



# 굴 패각을 이용한 간척지 배수재의 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산정 및 국내 적용성 평가

## Life Cycle CO<sub>2</sub> Assessment and Domestic Applicability Evaluation of the Drainage Material for Reclaimed Land Using Oyster Shell

전지훈<sup>a</sup> · 손영환<sup>b,†</sup> · 김동근<sup>c</sup> · 김태진<sup>d</sup>

Jeon, Jihun · Son, Younghwan · Kim, Donggeun · Kim, Taejin

### Abstract

The objective of this study is to assess the environmental effect of the reclaimed land drainage method using oyster shell through the Life cycle CO<sub>2</sub> assessment, and to evaluate the applicability in South Korea. In this Study, the life cycle CO<sub>2</sub> emissions of oyster shell (OS) and crushed stone (CS, as avoided product) were assessed and compared. The Life Cycle Assessment method was used for quantitative evaluation of direct or indirect environmental effects of OS recycling. CO<sub>2</sub> was selected as the evaluation target material, and the scope of assessment includes the acquisition of materials, processing, transportation, construction phases. Compared to using CS, 77.0% of CO<sub>2</sub> emissions in acquisition and processing, 47.0% in transportation and 6.5% in construction phase were reduced, respectively by using of OS. The maximum transportation distance of OS was estimated according to transportation distance of CS. OS has environmental advantages than CS within about 26 - 101 km from the source. OS was found to be applicable to reclaimed lands up to 810 ha, 3,910 ha from Tongyeong and Yeosu, respectively. In addition, the amount of OS that could be used as drainage material for reclaimed land was much higher than annual OS production of South Korea. Therefore, it is considered that OS is sufficient to be used as drainage material for reclaimed land in South Korea.

**Keywords:** Oyster shell; recycled materials; reclaimed land; drainage; life cycle CO<sub>2</sub> emissions

### 1. 서론

국립식량과학원 (National Institute of Crop Science, NICS) 의 2013년 보고서에 따르면, 국내 간척지의 면적은 약 35 만 ha에 이르며, 그 중 약 96%가 배수성이 불량한 특성이 있다. 또한 높은 지하수위와 토양 내 고농도의 염분으로 인하여 밭작물 재배 등 고부가가치 활용이 불리하고, 약 81%가 논으로 이용되고 있는 실정이다 (NICS, 2013; Son, 2009). 따라서 간척지를 밭작물 재배지로 전환, 활용하기 위해서는 배수를 개선하는 방안이 우선적으로 검토되어야 한다. 간척지의 배수

개선은 주로 암거 및 배수로 등 배수시설 설치를 통하여 이루어지고 있으나 투수계수  $10^{-4}$  cm/s 이하로 토양의 투수성이 불량한 경우 암거 단독으로는 제염이 어려워 흙의 투수성을 증가시키는 등 추가 배수공법이 필요하다 (Kim et al., 2015).

한편, 해양수산부 (Ministry of Oceans and Fisheries, MOF) 2017년 통계에 따르면, 우리나라에서는 경남 통영·거제, 전남 여수 등 남해안을 중심으로 약 28만 4000여 톤의 굴이 생산되었다 (MOF, 2017). 이에 따라 연간 20만 톤 내외의 굴 폐각이 폐기물로 발생되고 있다. 굴 폐각 발생량의 약 75%는 비료, 사료 등으로 재활용되고 있으나 불순물 제거 등 공정의 복잡성에 따른 전처리 비용 발생, 대량 처리의 어려움, 수요 부족으로 인한 판매 불황 등이 맞물려 재활용량이 감소하고 있는 실정이다 (Sung and Kim, 2010). 또한, 이러한 굴 폐각 폐기물은 상당수가 불법 매립 및 야적되어 경관을 해치고 악취를 발생시킬 뿐 아니라 오염된 침출수로 인한 해양 생태계 파괴를 야기하고 있다.

이에 따라, 굴 폐각을 대량으로 처리하기 위하여 건설재료로 재활용하는 방안에 대한 연구가 진행되었다. 특히, 철근 콘크리트 구조물, 시멘트 및 모르타르, 모래다짐말뚝 등의 골재 대체재로서 굴 폐각의 이용성을 검토하는 연구가 수행되었다 (Lee et al., 2007; Koo, 2008; Ez-zaki et al., 2016; Mikami and Okumura, 2007). 세립토의 투수성 및 전단강도 증대를 목

<sup>a</sup> MS Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

<sup>b</sup> Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering and Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

<sup>c</sup> PhD Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

<sup>d</sup> MS Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

† **Corresponding author**

Tel.: +81-2-880-4585 Fax: +81-2-873-2087

E-mail: syh86@snu.ac.kr

Received: September 17, 2018

Revised: November 8, 2018

Accepted: November 8, 2018

적으로 굴 패각을 혼합한 토양에 대한 연구도 활발히 수행되었다. Son et al. (2003)은 굴 패각 혼합토양의 비배수 전단강도 특성을, Lee and Han (2001)은 압밀 및 투수특성을 검토하였다. 특히, Yoon et al. (2001), Yoon and Yang (2004) 등은 사질 토 입경으로 파쇄한 굴 패각이 모래와 유사한 투수계수( $10^3 \sim 10^1$  cm/s)를 나타냄을 확인하였으며, 연약지반 개량 및 건설 공사 대체 재료로서의 사용 가능성을 제시하였다.

굴 패각을 간척지의 배수공법에 이용한 사례로서, 농촌진흥청 (Rural Development Administration, RDA)은 전북 부안군 간척지 시험포장에 쇄석, 굴 패각, 파쇄목, 왕겨, 석탄바닥재 등을 이용하여 모세관 차단층을 조성하였다 (RDA, 2015). 이는 투수성이 큰 재료로 이루어진 배수층을 표층 하부에 시공하여 지반의 배수성을 개선하고, 모세관현상으로 인한 재염화를 차단하는 방법이다. 처리구에 따른 토양의 제염효과 및 작물 수량을 확인한 결과, 굴 패각 처리구에서 토양의 제염효과가 가장 컸으며, 작물 (옥수수, *Zea mays*) 수량도 가장 많이 나타나 간척지 배수재로서 굴 패각의 적용성을 확인하였다. 이에 따라 간척지의 배수 성능 개선, 재염화 억제 및 제염을 통한 간척지의 범용성 제고, 굴 패각의 대량 재활용을 통한 환경적 이익 창출 효과가 발생할 것으로 판단된다.

그러나 굴 패각을 간척지 배수 재료로 이용할 경우 쇄석 이용 시보다 먼 운송거리로 인한 운송수단의 환경오염물질 배출이 증가하게 된다. 굴 패각 등의 폐기물이 재활용성을 갖기 위해서는 기존 재료를 이용할 때보다 오염물질 배출이 절감되어 환경적 우위를 가져야 하므로 굴 패각의 간척지 배수재 재활용의 실용화에 앞서, 객관적인 환경성 평가가 선행되어야 한다.

최근 전과정 평가 (Life cycle assessment, LCA) 기법을 이용한 환경성 평가가 다양한 제품에 대하여 실시되고 있으며, 폐각류 재활용과 관련된 사례는 다음과 같다. 전과정 평가를 적용하여 폐각류의 잔류 부산물 관리방안을 제시하거나 (Iribarren et al., 2010), 굴 패각을 탄산칼슘 (CaCO<sub>3</sub>) 원료로 활용하는 방안에 대하여 환경성을 평가한 사례 등이 있다 (Alvarenga et al., 2012; Kwon et al., 2004; Park, 2014). 그러나 굴 패각을 건설재료로 재활용하는 경우에 대한 환경성 평가, 시공 단계를 포함한 전과정 평가 기법을 적용한 사례가 전무한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 전과정 평가 기법을 이용하여 파쇄 굴 패각을 간척지 배수 재료로 재활용하는 방안에 대한 환경성 평가를 실시하였다. 첫째로, 굴 패각과 쇄석을 간척지 배수재로 이용하는 경우 각각에 대한 이산화탄소 배출량의 산정 및 비교를 실시하였으며, 이를 통하여 굴 패각의 간척지 배수재 재활용의 환경적 효과를 분석하였다. 둘째로, 굴 패각의

국내 주요 발생원으로부터 현장까지의 최대 운송거리를 산출하여 국내 간척지 현장의 위치에 따른 적용성을 평가하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 전과정 평가 (LCA)

폐자원 재활용에 대한 환경성 평가를 위한 기존 방법으로 폐자원 자체, 또는 용출액의 성분 분석 등을 통한 환경 기준 적합 여부 평가를 수행하였으나, 최근 많은 분야에서 전과정 평가 기법을 통한 오염물질 배출량 분석을 실시하고 있다. 전과정 평가 방법은 재료의 발생으로부터 가공, 수송, 시공 등 모든 공정에 걸쳐 배출되는 물질을 정량화하여 환경 영향을 평가하는 방법으로, 주관성의 개입을 배제하고 자원 재활용의 직간접적 환경 영향을 종합, 정량적으로 평가할 수 있다는 특징이 있다 (Noh, 2014).

1997년 국제 표준화기구 (International Organization for Standardization, ISO)는 전과정 평가를 표준화하여 ISO 14040을 제정하였으며, 2006년에는 ISO 14040의 개정과 함께 ISO 14044의 제정이 이루어졌다. ISO 14040은 전과정 평가의 원리와 구조에 관하여, ISO 14044에서는 올바른 전과정 평가를 위한 요건, 가이드라인을 제공하고 있다. 일반적으로 전과정 평가는 상기 기준에 따라 목적 정의 및 범위 설정, 전과정 목록 분석, 영향 평가, 결과 해석의 총 4단계로 실시되며, Fig. 1은 ISO 14040에서 제시한 전과정 평가의 절차 및 결과의 적용에 대한 도표에 단계별 ISO 표준을 추가하여 재구성한 것이다.

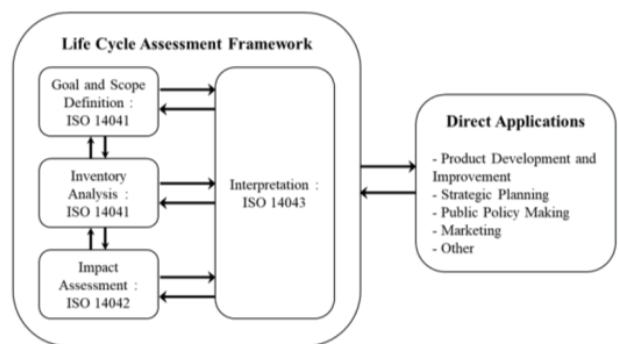


Fig. 1 Phase and applications of LCA (ISO 14040 : 2006(E))

### 2. 목적 정의 및 범위 설정

전과정 평가의 첫 단계인 ‘목적 정의 및 범위 설정’에서는 전과정 평가의 목적을 정의하고, 이에 따른 평가 대상과 고려할 공정 범위, 방법을 결정한다. 또한, 이 단계에서는 평가에

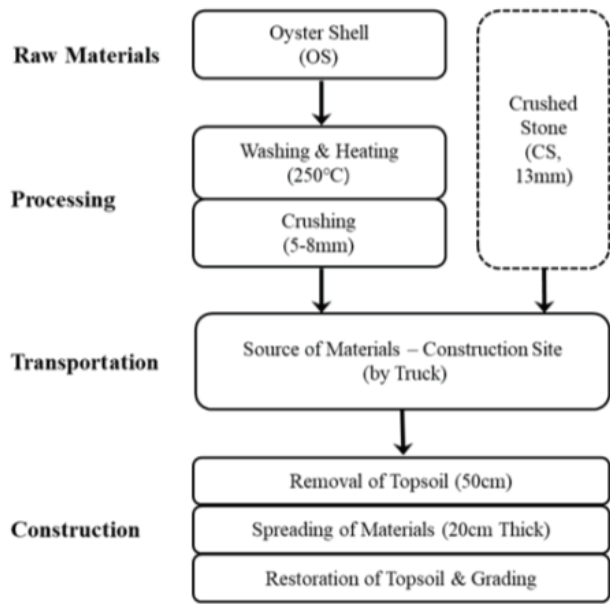


Fig. 2 The system boundary of process in this study (OS, CS)

필요한 가정, 경제조건, 제한사항 등을 선정하게 된다.

본 연구에서 전과정 평가를 실시하는 목적은 굴 폐각과 쇄석을 각각 간척지 배수재료로 이용하는 경우에 대하여 환경부하량을 산정하여 비교, 분석하기 위함이다. 상기 목적을 달성하기 위해서는 재료의 획득으로부터 가공, 운송, 시공, 유지 보수 및 해체 단계까지의 전생애주기를 모두 고려하는 것이 이상적이나, 아직 해당 공법에 대한 기초연구가 충분하지 않아 시공 단계의 세부공정이나 사용 연한이 확립되지 못한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 평가 범위를 재료의 획득 및 가공, 운송, 시공 단계로 한정하고, 다양한 오염물질 중에서 기후협약, 탄소거래 등의 실시로 세계적 관심도가 높으며 데이터베이스 획득이 비교적 용이한 CO<sub>2</sub> 를 배출량 평가 대상 물질로 선정하였다. Fig. 2는 본 연구에 적용된 재료별 공정을 간략히 도시한 것이다.

굴 폐각 초기 상태는 굴 수하 과정에서 사용한 코팅사를 인력으로 제거하고, 야적장에 방치된 상태로 설정하였다. 이는 굴 폐각 재활용을 위한 코팅사 등 이물질 제거의 자동화 기술 연구가 진행되어 실용화 단계 직전에 있으나 아직까지 대부분 인력에 의존하고 있는 상황을 고려하였다. 굴 폐각은 이후 유기물, 염분 등의 이물질 제거를 위하여 세척, 열처리되며, 이후 소요 입경에 따라 파쇄, 현장으로 운송된다. 본 연구에서 굴 폐각의 열처리온도는 MOF (2007)를 참고하여 염분 및 이물질 제거 목적에 맞게 250 °C로 설정하였다.

재료의 파쇄 입경 및 시공 단계 세부 공정은 앞에서 소개한 NICS (2015)의 시험포장 시공 사례에 따라 결정하였다. 파쇄 굴 폐각의 단위중량은 관련 연구 사례 (Yoon et al., 2001)를

Table 1 Assumed conditions at processing, construction phase

	OS	CS
Construction equipments by sequences	Removal of topsoil : 10t Bulldozer-caterpillar	
	Spreading of materials : 0.2m <sup>3</sup> Backhoe-caterpillar	
	Restoration of topsoil : 10t Bulldozer-caterpillar	
Thickness of spreading (cm)	20	
Crushing size (mm)	5-8	13
Unit weight (t/m <sup>3</sup> )	0,9	1,7
Unit weight for construction (1 unit, t/m <sup>2</sup> )	0,18	0,34

참고, 입경 범위를 고려하여 0.9 t/m<sup>3</sup>로 결정하였으며, 쇄석 단위중량은 시중 골재 규격 및 표준 품셈의 자갈 건조단위중량을 참고하여 1.7t/m<sup>3</sup>로 결정하였다.

시공 각 단계에서 현장 규모나 상황에 따라 이용되는 장비의 종류가 변화하게 되므로 본 연구에서는 간척지 배수층 시공 목적이 발작물 재배 등 필지 단위의 농업목적임을 고려하여 0.5 ha (50 m×100 m)의 소규모 현장을 가정하였다. 또한, 국내 간척지의 열악한 인근 포장 현황과 접근성을 고려하여 소형 장비인 0.2 m<sup>3</sup> Backhoe-caterpillar (무한궤도식 백호)와 10톤 Bulldozer-caterpillar (무한궤도식 도저)를 시공 장비로 선정하였다. Table 1은 가공, 시공 공정에서의 가정 사항 및 시공 조건, 각 재료의 단위면적당 시공량 (t/m<sup>2</sup>, 1 unit) 산정 과정을 정리한 것이다.

산림청(Korea Forest Service, KFS)의 2006년 연구보고서에 따르면, 쇄석의 운송거리와 관련하여 행정기관 및 채석업체 종사자 104명에 대하여 설문을 실시한 결과 경제성을 고려한 쇄석 골재의 최장 운송 반경을 현장으로부터 약 40 km 이내로 제시한 바 있다 (KFS, 2006). 본 연구에서는 이를 참고하여 쇄석 운송거리를 40 km 이내로 설정하고, 해당 범위 내에서 쇄석과 굴 폐각의 운송거리에 따른 환경성 분석을 실시하였다.

한편, 국내 간척지 현장 적용성 평가를 위하여 굴 폐각 야적장 및 간척지 현장 위치를 선정하였다. 굴 폐각 발생원(야적장)은 굴 생산지 전역에 고루 분포하여 위치를 특정하기 어려우므로 생산량을 고려하여 경남 통영시 용남면 “굴 수하식 수협 본소 (Oyster NFFC HQ, Tongyeong)”, 전남 여수시 교동 “굴 수하식 수협 여수지소 (Oyster NFFC, Yeosu)”를 기준으로 다음 Fig. 3과 같이 설정하였으며, 거제 일대는 통영과 인접하므로 제외하였다. 국내 간척지 위치 및 면적은 RDA (2012) 자료를 기준으로, Fig. 4와 같이 주요 17개 지구에 대하여 총 101,312 ha를 적용하였다.

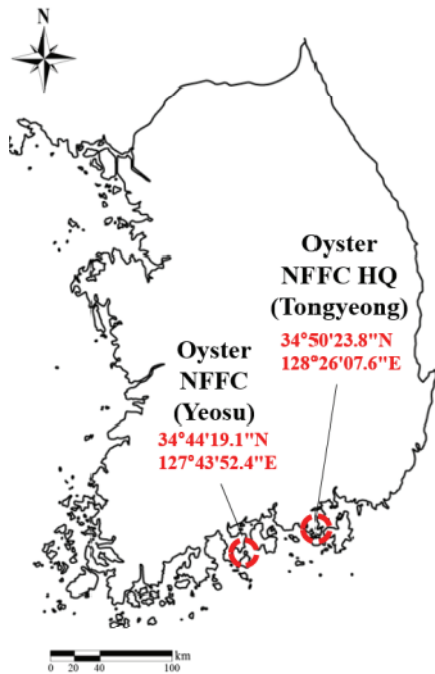


Fig. 3 Locations of the selected sources of oyster shells

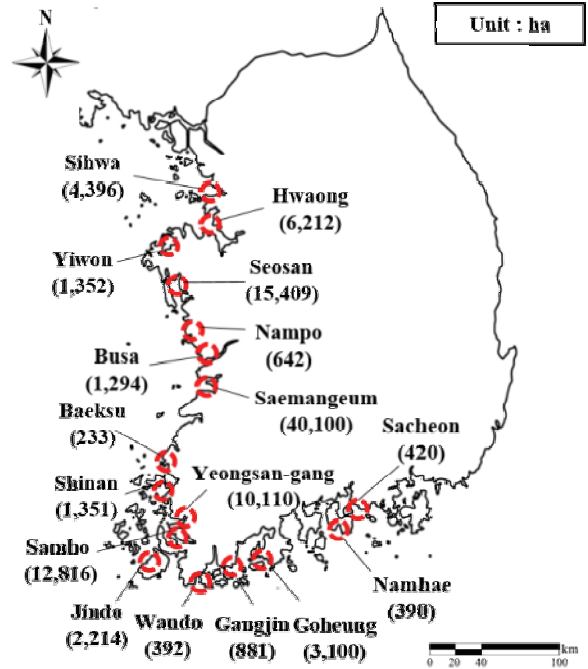


Fig. 4 Locations and area of the selected reclaimed lands

### 3. 전과정 목록 (LCI) 분석

전과정 목록 (Life Cycle Inventory) 분석 단계에서는 평가 대상 시스템 내에서 공정에 따른 투입물량 및 배출물량을 목록화하여 정량적 분석을 실시하게 된다. 본 연구에서는 공정에 따라 분류된 세부 전과정 목록의 CO<sub>2</sub> 배출량을 합산하는 방법인 개별적산법 (Process Analysis)을 이용하여 배출량 분석을 수행하였으며, 이를 식으로 나타내면 다음 식 (1)과 같다.

$$CO_2 \text{ Emissions} = E_A + E_B + E_C \quad (1)$$

위 식 (1)에서,

$E_A$  : 획득 및 가공 단계에서의 CO<sub>2</sub> 배출량 (kgCO<sub>2</sub>/unit)

$E_B$  : 운송 단계에서의 CO<sub>2</sub> 배출량 (kgCO<sub>2</sub>/unit)

$E_C$  : 시공 단계에서의 CO<sub>2</sub> 배출량 (kgCO<sub>2</sub>/unit) 이다.

굴 패각의 획득 및 가공 단계에서는 선행연구로부터 열처리 및 파쇄 공정의 전력 사용량을 이용하였다. 열처리 공정에서는 Kwon et al. (2004)의 연간 전기 사용량을 이용하되, 상기 사례에서는 탄산칼슘의 정제를 위하여 굴 패각 가열온도가 750 °C로 설정되었으므로 이를 250 °C 가열 시 열량으로 환산하여 이용하였다. 파쇄 공정에서는 캐나다의 수산해양부 (Fisheries and Oceans Canada, DFO)의 연구보고서를 참고하여 연간 전기요금 및 kWh 당 단가, 연간 처리량을 토대로 톤

당 전력 사용량을 계산하였으며, 본 연구에 적용된 굴 패각 입경 (5-8 mm)을 고려하여 문헌의 3가지 파쇄 장비 중에서 해당 입경 회수율이 우수하고 전력사용량이 적은 것으로 나타난 Double Shear Shredder를 선정하였다 (DFO, 2014). 산출된 톤당 전력사용량은 한국전력거래소의 전력부문 사용단 국가간접배출계수 (2011)인 0.459 tCO<sub>2</sub>/MWh를 이용하여 탄소 배출량으로 환산하였다. 한편, 세척 공정에서는 수돗물을 이용함에 따른 이산화탄소 배출이 없는 것으로 간주하여 전과정 목록에서 생략하였다. 쇄석의 생산으로 인한 CO<sub>2</sub> 배출량은 국내 최근 자료의 부재로 인하여 영국 Mineral Products Association (MPA)의 2016년 배출계수 3.8 kgCO<sub>2</sub>/t를 이용하였다 (MPA, 2017).

운송단계에서는 운송수단 (덤프트럭)의 규격이나 운행속도가 재료의 필요량, 공급 업체 및 현장에 따라 다양하며, 이에 따라 운송 공정의 CO<sub>2</sub> 배출량이 변화하게 된다. 본 연구에서는 이를 반영하기 위하여 다양한 차량의 평균 규격과 운행속도를 고려한 환경부 (Ministry of Environment, ME)의 “국가 LCI DB - 통합 공로수송” (ME, 2008)의 배출계수 0.249 kgCO<sub>2</sub>/km·t 을 이용하였다.

시공단계에서 이용되는 건설 장비 2종의 CO<sub>2</sub> 배출량은 Noh (2014)가 산정한 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량을 장비의 규격에 맞게 적용하여 시공단계의 총 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다. 상기 과정은 한국건설기술연구원(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, KICT)의 건설공사 표준

**Table 2** Information on the use of data

Process		CO <sub>2</sub> Emissions (unit)	Source
OS Processing	Heating (250°C)	0,278 (kgCO <sub>2</sub> /t)	Kwon et al. (2004)
	Crushing (5–8mm)	1,506 (kgCO <sub>2</sub> /t)	DFO (2011)
Production of CS		3,8 (kgCO <sub>2</sub> /t)	MPA (2017)
Transportation (truck)		0,249 (kgCO <sub>2</sub> /t)	ME (2008)
Construction	10t Bulldozer–caterpillar	39.88 (kgCO <sub>2</sub> /hr)	Noh (2014)
	0.2m <sup>3</sup> Backhoe–caterpillar	16.64 (kgCO <sub>2</sub> /hr)	

품셈 (KICT, 2018)을 참고하여 단위 면적당 시공량에 따른 작업 시간을 계산하고, 장비 규격에 따른 시간당 배출량을 곱하여 시공단계별 배출량을 산정한 후 적산하는 방식으로 수행하였다. 다음 Table 2는 배출량 산정을 위하여 이용된 자료의 이용 단계, 출처, 그 값을 정리한 것이다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산정

본 연구에서 산정한 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량을 재료별 1 unit (굴 패각 0.18 t, 쇠석 0.34 t)에 대하여 적용하여 정리하면 다음 Table 3과 같다.

굴 패각의 획득 및 가공에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 쇠석 배수재를 동일 부피만큼 생산 할 시와 비교하여 약 77.0 %의 CO<sub>2</sub> 배출 절감 효과가 있는 것으로 산정되었다.

운송단계에서는 배출계수가 0.249 kgCO<sub>2</sub>/km · t로 적용되었으며, 굴 패각과 쇠석의 단위중량 차이로 인하여 단위 면적당 시공 중량이 상이하므로, 이에 따라 운송거리 1 km 당 약 47.0 %의 배출량 절감효과를 나타냈다. 해당 단계에서, 재료

별로 다른 운송거리를 적용하여야 하므로 별도로 운송거리별 환경성 평가를 실시하여 후술하였다.

표토 제거, 재매립 및 정지 시에는 시공 재료와 관계없이 동일 부피의 현장 토공사이므로 동일한 CO<sub>2</sub> 배출량을 나타내었다. 포설 단계에서는 굴 패각 이용 시 약 63.3 %의 절감효과를 나타내었으며, 이는 재료의 성질에 따라 단위 면적 시공에 따른 작업시간이 서로 다르게 산출되기 때문이다. 그러나 시공 단계 전체에서 CO<sub>2</sub> 배출량 절감효과는 약 6.5% 수준으로 나타났는데, 이는 전체 시공 공정에서 포설 단계의 비중이 굴 패각 이용 시 약 4.0 %, 쇠석 이용 시 약 10.2 %로 크지 않기 때문이다.

#### 2. 운송거리에 따른 굴 패각 배수재의 환경성 평가

Fig. 5는 재료별 운송거리에 따른 1unit 당 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량을 도시한 것이다.

운송거리에 따른 재료별 총 CO<sub>2</sub> 배출량 관계는 다음 식 (2), (3)로 표시되며, 이를 통하여 재료별 중량 및 운송거리를 고려한 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정할 수 있다.

**Table 3** Life cycle CO<sub>2</sub> emissions of OS and CS

Materials	Process		CO <sub>2</sub> Emissions (kgCO <sub>2</sub> /unit)	Source
OS	Processing	Heating (250°C)	0.050	Kwon et al. (2004)
		Crushing (5–8mm)	0.271	DFO (2011)
	Transportation (per km)		0.045	ME (2008)
	Construction	Removal of Topsoil	1,287	KICT (2018) Noh (2014)
		Spreading	0.103	
		Restoration, Grading	1,164	
CS	Processing	Production	1,292	MPA (2017)
	Transportation (per km)		0.085	ME (2008)
	Construction	Removal of Topsoil	1,287	KICT (2018) Noh (2014)
		Spreading	0.280	
		Restoration, Grading	1,164	

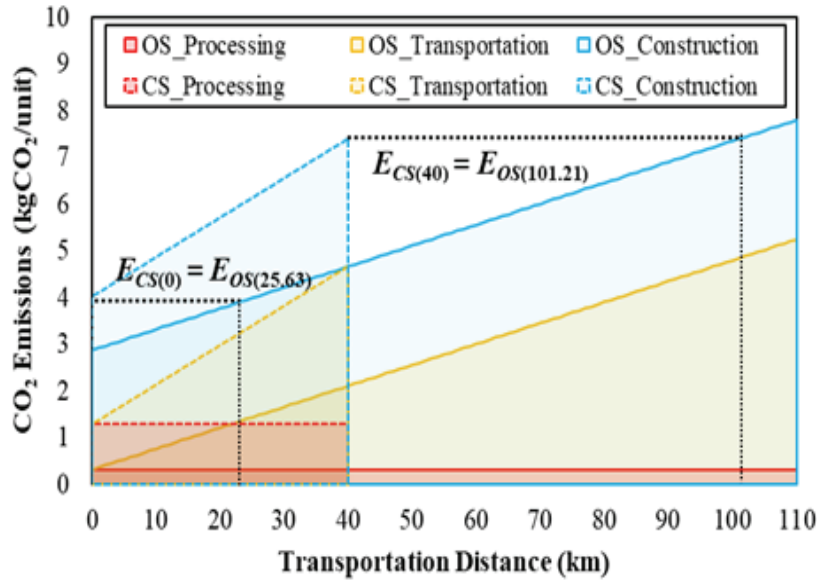


Fig. 5 CO<sub>2</sub> emissions of OS, CS by changing of transportation distance

$$E_{OS} = (0.0448D_{OS} + 2.875) \times \frac{W_{OS}}{0.18} \quad (2)$$

$$E_{CS} = (0.0847D_{CS} + 4.023) \times \frac{W_{CS}}{0.34} \quad (3)$$

위 식 (2), (3)에서,

$E_{OS}$  : 굴 패각 배수재의 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 (kgCO<sub>2</sub>)

$E_{CS}$  : 쇄석 배수재의 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 (kgCO<sub>2</sub>)

$D_{OS}$  : 굴 패각 배수재 운송거리 (km)

$D_{CS}$  : 쇄석 배수재 운송거리 (km)

$W_{OS}$  : 굴 패각 배수재의 중량 (ton)

$W_{CS}$  : 쇄석 배수재의 중량 (ton) 이다.

굴 패각 배수재가 쇄석 배수재와 비교하여 환경적 우위를 갖는 최대 운송거리를 산정하기 위하여, 각 재료의 중량을 1 unit로 통일하고  $E_{OS} = E_{CS}$  조건에서 연립하면 다음과 같은 식 (4)을 얻을 수 있다.

$$D_{OS(max)} = 1.8897D_{CS} + 25.625 \quad (4)$$

위 식 (4)에서,

$D_{OS(max)}$  = 굴 패각 배수재의 최대 운송거리 (km)

$D_{CS}$  = 쇄석 배수재 운송거리 (km) 이다.

이를 그래프로 도시하면 다음 Fig. 6과 같다.

Fig. 6으로부터, 굴 패각 배수재는 쇄석 배수재의 운송거리와 관계없이 굴 패각 발생원으로부터 약 26 km 이내 (A영역)에서, 쇄석 배수재의 운송거리에 따라 굴 패각 발생원로부터 최대 약 101 km 이내 (B영역)의 범위에서 쇄석 배수재에

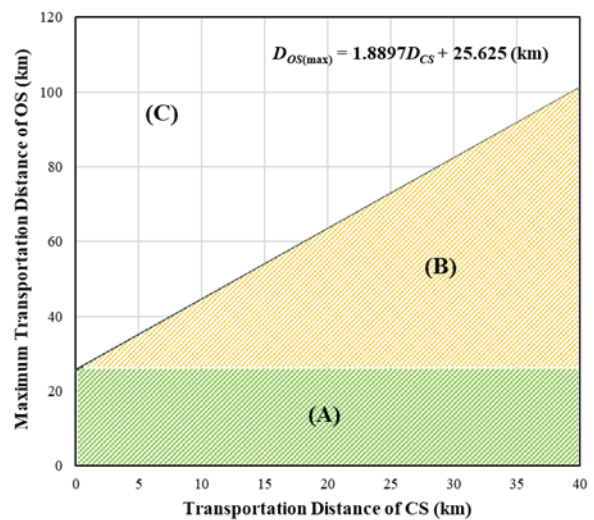


Fig. 6 Maximum transportation distance of OS by transportation distance of CS

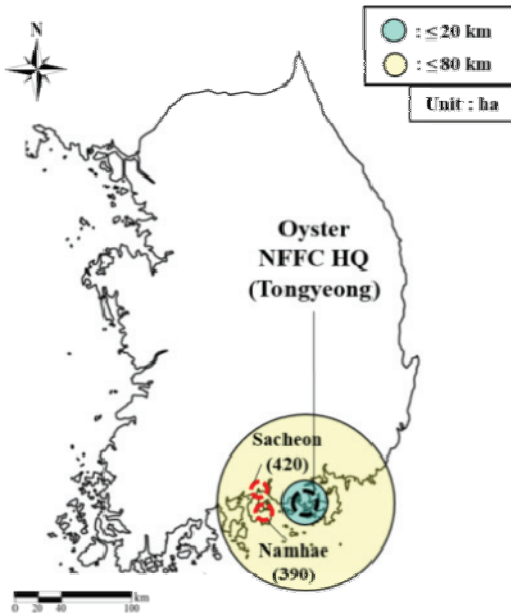


Fig. 7 Applicability of OS drainage material to Korean reclaimed land (from Tongyeong)

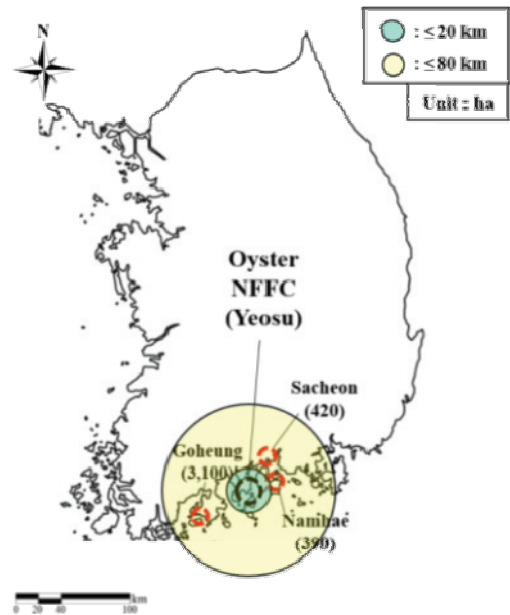


Fig. 8 Applicability of OS drainage Material to Korean reclaimed land (from Yeosu)

비하여 환경성 우위를 갖는 것으로 나타났다.

즉, 쇄석 배수재를 공급할 채석장이 현장으로부터 40 km 거리에 위치하고, 약 101 km 이내에 굴 폐각 야적장이 위치하고 있다면 쇄석보다 굴 폐각을 이용하는 것이 더 적은 CO<sub>2</sub> 배출량을 나타내며, 채석장이 매우 근거리에서 위치하여 운반 거리를 최소화할 수 있는 경우에도 굴 폐각 야적장이 약 26 km 이내에 있는 경우 굴 폐각을 이용하는 것이 환경성 측면에서 유리함을 의미한다.

### 3. 굴 폐각 배수재의 국내 간척지 적용성 평가

대체 재료(쇄석)의 운송거리에 따른 굴 폐각 배수재의 운송 범위를 굴 주요 생산지(통영, 여수)에 각각 적용하여 간척지 적용성을 평가하였다.

Kim et al. (2013)에 따르면, 도로거리와 직선거리의 비로 정의되는 우회계수(Circuitry Factor)는 국내에서 평균 1.26으로 나타나며 이를 앞에서 구한 직선거리 범위인 약 26-101 km에 적용하여 환산하면 20.3-80.3 km가 된다. Fig. 7, 8은 이를 실제 운송거리로 적용하여 통영, 여수를 기준으로 각각 지도에 나타낸 것이다.

통영에서 발생하는 굴 폐각은 대체재 운송거리가 40 km까지 증가하는 경우 사천, 남해 간척지(약 810 ha)에서 배출량 감소효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 전체 대상 면적 101,312 ha의 약 0.8 %를 차지한다. 이와 같이 통영의 굴 폐각을 간척지 배수재로 재활용하는 경우 국내 적용성이 다소 한

정적인 것으로 나타났으며, 그 이유는 국내 간척지가 서남해안에 주로 분포하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 굴 폐각 발생원이 여수인 경우 전체 대상 간척지 면적의 최대 약 3.9 %에 해당하는 3 개 지구(약 3,910 ha)에서 굴 폐각 배수재가 쇄석 배수재보다 CO<sub>2</sub> 배출량 측면에서 유리하여 굴 폐각을 적용할 수 있는 것으로 나타났다.

연간 국내에서 배출되는 굴 폐각(연간 20만 톤)으로 시공할 수 있는 간척지 면적은 약 110 ha이며 (ha 당 시공량 1,800 톤), 앞에서 산정한 굴 폐각 재활용 가능 면적은 이를 크게 상회하여 굴 폐각의 대량 재활용이 가능할 것으로 판단된다.

한편, 배수층 시공은 간척지의 이용 목적에 따라 시공 필요성 여부가 결정되므로 실제 시공 가능한 면적은 본 연구에서 산정된 것보다 다소 적을 것으로 예측된다. 그러나 서론에서 기술한 바와 같이 국내 간척지의 약 80 % 이상이 논으로 이용되고 있음을 고려할 때, 굴 폐각 배수재의 국내 간척지 적용성은 충분한 것으로 판단된다. 이를 통하여 굴 폐각 폐기물의 대량처리효과, 간척지의 배수 개선을 통한 활용성 증대 효과를 거둘 수 있을 것으로 기대된다.

### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 파쇄 굴 폐각의 투수성을 이용한 대량 재활용 방안으로, 간척지 배수재로 이용 시의 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하고, 대체 재료인 쇄석을 이용하여 시공하였을 때의

CO<sub>2</sub> 배출량과 비교하여 굴 폐각 생산지에 따른 국내 간척지 적용성을 평가하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산정 결과, 동일 부피 쇄석 배수재의 생산, 운송, 시공 시와 비교하여 굴 폐각의 획득 및 가공 공정에서는 약 77.0%, 운송단계에서는 동일 거리에 대하여 약 47.0 %, 시공 공정에서는 약 6.5 %의 CO<sub>2</sub> 배출 절감 효과가 있는 것으로 산정되었다.
2. 쇄석 배수재와 비교하여 환경적 우위를 갖는 굴 폐각의 최대 운송거리는 쇄석의 운송거리에 따라 변화하였다. 굴 폐각 발생원으로부터 약 26 km 이내에 현장이 위치하는 경우 쇄석 운송거리와 관계없이 굴 폐각 배수재가 쇄석 배수재보다 적은 CO<sub>2</sub> 배출량을 나타냈다. 또한, 쇄석의 운송거리가 최대 40 km까지 증가하게 되면 굴 폐각 배수재의 운송거리가 현장으로부터 약 101 km 이내인 경우 쇄석 배수재보다 CO<sub>2</sub> 배출량 측면에서 유리한 것으로 나타났다.
3. CO<sub>2</sub> 배출량 측면에서 굴 폐각의 국내 간척지 적용성을 평가한 결과 통영의 굴 폐각은 최대 810 ha 가량, 여수의 굴 폐각은 최대 3,910 ha 가량의 간척지에 이용할 경우 쇄석보다 환경성 우위가 있는 것으로 나타났다. 이는 전국의 연간 굴 폐각 배출량으로 시공할 수 있는 면적인 110 ha를 크게 상회하는 수치로, 굴 폐각 간척지 배수재의 국내 적용성이 충분한 것으로 판단된다.
4. 본 연구의 결과는 0.5 ha 내외의 소규모 현장에 대한 CO<sub>2</sub> 배출량을 토대로 하며, 향후 간척지 배수층 시공 사례가 충분히 축적되고, 시공 기준이 확립될 시 표준 공정에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량 산출, 더욱 정확한 환경 영향 평가가 가능할 것으로 사료된다. 또한, 간척지 토양에 굴 폐각 배수층 시공 시 토양의 pH가 다소 상승할 수 있으므로 현장에 따라 이를 고려하여야 할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서는 공법의 경제성이 고려되지 않았으므로 종합적인 적용성 평가를 위해서는 경제성 평가 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2016년도 농림축산식품부 농생명산업기술개발 사업 (114147-3) 및 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2017R1A2B4009461).

## REFERENCES

1. Alvarenga, R. A. F., et al., 2012. The recycling of oyster shells: An environmental analysis using Life Cycle Assessment. *Journal of environmental management* 106: 102-109. doi:10.1016/j.jenvman.2012.04.017.
2. Ez-Zaki, H., et al., 2016. Composite cement mortars based on marine sediments and oyster shell powder. *Materiales de construcción* 66(321): 080. doi:10.3989/mc.2016.01915.
3. Fisheries and Oceans Canada, 2014. Introduction of commercial shell crushing technology to the BC oyster aquaculture industry - final report. British Columbia, Canada: Fisheries and Oceans Canada.
4. Iribarren, D., et al., 2010. Implementing by-product management into the Life Cycle Assessment of the mussel sector. *Resources, Conservation and Recycling* 54(12): 1219-1230. doi:10.1016/j.resconrec.2010.03.017.
5. International Organization for Standardization, 2006a. Environmental management, life cycle assessment, principles and framework, Geneva: International Organization for Standardization. ISO 14040 : 2006(E).
6. International Organization for Standardization, 2006b. Environmental management, life cycle assessment, requirement and guidelines, Geneva: International Organization for Standardization. ISO 14044 : 2006(E).
7. Kim, H. T., et al., 2015. Theoretical analysis of soil desalination characteristics for underdrain system at reclaimed tidal land. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(3): 87-92 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2015.57.3.087.
8. Kim. T., et al., 2013. Calculation of regional circuitry factors using road network distance in South Korea. *Journal of Korea Planners Association* 48(4): 319-329 (in Korean).
9. Korea Forest Service, 2006. A Study on the improvement plan of quarry permission and restoration systems. Korea Forest Conservation Association (in Korean).
10. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 2018. 2018 Standard of construction estimate, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, 208-214 (in Korean).
11. Koo, H. S., 2008. An experimental study on the strength and behavior of reinforced concrete columns containing shells substituted a fine aggregate. *Journal of Korea Institute of Ecological Architecture and Environment* 8(3):



- 69-76 (in Korean).
12. Kwon, H. B., et al., 2004. Recycling waste oyster shells for eutrophication control. *Resources, Conservation and Recycling* 41(1): 75-82. doi:10.1016/j.resconrec.2003.08.005.
  13. Lee, K. H., and J. O. 2001. consolidation and permeability characteristic of sludge mixed with oyster shells. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers C* 21(4C): 375-384 (in Korean).
  14. Lee, S. C., et al., 2007. An experimental study on the structural characteristics of reinforced concrete beams containing oyster shells. *Journal of Korea Institute of Ecological Architecture and Environment* 7(5): 135-142 (in Korean).
  15. Ministry of Environment, 2008. Korea LCI DB Transportation (Roads): Truck.
  16. Mikami, K., and T. Okumura, 2007. Underwater soil improvement for port facilities by compaction piles of oyster shell-sand mixture. In *Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, Symposium on IEEE*, 2007. 66-75. doi:10.1109/UT.2007.370837.
  17. Ministry of Oceans and Fisheries, 2007. Development of the system for eliminating undesirable matters from oyster shell. Gyeongsang National University, Jinju, Korea. 80-81.
  18. Ministry of Oceans and Fisheries, 2017. Statistical yearbook of Oceans & Fisheries. pp. 212, 222 (in Korean).
  19. Mineral Products Association, 2017. Summary sustainable development data 2017. London, United Kingdom.
  20. National Institute of Crop Science, 2013. Look into the reclaimed tidal land soils. p 102 (in Korean).
  21. National Institute of Crop Science, 2015. Development of optimum desalinization technology for upland crop cultivating in reclaimed land. Rural Development Administration (in Korean).
  22. Noh, S. K., 2014. Recyclability of bottom ash and dredged soil mixture based on physical characteristics and Life Cycle CO<sub>2</sub> emissions. Ph.D. diss., Seoul, Korea.: Seoul National University (in Korean).
  23. Park, S. C., 2014. A study on the manufacture of precipitated calcium carbonate and estimation of greenhouse gas emissions using oyster shell recycling. Ph.D. diss., Asan, Korea.: Hoseo University (in Korean).
  24. Rural Development Administration, 2012. The third new continent, reclaimed land - agricultural value of the reclaimed land. *RDA Interrobang* 71: 5-6 (in Korean).
  25. Son, J. G., et al., 2009. Effect of Inorganic Cementing Agents on Soil Aggregate Formation in Reclaimed Tidelands. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(4): 43-47 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2009.51.4.043.
  26. Son, Y. J., et al., 2003. The undrained shear strength characteristics of mixed soil with oyster shells. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 19(6): 7-14 (in Korean).
  27. Sung, C. Y., and Y. I. Kim, 2010. Strength and durability properties of polymer concrete utilizing oyster shell powder as a filler. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(6): 125-134 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2010.52.6.125.
  28. Yoon, G. L., et al., 2001. Engineering characteristics of waste oyster shell for recycling. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers C* 21(4C): 421-431 (in Korean).
  29. Yoon, H. S., and T. S. Yang, 2004. Mechanical characteristics of crushed oyster shell. *Journal of Korean Society of Urban Environment* 4(2): 39-45 (in Korean).