한국해양환경 · 에너지학회지
J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy
Vol. 24, No. 3, 119-129, August 2021

https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2021.24.3.119
ISSN 2288-0089(Print) / ISSN 2288-081X(Online)

Original Article

해양생태계서비스의 에머지 가치 평가

강대석†
부경대학교 생태공학과 교수

Emergy-Based Value of Ecosystem Services Provided by the Korean seas

Daeseok Kang†
Professor, Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약

에머지 평가법을 활용해 우리나라 해양생태계를 유지하는 자연환경 요소와 이를 토대로 발생하는 해양생태계서비스의 가치를 평가했다. 평가 기준연도는 2018년, 공간적 범위는 배타적경제수역의 외측 경계로 설정했다. 평가 자료가 있는 공급서비스 3개(식량, 해양광물, 해양에너지), 조절서비스 2개(기후조절, 수질정화), 문화서비스 1개(여가·관광), 지원서비스 1개(일차생산) 등 총 7개의 해양생태계서비스를 평가대상으로 선정했다. 우리나라 해양생태계서비스의 토대가 되는 태양, 바람, 강수, 파도, 조석, 하천담수 등 자연환경 요소가 제공한 가치는 연간 43조 9,759억원으로 평가되었다. 평가대상 해양생태계서비스 가운데 가치가 가장 높은 서비스는 식량 공급(수산물 생산량으로 평가) 서비스로, 연간 가치는 52조 6,274억원이었다. 공급서비스, 조절서비스, 문화서비스의 가치를 모두 더한 해양생태계서비스의 총 가치(지원서비스는 중복계산 때문에 제외)는 연간 62조 1,471억원이며, 공급서비스가 대부분(97.7%)을 차지했다. 이는 해양수산업의 2018년 기준 총 부가가치보다 1.6배 높은 값이다. 해양생태계서비스의 에머지 기반 가치는 시장가격이나 선호도 기반 가치평가 연구를 이용해 계산한 가치보다 더 높았다. 지원서비스인 일차생산과 평가대상에 큰 차이가 있는 수질정화 서비스를 제외한 해양생태계서비스의 에머지 기반 가치는 경제학적 가치보다 최소 1.5배에서 최대 45.5배 컸으며, 합계 기준으로는 에머지 기반 가치가 7.6배 높았다.

Abstract – Values of ecosystem services provided by the Korean seas were calculated using the emergy methodology, along with the value of environmental sources that are essential in producing marine ecosystem services. The reference year for the valuation was 2018 with the outer limit of the exclusive economic zone chosen as the spatial boundary. Seven marine ecosystem services with available data for the valuation were selected: food, marine minerals, and marine energy for provisioning services, climate control and pollutant removal for regulating services, leisure and recreation for cultural services, and primary production for supporting services. The value of environmental sources was calculated as 43,976 billion ₩/yr. Food supply (fishery production) was the marine ecosystem service with the highest value at 52,627 billion ₩/yr among the seven ecosystem services valued. Total value of the marine ecosystem services (supporting services not included to avoid double counting) calculated in this study was 62,147 billion ₩/yr, with provisioning services accounting for 97.7%. This is 1.6 times greater than the total value added by the Korean marine and fisheries sector in 2018. Emergy-based values of five marine ecosystem services except primary production and pollutant removal were 1.5~45.5 times greater than economic values estimated using market prices or preference-based values. Sum of the emergy-based values of those five services was 7.6 times higher than that of their economic values.

Keywords: Marine ecosystem services(해양생태계서비스), Emergy valuation(에머지 가치평가)

†Corresponding author: dskang@pknu.ac.kr

1. 서 론

생태계가 인간에게 제공하는 혜택(MEA[2005])을 의미하는 생태계서비스는 2000년대 중반 이후 전 세계적으로 국가 차원에서 환경·생태 관리 정책의 핵심 개념이 되었다. 우리나라에서도 다양한 환경·생태 관련 법률과 국가계획이 생태계서비스 관련 내용을 포함하고 있다. 「생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률」은 제2조에서 생태계서비스를 "인간이 생태계로부터 얻는 … 혜택"으로 정의하고, 공급서비스, 환경조절서비스, 문화서비스, 지지서비스로 구분하고 있다. 또한 이 법률은 기본원칙, 국가생물다양성전략, 생물다양성 조사, 생태계 보전 및 복원, 생태계서비스 지불제 계약, 연구 및 기술개발 등에 대한 조항에서 생태계서비스를 다루고 있다. 자연환경보전법은 제9조에서 자연환경보전기본계획을 수립할 때 "자연환경·생태계서비스의 현황, 전망 및 유지·증진에 관한 사항"을 담도록 규정하고 있으며, 제48조에서 생태계보전협력금의 용도에 "생태계서비스 지불제계약의 이행"을 포함하고 있다.

「환경정책기본법」에 근거해 수립한 우리나라 환경분야 최상위 계획인 제5차 국가환경종합계획(2020~2040)은 정책방향, 목표, 국토환경관리 기본원칙, 환경관리 핵심전략 및 주요 정책과제 등에서 생태계서비스를 언급하고 있다(Joint Ministries[2020]). 「자연환경보전법」에 따라 수립한 제3차 자연환경보전기본계획(2016-2025)(ME[2015]), 「생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률」에 근거한 제4차 국가생물다양성전략(2019~2023)(Joint Ministries[2018])도 실천 목표, 추진전략, 추진과제 등에서 생태계서비스 관련 내용을 다루고 있다.

해양 분야의 경우 생태계서비스라는 용어를 사용하는 환경·생태 관련 법률은 없지만, 해양수산부 소관 법률에 근거해 수립하는 국가계획이 생태계서비스 관련 내용을 담고 있다. 「해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률」에 근거한 제2차(2019~2028) 해양생태계 보전·관리기본계획은 목표에 "해양생태계 서비스 혜택 증진"을 포함하고, 이 목표를 달성하는데 필요한 해양생태계서비스 관련 중점 추진과제를 제시했다(MOF[2019a]). 또한 「해양환경 보전 및 활용에 관한 법률」에 따라 수립한 제5차 해양환경종합계획(2021-2030)(MOF[2021a])과 「해양공간계획 및 관리에 관한 법률」에 근거를 둔 제1차 해양공간기본계획(2019~2028)(MOF[2019b])도 정책과제로 해양생태계서비스 관련 내용을 포함하였다.

해양생태계서비스 개념이 해양 환경·생태 관리에 실질적으로 기여하기 위해서는 해양생태계 유형별로 다양한 생태계서비스에 대한 가치평가 결과가 축적되어야 한다. UNEP-WCMC[2011]는 생태계서비스 가치평가 결과의 활용 분야로 생태계 중요성에 대한 교육·홍보, 국가개발계획 수립 지침, 정책이행과 개발사업 평가, 국가계획의 우선순위 설정, 녹색계정·녹색회계, 시장 기반 정책수단(세금, 벌금, 보조금 등) 기초 자료, 환경분쟁 보상금·배상금 결정 등을 제시한 바 있다. 우리나라 해양생태계가 제공하는 생태계서비스의 가치는 갯벌, 하구, 만, 해상·해안국립공원, 해수욕장 등 특정 해양생태계를 대상으로 선호도 기반 평가법(예를 들어 Yoo and Lee[2011]; MOF[2013]; Kwon *et al*.[2013]; Pyo[2017]; Choi and Oh[2018]; NPRI[2019]; Kim *et al*.[2021])이나 생물리적 평가법(예를 들어 Kang *et al*.[2006]; Kang[2013]; KNPS[2015]; NIFS[2016]; MOF[2016]; Kim *et al*.[2021])을 이용해 평가되었다.

해양생태계 관리 관련 국가정책 방향 논의와 의사결정에는 개별 해양생태계의 생태계서비스 가치뿐만 아니라 해양생태계 전체의 생태계서비스 가치평가도 중요한 기초 자료이다. 그러나 아직까지 우리나라 해양생태계 전체를 대상으로 생태계서비스의 가치를 종합적으로 산정한 경우는 없다. KIMST[2021]는 "생태계 기반 해양공간 가치 분석 및 해양공간계획을 지원할 수 있는 의사결정 지원 시스템"을 개발하기 위한 연구를 진행하고 있는데, 국가 관할해역 전체를 대상으로 해양생태계서비스 가치지도를 제작하고 있다. 국가 차원의 해양생태계서비스 지도가 완성되기 전까지 우리나라 해양생태계가 제공하고 있는 생태계서비스 가치의 규모를 파악해 해양생태계 관리방향의 설정에 참고하고, 향후 해양생태계서비스 가치지도를 검증하는데 활용할 수 있는 가치평가 자료가 필요한 시점이다. 따라서 이 연구에서는 생물리적 관점에서 생태계서비스의 가치를 평가할 수 있는 에머지 평가법을 적용해 평가 지표와 자료가 이용 가능한 해양생태계서비스를 대상으로 우리나라 전체 해양공간의 생태계서비스 가치를 평가하고자 하였다. 이 논문은 다음과 같이 구성하였다. 우선 연구 방법에서 에머지 평가법의 기본 개념, 평가대상 해양생태계서비스와 평가 자료를 소개하고, 에머지 평가 결과와 비교하기 위한 경제학적 가치 계산과정을 설명했다. 결과 및 고찰에서 자연환경 요소가 공급한 에머지량과 가치, 해양생태계서비스의 에머지 기반 가치를 제시하고 경제학적 가치와 비교했다. 마지막으로 결론에서 이 연구의 의미와 한계를 검토하고, 향후 연구방향을 제시했다.

2. 연구 방법

2.1 에머지 평가법

이 연구에서는 우리나라 해양생태계가 제공하는 생태계서비스의 가치를 평가하기 위해 생물리적 가치평가방법의 하나인 에머지 평가법을 이용했다. 에머지 평가법은 미국의 시스템생태학자인 Howard T. Odum이 개발한 시스템 평가법으로, 생물리 자료(에너지량, 물질량, 화폐량 등)를 이용해 생태계와 경제활동 등 다양한 시스템의 특성을 통합적 관점에서 평가한다(Odum[1996]). 생태계서비스 가치 평가는 이러한 시스템 특성 평가의 한 가지 사례이다. 에머지 평가법을 이용한 생태계서비스 가치평가의 첫 번째 단계는 평가대상 항목의 에머지량을 계산하는 것이다.

에머지(emergy)는 energy memory를 줄인 용어로, "한 가지 서비스나 생산물을 만드는 과정에 직접 그리고 간접으로 이미 소모한 한 종류의 이용 가능한 에너지"를 이른다(Odum[1996]). 이 정의에 따르면 에머지 평가법은 평가대상 항목이 만들어지는 과정에서 필요한 모든 요소의 양을 더하기 때문에 생산 관점의 평가법으로 구분할 수 있다(Odum[1996]). 즉, 생태계서비스의 가치는 이 서

비스가 만들어질 때까지 직·간접으로 투입된 모든 요소를 더해 평가한다. 에머지 평가법은 생태계서비스를 이용하는 소비자의 선호도를 바탕으로 생태계서비스 가치를 평가하는 방법인 선호도 기반 평가법(preference-based approaches)과 아주 다른 관점에서 가치를 평가한다. 이는 에머지 평가법의 가치평가 결과와 선호도 기반 가치평가의 결과를 직접 비교하는 것이 적절하지 않을 수 있음을 의미한다.

평가대상 생태계서비스의 양을 나타내는 생물리 자료와 각 자료에 적합한 환산인자를 곱해 각 생태계서비스의 에머지량을 계산한다. 이러한 환산인자가 필요한 이유는 "한 가지 서비스나 생산물"이 만들어지는데 필요한 요소들의 특성과 평가 자료의 단위가 아주 다양하기 때문이다. 다시 말해 각 요소마다 '일을 할 수 있는 능력'이 다르기 때문에 이를 감안하지 않고 각 요소의 생물리 자료를 단순히 더해 평가해서는 안 된다(Odum[1996]). 이는 평가 자료의 단위가 동일하더라도 마찬가지이다. 특성이 다른 요소를 적절히 비교하기 위해서는 모든 요소를 동일한 기준으로 먼저 환산해야 한다. 앞에서 제시한 에머지 정의에서 "한 종류의 이용 가능한 에너지"는 이러한 기준을 의미한다. 현재 에머지 평가법에서 채택한 기준은 태양에너지이며, 태양에너지 이외 모든 요소의 생물리 자료를 태양에너지 기준으로 환산한 다음 평가를 수행한다(Odum[1996]). 태양에너지가 기준인 경우 에머지를 태양에머지(solar emergy)로 불러야 하지만, 에머지 평가법에서 이용하는 다른 기준이 없기 때문에 에머지 문헌에서는 보통 에머지로 표현한다. 태양에너지가 기준인 경우 에머지의 단위는 solar emjoules(sej)이다.

생물리량 자료를 에머지량(태양에너지 기준)으로 바꾸기 위한 환산인자를 에머지 원단위(Unit Emergy Value, UEV)라고 하는데, 생물리 자료의 단위에 따라 sej/J, sej/g, sej/₩ 등과 같이 다양한 단위를 가질 수 있다. 즉, 생물리량 자료의 단위와 에머지 원단위의 단위는 서로 적합해야 한다. 예를 들어, 생물리량 자료가 에너지량(J/yr)인 경우 단위가 sej/J인 에머지 원단위를 곱해 에머지량을 계산하고, 물질량(g/yr)인 경우 단위가 sej/g인 에머지 원단위를 곱해 에머지량을 구한다.

에머지 평가의 일반적인 절차는 평가대상 선정, 평가경계 설정, 에머지 평가 모델 작성, 평가 기초자료 수집(평가대상 항목의 생물리 자료, UEV 등), 에머지 평가표 작성, 에머지 지수 계산으로 이루어져 있다(Odum[1996]). 이 연구의 목적은 평가 자료가 이용 가능한 해양생태계서비스의 가치를 평가하는데 있기 때문에 평가대상 선정, 평가경계 설정, 평가 기초자료 수집, 에머지 평가표 작성의 순서를 따라 연구를 수행했다. 에머지 평가는 Odum[1996]이 제시한 절차와 규칙을 따랐으며, 해양생태계를 대상으로 한 기존 국내 연구(Kang and Nam[2003]; Kang[2013]; Kang[2015]; Kang and Nam[2019])도 참고했다.

2.2 평가대상 해양생태계서비스

우리나라 해양생태계가 제공하는 생태계서비스의 분류는 MOF[2016]를 따랐다. MOF[2016]는 MEA[2005]의 생태계서비스 분류체계를 따라 총 24개의 해양생태계서비스(공급서비스 6개, 조절서비스 6개, 문화서비스 8개, 지원서비스 4개)를 구분했다. 이 가운데 에머지 평가 자료를 확보할 수 있는 7개의 해양생태계서비스의 가치를 평가하였다. 공급서비스는 식량(수산물), 광물자원(바닷모래 채취), 해양에너지(조력발전 및 해상풍력발전)의 가치를 평가했으며, 조절서비스 가치 평가는 기후조절(탄소 격리)과 수질정화(탈질)를 대상으로 하였다. 문화서비스는 여가·관광(해수욕장, 어촌체험휴양마을), 조절서비스는 일차생산의 가치를 평가했다.

공급서비스의 경우 식량 공급은 수산물 생산량(일반해면어업과 천해양식어업), 해양광물 공급은 바닷모래 채취량, 해양에너지 공급은 조력발전 및 해상풍력발전의 발전량을 이용해 생태계서비스의 가치를 계산했다.

조절서비스는 우리나라 해양생태계 전체를 대상으로 생태계서비스량을 평가한 연구가 아직 없어 평가에 필요한 자료가 있는 갯벌생태계만 가치산정 대상으로 삼았다. 따라서 이 연구에서 계산한 기후조절과 수질정화 가치는 우리나라 해양생태계가 제공하는 기후조절과 수질정화 서비스 가치의 최솟값으로 간주하는 것이 타당하다. 기후조절의 가치 계산에는 갯벌생태계가 격리하는 탄소량을 이용했다. 수질정화의 경우 수층 영양염류 제거량을 이용한다면 유기물 분해 결과 영양염류가 수층으로 다시 유입할 수 있으며 주변해역으로 유출하거나 주변해역에서 유입하는 등 영양염류의 단순한 위치 이동은 최종적인 오염물질 제거로 볼 수 없어 질소기체 형태로 해양생태계에서 빠져나가는 탈질만 고려했다. 갯벌생태계의 탄소격리량은 최근 전체 갯벌을 대상으로 추정한 연구결과가 있지만, 탈질량의 경우 아직까지 지역별, 유형별 갯벌을 충분히 대표할 만한 연구결과가 없다. 이 연구에서는 우리나라 갯벌의 약 84%가 서해안에 분포한다는 점(MOF[2021b])을 고려해 기존 탈질 연구 가운데 서해 중부에 있는 충청남도 태안 근소만 갯벌의 탈질률(Heo *et al.*[2011])을 에머지 평가에 적용했다. 하구 갯벌을 대상으로 한 탈질 연구도 있지만, 이 자료를 포함할 경우 수질정화 가치를 과대평가할 가능성이 있어 제외하였다.

문화서비스인 여가·관광의 가치는 해수욕장(전국 282개소)과 어촌체험휴양마을(2018년 기준 전국 101 개소, MOF[2019c])) 방문객 통계를 바탕으로 평가했다. 해수욕장의 경우 자연환경이 공급하는 에머지량(해수욕장의 자연환경을 유지하는데 필요한 에머지)과 해수욕장을 이용하는 사람들이 투입하는 에머지량을 더해 해양생태계서비스의 가치를 평가했다. 해수욕장이 제공하는 여가·관광 서비스를 평가하기 위한 공간 범위는 백사장뿐만 아니라 백사장에 인접한 해역까지 포함했으며, 해역의 경우 백사장 해안선에서 1 km 이내의 공간을 대상으로 하였다. 어촌체험휴양마을의 경우 사람들이 체험하는 해양공간 면적에 대한 정보가 없어 자연환경이 공급하는 에머지량을 가치 평가에 포함하지 못하고, 체험에 참여하는 사람들이 투입한 에머지량만 가치평가에 반영했다.

해양수산통계가 해양관광객 통계를 제공하기 때문에 여가·관광 가치 계산에 이 자료를 이용하는 것이 가장 이상적이다. 그러나 해양관광객이 누린 여가·관광 서비스는 해양생태계만이 아니라 해안

선 양쪽의 해양과 육상 생태계를 동시에 누리면서 얻은 혜택으로 보는 것이 타당하다. 그러나 현재 해양관광 통계는 해양관광객이 누린 혜택 가운데 해양생태계가 기여한 비율이 얼마인지 판단할만한 자료를 제공하지 않고 있다. 이 통계를 그대로 이용할 경우 여가·관광 가치를 과대평가할 가능성이 크다. 따라서 이 연구에서는 사람들이 누리는 가치가 모두 바다에서 유래한 것으로 볼 수 있는 해수욕장 및 어촌체험휴양마을 이용객 통계만 활용했다. 이렇게 계산한 여가·관광 가치는 조절서비스와 마찬가지로 해양생태계가 제공하는 생태계서비스 가치의 최솟값에 가까운 것으로 보아야 한다.

지원서비스에 해당하는 일차생산의 가치는 해양생태계의 연간 총일차생산량에 대한 평가이다. 이 연구에서는 태양, 바람, 강수, 파도, 조석, 하천담수 등의 자연환경 요소가 밀접하게 상호작용한 결과 해양생태계 먹이망의 토대인 일차생산이 발생한다는 점에서 연간 재생가능 에머지 유입량을 총일차생산의 에머지량으로 설정했다. 미국 국유림의 생태계서비스 가치를 평가한 Campbell and Brown [2012]도 이런 방식으로 지원서비스로서 일차생산의 가치를 산정했다. 일차생산 자료를 이용할 경우에는 총일차생산량(예, gC/yr)과 이에 맞는 에머지원단위(예, sej/gC)을 곱해 에머지량을 계산한다.

각 해양생태계서비스를 대상으로 계산한 에머지량(sej/yr)을 에머지화폐비율(sej/$, sej/₩ 등)로 나누어 생태계서비스의 가치를 화폐단위로 나타냈다(Odum[1996]). 일반적으로 에머지화폐비율은 한 나라의 사회경제활동에 일 년 동안 투입된 총 에머지량(sej/yr)을 그 해의 국내총생산(₩/yr)으로 나누어 구한다. 이 연구에 적용한 2018년 기준 에머지화폐비율은 3.34×10^9 sej/₩이다(Kang[2021]).

에머지 평가법을 이용해 계산한 가치가 어느 정도 수준인지 비교하기 위해 평가대상 해양생태계서비스의 경제학적 가치를 계산했다. 경제학적 가치 평가에 사용한 자료는 2018년 통계 또는 2018년 기준으로 환산한 값을 이용했다. 연간 금액 통계가 있는 경우 이 자료를 이용했다. 그렇지 않을 경우에는 해양생태계서비스 생산량과 단위당 시장가격이나 비시장가치를 곱해 경제학적 가치를 계산했다. 공급서비스의 경우 식량 생산은 해양수산통계연보의 수산물 생산금액, 해양광물은 바닷모래의 시장가격, 해양에너지는 조력발전소와 해상풍력단지 생산 전기의 가격(계통한계가격과 신재생에너지공급인증서 기준가격 이용)을 적용했다. 조절서비스인 기후조절은 탄소배출권 거래가격, 수질정화는 연안습지의 단위면적당 수질정화 가치를 이용했다. 문화서비스인 여가관광의 경우 해수욕장은 기존 연구의 경제학적 가치평가 자료, 어촌체험휴양마을은 소득금액 통계를 활용했다.

2.3 에머지 평가 자료

우리나라 해양생태계가 제공하는 생태계서비스의 가치를 평가하기 위한 에머지 평가의 공간 범위는 배타적 경제수역 바깥쪽 경계 이내의 해역(면적 374,934 km^2; MOLIT[2018a])을 대상으로 하였다. 해양생태계서비스의 가치평가 기준 연도는 2018년으로 설정했으며, 평가 자료는 문헌의 연간 자료를 직접 활용하거나 이를 연간 자료로 변환해 이용하였다.

에머지 평가표는 해양생태계서비스의 에머지량 계산뿐만 아니라 우리나라 해양생태계를 유지하는 토대인 자연환경 에머지 유입량에 대한 계산도 포함했다. 자연환경 에머지 유입량은 태양, 바람, 강수(화학에너지), 파도, 조석, 하천유입 담수(화학에너지)의 6가지 항목에 대해 계산했으며, 자연환경 에머지 총 유입량은 중복계산을 피하기 위해 조석과 하천유입 담수의 에머지량을 더한 값으로 하였다(Odum[1996]). 에머지 평가에 필요한 기초 자료는 통계청, 해양수산부, 기상청, 국립해양조사원이 발간하는 국가 통계와 보고서

Table 1. Items included in the emergy table and types of raw data used to calculate their emergy contents

Item	Raw Data
Environmental sources	
Sunlight	Average insolation, $kWh/m^2/day$
Wind	Average wind speed, m/s
Rain	Annual rainfall, m/yr
Wave	Wave energy potential, MW
Tide	Average tidal range, m
River, chemical	River inflows, m^3/yr
Marine ecosystem services	
Provisioning services	
Food	Fishery production, ton/yr
Marine minerals	Marine sand extracted, m^3/yr
Marine energy	Electricity generation, MWh/yr
Regulating services	
Climate control	Carbon sequestered, $gC/m^2/yr$
Pollutant removal	Denitrification rate, $gN_2/m^2/yr$
Cultural services	
Leisure and recreation	Visitors to beaches and fishing villages, people/yr
Supporting services	
Primary production	Total emergy inflow from environmental sources

및 학술문헌을 이용했다. 에머지 평가표에 포함한 각 항목의 에머지량 계산에 이용한 기초 자료의 유형과 단위를 Table 1에 제시했다.

Table 1에 포함한 항목의 에머지량 계산에 필요한 UEV는 기존 국내외 연구결과를 이용했다. UEV는 일차적으로 지구생태계의 재생가능에머지 유입량이 연간 15.83×10^{24} sej/yr(Odum *et al*.[2000])인 경우를 기준으로 계산한 값을 사용했다. UEV 계산에 활용한 재생가능에머지 기준이 다를 경우 15.83×10^{24} sej/yr 기준으로 환산해 에머지 평가에 적용했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해양생태계서비스의 에머지 토대

해양생태계로 유입해 생태계의 구조와 기능을 유지하는 자연환경 요소(Environmental sources, Table 2의 1~6번 항목)가 공급한 에머지는 사람들이 이용하는 해양생태계서비스의 기본 토대에 해당한다. 이들 자연환경 요소를 통해 유입한 재생가능 에머지량은 2018년 기준 연간 1.47×10^{23} sej/yr(조석과 하천유입 담수의 에머지량 합계)이었다(Table 2). 조석이 공급한 에머지량이 75.6%로 대부분을 차지했으며, 하천을 통해 바다로 유입하는 담수가 24.4%의 에머지를 공급했다. 이는 동일한 공간 범위를 대상으로 Kang and Nam[2019]이 계산한 2015년 기준 연간 재생가능 에머지 유입량과 동일한데, 조석은 해마다 달라지는 현상이 아니고 하천을 통한 담수 유입량의 경우 모든 하천을 대상으로 매년 이용 가능한 유량 자료가 없어 장기간 평균을 이용했기 때문이다. 태양, 바람, 강수, 파도가 공급한 에머지는 2018년 자료를 이용해 계산했지만, 각 요소의 에머지 공급량이 조석보다 적어 중복계산을 피하기 위해 재생가능 에머지 유입량 계산에 포함하지 않았다.

우리나라 해양생태계 유지에 필수적인 재생가능 에머지량을 화폐단위로 환산한 결과 2018년 기준 연간 43조 9,759억원에 이르렀다(Table 2). 비록 자연환경 요소가 기여하는 바는 시장경제의 가격체계에 포함되지 않아 사람들이 대부분 그 가치를 인식하지 못하지만, 에머지량을 토대로 계산한 가치는 자연환경 요소의 중요성을 잘 보여주고 있다. Kang and Nam[2019]이 2015년 기준으로 평가한 자연환경 요소의 가치는 연간 38.8조원으로, 이 연구에서 2018년 기준으로 계산한 가치가 더 높았다. 이는 우리나나라 경제의 2018년 기준 에머지화폐비율이 2015년에 비해 감소했기 때문이다. Odum [1996]에 따르면, 에머지화폐비율(=에머지량/화폐량)은 화폐의 구매력에 대한 척도이며 에머지화폐비율이 감소하는 현상은 에머지

Table 2. Emergy table for the valuation of ecosystem services provided by the Korean seas

No	Item	Raw Data		Unit Emergy Value (UEV)[a]		UEV Source[b]	Emergy (sej/yr)	Emvalue[c] (2018 ₩/yr)
Environmental sources								
1	Sunlight	1.76×10^{21}	J/yr	1	sej/J	A	1.76×10^{21}	5.27×10^{11}
2	Wind	1.94×10^{18}	J/yr	2450	sej/J	A	4.75×10^{21}	1.42×10^{12}
3	Rain	2.37×10^{18}	J/yr	1.25×10^{4}	sej/J	A	2.96×10^{22}	8.86×10^{12}
4	Wave	3.15×10^{17}	J/yr	5.10×10^{4}	sej/J	A	1.60×10^{22}	4.80×10^{12}
5	Tide	1.50×10^{18}	J/yr	7.39×10^{4}	sej/J	A	1.11×10^{23}	3.33×10^{13}
6	River, chemical	4.40×10^{17}	J/yr	8.13×10^{4}	sej/J	A	3.58×10^{22}	1.07×10^{13}
Marine ecosystem services								
- Provisioning services								
7	Food[d]	3.26×10^{12}	g/yr	5.39×10^{10}	sej/g	B	1.76×10^{23}	5.26×10^{13}
8	Marine minerals	1.20×10^{13}	g/yr	2.13×10^{9}	sej/g	C	2.55×10^{22}	7.64×10^{12}
9	Marine energy	5.05×10^{15}	J/yr	2.86×10^{5}	sej/J	D	1.45×10^{21}	4.33×10^{11}
Regulating services								
10	Climate control	7.14×10^{10}	gC/yr	1.24×10^{10}	sej/gC	E	8.85×10^{20}	2.65×10^{11}
11	Pollutant removal	2.54×10^{9}	gN_2/yr	1.17×10^{11}	sej/gN_2	F	2.97×10^{20}	8.89×10^{10}
- Cultural services								
12	Leisure & recreation	1.99×10^{16}	J/yr	varies			3.66×10^{21}	1.10×10^{12}
- Supporting services								
13	Primary production[e]	-		-			1.47×10^{23}	4.40×10^{13}

[a]All unit emergy values were adjusted to the global renewable emergy baseline of 15.83×10^{24} sej/yr.
[b]UEV sources: A) Odum *et al.* [2000], B) Kang and Nam [2019], C) Odum [2000], D) Odum [1996], E) Kim *et al.* [2018], F) Watanabe and Ortega [2011]
- The UEV for climate control was UEV of net primary production (NPP) calculated from the UEV of gross primary production (GPP) for the Korean tidal flats in the reference, assuming NPP as 90% of GPP.
- The UEV for N_2 was calculated using data for denitrification flows in both terrestrial and aquatic systems in Watanabe and Ortega [2011].
[c]Emvalues were calculated with the emergy-money ratio of the year 2018 for Korea (Kang [2021]).
[d]Fishery production in wet weight.
[e]Emergy of gross primary production is the total annual renewable emergy inflow to the Korean seas which is the sum of tidal and river (chemical) emergy.
* Detailed calculations for the line items are given in Appendix.

관점에서 바라본 인플레이션(에머지량에 큰 변화가 없는 상태에서 화폐량이 더 크게 증가)이다. 에머지화폐비율이 감소하면 화폐의 구매력이 떨어져 동일한 양의 화폐로 구매할 수 있는 에머지량은 줄어든다. 즉, 재화와 서비스에 내재한 에머지의 가치(또는 가격)는 더 상승한다. 최근 30년 동안 전 세계 경제와 우리나라 경제에 대한 에머지 평가에 따르면 에머지화폐비율이 지속적으로 감소하고 있다(Kang[2021]). 따라서 에머지 평가를 통해 해양생태계서비스의 가치를 평가하고자 할 경우 평가 기준 연도를 명확히 설정하고, 선정한 기준 연도의 에머지화폐비율을 이용하지 않으면 해양생태계서비스의 가치를 과소 또는 과대 평가할 가능성이 높다.

3.2 해양생태계서비스의 가치

3.2.1 공급서비스

해양생태계가 제공하는 공급서비스 가운데 수산물 생산량으로 평가한 식량 공급의 가치는 2018년 기준 연간 52조 6,274억원으로, 이 연구에서 평가한 일곱 가지 해양생태계서비스 중 가치가 가장 높았다(Table 2). 바닷모래 채취량을 이용해 평가한 해양광물 공급서비스의 가치는 연간 7조 6,380억원이었으며, 조력발전소와 해상풍력발전단지의 발전량으로 평가한 해양에너지 공급은 연간 4,328억원의 가치를 갖는 것으로 나타났다. 세 가지 공급서비스의 가치 합계는 연간 60조 6,982억원이었다.

에머지량을 토대로 평가한 세 가지 공급서비스의 가치는 시장가격을 이용해 평가한 것보다 훨씬 높았다(Table 3). 2018년 일반해면어업과 천해양식어업의 수산물 생산금액 합계는 7조 167억원이었다(MOF[2020]). 에머지량을 이용해 계산한 수산물의 가치(2018년 기준 연간 52.6조원)는 수산물 생산금액의 7.5배에 이르렀다. 해양생태계가 제공하는 공급서비스 가운데 원료물질 공급과 유전자원 공급의 가치는 관련 통계자료가 부족하여 평가하지 못했다. 그러나 연간 수산물 생산량을 이용해 평가한 식량 공급 서비스가 일부 원료물질의 가치도 포함하고 있다. 예를 들어, 이 연구에서 활용한 수산물 생산량 통계는 산업용 원료인 한천을 생산하는데 이용하는 우뭇가사리 등 해조류 생산량도 포함하고 있다. 향후 해양생태계가 제공하는 원료물질과 유전자원의 종류 및 양에 관한 통계 자료를 확보해 별도의 공급서비스로 가치평가를 수행할 필요가 있다. 또한 원료물질과 유전자원의 에머지 원단위 목록을 만드는 일도 함께 이루어져야 한다.

조건부가치측정법으로 평가한 바닷모래의 비시장가치(35,041원/m^3, Lee *et al*.[2018])를 적용할 경우 2018년 바닷모래 공급량의 가치는 연간 2,894억원이었다. 바닷모래 가격(25,000원/m^3, Yoon *et al*.[2017]이 정리한 가격 평균)을 이용해 계산할 경우 2018년 공급된 바닷모래의 가치는 연간 2,065억원이었다. 두 경우 모두 에머지량을 토대로 계산한 바닷모래 공급 서비스 가치의 4% 미만에 불과했다.

조력발전과 해상풍력발전을 통해 생산한 전기는 2018년 계통한계가격(95.16 원/kWh; KPX[2021])과 신재생에너지공급인증서(REC) 기준가격(87,833 원/REC; KPX[2019])을 적용해 계산할 경우 연간 1,109억원의 가치가 있는 것으로 나타났다. 에머지 평가법을 이용해 평가한 해양에너지 공급의 가치가 시장가격으로 계산한 것보다 3.9배 더 컸다.

3.2.2 조절서비스

조절서비스인 기후 조절(탄소 흡수·격리)과 수질 정화(탈질을 통한 질소 제거)의 2018년 기준 가치 합계는 연간 3,539억원이었다(Table 2). 갯벌의 탄소 격리량으로 평가한 기후조절 서비스는 연간 2,650억원, 탈질량으로 평가한 수질정화 서비스는 연간 889억원의 가치가 있는 것으로 나타났다.

Table 3. Comparison of emergy-based and market price-based values of the marine ecosystem services covered in this study

Item	Emergy-based value (E8 ₩/yr)	Economic value (E8 ₩/yr)	
		Value	Remarks
Provisioning services			
Food	526,274	70,167	MOF [2020], market price
Marine minerals	76,380	2,894	Calculated using a nonmarket value (Lee *et al*. [2018])
Marine energy	4,328	1,109	Calculated using SMP & REC[c] prices (KPX [2021])
Regulating services			
Climate control	2,650	58	Calculated using carbon price (KRX [2019])
Pollutant removal	889	17,676[a]	Calculated using per area value (MOF [2013]), preference-based value for all pollutants
Cultural services			
Leisure & recreation			
Beaches	10,539	7,511[b]	Kim *et al*. [2021], choice experiment
Fishing villages	411	275	Choi and Lee [2020], annual revenue
Supporting services			
Primary production	439,759	-	

[a]This preference-based value includes the contribution of intertidal flats in removing all types of pollutants that enter the Korean seas, while the emergy-based value only includes the removal of nitrogen through denitrification.
[b]The value in Kim *et al*.[2021] was converted to 2018 value using consumer price index.
[c]SMP = system marginal price, REC = renewable energy certificate.

에머지로 평가한 갯벌의 기후 조절 가치는 탄소배출권 거래가격으로 평가한 것보다 45.7배 더 높았다. 2018년 탄소배출권 거래량의 대부분을 차지하는 할당배출권의 평균 가격(22,237 원/톤CO_2, KRX[2019])을 이용해 계산한 갯벌의 기후 조절 서비스(Lee *et al*.[2021]의 결과를 CO_2량으로 환산하면 약 26만톤/년) 가치는 연간 58억원이었다. 미국 국유림의 생태계서비스 가치를 평가한 Campbell and Brown[2012]의 연구에서도 에머지로 평가한 탄소저감의 가치가 탄소 가격으로 산정한 가치보다 약 8.8배 높았다. 이는 탄소배출권 거래가격이 생태계가 제공하는 기후조절 서비스의 가치를 평가하기데 적절하지 않다는 것을 의미한다. 탄소배출권 거래가격은 시장의 수요와 공급에 의해 결정되기 때문에 대기 중 온실기체의 증가 때문에 발생하는 생태적, 사회경제적 피해를 다루지 못한다.

MOF[2013]는 기존 갯벌 가치평가 사례를 토대로 우리나라 갯벌이 제공하는 수질정화 서비스의 단위면적당 가치를 6,625 천원/ha/yr (2012월 12월 기준)으로 산정한 바 있다. 이 자료를 소비자물가지수를 이용해 2018년 기준 가치로 환산한 뒤 우리나라 전체 갯벌(2018년 기준 2,482 km^2, MOF[2020])의 수질정화서비스 가치를 평가하면 연간연간 1조 7,676억원이다. 이는 Table 2에서 에머지량을 토대로 계산한 가치보다 아주 높은 값이다. 탈질 과정에 의한 질소 제거만 평가한 이 연구와 달리 MOF[2013]의 수질정화 가치는 질소계 영양염류를 포함한 모든 오염물질의 정화 가치를 평가한 것으로 볼 수 있고, 가치평가 방법에도 차이(생물리적 방법 ↔ 선호도 기반 방법)가 있기 때문인 것으로 보인다.

에머지 평가의 경우 앞으로 질소 이외의 오염물질 제거에 갯벌 생태계가 기여하는 역할과 갯벌이 아닌 다른 유형의 해양생태계가 제공하는 수질정화 서비스에 대한 자료를 확보해 가치평가를 수행할 필요가 있다. Geber and Björklund[2002]가 스웨덴의 하수처리장 에머지 평가에서 계산한 단위 질소제거량당 에머지 투입량(1.04×10^{11} sej/gN; 이 연구에서 사용한 에머지 원단위 기준(15.83×10^{24} sej/yr)으로 환산한 값)을 이용해 갯벌이 제거한 질소를 하수처리장을 통해 제거한다고 가정하고 계산하면 갯벌의 수질정화 서비스(질소 제거 기준) 가치는 연간 1,579억원으로 올라간다. 이는 제거된 질소의 에머지량을 이용해 Table 2에서 계산한 가치보다 1.8배 높은 값이다.

또한 이 연구의 계산과정은 탈질을 통해 제거된 질소를 모두 오염물질로 간주한 것으로 볼 수 있는데, 질소계 영양염류는 해양생태계 구조와 기능 유지에 필수적인 요소이기 때문에 탈질로 제거된 총 질소량을 수질 정화 서비스로 보는 것이 타당한지 아니면 이 중 일부만 수질 정화 서비스로 간주할 것인지에 대한 연구가 필요하다. 이는 향후 다른 오염물질에 대해서도 수질 정화 서비스 가치를 평가할 경우 검토해야 할 사항이다.

3.2.4 문화서비스

해수욕장과 어촌체험휴양마을 방문객 통계를 이용해 계산한 여가·관광 서비스의 가치는 2018년 기준 연간 1조 950억원이었다. 이 가운데 해수욕장의 가치는 연간 1조 539억원, 어촌체험휴양마을의 가치는 411억원이었다.

에머지량을 토대로 계산한 여가·관광 가치도 경제학적 가치보다 더 큰 것으로 판단된다. 전국 해수욕장을 대상으로 2018년 기준 여가·관광의 경제학적 가치를 평가한 사례는 없지만, Kim *et al*.[2021]은 2016년 기준 전국 266개 해수욕장의 여가·관광 가치를 생물리적 방법(에머지 평가법)과 선호도 기반 방법(선택실험법)으로 계산해 비교했다. 이 연구에 따르면 에머지 평가법으로 계산한 가치는 연간 1조 1,266억원, 선택실험법에 근거한 가치는 7,261억원으로, 에머지 기반 가치가 선호도 기반 가치보다 약 1.6배 높았다. 이 연구의 평가대상 해수욕장 수가 더 많지만 해수욕장의 여가·관광 가치가 Kim *et al*.[2021]의 값보다 더 낮은 것은 해수욕장 방문객의 수가 더 적고 화폐단위 가치 환산에 적용한 에머지화폐비율이 더 낮기 때문이다. 어촌체험휴양마을의 에머지 기반 여가·관광 가치(연간 411억원)는 직접소득액의 약 1.5배였다. 어촌체험휴양마을의 경우 2018년 직접소득액이 약 275억원이었다(Choi and Lee[2020]).

해수욕장과 어촌체험휴양마을의 여가·관광 가치를 더 정확하게 계산하기 위해서는 체류시간, 공간범위, 평가 자료를 보완할 필요가 있다. 해수욕장과 어촌체험휴양마을의 가치 계산식은 이용객 체류시간을 포함하고 있기 때문에 최종 가치계산 결과는 체류시간에 따라 달라질 수밖에 없다. 그러나 이 연구에서는 해수욕장이나 어촌체험휴양마을 체류시간에 대한 자료가 거의 없어 체류시간을 조사한 일부 연구 자료를 바탕으로 해수욕장은 2시간, 어촌체험휴양마을은 1시간으로 단순하게 가정했다. 해수욕장의 경우 평가에 포함할 해역의 범위도 더 명확하고 합리적으로 설정할 필요가 있으며, 이 연구에서 포함하지 못한 백사장 인접 육지 부분을 공간범위에 추가할 필요가 있다. 어촌체험휴양마을의 경우 사람들의 체험 행위가 이루어지는 면적에 관한 자료가 없어 자연환경 요소의 에머지량을 가치 계산에 포함하지 못한 한계가 있다.

해양생태계를 대상으로 한 여가·관광 행위 가운데 통계가 있는 낚시어선 이용은 체류시간, 낚시활동에 투입하는 재화와 용역에 대한 자료가 없어 가치 계산에서 제외했다. 낚시어선 이용객은 2018년 기준 약 448만명(MOF[2021c])이다. 또한 최근 해양수산통계연보는 해양관광 이용객 통계를 제공하고 있는데, 2019년 기준 약 2.7억명이었다(MOF[2020]). 앞에서 언급한 해수욕장, 어촌체험휴양마을, 낚시어선 관련 관광객을 제외한 나머지 해양관광 이용객이 누린 서비스 가운데 해양생태계가 기여한 부분을 분리해 평가할 수 있는 방법을 찾기 위한 연구가 필요하다.

생태계서비스 가운데 가치 평가가 가장 미흡한 분야가 문화서비스인데, 세부 생태계서비스별 정의는 제시되었지만 생태계서비스의 양을 적절히 나타낼 수 있는 지표와 구체적인 평가 자료의 형태가 확립되지 않은 경우가 많다. 이에 따라 생물리적 평가법이건 선호도 기반 평가법이건 문화서비스에 속하는 개별 생태계서비스에 대한 가치 평가는 많이 이루어지지 않았다. 따라서 향후 에머지 평가에 이용할 정량 지표와 자료를 구체화하기 위한 연구가 필요하다.

3.2.5 지원서비스

일차생산 서비스의 가치는 2018년 기준 43조 9,759억원으로 평

가되었다. 이는 우리나라 해양생태계를 유지하는 연간 재생가능 에머지 유입량(Table 2의 조석과 하천담수 에머지량의 합계)을 화폐 단위로 환산한 값이다.

일차생산의 가치를 경제학적 방법으로 평가한 사례는 아직 없다. Table 3에 제시한 수산물 생산금액에 포함된 해조류 생산금액은 우리나라 해양생태계 순일차생산의 경제학적 가치를 일부 나타내고 있는데, 2018년 해조류 생산금액은 8,671억원(MOF[2020])이었다.

3.2.6 해양생태계서비스 가치 종합

이 연구에서 평가한 해양생태계서비스의 2018년 기준 총 가치(공급서비스, 조절서비스, 문화서비스의 가치 합계)는 연간 62조 1,471억원이었다. 일반적으로 개별 생태계서비스의 가치를 더해 총 가치를 계산할 때 지원서비스의 가치는 포함하지 않는데, 지원서비스는 다른 서비스가 발생하는 토대에 해당하므로 지원서비스를 총 가치 계산에 포함할 경우 중복계산이 발생하기 때문이다.

해양생태계서비스의 총 가치는 해양수산업이 창출한 부가가치(2018년 기준)보다 약 1.6배 높았다. 2017년 해양수산업의 부가가치는 39.8조원으로, 우리나라 국내총생산의 2.19%를 차지했다(Chang *et al*.[2021]). GDP 디플레이터 값을 이용해 2018년 기준으로 환산할 경우 해양수산업의 부가가치는 연간 약 40조원이었다. 전 세계 생태계가 제공하는 17가지 생태계서비스의 가치를 평가한 Costanza *et al*.[2014]에서도 이러한 경향을 확인할 수 있다. 전 세계 생태계서비스의 총 가치는 연간 124.8조 달러로, 2011년 전 세계 총생산(75.2조 달러)의 약 1.7배에 달하였다. 전 세계 해양생태계가 제공하는 생태계서비스의 총 가치는 연간 49.7조 달러로, 전 세계 총생산의 66%에 이르렀다.

에머지 평가법으로 계산한 생태계서비스의 가치는 경제학적 가치보다 높게 나타나는 경향이 있다. 이 연구에서도 에머지량을 토대로 계산한 개별 해양생태계서비스의 가치가 경제학적 가치보다 높았다. Table 3에 제시한 공급서비스, 조절서비스, 문화서비스 가치에서 평가대상에 큰 차이가 있는 수질정화 가치를 제외한 5개 서비스의 에머지 기반 가치 합계는 연간 62조 582억원으로, 경제학적 가치(연간 8조 2,014억원)의 약 7.6배였다. 이는 Odum[1996]이 지적한 바와 같이 재화나 서비스의 생산에 기여하는 인간의 노력만을 반영하는 시장가격 또는 선호도 기반 가치 평가와 달리 에머지 평가는 자연환경의 일과 인간의 노력을 동시에 포함하기 때문이다. 해양생태계를 대상으로 한 연구는 아니지만 Campbell and Brown[2012]도 에머지 평가를 통해 산정한 생태계서비스의 가치가 시장가격을 이용해 평가한 가치보다 더 높다는 것을 보여준 바 있다. 에머지 평가법으로 계산한 미국 국유림의 생태계서비스 가치 합계는 시장 가격을 이용해 평가한 것보다 약 2.8배 높았다. 그러나 Campbell and Brown[2012]의 평가에서 개별 생태계서비스의 경제학적 가치가 에머지 기반 가치보다 더 높은 경우도 있어, 에머지 기반 가치와 경제학적 가치 사이의 관계가 고정되어 있지는 않은 것으로 보인다.

MOF[2016]가 제시한 해양생태계서비스 가운데 이 연구에서 다루지 못한 항목을 포함할 경우 우리나라 해양생태계가 사회경제활동에 제공하는 생태계서비스의 총 가치는 더 커질 것이다. 해양생태계서비스의 총 가치를 제대로 평가하려면 생태계서비스별 정량 지표를 명확히 설정하고 관련 자료를 더 축적하는 일이 선행해야 한다. 특히 정량 지표 설정과 가용 자료의 한계 때문에 여가·관광 서비스를 제외하고는 국내외에서 아직까지 가치평가가 거의 이루어지지 않은 문화서비스의 경우 항목별 정량 지표와 평가 자료 형태를 확립하기 위한 연구가 시급하다.

4. 결 론

생태계서비스의 가치를 생물리적 관점에서 평가하는 에머지 평가법을 적용해 우리나라 해양생태계를 유지하는 자연환경 요소와 이를 토대로 발생하는 해양생태계서비스의 2018년 기준 가치를 산정했다. 평가 자료가 이용 가능한 7개의 해양생태계서비스를 평가 대상으로 선정했는데, 공급서비스 3개(식량, 해양광물, 해양에너지), 조절서비스 2개(기후조절, 수질정화), 문화서비스 1개(여가·관광), 지원서비스 1개(일차생산)를 포함했다.

우리나라 해양생태계서비스의 토대가 되는 태양, 바람, 강수, 파도, 조석, 하천담수 등 자연환경 요소가 제공한 가치는 연간 43조 9,759억원이었다. 이 연구에서 평가한 7개 해양생태계서비스 가운데 가치가 가장 높은 서비스는 식량 공급(수산물 생산량으로 평가) 서비스로, 연간 52조 6,274억원의 가치가 있는 것으로 계산되었다. 공급서비스, 조절서비스, 문화서비스의 가치를 모두 더한 해양생태계서비스의 총 가치(지원서비스는 중복계산 때문에 제외)는 연간 62조 1,471억원이었는데, 공급서비스가 대부분(97.7%)을 차지했다. 해양생태계서비스의 에머지 기반 가치는 시장가격이나 선호도 기반 가치평가 연구를 이용해 계산한 경제학적 가치보다 더 높았다. 평가대상에 큰 차이가 있는 수질정화 서비스를 제외할 경우 개별 해양생태계서비스의 에머지 기반 가치가 경제학적 가치보다 최소 1.5배, 최대 45.5배 더 컸으며, 비교대상 생태계서비스 가치의 합계로는 에머지 기반 가치가 7.6배 더 높았다.

이 연구에서는 해양생태계서비스의 일부만 평가했기 때문에 연간 62.1조원이라는 해양생태계서비스 총 가치는 우리나라 해양생태계로부터 기대할 수 있는 가치의 최솟값으로 볼 수 있다. 제한적인 평가에서도 해양생태계서비스의 가치는 해양수산업의 부가가치 총액(2018년 기준)보다 1.6배 높았다. MOF[2016]가 제시한 해양생태계서비스 가운데 이 연구에서 다루지 못한 항목을 포함할 경우 우리나라 해양생태계가 사회경제활동에 제공하는 생태계서비스의 총 가치는 더 커질 것이다.

가치평가 철학이 서로 다른 생물리 평가법과 선호도 기반 평가법으로 산정한 해양생태계서비스의 가치를 해양생태계 관리에 어떻게 유용하게 활용할 것인지 적절한 방향을 설정하려면 가치평가 자료가 좀 더 축적되어야 한다. 에머지 평가법의 경우 최소한 개념적으로는 모든 종류의 해양생태계서비스 가치를 평가할 수 있다. 그렇지만 에머지 평가의 일차 목적인 에머지량 계산에 필요한 생

물리 자료를 충분히 확보할 수 없는 경우가 많다. 또한 화폐가치로 환산해 제시하지만 정책결정자나 일반인이 그 근거자료인 에머지량을 이해하기 쉽지 않기 때문에 가치계산 결과의 수용성이 낮아 이를 개선하기 위한 전략이 필요하다. 선호도 기반 평가의 경우 많은 사람들이 쉽게 이해할 수 있어 수용성이 높기 때문에 정책적으로 더 유용하게 활용되지만, 일부 해양생태계서비스에 대해서는 평가 수단이 없다는 한계가 있다. 예를 들어 지원서비스인 일차생산의 가치를 선호도 기반 평가법으로 평가한 사례는 아직 없다. 이 경우 생물리 평가법으로 산정한 가치를 활용하는 것을 고려할 수 있다. 선호도 기반 평가법으로 가치를 평가할 수 없는 해양생태계서비스에 대해서는 생물리 평가법으로 계산한 가치를 이용해 이들 생태계서비스가 가지고 있는 가치의 대략적 수준을 간접적으로 평가하거나 환경 및 사회경제 여건 변화에 따라 나타나는 가치 변화를 파악해 해양생태계 관리에 활용할 수 있을 것이다.

이 연구에서 평가한 일부 해양생태계서비스의 경우 공간 범위 설정, 평가 자료의 대표성 및 정확성 등에 한계가 있다. 이는 정책적으로 의미 있는 가치평가 결과를 만들어내기 위해 향후 연구에서 해결해야 할 과제이다. 특히 조절서비스와 문화서비스는 평가 자료가 충분히 축적되지 않아 전체 해양생태계가 제공하는 가치를 평가하지 못했다. 이 연구에서 계산한 조절서비스와 문화서비스의 가치는 현재 활용 가능한 자료(갯벌 대상)를 토대로 산정할 수 있는 가치로, 우리나라 해양생태계가 제공하는 최솟값으로 간주해야 한다. 또한 우리나라 해양생태계가 제공하는 해양생태계서비스의 총가치를 제대로 평가하려면 아직까지 정량 지표와 자료의 형태가 확립되지 않은 생태계서비스에 대해 이를 명확히 설정하고 관련 자료를 더 축적해야 한다. 국내외 연구결과를 바탕으로 아직 가치평가를 수행하지 못한 해양생태계서비스 가운데 핵심 생태계서비스가 무엇인지 판단하고, 이들 생태계서비스에 대한 연구를 우선 추진할 필요가 있다. 특히 정량 지표 설정과 가용 자료의 한계 때문에 여가·관광 서비스를 제외하고는 국내외에서 아직까지 가치평가가 거의 이루어지지 않은 문화서비스의 경우 항목별 정량 지표와 평가 자료의 형태를 확립하기 위한 연구가 시급하다.

후 기

이 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

[1] Archer, C.L. and Jacobson, M.Z., 2005, Evaluation of global wind power, J. Geophys. Res., 110(D12), http://dx.doi.org/10.1029/2004JD005462.

[2] Campbell, E.T. and Brown, M.T., 2012, Environmental accounting of natural capital and ecosystem services for the US National Forest System, Environ. Dev. Sustain., 14, 691-724.

[3] Chang, J., Jeong, S., Park, D. and Kim, T., 2021, Analysis on marine and fisheries sectors(2020) - Using 2016-2017 input-output tables, Korea Maritime Institute, Busan.

[4] Choi, A.S. and Oh, C.-O., 2018, Economic valuation of the ecosystem services in Seocheon intertial mudflats, Environ. Res. Econ. Rev., 27(2), 233-260.

[5] Choi, K.C. and Lee, S.G., 2020, The effects of fishing village experience on family relationships, J. Fish. Bus. Adm., 51(2), 107-121.

[6] Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S.J., Kubiszewski, I., Farber, S. and Turner, R.K., 2014, Changes in the global value of ecosystem services, Glob. Environ. Change, 26, 152-158.

[7] Garratt, J.R., 1992, The Atmospheric Boundary Layer, Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press, Cambridge.

[8] Geber, U and Björklund, J., 2002, The relationship between ecosystem services and purchased input in Swedish wastewater treatment systems - a case study, Ecol. Eng., 19, 97-117.

[9] Heo, N., Lee, J., Choi, J.U. and An, S., 2011, Nitrogen removal via sediment denitrification and its seasonal variations in major estuaries of south coast of Korean peninsula, The Sea, 16(2), 81-96.

[10] HRFCO (Han River Flood Control Office), 2021, Korea Annual Hydrological Report, http://www.hrfco.go.kr/web/sumun/floodgate.do (accessed 2021.03.10.)

[11] Joint Ministries, 2018, Fourth National Strategy on Biodiversity (2019~2023).

[12] Joint Ministries, 2020, Fifth Comprehensive National Environmental Plan (2020~2040).

[13] Kang, D. and Nam, J., 2003, Emergy-based valuation of marine environmental resources and policy implications, Korea Maritime Institute, Seoul.

[14] Kang, D. and Nam, J., 2019, Emergy evaluation of sustainability of Korean fisheries, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 22(3), 172-181.

[15] 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.

[16] Kang, D., 2015, Emergy evaluation of the Korean economy and environment: implications for the valuation of marine ecosystem services, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 18(2), 102-115.

[17] Kang, D., 2021, Emergy evaluation database for Korea, unpublished manuscript.

[18] Kang, D., Nam, J. and Lee, S., 2006, Emergy valuation of a tidal flat ecosystem in the southwestern coast of Korea and its comparison with valuations using economic methodologies, J. Environ. Sci. Int., 15(3), 243-252.

[19] KEA (Korea Energy Agency), 2019, New and Renewable Energy Statistics 2018, Korea Energy Agency, Ulsan.

[20] KEEI (Korea Energy Economics Institute), 2020, Yearbook of Energy Statistics, Korea Energy Economics Institute, Ulsan.

[21] KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Administration), 2012, Harmonic constants for tide and tidal current of the Korean coast, Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, Busan.
[22] Kim, M., Oh, C.-O. and Kang, D., 2021, "The valuation of cultural ecosystem services provided by beaches – A comparison between stated-preference and biophysical valuation methods", 2021 Spring Conference of the Korea Environmental Policy and Administration Society, February 25, 2021.
[23] 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.
[24] KIMST (Korea Institute of Marine Science and Technology Promotion), 2021, Marine ecosystem-based analysis and decision-making support system development for marine spatial planning, Korea Institute of Marine Science and Technology Promotion, Seoul.
[25] KNPS (Korea National Park Service), 2015, Emergy valuation of national parks of Korea, Korea National Park Service, Seoul.
[26] KPX (Korea Power eXchange), 2019, 2018 Renewable Energy Certificate Price, https://onerec.kmos.kr/ (accessed 2021.08.11.)
[27] KPX, 2021, Electric Power Market Statistics, KPX, Naju.
[28] KRX (Korea Exchange), 2019, 2018 Korea Emissions Trading Market Report, Korea Exchange, Busan.
[29] Kwon, Y.-J., Yoo,S.-H. and Park, S.-H., 2013, Assessment of the environmental value of the Geum-river estuary, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 19(5), 417-429.
[30] Lee, J., Kim, B., Noh, J., Lee, C., Kwon, I., Kwon, B., Ryu, J., Park, J., Hong, S., Lee, S., Kim, S., Son, S., Yoon, H.J., Yim, J., Nam, J., Choi, K. and Khim, J.S., 2021, The first national scale evaluation of organic carbon stocks and sequestration rates of coastal sediments along the West Sea, South Sea, and East Sea of South Korea, Sci. Total Environ., 793, 148568.
[31] Lee, U., Chang, J. and Kang, M., 2018. Supply chain management (SCM) strategies of construction sand – Focusing the re-estimation of the value of sea sand, Korea Maritime Institute, Busan.
[32] Manwell, J.F., McGowan, J.G. and Rogers, A.L., 2010, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, John Wiley & Sons, New York.
[33] ME (Ministry of Environment), 2015, Third Basic Plan for Conservation of Natural Environment (2016-2025), Ministry of Environment, Sejong.
[34] MEA (Millenium Ecosystem Assessment), 2005, Ecosystems and human well-being: Synthesis, Island Press, Washington, DC.
[35] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), 2013, 2012 National Survey Coastal Wetlands, Ministry of Oceans and Fisheries, Seoul.
[36] MOF, 2016, 2016 Pilot Study on the Development of Marine Spatial Planning System, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong.
[37] MOF, 2019a, Second Basic Plan on Conservation and Management of Marine Ecosystems (2019~2028), Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong.
[38] MOF, 2019b, First Marine Spatial Master Plan (2019~2028), Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong.
[39] MOF, 2019c, Third Basic Plan for the Development of Fishing Villages and Fishery Harbors, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong.
[40] MOF, 2020, Statistical Yearbook of Oceans and Fisheries, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong.
[41] MOF, 2021a, Fifth Comprehensive Plan for Marine Environment (2021-2030), Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong.
[42] MOF, 2021b, Tidal flats of Korea, https://www.meis.go.kr/mes/mudFlat/ internalSituation/view1.do (accessed 2021.05.01.)
[43] MOF, 2021c, Information on the Operation of Recreational Marine Fishing Boats, https://www.mof.go.kr (accessed 2021.04.30.)
[44] MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2018a, Coastal information Q&A, http://www.molit.go.kr/USR/policyTarget/m_24066/ dtl.jsp?idx=203 (accessed 2018.05.12.)
[45] MOLIT, 2018b, 2019 Aggregate Demand and Supply Plan, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong.
[46] NASA, 2021, NASA Prediction of Worldwide Energy Resources, https://power.larc.nasa.gov (accessed 2021.06.01.)
[47] NIFS (National Institute of Fisheries Science), 2016, Emergy valuation of the Gangjin Bay ecosystem in the south sea of Korea, National Institute of Fisheries Science, Busan.
[48] NPRI (National Park Research Institute), 2019, 2019 Emergy valuation of ecosystem services provided by national parks, National Park Research Institute, Wonju.
[49] Odum, H.T., 2000, Folio #2: Emergy of global processes, Handbook of emergy evaluation, Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL, USA.
[50] Odum, H.T., 1996, Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making, John Wiley & Sons, New York.
[51] 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.
[52] Pyo, H., 2017, Estimating the economic value of the East Sea beach using individual travel cost method, Ocean Polar Res., 39(1), 51-59.
[53] Ryu, H.J., Hong, K., Shin, S.H., Kim, S.H. and Kim, Y.D., 2011, "Study on analysis of wave energy resources and wave energy density map of the Korean sea area", Proceedings of Joint Meeting of the Korean Association of Ocean Science and Technology, July 2~3 2011, BEXCO, Busan, 1464-1468.
[54] UNEP-WCMC (UNEP World Conservation Monitoring Centre), 2011, Marine and coastal ecosystem services: Valuation methods and their application, UNEP World Conservation Monitoring Centre, Cambridge.
[55] Watanabe, M.D.B. and Ortega, E., 2011, Ecosystem services and biogeochemical cycles on a global scale: valuation of water, carbon and nitrogen processes, Environ. Sci. Policy, 14, 594-604.

[56] Yoo, S.-H. and Lee, J.-S., 2011, Assessment of economic value of Youngsan River estuary, J. Korea Water Resour. Assoc., 44(8), 629-637.
[57] Yoon, S., Kim, K. and Chang, J., 2017, Utilization of sea sand and improvement of management system, Korea Maritime Institute, Busan.

Received 19 July 2021
Revised 11 August 2021
Accepted 12 August 2021

Appendix. Notes to Table 2.

1. Sunlight

Area = 3.75×10^{11} m^2 (MOLIT[2018a]); Insolation = 3.8 kWh/m^2/day (NASA[2021]); Albedo = 0.06 (NASA[2021])

Energy = (Area)×(Insolation)×(1-Albedo)×(3.6×10^6 J/kWh) × (365 days/yr) = 1.76×10^{21} J/yr

2. Wind

Average wind speed = 5.77 m/s (NASA[2021]); Air density = 1.23 kg/m^3; Drag coefficient = 0.00126 (Garratt[1992])

Geostrophic wind = (Reference velocity)×(Height/Reference height)^surface roughness = 10.5 m/s

Reference velocity = 6.64 m/s (Archer and Jacobson[2005]); Height = 1000 m; Reference height = 10 m; Surface roughness = 0.1 (Manwell et al.[2010])

Wind absorbed = (Geostrophic wind – Surface wind) = 4.73 m/s

Energy = (Area)×(Air density)×(Drag coefficient)×(Wind absorbed)^3 ×(3.1536×10^7 sec/yr) = 1.94×10^{18} J/yr

3. Rain

Rain = 3.5 mm/day = 1.28 m/yr (NASA[2021])

Energy = (Area)×(Rain)×(1000 kg/m^3)×(4940 J/kg) = 2.37×10^{18} J/yr

4. Wave

Wave energy potential = 9978 MW (Ryu *et al*.[2011])

Energy = (Wave energy potential)×(1×10^6 J/sec/MW)×(3.1536×10^7 sec/yr) = 3.15×10^{17} J/yr

5. Tide

Continental shelf area = 2.45×10^{11} m^2 (Kang[2015]); Average tidal range = 1.86 m (KHOA[2012], area weighted average); Percent absorbed = 50%

Energy = (Density×Area×Tidal range)×(9.8 m/s^2)×(0.5×Tidal range) ×(706 cycles/yr)×(Percent absorbed) = 1.50×10^{18} J/yr

6. River, chemical

Inflow = 8.97×10^{10} m^3/yr(HRFCO[2021], sum of annual inflows of Korean rivers)

Gibbs free energy of river water = 4.91 J/g

Energy = (Inflow)×(Density)×(Gibbs free energy) = 4.40×10^{17} J/yr

7. Food (fishery production)

Annual fishery production = 3.26×10^{12} g/yr (MOF[2020], wet weight)

8. Marine minerals (marine sand extraction)

Annual extraction = 8.26×10^6 m^3/yr (MOLIT[2018b])
= (Annual extraction)×(1.45×10^6 g/m^3) = 1.20×10^{13} g/yr

9. Marine energy (electricity generation by tidal and wind powers)

Electricity generation = 5.67×10^5 MWh/yr (KEA[2019])

Net calorific value = 2.13×10^6 kcal/MWh (KEEI[2020])

Energy = (Generation)×(Net calorific value)×(4186 J/kcal) = 5.05×10^{15} J/yr

10. Climate control (carbon sequestration in intertidal flats)

Annual carbon sequestration = 7.14×10^{10} gC/yr (Lee *et al*.[2021])

11. Pollutant removal (nitrogen removal through intertidal denitrification)

Denitrification rate = 0.1 mmol N_2/m^2/day (Heo *et al*.[2011])

Area of intertidal flats = 2.48×10^9 m^2 (MOF[2020])

Total N removal = (Area)×(Denitrification rate)×(0.028 gN_2/mmol N_2) ×(365 days/yr) = 2.54×10^9 gN_2/yr

12. Leisure and recreation

Total emergy = 3.66×10^{21} sej/yr

Beaches

Energy = 1.99×10^{16} J/yr (calculated separately, as explained in the text)

Emergy = 3.52×10^{21} sej/yr (calculated separately, as explained in the text)

Fishing villages

Visitors = 9.81×10^6 people/yr (MOF[2019c]), Time stayed = 1 hr (assumed)

Energy = (# of visitors)×(time stayed)×(104 kcal/hr)×(4186 J/kcal) = 4.27×10^{12} J/yr

UEV = 3.22×10^7 sej/J (Kang[2021])

Emergy = 1.37×10^{20} sej/yr

13. Primary production

Emergy of gross primary production = Total annual renewable emergy inflow to the Korean seas (sum of tide and river_chemical)