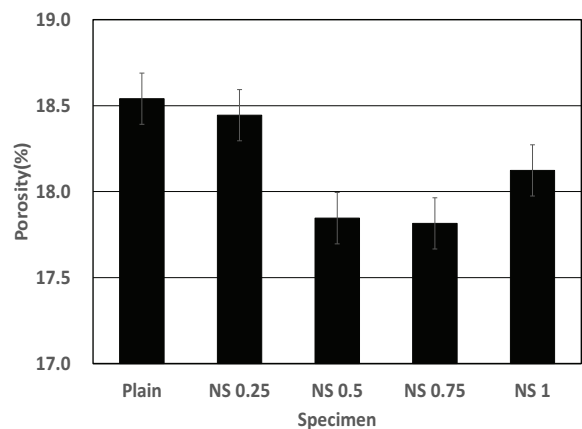


Fig. 8. Porosity of cement mortar

의 공극률은 모두 이보다 낮게 나타나, 나노실리카에 의한 공극충전 효과가 존재함이 명확히 확인되었다. 나노실리카의 혼입률이 0.25 %, 0.5 %, 0.75 %로 증가함에 따라, 공극률은 각각 18.44 %, 17.85 %, 17.80 %로 줄어들다가, 나노실리카의 혼입률이 1 %로 증가하면 공극률은 18.12 %로 다시 증가하는 경향을 보였는데, 이는 작업성의 감소로 인해 나노실리카의 충분한 분산이 이루어지지 못하여(Berra et al, 2012) 미세공극의 채움효과를 극대화시키지 못해 발생한 현상으로 사료된다.

3.3 압축강도

Fig. 9는 나노실리카 치환율 변화에 따른 순환잔골재 모르타르의 재령 7일, 14일, 28일의 압축강도를 나타낸 그래프이다. 7일 14일 및 28일 재령의 압축강도는 7일 재령을 제외하면 나노실리카 혼입률이 0.75 %까지 증가할수록 압축강도는 증가하다가, 나노실리카 혼입률 1 %에서 가장 낮은 강도 값을 보이는 것으로 나타났다. 나노실리카 혼입률 1 %에서 다른 시편보다 낮은 압축강도 수치를 보인 이유는 밀도가 낮고 분말도가 상당히 높은 나노실리카의 과다 혼입으로 인해 나노실리카의 재응집이 발생하여 충분한 충전 효과가 발생하지 못하였을 가능성이 높으며, Fig. 8에서 나타난 바와 같이 나노실리카 1 % 혼입 시 작업성이 떨어져 공시체 제작 시 충분한 다짐이 이루어지지 못해 발생한 현상으로 사료된다.

Fig. 9의 압축강도 데이터와 Fig. 8의 공극률 데이터는 매우 높은 상관관계를 보여주고 있다. 압축강도 및 공극률 모두 나노실리카 혼입률 0.75 %에서 강도 상승 효과가 가장 높았으며, 이 때 공극률도 가장 낮게 나타났다. 이는 해당 배합에서는 나노실리카의 함유량이 0.75 %가 최적의 비율임을 의미한다. 이는 통상 나노

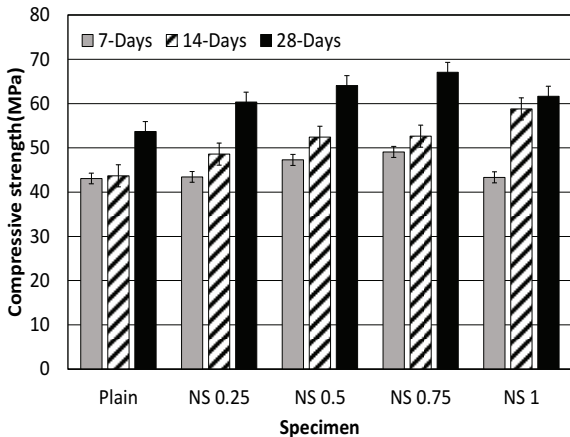


Fig. 9. Compressive strength of mortar

실리카의 최적 혼입 비율이 0.5 %~1 %로 나타난 기존의 연구 결과(Wu et al, 2016)와도 일치한다.

순환잔골재의 모르타르의 경우 배합 내의 순환잔골재 함유량이 높아질수록 작업성 감소의 폭이 천연잔골재에 매우 커지게 된다. 이는 본 연구에서 활용된 실리카폼과 나노실리카를 동시에 함유하는 물결합재비 0.2 수준의 배합에서 순환잔골재 사용으로 인해 발생하는 낮은 작업성의 문제를 고성능 감수제의 과다 사용 없이 극복하기는 매우 어렵다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 이러한 부분을 극복하고자 단위수량과 결합재량을 동시에 증가시킨 부배합을 사용할 수 밖에 없었는데, 지나친 부배합을 사용하는 것은 구조체의 크리프 및 자기수축 등의 위험성도 함께 증가한다는 것을 의미하므로, 결국 나노실리카의 최적 혼입 비율에 대한 평가는 순환잔골재의 비율이 상대적으로 높은 결합재:골재 중량비 = 1:3의 배합에서 재검증할 필요가 있다. 이에 대한 부분은 추후 연구를 통해 입증하고자 한다.

4. 결론

본 연구에서는 순환잔골재를 활용한 고강도 모르타르의 제조를 위하여, 시멘트, 고로슬래그 미분말, 실리카폼 및 나노실리카를 함유한 4성분계 모르타르 배합을 사용하고, 이의 물성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 나노실리카 입자의 높은 분말도로 인해 나노실리카 혼입률이 증가할수록 모르타르의 플로우는 감소하는 것으로 나타났다.
2. 나노실리카의 혼입률이 증가할수록 모르타르의 공극률은 감소하는 경향을 보이다가, 혼입률 1 %에서 다시 증가하는 것으로 나타났다. 모르타르 시편의 압축강도 또한 나노실리카 혼입률이 증가할수록 증가하다가, 혼입률 1 %에서 감소하는 것으로 나타났다.
3. 나노실리카 혼입률 0.75 %에서 최저의 공극률(17.80 %) 및 최고의 압축강도(67.08 MPa)를 얻었다.
4. 나노실리카 혼입률 0.75 %까지 증가할수록 순환잔골재 고강도 모르타르의 공극률은 감소하고, 압축강도는 증가한 점과, 나노실리카 혼입률 1 %에서의 모르타르 플로우 손실폭이 0.75 %의 경우에 비해 급격하게 발생하였다는 점을 종합적으로 고려하면, 나노실리카 혼입률 0.75 %가 순환잔골재 혼입 고강도 모르타르에서 최적의 역학적 성능을 도출할 수 있는 혼입률로 판단할 수 있다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 22NANO-C156177-03).

References

- Bagheri, A., Parhizkar, T., Madani, H., Raisghasemi, A. (2013). The influence of pyrogenic nanosilicas with different Surface areas and aggregation states on cement hydration, *Asian Journal of Civil Engineering*, **14**(6), 783–796.
- Berra, M., Carassiti, F., Mangialardi, T., Paolini, A.E., Sebastiani, M. (2012). Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes, *Construction and Building Materials*, **35**, 666–675.
- Carmo, R.N.F., Costa, H., Júlio, E. (2017). Influence of nanoparticles additions on the bond between steel fibres and the binding paste, *Construction and Building Materials*, **151**, 312–318.
- Du, H., Du, S., Liu, X. (2015). Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, **82**, 114–122.
- Fu, Q., Zhao, X., Zhang, Z., Xu, W., Niu, D. (2022). Effects of nanosilica on microstructure and durability of cement-based materials, *Powder Technology*, **404**, 117447.
- Ju, M., Park, K., Park, W.J. (2019). Mechanical behavior of recycled fine aggregate concrete with high slump property in normal-and high-strength, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **13**, 1–13.
- Kaarthik, M., Maruthachalam, D. (2021). A sustainable approach of characteristic strength of concrete using recycled fine aggregate, *Materials Today: Proceedings*, **45**(7), 6377–6380.
- Kim, J.H., Kim, W.W., Moon, J.H., Chung, C.W. (2020). Effect of multi-walled carbon nanotube on rheological behavior and compressive strength of cement paste, *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*, **8**(4), 467–474 [in Korean].
- Kim, J.H. (2021). Construction and demolition waste management in Korea: recycled aggregate and its application, *Clean Technologies and Environmental Policy*, **23**, 2223–2234.
- Kim, S.C., Park, D.K., Yoog, K.C. (2016). Characteristic of cementitious mortar using high volume of recycled fine aggregate, *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*, **4**(3), 235–242 [in Korean].
- Kim, Y.J., Kim, G.W., Chung, C.W. (2020). Contribution of two-stage mixing approach on compressive strength of mortar made of recycled fine aggregate, *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*, **8**(4), 490–497 [in Korean].
- Kirthika, S.K., Singh, S.K. (2020). Durability studies on recycled fine aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, **250**, 118850.
- Kong, D., Corr, D.J., Hou, P., Yang, Y., Shah, S.P. (2015). Influence of colloidal silica sol on fresh properties of cement paste as compared to nano-silica powder with agglomerates in micron-scale, *Cement and Concrete Composites*, **63**, 30–41.
- Korpa, A., Trettin, R., Böger, K.G., Thieme, J., Schmidt, C. (2008). Pozzolanic reactivity of nanoscale pyrogene oxides and their strength contribution in cement-based systems, *Advances in Cement Research*, **20**(1), 35–46.
- Lee, N.K., Koh, K.T., Kim, M.O., Ryu, G.S. (2018). Uncovering the role of micro silica in hydration of ultra-high performance concrete(UHPC), *Cement and Concrete Research*, **104**, 68–79.
- Lee, S.Y., Yoo, J.C., Kim, G.Y., Yoon, M.H., Nam, J.S., Choi, H.G. (2016). Evaluation on the chloride ion diffusion coefficient of mortar depending on replacement ratio of recycled fine aggregate, *Journal of Architectural Engineering in Korea*, **16**(6), 479–485 [in Korean].
- Moon, D.J., Choi, J.J. (2009). A study on the properties of mortar with recycled fine aggregate, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **4**(1), 96–100 [in Korean].
- Oertel, T., Hutter, F., Helbig, U., SEXTL, G. (2014). Amorphous silica in ultra-high performance concrete: first hour of hydration, *Cement and Concrete Research*, **58**, 131–142.
- Park, S.H., Choi, J.H., Lee, C.Y., Koo, M.S., Chung, C.W. (2022). Investigation on fire resistance of high-performance cement mortar with recycled fine aggregate mixed by two-stage mixing approach, *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*, **10**(1), 23–29 [in Korean].
- Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H., Kou, S.C. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete, *Cement and Concrete Research*, **34**(1), 31–36.
- Schimek, M.J., Kasper, T., Humer, H.M. (2023). Critical review of the recovery rates of construction and demolition waste in the

European Union – An analysis of influencing factors in selected EU countries, *Waste Management*, **167**, 150–164.
SLC. (2019). 2018 Sudokwon Landfill Statistics Yearbook, Sudokwon Landfill Site Management Corporation.

Wu, Z., Shi, C., Khayat, K.H., Wan, S. (2016). Effects of different nanomaterials on hardening and performance of ultra-high strength concrete(UHSC), *Cement and Concrete Composites*, **70**, 24–34.

나노실리카 혼입률이 실리카폼 및 고로슬래그 미분말을 혼입한 4성분계 고강도 순환잔골재 모르타르의 역학적 성능에 미치는 영향

본 연구에서는 순환잔골재 사용량 증대를 목적으로 순환잔골재만 혼입한 고강도 모르타르를 제조하고 이의 물성을 분석하여, 순환잔골재의 구조용 골재로서의 활용가능성을 파악하고자 하였다. 시멘트, 실리카폼 및 고로슬래그 미분말을 함유한 물결합 재비 0.2 시멘트 모르타르에, 나노실리카를 추가로 혼입하고 이의 치환율을 변화시켜, 나노실리카 혼입량 변화가 순환잔골재 모르타르의 물성 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 시험체 제작 시 결합재 내부에서의 나노실리카 분산도 향상을 위해, 초음파 처리한 수분산된 나노실리카 수용액을 활용하였고, 나노실리카의 혼입률은 1%까지 변화시켜 모르타르 플로우, 공극률 및 압축강도의 변화를 평가하였다. 실험 결과에 따르면, 나노실리카의 혼입률이 증가할수록 모르타르 플로우는 감소하였으며, 나노실리카 혼입률 0.75%까지는 혼입율을 높일수록 공극률은 감소하고 압축강도는 증가하였으나, 치환율 1%에서는 공극률의 상승 및 압축강도의 저하가 관찰되어, 나노실리카 혼입률 0.75%가 성능 최적화를 위해 가장 적절한 혼입 비율인 것을 확인할 수 있었다.