

굴 박신장에서 발생하는 굴 껍데기의 특성 연구: 해양생태계 개선제로의 활용을 위한 기초조사

우희은¹ · 김경희² · 최은원³ · 여정원⁴ · 김종오^{5,6} · 이인철^{2,†}

¹국립부경대학교 G-램프사업단 박사후연구원

²국립부경대학교 해양공학과 교수

³주대영엔지니어링 항만부 상무

⁴해양환경공단 미래전략TF 팀장

⁵국립부경대학교 미생물학과 교수

⁶국립부경대학교 G-램프사업단 교수

Characteristics of Crushed Shells in Oyster Shucking Facilities: A Preliminary Study for Their Application as Marine Ecosystem Improvement

Hee-Eun Woo¹, Kyunghoi Kim², Eun-Won Choi³, Jung-Won Yeo⁴, Jong-Oh Kim^{5,6}, and In-Cheol Lee^{2,†}

¹Post-Doctoral Researcher, Institute of Sustainable Earth and Environmental Dynamics (SEED), Pukyong National University, Busan 48547, Korea

²Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

³Managing Director, Port Development Department, DY Engineering, Seoul 08378, Korea

⁴Team Head, Future Strategy Development Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Seoul 05718, Korea

⁵Professor, Department of Microbiology, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

⁶Professor, Institute of Sustainable Earth and Environmental Dynamics (SEED), Pukyong National University, Busan 48547, Korea

요 약

본 연구는 굴 껍데기의 생산량 및 물리·화학적 특성을 조사하고 특히 굴 껍데기를 해양생태계 개선제로 재활용하기 위한 기초자료를 제공하는데 목적을 둔다. 굴 껍데기의 발생량은 통계자료 및 추정방법에 따라 294,708~325,217톤으로, 편차가 크게 나타났는데 향후 굴 껍데기 통계자료 도출 시 자료원 및 추정 방법에 대한 면밀한 고려가 필요하다. 또한 굴 껍데기에 포함된 중금속은 해양환경기준을 모두 만족하였으며, 굴 껍데기의 강열감량은 3.6%로 연안에 활용하기 안전한 재료임을 확인하였다. 그러나 800°C의 고온에서 가열해도 코팅사를 완전히 제거하는 것은 어려운 것으로 확인되어(77% 감소), 굴 껍데기를 해양생태계 개선제로 사용하기 전에 코팅사 문제를 해결하기 위한 방안이 선행되어야 한다.

Abstract – This study investigated the characteristics of oyster shells produced in oyster processing facilities for their potential use in improving marine ecosystems. The analysis shows significant variation in oyster shell estimates based on statistical data, highlighting the need for careful consideration of data sources and estimation methods in future studies. The true density of oyster shells produced at the oyster processing facility was 2.05 g/cm³, the absorption rate was 14.7%, and the unit mass was 0.83 g/cm³. Heavy metal concentrations in oyster shells met marine environmental standards and the average loss on ignition was 3.6%, confirming their safety for coastal applications. However, it was found that it was difficult to completely remove the coating yarn (77% reduction) even at 800°C, suggesting that a new strategy was needed to address this issue comprehensively.

Keywords: Oyster shell(굴 껍데기), Recycling(자원화), Marine ecosystem(해양생태계), Oyster shucking facility(굴 박신장), Coated yarn(코팅사)

[†]Corresponding author: ilee@pknu.ac.kr

1. 서 론

우리나라 패류 양식수산물에서 생산량이 가장 많은 굴은 1960년 대 양식 기술의 발달로 생산량이 급증하면서 현재 우리나라는 세계 2위의 굴 생산국이 되었다(Baek and Lee[2020]). 그러나 굴 산업의 급격한 발전으로 인해 굴 껍데기 처리가 새로운 지역사회 문제로 대두되기 시작했다. 각굴 중량의 약 90%를 차지하는 굴 껍데기는 박신(각굴에서 껍데기를 제거하는 작업) 과정에서 육질이 남아있는 상태로 굴 까기 작업장(굴 박신장) 근처에 방치된다. 굴 껍데기에 남아있던 육질을 포함한 각종 이물질은 악취 및 병충해 문제를 야기하고, 오염침출수로 인한 환경오염, 자연경관 훼손, 지역 주민들의 보건환경 침해, 관광 및 어업산업 소득 감소 등의 피해를 발생시킨다(Jeon *et al.*[2020]). 따라서 방치되고 있는 굴 껍데기 처리 방안 마련이 필요한 실정이다.

최근 「수산부산물 재활용 촉진에 관한 법률(이하 수산부산물법)」이 제정(2022년 7월 시행)됨에 따라 수산부산물의 연간 발생량 및 처리량 통계 의무화, 자원화 시설 설치 등의 정책으로 굴 껍데기의 자원화(재활용)가 촉진될 것으로 기대된다. 그러나 ‘굴 껍데기 자원화시설 구축 타당성 및 경제성 분석 조사’에 따르면 굴 껍데기 자원화시설을 탈황설비, 액상 소석회 제조설비, 토목·건축자재 제조설비로 활용하는 것은 적자를 면하기 어렵다고 보고된 바 있다(Hyun[2019]). 자원화 시설의 굴 껍데기 재활용 방안은 900°C 이상의 온도에서 열처리하는 과정을 거쳐야 하며 이로 인한 높은 연료비와 수요처의 부족으로 어려움을 겪고 있다. 이러한 방안 외에 새로운 재활용 방안으로 굴 껍데기를 인공어초의 부착체, 골재채취해역의 복원체, 연안 오염 퇴적물의 정화체 등으로 해양에 재투입하는 연구들이 수행되고 있다(Lee *et al.*[2021]; Lee *et al.*[2022]; Patil *et al.*[2022]).

다만, 굴 껍데기를 해양의 생태계를 복원하기 위한 재료로 활용하기 위해서는 굴 박신장에 방치된 굴 껍데기의 실태와 굴 껍데기가 해양환경에 미치는 영향에 대한 조사가 선행되어야 한다. 실제 국내 굴 껍데기 발생량에 대한 공식적인 통계 데이터가 없고, 박신장에 쌓여있는 굴 껍데기는 부피를 줄이기 위해 파쇄된 상태로 코팅사와 유기물이 혼재되어 1년 이상 방치되고 있다. 이러한 중요성에도 불구하고 굴 껍데기의 재활용 관련 연구는 기술개발에 집중되어 있어 굴 껍데기 재활용 정책의 실효성 논란이 계속되고 있다.

본 연구에서는 굴 껍데기를 해양환경 및 생태계 복원에 활용하기 위한 기초연구로 굴 껍데기 처리 현황과 굴 박신장의 굴 껍데기 물성 및 해양환경 적합성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 굴 껍데기 발생량 추정 및 처리 현황

국내에서 발생하는 굴 껍데기는 현재까지 정식 통계 데이터가 없어 굴 생산량으로부터 추정한다. 국내 굴 생산량 통계자료는 통계청의 어업생산동향조사에 근거한 해양수산부(MOF) 행정간행물 ‘해양수산 주요통계’와 한국해양수산개발원(KMI) 수산관측업센터의

굴 생산량이 주로 활용되고 있다. 본 연구에서도 해당 통계자료를 바탕으로 굴 껍데기 발생량을 추정하였다. 굴 껍데기 처리 현황은 2019년 경상남도의 각 지자체에서 내부조사를 통해 작성한 내부자료를 활용하였다.

2.2 굴 박신장에서 발생하는 굴 껍데기의 물성 조사

굴 껍데기 시료는 경남지역의 주요 굴 생산지(통영, 거제, 고성) 내의 굴 박신장 다섯 곳(F₁-F₅)을 임의로 선정하여 채취하였다. 각 작업장에서 이물질 및 코팅사가 포함되어 있는 굴 껍데기를 2 L씩 3회 채취하였고, 이후 실험실로 운반하여 분석을 진행하였다.

굴 껍데기의 물성은 한국산업표준(KS) 시험 방법을 따라 분석하였다. 진밀도 및 흡수율은 KS F 2503, 단위 질량은 KS F 2505, 입도 분석은 KS F 2502를 따라 수행하였으며 시료당 5회씩 반복 측정하였다. 굴 껍데기의 국내 해양환경기준(해양수산부 고시 제2018-10호)과 「해양 폐기물 및 해양오염퇴적물 관리법 시행규칙」 별표 1 폐기물의 해양배출 처리 기준을 충족하는지 조사하기 위해 굴 껍데기의 중금속 농도(As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg) 및 PCBs를 분석하였다. 시료의 전처리, 시험방법은 해양환경시험공정기준(국립수산업과학연구소 제2023-5호)의 [별표 4]해양폐기물공정시험기준에 따라 수행되었다. 산분해를 통해 얻어진 용액 중 As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn는 ICP-MS(NexION 300D, PerkinElmer)로 측정하였고, Hg의 농도는 Direct Mercury Analyzer(DMA-80, Milestone)를 이용하였다. 중금속 농도의 정확도를 확보하기 위해 퇴적물용 표준물질(NRC, MESS-4)을 함께 분석하였고, 회수율은 모든 항목에서 80-120%의 이내로 나타났다. PCBs는 GC-MS(6890 GC with 5973N MSD, Agilent)로 측정하였다.

굴 껍데기의 유기물 함량은 강열감량(Loss on ignition; LOI)을 측정하여 확인하였다. 일반적으로 한 박신장 내에서도 노출 기간이 다른 굴 껍데기가 혼재하고 있고, 이러한 환경의 차이는 유기물 함량에 영향을 줄 수 있다. 이를 고려하여 5개의 박신장에서 각 3개의 시료를 구분하여 LOI를 분석하였다(F₁-1, F₁-2, F₁-3; F₂-1, F₂-2, F₂-3; F₃-1, F₃-2, F₃-3; F₄-1, F₄-2, F₄-3; F₅-1, F₅-2, F₅-3). LOI는 건조로(WOF-155, WiseVen)를 사용하여 100°C에서 6시간 동안 건조한 다음 전기로(SF-14, SciLab)로 600°C에서 4시간 가열 후 중량 변화량을 측정하여 산정하였고, 이를 각 3회씩 반복분석하였다. 굴 박신장에서 굴 껍데기와 함께 채취된 코팅사는 길이를 측정하고 전체 시료 대비 코팅사가 차지하는 중량비를 조사하였다. 또한 굴 껍데기의 전처리 과정에서 코팅사의 제거 여부를 확인하기 위하여 코팅사를 100-800°C에서 각각 30분씩 가열하여 중량감소를 비교하였다. 코팅사는 1 cm로 잘라 세척 후 60°C에서 1시간 건조 후 가열하였으며 5회 반복 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 굴 껍데기 발생량 추정

해양수산부의 ‘해양수산 주요통계’에 따르면, 국내에서 생산되는

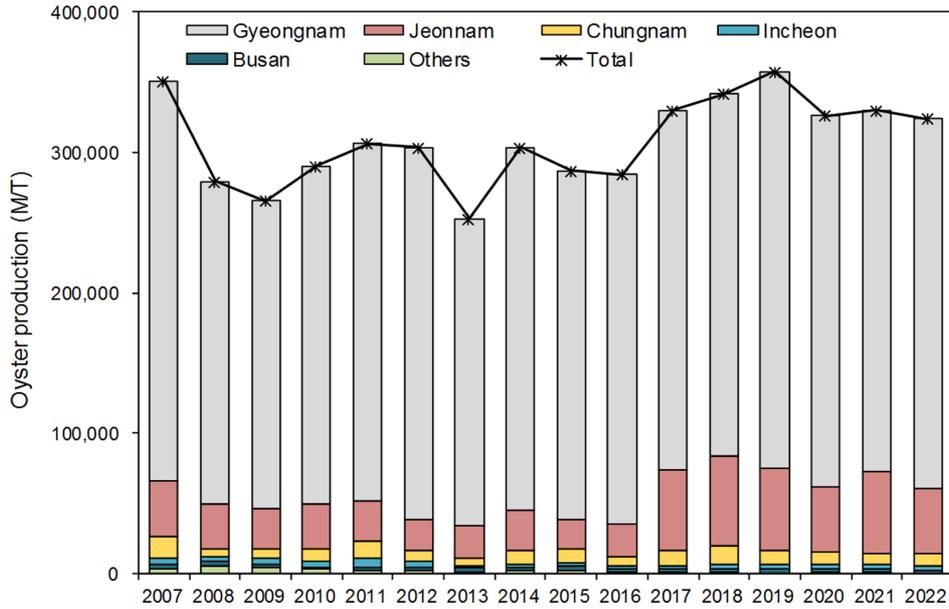


Fig. 1. Oyster production in major domestic cities from 2007 to 2021.

Table 1. Oyster meat production (M/T) by region for 10 years (2013-2022)

Year	Total	Gyeongnam	Jeonnam	Others*
2013	30,338	25,906	3,992	440
2014	30,847	26,391	3,898	558
2015	32,778	27,375	4,895	508
2016	31,708	26,365	4,804	539
2017	31,058	25,084	5,444	530
2018	32,780	26,495	5,628	657
2019	32,065	27,245	4,285	535
2020	31,181	26,713	3,963	505
2021	30,042	24,886	4,640	516
2022	30,665	24,929	5,017	717
2023	30,707	24,293	5,729	685

*Chungnam, Gangwon, Gyeonggi

굴(각굴; 알굴+굴 껍데기)은 연간 약 300,000 톤으로, 2022년 기준 325,889 톤이 생산되었다(Fig. 1). 지역별로는 경상남도가 전국 굴 생산량의 약 81%를 차지하였으며, 뒤를 이어 전라남도 (14%), 충청남도 (3%) 순으로 나타났다. KMI 수산관측업센터의 통계자료에 의하면, 알굴 생산량은 연간 약 30,000 톤이며, 2023년 30,707 톤이 생

산되었다(Table 1). 두 통계자료에서 2020년부터 공통으로 확인되는 굴 생산량의 감소는 박신 인력 수급의 어려움과 수온 상승에 의한 집단 폐사 등이 원인인 것으로 보인다.

‘해양수산 주요통계’는 각굴에 대한 통계이며, KMI 수산관측업 센터는 알굴 생산량의 통계자료를 제공한다. 해당 통계를 바탕으로

Table 2. Estimation of oyster shell production

	2018	2019	2020	2021	2022
Oyster production					
Oyster (i)*	341,524	357,282	325,889	329,920	323,686
Oyster meat (ii)**	32,780	32,065	31,181	30,042	30,665
Oyster shell production					
a. (i) - (ii)	308,744	325,217	294,708	299,878	293,021
b. (i) × 78%	266,389	278,680	254,193	257,338	252,475
c. (ii) × 0.9	295,020	288,585	280,629	270,378	275,985

*MOF statistical data **KMI statistical data

굴 껍데기 발생량을 추정하는 방법을 Table 2에 나타내었다. 굴 껍데기 발생량은 기본적으로 각굴과 알굴 생산량 차이로 추정할 수 있으며(Table 2a), 이외에도 굴의 폐기율(비가식율)을 적용할 수 있다. 한국농촌경제연구원(2021)의 식품수급표[2021]에 따르면 최근 5년간의 굴의 폐기율은 78%이다(Table 2b). 또한 알굴 대비 굴 껍데기의 평균 중량을 고려하여 추정할 수 있으며 이는 약 9배 정도이다(Table 2c). Baek and Lee[2020]에 따르면, 일반적으로 상품화되어 출하되는 알굴의 평균 수율은 10% 이내인 것으로 보고되었다. 세 가지 방법으로 5년간 평균 굴 껍데기 발생량을 추정하면 각각 304,314 톤, 261,815 톤, 282,119 톤으로, 추정 방법에 따라 굴 껍데기 발생량의 차이가 큰 것으로 확인되었다. 다수의 연구에서도 굴 껍데기의 발생량은 굴 생산량의 70~93% 범위의 비율로 추정하고 있다(Lee et al.[2009]; Jeong et al.[2019]; Kim et al.[2019]).

「수산부산물법」 제6조에 따르면 연간 수산부산물의 발생량과 처리실적에 대한 통계조사 제출을 명시하고 있어 기존의 추정방식보다 신뢰성 있는 굴 껍데기 발생량 자료를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 수산물 생산 통계는 유통량 혹은 수협 위판현황의 합계에 근거하여 도출되고 있으나, 비계통 표본 조사과정에서 오차가 발생할 가능성이 있어 신뢰성이 낮은 것으로 보고된 바 있다(Lee and Kim[2017]). 또한 조사원의 면접조사로 진행되는 비계통 출하 조사는 통계 조사원의 전문성 결여, 잦은 인력 교체 등으로 인해 객관적인 물량을 파악하기 어렵다. 따라서, 굴 및 굴 껍데기 발생량에 대한 신뢰성 있는 통계조사를 위한 정부의 적극적인 노력이 필요할 것으로 보인다.

3.2 굴 껍데기 처리 현황

박신 과정에서 발생하는 굴 껍데기는 한정적인 공간에 많은 양을 보관하기 위하여 과쇄된 채로 굴 박신장 근처에 적치된다. 굴 껍데

기는 비료, 사료, 채묘용 등으로 재활용되며, 나머지는 해양배출 및 해안가에 매립된다. 경상남도 내부자료에 의하면 경남지역에서 발생한 굴 껍데기 중 약 50,000 톤이 매년 방치되고 있다(Fig. 2). 국회의원조사처의 조사 결과에 따르면, 2010년부터 2019년 8월까지 굴 껍데기의 누적 방치량은 약 20만 톤으로 추정하고 있으며(Yoo and Kim[2020]), 현재까지 그 누적량이 증가하고 있을 것으로 보인다.

굴 껍데기 재활용의 가장 큰 수요처인 패화석 비료는 제작 방법이 간단하고 대량 생산 및 소비가 가능할 경우 굴 껍데기 문제를 쉽게 해결할 수 있다. 그러나 잔류 염분에 의한 농작물 피해 등의 우려로 그 수요가 지속적으로 감소하고 있다. 6개월 이상 야적된 굴 껍데기는 빗물에 의해서 염분이 자연세척될 것이라 간주하지만 잔류 염분이 남아있어 비료로 사용할 경우 토양의 산성화 등의 문제를 발생시킬 수 있다(Kim et al.[2014]; Baek and Lee[2020]). 반면, 굴 껍데기를 해양에 재활용할 경우 잔류 염분을 고려하지 않아도 되므로 굴 껍데기를 해양생태계 개선 재료로 활용하는 방안은 다른 방안들보다 효율적일 수 있다.

3.3 굴 껍데기의 물성 및 환경 영향

굴 껍데기의 비중시험 결과는 Table 3에 나타내었다. 굴 껍데기의 진밀도(True density)는 2.05 g/cm³, 흡수율(Absorption)은 14.7%로 산출되었다. 비중 및 흡수율 시험은 재료의 실질적인 부분의 진비율을 측정하여 공극률 및 단위중량을 계산하며, 원하는 용도에 사용할 수 있는 재료인지 사용 가능 여부를 판단할 때 사용된다. 또한 재료의 실적률(Solid content) 및 공극률(Porosity)은 입도의 상태나 입형의 양부를 판정하며, 특히 실적률은 재료의 내구성이나 경제성에 영향을 준다. 굴 껍데기의 평균 실적률과 공극률은 각각 52.7%와 47.3%로 나타났으며 단위용적질량은 0.83 g/cm³로 확인되었다.

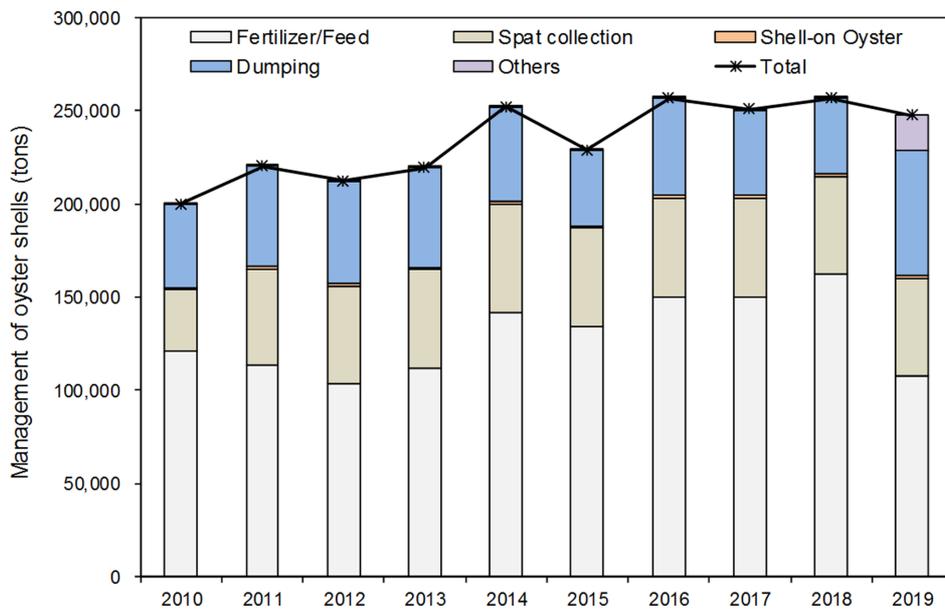
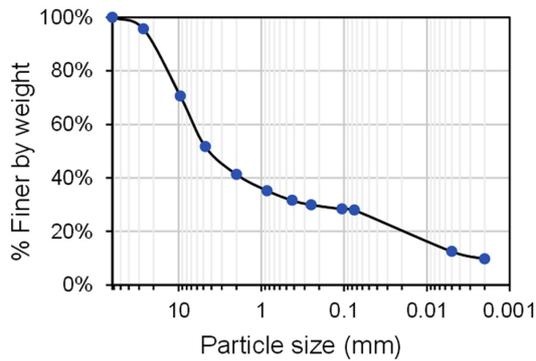


Fig. 2. Oyster shells management in Gyeongnam (2019).

Table 3. Results of specific gravity determination and unit mass test

Physical properties	Average	SD*
True density	2.05 g/cm ³	0.02
Surface dried density	1.81 g/cm ³	0.04
Density	1.57 g/cm ³	0.10
Absorption	14.7%	3.83
Unit mass	0.83 g/cm ³	0.03
Solid content	52.7%	2.89
Porosity	47.3%	2.89

*SD: Standard deviation

**Fig. 3.** The grain particle size of oyster shells.

각 굴 박신장(F₁-F₅)에서 파쇄된 상태로 야적되어 있던 굴 껍데기의 크기는 63 mm를 넘지 않는 것으로 조사되었으며, 평균적으로 9.5 mm 통과율은 약 70.6%, 4.75 mm 통과율은 51.7%, 2 mm 통과율은 약 41.3%인 것으로 나타났다(Fig. 3). 체거름 통과율 결과, 통일분류상 굴 껍데기는 자갈로 분류된다. 입도분포곡선에서 통과 백분율이 10%, 30%, 60%에 해당하는 D₁₀, D₃₀, D₆₀ 결과를 활용하여 균등계수(C_u) 및 곡률계수(C_g)를 계산할 수 있으며, 이는 시료의 입도 불량 정도를 판단할 수 있다. C_u가 작을수록 입도가 균등하고, C_g가 1-3이면 입자의 분포가 양호한 것으로 본다. 박신장별 평균 C_u 및 C_g는 각각 약 2388.5, 5.9로 입도분포가 불량하고 입경 분포 범위가 넓다(Table 4). 이는 박신장 내에서 더 많은 굴 껍데기를 적치하기 위한 파쇄 과정에서 굴 껍데기의 입경은 불균질해진다는 것을

Table 4. Coefficient of uniformity and grading (C_u, C_g) of oyster shell, based on grain size parameters (D₁₀, D₃₀, D₆₀)

Facility	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _u	C _g
F ₁	-	0.08	5.4	-	-
F ₂	0.002	0.25	5.7	2556.1	4.92
F ₃	0.002	0.15	6.5	2838.4	1.59
F ₄	0.002	0.29	6.5	3009.3	5.83
F ₅	0.003	0.50	8.0	2930.4	11.45
Average	0.002	0.25	6.4	2833.5	5.95

보여준다. 입경은 굴 껍데기의 성능에 중요한 요인으로, 특히 굴 껍데기를 화학반응제로 사용할 경우 입경이 작을수록 비표면적이 크기 때문에 반응면적도 증가한다(Woo *et al.*[2018]; Liao *et al.*[2023]). 그러므로 재활용 목적에 따라 굴 껍데기의 입경에 관한 별도의 처리 과정이 필요한 것으로 판단된다.

박신장에서 채취한 굴 껍데기의 평균 중금속 농도를 Table 5에 나타내었다. 해양환경기준은 생물학적 요인을 반영한 값으로 중금속 8개 항목에 대해 Threshold Effects Level (TEL: 부정적인 생태영향이 일부 발현될 개연성이 있을 것으로 예측되는 농도)과 Probable Effects Level (PEL: 부정적인 생태영향이 발현될 개연성이 매우 높은 농도)로 구분하여 농도를 제시하고 있다. 굴 껍데기의 8개 중금속 농도는 박신장에 따라 차이가 나타났으나, 해양환경 기준을 만족하는 것으로 확인되었다. 굴 껍데기의 Hg 농도는 평균 0.00009 mg/kg으로 해양배출기준의 제 1, 2 기준에 모두 만족하였다. PCBs 역시 측정 결과 모두 검출한계 미만으로 나타나 굴 껍데기는 해양배출 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

굴 박신장별 굴 껍데기의 LOI는 0.8-7.4%(평균 3.4%) 범위에 분포하고 있으며 전체 평균은 약 3.6%로 조사되었다(Fig. 4). 동일한 작업장 내에서도 방치된 기간이 달라 LOI의 차이가 나타났다. LOI 결과는 약 700°C 이하의 소성온도에서 수분 및 유기물에 의한 중량감소가 나타났던 굴 껍데기의 열분석(Thermogravimetry Differential Thermal Analysis; TG-DTA) 결과와도 유사한 것을 확인하였다(Huh *et al.*[2016]; Ok *et al.*[2010]). 국내 연안 퇴적물의 LOI는 1.3-11.8%의 범위로, 굴 껍데기의 유기물과 비슷한 수준인 것으로 나타났다(Woo *et al.*[2024]).

Table 5. Concentrations of heavy metals and PCBs (mg/kg, dry weight) in oyster shells and environmental standards

	Marine environmental standards (benthic)		Discharge of garbage into sea standards		This study
	Threshold Effects Level	Probable Effects Level	1 st criterion	2 nd criterion	Range (average)
As	14.5	75.5	-	-	0.24-1.50 (0.98)
Cd	0.75	2.72	-	-	0.0001-0.0029 (0.0013)
Cr	116	181	-	-	0.0024-0.0091 (0.0054)
Cu	20.6	64.6	-	-	0.0018-0.0208 (0.0113)
Ni	47.2	80.5	-	-	0.0010-0.2674 (0.1082)
Pb	44.0	119	-	-	0.002-0.006 (0.004)
Zn	68.4	157	-	-	0.0050-0.0540 (0.0318)
Hg	0.11	0.62	5	1	0.00003-0.0003 (0.00009)
PCBs	-	-	0.15	0.03	BDL*

*Below detection limit

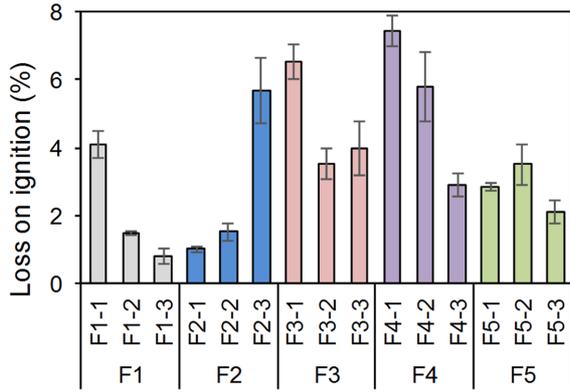


Fig. 4. Loss on ignition of oyster shell each oyster shucking factory.

굴 껍데기 재활용을 위한 이물질 제거에서 가장 중요한 요인인 코팅사는 굴 양식 과정에서 굴 껍데기에 부착되고, 굴 수확시에 함께 섞여 있다. 주로 사용되는 코팅사의 주재료는 플라스틱으로, 굴 껍데기를 재활용하기 위해서는 코팅사의 완전한 분리가 선행되어야 한다. 현재까지 코팅사 분리 장치에서 처리 가능한 코팅사는 30 cm 이상으로 이보다 짧은 코팅사를 처리하기 위해서는 별도의 인력 등 추가 비용이 요구된다(Baek and Lee[2020]). 경상대학교 연구보고서[2007]에 따르면, 굴 박신장 내에서 굴 껍데기로부터 코팅사를 분리하는 장치를 활용하고 있으나, 약 10% 정도는 분쇄된 굴 껍데기에 섞여 들어가는 것으로 보고되었다.

굴 박신장에서 채취한 굴 껍데기에 포함된 코팅사의 길이는 2.5–27.9 cm로, 코팅사 제거장치를 이용하더라도 30 cm 이하의 코팅사는 걸러지지 않는다는 것을 재차 확인하였다. 코팅사 열처 결과, 100°C에서 중량감소는 0.1%로 중량 변화가 없었으며, 300°C에서는 51% 감소하였다(Fig. 5). 400–800°C에서 가열한 코팅사의 중량감소는 72–77%로, 온도에 따른 유의미한 차이가 없었다. 코팅사는 800°C의 고온에서도 중량이 100% 감소하지 않았으며, 잔여물이 녹았다 굳어져 800°C까지 가열하는 방식으로는 완벽한 제거가 어렵다는 것을 확인하였다. 코팅사를 완벽하게 제거하는 방안이 마련되지 않은 현 상황에서는 작업자에게 박신 작업 시 코팅사를 30 cm 이상 길게 자르도록 권고할 필요가 있다.

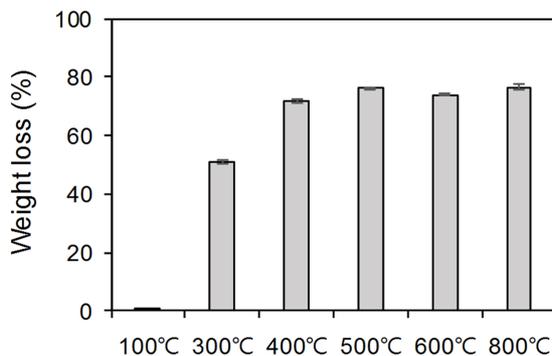


Fig. 5. The weight loss of coated yarn by heat treatment temperature.

4. 결 론

본 연구는 굴 껍데기를 해양생태계 개선제로 활용하기 위해서 굴 박신장에서 발생하는 굴 껍데기의 물리·화학적 특성을 조사하였다. 연구 결과, 굴 생산량 통계자료로 추정된 굴 껍데기의 발생량은 통계자료와 추정 방법에 따라 상당한 차이를 보였으며, 보다 신뢰성 높은 굴 껍데기 발생량 조사 방법 및 통계조사가 필요함을 확인하였다. 굴 껍데기의 물리적 특성 분석 결과, 평균 진밀도는 2.05 g/cm³, 흡수율은 14.7%, 단위 질량은 0.83 g/cm³로 나타났다. 박신장에서 1차 분쇄되어 있는 굴 껍데기의 입도분포는 불균등하고 입경의 범위가 넓은 것으로 확인되었다. 또한 굴 껍데기의 중금속 함량은 해양환경기준을 충족하여 해양에 활용하기에 안전한 재료임을 확인되었다. 그러나 굴 박신장에 굴 껍데기와 함께 혼재되어 있는 코팅사는 800°C로 가열해도 완전히 제거되지 않았다. 향후 해양생태계 개선제로 굴 껍데기를 활용하기 위해서 물리적 특성을 반영한 최적 활용 방안을 모색하고, 코팅사의 효과적인 분리·제거 기술개발 및 해양환경 내에서의 장기적인 안정성 평가 등 추가적인 연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 2024년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20220252, 수산전문인력양성사업).

References

- [1] Baek, E.-Y. and Lee, W.-G., 2020, A study on the rational recycling of oyster-shell, *J. Fish. Bus. Adm.*, 51(2), 071-087.
- [2] Gyeongsang National University, 2007, Development of the system for eliminating undesirable matters from oyster shell. Ministry of Oceans and Fisheries, <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201400022892anddb=TRKOandm=>
- [3] Huh, J.-H., Choi, Y.-H., Lee, H.-J., Choi, W.J., Ramakrishna, C., Lee, H.-W., Lee, S.-H., and Ahn, J.-W., 2016, The Use of Oyster Shell Powders for Water Quality Improvement of Lakes by Algal Blooms Removal, *J. Korean Ceram. Soc.*, 53(1), 1-6.
- [4] Hyun, D.H., 2019, A study on the feasibility and economic analysis of constructing an oyster shell recycling facility, Gyeongnam Regional Government Development Institute, Changwon, Republic of Korea.
- [5] Jeon, J.H., Son, Y.H., Kim, D.G., and Kim, T.J., 2020, Estimation of Life Cycle CO₂ emissions using oyster shells and bottom ash as materials for soil-mixing and a drainage layer, *J. Clean. Prod.*, 270, 122477.
- [6] Jeong, I., Woo, H.-E., Lee, I.-C., Kim, J., and Kim, K., 2019, Evaluation of nutrients removal using pyrolyzed oyster shells, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 25(7), 906-913.
- [7] Kim, B.S., 2001, Assessment of heavy metal contamination of

- the coastal surface sediments around Korea, Ph.D. dissertation, Dept. Oceanography, Seoul National Univ., Seoul, Korea.
- [8] Kim, H.-C., Woo, H.-E., Jeong, I., Oh, S.-J., Lee, S.-H., and Kim, K., 2019, Changes in sediment properties caused by a covering of oyster shells pyrolyzed at a low temperature, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 25(1), 74-80.
- [9] Kim, J.-H., Chung, C.-W., and Lee, J.-Y., 2014, Effects of crushed shells on the physical properties of cement mortar. *J. Korea Inst. Build. Constr.*, 14(1), 94-100.
- [10] Korea Rural Economic Institute, 2021, Food Balance Sheet.
- [11] Lee, H.-D. and Kim, D.-Y., 2017, Current status and improvement of the fisheries supply and demand statistics, *TJ. Fish. Bus. Adm.*, 48(2), 19-32.
- [12] Lee, H.-S., Park, D.-W., and Woo, D.-S., 2009, A study on physicochemical and calcination processed characteristic of oyster shell, *J. Korea Academia-Industrial cooperation Soc.*, 10(12), 3971-3976.
- [13] Lee, I.-C., Park, S., Woo, H.-E., Jeong, I., Choi, C.G., and Kim, K., 2021, A study on macroalgae establishment on concrete substratum covered by oyster shells, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 27(5), 639-646.
- [14] Lee, K., Yun, J., and Lee, H., 2022, A study on the diffusion of oyster shell dumping methods for restoration of sand mining zone, *Sci. Fish. Oceanogr.*, 31(1), 41-27
- [15] Liao, Y., Wang, X., Kong, D., Da, B., and Chen, D., 2023, Experiment research on effect of oyster shell particle size on mortar transmission properties, *Constr. Build. Mater.*, 375, 131012.
- [16] Ok, Y.S., Oh, S.-E., Ahmad, M., Hyun, S., Kim, K.-R., Moon, D.H., Lee, S.S., Lim, K., Jeon, W.-T., and Yang, J., 2010, Effects of Natural and Calcined Oyster Shells on Cd and Pb Immobilization in Contaminated Soils, *Environ. Earth Sci.*, 61, 1301-1308.
- [17] Patil, M.P., Jeong, I., Woo, H.E., Kim, J.O., Lee, D.I., and Kim, K., 2023, Natural Variations in the Benthic Environment and Bacterial Communities of Coastal Sediments around Aquaculture Farms in South Korea, *Indian J. Microbiol.*, 63(1), 100-105.
- [18] Woo, H.-E., Kim, K., Lee, I.-C., and Kim, K., 2018, A study on phosphate removal efficiency by pre-treatment conditioning of oyster shells, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 24(2), 196-202.
- [19] Woo, J., Choi, M., Park, J.M Kim, T., and Lee, H., 2024, Distribution of organic matter parameters and selection of representative indicators in coastal sediments of Korea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 27(1), 1-13.
- [20] Woo, J., Lee, H., Park, J., Cho, D., Jang, D, Park, S., Choi, M., and Yoo, J., 2019, Background concentration and contamination assessment of heavy metals in Korean coastal sediments, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 24(1), 67-78.
- [21] Yoo, J.B. and Kim, K.M., 2020, Problems related to the generation and treatment of fishery by-products and directions for improvement, National Assembly Research Service, 118, 1-20.

Received 5 November 2024

Revised 12 December 2024

Accepted 10 February 2025