

한국 연안 양식패류 패각 재활용을 통한 탄소수지 추정 (리뷰)

박영철*[†] · 유재원** · 최근형*** · 이창근**** · 김혜정*****

*^{(주)뉴워터텍}

**한국연안환경생태연구소(주)

***전남대학교

****(주)세광종합기술단

*****한국어촌어항공단 어장양식본부

Estimation of Carbon Flux caused by the shell re-treatment at coastal shellfish aquaculture fields in Korea (Review)

Young Cheol Park*[†] · Jae Won Yoo** · Keun-Hyung Choi*** ·

Chang-Gun Lee**** · Hyejeong Kim*****

*New Water Tec Co. Ltd., Incheon, Korea

**Korea Institute of Coastal Ecology Inc., Bucheon, Gyeonggi-do, Korea

***Chungnam National University, Daejeonsi, Korea

****Sekwang Engineering Consultants Co., Ltd., Seoul, Korea

*****Korea Fisheries Infrastructure Public Agency Seoul, Korea

(Received : 23 September 2022, Revised : 5 December 2022, Accepted : 5 December 2022)

요약

연안의 양식 어장에서 식량자원으로 주로 생산되는 양식 패류는 성장에 따라 탄소가 저장된 패각을 형성한다. 수확된 패류를 식량자원으로 사용하고 남겨지게 되는 패각 부분을 탄소저장기능이 있는 방법으로 재활용할 경우, 탄소수지 개선 효과가 있다는 것이 여러 연구를 통해 보고되었다. 본 연구에서는 해양 패류의 개체 성장에 따른 패각 내 이산화탄소의 생성과 저장에 대한 기작을 분석하였고 자연 패류 및 양식 패류의 생산성 향상을 통하여 일반적으로 얻어지는 탄소수지 추정에 대하여 고찰하였다. 또한 양식 패류 생산의 부산물로 얻어지는 패각의 재활용방안에 대하여 분석하였으며 마지막으로 탄소저장 가능성을 가진 재활용 방법이 활용될 경우에 대한 탄소수지를 추정함으로써 온실가스 감축에 대한 잠재효과를 고찰하였다.

핵심어 : 탄소수지, 온실가스, 패류, 패각재활용, 양식어장

Abstract

Coastal shellfish in the shallow aquaculture waters form carbon contained shells as they grow. The existing researches showed that carbon flux can be improved, if the shells are re-treated by the carbon stored methods. In the present study, firstly, the mechanism and the quantitative flux of carbon dioxide in the shellfish individual have been analyzed. The re-treated methods of the useful by-product in the shellfish aquaculture, shells, have been reviewed. Finally, the potential effects to reduce the greenhouse gas has been suggested, if the shells can be properly re-treated.

Key words : carbon flux, greenhouse gas, shellfish, shell re-treatment, aquaculture field

[†]To whom correspondence should be addressed.
New Water Tec Co. Ltd., Incheon, Korea, CEO.
E-mail: ypark115@naver.com

- Park, Young Cheol New Water Tec Co. Ltd., Incheon, Korea (e-mail: ypark115@naver.com)
- Yoo, Jae Won Korea Institute of Coastal Ecology Inc., Bucheon, Gyeonggi-do, Korea (e-mail: jwyo@coastkorea.com)
- Choi, Keun-Hyung Chungnam National university, Daejeonsi, Korea (e-mail: keunhchoi@cnu.ac.kr)
- Lee, Chang-Gun Korea Fisheries Infrastructure Public Agency Seoul, Korea (e-mail: smilelee88@empas.com)
- Kim, Hyejeong Korea Fisheries Infrastructure Public Agency Seoul, Korea (e-mail: khj@fipa.or.kr)

1. 서 론

기후변화의 원인 해소를 위한 탄소 저감은 이제 전 지구적인 생태계 관리 목표가 되고 있다. IPCC의 2018년 보고서에서도 2050년까지 10억 ha의 숲을 조성하여 지구 평균 기온 1.5°C 상승을 저지할 것을 제안하고 있다. 그러나 가장 일반적인 탄소 저감원으로서 인식되고 있는 산림 조성과 인위적인 탄소 포집 및 매립 또는 저장 기술들도 대규모의 예산이 소요되는 과제들이며 식량 생산을 위한 토지이용, 생물다양성 증진 및 에너지소모의 관점에서 본다면 여러 가지 제한 요인들이 있는 것이 사실이다(Rinne-Garmston et al., 2019; Boysen et al., 2017; Li et al., 2019).

해양 양식 패류 및 일부 미세조류(Coccolithophore algae) 들은 자체 대사 기작에 의해 형성되는 탄산칼슘(CaCO_3) 성분의 폐각이나 체대기관에 탄소를 저장함으로써 대기로부터 이산화탄소를 영구적으로 제거할 수 있는 매우 중요한 근원들로 알려져 있다(Moore, 2020). 따라서 해양 패류 양식생산량을 증가시켜 수거된 폐각을 탄소 저감 효과가 큰 방향으로 재활용하는 일은 연안 생태계의 탄소 저감 능력을 증가시키는 데 도움이 될 뿐만 아니라 식량자원으로 활용되고 남겨지는 폐각 부산물을 환경친화적으로 재활용하는 점에서 학술적으로나 정책적으로 관심이 집중되는 분야이다.

우리나라에서는 패류 생산의 대부분을 차지하는 연안 양식지역 생산성향상을 위해서 국가적 과제의 일환으로 청정어장 재생사업¹⁾을 수행 중에 있는데 주로 연안의 패류 양식 어장을 중심으로 버려진 해양쓰레기들을 제거하고 저질을 개선하는 과업이다. 이 과업의 대상이 되는 연안 양식 어장은 일반적으로 수심이 얇고 해안에서 접근이 용이한 천해 지역에 분포하고 특히 서남해안의 경우에는 패류 양식해역이 대부분을 차지하고 있다. 따라서 연안 양식 어장의 청정재생사업은 패류 양식의 경우, 양식 생산성을 향상시키는 일차적인 목표와 함께 수확된 패류의 폐각을 환경친화적으로 재활용함으로써 탄소 저감이라는 부가적인 이득을 가져올 수 있는 매우 부가가치가 높은 과업이다.

최근 들어 양식 패류의 탄소 저감 효과에 대한 연구들이 진행되고 있으나 아직까지는 폐각의 탄소 고정 기작 및 탄소 저감 가능성에 대한 연구들이 주를 이루고 있으며 구체적인 탄소 저감 효과에 대한 연구는 소수에 불과한 실정이다(Moore, 2020; Filgueira et al. 2019; Jansen & van den Bogaart, 2020; Fodrie et al., 2017). 이들 소수의 연구들 중에 특히 Jansen & van den Bogaart(2020)는 블루카본으로서의 해양 패류에 대한 가능성과 관련된 탄소 수지에 대한 종합적인 고찰을 실시하였으며 아직까지 불명확

한 일반적인 패류 생산성 향상에 따른 정량적인 물질순환 및 탄소 저감 효과 보다는 양식의 산업적인 생산에 따른 부산물로서의 폐각의 역할에 주목하였다. 즉 양식 생산물의 부산물로서 폐기 대상인 폐각은 탄소를 저장할 수 있는 화학소로서 가치가 충분하며 이를 재활용한다면 이산화탄소 저감에 기여할 것이라는 점을 명확히 지적하였다. 이러한 내용은 Filgueira et al.(2019)의 연구에서 이미 언급되었으며 양식 패류의 생산성 향상을 통한 탄소 저감 효과와 관련하여 패류의 대사 기작별로 대한 매우 중요한 고찰을 제공하고 있다.

해양 양식 패류의 폐각은 패류 전체 생체량의 약 50% 이상을 차지하는 중요한 생체 구성요소로서 종에 따라 차이는 있지만 일반적으로 대부분의 탄산칼슘(CaCO_3)과 미량의 단백질 조합성분으로 구성되어 있으며 개체성장과 함께 폐각도 성장하게 된다. 중량을 기준으로 한 연육질과 폐각의 비율은 종에 따라 차이를 보일 수 있으며 탄소 저감 관련 추정량 또한 개체군에 따라 다를 수 있다.

우리나라에서 생산되는 주요 패류들은 연안 양식 어장에서 생산되고 있으며 씨뿌림이나 종묘 방류의 형태로 개방형 양식 방법에 의해 주로 생산된다. 따라서 해양 패류들의 폐각에 저장되고 연안 생태계에서 순환되는 탄소 수지를 고찰함과 함께 양식 생산에 의해 수확되는 패류 및 부산물인 폐각에 저장되는 탄소량을 고려한 탄소 수지의 정량적 고찰은 향후 이러한 부산물을 재활용하거나 양식 패류의 생산성 향상으로 얻어지는 탄소 수지 개선 효과를 추정하는데 핵심적인 정보들을 제공해 줄 것이다. 또한 Moore (2020)가 지적했듯이 양식 패류의 생산성 증가와 부산물인 폐각의 탄소 저감형 재활용은 완전한 의미의 생산적인 탄소 저감형 물질순환에 접근하는 유효한 방법이 될 것으로 사료 된다.

본 연구에서는 양식 패류의 생산성 향상을 통하여 일반적으로 얻어지는 탄소 저감 효과를 고찰하고 함께 양식 패류 생산의 부산물로 얻어지는 폐각의 재활용에 따른 탄소 수지 개선 효과를 기존 연구들에서 도출된 자료들을 기반으로 개략적으로 추정하였다. 또한, 해양 패류의 개체 성장에 따른 폐각 내 이산화탄소의 생성과 저장에 대한 기작을 고찰하고, 양식 패류의 생산성 향상이 가져오는 정량적인 탄소 수지 변화에 대하여 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 해양생태계 패류의 성장과 탄소순환

양식장에서 성장하고 수확되어 수산물로 이용되는 양식 패류와는 달리 천연의 해양생태계 서식처에 존재하는 패류들은 산란 및 재생산, 성장, 가입, 사망 등의 생활사 전 과정이 해양에서 이루어지게 된다. 본 연구에서 언급하고자 하는 해양 패류는 심해에서 서식하는 패류를 제외하고 연안 생태계의 경성 저질이나 연성 성질에서 서식하고 있는

1) 본 연구에서는 영어로 “the Clean Regeneration on Coastal Aquaculture Fields”로 명명

패류에 대한 일반적인 탄소순환 기작이다. 이를 요약하면 다음의 몇가지 주요 기작으로 요약할 수 있다.

2.1.1 석회화(Calcification)

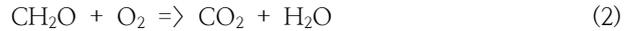
패류의 패각은 패류의 중요 구성요소로서 포식자로부터의 공격을 방어하고 서식처의 환경에 효과적으로 적응하여 서식하기 위한 도구로서도 역할을 한다. 패류의 패각은 기본적으로 탄산칼슘(CaCO₃)으로 구성 되어 있고 패류가 성장함에 따라 함께 형성되고 성장하게 되는데 그 형성 기작을 패류의 석회화 과정(Mistri & Munari, 2012) 이라 한다. 해수에는 다양한 염들이 용해되어 있는데 이들 중에 1개의 칼슘이온(Ca²⁺)과 2개의 중탄산염(HCO₃⁻)이 결합하여 탄산칼슘과 물을 형성시키고 이산화탄소를 해수 중에 배출하게 된다. 따라서 석회화 과정에서는 패각이 형성되지만 이산화탄소가 배출되며 패류 사망 이후 남겨진 패각 중 해수에 노출된 패각은 해수에 용해되어 다시 칼슘이온과 중탄산염으로 돌아가고 해저에 매립되어 보존되는 패각은 탄소 저장원으로 남겨지게 된다(Fig. 1).



2.1.2 호흡(Respiration)

다른 해양동물들처럼 패류도 유기물(탄수화물)을 섭취하고 산소 호흡을 한다. 섭취된 탄수화물과 산소가 결합하면 이산화탄소와 물이 만들어지고 만들어진 이산화탄소는 체외로 배출되게 된다. 호흡의 효율은 종별로 차이가 있으며 같은 종에서도 성숙단계와 수온 등의 영향에 따라 달라질

수 있다(Jansen & van den Bogaart, 2020).



2.1.3 성장 및 대사(Growth and Metabolism)

대부분의 패류들은 여과 식자 (Filter Feeder) 들이며 주로 식물성 플랑크톤을 섭취하지만 종에 따라 소형 동물성 플랑크톤이나 저질 (Detritus) 속의 유기물을 섭취하는 경우도 있다. 홍합은 시간당 5리터의 해수를 여과시키고 굴은 시간당 25리터까지도 여과시키는 것으로 보고된 바 있다 (Jansen & van den Bogaart, 2020). 섭취된 먹이들은 성장과 생명 유지에 사용되며 일부는 배설물을 통해서 배설되어 해저에 묻히거나 박테리아에 의해 분해되고 영양염화 (mineralization)되며 이 영양염화 과정에서도 이산화탄소가 배출된다.

패류의 성장과 대사 기작에서 탄소는 호흡을 통해서 이산화탄소의 형태로 해수 중에 배출되기도 하고 사체나 배설물의 분해 과정에서 이산화탄소의 형태로 해수 중에 배출되기도 한다. 하지만 일부는 배설물에 포함되어 바다속 저질에 매립됨으로써 저장되기도 하기 때문에 이와 관련된 모든 기작들에서 탄소 수지를 정확히 추정하는 것은 매우 어려운 과제이다. 배설물 및 사체 내 유기탄소의 동향은 패류와 관련된 탄소 순환에서 탄소의 수지를 결정하는 매우 중요한 부분의 하나로서 패류의 성장과 대사 기작 동안 해양으로 배출되거나 저장되는 탄소의 양은 패류의 종류에 따라 다르며 서식처의 먹이 조건, 계절 및 서식처의 환경에 따라서도 달라진다(Jansen & van den Bogaart, 2020).

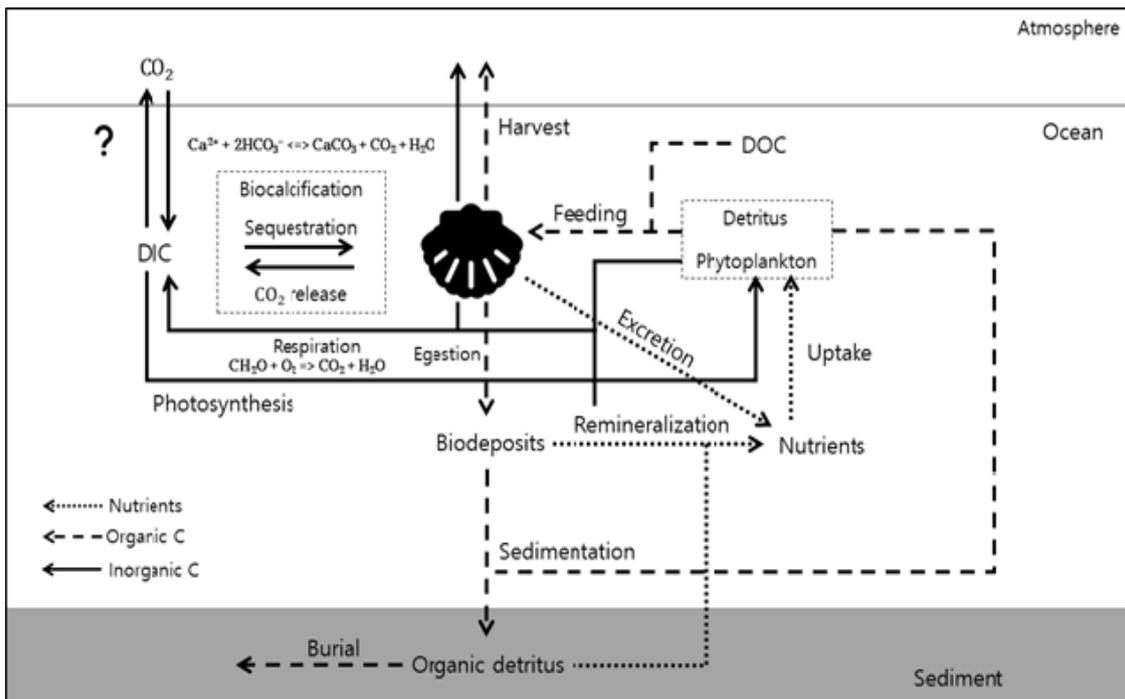


Fig. 1. Carbon cycle related to bivalves in the marine ecosystem (source: modified from Jansen & van den Bogaart, 2020).

2.1.4 패류 관련 탄소 순환

양식 패류의 탄소순환을 도식화 하면 다음의 그림으로 나타낼 수 있으며 여기에서 수확을 제외하면 자연 서식 해양 패류의 탄소 순환이 된다(Fig. 1). 기본적으로 패류는 동물의 기본적인 대사 및 물질 순환에 관여하기 때문에 호흡이 가장 중요한 배출원이 되고 폐각이 형성되는 과정인 석회화 과정 또한 중요한 탄소 배출 과정이다. 이와는 대조적으로 성장의 결과로 축적되는 유기물이나 사망이나 배설 이후 저질에 매립되는 유기물이 중요한 탄소 흡수원이 된다.

2.2 양식 패류의 탄소 수지 추정

자연상태에서 서식하는 해양 패류와 관련된 탄소 기작과 달리 양식 패류의 경우에는 성체로 성장 후에 수확하는 것을 목적으로 인위적으로 서식환경을 조성하기 때문에 수확 이전의 기작에 대해서는 자연상태의 패류와 동일하지만 수확 이후의 패류 개체들과 관련된 탄소 순환에 대하여는 별도로 고려할 필요가 있다. 패류의 생태를 좀 더 확장시켜 생태계 서비스의 관점에서 고찰해 보면 자연상태에서 서식하는 패류와 양식 패류는 확연히 차이가 있는데 가장 중요한 차이는 양식 패류의 경우에는 생태계의 제공서비스 즉 식량 자원으로 직접적으로 사용되는 점이라 할 수 있다. 즉, 양식 패류는 육상에서의 축산과 같이 식량자원의 획득을 목표로 하기 때문에 다른 식량자원을 생산하는 것과 유사한 관점에서 탄소 수지의 의미를 고찰할 필요가 있다. 예를 들어, 같은 양의 식량 단백질을 생산하기 위한 상대적 탄소 수지는 어느 정도인가를 추정하여 비교할 필요가 있으며 필요할 경우 해양 양식 생산물로 단백질을 대체한다면 동일한 생산 단백질량에 대한 탄소 저감효과를 분석하는 것도 중요한 연구과제가 될 수 있다. 즉 전체 식량자원의 관점에서 탄소 수

지 및 탄소 배출량을 추정할 필요가 있는 것이다.

Filgueira et al.(2019)는 보다 정확한 양식 패류의 탄소 수지 추정을 위하여 폐각과 연육부로 나누어 각각의 탄소 수지를 추정하고 이를 종합하여 양식 패류의 탄소 수지량을 결정하는 방법을 사용하여 이전의 일방적인 패류의 탄소 저장 능력만을 추정한 연구들에 비해 진보된 방법론을 제시하였다(Table 1). 본 연구에서는 Filgueira et al.(2019)의 방법을 기반으로 우리나라 양식 패류의 탄소 수지를 추정하였으며 이 추정에서는 우리나라 양식 패류 전체에 대해서 종에 따른 탄소 수지의 차이는 없는 것으로 가정하였고 수확 수거된 패류의 폐각들은 전량 탄소 저감 목적에 맞게 재활용된다는 가정 아래 이루어졌다.

실제 종별로 폐각과 연육부의 비중이 다르기 때문에 탄소 수지는 차이가 나는 것이 일반적이다. 그러나 그 차이는 비교적 크지 않는데 이는 대표적인 패류인 굴류 및 홍합류의 비교에서 관찰할 수 있다. 굴의 경우 폐각이 두꺼우나 연육부의 비중도 높으며 홍합 또한 폐각의 두께가 얇지만 연육부의 중량 또한 작아서 종별로 폐각과 연육부에 함유된 탄소량의 비율 차이가 크게 나지 않는 결과가 보고된 바가 있으며(van der Schatte Olivier et al., 2018) 본 연구에서는 van der Schatte Olivier et al.(2018)에 의해 추정된 패류 7종 폐각과 연육부에 함유된 평균 탄소량 비율을 사용하였다(Table 2).

만약 남획되거나 훼손된 자원 개체군의 경우, 자원군의 복원이 이루어지고 지속가능한 수준까지 어획이 관리된다고 가정한다면, 증가된 생산 증가량 중에서 지속가능한 수준까지의 생체량 증가분에 대하여 연육부에 저장되는 탄소는 지속가능하게 생태계에 존재하게 되며 따라서 이 부분은 수확된 연육부가 식량자원으로 활용된다고 하더라도 여전히 훼손된 상태보다 증가된 탄소량 수준이 생태계에서

Table 1. Estimation factors of carbon flux for bivalves in marine aquaculture (based on Filgueira, 2019)

Factors		Description	Norwegian suspended mari-cultured <i>Mytilus edulis</i> (g C/m ² /yr)
Harvested bivalves	Harvested shell*	stored carbon of harvested shells (+)	273
	bio-calcification	discharged carbon caused by the bio-calcification of harvested shells (-)	-164
	Tissue growth	stored carbon of increased harvested tissues (+)	218
	Shell respiration	it is estimated to be 10% of the total individual ¹⁾ (-)	-106.4
	Tissue respiration	it is estimated to be 90% of the total individual ²⁾ (-)	-957.6
Total bivalves	Burial of excretion	stored carbon of excretion buried under the sediment (+)	737
Deposited bivalves	Sediment burial of tissue	stored carbon of deposited tissues caused by the sediment burial (+)	
	Sediment burial of shell	stored carbon of deposited shells caused by the sediment burial (+)	
Total bivalves	Mineralization of excretion	discharged carbon of excretion mineralized (-)	-177
Deposited bivalves	Mineralization of tissue	discharged carbon of deposited tissues caused by the mineralization (-)	
	Mineralization of shell	discharged carbon of deposited shells caused by the mineralization (-)	
Total carbon flux			-177

*Harvested shells are assumed to be re-used for carbon storage

Table 2. Comparison of chemical composition of shellfish (C: carbon; N: nitrogen; P: phosphate (% dry weight)). Adash indicates no value presented (van der SchatteOliver et al., 2020)

Species	Tissue			Shell			Reference
	C	N	P	C	N	P	
Oysters							
<i>Crassostrea gigas</i>	-	8.4	-	-	-	-	Ren et al. (2003)
<i>Crassostrea gigas</i>	44.90	8.19	-	11.52	0.12	-	Zhou et al. (2002)
<i>Crassostrea gigas</i>	-	7.4	-	-	-	-	Linehan et al. (1999)
<i>Crassostrea virginica</i>	44.72	7.72	0.83	12.17	0.2	0.04	Higgins et al. (2011)
<i>Crassostrea virginica</i>	-	7.54	0.99	-	-	-	Sidwell et al. (1973)
Oyster mean(1 SE)	44.81 0.09	7.85 0.19	0.91 0.08	11.85 0.33	0.16 0.04	0.04	
Mussels							
<i>Mytilus edulis</i>	45.98	11.40	0.708	12.68	0.55	-	Zhou et al. (2002)
<i>Mytilus edulis</i>	-	10.6	0.80	-	1.13	0.05	Haamer (1996)
<i>Mytilus edulis</i>	-	8.1	1.24	-	-	-	Cantoniet al. (1977)
<i>Mytilus</i>	-	6.2	-	-	-	-	Miletic et al. (1991)
<i>galloprovincialis</i>	-	-	-	-	-	-	
Mussel mean(1 SE)	45.98	9.08 1.19	0.92 0.16	12.68	0.84 0.29	0.05	
Other spp.							
<i>Arctica islandica</i>	-	-	-	-	0.05	0.003	Westermarket al. (1996)
<i>Chlamys farreri</i>	43.87	12.36	0.839	11.44	0.05	0.09	Zhou et al. (2002)
<i>Corbicula japonica</i>	-	9.81	-	-	0.22	-	Nakamura et al. (1988)
<i>Macra chinensis</i>	42.21	10.57	-	11.52	0.19	-	Zhou et al. (2002)
<i>Macra veneriformis</i>	-	9.67	-	-	0.09	-	Hiwatari et al. (2002)
<i>Macoma baltica</i>	-	-	-	-	0.1	0.03	Seireet al. (1996)
<i>Arcuatula senhousia</i>	-	-	-	-	0.82	0.05	Yamamuro et al. (2000)
<i>Pinctada imbricata</i>	-	9.82	0.74	-	0.39	0.03	Gifford et al. (2005)
<i>Pinctada imbricata</i>	-	10.5	-	-	-	-	Seki (1972)
<i>Ruditapes</i>	42.84	10.76	-	11.40	0.56	-	Zhou et al. (2002)
<i>Philippinarum</i>	-	-	-	-	-	-	
<i>Anadara</i>	45.86	8.71	-	11.29	0.07	-	Zhou et al. (2002)
<i>Kagoshimensis</i>	-	-	-	-	-	-	
Other spp. Mean(1 SE)	44.35 0.80	9.95 0.38	0.74 0.05	11.35 0.05	0.46 0.08	0.04 0.01	
Overall mean(1 SE)	44.86 0.54	9.28 0.40	0.88 0.07	11.72 0.19	0.32 0.09	0.04 0.01	

지속가능하게 유지되기 때문에 저장되는 탄소량으로 추정하는 것이 타당하다.

패각의 탄소 배출 항목은 i) 호흡으로 인한 이산화탄소 배출량의 패각 부분은 전체 호흡량의 10%로 추정하고 (Filgueira et al., 2019) ii) 패각 형성의 석회화 과정에서 이산화탄소를 배출하게 되며 마지막으로 iii) 탈락된 패각 중 해수에 지속적으로 노출되어 해수 중에서 영양염화 되는 과정에서 배출된다.

반면 패각에 대한 탄소 저장 기작은 i) 형성된 패각을 수확 후 수거하여 재활용 할 경우 패각에 탄소가 저장되고 ii) 탈락된 패각이 저질에 매립되는 기작에 의해 탄소가 저장

된다(Table 1).

2.3 우리나라 양식 패류 생산 현황에 따른 이산화탄소 저장량 산정

우리나라에서 생산되는 모든 패류는 2021년 현재 약 50만 6천톤이며 이중 32만 3천톤이 굴류로서 약 65.3%를 차지하고 있다. 따라서 수확된 패류의 패각이 차지하는 비율 또한 굴류가 가장 높다(해양수산부, 2020; Table 3).

우리나라에서 2021년 생산된 패류 전체에 대하여 Table 1의 Filgueira et al.(2019) 방법에 의해 연안 생태계에서의 탄소 수지를 계산해 보면 Table 4와 같이 약 34,573 톤의

Table 3. Domestic shellfish and oyster production of Korea

(Unit: ton)

Year	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production of shellfish	440,164	446,686	432,818	346,185	418,591	408,795	420,649	490,215	513,085	532,883	500,866	506,000
Production of oyster	282,155	290,462	306,007	303,280	252,530	303,034	286,630	282,917	329,794	357,282	325,889	323,000
Proportion of oysters	64.1%	65.0%	70.7%	87.6%	60.3%	74.1%	68.1%	57.7%	64.3%	67.0%	65.1%	65.3%

Table 4. Factors related carbon flux of shellfish and estimates of carbon flux of Korean shellfish in 2021 (based on Filgueira, 2019)

Factors		Description	Estimates of carbon flux (ton C/yr)
Harvested bivalves	Harvested shell*	stored carbon of harvested shells (+)	53,324
	bio-calcification	discharged carbon caused by the bio-calcification of harvested shells (-)	-32,033
	Tissue growth	stored carbon of increased harvested tissues (+)	42,581
	Shell respiration	it is estimated to be 10% of the total individual ¹⁾ (-)	-20,783
	Tissue respiration	it is estimated to be 90% of the total individual ²⁾ (-)	-187,044
Total bivalves	Burial of excretion	stored carbon of excretion buried under the sediment (+)	143,955
Deposited bivalves	Sediment burial of tissue	stored carbon of deposited tissues caused by the sediment burial (+)	
	Sediment burial of shell	stored carbon of deposited shells caused by the sediment burial (+)	
Total bivalves	Mineralization of excretion	discharged carbon of excretion mineralized (-)	-34,573
Deposited bivalves	Mineralization of tissue	discharged carbon of deposited tissues caused by the mineralization (-)	
	Mineralization of shell	discharged carbon of deposited shells caused by the mineralization (-)	
Total carbon flux			-34,573

*Harvested shells are assumed to be re-used for carbon storage

탄소가 매년 배출되는 것으로 추정된다. 따라서 패류의 생산성 향상에 따른 절대적인 탄소 수지는 마이너스가 되며 이는 먹이사슬에서 소비자의 역할을 하는 대부분의 생태계 구성원들이 유사하다. 그 이유는 호흡을 통한 이산화탄소의 배출이 마이너스 탄소수지에 매우 큰 부분을 차지하기 때문이다.

그러나, 양식 패류의 경우에는 앞에서 언급한 것처럼 식량자원으로서 동일한 중량의 단백질을 공급하기 위한 탄소 수지를 고려할 경우 육상가축의 약 7.6% 밖에는 탄소를 배출하지 않으므로 탄소 수지와 관련하여서는 매우 우수한 단백질 공급원이라 할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 양식 패류의 폐각 재활용에 따른 이산화탄소 저감량 산정

수확된 양식 패류는 연육부를 식량으로 활용하고 폐각은 부산물로 남겨지게 된다. 이때 남겨지는 폐각내의 탄소를 장기간 저장할 수 있는 재활용 방법을 사용하여 재활용 하게 되면 부산물인 폐각에 포함된 탄소저장량 만큼의 탄소

수지 개선 효과를 가져오게 된다.

우리나라에서 생산되는 양식 패류들에서 재활용이 가능하고 수거가 가능한 폐각의 양은 2021년 현재 기준으로 약 31만여 톤으로 추정된다(Table 5). 이 폐각 내의 탄소를 전량 흡수 저장이 가능한 재활용 방법으로 재활용한다고 가정한다면 연간 약 36,367톤의 탄소수지를 개선하는 효과를 볼 수 있으며 이양은 국가 배출가스 엔벤토리에 반영될 만큼 상당한 탄소수지 개선 효과라 할 수 있다(Table 5).

3.2 양식 패류의 수거 폐각 재활용에 의한 탄소 저감량 추정

해양 패류 양식은 패류 폐각이 탄산칼슘의 형태로 탄소를 저장하고 있고 연안생태계에서 패류 폐각 생성과 탈락으로 인한 탄소 순환에서의 역할로 인하여 기후변화 완화를 위한 연구대상이 되어 왔다(Peterson et al., 2014; Hickey 2009; Tang et al. 2011; Waldbusser et al. 2013; Filgueira et al. 2015).

폐각 성분 중에 탄소의 비중은 패류 종별로 차이가 있지만 20개 패류의 분석 결과를 종합해 보면 평균 약 11.7% 정도로 추정된다(Table 2; van der Schatte Olivier et al., 2018).

Table 5. Estimated amount of total carbon among the harvested and non-treated shells in Korea, 2021.

Division	Estimates (ton/yr or ton C/yr)
total production of oysters in 2019 (ton/yr; tissue+shell; MOMAF, 2020)	357,282
estimated amount of oyster shells in 2019 (ton/yr; MOMAF, 2020 ¹⁾)	278,680
estimated amount of non-treated oyster shells in 2019 (ton/yr; MOMAF, 2020)	190,060
Total production of shellfish in 2021 (ton/yr; tissue+shell; MOMAF, 2022 ²⁾)	505,535
estimated amount of total shells in 2021(ton/yr; MOMAF, 2022)	454,982
estimated amount of total non-treated shells in 2021 (ton/yr; MOMAF, 2022)	310,297
estimated amount of total carbon among the estimated non-treated shells in Korea, 2021 (ton C/yr; van der Schatte Olivier et al., 2018 ³⁾)	36,367

1) MOMAF, 2020. 굴패각 자원화를 위한 제도개선 방안 마련 연구 중 표 2-5. 해양수산부 용역 최종 보고서 (주관 연구책임: 마창모)
 2) 수산 정보 포털, 2022. <https://www.fips.go.kr/p/S020601/>의 어종별 연도별 생산량 자료
 3) Table 2의 패각 중 평균 탄소 비율, 11.72% 적용

석회화 과정 동안에는 이산화탄소가 수중으로 배출되고 특히 수심이 얇은 천해에서는 조석작용과 파도에 의해 대기중으로 이산화탄소의 배출이 일어난다(Fodrie et al. 2017). 그래서 패각이 형성되는 석회화 과정은 탄소 수지에서 마이너스 작용(배출)이 일어나는 부분이다. 하지만 일단 패각에 형성된 탄소는 일부 영양염화 되는 패각을 제외하면 장기간 고정되어 탄소의 저장고로 작용하게 된다. Hickey(2009)는 굴양식장에서 굴패각에 저장되는 탄소가 약 3.81에서 17.94 ton C/ha/yr에 이른다고 보고했다. Higgins et al.(2011)은 미국 체사피크만 굴양식장의 생태계 서비스 정량 모델연구를 통하여 제품 미터당 약 286개의 굴(*Crassostrea virginica*)개체가 서식할 경우 약 13.47 ± 1.00 ton C/ha/yr의 탄소 저장 효과가 있다고 추정하였다. 이 추정량은 연안생태계에서 블루카본 저감 효과가 있다고 알려진 여러 서식처들의 탄소 저장량 결과 보다도 매우 높은 값으로 보고된 바 있다(Fig. 2).

최근 Filgueira et al.(2019)는 네덜란드 양식 홍합의 연육부 및 패각의 탄소 저장량을 별도로 추정하였다. 양식 홍합의 경우, 호흡은 동물 생산 분야의 축산업에서처럼 탄소 배출원으로 산정하지 않았는데 이는 공기 중의 탄소가 흡수된 1차 생산자를 섭취하여 대사에 사용하면서 호흡으로 탄소를 다시 공기중에 방출하는 순환과정이 지구적인 생물학적 시스템 순환의 일환이며 이 과정에서의 탄소 순환 또한 일시적인 것으로 고려되어지기 때문이었다(Rojas-downing et al., 2017). 즉, 공기 중의 이산화탄소를 가축의 사료로 쓰이는 초지가 흡수하고 이를 가축이 섭취하여 호흡으로 배출함으로써 탄소의 일시적인 저장과 배출이 단기간에 발생하므로 현재의 IPCC 탄소 인벤토리의 축산분야에서는 가축의 호흡을 탄소 배출원으로 산정하지 않고 있다. Filgueira et al.(2019)는 이점에 착안하여 연육부는 축산에서처럼 식량자원으로, 패각은 부산물로 활용되므로 가장 큰 배출 항목인 호흡 중 연육부의 호흡량은 축산에서와 같이 탄소수지에 산정하지 않고 부산물로 남겨지는 패각의 호흡량에 해당하는 10% 만을 호흡으로 인한 탄소 배출원으로 탄소 수지추정에 활용하는 방법을 사용하였다. Filgueira et al.

(2019)는 노르웨이 양식 홍합의 연육부는 이산화탄소를 배출하는 수지를 나타내었으나 패각 부분은 탄소 흡수원으로서의 역할을 수행하는 것으로 보고하였다.

Filgueira et al.(2019)의 이러한 추정 방식은 이매패 양식 어장의 생태계 서비스를 평가할 때 수확된 패류의 연육부는 제공서비스의 산물로 그리고 패각은 폐기해야 하는 부산물로 가정하고 부산물인 패각을 탄소저장기능이 유지되는 생산적인 용도로 재활용할 경우를 가정한다. 연육부는 연안어장 생태계의 탄소 순환 과정에서 탄소의 흡수와 배출이 단시간 동안 발생하여 평형 상태를 유지함으로써 전체적으로 보면 연육부의 탄소수지는 0으로 가정하고 다만 양식 산물 중에 인간이 섭취하지 않는 부산물인 패각은 탄소의 흡수원으로써 충분히 고려하여야 한다고 제안하였다. Filgueira et al. (2019)는 2년생 노르웨이 양식 홍합 1개체의 평균 탄소 흡수량이 약 0.45 g CO₂로 추정하였으며 이 연구결과를 바탕으로 Jansen과 van den Boraart (2020)는 2년생 네덜란드 양식 홍합 (*Mytilus edulis*)의 탄소 수지를 추정하였다. 만약 1 m² 당 약 500개체가 수확된다고 가정하면, 패각에 대한 석회화와 패각의 호흡 할당량(즉, 10%) 만을 탄소 배출 항목으로 고려한 양식 홍합의 패각에 흡수된 탄소 흡수량을 2.7 g C/m²/yr로, 양식 홍합의 배설물 및 유기 퇴적물에 대한 탄소 수지 등, 전체적인 생태계 순환을 고려한 양식 홍합 패각의 탄소 흡수량을 61 g C/m²/yr로 추정하였다.

양식으로 생산되는 수산물은 일반적으로 육상의 동물성 식량자원에 비해 매우 고품질의 식량자원이며 전체 해양 동물성 수산물의 37.5%와 식물성 수산물의 약 97%를 공급하는 매우 중요한 산업이다(Jones et al., 2022). 특히 해양 동물성 양식 수산물은 건강한 고단백의 식품 공급원으로써 높은 부가가치를 지니고 있으며 온실가스 측면에서도 생산 및 처리 과정의 탄소 발자국이 육상의 동물성 자원과 비교하여 매우 작아 양식 생산성 향상을 통한 식량 자원의 수급은 지속가능한 환경 및 상대적 탄소 저감 효과의 측면에서도 이점이 매우 큰 방안이 될 수 있다. Jones et al.(2022)은 해양 양식 동식물의 생산, 처리 및 소비과정에

서의 전주기 탄소 배출량을 추정하였는데 특히 이때패의 경우 어류와 비교하여 탄소 배출 정도가 매우 낮은 결과를 보여 준다.

3.3 패류 양식 전주기에 대한 탄소 수지

어떠한 산업의 탄소 수지를 논의할 때 산업의 생산 현장 뿐만 아니라 산업의 산물 생산을 위하여 생산되고 유통되어 소비되는 전 주기에 대한 탄소 수지를 살펴보는 것은 중요하다. 연안양식 어장에서 자라는 양식 패류 들은 별도의 먹이공급이 불필요하다. 따라서 먹이 공급과 관련된 육상에서의 탄소 배출은 최소화 될 수 있으며 이러한 방식으로 산물 생산의 전주기에 대한 탄소수지를 살펴본 가장 최근 연구결과를 보면 양식 패류 단백질 1톤을 생산하는데 이산화탄소 11.1톤이 배출된다는 추정 결과가 보고되었는데 이

추정값은 소, 돼지 및 닭 등 육상 가축 단백질 1톤을 생산하는데 배출되는 이산화탄소의 7.6%에 지나지 않는 값이다(Willer & Aldridge, 2020; Ray et al., 2019). 즉 연안 패류 양식은 매우 기후 친화적이고 지속가능한 양질의 단백질을 공급 할 수 있는 산업이라 할 수 있다. Jones et al. (2022)는 어류 양식과 연안양식어장 패류 양식생산의 전주기에 대한 탄소 배출 항목들을 표로 정리하였으며 생산 현장(on farm)에서의 시설물 및 관리관련 항목과 유통(downstream) 부분을 제외하면 탄소 배출을 최소화 할 수 있는 장점이 있다(Table 6).

3.4 굴패각의 처리 및 재활용

굴패각은 산업용에서부터 가정용까지 다양한 분야에 활용될 수 있다. 중요한 것은 비용적 추정에서 경제성을 확보

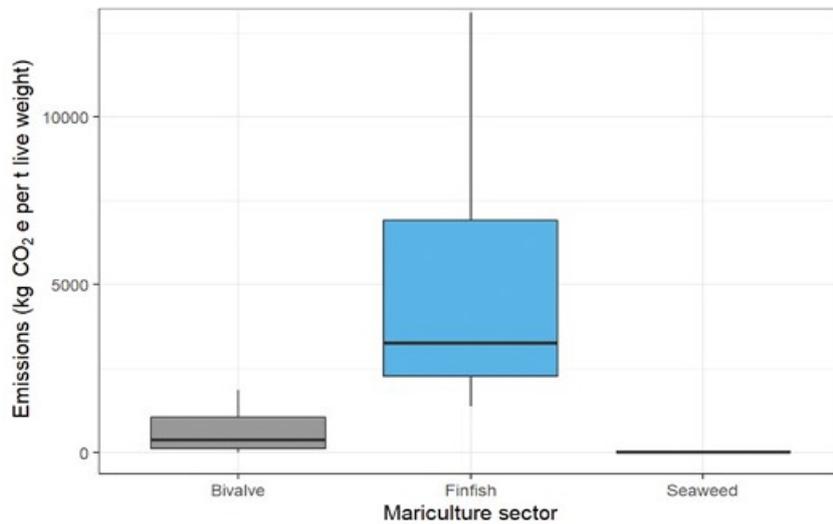


Fig. 2. Comparison of total CO₂ emissions across all stages of the mariculture supply chain for bivalve, fed finfish and seaweed (Jones et al., 2022)

Table 6. Major carbon emissions sources at different production stages for bivalve, finfish and seaweed (○: emission; ×: zero emission; ~: carbon emission can be reduced with improved management, Jones et al., 2022)

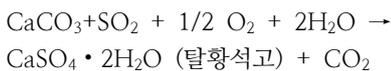
Production stage	Source of emission	Finfish	Bivalves	Seaweed
Upstream (Preparation)	Production and supply of eggs, larvae or propagules	○	~	~
	Terrestrial land use change and degradation	○	×	×
	Feed production and processing	○	×	×
	Transport of feed to wholesale and mariculture operations	○	×	×
On farm (Production)	Fuel use	○	○(~)	○(~)
	Energy use	○	○(~)	○(~)
	Infrastructure or maintenance	○	○(~)	○(~)
	Coastal and subtidal land use change and degradation	○	~	~
	Nutrient or effluent impact and water treatment	○	~	~
	Liquid oxygen and other chemicals use in production	○	~	~
Downstream (Transport and processing)	Processing	○	○	○
	Packaging and ice	○	○	○
	Refrigeration	○	○	○
	Transport	○	○	○

하는 것이 중요하다고 판단되며 따라서 활용에 있어서도 최소비용으로 최대효과를 올리는 것이 활용효율이 높다고 판단할 수 있다. 국내외사례를 통해 가장 널리 활용될 수 있는 분야를 고찰하여 보았다.

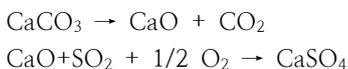
3.5 제철소 또는 화력발전소의 탈황 재료

폐각을 자연 친화적으로 재활용하면서 일반적인 대기 오염가스 물질을 저감하는 효과를 올릴 수 있는 대표적인 방법이 제철소나 석탄화력 발전소의 탈황 재료로 활용하는 방법이다. 제철소에서는 용광로에 철광석과 석탄을 함께 넣고 석탄을 태워서 철광석을 녹여 쇳물을 생산하게 되는데 이때 석탄이 타면서 황산화물(SO_x) 같은 오염물질이 배출되며 이들은 적절한 처리공정을 통하여 제거해 주어야만 한다. 탈황 방법은 습식 방법과 건식 방법으로 나누는데 소규모 시설이 가능하고 에너지 및 경제적 측면에서도 장점이 있는 건식 방법이 많이 사용되며 이때 황산을 흡수하는 탈황제로서 폐각의 탄산칼륨(CaCO₃)성분이 활용될 수 있다. 각각의 탈황 기작은 아래와 같다.

습식 방법의 예(하동 화력발전소)



건식 방법의 예(삼척 화력발전소)



이 방법은 환경친화적으로 폐각을 활용할 수 있는 장점이 있지만 현재로는 황이 온실가스 범위에 포함되어 있지 않으며 탈황 과정에서 이산화탄소를 배출 하기 때문에 공식적인 탄소 저감 방안이 되거나 탄소수지를 개선할 수 있는 재활용 방법은 되지 못하는 것으로 사료된다.

3.6 서식처 저질개선 재료

서식지 저질개선을 위한 재료로 수거된 폐각을 활용하면 전체 생태계의 환경을 개선 시키는 효과를 볼 수 있어 저비용으로 큰 혜택을 볼 수 있다. 이미 굴폐각 가루는 토양 속의 중금속을 흡착할 수 있는 것으로 보고되어 겹고 이는 농사에서 쌀의 금속 함량을 낮추어 줄 수 있는 것으로 보고되었다(He et al., 2021).

굴폐각 가루를 토양 안정제로 사용하여 폐광 주변에서 일반적으로 발견되는 전형적인 카드뮴(Cd) 및 납(Pb) 오염 토양을 정화할 수 있음도 확인되었다(Ok et al., 2010). 이 경우 단순 분말가루보다는 소성된 굴폐각 분말가루가 토양 pH의 증가와 금속 수산화물 형성의 결과로 카드뮴(Cd)과 납(Pb) 농도를 크게 감소시켜 이러한 독성 중금속을 저감시켜 주는데 효과가 있는 것으로 나타났다. 전반적으로, 이 연구의 결과는 굴폐각이 효과적인 토양 개선제로 재활용될 수 있음을 시사하고 이는 토양뿐 아니라 축사 내 내수면 및

연안 양식장 저질 개선에도 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 다만 폐각을 단순 사용하기보다는 파쇄하여 다른 성분과의 용합을 통해 더 큰 효과를 거둘 수 있을 것으로 보여진다. 또한 토양과의 적절한 배합을 조정 등을 통해 잔류염분을 가능한 낮추는 방법을 모색할 필요도 있다고 생각된다.

3.7 탄소수지 개선을 위한 재활용법

위에서 언급한 재활용 방법들은 자연 친화적이기는 하지만 굴 폐각에 저장된 탄소성분을 생태계에서 제거할 수 있는 방법으로는 한계가 있으며 탄소수지를 개선할 수 있는 재활용 방법으로는 연안침식 방지시설의 재료, 친환경 매립 또는 생광물화 방법 등을 꼽을 수 있다.

3.7.1 연안보호재 활용

우리나라에서도 최근 기후변화와 해수면 상승에 따른 연안 침식이 큰 이슈로 부상하고 있다. 굴폐각은 이러한 연안 침식을 저감하는 재료로 활용될 수 있다. 미국 뉴욕시의 경우 항만의 침식을 막기 위해 시범적으로 2018년부터 폐각을 활용하고 있다²⁾. 굴 암초는 도시의 기반 시설을 파괴할 수 있는 허리케인의 파도로부터 보호할 수 있고 폭풍우로 인한 침식 및 피해를 줄여줄 것으로 기대하고 있다. 우리나라 연안 침식을 고려할 때 전 연안에 걸쳐 활용될 수 있을 것을 고려할 때 폐각의 재활용성이 매우 큰 분야로 여겨진다. 또한 디자인 및 구조 변경을 통해 현재 바다목장 사업의 일환으로 연안에 투하되고 있는, 콘크리트 테트라포드 인공어초나 철근 기반 인공어초를 대신할 수 있을 것으로 여겨진다. 폐각에 저장된 탄소는 폐각에 어떠한 화학적인 작용이 가해지지 않는한 장기적으로 저장된다고 간주하는 것이 타당할 것이다. 이는 우리나라 연안에서 신석기 시대의 패총이 발견되는 것을 보더라도 반영구적으로 보존되는 탄소를 볼 수 있다.

3.7.2 패류의 잠재적인 서식처 개선 서비스

대기로부터의 탄소 제거나 저장에 초점을 맞춘 육상의 삼림이나 농업 관리 방식이 식량 생산을 위한 경작지의 확대와 생물 다양성에 미치는 필연적인 부정적 영향을 감안할 때 폐각은 보다 유망한 탄소 제거원이라 할 수 있다(Jansen and van den Bogaart, 2020; Moore, 2020). 비록 폐각 생산의 부산물로 CO₂가 발생하며, 패류의 성장이나 생존 조건 그리고 폐각 자체의 bioerosion에 따라 패류 서식처, 예를 들어 굴초(oyster reef)의 탄소 흡수/방출 여부에 차이가 발생할 수 있으나 이미 존재하는 서식처는 과거로부터 오랜 기간 유기탄소와 무기탄소(폐각)의 저장고 역할을 수행한 곳이다(Fodrie et al., 2017).

굴초와 같은 유형의 서식처만 고려하더라도, 비록 국내에서는 생태계 서비스 측면에서의 중요성에 대한 인식 미비로 공간적 분포에 대한 기초 조사 자료가 없으나, 전 세계

2) <https://www.npr.org/sections/thesalt/2018/10/10/654781446/oysters-on-the-half-shell-are-actually-saving-new-yorks-eroding-harbor>

적으로는 굴에 대한 어획으로 발생한, 서식처 파괴에 의한 굴초 면적의 감소 비율이 최근 100년간 85% 수준에 이르는 것으로 보고되었다(Zu Ermgassen et al., 2012). Fodrie et al.(2017)은 어획 과정에서 발생하는 서식처 파괴로 인한 그간의 서식처 감소로 이곳에 저장된 유기탄소의 상당량(전세계적으로 400,000,000 megagram 이상)이 재광물화(reminalization)된 것으로 추정하였다. 국내에서도 기존의 굴초나 패류의 생산이 양호한 서식처를 보존하기 위한 대책을 수립하는 것이 기후변화 대응에 있어서 주요 축을 이를 가능성이 있으므로 이에 해당하는 서식처의 면적과 연안역의 분포 공간을 찾아내고, 탄소의 저장과 생태계 서비스의 측면에서의 중요성을 발굴하는 연구가 필요하다.

주로 호흡으로 인해 탄소 방출원으로 인정되고 있는 패류의 탄소 순환기능 관련 평가에 있어 여전히 자료의 부족과 해결해야 할 개념적인 문제가 존재한다. Gallagher et al. (2022)은 최근 탄소 흡수원으로의 오평가와 이에 부응한 정책의 장기적 실행이 추후 지구적인 생태계에 미칠 부정적 영향의 위험성을 강조하며, 풍부한 동물상의 서식에 의해 그간 탄소 흡수원으로 평가된 연안역의 바다숲을 오히려 탄소 방출원으로 규정한 바 있다. 그들은, 위의 서식처 보존 필요성과 같은 맥락에서, 현재는 명백한 탄소의 방출원이나 이러한 서식처가 다른 유형의 서식처로 인위적/자연적 요인에 따라 대체되거나 훼손되었을 경우를 고려하여 탄소 흡수원으로서 재평가하고 이를 보전하고 관리하는 것의 중요성을 언급하였다. 이와 같은 상황은, 비록 탄소 방출원으로 간주되긴 하였으나, 매우 높은 수준의 생물 다양성과 다양한 동식물의 서식을 통해 높은 탄소 저장 능력을 갖는 바다숲이 성게류의 번성으로 갯녹음 지역으로 전환되어 저장 능력을 상실한 경우를 상정하면 어렵지 않게 이해될 수 있다.

수산물을 생산하는 공간으로서의 연안역의 활용은 환경적 측면에서 부정적인 결과를 낳기도 한다. 최근 본 연구진의 조사에 의하면 경남 해역의 수하식 양식장과 주변에서는 조하대 저서동물 군집의 생산성이 현저하게 낮은 수준인 것으로 파악되었다(경상남도, 2021). 패류에 대한 바닥식 양식은 치패를 해저에 살포하여 자연적 조건으로 성장시킨 후 수확하는 방식이다. 패류의 성장에 의한 높은 생산은 유기물 오염물질 제거를 통해 환경 개선에 긍정적 효과를 나타낸다(Asmus et al., 1992; Aoyama and Suzuki, 1997). 따라서 바닥식 양식은 유기물 오염이나 빈산소/무산소 수괴의 출현 빈도를 낮추는 데에 크게 기여하는 것으로 볼 수 있다.

서식처 상태의 악화가 진행되어 빈산소를 거쳐 무산소 수괴가 발생하면 생태계에서 발생하는 대부분의 호흡과 에너지는 미생물에게 전달되며, 먹이망 내 상위 단계 소비자에게 전달되는 양은 0에 가깝게 된다(Diaz and Rosenberg, 2008). Reise(1985)가 제시한 해양생물 구형 부피(spherical volume)의 직경으로 표현된 등가 구형 직경(equivalent spherical diameter)의 생물군 간 최빈수 차이(대형저서동물

vs. 박테리아는 약 16 mm vs. 1 μ m)로 부피를 계산($V=4/3\pi r^3$)하고 표면적 대비 부피 비율(surface area to volume ratio, SA)을 $SA \approx V^{2/3}$ 식에 적용하여 계산한 박테리아와 대형저서동물 간 동일한 부피에서의 SA 차이는 2.6E+08배 수준이다.

건강한 유산소 환경에서는 (normoxia) 해저면에 서식하는 패류를 포함한 대형저서동물 군집의 생체량이 높아지며, 큰 몸체, 즉 위에 언급한 등가 구형 직경이 큰 생물들의 비중이 높아지고, 무산소 환경으로 갈수록 정반대의 현상이 나타난다(Odum, 1969; Pearson and Rosenberg, 1978), 종종 박테리아의 최대 개체수가 무산소 환경에서 관찰되며 이 때는 밀도 높은 박테리아 매트가 해저면에 형성되기도 한다. 선형적 관계가 분명하지는 않으나 일반적으로 DO 농도가 낮아질수록 퇴적물의 TOC는 증가하며 TOC와 박테리아 개체수 간에도 밀착 관계가 형성되어 있다(Mori et al., 2018). 패류 바닥식 양식이 행해지는 연안역은 탄소의 방출원이거나 균형을 맞춘 상태일 수는 있다. 그러나 이러한 곳이 훼손된 서식처로 전환되었을 경우 탄소의 방출은 보다 급격하게 증가하게 될 것이며 현재 빈산소/무산소 수괴가 높은 빈도로 발생하는 기존 양식장 등지에서는 많은 양의 탄소가 대기 중으로 방출되고 있다. 이러한 점을 고려하면 서식처의 관리와 복원을 통해 생산성이 높은 연안역으로, 특히 환경의 질적 상태를 개선할 수 있는 패류 바닥식 양식장으로 전환하거나 이를 적절하게 유지 및 관리하는 것 역시 탄소 경감 차원에서 매우 중요한 역할로 평가되어야 한다.

3.7.3 패각의 직접적인 탄소 저감 처리

본 연구에서는 여러 연구들에 근거하여 연체동물의 패각이 갖는 탄소 제거원으로서의 가능성을 진단하였다.

패류 서식처의 복원 및 개선을 통한 탄소저감 기작은 탄소수지의 측면에서 아직까지 정확한 정량적인 추정이 매우 부족한 것이 현실이며 앞서 언급한 패각 활용 방법들도 자연 친화적이기는 하지만 굴 폐각에 저장된 탄소성분을 생태계에서 제거하거나 탄소를 생태계 순환에서 직접적으로 격리할 수 있는 방법으로는 한계가 있다. 굴 폐각에 대한 탄소저감 차원의 처리 방법 중 가장 단순한 방법은 지중 또는 해중 매립이다. 패각을 매립하게 되면 패각에 저장된 탄소가 지중이나 해중에 고정되어 자연 생태계로부터 제거되는 효과를 볼 수 있다. 현재 굴 폐각은 관련 법에 따라 폐기물에서 제외될 수 있으므로 매립이 가장 쉬우면서도 확실한 탄소 저감 방안이라 할 수 있다. 매립은 굴폐각을 생산적으로 재활용하기보다는 인위적으로 생태계에서 격리시키는 방법으로 굴폐각을 생산적으로 재활용하면서도 탄소저감 효과를 올릴 수 있는 획기적인 기술개발이 시급한 실정이다. 생광물화는 경제적이면서도 자연 친화적인 탄소 중립적인 패각의 재활용 기술일 수 있다. 생광물화 기술은 미생물의 신진 대사를 활용하여 이산화탄소를 석회석의 형태로 고정시키는 방법이다. 이 공정에 필요한 금속 양이온

(Ca²⁺, Mg²⁺)의 공급원으로써 석탄회나 굴폐각 등을 활용할 수 있어 매우 유용한 굴폐각의 탄소중립적 기술이 될 수 있다. 따라서 향후 폐각 재활용 방법으로서의 생광물화 실증기술 연구가 절실히 필요한 이유가 여기에 있다고 생각된다.

감사의 글

본 연구를 수행하는데 많은 조언과 날카로운 지적을 아끼지 않으신 제주대학교 최광식 교수님, 순천대학교 정재성 교수님, 공주대학교 김이형 교수님 그리고 인하대학교 김창균 교수님과 김수전 교수님께 깊이 감사드립니다. 본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 습지생태계 가치평가 및 탄소흡수 가치증진 기술개발사업의 지원을 받아 이루어졌습니다(2022003630003).

References

- 경상남도 (2021). 청정어장 재생로드맵 수립을 위한 양식어장 오염실태 연구 최종보고서 II (기본계획&현장조사). 발간번호, 76-6480000-000323-01, 경상남도, 542pp.
- 해양수산부 (2020). 굴폐각 자원화를 위한 제도개선 방안 마련 연구, 최종보고서, 146pp.
- Aoyama, H and Suzuki, T (1997). In situ measurement of particulate organic matter removal rates by a tidal flat macrobenthic community. *Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography* (Japan).
- Asmus, H, Asmus, RM, Prins, TC, Dankers, N, Frances, G, Maass, B and Reise, K (1992). Benthic-pelagic flux rates on mussel beds: tunnel and tidal flume methodology compared. *Helgolander Meeresuntersuchungen*, 46(3), pp. 341-361.
- Boysen, LR, Lucht, W and Gerten, D (2017). Trade-offs for food production, nature conservation and climate limit the terrestrial carbon dioxide removal potential, *Global Change Biology*, 23(10), 4303-17.
- Cantoni C, Cattaneo P and Ardemagni A (1977) A report on P content in flesh of aquatic animals (in Italian). *Industria Alimentari*, 16, 89-90.
- Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321(5891), 926-929.
- Filgueira R, Comeau LA, Guyondet T, Mckindsey CW, and Byron CJ (2015). Modelling carrying capacity of bivalve aquaculture: A review of definitions and methods. In: Meyers R (ed) *Encyclopedia of sustainability science and technology*. Springer, New York.
- Filgueira, R, Strohmeier, T and Strand, Ø (2019). Regulating services of bivalve molluscs in the context of the carbon cycle and implications for ecosystem valuation, *Goods and Services of Marine Bivalves*. Springer, Cham, pp. 231-251.
- Fodrie FJ, Rodriguez AB, Gittman RK, Grabowski JH, Lindquist NL, Peterson CH et al. (2017). Oyster reefs as carbon sources and sinks. *Proceedings of Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1859), 20170891. [DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0891>].
- Gallagher, JB, Shelamoff, V and Layton, C (2022). Seaweed ecosystems may not mitigate CO₂ emissions. *ICES Journal of Marine Science*, 79(3), pp. 585-592.
- Gifford S, Dunstan H, O'Connor W, Macfarlane GR, O'Connor W, and Macfarlane GR (2005). Quantification of in situ nutrient and heavy metal remediation by a small pearl oyster (*Pinctada imbricata*) farm at Port Stephens, Australia. *Marine Pollution Bulletin*, 50, pp. 417-422.
- Haamer J (1996). Improving water quality in a Eutrophied Fjord system with mussel farming linked references are available on JSTOR for this article : improving water quality in a Eutrophied Fjord system with mussel farming. *Ambio*, 25, pp. 356-362.
- He, L, Meng, J, Wang, Y, Tang, X, Liu, X, Tang, C, Ma, LQ and Xu, J (2021). Attapulgitic and processed oyster shell powder effectively reduce cadmium accumulation in grains of rice growing in a contaminated acidic paddy field, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 209(2021) 111840. [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111840>]
- Hickey JP (2009). Sequestration potential of shellfish. [Cited 16 July 2017.] Available from URL: www.thefishsite.com/articles/615/carbon-sequestrationpotential-of-shellfish
- Higgins CB, Stephenson K and Brown BL (2011). Nutrient bioassimilation capacity of aquacultured oysters: quantification of an ecosystem service. *Journal of Environmental Quality*, 40, p. 271.
- Hiwatari T, Kohata K and Iijima A (2002). Nitrogen budget of the bivalve *Macra veneriformis*, and its significance in benthic-pelagic systems in the Sanbanse Area of Tokyo Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55, 299-308.
- Jansen, H and van den Bogaart, L (2020). Blue carbon by marine bivalves: Perspective of Carbon sequestration by cultured and wild bivalve stocks in the Dutch coastal areas, Wageningen University & Research report C116/20, 51pp. [DOI: <https://doi.org/10.18174/537188>]
- Jones, AR, Alleway, HK, McAfee, D, Reis-Santos, P, Theuerkauf, SJ and Jones, RC (2022). Climate-friendly seafood: The potential for emissions reduction and carbon capture in marine aquaculture, *BioScience*, 72(2), pp. 123-143, <https://doi.org/10.1093/biosci/biab126>
- Li, H, Ilyina, T, Muller, A and Landschutzer, P (2019). Predicting the variable ocean carbon sink, *Science Advances*, 5(4). [DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav6471>]
- Linehan LG, Connor TPO, and Burnell G (1999). Seasonal

- variation in the chemical composition and fatty acid profile of Pacific oysters (*Crassostrea gigas*). *Food Chemistry*, 64, pp. 211–214.
- Miletic I, Miric M, Lalic Z, and Sobajic S. (1991) Composition of lipids and proteins of several species of molluscs, marine and terrestrial, from the Adriatic Sea and Serbia. *Food Chemistry*, 41, pp. 303–308.
- Mistri, M and Munari, C (2012) Clam farming generates CO₂: A study case in the Marinetta lagoon (Italy), *Marine Pollution Bulletin*, 64(10), pp. 2261–2264.
- Moore, D. (2020). A biotechnological expansion of shellfish cultivation could permanently remove carbon dioxide from the atmosphere/Una ampliación biotecnológica del cultivo de moluscos bivalvos podría eliminar permanentemente el dióxido de carbono de la atmósfera. *Mexican Journal of Biotechnology*, 5, pp. 1–10.
- Mori, F, Umezawa, Y, Kondo, R and Wada, M (2018). Effects of bottom-water hypoxia on sediment bacterial community composition in a seasonally hypoxic enclosed bay (Omura Bay, West Kyushu, Japan). *FEMS microbiology ecology*, 94(5), fiy053.
- Nakamura M, Yamamuro M, Ishikawa M and Nishimura H (1988). Marine biology role of the bivalve *Corbicula japonica* in the nitrogen cycle in a Mesohaline lagoon. *Marine Biology*, 99, pp. 369–374.
- Odum, EP. (1969). The Strategy of Ecosystem Development: An understanding of ecological succession provides a basis for resolving man's conflict with nature. *Science*, 164 (3877), pp. 262–270.
- Ok, YS, Oh, S, Ahmad, M, Hyun, S, Kim, K, Moon, DH, Lee, SS, Lim, K, Jeon, W and Yang, JE (2010). Effects of natural and calcined oyster shells on Cd and Pb immobilization in contaminated soils, *Environmental Earth Sciences*, 61, pp. 1301–1308.
- Pearson, TH and Rosenberg, R (1978). Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 16, pp. 229–311.
- Petersen JK, Hasler B, Timmermann K, Nielsen P, Tørring DB, Larsen MM and Holmer M (2014) Mussels as a tool for mitigation of nutrients in the marine environment, *Mar Pollut Bull*, 82, pp. 137–43.
- Ray, DK, West, PC, Clark, M, Gerber, JS, Prishchepov, AV and Chatterjee, S. (2019). Climate change has likely already affected global food production, *Plos one*, May 31, 2019. [DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217148>]
- Reise, K (1985). Tidal flat ecology: an experimental approach to species interactions. Springer-Verlag, 191pp.
- Ren JS, Marsden ID, Ross AH and Schiel DR (2003) Seasonal variation in the reproductive activity and biochemical composition of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) from the Marlborough Sounds, New Zealand. *Journal of Marine Freshwater Research*, 37, pp. 171–182.
- Rinne-Garmston, KT, Peltoniemi, K, Chen, J, Peltoniemi, M, Fritze, H and Mäkipää, R (2019). Carbon flux from decomposing wood and its dependency on temperature, wood N₂ fixation rate, moisture and fungal composition in a Norway spruce forest, *Global Change Biology*, 25(5), pp. 1852–67.
- Rojas-Downing, MM, Nejadhashemi, AP, Harrigan, T and Woznicki, SA (2017). Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation, *Climate Risk Management*, 16, pp. 145–163. [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001>]
- Seire A, Carell B, Westermark T, Mutvei H, Bignert A (1996). Bivalve shells as environmental archives in brackish water : Elemental and radioactivity studies of Estonian *Macoma baltica* shells, *Biom mineralisation 93. 7th International Symposium on Biom mineralisation*. Bulletin de L'Institut Oceanographique, Monaco.
- Seki M (1972). Studies on environmental factors for the growth of the pearl oyster, *Pinctada fucata*, and the quality of its pearl under the culture condition. *Bulletin Mie Prefectural Fisheries Experimental Station*, 1, pp. 32–143.
- Sidwell VD, James C, Zook EG and Bonnet JC (1973). Chemical and nutritive values of several fresh and canned finfish, crustaceans, and mollusks Part I: proximate composition, calcium, and phosphorus. *Marine Fisheries Review*, 35, pp. 16–19.
- Tang Q, Zhang J and Fang J (2011). Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems. *Mar Ecol Prog Ser*, 424, pp. 97–104.
- van der Schatte Olivier, A, Jones, L, Vay, LL, Christie, M, Wilson, J and Malham, SK (2018). A global review of the ecosystem services provided by bivalve aquaculture. *Rev. Aquacult.* [DOI: <https://doi.org/10.1111/raq.12301>]
- Waldbusser GG, Powell EN and Mann R (2013). Ecosystem effects of shell aggregations and cycling in coastal waters: an example of Chesapeake Bay oyster reefs. *Ecology*, 94, pp. 895–903.
- Westermark T, Carell B, Mutvei H, Forberg S, and Kualakowski E (1996). Elemental content in shells of the ocean quahog, *Arctica islandica* L. (Mollusca: Bivalvia), from NW Europe as marine environmental archives, *Biom mineralisation 93. 7th International Symposium on Biom mineralisation*. Bulletin de L'Institut Oceanographique, Monaco.
- Willer, D and Aldridge, DC (2020). Sustainable bivalve farming can deliver food security in the tropics, *Nature Food*, 1, pp. 384–8. [DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0116-8>]
- Yamamuro M, Hiratsuka J, and Ishitobi Y (2000). Seasonal change in a filter-feeding bivalve *Musculista senhousia* population of a eutrophic estuarine lagoon. *Journal of*

- Marine Systems*, 26, pp. 117–126.
- Zhou Y, Yang H, Liu S, He Y and Zhang F (2002). Chemical composition and net organic production of cultivated and fouling organisms in Sishili Bay and their ecological effects. *Journal of Fisheries of China*, 26, pp. 21–27.
- Zu Ermgassen, PS, Spalding, MD, Blake, B, Coen, LD, Dumbauld, B, Geiger, S, Grabowski, JH, Grizzle, R, Luckenbach, M, McGraw, K, Rodney, W, Ruesink, JL, Powers, SP and Brumbaugh, R (2012). Historical ecology with real numbers: past and present extent and biomass of an imperilled estuarine habitat. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1742), pp. 3393–3400.