

에머지 방법론을 이용한 황해 생태계서비스 가치 평가

강대석[†]

부경대학교 생태공학과 교수

Emergy-based Value of Ecosystem Services Provided by the Yellow Sea

Daeseok Kang[†]

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

요 약

에머지 평가법을 이용해 황해 생태계의 생물리적 기반을 분석하고 생태계서비스의 가치를 평가했다. 에머지 평가의 공간적 범위는 황해와 발해를 포함하는 광역해양생태계를 채택했다. 황해광역해양생태계의 구조와 기능을 유지하는데 기여하는 환경요소가 공급한 에머지 총량(조석에머지와 하천유입 에머지의 합)은 2.03×10^{23} sej/yr이었다. 조석에너지가 총 에머지 유입량의 93.3%를 차지했으며, 하천유입 담수 및 유기물의 에머지의 비율은 6.7%였다. 환경요소가 공급한 에머지량은 연간 63.8조원(2019년 우리나라 기준)의 가치를 갖는 것으로 평가되었다. 공급 서비스인 식량 공급(수산물 생산량)의 가치는 연간 223조원으로, 이 연구에서 평가한 생태계서비스 가운데 가치가 가장 컸다. 조절서비스인 기후 조절(탄소 격리)과 수질 정화(탈질)의 가치는 각각 4.5조원/년, 35.5조원/년으로 평가되었다. 지원서비스인 일차생산은 연간 63.8조원의 가치가 있는 것으로 나타났다. 시장가격을 토대로 평가한 기존 연구보다 에머지 기반 가치가 더 높았다. 에머지 평가법을 이용해 황해광역해양생태계의 생태계서비스 가치를 평가하는데 필수적인 자료가 부족하고, 일부 생태계서비스의 경우 정량 지표가 아직 확립되지 않은 경우가 많았다. 에머지 관점의 생태계서비스 가치 평가가 황해 생태계 관리에 실질적으로 기여하기 위해서는 황해 생태계의 핵심 생태계서비스가 무엇인지 파악하고, 이들 생태계서비스의 양을 적절히 나타낼 수 있는 지표를 먼저 확립할 필요가 있다.

Abstract – The emergy methodology was used to evaluate the biophysical base of the Yellow Sea system and value ecosystem services provided by the system. The spatial boundary of the emergy evaluation was set to include both the Yellow Sea and the Bohai Sea following the large marine ecosystem concept. Total annual emergy input from environmental sources was calculated as 2.03×10^{23} sej/yr (sum of tide and river emergy). Tidal emergy accounted for most of the emergy input at 93.3%, with river inputs (freshwater and organic matter) contributing only 6.7%. The emergy input from environmental sources to the Yellow Sea system was worth of 63.8 trillion ₩/yr. The value of food supply (fisheries production) was the highest among the ecosystem services valued in this study, at 223 trillion ₩/yr. Two regulating services of climate regulation (carbon sequestration) and pollutant removal (denitrification) were worth of 4.5 trillion ₩/yr and 35.5 trillion ₩/yr, respectively. Primary production as a supporting service was valued at 63.8 trillion ₩/yr. The emergy-based values of the ecosystem services were higher than those calculated based on market prices in the literature. Many of ecosystem services that the Yellow Sea system provides could not be valued in this study due to lack of data required for the emergy valuation and appropriate indicators to quantify ecosystem services. For the emergy valuation of ecosystem services of the Yellow Sea system to be useful for the management of the ecosystem, the identification of key ecosystem services of the system and the establishment of proper quantitative indicators for ecosystem services should be priority in future researches.

Keywords: Yellow Sea(황해), Ecosystem services(생태계서비스), Emergy valuation(에머지 기반 가치 평가)

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

1. 서 론

해안선에서 대륙붕 외측 경계까지의 바다를 의미하는 연안해역(coastal seas)은 수산물 생산, 여가·관광, 해운, 에너지 개발, 광물 채취 등 아주 다양한 인간 활동의 핵심 공간이다. 이를 반영해 전 세계 인구의 1/3이 넘는 27.5억 명이 해안선에서 100km 이내의 육지에 살고 있으며, 해안선에서부터 10 km 이내에 거주하는 인구는 약 10억 명에 이른다(Reimann *et al.*[2023]). 연안해역의 중요성은 생태계가 사람들에게 제공하는 혜택을 의미하는 생태계서비스 가치 평가에서도 확인할 수 있다. 전 세계 해양생태계가 제공하는 생태계서비스의 가치는 연간 49.6조 달러(2007년 미국 달러 기준)인데, 해양에서 차지하는 면적이 9%에 불과한 대륙붕 이내의 연안해역이 전체 가치의 56%(27.7조 달러/년)를 차지했다(Costanza *et al.*[2014]). 이러한 가치는 연안해역 생산성을 유지하기 위한 체계적 관리가 연안국가 사회경제 활동의 지속성을 높이는데 아주 중요한 요소임을 시사한다. 그러나 연안해역은 육지에 인접해 있고 해양경제활동이 집중하는 곳이기 때문에 오염물질 유입, 남획, 연안개발, 기후변화 등 인간 활동과 지구적 환경 변화에 취약하다. 인간 활동과 환경 변화에 기인한 서식지 훼손·파괴, 생물다양성 감소는 연안해역의 생태계서비스 제공 능력을 위협하고 있다.

해양생태계는 해류 흐름과 생물 이동 때문에 공간적으로 연결되어 있어 전체 시스템 관점에서 관리, 즉 생태계 기반 관리가 필요한 곳이다. 여러 나라가 한 해역을 공유하는 경우 생태계 기반 관리가 더 중요할 수밖에 없다. 특히 연안해역을 정치적 또는 경제적 경계로 나누어 개별적으로 관리하는 것이 아니라 생태적 특성을 고려해 하나의 공간으로 관리할 필요가 있다는 점을 반영해 1984년에 광역해양생태계(Large Marine Ecosystem, LME) 개념이 등장했다(Sherman and Hempel[2009]). 현재 전 세계 연안해역에 66개의 LME가 설정되어 있으며, 황해광역해양생태계(Yellow Sea Large Marine Ecosystem, YSLME)도 이 가운데 하나이다. 2005년 제1기 사업을 시작한 황해광역해양생태계 사업(YSLME Project)은 우리나라와 중국이 황해 조사와 관리를 위해 진행하고 있는 국가간 협력사업이다(UNDP[2021]). 황해광역해양생태계 사업은 Sherman and Hempel[2009]과 달리 발해를 제외하고 황해만 사업 대상해역으로 설정했다.

황해광역해양생태계는 사회경제활동 뿐만 아니라 생태적 측면에서도 아주 중요한 해역이다(UNDP[2021]). 황해의 연안인구는 2억명에 이르며, 이곳에서 이루어지는 주요 경제활동은 수산업, 원유 시추, 항만, 관광 등이 있다. YSLME에는 총 339종의 어류가 서식하고 있고 철새의 주요 이동경로이며 점박이 물범, 상괘이 등 멸종위험에 처한 포유류의 서식지이기도 하다. 이렇듯 YSLME는 생태계 생산성이나 생물다양성 측면에서 아주 우수한 해역이지만, 인간 활동의 영향에 가장 취약한 LME

이기도 하다(UNDP[2021]). YSLME의 핵심 관리 현안은 남획, 지속가능하지 않은 양식, 오염, 부영양화, 생태계 변화, 서식지 손실 및 훼손, 생물다양성 손실, 기후변화 등이 있다(Zhang *et al.*[2019]; UNDP[2021]). 따라서 황해광역해양생태계의 지속가능한 이용을 실현하기 위한 실질적인 국가간 협력과 체계적 관리방안을 수립·시행하는 것이 아주 중요하다.

해양생태계 관리의 한 수단으로서 생태계서비스 가치 평가가 갖는 중요성과 역할은 많은 연구에서 제기한 바 있다(UNEP-WCMC[2011]; Börger *et al.*[2014]; Kang[2021]; KIMST[2022]). 우리나라의 경우 해양공간관리 의사결정 수단의 한 가지로 해양생태계서비스 개념과 가치 평가를 실질적으로 활용하기 위한 연구를 진행한 바 있다(KIMST[2022]). 황해 생태계가 제공하는 생태계서비스의 가치를 평가한 연구는 아주 적다. Wang *et al.*[2016]은 황해의 중국 연안을 대상으로 생태계서비스 가치를 평가했으며, Song *et al.*[2021]은 황해(발해 제외)를 평가 범위로 설정했다. Yim *et al.*[2018]은 황해 광역해양생태계 차원에서 갯벌의 생태계서비스 가치를 산정한 경우이다. 이들은 기본적으로 시장가격에 기반을 둔 경제적 관점의 가치 평가 연구들이다. 아직까지 황해의 해양생태계서비스의 가치를 평가하는데 생물리적 방법인 에머지 평가법을 적용한 연구는 없다. 이미 국내외 연구에서 에머지 평가법으로 평가한 생태계서비스의 가치와 경제학적 방법으로 산정한 가치에 차이가 있으며(Campbell and Brown[2012]; Kang[2021]), 해양생태계 관리에 적절한 정책방향과 수단을 찾기 위해 다양한 관점에서 가치평가를 수행할 필요성을 제기한 바 있다(Kang[2021]).

따라서 이 연구에서는 발해를 포함한 황해광역해양생태계 차원에서 에머지 평가법을 이용해 황해의 생태계서비스 가치를 시범적으로 평가하고, 향후 황해 광역해양생태계 관리에 유용한 정책정보를 제공하기 위해 필요한 생태계서비스 가치평가 방향을 제안하는 것을 목적으로 하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구지역

이 연구에서는 Sherman and Hempel[2009]을 따라 발해와 황해를 모두 포함하는 황해광역해양생태계를 환경요소 및 생태계서비스 가치 평가의 공간적 범위로 설정했다(Fig. 1). 우리나라, 북한, 중국을 접하고 있는 황해광역해양생태계의 남쪽 경계는 양자강 하구 북단에서 제주도 서쪽, 제주도 서쪽에서 해남반도 끝을 연결하는 선이다. 황해와 발해의 경계는 산둥반도와 요동반도를 연결하는 선이다. 에머지 평가에 적용한 황해광역해양생태계의 면적은 45.7만 km²로, 기존 문헌에서 일반적으로 사용하고 있는 황해(38만 km²)와 발해(7.7만 km²)의 면적을 더한 값이다.

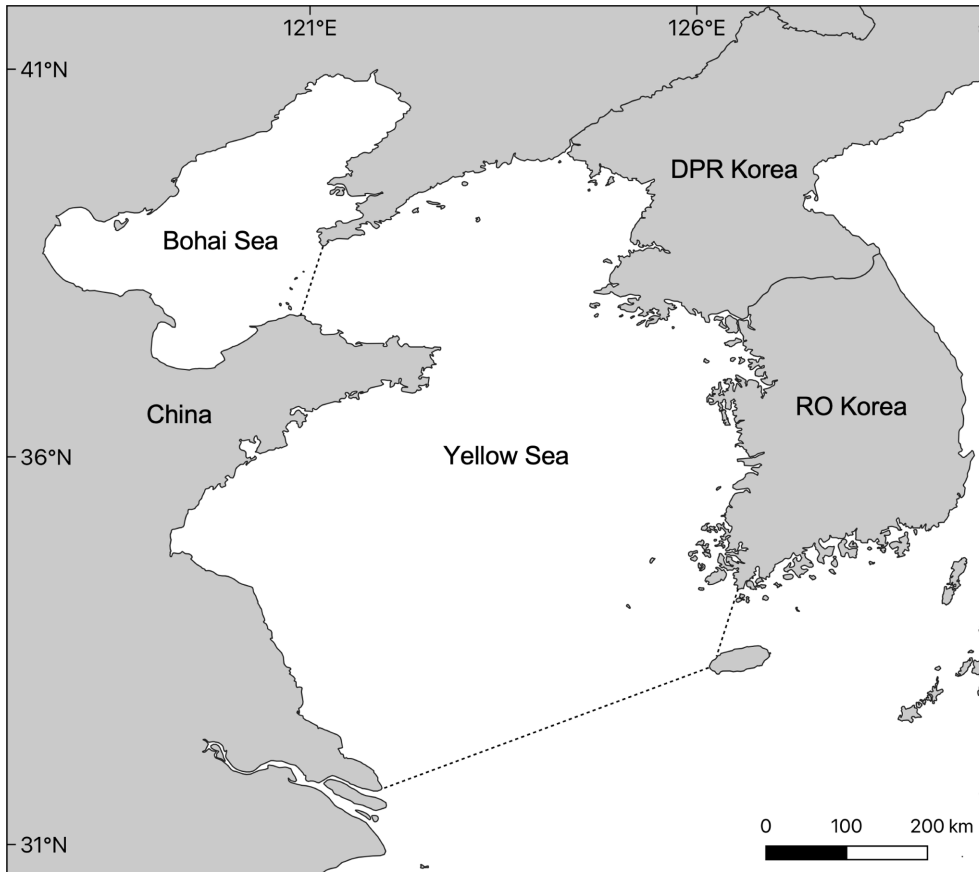


Fig. 1. Map of the study area that includes both the Yellow Sea and the Bohai Sea following the large marine ecosystem concept.

2.2 에머지 평가 절차

에머지 평가의 기본적인 절차는 평가 대상 선정 및 경계 설정, 에머지 평가 모델 작성, 평가 자료 수집, 에머지 평가표 작성, 에머지 지수 계산의 순서를 따른다(Odum[1996]). 이 연구는 황해광역해양생태계가 제공하는 생태계서비스의 가치를 평가하는 것이 목적이기 때문에 에머지 평가의 마지막 단계인 에머지 지수 계산은 수행하지 않았다. 이 연구에서 수행한 평가의 기본 개념과 절차는 Odum[1996]을 토대로 했으며, 평가 자료의 선정 및 계산 과정은 해양생태계 대상 국내 연구(Kang and Nam[2003]; Kang[2013]; Kang[2015])를 참고했다.

에머지 평가표 작성의 기본 목적은 평가대상 항목의 자료를 에머지량(단위: solar emjoules, sej)으로 바꾸는 것이다. 평가대상 항목의 특성을 나타내는 자료(에너지량, 물질량, 노동 투입량, 화폐량 등 생물리 자료)를 에머지량으로 환산하는데 필요한 인자를 에머지 원단위(Unit Energy Value, UEV)라고 한다(Odum[1996]). 현재 에머지 방법론에서 기준으로 사용하는 요소는 태양에너지이며, 평가대상 항목의 생물리 자료와 에머지 원단위를 곱해 서로 성격이 다른 모든 요소를 태양에너지 기준으로 환산(즉 에머지량을 계산)한다. 에머지 원단위의 단위는 생물리 자료의 단위에 맞게 선택해야 한다. 에머지 원단

위는 사용하는 단위에 따라 에너지량인 경우 에너지변환도(transformivity; 단위는 sej/J), 질량인 경우 specific energy(단위: sej/g), 화폐인 경우 에머지-화폐비율(emergy money ratio; 단위는 sej/₩, sej/\$ 등)로 부른다. 황해로 유입하는 환경요소의 양을 에머지량으로 바꾸는데 필요한 UEV는 문헌 자료를 참고했으며, 일차생산 UEV는 이 연구에서 계산했다. 에머지 평가에 이용한 에머지 원단위는 지구생태계의 연간 재생가능 에머지 유입량이 15.83×10^{24} sej/yr(Odum et al.[2000])인 경우를 기준으로 계산된 값을 이용했으며, 그렇지 않을 경우 이 기준으로 환산해 적용했다.

환경요소와 생태계서비스의 에머지량은 에머지-화폐비율을 이용해 모든 사람에게 익숙한 화폐단위로 환산했다. 평가대상 항목의 에머지량을 에머지-화폐비율로 나누면 이 항목의 화폐가치를 구할 수 있다. 이를 위해 Kang[2023]이 계산한 2019년 기준 우리나라 에머지-화폐비율(3.18×10^9 sej/₩)을 이용했다. 이에 따라 이 연구에서 에머지량을 토대로 계산한 값은 우리나라 기준 가치에 해당한다. 국가 차원의 에머지-화폐비율은 국가 경제가 일 년 동안 사용한 총 에머지량(sej/yr)을 국내총생산(₩/yr)으로 나누어 구한다(Odum[1996]).

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

Item	Raw Data
Environmental sources	
Sunlight	Average insolation, kWh/m ² /day
Wind	Average wind speed, m/s
Rain, chemical	Annual rainfall, m/yr
Wave	Wave energy potential, MW
Tide	Average tidal range, m
River, chemical	River inflows, m ³ /yr
River, organic matter	Riverine input, tonC/yr
Marine ecosystem services	
Provisioning services	
Food supply	Fishery production, ton/yr
Regulating services	
Climate regulation	Carbon sequestered, gC/m ² /yr
Pollutant removal	Denitrification flux, mol N/yr
Supporting services	
Primary production	Primary productivity, gC/m ² /yr

2.3. 에머지 평가 대상 및 자료

황해광역해양생태계로 유입하는 환경요소는 태양에너지, 바람, 강수(화학에너지), 파도, 조석, 하천을 통해 유입하는 담수와 유기물 등 7개 항목을 선정했다(Table 1). 에머지 평가에 필요한 생물리 자료는 NASA의 전 세계 에너지 자원 분석 자료, 황해 관련 학술문헌을 통해 확보했다.

이 연구에서 평가한 생태계서비스는 MOF[2016]의 해양생태계서비스 분류 체계를 바탕으로 선정했다. MOF[2016]는 대분류-중분류-소분류의 세 단계 구조를 채택했는데, 대분류는 공급서비스, 조절서비스, 문화서비스, 지원서비스로 구분했다. 이 연구에서는 평가 자료의 이용 가능 여부와 확립된 에머지량 계

산 방법의 존재 여부를 고려해 평가 대상 생태계서비스를 선정했다(Table 1). 공급서비스는 국가 통계 자료를 쉽게 확보할 수 있는 식량 공급을 선정하고, 황해 연안국의 연간 수산물 생산량을 정량 지표로 활용했다. 조절서비스는 탄소 격리를 통한 기후 조절, 질소계 영양염을 제거하는 탈질에 의한 수질정화 서비스를 선정했다. 지원서비스는 일차생산을 평가대상 생태계서비스로 선정했다. 문화서비스의 경우 황해광역해양생태계 차원의 통계 또는 학술문헌 자료를 확보할 수 없어 평가항목에 포함하지 못했다. 생태계서비스의 가치 평가에 필요한 자료는 우리나라와 중국의 국가 통계, 정부 보고서, 학술문헌을 통해 수집했다.

에머지 평가의 시간 범위는 1년이며, 평가에 필요한 자료는 모두 연간 자료를 이용하거나 필요한 경우 문헌 자료를 연간 자료로 환산했다. 에머지 평가의 기준 연도는 에머지량을 화폐 단위로 환산하는데 필요한 에머지-화폐비율이 계산되어 있는 가장 최근 연도인 2019년으로 설정했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 황해광역해양생태계의 에머지 토대

3.1.1 에머지 유입량 평가

황해광역해양생태계의 구조와 기능을 유지하는데 필수적인 환경요소의 에머지량은 태양, 바람, 강수, 파도, 조석, 하천 유입(담수 및 유기물)을 대상으로 Table 2에서 계산했다. 연간 에머지 유입량이 가장 많은 요소는 조석에너지(1.89×10^{23} sej/yr)였으며, 태양에너지가 공급한 에머지량이 가장 적었다(2.25×10^{21} sej/yr). 황해광역해양생태계로 유입하는 에머지 총량(즉, 황해광역해양생태계의 연간 에머지 토대)은 2.03×10^{23} sej/yr이었다. 이를 바탕으로 황해광역해양생태계의 구조와 기능이 유지되고, 사람들이 이용하는 생태계서비스가 만들어진다. 총 에머지 유입량의 대부분은 조석에너지가 기여했으며(93.3%),

Table 2. Emergy input from environmental sources that support the Yellow Sea large marine ecosystem

No	Item	Raw Data	Unit Emergy Value (UEV) ^a	UEV Source ^b	Solar Emergy (sej/yr)	Emvalue ^c (2019 ₩/yr)
1	Sunlight	2.25×10^{21} J/yr	1	sej/J	2.25×10^{21}	7.08×10^{11}
2	Wind	1.41×10^{19} J/yr	2450	sej/J	3.46×10^{22}	1.09×10^{13}
3	Rain	2.06×10^{18} J/yr	1.25×10^4	sej/J	2.57×10^{22}	8.08×10^{12}
4	Wave	2.38×10^{17} J/yr	5.10×10^4	sej/J	1.22×10^{22}	3.82×10^{12}
5	Tide	2.56×10^{18} J/yr	7.39×10^4	sej/J	1.89×10^{23}	5.95×10^{13}
6	River, chemical	1.25×10^{17} J/yr	8.13×10^4	sej/J	1.02×10^{22}	3.20×10^{12}
7	River, organic matter	2.69×10^{17} J/yr	1.26×10^4	sej/J	3.39×10^{21}	1.07×10^{12}
Total input (sum of 5, 6, and 7)					2.03×10^{23}	6.38×10^{13}

a) All unit emergy values were adjusted to the global renewable emergy baseline of 15.83×10^{24} sej/yr.

b) UEV sources: 1) Odum *et al.* [2000], 2) Odum [1996], 3) Brown and Ulgiati [2011].

c) Emvalues were calculated with the emergy-money ratio of the year 2019 for Korea.

* Detailed calculations for line items are given in Appendix 1.

황해광역해양생태계로 유입하는 하천이 공급한 에머지량은 6.7%에 불과했다.

황해로 직접 유입하는 태양, 바람, 강수, 파도, 조석의 경우 지구시스템의 에너지 흐름과 물질순환 과정에서 밀접하게 연결되어 있기 때문에 중복계산을 피하기 위해 에머지 유입량이 가장 많은 조석에너지만 총에머지 유입량 계산에 포함했다 (Odum *et al.*[2000]). 하천유입 담수 및 유기물의 경우 육지에 내린 강수와 생태 과정을 통해 형성된 것이기 때문에 다른 환경요소와 중복문제가 없어 연간 총에머지 유입량 계산에 모두 포함했다.

황해광역해양생태계를 유지하는 환경요소의 가치를 에머지 관점에서 계산한 결과 연간 63.8조원(2019년 우리나라 에머지-화폐비용 기준)이었다. 항목별로 살펴보면 조석에너지가 기여한 가치는 연간 59.5조원이었으며, 하천유입 담수 및 유기물의 가치는 각각 3.2조원/년, 1.1조원/년으로 나타났다. 자연 요소의 가치 산정은 경제학적 평가에서는 다루지 못하는 부분이기 때문에 에머지 평가법이 해양생태계 관리 의사결정에 필요한 자료를 제공할 수 있을 것이다. 2019년 기준 우리나라 연근해어업과 해면양식어업의 생산금액 합계가 6.8조원/년(MOF[2023])이고 2019년 기준 해양수산업의 총 매출액이 177.5조원/년(KMI[[2020])이라는 점을 감안할 때 황해광역해양생태계를 지탱하는 환경요소의 가치가 어느 정도 인지 가능해 볼 수 있다.

3.1.2 에머지 유입량과 생태계서비스

환경요소(재생가능에머지 공급원)가 황해광역해양생태계로 유입해 생태계의 구조와 기능을 형성·유지하고, 이 과정에서 발생한 다양한 에너지 흐름 및 물질 순환의 일부를 사람들이 이용하는데 이것이 생태계서비스다. 따라서 황해광역해양생태계가 제공하는 아주 다양한 생태계서비스의 총 가치(지원서비스 제외)는 최소한 연간 63.8조원으로 볼 수 있다.

생태계서비스의 가치가 평가되어 있지 않고 에머지 평가에 활용할 자료가 충분하지 않은 상태에서 신속한 관리 의사결정

이 필요할 경우 Table 2에서 계산한 총에머지 유입량을 생태계서비스의 규모 또는 가치를 개략적으로 평가하는데 활용해 볼 수 있다. 해양생태계의 구조와 기능을 뒷받침하는 환경요소에 관한 자료는 생태계서비스 평가에 필요한 자료보다 확보하기 더 용이하다. Kim *et al.*[2018]은 우리나라 갯벌생태계로 유입하는 단위면적당 재생가능에머지 유입량과 수산물 생산량 사이에 유의한 상관관계가 있음을 밝혔다. 해양생태계를 대상으로 한 연구는 아니지만 Campbell and Tilley[2016]의 시뮬레이션 모델은 재생가능에머지 유입량과 생물다양성 사이에 양의 상관관계를 보여주었다.

3.2 황해광역해양생태계의 생태계서비스 가치

3.2.1 생태계서비스의 에머지 관점 가치

이 연구에서 평가 대상으로 선정한 생태계서비스의 가치는 Table 3에서 계산했다. 공급서비스인 식량 공급의 경우 2019년 생산된 1,315만톤의 수산물에 내재한 에머지량을 화폐단위로 환산한 결과 연간 223조원의 가치를 갖는 것으로 나타났으며, 이 연구에서 평가한 생태계서비스 가운데 가치가 가장 높았다. 황해광역해양생태계에서 생산된 수산물에는 식량으로 이용하는 것뿐만 아니라 원료물질, 유전자원 용도로 활용하는 것들도 있지만, 수산물 생산 통계에서 이를 구분할 수 없어 수산물 생산량을 모두 식량 공급 서비스를 나타내는 지표로 채택했다. 조절서비스인 기후조절(이산화탄소 격리)의 가치는 연간 4.5조원, 수질정화(탈질) 가치는 연간 35.5조원이었다. 이 연구에서 제한적으로 평가한 공급서비스와 조절서비스 가치를 더한 값은 연간 263조원에 이르렀다. 지원서비스의 한 가지인 일차생산의 가치는 연간 63.8조원으로 평가되었다. 지원서비스의 경우 다른 유형의 서비스를 형성하는 토대이기 때문에 중복계산의 우려가 있어 생태계서비스의 총 가치를 구할 때 포함하지 않는다.

우리나라와 중국의 수산물 생산금액 합계는 2019년 연간 77.6조원이었다(KOSIS[2022], FA[2020]). 북한의 수산물 생산

Table 3. Value of ecosystem services provided by the Yellow Sea large marine ecosystem

No	Item	Raw Data		Unit Energy Value (UEV) ^a		UEV Source ^b	Solar Energy (sej/yr)	Emvalue ^c (2019W/yr)
Provisioning services								
1	Food supply	1.32×10^{13}	g/yr	5.39×10^{10}	sej/g	1	7.09×10^{23}	2.23×10^{14}
Regulating services								
2	Climate regulation	3.34×10^{17}	J/yr	4.25×10^4	sej/J	2	1.42×10^{22}	4.46×10^{12}
3	Pollutant removal	9.66×10^{11}	gN/yr	1.17×10^{11}	sej/gN	2	1.13×10^{23}	3.55×10^{13}
Supporting services								
4	Primary production	4.78×10^{18}	J/yr	4.25×10^4	sej/J	3	2.03×10^{23}	6.38×10^{13}

a) All unit energy values were adjusted to the global renewable energy baseline of 15.83×10^{24} sej/yr.

b) UEV sources: 1) Kang and Nam [2019], 2) Campbell *et al.* [2014], 3) this study.

c) Emvalues were calculated with the energy-money ratio of the year 2019 for Korea.

* Detailed calculations for line items are given in Appendix 2.

금액은 자료가 없어 포함하지 못했지만, 북한 수산물 생산량이 전체 합계에서 차지하는 비중이 크지 않아 생산금액 합계에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 에머지량을 토대로 계산한 2019년 수산물 생산량의 가치는 수산물 생산금액보다 2.9배 높았다. 그러나 식량 공급의 에머지량 계산에 적용한 에머지 원단위는 우리나라에서 생산한 수산물에 대한 것이기 때문에 중국 생산 수산물의 에머지량 계산에 적합하지 않을 가능성이 있다. 중국의 수산물 생산량이 훨씬 많기 때문에 황해광역해양 생태계의 식량 공급 가치를 과대 또는 과소 평가할 여지가 있다. 따라서 향후 연구에서는 황해 수산업의 에머지 평가를 통해 황해의 환경적, 국가별 특성을 반영하는 에머지 원단위값을 계산해 식량 공급 서비스의 가치를 계산할 필요가 있다.

조절서비스 중 기후 조절의 경제적 가치를 탄소배출권 거래 가격(2019년 전체 배출권의 장내외 평균 거래가격은 28,440원/톤CO₂, GIR[2021])으로 평가할 경우 연간 0.73조원이었다. 에머지 평가법으로 계산한 기후 조절의 가치(4.5조원/년)가 탄소배출권 거래가격을 이용해 계산한 것보다 약 6.2배 높았다. 기후조절 서비스를 평가한 다른 연구(Campbell and Brown[2012]; Kang[2021])에서도 에머지 기반 가치가 시장가격에 기반한 가치보다 더 높았다. 이는 수요와 공급에 따라 결정되는 탄소배출권 가격이 탄소배출의 부정적 영향 또는 생태계 탄소격리의 긍정적 영향을 전혀 반영하지 못하기 때문으로 판단된다.

질산화-탈질 과정을 통해 하수에서 질소를 제거하는 공정의 처리 단가(\$15.56/kgN, Vineyard *et al.*[2020])를 활용해 계산한 수질정화(탈질)의 경제적 가치는 17.5조원/년이었다. 에머지 평가법을 이용해 계산한 수질정화의 가치(35.5조원/년)는 하수처리 비용으로 계산한 값보다 2배 높았다. 가치 평가에 이용한 경제학적 방법에 따라 반대인 경우도 나타나는데, Kang[2021]의 연구에서는 지불의사금액에 근거한 수질정화의 경제적 가치가 에머지 가치보다 더 높았다. Table 3에서 사용한 질소 기체의 에머지 원단위는 지구 전체 질소 순환 모델을 토대로 계산한 것이므로 해양에서 일어나는 탈질의 에머지량을 평가하는데 적절하지 추가 연구를 통해 판단할 필요가 있다.

시장가격을 토대로 계산한 경제적 관점의 가치보다 에머지량을 토대로 계산한 황해 생태계서비스의 가치가 최소 2배에서 최대 6.2배까지 더 높았다. 자연의 기여율을 고려할 경우 시장가격 기반 가치는 에머지 기반 가치보다 더 낮아질 것이다. 시장가격을 바탕으로 한 생태계서비스 가치 평가가 갖는 한계를 해결하기 위해 생태계서비스 생산에 자연이 기여한 비율을 계산하고 이를 경제적 관점의 가치 평가에 반영하기 위한 연구가 진행되고 있다(Pérez-Soba *et al.*[2019]; Vallecillo *et al.*[2019]).

에머지 평가법을 이용한 생태계서비스 가치 평가가 정책 수립과 집행에 유용한 수단으로 활용되기 위해서는 Table 3과 같이 제한적인 항목만을 대상으로 한 평가가 아니라 황해광역해양 생태계의 핵심 생태계서비스를 모두 포함해 가치 평가를 수행해야 한다. 이를 위해서는 황해광역해양 생태계의 생태계서비스 목록을 먼저 작성하고 각 생태계서비스의 양을 나타내는데 적절한 지표를 확립할 필요가 있는 것으로 판단된다.

3.2.2 기존 가치평가와 비교

황해(발해 제외)를 대상으로 생태계서비스의 가치를 평가한 기존 사례(Wang *et al.*[2016]; Song *et al.*[2021])는 시장가격에 기반을 둔 경제적 가치평가를 중심으로 교육·연구 서비스 평가에 에머지 평가법을 적용했다. 이들 연구와 비교하기 위해 Table 3에서 계산한 생태계서비스 가치에서 발해가 기여한 부분을 제외해 Table 4에 제시했다. 생태계서비스 가치평가 방법에 차이가 있지만 기존 평가와 이 연구를 비교할 경우 식량공급, 탄소격리, 수질정화 가치는 에머지 평가법으로 산정한 가치가 더 높았고, 일차생산의 경우 경제적 관점의 가치가 에머지 가치보다 더 높았다. Wang *et al.*[2016]의 평가 범위는 황해의 중국연안이기 때문에 이 연구와 직접 비교는 힘들지만, 이 연구에서 계산한 가치의 크기를 가능하기 위해 포함했다.

앞에서도 언급한 바와 같이 시장가격을 이용해 생태계서비스의 가치를 평가할 경우 자연이 기여한 부분뿐만 아니라 생태계서비스를 이용하기 위해 투입한 비용까지 포함하기 때문에 경제적 가치를 과대평가할 수밖에 없다. Wang *et al.*[2016]은 수

Table 4. Comparison of the values of ecosystem services provided by the Yellow Sea. The contribution of the Bohai Sea calculated in Table 3 was not included to compare with the values in the literature

Item	This study (trillion ₩/yr)	Song <i>et al.</i> [2021] ^a (trillion ₩/yr)	Wang <i>et al.</i> [2016] ^a (trillion ₩/yr)
Valuation area	Yellow Sea	Yellow Sea	Chinese coastal area of the Yellow Sea
Ecosystem services			
Food supply	95.8	37.8~67.5 ^b	60.2 ^b
Climate regulation	3.7	0.12~0.79	2.7
Pollutant removal	25.7	6.4~9.1	15.3
Primary production	53.0	-	419.0

a) Values for the year 2010 in Wang *et al.* [2016] and Song *et al.* [2021] were converted to 2019 value using the currency exchange rate and the consumer price indices of Korea.

b) The values of food supply and raw materials in Wang *et al.* [2016] and Song *et al.* [2021] were added to compare with the value of food supply of this study.

산물 생산(식량과 원료물질)과 일차생산, Song *et al.*[2021]은 수산물 생산의 가치를 평가하는데 시장가격을 이용했다. 이에 비해 Table 3에서 에머지량을 토대로 평가한 가치는 자연의 기여부분만 평가한다는 점에서 생태계서비스 개념에 더 부합하는 것으로 볼 수 있다. 에머지량 계산에 이용한 에머지 원단위는 인간의 노력을 배제한 값을 적용했다.

황해의 생태계서비스를 평가한 선행 연구(Wang *et al.*[2016]; Song *et al.*[2021])들에 내재한 또 다른 문제는 생태계서비스량을 나타내는 생물리 자료가 가치 평가에 적절하지 않은 경우가 있다는 점이다. 이 연구들은 기후조절 서비스의 가치를 계산하는데 일차생산량과 패류 생산량 자료를 이용했다. 그러나 해수 중 이산화탄소가 유기물로 합성(즉 일차생산)된 다음 분해되지 않고 일정한 기간 동안 생태계에 저장되어야 기후조절 서비스로서 가치를 가지는데, 이들 연구는 단순히 일차생산량 자료를 가치 계산에 이용했다. 이런 문제를 피하기 위해 이 연구에서는 퇴적물에 격리되는 유기물량을 이용해 기후조절 서비스의 가치를 평가했다.

지원서비스인 일차생산의 가치를 평가한 Wang *et al.*[2016]은 대형조류 일차생산량 중 패류 생산으로 전환된 부분에 대해 패류의 시장가격을 토대로 생태계서비스의 가치를 계산했다. 그러나 지원서비스에 포함된 일차생산은 생태계의 먹이망을 유지하는 유기물 공급의 출발점을 나타내기 위한 항목이라는 점에서 개념 적용에 문제가 있다. 이 생태계서비스는 먹이사슬의 다른 단계에 필요한 에너지와 물질 공급의 출발점으로서 일차생산이 가지는 중요성을 다루기 위한 것이며, 일차생산의 일부를 사람들이 공급서비스로 이용한다. 황해광역해양생태계의 생태계서비스 가치 평가 결과가 황해 생태계의 국가간 협력 관리에 유용한 정책 자료로 활용되기 위해서는 황해 관련 모든 가치 평가 연구가 생태계서비스 개념 및 정량 지표에 관해 일관성을 유지할 필요가 있다. 따라서 황해광역해양생태계의 생태계서비스 정의를 명확하게 내리고 각 가치평가 방법별로 생태계서비스의 양을 나타내는데 가장 적절한 지표가 무엇인지 설정할 필요가 있다.

또한 수질정화 서비스의 경우도 오염물질의 격리를 정량적으로 나타낼 수 있는 자료를 이용했는지 분명하지 않아 기존 황해 대상 연구가 가치를 과대평가했을 가능성이 있다. Wang *et al.*[2016]의 경우 오염물질량, Song *et al.*[2021]은 질소 및 인 제거량 자료를 이용했는데, 수질정화 서비스 가치 계산에 필요한 자료는 단순히 해수에서 제거된 물질의 양이 아니라 이렇게 제거된 오염물질 가운데 퇴적물 등에 격리되어 일정 기간 동안 해수로 유출하지 않는 양만 생태계서비스 가치 계산에 포함해야 한다. 이 연구에서 수질정화서비스의 양을 나타내기 위한 지표로 탈질량을 선택한 이유는 해수 중 질소계 영양분이 질소 기체로 제거되어 대기 중으로 빠져 나갈 뿐만 아니라 이렇게 빠져나간 질소 기체가 다른 환경문제를 유발하지 않기 때문이

다. 물론 탈질 이외에도 황해광역해양생태계가 오염물질을 격리하는 다양한 과정들이 있기 때문에 탈질에 기초한 가치 평가는 수질정화 가치의 최솟값으로 봐야 한다. 황해 생태계의 수질정화서비스 가치를 제대로 평가하기 위해서는 황해로 유입한 오염물질을 격리하는 모든 과정을 확인하고 격리량을 정량적으로 나타낼 수 있는 지표를 선정할 필요가 있다.

3.2.3 문화서비스 가치 평가 문제

문화서비스 가운데 여가·관광서비스의 가치는 기존 에머지 연구(Campbell and Brown[2012]; Kang[2021])에서 평가된 바 있지만, 이 연구에서는 황해광역생태계 전체의 해양 관광객 자료를 확보하지 못해 가치평가를 수행하지 못했다. 또한 여가·관광 이외의 문화서비스에 대해서는 생태계서비스의 양을 적절히 나타낼 수 있는 지표가 확립되지 않아 평가에 포함하지 못했다. 문화서비스는 에머지 평가법 뿐만 아니라 경제학적 가치 평가에서도 아직 충분히 다루어지지 못하고 있는 서비스이다. Wang *et al.*[2016]은 중국 황해 연안지역(랴오닝성, 산둥성, 장쑤성)의 관광 수입을 이용해 관광서비스 가치를 평가했는데, 2010년 기준 43.1조원이었다. 그러나 이는 연안지역을 방문하는 관광객을 통해 창출한 관광 수입이 바다만을 대상으로 한 것이 아니라는 점에서 관광서비스 가치를 과대평가한 것으로 볼 수밖에 없다.

해양생태계서비스의 가치 평가 자료를 우리나라 해양공간관리에 활용하기 위해 해수욕장의 여가·관광 가치를 평가한 연구(KIMST[2022])를 통해 황해광역해양생태계의 관광서비스 가치 규모를 개략적으로 판단해 볼 수 있다. 우리나라 전국 287개 해수욕장 여가·관광서비스의 2016년 기준 가치는 에머지 평가법으로 계산할 경우 1.1조원/년, 선호도 기반 방법을 이용할 경우 5.4조원/년이었다. 황해 중국 연안의 해수욕장 규모와 방문객 통계 자료가 이용 가능할 경우 황해광역해양생태계의 해수욕장이 제공하는 여가·관광 가치는 연간 수십조원에 이를 것으로 판단된다. KIMST[2022]의 방법을 따라 2019년 방문객 통계자료를 적용해 황해 연안에 있는 우리나라 해수욕장의 여가·관광 가치를 에머지 평가법으로 계산하면 2019년 기준 연간 1,683억원의 가치를 가지고 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

황해 생태계의 생물리적 기반과 생태계서비스의 가치를 평가하기 위해 에머지 평가법을 적용했다. 에머지 평가의 공간적 범위는 황해와 발해를 포함하는 광역해양생태계를 채택했으며, 평가 기준 연도는 2019년으로 설정했다. 황해광역해양생태계의 구조와 기능은 태양, 바람, 강수, 파도, 조석, 하천(담수, 유기물) 등 재생가능 환경요소가 공급하는 에머지를 기반으로 유지되는데, 연간 에머지 유입 총량(조석에머지와 하천유입 에머

지의 합)은 2.03×10^{23} sej/yr이었다. 조석에너지가 총 에머지 유입량의 93.3%를 차지했으며, 하천을 통해 유입한 에머지(담수 및 유기물)가 기여한 비율은 6.7%였다. 환경요소가 공급한 에머지량은 연간 63.8조원의 가치를 갖는 것으로 평가되었다.

공급서비스인 식량 공급(수산물 생산량)의 가치는 연간 223조원으로, 이 연구에서 평가한 생태계서비스 가운데 가치가 가장 컸다. 조절서비스인 기후 조절(탄소 격리)과 수질 정화(탈질)의 가치는 각각 4.5조원/년, 35.5원/년으로 평가되었다. 지원서비스인 일차생산은 연간 63.8조원의 가치가 있는 것으로 나타났다. 시장가격을 토대로 평가한 기존 연구보다 에머지 기반 가치가 더 높았다. 비록 이 연구에서 평가한 황해광역해양생태계의 생태계서비스가 제한적이었지만, 우리나라의 일부 해양 관련 경제 지표와 비교할 때 황해 생태계가 주변국 경제에 기여하는 가치가 높다는 것을 보여주었다.

에머지 평가법을 이용한 생태계서비스 가치 평가가 황해광역해양생태계를 관리하기 위한 국가간 협력에 실질적으로 기여하기 위해서는 이 연구에서 충분히 다루지 못한 다음과 같은 사항을 우선 연구할 필요가 있다. 국가간 공동연구 또는 황해광역해양생태계사업을 통해 이에 관련된 연구를 수행한다면 황해광역해양생태계 관리에 유용한 정보를 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

첫째, 황해광역해양생태계가 제공하는 생태계서비스 개념을 명확히 정의하고 황해 관리 측면에서 핵심적인 생태계서비스가 무엇인지 설정할 필요가 있다. 황해 생태계서비스 가치를 평가한 기존 연구는 일부 생태계서비스 항목의 정의를 가치 평가에 적절히 적용하지 못한 경우가 있다. 황해광역해양생태계는 국가간 협력관리가 필수적인 공간임을 고려할 때 서로 다른 정의에 기반을 둔 생태계서비스 가치평가는 관리 의사결정에 혼란을 초래할 수도 있다.

둘째, 평가대상 생태계서비스의 양을 나타내는데 적절한 지표를 설정해야 한다. 이는 항목별 생태계서비스 정의를 명확히 하는 것과 연결되어 있는데, 생태계서비스의 정의를 숫자로 옮기지 않으면 가치 평가가 불가능하다. 특히 문화서비스 중 여가·관광을 제외한 나머지 서비스의 정량 지표를 정립하는 것이 시급하다. 이는 경제학적 가치 평가에서도 연구가 부족한 분야이다. 또한 생태계서비스의 정량 지표가 자연이 기여한 부분뿐만 아니라 인간의 노력을 포함하고 있는지 파악하고, 이를 구분하기 위한 방안을 연구할 필요가 있다.

셋째, 에머지량 계산에 필요한 생물리 자료를 체계적으로 확보하기 위한 노력이 필요하다. 황해 연안국의 통계 구성과 자료, 학술연구 결과를 에머지 평가 관점에서 분석하고, 앞에서 언급한 정량지표와 연계해 에머지 평가에 적합하도록 정립할 필요가 있다. 특히 일부 생태계서비스 항목(예, 여가·관광)의 경우 평가 자료에서 바다를 대상으로 한 부분과 그렇지 않은 부분을 구분해서 가치 평가에 활용하기 위한 방법을 정립할 필요

가 있다.

넷째, 에머지 평가의 핵심은 생태계서비스의 에머지량을 계산하는 것인데, 황해 또는 주변국의 생태적·사회경제적 특성을 반영하는 에머지 원단위 값을 확보하기 위한 연구가 필요하다. 이 연구에 포함된 수산물은 이러한 연구의 필요성을 잘 보여준다. 각 생태계서비스별로 기존 문헌의 에머지 원단위를 적용하는 것이 적절한지 평가하고, 필요할 경우 새로운 에머지 원단위를 산정해 가치 평가에 활용할 필요가 있다.

후 기

이 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- [1] Brown, M. T. and Ulgiati, S., 2011, Handbook of emergy evaluation folio #6: The global energy budget and the emergy of global processes revisited, Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville.
- [2] Börger, T., Beaumont, N.J., Pendleton, L., Boyle, K.J., Cooper, P., Fletcher, S., Haab, T., Hanemann, M., Hooper, T.L., Hussain, S.S., Portela, R., Stithou, M., Stockill, J., Taylor, T. and Austen, M.C., 2014, Incorporating ecosystem services in marine planning: The role of valuation, Marine Policy, 46, 161-170, <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2014.01.019>.
- [3] Campbell, D.E., Lu, H. and Lin, B., 2014, Emergy evaluations of the global biogeochemical cycles of six biologically active elements and two compounds, Ecol. Model., 271, 32-51, dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.01.013.
- [4] 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.
- [5] Campbell, E.T. and Tilley, D.R., 2016, Relationships between renewable emergy storage or flow and biodiversity: A modeling investigation, Ecol. Model., 340, 134-148, dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.08.004.
- [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] FA (Fisheries Administration), 2020, 2020 China Fisheries Statistical Yearbook, China Agriculture Press, Beijing, China.
- [8] GIR, 2021, 2019 Korea Emissions Trading System Report, Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea, Seoul.
- [9] Hu, L., Shi, X., Bai, Y., Qiao, S., Li, L., Yu, Y., Yang, G., Ma, D. and Guo, Z., 2016, Recent organic carbon sequestration in the shelf sediments of the Bohai Sea and Yellow Sea, Chi-

- na, *J. Marine Syst.*, 155, 50-58, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.10.018>.
- [10] Kang, D. and Nam, J., 2003, *Emergy-based valuation of marine environmental resources and policy implications*, Korea Maritime Institute, Seoul.
- [11] Kang, D. and Nam, J., 2019, *Emergy evaluation of sustainability of Korean fisheries*, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 22(3), 172-181.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Kang, D., 2021, *Emergy-based value of ecosystems services provided by the Korean seas*, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 24(3), 119-129.
- [15] Kang, D., 2023, *Emergy evaluation database for Korea*, unpublished manuscript.
- [16] 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.
- [17] KIMST (Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion), 2022. *Marine ecosystem-based analysis and decision-making support system development for marine spatial planning*, Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion, Seoul.
- [18] KMI (Korea Maritime Institute), 2020, *2020 Blue Economy*, Korea Maritime Institute, Busan.
- [19] KOSIS (Korean Statistical Information Service), 2022, *Korea Statistical Database*, <https://kosis.kr/index/index.do>, (accessed 2023.03.15.)
- [20] Lee, Y.C., Qin, Y.-S. and Li, R.-Y., 1998, *Yellow Sea Atlas*, Ocean Science and Technology Institute and Institute of Oceanography, Beijing.
- [21] Liu, J., Yu, Z., Zang, J., Sun, T., Zhao, C. and Ran, X., 2015, *Distribution and Budget of Organic Carbon in the Bohai and Yellow Seas*, *Advances in Earth Science*, 30(5), 564-578.
- [22] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), 2016, *2016 Pilot Study on the Development of Marine Spatial Planning System*, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong.
- [23] MOF, 2023, *Statistical Yearbook of Oceans and Fisheries*, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong.
- [24] NASA, 2022, *POWER Data Access Viewer*, <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer> (accessed 2022.05.10.)
- [25] Odum, H.T., 1996, *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*, John Wiley & Sons, New York.
- [26] 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.
- [27] Pérez-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 29725 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- [28] Reimann, L., Vafeidis, A.T. and Honsel, L.E., 2023, *Population development as a driver of coastal risk: Current trends and future pathways*, *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, 1, e14, 1-12, <https://doi.org/10.1017/cft.2023.3>.
- [29] 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.
- [30] Sherman, K. and Hempel, G., 2009. *The UNEP Large Marine Ecosystem Report: A perspective on changing conditions in LMEs of the world's Regional Seas*, UNEP Regional Seas Report and Studies No. 182, United Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- [31] Song, J., Zhang, Z., Chen, L., Wang, D., Liu, H., Wang, Q., Wang, M. and Yu, D., 2021, *Changes in ecosystem services values in the south and north Yellow Sea between 2000 and 2010*, *Ocean Coast. Manage.*, 202, 105497, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105497>.
- [32] UNDP (United Nations Development Programme), 2021, *The YSLME Story: Management and Governance for the Restoration and Protection of the Yellow Sea Large Marine Ecosystem*. UNDP/GEF Yellow Sea Large Marine Ecosystem (YSLME) Phase II Project, Incheon, RO Korea.
- [33] UNEP-WCMC (UNEP World Conservation Monitoring Centre), 2011, *Marine and coastal ecosystem services: Valuation methods and their application*, UNEP World Conservation Monitoring Centre, Cambridge.
- [34] Vallecillo, S., La Notte, A., Kakoulaki, G., Roberts, N., Kamberaj, J., Dottori, F., Feyen, L., Rega, C. and Maes, J., 2019, *Ecosystem services accounting. Part II-Pilot accounts for crop and timber provision, global climate regulation and flood control*, EUR 29731 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- [35] Vineyard, D., Hicks, A., Karthikeyan, K.G. and Barak, P., et al., 2020, *Economic analysis of electrodialysis, denitrification, and anammox for nitrogen removal in municipal wastewater treatment*, *J. Clean. Prod.*, 262, 121145, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121145>
- [36] Wang, Q., Song, J., Zhou, J., Zhao, W., Liu, H. and Tang, X., 2016. *Temporal Evolution of the Yellow Sea Ecosystem Services (1980-2010)*, *Heliyon*, 2, e00084, <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2016.e00084>.

- [37] Wang, S., Yuan, R., Li, D. and Jiao, Y., 2011, An overview of ocean renewable energy in China, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 15, 91-111, doi:10.1016/j.rser.2010.09.040.
- [38] Yim, J., Kwon, B., Nam, J., Hwang, J., Choi, K. and Kim, J., 2018, Analysis of forty years long changes in coastal land use and land cover of the Yellow Sea: The gains or losses in ecosystem services, *Environ. Pollut.*, 241, 74-84, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.058>.
- [39] Yoo, S., Kong, C., Son, Y. and Ishizaka, J., 2019, A critical re-assessment of the primary productivity of the Yellow Sea, East China Sea and Sea of Japan/East Sea Large Marine Ecosystems, *Deep-Sea Res. Pt. II*, 163, 6-15.
- [40] Zhang, Z., Qu, F. and Wang, S., 2019, Sustainable development of the Yellow Sea Large Marine Ecosystem, *Deep-Sea Res. Pt. II*, 163, 102-107, <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.08.009>.
- [41] Zhao, C., Zang, J., Liu, J., Sun, T. and Ran, X., 2016, Distribution and budget of nitrogen and phosphorus and their influence on the ecosystem in the Bohai Sea and Yellow Sea, *China Environmental Science*, 36(7), 2115-2127.

Received 23 January 2024

Revised 21 February 2024

Accepted 26 February 2024

Appendix 1. Notes to Table 2.

1. Sunlight

$$\text{Area} = 4.57 \times 10^{11} \text{ m}^2$$

$$\text{Insolation} = 3.99 \text{ kWh/m}^2/\text{day} \text{ (NASA[2022]); Albedo} = 0.06 \text{ (NASA[2022])}$$

$$\text{Energy} = (\text{Area}) \times (\text{Insolation}) \times (1 - \text{Albedo}) \times (3.6 \times 10^6 \text{ J/kWh}) \times (365 \text{ days/yr}) = 2.25 \times 10^{21} \text{ J/yr}$$

2. Wind

$$\text{Average wind speed} = 5.56 \text{ m/s (NASA[2022])}$$

$$\text{Geostrophic wind} = (\text{Average wind speed}) \times (10/8) = 9.3 \text{ m/s}$$

$$\text{Energy} = (\text{Area}) \times (1.23 \text{ kg/m}^3) \times (0.001) \times (\text{Geostrophic wind})^3 \times (3.1536 \times 10^7 \text{ sec/yr}) = 1.41 \times 10^{19} \text{ J/yr}$$

3. Rain, chemical

$$\text{Precipitation} = 0.91 \text{ m/yr (NASA[2022])}$$

$$\text{Energy} = (\text{Area}) \times (\text{Precipitation}) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times (4940 \text{ J/kg}) = 2.06 \times 10^{18} \text{ J/yr}$$

4. Wave

$$\text{Wave energy potential} = 7555.5 \text{ MW (Wang et al.[2011]; Ryu et al.[2011])}$$

$$\text{Energy} = (\text{Wave energy potential}) \times (1 \times 10^6 \text{ J/sec/MW}) \times (3.1536 \times 10^7 \text{ sec/yr}) = 2.38 \times 10^{17} \text{ J/yr}$$

5. Tide

$$\text{Average tidal range} = 1.8 \text{ m (Lee et al.[1998]); Percent absorbed} = 50\%$$

$$\text{Energy} = (\text{Density} \times \text{Area} \times \text{Tidal range}) \times (9.8 \text{ m/s}^2) \times (0.5 \times \text{Tidal range}) \times (706 \text{ cycles/yr}) \times (\text{Percent absorbed}) = 2.56 \times 10^{18} \text{ J/yr}$$

6. River, chemical

$$\text{Inflow} = 2.54 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{yr (Liu et al.[2015])}$$

$$\text{Energy} = (\text{Inflow}) \times (\text{Density}) \times (4.93 \text{ J/g}) = 1.25 \times 10^{17} \text{ J/yr}$$

7. River, organic matter

$$\text{Inflow} = 6.43 \times 10^6 \text{ tonC/yr (Liu et al.[2015])}$$

$$\text{Energy} = (\text{Inflow}) \times (1 \times 10^6 \text{ g/ton}) \times (10 \text{ kcal/gC}) \times (4187 \text{ J/kcal}) = 2.69 \times 10^{17} \text{ J/yr}$$

Appendix 2. Notes to Table 3.

1. Food supply

$$\text{Fisheries production} = 1.32 \times 10^{13} \text{ g/yr (KOSIS[2022]; FA[2020])}$$

2. Climate regulation

$$\text{Carbon sequestered} = 15.3 \text{ gC/m}^2/\text{yr (Hu et al.[2016])}$$

$$\text{Energy} = (\text{Area}) \times (\text{Carbon sequestered}) \times (11.4 \text{ kcal/gC}) \times (4187 \text{ J/kcal}) = 3.34 \times 10^{17} \text{ J/yr}$$

3. Pollutant removal

$$\text{Denitrification flux} = 6.9 \times 10^{10} \text{ mol N/yr (Zhao et al.[2016])}$$

$$= 9.66 \times 10^{11} \text{ gN/yr}$$

4. Primary production

$$\text{Primary productivity} = 219 \text{ gC/m}^2/\text{yr (Yoo et al.[2019])}$$

$$\text{Energy} = (\text{Area}) \times (\text{Primary productivity}) \times (11.4 \text{ kcal/gC}) \times (4187 \text{ J/kcal}) = 4.78 \times 10^{18} \text{ J/yr}$$