

패각 잔골재가 시멘트 모르타르 재료 특성에 미치는 영향 분석

오서은*^{ID} · 최승하** · 김규원***^{ID} · 한수호**** · 정상엽*****^{ID}

Oh, Seo-Eun*^{ID}, Choi, Seung-Ha**, Kim, Kyuwon***^{ID}, Han, Soo-Ho****, Chung, Sang-Yeop*****^{ID}

Investigation of Waste Shell Fine Aggregates on the Material Characteristics of Cement Mortars

ABSTRACT

This study explores the utilization of common marine wastes, specifically seashells, such as oysters and cockles, as alternative fine aggregates in construction materials. The considered seashells were cleaned and pre-processed for use as a substitute for aggregate in mortar. Cement mortar specimens were prepared under different conditions, such as substitution ratios and the cleaning status of the seashells. The compressive strength of the mortars specimens was evaluated, and the solid and porous structures of each specimen were analyzed using microstructure analysis methods such as XRD, SEM, and micro-CT. The results confirmed that oyster and cockle seashells are composed of different calcium carbonate polymorphs, and their microstructural characteristics influence the mechanical properties of the cement mortar specimens.

Keywords : Mortar, Microstructure, Marine waste, Seashell, Alternative fine aggregate

초록

본 연구에서는 대표적인 해양 폐기물인 패각을 자원화하여 건설재료에 활용하고, 재료의 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 꼬막, 굴 등 국내에서 많이 발생하는 패각을 세척 및 전처리하여 잔골재 대체재로서 활용하였으며, 패각의 대체율 및 세척 여부 등의 조건에 따라 시멘트 모르타르 시편을 제작하였다. 서로 다른 조건하에 타설된 모르타르 시편의 압축강도를 평가하고, XRD, SEM, micro-CT 등의 미세구조 분석 방법들을 활용하여 각 시편의 고체 및 공극 구조를 분석하였다. 결과를 통해, 굴과 꼬막 패각이 서로 다른 탄산칼슘의 동질이상으로 구성되어 있는 것을 확인하였으며, 각각의 미세구조 특성에 의해 잔골재 대체재로 활용 시, 모르타르의 역학적 물성 차이에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

검색어 : 모르타르, 미세구조, 해양 폐기물, 패각, 잔골재 대체재

1. 서론

콘크리트 제작에 이용되는 기본 재료인 잔골재는 주로 자연에서 얻어지는 천연 잔골재를 이용한다. 천연 잔골재는 채취되는 장소에 따라 강사, 해사, 육상 모래, 산모래 등으로 구분되는데, 최근 잔골재

의 자원량을 보존하고 환경오염을 줄이고자 점차 채취량을 줄여가고 있는 상황이다(Habert et al., 2010). 감소되는 천연 잔골재의 공급량을 충족시키고자 여러 잔골재 대체재에 대한 연구가 수행되어지고 있다(Malik et al., 2015; Dash et al., 2016).

잔골재 관련 이슈와 더불어 최근 폐기물 양의 급증에 따른 문제로

* 정회원 · 연세대학교 건설환경공학과 (Yonsei University · seoeunoh@yonsei.ac.kr)

** 세종대학교 건설환경공학과 학사과정 (Sejong University · tmdgk0987@naver.com)

*** 정회원 · (주)포어시스 이사 (Foresys · Kyuwon.kim@frss.co.kr)

**** 정회원 · (주)포어시스 매니저 (Foresys · sooho.han@frss.co.kr)

***** 정회원 · 교신저자 · 연세대학교 건설환경공학과 부교수 (Corresponding Author · Yonsei University · sychung@yonsei.ac.kr)

Received November 23, 2023/ revised November 27, 2023/ accepted November 28, 2023

인해, 폐기물 재활용 관련 연구가 주목받고 있다. 특히 삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라에서, 해양 폐기물은 육상 폐기물에 비하여 부피가 크고 수분 및 염분으로 인해 처리 비용이 높아 더욱 문제가 된다(MOF, 2021). 해양 폐기물 중 하나인 패각은 매년 7만 톤 이상의 양이 해안가에 방치되거나 매립되고 있어, 심미적으로 문제가 될 뿐만 아니라, 악취로 인한 문제를 발생시키고 있다(Kim et al., 2009). 패각은 탄산칼슘으로 구성되어 있기 때문에 건설재료로서 활용될 수 있고, 이러한 패각의 특징을 이용하여 골재 대체재나 시멘트 대체재로 이용하는 연구가 국내외에서 다수 수행되고 있다(Ponnada et al., 2016; Olivia et al., 2017; Eziefula et al., 2018). 패각의 종류는 다양하고, 처리 방법 및 대체율에 따라 제작된 콘크리트의 특성이 달라지기 때문에 관련된 기초 연구가 필요하지만, 국내에서 주로 생산되는 굴패각과 꼬막패각에 대한 차이 및 해당 패각이 시멘트계 재료에 미치는 영향에 대한 기초 연구는 부족한 상황이다(Eo and Yi, 2015; Ramakrishna and Sateesh, 2016).

본 연구에서는 감소되는 골재 채취량과 해양 폐기물인 패각 처리 문제를 해결하고자 굴패각과 꼬막패각을 콘크리트의 구성요소인 잔골재로 대체하는 연구를 수행하였다. 패각 종류 및 대체율을 조정하여, 각 요소가 시멘트 모르타르 시편의 특성에 미치는 영향을 확인하였으며, 패각에 잔존하는 이물질의 영향을 살펴보기 위해, 패각 세척 유무에 따른 역학적 물성 및 특성도 분석하였다. 패각의 미세구조적 특성을 파악하기 위해, X선 회절(X-ray diffraction, XRD), 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 활용하였으며, X선 미세단층 이미지(X-ray micro-computed tomography, micro-CT)를 활용하여 다양한 조건 하의 시멘트 모르타르 시편 미세구조를 살펴봄으로써, 잔골재 대체로 이용될 수 있는 최적의 패각 종류 및 대체율을 확인하였다.

2. 재료 및 시험체 준비

2.1 재료 및 패각 특성 확인

모르타르 시험체 제조를 위하여 1종 포틀랜드 시멘트를 이용하였으며, 잔골재는 직경 2 mm 이하의 중사를 사용하였다. 잔골재를 대체하기 위한 패각은 우리나라에서 주로 생산되는 꼬막과 굴을

이용하였으며, 기존 잔골재와의 비교를 위해, 2 mm 이하로 분쇄한 후 이용하였다(Fig. 1). 패각의 표면은 다수의 유기물과 이물질이 존재하기 때문에 이로 인한 영향성을 파악하기 위하여 초음파 세척기를 활용해 패각 세척 유무에 따른 영향도 살펴보았다. 이용된 재료의 특성을 파악하기 위하여 밀도, 물 흡수율, XRF, XRD, SEM 분석을 수행하였고, 그 결과는 아래와 같다.

본 연구에서 사용된 구성요소들의 원소 및 산화물을 확인하기 위한 XRF 결과는 Table 1에 나타나 있다. Table 2에는 사용된 잔골재들의 물리적 특성이 나타나 있으며, 굴패각과 꼬막패각의 밀도 모두, 본 연구에서 이용된 잔골재와 유사한 것을 확인할 수 있었으나, 흡수율 결과, 잔골재에 비하여 패각의 흡수율이 높은 것을 확인할 수 있었으며, 특히 굴패각의 흡수율이 높은 것을 확인하였다. 패각의 표면 및 조직을 확인하기 위하여 SEM 촬영을 수행하였고, 굴패각의 경우 일방향의 층이 조직을 이루고 있는 것을 확인하였다(Fig. 2(a)). 꼬막패각의 경우, 굴패각과는 다르게 균집을 이루는 조직이 다수 발견되었다(Fig. 2(b)). 패각은 주로 탄산칼슘으로

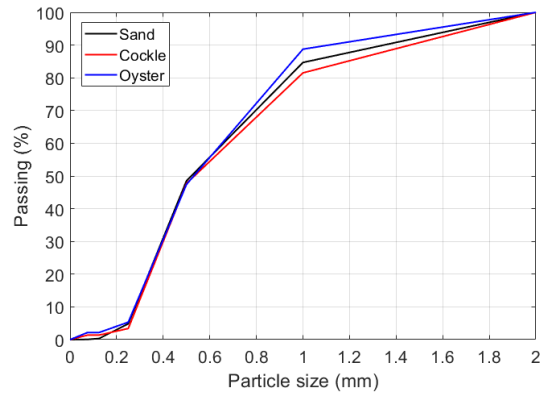


Fig. 1. Particle Size Distribution of the Used Fine Aggregates

Table 2. Physical Properties of the Used Fine Aggregates

Material	Density [g/cm ³]	Water absorption ratio [%]
Sand	2.58	1.2
Oyster shell	2.39	4.4
Cockle shell	2.60	3.6

Table 1. Chemical Properties of the Cement and Aggregate Materials [wt.-%]

Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Type OPC	60.4	30.9	3.3	2.15	1.3	0.1	0.7	1.2
River sand	-	96.2	2.8	0.1	-	-	-	< 1.0
Oyster shell	97.2	0.4	0.1	0.1	0.4	0.8	0.1	0.6
Cockle shell	97.6	0.1	0.1	0.3	0.3	1.2	0.1	0.1

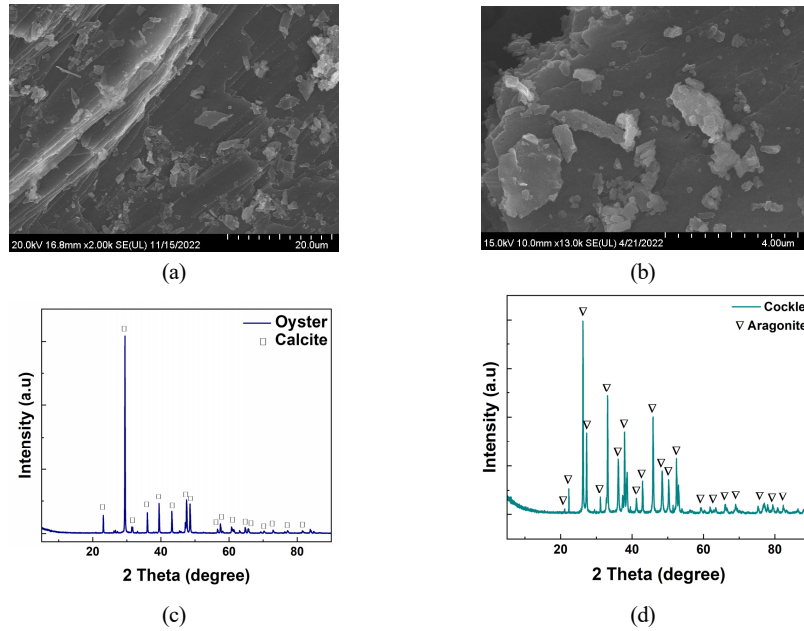


Fig. 2. SEM and XRD Data of the Used Seashells: (a) SEM of Oyster Shell, (b) SEM of Cockle Shell, (c) XRD of Oyster Shell, (d) XRD of Cockle Shell

구성되어 있으며, 탄산칼슘은 다양한 동질이상을 갖는 물질로 알려져 있다. 패각을 이루고 있는 화합물을 확인하고자 XRD 분석을 수행하였으며, 그 결과 굴패각은 탄산칼슘 중 밀도 2.71 g/cm³의 calcite로 이루어져 있는 것을 확인하였으며(Fig. 2(c)), 꼬막패각은 주로 밀도 2.93-2.95 g/cm³의 aragonite로 구성된 것을 확인하였다(Fig. 2(d)).

Table 3. Specimens Cases

Type of replacement shell	Ultrasonic cleaning	Replacement ratio [%]
Cockle	O	20
Oyster	X	30
		40

2.2 시험체 제작 및 케이스

본 연구에서 이용된 시멘트 모르타르 시험체의 영향인자는 Table 3와 같다. 국내에서 많이 소비되는 대표적인 두 가지 패각인 꼬막과 굴패각을 활용하여 잔골재 모래를 대체하였다. 패각의 표면에는 다수의 유기물과 이물질이 포함되어 있기 때문에, 초음파 세척기를 이용하여 세척 유무에 따른 영향성을 파악하였다. 패각 대체율 별 그 효과를 확인하기 위하여 각 패각별로 20, 30, 40%로 모래를 대체하였다. 각 시험체 케이스에 따른 배합비는 Table 4와 같다. Table 4에서 reference 케이스를 ‘R’로 표기하였으며, 꼬막패각은 ‘C’, 굴패각은 ‘O’로 표기되었다. 또한 세척한 패각은 ‘W’, 세척하지 않은 패각은 ‘U’로 표기되었으며 영문 뒤에 따라오는 숫자는 패각 대체율을 말한다. 배합비에 따라 제작된 시험체는 28일 수중양생을 수행하였으며, 완료된 시험체에 대해서는 물성

Table 4. Mix Proportions of the Mortar Specimens with Different Aggregates [kg/m³]

Specimen	W/C ratio	Cement [kg/m ³]	Water [kg/m ³]	Sand [kg/m ³]	Cockle shell [kg/m ³]	Oyster shell [kg/m ³]	SP [wt.-%]
R	0.3	630	189	1261	-	-	3
CU20/CW20	0.3	630	189	1008	252	-	3
CU30/CW30	0.3	630	189	882	378	-	3
CU40/CW40	0.3	630	189	756	504	-	3
OU20/OW20	0.3	630	189	1008	-	252	3
OU30/OW30	0.3	630	189	882	-	378	3
OU40/OW40	0.3	630	189	756	-	504	3

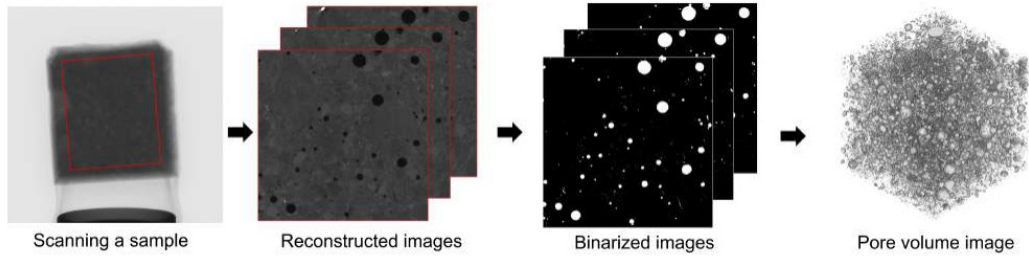


Fig. 3. Micro-CT Imaging Process to Segment the Pore Volume

및 특성 분석을 위하여 압축강도 및 다양한 미세구조 분석을 수행하였다.

3. 물성 및 특성 평가

패각의 세척 여부 및 대체율에 따른 기계적 물성 평가를 위하여 압축강도를 측정하였다. 압축강도 측정을 위한 시험체는 KS L 5105 표준에 준하여 $5 \times 5 \text{ cm}^3$ 로 제작되었으며, 만능재료시험기를 이용해 1 mm/min 의 속도로 하중을 재하하여 강도를 측정하였다.

탄산칼슘으로 구성된 패각이 모르타르 시험체에 포함되었을 때, 시멘트 수화 등으로 인하여 발생하는 화합물을 확인하기 위해 XRD 분석을 수행하였다. XRD 분석을 위한 샘플은 파우더 형태로 Bruker DE/D8 Advance 모델을 이용하였으며, 2θ 에 대해 5° 에서 90° 까지 측정을 수행하였다. 제작된 시험체의 미세구조 평가는 SEM과 비파괴적으로 내부 공극을 확인할 수 있는 micro-CT를 활용하여 수행하였다. SEM 분석을 위한 시험체는 표면 연마 후 pt 코팅 처리 후, 표면을 확인하였다. Micro-CT 촬영을 위해, 해상도를 고려하여 시험체를 $2 \times 2 \text{ cm}^3$ 로 제작하였으며, 픽셀 사이즈 $16 \mu\text{m}$ 으로 촬영하였다. 촬영이 완료된 데이터는 MATLAB의 이미지 프로세싱 툴을 활용하여 공극 분포 및 특성을 확인하였다(Fig. 3).

4. 결과 분석

4.1 기계적 물성 평가

각 시편의 압축강도 결과는 Fig. 4와 같다. 일반 모래를 사용한 모르타르 경우와 비교하여, 패각 대체 시편에서 전반적으로 강도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 강도 저감은 20% 대체보다 30%, 40% 대체시 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 대체율이 증가할수록 강도가 감소하는 것을 확인하였다(Fig. 4(a)). 또한, 동일한 대체율에서 비세척 패각을 포함한 시험체가 세척한 패각을 포함한 시험체보다 더 큰 강도 저감을 나타내는 것을 확인함으로써(Fig. 4(b)), 패각 골재의 세척유무가 강도에 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

패각 종류별 압축강도 확인 결과, 굴패각을 포함한 시험체의 강도가 꼬막패각을 포함한 시험체의 강도보다 낮은 것을 확인할 수 있었다. 패각 종류별로 발생하는 강도의 차이는 패각의 특성에 기인한 것으로, 굴패각이 꼬막패각에 비하여 낮은 밀도와 높은 흡수율을 나타내고 있었으며, SEM을 통해 확인한 굴패각의 판상형 조직 구성도 기계적 물성에 영향을 미친 것으로 판단되었다(Horiguchi et al., 2021).

4.2 XRD를 이용한 화합물 특성 평가

패각을 포함한 시험체의 화합물 분석 결과는 Fig. 5와 같다.

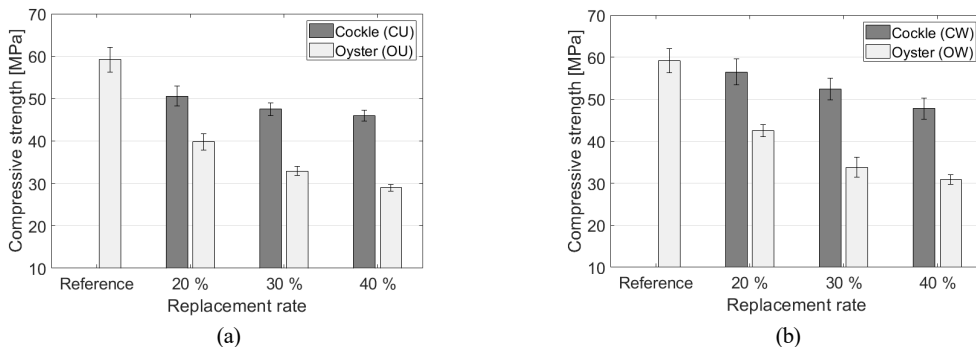


Fig. 4. Compressive Strength Results: (a) Uncleaned Cases, (b) Washed Cases

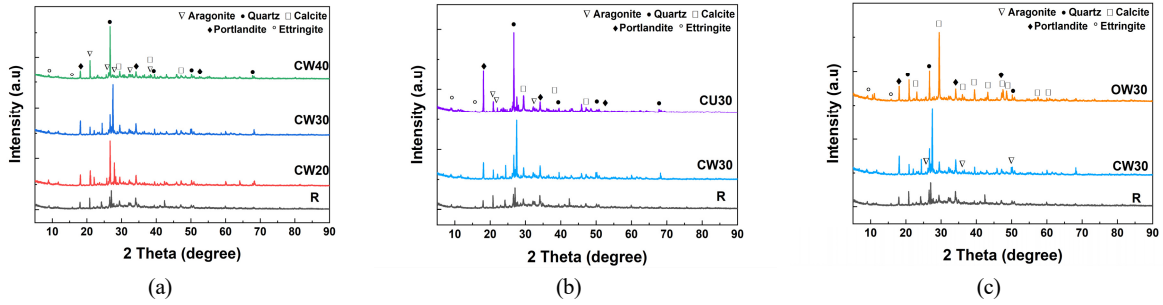


Fig. 5. XRD Results of the Considered Specimens: (a) CW with Different Ratios, (b) CW and CU, (c) CW and OW

일반 모르타르와 화합물의 피크 위치 및 intensity를 확인한 결과, 패각의 대체율이 높아짐에 따라 패각을 구성하고 있는 탄산칼슘의 피크 intensity가 높아지는 것을 확인하였다(Fig. 5(a)). 패각 세척, 비세척에 따른 화합물 확인 결과, portlandite 및 ettringite와 같은 수화생성물의 피크 위치가 intensity의 차이는 있지만, 모든 경우에서 일반 모르타르와 유사한 것을 확인하였으며, 이를 통해 패각 잔골재를 사용하는 것이 모르타르의 수화 생성물에는 큰 영향을 미치지 않으면서 일반 모래의 대체재로 활용될 수 있음을 확인하였다. Fig. 5(b)에 나타난 세척 및 비세척에 따른 차이는 유기물 및 이물질에 기인한 것으로 판단되며, XRD의 경우 결정질만을 확인할 수 있는 분석이기 때문에 유기물에 대한 영향은 해당 결과에서 나타나지 않은 것으로 확인되었다.

패각 종류별 XRD 결과, 탄산칼슘의 동질이상인 vaterite와 calcite, aragonite 중 패각을 구성하고 있는 calcite와 aragonite 피크를 제외한 나머지 화합물의 피크는 일반 모르타르에서 생성된 화합물의 피크와 유사한 것을 확인할 수 있었다(Fig. 5(c)). Vaterite, calcite, aragonite의 피크가 다르게 나타난 이유는 패각종류에 따라, 골과 꼬막을 구성하는 탄산칼슘의 상이 영향을 미친 것으로 확인되었다(Xie et al., 2005; Oral and Ercan, 2018). 탄산칼슘 상 외에는 R 시편과 유사한 피크 구성을 나타내는 것을 확인함으로써, 골과 꼬막 모두 잔골재 대체재로 활용될 수 있음을

확인하였다.

4.3 SEM을 이용한 미세구조 분석

SEM을 활용하여, 제작된 패각 모르타르의 표면 미세구조를 확인하였다. SEM 이미지에서 시멘트 수화 생성물과 골재 그리고 패각을 구분하기 위하여 energy dispersive X-ray spectrometer (EDX)를 이용하여 원소를 확인 후 SEM 이미지를 촬영하였다. 골패각을 포함한 SEM 이미지는 Fig. 6(a)와 같다. 골패각 시편의 SEM 이미지에서는 모르타르 사이로 층을 형성하고 있는 조직을 확인할 수 있었다. 균집화된 조직으로 구성되어 있는 시멘트 수화생성물과는 다르게, 방향성 있는 층으로 구성된 골패각이 기계적 물성 감소 및 공극 등에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되었다. 꼬막패각을 포함한 시험체의 SEM 이미지는 Fig. 6(b)에 제시된 것과 같다. 골패각 시편과는 다르게, 꼬막패각의 경우 균일하고 매끄러운 표면의 꼬막패각 골재의 흔적이 시멘트 수화생성물 사이에서 확인되었으며, 상대적으로 치밀한 조직을 나타내는 꼬막패각이, 골패각과 비교하였을 때 상대적으로 높은 압축강도 및 공극 조직에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단하였다. 각 시편의 공극구조에 대해서는 다음 절에 나타난 micro-CT를 통해 면밀히 분석하였다.

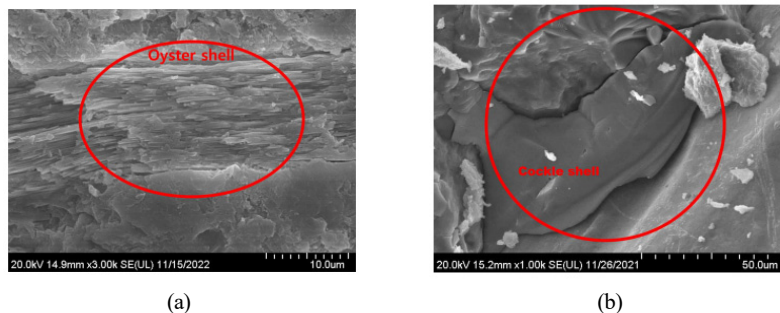


Fig. 6. SEM Images of Mortar Specimens with Different Seashells: (a) Mortar with Oyster Shell, (b) Mortar with Cockle Shell

Table 5. Porosity of the Specimens with Different Shells and Replacement Ratios [%]

Specimen	R	CW20	CW30	CW40	CU30	OW30
Porosity	2.97	3.73	4.40	5.50	3.83	8.47

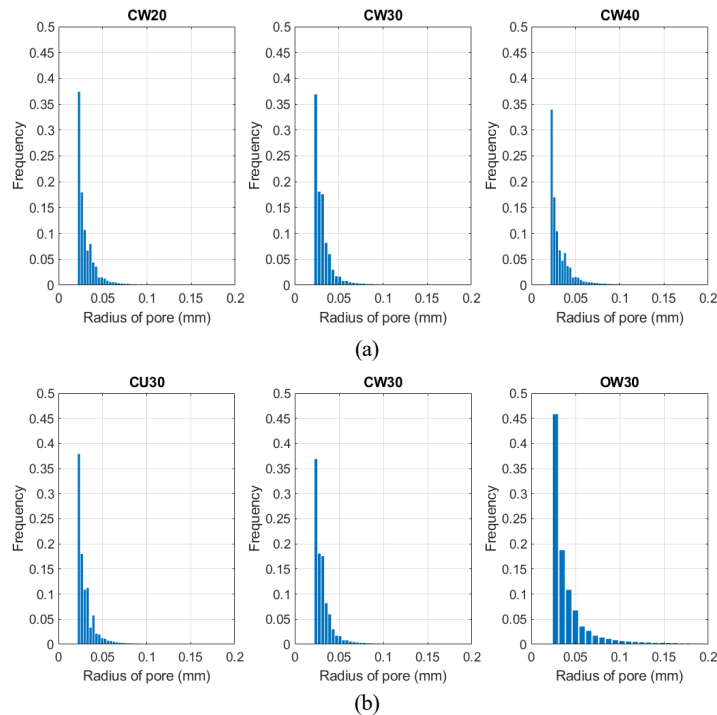


Fig. 7. Pore Size Distribution of Mortar Samples: (a) Specimens with Different Replacement Ratios, (b) Specimens with Unwashed/Washed Cockles and Oysters

4.4 Micro-CT를 활용한 공극 분포 특성 분석

XRD 및 SEM에 더하여 micro-CT를 활용하여 공극 분포 특성을 확인하였다. 각 케이스에 대한 공극률은 Table 5와 같으며, 뚜렷한 차이가 나타나지는 않지만, 전반적으로 폐각 대체율이 높아 질수록 공극률이 증가되는 경향을 확인하였다. 또한 세척하지 않은 폐각을 포함한 시험체의 공극이 세척한 폐각을 포함한 시험체보다 높은 것을 확인하였으며, 이는 폐각 표면에 잔류하던 이물질 때문으로 판단될 수 있다. 동일한 대체율에 대하여 폐각 종류별 공극률 비교 결과, 굴폐각이 꼬막폐각보다 높은 공극률을 나타냈으며, 굴폐각 자체의 조직 특성이 영향을 미친 것으로 판단되었다.

공극률 이외에도 공극 크기 분포 특성 분석을 Fig. 7과 같이 수행하였다. Fig. 7(a)를 살펴보면, 대체율 40%에 대한 결과에서 20%, 30% 대체에 비하여 상대적으로 작은 공극은 감소하는 것을 확인하였으나 0.05 mm 이상의 큰 공극의 비율은 높아지는 것을 확인함으로써, 미세한 차이지만 대체율이 증가함에 따라 상대적으로 큰 공극의 비율이 증가하는 것을 확인하였다. Fig. 7(b)의 꼬막폐각 세척 및 비세척 결과에서 0.05 mm보다 큰 공극에서는 두

경우 모두 비슷한 경향을 보였지만, 세척하지 않은 폐각에서 0.05 mm보다 작은 공극의 비율이 높은 것으로 확인되었다. 이러한 폐각 대체율 및 세척 유무에 따른 공극 크기 분포의 결과는 폐각 표면의 이물질과 유기물이 공극 특성에 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한 Fig. 7(b)의 OW30 공극 크기 분포 결과를 살펴보면, 굴폐각 시편에서 상대적으로 큰 공극의 비율이 다른 케이스에 비하여 더 높았으며, 해당 결과가 굴폐각 시편의 상대적으로 낮은 강도에 영향을 미친 것으로 판단되었다.

5. 결론

본 연구에서는 감소되는 천연 잔골재 문제 및 증가하는 해양 폐기물 문제를 해결하고자 해양 폐기물 중 하나인 폐각을 가공하여 잔골재를 대체하였다. 국내에서 가장 많이 생산되는 굴과 꼬막을 잔골재로 대체하였으며, 대체율 및 세척 유무에 따른 물성 평가를 통하여 가장 적절한 대체제를 확인하였다. 정리된 연구의 결론은 아래와 같이 정리될 수 있다.




- (1) 패각 대체율이 증가될수록 압축강도가 낮아지는 경향성을 확인하였으며, 본 연구에서 살펴본 대체율 중, 꼬막패각을 20% 대체하였을 때, 가장 낮은 강도 저하를 나타내는 것을 확인하였다.
- (2) 패각 표면의 이물질 및 유기물 제거를 위하여 초음파를 사용하여 세척 유무의 영향을 살펴본 결과, 세척한 패각을 이용하는 것이 더 높은 강도 및 내구성을 기대할 수 있다.
- (3) SEM, micro-CT 결과 패각의 특성상 굴패각을 포함한 시험체는 다수의 공극이 생성되며, 압축강도 결과 굴패각을 포함한 시험체가 꼬막패각을 포함한 시험체보다 현저히 낮은 성능을 확인하였다.

결론을 통해, 국내에서 발생하는 패각 중, 꼬막패각이 굴패각에 비해 역학적 및 미세구조적 특성이 우수한 것으로 확인되었으며, 적절한 가공 및 대체를 통해, 기존의 천연 잔골재를 보완하여 활용될 수 있음을 확인하였다.

Acknowledgements

This research was supported by Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion(KIMST) funded by the Ministry of Oceans and Fisheries, Korea(20220402).

ORCID

Seo-Eun Oh  <https://orcid.org/0009-0007-9060-9571>
 Kyuwon Kim  <https://orcid.org/0000-0003-3825-2361>
 Sang-Yeop Chung  <https://orcid.org/0000-0002-8295-8137>

References

Dash, M. K., Patro, S. K. and Rath, A. K. (2016). "Sustainable use of industrial-waste as partial replacement of fine aggregate for preparation of concrete-A review." *International Journal of Sustainable Built Environment*, Elsevier, Vol. 5, No. 2, pp. 484-516, <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.04.006>.

Eo, S. H. and Yi, S. T. (2015). "Effect of oyster shell as an aggregate replacement on the characteristics of concrete." *Magazine of Concrete Research*, ICE, Vol. 67, No. 15, pp. 833-842, <https://doi.org/10.1680/mac.14.00383>.

Eziefula, U. G., Ezech, J. C. and Eziefula, B. I. (2018). "Properties of

seashell aggregate concrete: A review." *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol. 192, pp. 287-300, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.096>.

Habert, G., Bouzidi, Y., Chen, C. and Jullien, A. (2010). "Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete." *Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier, Vol. 54, No. 6, pp. 364-376, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.09.002>.

Horiguchi, I., Mimura, Y. and Monteiro, P. J. (2021). "Plant-growing performance of pervious concrete containing crushed oyster shell aggregate." *Cleaner Materials*, Elsevier, Vol. 2, 100027, <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100027>.

Kim, P. G., Park, M. E. and Sung, K. Y. (2009). "Distribution of heavy metals in marine sediments at the ocean waste disposal site in the yellow sea, South Korea." *Geosciences Journal*, Springer, Vol. 13, No. 1, pp. 15-24, <https://doi.org/10.1007/s12303-009-0002-8>.

Malik, M. I., Jan, S. R., Peer, J. A., Nazir, S. A. and Mohammad, K. F. (2015). "Study of concrete involving use of quarry dust as partial replacement of fine aggregates." *IOSR Journal of Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 5-10.

Ministry of Oceans and Fisheries(MOF) (2021). "Plans to recycle marine by-products such as oyster shells are being prepared." Available at: <https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?docSeq=39275&menuSeq=971&bbsSeq=10> (Accessed: October 26, 2023) (in Korean).

Olivia, M., Oktaviani, R. and Ismeddiyanto. (2017). "Properties of concrete containing ground waste cockle and clam seashells." *Procedia Engineering*, Elsevier, Vol. 171, pp. 658-663, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.404>.

Oral, Ç. M. and Ercan, B. (2018). "Influence of pH on morphology, size and polymorph of room temperature synthesized calcium carbonate particles." *Powder Technology*, Elsevier, Vol. 339, pp. 781-788, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.066>.

Ponnada, M. R., Prasad, S. S. and Dharmala, H. (2016). "Compressive strength of concrete with partial replacement of aggregates with granite powder and cockle shell." *Malaysian Journal of Civil Engineering*, UTM, Vol. 28, No. 2, pp. 183-204, <https://doi.org/10.11113/mjce.v28.15970>.

Ramakrishna, B. and Sateesh, A. (2016). "Exploratory study on the use of cockle shell as partial coarse and fine aggregate replacement in concrete." *International Research Journal of Engineering and Technology*, Fast Track Publications, Vol. 3, No. 6, pp. 2347-2349.

Xie, A. J., Shen, Y. H., Zhang, C. Y., Yuan, Z. W., Zhu, X. M. and Yang, Y. M. (2005). "Crystal growth of calcium carbonate with various morphologies in different amino acid systems." *Journal of Crystal Growth*, Elsevier, Vol. 285, No. 3, pp. 436-443, <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.08.039>.