

에머지 방법론을 이용한 굴 양식의 지속가능성 평가

강대석[†]

부경대학교 지속가능공학부 생태공학전공 교수

Emergy-based Evaluation of the Sustainability of Oyster Aquaculture in Korea

Daeseok Kang[†]

Professor, Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48153, Korea

요 약

에머지 평가법을 적용해 우리나라 연승수하식 굴 양식의 지속가능성을 평가하고, 굴 양식 해역 생태계가 수산물 공급 서비스에 순수하게 기여하는 비율(자연기여율)을 산정했다. 굴의 양성·채취 및 박신 과정에 투입된 에머지 총량은 2.64×10^{17} sej였으며, 이 중 재생가능에머지는 8.1%, 외부구입 에머지는 91.9%를 차지했다. 박신 과정을 제외할 경우 재생가능에머지와 외부구입 에머지의 비율은 각각 11.6%, 88.4%였다. 연승수하식으로 생산한 굴의 에머지원단위(알굴 기준)는 박신 이전 3.48×10^6 sej/J, 박신 후 5.00×10^6 sej/J이었다. 연승수하식 굴 양식의 에머지산출비율(박신 이전 1.13, 박신 포함 1.09)이 낮았으며, 해역 환경에 미치는 부정적 영향은 비교적 높았다(박신 이전 환경부하비율 7.62, 박신 포함 시 11.38). 그 결과 우리나라 연승수하식 굴 양식의 지속가능성은 아주 낮았다(박신 이전 에머지지속성지수 0.15, 박신 포함 시 0.10). 굴 양식 해역이 굴 생산에 순수하게 기여한 비율인 자연기여율은 박신 이전 11.6%, 박신 포함 시 8.1%였다. 굴 양식의 지속가능성과 양식 해역의 자연기여율을 더 명확히 파악하기 위해서는 채묘 및 단련 과정을 평가에 포함하고, 실제 시설 투입 물량을 더 확보해 에머지 평가를 개선할 필요가 있다. 해면양식어업이 전체 수산물 생산량에서 차지하는 비중이 증가하고 있다는 점을 고려할 때 굴 이외의 주요 양식 품종을 대상으로도 에머지 평가를 수행해 양식 어업의 지속가능성 제고에 활용할 수 있는 정보를 제공할 필요가 있다.

Abstract – The emergy methodology was applied to assess the sustainability of longline hanging oyster aquaculture in Korea and to quantify the ecosystem contribution, defined as the proportion of total inputs to ecosystem service production derived from the natural environment. The total emergy input from the grow-out and harvesting stages through the post-harvest shucking process was 2.64×10^{17} sej, with renewable and purchased emergy accounting for 8.1% and 91.9%, respectively. When shucking was excluded, the corresponding proportions were 11.6% and 88.4%. The unit emergy value of the oysters produced was 3.48×10^6 sej/J before shucking and 5.00×10^6 sej/J after shucking. The system showed a low emergy yield ratio (1.13 before shucking and 1.09 after shucking) and a relatively high environmental loading ratio (7.62 before shucking and 11.38 after shucking). The emergy sustainability index was very low, at 0.15 before shucking and 0.10 after shucking. The ecosystem contribution was 11.6% before shucking and 8.1% after shucking. For a more comprehensive evaluation of oyster aquaculture, future studies should incorporate the spat collection and hardening stages and obtain more detailed data on aquaculture inputs. Emergy evaluations should be extended to other major cultured species to provide quantitative information for improving the sustainability of aquaculture in Korea.

Keywords: Oyster aquaculture(굴 양식), Emergy evaluation(에머지 평가), Environmental impact(환경영향), Sustainability(지속가능성), Ecosystem contribution(자연기여율)

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

1. 서 론

수산자원 고갈과 국제 어업규제 강화 때문에 잡는 어업보다 기르는 어업(양식어업)이 수산물 공급에서 차지하는 중요성이 커지고 있다(MOF[2023]; Shin[2020]). 2024년 기준 우리나라 해면양식어업 생산량은 연간 225만톤, 생산금액은 연간 3.7조원으로, 전체 수산물 생산에서 차지하는 비율은 생산량 기준 62.3%, 생산금액 기준 36.8%였다(MOF[2025]). 2006년에 해면양식어업 생산량이 일반해면어업 생산량을 넘어선 이후 전체 수산물 생산량에서 해면양식어업이 차지하는 비율은 2006년 41.5%에서 2024년 62.3%로 지속적으로 증가했다.

굴은 우리나라의 주요 패류양식 품종으로, 100년 이상의 양식 역사를 지니고 있다(NIFS[2016]). 주요 굴 생산국 중 하나인 우리나라는 2024년 약 31만톤(각굴 기준)의 양식 굴을 생산했으며(MOF[2025]), 연간 약 1만톤을 수출하고 있다(Joint Ministries [2025]). 2024년 양식 굴 생산량은 해면양식어업 생산량의 13.7%에 해당하며, 패류양식 생산량의 74%를 차지했다, 굴 양식 어업권 면적은 2024년 기준 1,241건, 6,884 ha로, 전체 양식어업 면적 건수의 12.3%, 면적의 4.2%를 차지했다.

기후변화에 따른 해양환경 변화, 지속적인 연안개발 및 육상오염물질 유입, 과밀 양식, 인력수급 문제 때문에 해면양식어업 여건이 악화하고 있으며, 이에 따라 해면양식어업 지속가능성이 저하되고 있다(MOF[2023]). 해양생태계 변화로 어획 가능한 수산자원량이 감소하는 추세를 고려할 때 해면양식어업을 통한 수산물 생산은 앞으로 더욱 중요한 역할을 담당할 것으로 예상된다. 따라서 식량공급 측면에서 해면양식어업의 지속가능성과 생산 효율을 높이기 위한 정책 수립과 집행이 시급한 시점이다.

2000년대 중반 생태계서비스 개념이 국제적으로 생태계 관리 핵심 수단으로 등장한 이후(MEA[2005]) 생태계서비스 가치를 평가하고 이를 생태계 관리에 활용하기 위한 연구가 수행되어 왔다(Ahn *et al.*[2023]; Jeong *et al.*[2025]). 국내에서도 환경부와 해양수산부 관할 법률(자연환경보전법, 생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률, 해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률 등)과 국가계획에서 생태계서비스 개념과 방법론을 생태계 관리의 주요 수단으로 활용하고 있다. 또한 생태계 유형별로 생태계서비스를 분류하고 가치를 산정해 육상 및 해양 생태계 관리에 활용하기 위한 다양한 연구가 이루어졌다(Ahn *et al.*[2015]; Cheon *et al.*[2025]; Joo *et al.*[2021]; Kang [2021]; MOF[2016]).

최근 연구는 생태계서비스 중 공급서비스의 가치를 산정할 때 이 생태계서비스를 이용하기 위해 인간이 투입한 요소(물질, 에너지, 노동력 등)를 제외하고 평가대상 생태계가 순수하게 기여한 부분(자연기여율)만 고려해야 한다는 점을 강조하고 있다(Ahn *et al.*[2023]; Kang and Lee[2026]; Lee and Kang[2024]; Perez-Soba *et al.*[2019]). 우리나라 해양생태계의 일부 생태계서비스 가치를 평가한 기존 연구에 따르면 공급서비스인 수산물 생산의 가치가 가장 높지만(Kang[2013]; Kang[2021]; Kang[2024]), 이들 연구는 자연

기여율을 고려하지 않고 가치를 산정했기 때문에 해양생태계가 제공하는 혜택을 과대평가했을 가능성이 있다. 해양생태계를 관리하기 위해 정책방향을 적절히 설정하기 위해서는 관리대상 해역이 순수하게 기여하는 가치를 산정할 필요가 있다.

생물리적 관점에서 자연의 일과 인간의 노력을 동일한 기준으로 평가하는 에머지 방법론(Odum[1996])을 수산 분야에 적용한 국내외 연구는 많지 않다. 국외에서는 에머지 방법론을 갑각류(Lima *et al.*[2012]; Odum and Arding[1991]), 어류(Cristiano *et al.*[2023]; Fonseca *et al.*[2022]; Vassallo *et al.*[2007, 2009]; Wilfart *et al.*[2013]; Zhao *et al.*[2013]), 패류(Lu *et al.*[2022]; Williamson *et al.*[2015]) 양식의 환경영향과 지속가능성 평가에 적용한 사례가 있다. 이 중 Williamson *et al.*([2015])은 미국 체서피크만의 굴 양식, Lu *et al.*([2022])은 중국 저장성 굴 양식을 평가했다. 이들 연구에서 평가한 굴 양식 시스템은 모두 외부구입 에머지에 대한 의존도가 아주 높았지만, 어류나 갑각류 양식에 비해서는 환경에 미치는 영향이 더 작았다.

국내에서는 전체 수산업의 지속가능성을 평가한 사례(Kang and Nam[2019]; Sohn *et al.*[1996])를 비롯해 어류 양식(Kim *et al.*[2001]), 가막만 전체 양식어업 및 미국 FDA 패류수출 지정해역 패류 양식(Oh[2008]) 등 양식어업을 다룬 연구가 있다. 이외에도 에머지 방법론을 해역의 양식어업 환경용량 산정에 적용한 연구도 있다(Eum *et al.*[1996]). 그러나 굴 양식에 국한해 에머지 평가를 수행한 국내 연구는 아직 없다.

양식어업이 우리나라 수산물 공급에서 차지하는 역할이 증가하고 있는 만큼 양식어업의 지속가능성을 높이기 위해서는 다양한 관점의 연구를 바탕으로 정책 방향을 합리적으로 설정할 필요가 있다. 이 연구는 통합적 관점에서 생태계를 포함한 다양한 시스템의 특성을 파악하는 에머지 평가법을 이용해 국내 주요 양식 자원이면서 국외 평가 사례가 있는 양식 수산물인 굴을 대상으로 한 양식어업의 에머지 유입 특성, 환경영향 및 지속가능성을 평가하는 것을 목적으로 했다. 또한 양식을 통한 굴 생산이라는 해양생태계서비스(공급서비스)에 양식 해역의 자연환경이 어느 정도 기여하는지 평가해 향후 우리나라 해역이 제공하는 해양생태계서비스의 가치를 적절히 평가하는데 활용할 수 있는 기초 자료를 확보하고자 했다.

2. 연구 방법

2.1 에머지 평가 대상

이 연구에서 에머지 평가 대상으로 선정한 굴 양식 방법은 연승수하식이며, 양식 해역은 경상남도 통영시 인근 해역으로 설정했다. 연승수하식은 우리나라 굴 양식어업권 건수와 면적에서 가장 높은 비중을 차지하는 양식 방법이다. 2025년 기준 굴 양식 어업권에서 수하식 양식이 차지하는 비율은 건수 기준 86%, 면적 기준 77%이다(MOF[2026]). 경상남도 해역은 우리나라에서 수하식 굴 양식이 가장 활발하게 이루어지는 곳으로, 전체 수하식 어업권 건수의 71%(763건), 면적의 60%(5,322ha)가 분포하고 있다. 경상남도 굴

양식은 거의 대부분 수하식(건수의 99%, 면적의 96%)으로 이루어지고 있다.

굴 생산량과 생산금액에서 경상남도 양식장이 차지하는 비중이 가장 높고, 통영시는 경상남도의 주요 굴 양식 지역임을 고려해 경상남도 통영시 해역을 평가대상 공간으로 선정했다. 2024년 기준 경상남도 양식굴 생산량(244,888톤)은 전국 양식 생산량의 79%를 차지했다(MOF[2025]). 통영시에는 경상남도 굴 양식 어업권 건수의 43%, 면적의 40%가 있다(Tongyeong City[2025]). 그러나 개별 양식장을 대상으로 에머지 평가를 수행하기 위한 자료가 부족해 통영시의 특정 굴 양식장이 아니라 ‘참굴 양식 표준 매뉴얼’ (NIFS[2016])이 제시하는 굴 양식장 시설 조건을 평가에 활용했다. 경상남도의 경우 알굴을 주로 생산하기 때문에 에머지 평가에 양성 및 채취 기간 뿐만 아니라 박신 과정까지 포함해 에머지평가표를 작성했으며, 본문의 토의 전개 필요에 따라 박신 이전과 이후를 구분해 결과를 제시했다.

에머지 평가의 공간 규모는 NIFS[2016]가 제시한 연승수하식 시설 물량 자료를 활용하기 위해 1ha(수하연 5,000연 설치 기준)로 설정했다. NIFS[2016]는 길이 200 m, 폭 50 m의 참굴 양식시설 표준안을 제시하였다. 굴 양성 및 채취 기간을 에머지 평가의 시간 범위로 채택했는데, Lee *et al.*[2011]을 따라 270일(거제한산만의 굴 양식 순기)을 평가 기간으로 삼았다. 에머지 평가 기준 연도는 양식비용 자료(NIFS[2022]), 화폐 자료를 에머지량으로 변환하는데 필요한 최신 에머지화폐비율 이용 가능성(Kang[2026])을 고려해 2022년으로 설정했다.

2.2 에머지 평가 절차

에머지 평가는 물질량, 에너지량 등 생물리 자료를 에머지량으로

변환한 뒤 시스템의 특성을 파악하는 시스템 분석 방법론이다. 우리나라 굴 양식 시스템의 에머지 평가는 기존 국내 연구(예들 들어 Kang[2021]; Kang[2024])와 마찬가지로 Odum[1996]이 제시한 절차를 따랐다. 에머지 평가의 표준 절차는 에머지 평가대상 시스템 선정(경계 설정 포함), 에머지 평가모델 작성, 평가항목별 생물리 자료 수집, 에머지 평가표 작성, 에머지 지수 계산의 순서로 구성되어 있다. 이 연구의 평가 대상 시스템은 면적이 1 ha인 연승수하식 굴 양식이다. 우리나라 연승수하식 굴 양식을 평가하기 위해 작성한 에머지 평가 모델은 Fig. 1에 제시했다. 굴 양식의 에머지 평가표 작성에 필요한 자료 계산 과정과 출처는 Appendix에 제시했다.

2.3 에머지 지수 계산

연승수하식 굴 양식이 해역 환경에 미치는 영향과 지속가능성을 평가하기 위해 에머지산출비율(emergy yield ratio, EYR), 환경부하비율(environmental loading ratio, ELR), 에머지지속성지수(emergy sustainability index, ESI)를 계산했다. 이들 지수를 계산하는데 필요한 자료는 에머지평가표에 포함한 항목을 평가대상 시스템 외부에서 유입하는 재생가능에머지량(R), 시스템 내부에서 공급된 재생불가능에머지량(N), 시스템 외부에서 구입해 투입하는 에머지량(F)으로 구분한다. 그러나 이 연구의 대상인 굴 양식 시스템은 내부에서 기원한 재생불가능에머지 투입은 없는 것으로 보았다.

EYR은 굴 양식 시스템이 생산한 굴에 내재한 총 에머지량($Y=R+N+F$)을 외부구입 에머지량(F)으로 나눈 값이다(Odum[1996]). 외부구입 에머지량이 적을수록 EYR이 증가하는데, 이는 굴 양식 해역의 자연환경이 양식 생산에 더 큰 역할을 하며 사회에 기여하는 정도가 더 높다는 것을 의미한다. ELR은 굴 양식 활동이 양식 해역의 자연환경에 미치는 부정적 영향을 거시적 관점에서 나타내는

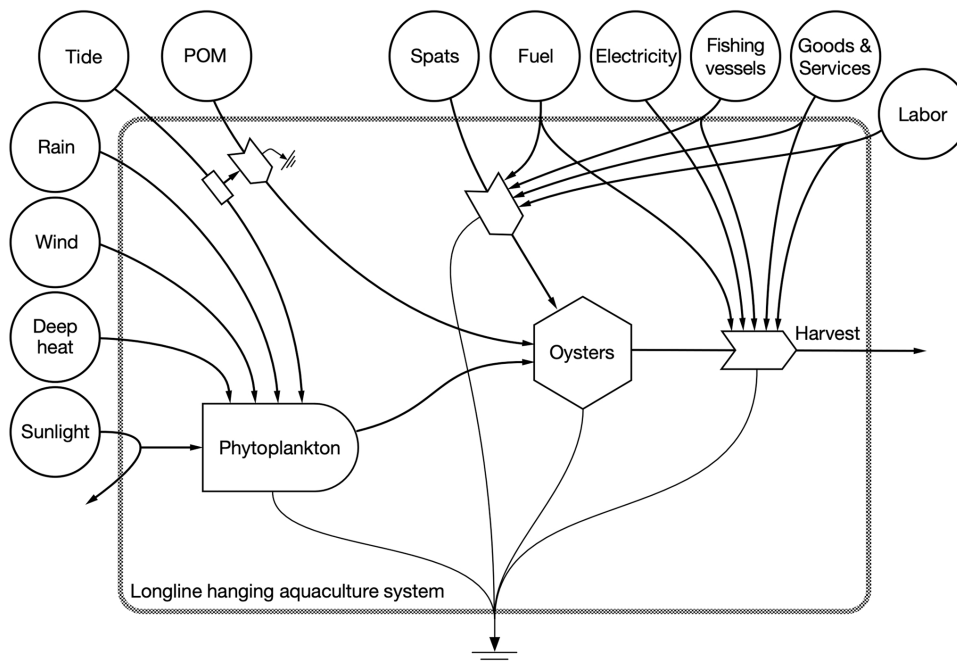


Fig. 1. Energy systems diagram of a longline hanging oyster aquaculture system in Korea. POM=particulate organic matter.

Table 1. Items included in the emergy table and the types and sources of raw data for longline hanging oyster aquaculture in Korea

Items	Raw data	Source
Sunlight	Annual insolation, J/m ² /yr	KMA[2022]
Deep heat	Heat flow, mW/m ²	Kim and Lee[2007]
Tide	Average tidal range, m	KHOA[2012]
Wind	Average wind speed, m/s	KMA[2022]
Rain, chemical	Annual rainfall, m/yr	KMA[2022]
Particulate organic matter	Outside supply, gC ¹⁾	estimated
Spats	Purchase cost, ₩/kg oyster meat produced	NIFS[2022]
Fuel	Fuel cost, ₩/kg oyster meat produced	NIFS[2022]
Electricity	Electricity cost, ₩/kg oyster meat produced	NIFS[2022]
Steel pipe anchors	Number of anchors used at installation	NIFS[2016]
Polypropylene ropes	Length of ropes used at installation, m	NIFS[2016]
Expanded polystyrene buoys	Number of buoys used at installation	NIFS[2016]
Fishing vessels	Tonnage of vessels used, ton ²⁾	estimated
Facilities	Depreciation, ₩/kg oyster meat produced	NIFS[2022]
Services	Production cost ³⁾ , ₩/kg oyster meat produced	NIFS[2022]
Labor	Labor cost, ₩/kg oyster meat produced	NIFS[2022]
Oyster meat	Production per hanging line, kg/line	NIFS[2022], Park & Kang[2022]

¹⁾The input of particulate organic matter from outside the aquaculture site was estimated over a 270-day cultivation period, using the method proposed by Lee et al.[2011].

²⁾Fishing vessel tonnage was estimated based on relevant national and local statistics.

³⁾Costs for labor, depreciation, and spat purchase were excluded.

데, 내부 투입 재생불가능에머지량(N)과 외부구입 에머지량(F)의 합계를 재생가능에머지량(R)으로 나누어 구한다. 굴 양식에 투입하는 에머지량 합계에서 재생가능에머지량이 차지하는 비율이 감소할수록 환경에 미치는 부정적 영향은 더 커진다. ELR은 일반적으로 재생불가능자원의 개발·이용이나 시스템 외부에서 구입해 투입하는 에너지와 물질 이용에 내재한 부정적 환경영향을 고려하는 지수이다. Brown and Ulgiati[2004]는 ELR이 3보다 작으면 환경영향이 적은 활동, 10보다 크면 부정적 영향이 아주 큰 활동, 3~10의 범위이면 중간 정도의 영향을 미치는 활동으로 구분했다.

ESI는 EYR을 ELR로 나눈 값으로, 굴 양식 시스템이 얼마나 지속가능한지 나타내는 지수이다. EYR이 클수록, ELR이 작을수록 지속가능성(ESI)은 증가한다. 양식 생산이 지속가능한지 여부를 판단하기 위한 구체적 기준을 설정할 만큼 연구 결과가 축적되어 있지는 않다. Brown and Ulgiati[2004]는 다양한 시스템에 대한 에머지 평가를 종합해 ESI의 의미를 해석하기 위한 개략적인 기준을 제시했는데, ESI가 1보다 작으면 지속가능하지 않은 시스템, 10보다 크면 장기적으로 지속가능한 시스템으로 구분한 바 있다.

2.4 에머지 평가 자료

굴 양식 에머지 평가에 필요한 자료는 국립수산물과학원, 해양수산부, 통계청, 기상청, 국립해양조사원이 제공하는 통계 및 보고서와 굴 양식을 다룬 학술논문을 활용했다(Table 1). 에머지 평가에 필요한 자료가 연간으로 제시된 경우는 앞에서 제시한 굴 양식 기간인 270일 기준으로 환산했다. 연승수하식 굴 양식장 시설 물량은 참굴 양식 표준매뉴얼(NIFS[2016]), 기타 자료는 참굴 양식장 경영비 분

석(NIFS[2022]) 자료(자연채묘 기준)를 이용했다. 필요한 경우 NIFS[2022]가 제시한 경영비 자료를 시장가격에 근거해 투입 물량으로 환산한 뒤 평가에 이용했다.

굴 양식에 투입하는 요소에 관한 자료는 재생가능에머지와 외부구입 에머지로 나누어 수집했다. 재생가능에머지는 일차에너지원, 이차·삼차에너지원, 입자상 유기물의 세 유형으로 구분했다. 일차에너지원은 지구생태계를 유지하는 기본 에너지인 태양, 지열, 조석을 포함하며, 이차·삼차 에너지원은 바람, 강수 등과 같이 일차에너지원의 상호작용으로 나타나는 재생가능에너지들이다. 입자상 유기물은 굴 양식장 외부에서 유입하는 굴 먹이원이다. 외부구입 에머지를 구성하는 항목 중 인간의 노력에 해당하는 것은 직접 노력과 간접 노력으로 구분했다. 노동(labor)은 굴 양식 과정에 직접 투입하는 노력을 의미하며, 간접 노력인 서비스(services)는 굴 양식에 투입하는 재료, 장비, 연료 등을 생산하는데 들어간 인간의 노력을 의미한다.

각 평가 항목의 에머지량 계산에 필요한 에머지원단위(Unit Emergy Value, UEV)는 기존 에머지 평가 문헌에서 확보했다. 모든 UEV는 지구생태계로 유입하는 재생가능에머지량이 12.0×10^{24} sej/yr(Brown et al.[2016])인 조건에서 계산한 값이나 이 기준에 맞게 환산한 값을 적용했다.

2.5 자연기여율

자연기여율은 “인간에게 제공되는 생태계서비스의 총가치 중 순수하게 자연이 제공하는 가치의 비율”이다(Lee and Kang[2024]). 이 연구에서는 Lee and Kang[2024]이 제시한 바와 같이 양식으로

Table 2. Emergy evaluation of a longline hanging oyster aquaculture system in Korea, including post-harvest shucking

No	Items	Data ¹⁾		Unit Emergy Value (UEV) ²⁾		UEV sources ³⁾	Emergy (sej)
Renewable sources							
Primary sources							
1	Sunlight	3.86E+13	J	1	sej/J	a	3.86E+13
2	Deep heat	1.35E+09	J	4.90E+03	sej/J	b	6.61E+12
3	Tide	6.34E+10	J	3.09E+04	sej/J	b	1.96E+15
	Sum						2.01E+15
Secondary & tertiary sources							
4	Wind	3.36E+09	J	520	sej/J	c	1.75E+12
5	Rain, chemical	3.50E+10	J	6.00E+03	sej/J	c	2.10E+14
	Largest of 2nd & 3rd sources						2.10E+14
Organic matter input							
6	Particulate organic matter	2.05E+06	gC	9.40E+09	sej/gC	d	1.93E+16
Purchased inputs							
7	Spats	2.48E+06	₩	1.91E+09	sej/₩	e	4.73E+15
8	Fuel	2.16E+11	J	1.43E+05	sej/J	f	3.09E+16
9	Electricity	1.19E+11	J	1.62E+05	sej/J	g	1.93E+16
10	Steel pipe anchors	3.00E+05	g	5.36E+09	sej/g	h	1.61E+15
11	Polypropylene ropes	1.98E+06	g	6.70E+09	sej/g	h	1.32E+16
12	Expanded polystyrene buoys	2.10E+05	g	6.70E+09	sej/g	h	1.40E+15
13	Fishing vessels	1.74E+05	g	1.68E+10	sej/g	i	2.92E+15
14	Facilities	3.79E+06	₩	1.91E+09	sej/₩	e	7.24E+15
15	Services	4.89E+07	₩	1.91E+09	sej/₩	e	9.33E+16
16	Labor	3.54E+07	₩	1.91E+09	sej/₩	e	6.76E+16
Production							
17	Oyster meat(wet weight)	1.50E+07	g	1.76E+10	sej/g		
	Oyster meat(energy)	5.28E+10	J	5.00E+06	sej/J		

¹⁾All data were standardized to a 270-day cultivation period for a 1 ha aquaculture site. Detailed calculations and data sources for each line item are provided in the Appendix.

²⁾All UEVs were either calculated based on the annual global emergy baseline of 12.0E24 sej/yr or converted to align with this baseline.

³⁾UEV sources: a) Odum *et al.*[2000], b) Brown *et al.*[2016], c) De Vilbiss *et al.*[2024], d) Kim *et al.*[2018], e) Kang[2026], f) Brown *et al.*[2011], g) Lee and Kang[2024], h) Buranakarn[1998], i) Odum[1996]

생산한 굴에 내재한 에머지량에서 양식 해역의 자연환경이 공급한 재생가능에머지가 차지하는 비율을 자연기여율로 계산했다. 양식 시설을 설치하고 치패를 수하한 이후 굴 성장은 태양, 바람, 조석 등과 같은 외부 에너지원과 이를 바탕으로 한 일차생산에 의존하며, 사람은 양식장을 주기적으로 관리하는 역할을 수행한다. 사람이 굴 양식 과정에 투입하는 재료, 선박, 노동력 등은 양식 해역 생태계가 공급한 것이 아니라 시스템 외부에서 투입한 비용이므로 해당 생태계가 순수하게 기여하는 생태계서비스에 포함하지 않는 것이 타당하다.

3. 결과 및 고찰

3.1 에머지 유입 특성 및 에머지원단위

1 ha 규모의 연승수양식 양식장에서 양식 기간(270일) 동안 굴을 키워 채취한 다음 알굴을 생산하는데 투입된 총 에머지량(Y)은 2.64×10^{17} sej였다(Table 2). 태양, 지열, 바람, 강수, 조석, 입자상 유기물 등 재생가능 외부요소가 기여한 에머지량(R)은 2.13×10^{16}

sej로, 총 에머지량의 8.1%였다. 재생가능에머지 투입량은 일차에너지원(태양, 지열, 조석)의 에머지 합계와 양식장 외부에서 유입한 입자상 유기물의 에머지량을 더해 구했다. 재생가능에머지의 대부분은 외부유입 입자상 유기물이 공급했는데, 재생가능에머지 투입량의 90.6%를 차지했다. 입자상 유기물을 제외한 재생가능 외부요소의 경우 중복 계산을 피하기 위해 일차에너지원(태양, 지열, 조석)과 이차·삼차에너지원(바람, 강수)으로 나눈 다음 Brown and Ulgati[2016]가 제시한 방법을 적용해 에머지 투입량을 계산했다. 일차에너지원의 에머지량 합계가 이차·삼차에너지원 중 에머지량이 가장 많은 항목(강수)의 에머지량보다 많아 일차에너지원의 에머지량 합계를 재생가능에머지 투입량에 포함했다.

치패, 연료, 전기, 재료 및 장비, 노동력 등 외부에서 구입해 투입한 에머지량의 합계(F)는 2.42×10^{17} sej였으며, 전체 에머지 투입량의 91.9%에 해당했다. 굴 양식에 투입하는 사람들의 직·간접 노력을 나타내는 서비스와 노동이 외부구입 에머지량의 66.4%로 가장 큰 비중을 차지했다. 양식 과정을 고려할 때 굴 양식 해역 내부에서 투입된 재생불가능에머지(N)는 없는 것으로 보였다.

Table 3. Comparison of the unit emergy values of oysters calculated in this study and those reported in previous studies

Oyster aquaculture system		%R ¹⁾	UEV (sej/J)	Source
Korea	Longline	11.6	3.48E6	This study (before shucking)
		8.1	5.00E6	This study (after shucking)
USA ²⁾	Raft	28.7	3.37E6	Williamson <i>et al.</i> [2015]
	Bottom cage	23.8	9.93E6	Williamson <i>et al.</i> [2015]
China	Raft	10.6	4.28E6	Lu <i>et al.</i> [2022]
	Longline	30.1	4.10E6	Lu <i>et al.</i> [2022]

¹⁾%R=fraction of renewable emery input in the total emery required for the oyster production.

²⁾The UEVs(unit emery values) for the U.S. case were converted to the annual global renewable emery baseline of 12.0E24 sej/yr. All UEVs in this table include the emery contribution of services and labor.

우리나라 연승수하식 굴 양식에 투입되는 총 에머지량에서 재생가능에머지량이 차지하는 비율은 박신 과정을 포함할 경우 8.1%, 박신 관련 항목(박신 시설 및 일용 인건비)을 제외할 경우 11.6%였다(Table 3). 미국과 중국 양식 굴 생산에 투입된 재생가능에머지 비율은 10.6~30.1%였는데(Williamson *et al.*[2015]; Lu *et al.*[2022]), 이들 사례는 박신 이전 채취 단계까지만 평가한 것으로 보인다. 미국 사례의 경우 뱀목식은 재생가능에머지 비율이 28.7%, 바닥망식은 23.8%였다(Williamson *et al.*[2015]). 미국 사례는 하천 영향을 받는 하구 및 만에 있어 하구순환에 기여하는 담수의 영향을 평가에 포함했기 때문에 재생가능에머지 기여 비율이 상대적으로 높게 나타난 것으로 보인다. 또한 뱀목식은 하구 해안에 설치되어 선박(인위적 투입 요소)을 이용할 필요가 없는 사례였기 때문에 외부구입 에머지 의존도가 낮게 나타난 것으로 보인다.

중국 굴 양식의 경우 뱀목식은 재생가능에머지 비율이 10.6%, 연승수하식은 30.1%였다(Lu *et al.*[2022]). 중국 사례에서 치패(콘크리트판 부착)를 구입해 사용하는 뱀목식 양식의 재생가능에머지 비율이 이 연구에서 평가한 시스템과 유사한 수준이었다. 중국 연승수하식은 양식어가가 자연채묘하는 시스템이기 때문에 치패를 재생가능에머지에 포함했는데, 채묘에 투입한 에머지 비용은 포함하지 않았다. 또한 중국 사례는 두 가지 양식 방식 모두에서 관리 및 채취에 투입하는 선박을 내부 요소로 간주하고 에머지 평가표에 포함하지 않았기 때문에 재생가능에머지 비율을 과대평가했을 가능성이 있다. 양식에 투입하는 선박은 해역 생태계 내부 구성요소가 아니라 외부에서 구입해 투입하는 요소로 분류하는 것이 타당하다. 선박을 외부구입 요소에 포함한다면 양식 굴 생산에서 재생가능에머지가 차지하는 비율은 감소할 수밖에 없다.

에머지 평가표를 이용해 계산한 우리나라 양식 굴의 UEV는 박신 과정을 포함할 때 5.00×10^6 sej/J, 제외하면 3.48×10^6 sej/J이었다(Table 3). 박신 과정을 평가에 포함하지 않은 미국과 중국 양식 굴의 UEV는 3.37×10^6 ~ 9.93×10^6 sej/J의 범위로, 우리나라 양식 굴의 UEV와 큰 차이를 보이지 않았다. 평가 사례별 UEV 차이는 양식이 이루어지는 해역의 환경적·생태적 특성, 양식 방법 및 각 방법별 투입 물량 차이를 반영한 결과로 볼 수 있다. 중국 사례의 경우 양식장 관리 및 수확에 투입하는 선박의 에머지를 외부구입 요소에 포함한다면 UEV가 더 커질 것으로 판단된다.

이 연구와 국외 사례에서 계산한 양식 굴의 UEV는 자연 서식지에 나타나는 굴(채취 이전)이나 판매하기 위해 채취한 자연산 굴의 UEV보다 높았다. 조건대에 서식하는 굴의 UEV(12.0×10^{24} sej/yr 기준 환산)는 2.40×10^5 sej/J(Odum and Collins[2001]), 판매를 위해 채취한 자연산 굴의 UEV는 1.58×10^6 sej/J(Lu *et al.*[2022])로 평가된 바 있다. 양식을 통해 굴을 생산하기 위해서는 양식 해역 생태계 외부에서 다양한 요소(자재, 선박, 노동력 등)를 인위적으로 투입해야 하기 때문에 자연에 서식하는 굴이나 판매 목적으로 채취한 자연산 굴보다 UEV(에머지 투입량을 굴 생산량으로 나눈 값)가 높을 수밖에 없다.

3.2 에머지 지수

우리나라 굴양식의 에머지산출비율(EYR)은 1.09(박신 과정 포함)로 나타났다(Table 4). 이는 비용(외부구입 에머지)에 비해 양식 생산을 통해 얻을 수 있는 에머지 편익이 크지 않음을 의미한다. 국외 사례와 비교하기 위해 박신 과정을 제외하고 계산한 EYR은 1.13으로, 미국 사례(뱀목식 1.40, 바닥망식 1.31)보다 낮았다. 중국 사례의 뱀목식(1.12)과 비슷하지만 연승수하식(1.43)보다는 낮았다. Table 3에 제시한 바와 같이 미국과 중국 사례에 비해 우리나라 연승수하식 굴 양식에 투입되는 재생가능에머지가 차지하는 비율이 낮기 때문에 나타난 결과이다. 재생가능에머지 비율이 우리나라 연승수하식 굴 양식과 비슷한 중국 뱀목식의 EYR은 이 연구 결과와 아주 유사했다. 중국 사례의 경우 양식 과정에 투입한 선박의 에머지를 포함할 경우 EYR이 더 감소할 것이다.

우리나라 연승수하식 굴 양식의 환경부하비율(ELR)은 박신 과정을 포함할 경우 11.38, 제외할 경우 7.62였다(Table 4). 박신은 육상에서 이루어지는 과정이기 때문에 이를 제외한 ELR을 기준으로 판단하면 연승수하식 굴 양식이 해역 환경에 미치는 영향은 중간 정도인 것(Brown and Ulgiati[2004])으로 구분할 수 있다. 미국 사례의 ELR은 뱀목식 2.5, 바닥망식 3.2로 낮았다. 중국 굴양식의 경우 뱀목식의 ELR은 8.43으로 비교적 높았지만, 연승수하식은 2.33으로 낮았다.

EYR과 ELR을 이용해 계산한 우리나라 굴양식의 에머지지속성 지수(ESI)는 박신 과정을 포함할 경우 0.10, 제외할 경우 0.15로 매우 낮았다(Table 4). 미국과 중국 사례의 ESI도 0.13~0.61의 범위로

Table 4. Comparison of emergy indices for longline hanging oyster aquaculture in Korea and those reported in previous studies

Oyster aquaculture system		EYR	ELR	ESI ¹⁾	Source
Korea	Longline	1.13	7.62	0.15	This study (before shucking)
		1.09	11.38	0.10	This study (after shucking)
USA	Raft	1.40	2.5	0.56	Williamson <i>et al.</i> [2015]
	Bottom cage	1.31	3.2	0.41	Williamson <i>et al.</i> [2015]
China	Raft	1.12	8.43	0.13	Lu <i>et al.</i> [2022]
	Longline	1.43	2.33	0.61	Lu <i>et al.</i> [2022]

¹⁾The ESI for the U.S. case was calculated using the EYR and ELR from Williamson *et al.*[2015].

*EYR = emergy yield ratio, ELR=environmental loading ratio, ESI = emergy sustainability index

낮은 수준이었다. 이 연구와 국외 사례에서 평가한 모든 양식 굴 생산 시스템의 ESI는 1에 미치지 못했다. 이는 현재의 방식과 조건에서는 대부분의 굴 양식 활동이 지속가능하지 않다는 것을 의미한다. 이런 결과는 양식을 통한 굴 생산이 외부구입 에머지에 크게 의존하고 노동 집약적이라는 점을 반영한다. Brown and Ulgiati[2004]는 ESI가 1보다 작은 시스템은 지속가능하지 않은 것으로 구분한 바 있다. 이 연구와 국외 사례에서 평가한 굴 양식은 Williamson *et al.*[2015]이 인용한 어류나 새우 양식에 비해 환경에 미치는 영향이 더 작고 지속가능성은 더 높았다.

굴 양식 시스템의 목적은 자연 상태에서 성장하는 굴을 수확하는 것보다 동일한 면적에서 더 많은 양의 굴을 생산하는데 있으므로 외부구입 에머지 투입은 불가피하다. Table 2에 제시한 외부요소 가운데 자연이 제공하는 재생가능에머지 유입량은 인간이 조절할 수 없기 때문에 굴 양식의 지속가능성을 높이려면 외부구입 요소 투입량을 줄여야 한다. 굴 양식에 필요한 외부구입 요소는 크게 자재, 선박, 노동력으로 구분할 수 있는데, 내구성이 좋은 자재 활용(자재 에머지 투입량 감소), 선박 이동거리가 짧은 곳에 양식장 설치(선박 관련 에머지 비용 감소), 자동화를 통한 노동력 투입 감소(노동 에머지 투입 감소)가 굴 양식의 지속가능성을 높이는데 기여할 수 있을 것이다. 미국의 굴 양식을 평가한 Williamson *et al.*[2015]은 양식장을 해안선에 더 가까운 곳에 설치하는 것이 양식 활동의 지속가능성 개선에 기여할 수 있다고 제시한 바 있다.

3.3 자연기여율

굴 양식 과정에는 해역 생태계 내부의 재생가능에머지 투입이 없으므로 양식 생산 굴의 총 에머지량에서 재생가능에머지가 차지하는 비율이 자연기여율에 해당한다. Table 3에 제시한 바와 같이 우리나라 연승수하식 굴 양식장에서 굴을 생산하는데 투입된 총 에머지량에서 재생가능에머지가 차지하는 비율은 박산 과정을 포함할 경우 8.1%, 제외할 경우 11.6%였다. 이는 굴 양식 해역의 자연 환경이 순수하게 기여한 비율이 각각 8.1%, 11.6%라는 것을 의미한다. 국외 사례의 경우 미국 양식 굴은 자연기여율이 뱀목식 28.7%, 바닥망식 23.8%였으며, 중국 사례는 뱀목식 10.6%, 연승수하식 30.1%였다.

우리나라 연승수하식 굴 생산의 자연기여율은 연근해어업을 통해 어획한 수산물의 자연기여율(2018~2020년 평균 60.2%, Kang and

Lee[2026])에 비해 아주 낮았다. 채묘부터 수확까지 모든 과정에 외부에서 구입한 자재, 장비, 연료, 노동력을 투입해야 하는 굴 양식과 달리 연근해어업의 경우 인간이 투입하는 에머지는 어획 활동에 국한하고 어획 이전에는 해양생태계를 유지하는 자연 요소가 에머지를 공급하기 때문에 나타난 차이이다. 따라서 수산물 품종과 생산 방식에 따라 자연기여율이 많이 다를 수 있기 때문에 해양생태계의 수산물 공급서비스 가치를 적절히 평가하기 위해서는 어법별, 품종별로 자연기여율을 계산할 필요가 있다. 특히 양식을 통한 수산물 생산이 증가하고 있다는 점을 고려할 때 최소한 주요 양식 품종에 대해서는 자연기여율을 별도로 계산해 우리나라 해양생태계의 공급서비스 가치 산정에 활용하는 것이 적절하다.

해양생태계의 수산물 공급서비스를 평가한 기존 국내 연구(Kang[2013]; Kang[2021])는 인간의 직·간접 노력인 노동과 서비스를 제외한 UEV를 사용해 생태계서비스의 가치를 산정했다. 그러나 여전히 이러한 UEV도 평가대상 해양생태계가 아닌 다른 생태계가 공급한 물질과 에너지를 포함하고 있기 때문에 공급서비스 가치를 과대평가할 가능성이 있다. 특히 양식을 이용한 수산물 생산은 이 연구와 기존 국외 사례가 보여주듯이 외부구입 에머지량이 해역 생태계가 공급한 재생가능에머지량보다 훨씬 많기 때문에 자연기여율을 고려하지 않을 경우 공급서비스 가치 산정에 더 큰 영향을 미칠 수 있다. 수산물 공급서비스 가치 산정에 이용한 UEV가 직·간접 노동을 포함하고 있을 경우 자연기여율을 고려하지 않는다면 연승수하식 생산 굴의 공급서비스 가치는 8.6배, 어선어업 수산물의 공급서비스 가치는 1.7배 과대평가할 가능성이 있다. 따라서 에머지 평가법을 이용하는 우리나라 해양생태계가 제공하는 수산물 공급서비스의 가치를 산정할 때 수산물 에머지량 계산에 활용하는 UEV에서 생태계 순수 기여분(즉, 생산물의 총에머지량에서 재생가능에머지량이 차지하는 비율) 비율이 어느 정도인지 파악해야 한다.

Lee and Kang[2024]이 언급한 바와 같이 생태계서비스 가치 중 자연과 인간의 기여를 구분하기 위해서는 공급(또는 생산) 관점의 평가가 필요하다. 사람들의 수요에 기반해 생태계서비스의 가치를 평가하는 경제학적 방법은 자연기여율을 적절히 평가하는데 한계가 있다. 재화나 서비스 생산에 투입된 모든 요소를 평가에 반영하는 공급 관점의 방법론인 에머지 평가법은 생태계서비스 공급에 자연 환경이 순수하게 기여한 부분을 과학적으로 평가할 수 있는 유용

한 방법론이다. 우리나라에서 생태계서비스의 가치를 평가하는데 주로 활용하고 있는 경제학적 방법론에 이 연구와 같이 에머지 평가법으로 계산한 생태계서비스 자연기여율 자료를 활용한다면 생태계 관리방향 수립에 더 의미 있는 정보를 확보할 수 있을 것으로 판단한다.

4. 결 론

에머지 평가법을 적용해 우리나라 연승수하식 굴 양식의 지속가능성을 평가하고, 굴 양식 해역 생태계가 수산물 공급서비스에 순수하게 기여하는 비율(자연기여율)을 산정했다. 굴 양식·채취 기간과 채취 후 박신 과정에 투입된 에머지 총량은 2.64×10^{17} sej였으며, 이 중 재생가능에머지는 8.1%, 외부구입 에머지는 91.9%를 차지했다. 박신 과정을 제외할 경우 재생가능에머지와 외부구입 에머지의 비율은 각각 11.6%, 88.4%였다. 연승수하식으로 생산한 굴의 UEV는 박신 이전 3.48×10^6 sej/J, 박신 후 5.00×10^6 sej/J로, 국외 굴 양식 사례와 큰 차이를 보이지 않았다. 굴 양식에 투입된 재생가능에머지 비율이 낮다는 것을 반영해 연승수하식 굴 양식의 에머지산출비율은 1.09(박신 과정 포함)로 낮았다. 이에 비해 굴 양식 활동이 해역 환경에 미치는 부정적 영향은 비교적 높았다(박신 이전 ELR=7.62, 박신 포함 ELR=11.38). 국외 사례와 마찬가지로 우리나라 연승수하식 굴 양식의 지속가능성은 아주 낮았다(박신 이전 ESI=0.15, 박신 포함 ESI=0.10). 굴 양식 해역이 굴 생산에 순수하게 기여한 비율인 자연기여율은 박신 이전 11.6%, 박신 포함시 8.1%였다.

굴 양식은 인위적 투입을 통해 해양생태계의 생산력을 높이고자 하는 활동이므로 외부구입 에머지 투입이 불가피하다. 태양, 바람, 조석 등 자연이 제공하는 요소(재생가능에머지)는 인간이 조절할 수 없기 때문에 굴 양식 시스템의 지속가능성을 높이려면 외부구입 요소 투입량을 줄여야 한다. 굴 양식에 필요한 자재, 선박, 노동력 등의 투입을 줄이고 이용 효율을 높이기 위한 방안을 체계적으로 추진할 필요가 있다. 내구성이 뛰어난 자재(부표, 연승줄, 수하연, 닻 등) 사용, 선박 투입량을 저감할 수 있는 원격 모니터링 또는 자동화 장비 도입, 노동력을 절감할 수 있는 장비·시설 활용 등을 통해 연승수하식 굴 양식 생산의 효율성을 높여야 한다. 중장기적으로는 인위적 에머지 투입량이 더 적은 굴 양식 방법을 도입하는 것도 필요하다.

이 연구는 굴 양식 단계 중 수하부터 박신까지만 평가 범위로 설정했기 때문에 채묘 및 단련 과정을 포함하지 못한 한계가 있다. 채묘(자연채묘, 인공종묘 생산)와 단련에 모두 인위적 노력이 투입된다는 점을 고려할 때 이 과정들까지 평가에 포함할 경우 굴 양식의 지속가능성과 자연기여율은 달라질 수 있다. 특히 인공종묘 생산이 증가하는 추세를 감안하면 굴 양식의 지속가능성을 더 명확히 평가하기 위해서는 채묘와 단련 과정을 에머지 평가에 반영할 필요가 있다. 또한 표준 매뉴얼을 바탕으로 한 추정값이 아니라 실제 양식장의 시설 물량과 관리 투입 물량 자료를 더 확보해 에머지 평가를 개선할 필요도 있다. 해면양식어업이 전체 수산물 생산량에서 차지

하는 비중이 증가하고 있다는 점을 고려할 때 굴 이외의 주요 양식 품종을 대상으로 에머지 평가를 수행해 양식어업 지속가능성을 높이는데 활용할 수 있는 정보를 제공할 필요가 있다.

후 기

이 연구는 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2024년)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- [1] Ahn, S.E. et al., 2023, Integrated assessment to environmental valuation via impact pathway analysis, Korea Environment Institute, Sejong.
- [2] Ahn, S.E., Kim, G., Rho, P.H. and Kwon, Y.H., 2015, Development and application of integrated measurement system to assess freshwater ecosystem services in Korea (II), Korea Environment Institute, Sejong.
- [3] Brown, M.T. and Ulgiati, S., 2004, Emergy analysis and environmental accounting, Encyclopedia of Energy, 2, 329-354.
- [4] Brown, M.T. and Ulgiati, S., 2016, Emergy assessment of global renewable sources, Ecol. Model., 339, 148-156.
- [5] Brown, M.T., Campbell, D.E., De Vilbiss, C. and Ulgiati, S., 2016, The geobiosphere emergy baseline: a synthesis, Ecol. Model., 339, 92-95.
- [6] Brown, M.T., Protano, G. and Ulgiati, S., 2011, Assessing geobiosphere work of generating global reserves of coal, crude oil, and natural gas, Ecol. Model., 222, 879-887.
- [7] Buranakarn, V., 1998, Evaluation of recycling and reuse of building materials using the emergy analysis method, Ph.D. Dissertation, University of Florida, Gainesville, FL, USA.
- [8] Cheon, G. et al, 2025, Development of policy decision support system based on ecosystem services assessment ('25), National Institute of Ecology, Seoecheon.
- [9] De Vilbiss, C., Arden, S., Brown, M.T., Campbell, D.E., Ma, X. and Ingwersen, W., 2024, The unit emergy value (UEV) library for characterizing environmental support in life cycle assessment, US Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- [10] Eum, K.H., Son, J.H., Cho, E.I., Lee, S.M. and Park, C.K., 1996, The estimation of carrying capacity in Deukryang Bay by EMERGY analysis, J. Korean Fish. Soc., 29(5), 629-636.
- [11] FEI (Fisheries Economics Institute), 2015, Survey report on aquaculture management, Fisheries Economics Institute, Seoul.
- [12] FEI, 2022, Fisheries economy report, Fisheries Economics Institute, Seoul.
- [13] Garratt, J.R., 1992, The Atmospheric Boundary Layer. Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press, Cambridge.
- [14] Jakobsen, H.H. and Markager, S., 2016, Carbon-to-chlorophyll ratio for phytoplankton in temperate coastal waters: seasonal

- patterns and relationship to nutrients, *Limnol. Oceanogr.*, 61, 1853-1868.
- [15] Jeong, S., Choi, H.J., Jung, J.H., Lee, S., Cho, S.J. and Nam, J., 2025, A study on utilization of strategies for marine ecosystem services, Korea Maritime Institute, Busan.
- [16] Joint Ministries, 2025, Development plan for the oyster aquaculture industry, Joint Ministries, Seoul.
- [17] Joo, W. et al., 2021, Assessment of key ecosystem assets and ecosystem services for conservatin planning, National Institute of Ecology, Seochon.
- [18] Kang, D. and Lee, S., 2026, Assessment of ecosystem contributions to provisioning services in South Korea using emergy methodology, *Ecol. Model.*, 516, 111561.
- [19] Kang, D. and Nam, J., 2019, Emergy evaluation of sustainability of Korean fisheries, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 22, 172-181.
- [20] Kang, D., 2013, Emergy-based value of the contributions of the Youngsan river estuary ecosystem to the Korean economy, *The Sea*, 18(1), 13-20.
- [21] Kang, D., 2021, Emergy-based value of ecosystem services provided by the Korean seas, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 24(3), 119-129.
- [22] Kang, D., 2024, Emergy-based value of ecosystem services provided by the Yellow Sea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 27(2), 121-130.
- [23] Kang, D., 2026, Emergy evaluation database for Korea, unpublished manuscript.
- [24] KEPCO (Korea Electric Power Corporation), 2023, Statistics of electric power in Korea, Korea Electric Power Corporation, Seoul.
- [25] KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Administration), 2012, Harmonic constants for tide and tidal current of the Korean coast, Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, Busan.
- [26] Kim, H.C. and Lee, Y., 2007, Heat flow in the Republic of Korea, *J. Geophys. Res.*, 112, B05413.
- [27] Kim, N., Ryu, J. and Kang, D., 2018, Relationship between renewable emergy inflow and ecosystem service provision of tidal flat ecosystems in Korea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 21(2), 130-138.
- [28] Kim, N.K., Son, J.H., Kim, J.L. and Lee, S.M., 2001, Evaluation of sustainability for olive flounder production by the systems ecology: I. EMERGY analysis of olive flounder production, *J. Korean Fish. Soc.*, 34(3), 218-224.
- [29] KMA (Korea Meteorological Administration), 2022, Annual Climatological Report, Korea Meteorological Administration, Seoul.
- [30] Lee, J.M., Jang, Y.C., Hong, S.Y., Lee, J.S., Kim, K.S., Choi, H.J. and Hong, S.W., 2016, A study on the annual inflow and its control of styrofoam buoy debris in oyster aquaculture farm in Gyeongnam, Korea, *Ocean Policy Research*, 31(1), 55-79.
- [31] Lee, S. and Kang, D., 2024, Improving ecosystem service evaluation using the ecological contribution concept and socio-ecological models, Korea Environment Institute, Sejong.
- [32] Lee, W.C., Cho, Y.S., Jong, S.J., Kim, H.C., Kim, J.B. and Lee, S.M., 2011, Estimation of ecological carrying capacity for oyster culture by ecological indicator in Geoje-Hansan bay, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 17(4), 315-322.
- [33] Lima, J.S.G., Rivera, E.C. and Focken, U., 2012, Emergy evaluation of organic and conventional marine shrimp farms in Guaraira Lagoon, Brazil, *J. Cleaner Prod.*, 35, 194-202.
- [34] Lu, D., Cheng, J., Feng, Z., Sun, L., Mo, W. and Wang, D., 2022, Emergy synthesis of two oyster aquaculture systems in Zhejiang province, China, *Sustainability*, 14, 13876.
- [35] MEA (Millenium Ecosystem Assessment), 2005, Ecosystems and human well-being: Synthesis, Island Press, Washington DC.
- [36] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), 2016, 2016 Pilot Study on the Development of Marine Spatial Planning System, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong.
- [37] MOF, 2023, Fifth Aquaculture Industry Development Master Plan ('24~'28), Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong.
- [38] MOF, 2025, Statistical Yearbook of Oceans and Fisheries, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong.
- [39] MOF, 2026, Satus of shallow-sea culture licenses, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong. <https://www.mof.go.kr/statPortal/stp/ofs/stl/ztlStatsList.do>
- [40] MOF and KOEM (Korea Marine Environment Management Corporation), 2023, Annual report on marine environment monitoring in Korea, MOF and KOEM, Busan.
- [41] NAS (National Institute of Agricultural Sciences), 2016, Korean food composition table, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju.
- [42] NASA, 2021, NASA Prediction of Worldwide Energy Resources, <https://power.larc.nasa.gov> (accessed 2021.06.01.)
- [43] NIFS (National Institute of Fisheries Science), 2016, Standard mannual for Pacific oyster aquaculture, National Institute of Fisheries Science, Busan.
- [44] NIFS, 2022, Value chain analysis of major aquaculture species: Pacific oyster, National Institute of Fisheries Science, Busan.
- [45] Odum, H.T. and Arding, J.E., 1991, Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador, Center for Wetlands, University of Florida, Gainesville, FL, USA.
- [46] Odum, H.T. and Collins, D., 2001. Transformities from ecosystem energy webs with the eigenvector method, in proc. of the Second Biennial Emergy Research Conference, Gainesville, FL, USA.
- [47] Odum, H.T., 1996, Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making, John Wiley & Sons, New York.
- [48] Odum, H.T., Brown, M.T. and Brandt-Williams, S., 2000, Folio #1: Introduction and global budget, Handbook of emergy evaluation, Center for Environmental Policy, University of Florida,

Gainesville, FL, USA.

- [49] Oh, H.T., 2008, Sustainability evaluation for shellfish production in Gamak Bay based on the systems ecology, Ph.D. Dissertation, Pukyong National University, Busan.
- [50] Park, B.Y. and Kang, J.H., 2022, A study on the characteristics of the cultured oyster marketing in Sacheon bay, J. Fish. Bus. Adm., 53(4), 69-78.
- [51] Perez-Soba, M., Elbersen, B., Braat, L., Kempen, M., van der Wijngaart, R., Staritsky, I., Rega, C. and Paracchini, M.L., 2019, The emergy perspective: natural and anthropic energy flows in agricultural biomass production, EUR 297275 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC116274.
- [52] Seo, S. and Park, Y.G., 2024, Distribution and environmental impact of expanded polystyrene buoys from Korean aquaculture farms, J. Mar. Sci. Eng., 12, 256.
- [53] Shin, Y.M., 2020, An analysis on significance and problems of aquaculture industry development act, J. Fish. Bus. Adm., 51(1), 1-17.
- [54] Sohn, J.H., Shin, S.K., Cho, E.I. and Lee, S.M., 1996, Emergy analysis fo Korean fisheries, J. Korean Fish. Sco., 29(5), 689-700.
- [55] Tongyeong City, 2025, Tongyeong statistical yearbook, Tongyeong City. <https://www.tongyeong.go.kr/00681/00827/04173.web>
- [56] Vassallo, P., Bastianoni, S., Beiso, I., Ridolfi, R. and Fabiano, M., 2007, Emergy analysis for the environmental sustainability of an inshore fish farming system, Ecol. Model., 7(2), 290-298.
- [57] Vassallo, P., Beiso, I., Bastianoni, S. and Fabiano, M., 2009, Dynamic emergy evaluation of a fish farm rearing process, J. Environ. Manage., 90(8), 2699-2708.
- [58] Wilfart, A., Prudhomme, J., Blancheton, J.-P. and Aubin, J., 2013, LCA and emergy accounting of aquaculture systems: towards ecological intensification, J. Environ. Manage., 121, 96-109.
- [59] Willamson, T.R., Tilley, D.R. and Campbell, E., 2015, Emergy analysis to evaluate the sustainability of two oyster aquaculture systems in the Chesapeake Bay, Ecol. Eng., 85, 103-120.
- [60] Zhao, S., Song, K., Gui, F., Cai, H., Jin, W. and Wu, C., 2013, The emergy ecological footprint for small fish farm in China, Ecol. Indic., 29, 62-67.

Received 30 June 2026

Revised 9 July 2026

Accepted 14 July 2026

Appendix. Notes to Table 2

1. Sunlight

Insolation=5.48E+09 J/m²/yr (KMA[2022])

Albedo=0.06 (NASA[2021])

Area=10,000 m²

Energy(J)=(Insolation)×(1-Albedo)×(Area)×(0.75 yrs)=3.86E+13 J
(for a period of 270 days from hanging to harvest, Lee *et al.*[2011])

2. Deep heat

Area=10,000 m²

Heat flow=60 mW/m² (Kim and Lee[2007])

Carnot efficiency=9.5% (Brown and Ulgiati[2016])

Energy (J)=(Area)×(Heat flow)×(0.001 W/mW)×(31536000 sec/yr)
×(Carnot efficiency)×(0.75 yrs)=1.35E+09 J

3. Tide

Area=10,000 m²

Average tidal range=1.54 m (KHOA[2012])

Seawater density=1,025 kg/m³

Energy (J)=(Density×Area×Tidal range)×(9.8m/s²)×(0.5×Tidal range)
×(706 cycles/yr)×(0.75 yrs)=6.34E+10 J

4. Wind

Area=10,000 m²

Average wind speed=2.4 m/s (KMA[2022])

Geostrophic wind=(Avg. surface wind speed)/0.8=1.9 m/s (surface
wind speed at 10 m over sea is about 80% of geostrophic wind,
www.kma.go.kr)

Drag coefficient=0.00164 (Garratt[1992])

Energy (J)=(1.225 kg/m³)×(Geostrophic wind)³×(Drag coefficient)
×(3.1536E7 s/yr)×(Area)×(0.75 yrs)=3.36E+09 J

5. Rain

Area=10,000 m²

Rain=0.99 m/yr (KMA[2022])

Energy (J)=(Area)×(Rain)×(1000 kg/m³)×(4720 J/kg)×(0.75 yrs)
=3.50E+10 J

6. Particulate organic matter(POM)

Water filtration rate of oysters=1.84 L/ind/hr (Lee *et al.*[2011])

Oyster density=50 ind/m³

Chl-a concentration=2.15 µg/L (2020~2023 average, MOF and
KOEM[2023])

POM filtration=(Water filtration rate)×(Oyster density)×(Chl-a conc.)
×(Chl-a/C ratio)×(24 hrs/day)×(Water depth)/1000000

=1.52 gC/m²/day(Chl-a/C ratio=32, Jakobsen and Markager[2016])

Total feeding=(POM filtration)×(10,000 m²)×(270 days of growth)
=4.10E+06 gC(for a period of 270 days from hanging to harvest,
Lee *et al.*[2011])

Outside supply=2.05E+06 gC (assumed 50% of POM from outside
the culture site, Lee *et al.*[2011])

7. Spats

Unit cost=165 ₩/kg oyster meat produced (NIFS[2022])

Total oyster meat production=15,000 kg (refer to note #17)

Total cost=(Unit cost)×(Oyster meat production)=2.48E+06 ₩

8. Fuel

Unit cost=468 ₩/kg oyster meat produced (NIFS[2022])

Unit fuel use=(1,148.74 ₩/liter)/Unit cost=0.41 liter/kg oyster meat
produced (fuel price from FEI[2022])

Total oyster meat production=15,000 kg (refer to note #17)

Total use=(Unit fuel use)×(Oyster meat production)×(35.3E6 J/liter)
=2.16E+11 J

9. Electricity

Unit cost=98 ₩/kg oyster meat produced (NIFS[2022])

Unit electricity use=(118.66 ₩/kWh)/Unit cost=0.83 kWh/kg oyster
meat produced (Electricity price for industrial use from KEPCO
[2023])

Total oyster meat production=15,000 kg (refer to note #17)

Total electricity use=(Unit electricity use)×(Oyster meat production)
×(9.6 MJ/kWh)=1.19E+11 J

10. Steel pipe anchors

(assumed hot-dipped galvanized steel pipes of 165.2mm×5t×5m)

Number of anchors used=40 pcs (NIFS[2016])

Weight=(Number of anchors used)×(100 kg/anchor)×(1000 g/kg)
=4.0E+06 g

Useful life=10 yrs (estimated)

Total use=(Weight/Useful life)×(0.75 yrs)=3.00E+05 g

11. Polypropylene ropes

Longlines(ø 22mm)=2.00E+03 m (NIFS[2016])

Weight=(Length used)×(230 g/m)=4.60E+05 g

Cross lines(ø 22mm)=1.00E+02 m (NIFS[2016])

Weight=(Length used)×(230 g/m)=2.30E+04 g

Anchor lines(ø 22mm)=4.00E+03 m (NIFS[2016])

Weight=(Length used)×(230 g/m)=9.20E+05 g

Buoy lines(ø 8mm)=1.55E+03 m (NIFS[2016])

Weight=(Length used)×(31 g/m)=4.81E+04 g

Hanging lines(ϕ 6mm)= $3.00\text{E}+04$ m (NIFS[2016])

Weight=(Length used) $\times$ (17.5g/m)= $5.25\text{E}+05$ g

Total weight at installation= $1.98\text{E}+06$ g (assumed replacement after harvest)

12. Expanded polystyrene buoys

480L buoys

Number of buoys used=4 pcs (NIFS, 2016)

Weight=(# of buoys used) $\times$ (20 g/L) $\times$ (480 L)= $3.84\text{E}+04$ g
(EPS density from Seo and Park[2024])

62L buoys

Number of buoys used=1,546 pcs (NIFS[2016])

Weight=(# of buoys used) $\times$ (20 g/L) $\times$ (62 L)= $1.92\text{E}+06$ g

Total weight installed= $1.96\text{E}+06$ g

Useful life=7 yrs (Lee *et al.*[2016])

Total use=(Total weight installed/Useful life) $\times$ (0.75 yrs)
= $2.10\text{E}+05$ g

13. Fishing vessels

Management vessel

Average tonnage=4.7 ton (average tonnage of management vessels used for hanging aquaculture in Namhae, Kyeongnam, data.go.kr)

Work days=43 days (estimated based on FEI[2015])

Useful life=15 yrs (NIFS[2016])

Used=(Tonnage) $\times$ (1E6 g/ton) $\times$ (Work days/365)/(Useful life)
= $3.69\text{E}+04$ g

Harvest barge

Average tonnage=15 ton (estimated)

Work days=20 days (estimated based on FEI[2015])

Useful life=10 yrs (NIFS, 2016)

Used=(Tonnage) $\times$ (1E6 g/ton) $\times$ (Work days/365)/(Useful life)
= $8.22\text{E}+04$ g

Transport barge

Average tonnage=10 ton (estimated)

Work days=20 days (estimated based on FEI[2015])

Useful life=10 yrs (NIFS, 2016)

Used=(Tonnage) $\times$ (1E6 g/ton) $\times$ (Work days/365)/(Useful life)
= $5.48\text{E}+04$ g

Total use= $1.74\text{E}+05$ g

14. Facilities

Depreciation= 253 ₩/kg oyster meat produced (NIFS[2022])

Total oyster meat production=15,000 kg (refer to note #17)

Total cost=(Unit cost) $\times$ (Oyster meat production)= $3.79\text{E}+06$ ₩

15. Services

Unit cost= $3,258$ ₩/kg oyster meat produced (NIFS[2022])

Total oyster meat production=15,000 kg (refer to note #17)

Total cost=(Unit cost) $\times$ (Oyster meat production)= $4.89\text{E}+07$ ₩

16. Labor

Unit cost= $2,360$ ₩/kg oyster meat produced (NIFS[2022])

Total oyster meat production=15,000 kg (refer to note #17)

Total cost=(Unit cost) $\times$ (Oyster meat production)= $3.54\text{E}+07$ ₩

17. Oyster production: oyster meat (wet weight after shucking)

Production per hanging line=3 kg/line (NIFS[2022]; Park and Kang [2022])

Total production=(Production per hanging line) $\times$ (5,000 lines) $\times$ (1000 g/kg)= $1.50\text{E}+07$ g

Total energy=(Production) $\times$ (0.84 kcal/g) $\times$ (4187 J/kcal)= $5.28\text{E}+10$ J
(calory content from NAS[2016])