



Original Article

에머지 방법론을 이용한 한국 수산업의 지속가능성 평가

강대석^{1,†} · 남정호²

¹부경대학교 생태공학과 교수
²한국해양수산개발원 해양공간연구센터 센터장

Emergy Evaluation of Sustainability of Korean Fisheries

Daeseok Kang^{1,†} and Jungho Nam²

¹Professor, Department of Ecological Engineering, Pukyong National University 48513, Busan, Korea
²Director, MSP Research Center, Korea Maritime Institute, Busan 49111, Korea

요 약

자연의 일과 사람의 노력을 동시에 고려하는 에머지 평가법을 이용하여 우리나라 수산물 생산 시스템(원양어업 및 수산가공업 제외)의 생물리적 기반을 살펴보고 에머지 지수를 계산해 수산물 생산 시스템의 지속가능성을 평가하였다. 일 년 동안 수산물 생산에 유입하는 에머지 총량은 2015년 기준 1.53×10^{23} sej/yr이었는데, 조석, 하천 담수 등 자연환경 요소를 통해 공급된 재생가능에머지가 에머지 총량의 96.2%(1.47×10^{23} sej/yr)로 대부분을 차지했다. 외부구입 에머지가 에머지 유입량에서 차지하는 비율은 3.8%에 불과했다. 수산물을 생산하는 데 투입된 연간 에머지 총량의 화폐 환산 가치는 40조 3,065억원/년으로, 에머지 관점에서 평가한 수산물 생산 비용은 어업경영비를 이용해 추정한 수산물 생산 비용보다 약 27배 많았다. 우리나라 수산물의 평균 UEV는 노동과 서비스의 에머지를 제외할 경우 2.43×10^7 sej/J 또는 5.39×10^{10} sej/g (습중량 기준)로 계산되었다. 에머지 지수 계산 결과 우리나라 수산물 생산 시스템은 투입 비용 대비 효율성(에머지산출비율=26.51)이 높고 해양생태계에 미치는 영향(환경부하비율=0.04)이 아주 적었다. 그 결과 수산물 생산 시스템의 지속가능성(에머지지속성지수=676.41)은 아주 높은 것으로 나타났다. 수산업의 지속가능성을 높이기 위한 정책방향 제시에 더 유용한 정보를 확보하기 위해서는 해역, 어업유형, 어법 또는 생산 품종별로 에머지 평가를 수행하고, 수산업의 지속가능성을 높이기 위한 실용적인 시사점을 도출하기 위한 연구가 필요하다.

Abstract – Biophysical base of the Korean fisheries and their sustainability were evaluated using the emergy methodology. A total annual emergy input of 1.53×10^{23} sej/yr was required for the fishery production of Korea in 2015. Renewable environmental inputs accounted for 96.2% (1.47×10^{23} sej/yr) of the annual input and purchased inputs contributed only 3.8%. Money equivalent of the total emergy input to the Korean fisheries was 40.3 trillion ₩/yr, 27 times greater than total production cost estimated using data from fishing expense surveys. An average unit emergy value of fishery products of Korea was calculated as 2.43×10^7 sej/J or 5.39×10^{10} sej/g (on wet weight basis) without services. The Korean fisheries were a system with net contribution to the national economy beyond its own operation, as revealed by a high emergy yield ratio of 26.51. The environmental impact of fishing activities was very low as indicated by a low environmental loading ratio of 0.04. With high yield on investment and low environmental impact, the Korean fisheries were a sustainable system with emergy sustainability index of 676.41. Further emergy evaluations on subsystems of the Korean fisheries are needed to provide policy recommendations for specific sectors of the fishery system.

Keywords: Korean fisheries(한국 수산업), Emergy evaluation(에머지 평가), Sustainability(지속가능성)

1. 서 론

2017년 우리나라 어업의 부가가치는 3.4조원으로 총부가가치에서 차지하는 비중은 0.2%로 아주 낮고(BOK[2019]), 어가 인구가

전체 인구에서 차지하는 비율은 0.24%(MOF[2018])에 불과하다. 그러나 수산업(어촌 포함)은 식량의 안정적 공급, 고용기회 제공, 전통문화 계승, 휴식 공간, 지역사회 유지, 해양환경 보전 등의 역할을 수행하고 있으며(Kim *et al.*[2017]), 어패류는 국민이 소비하는 동물성 단백질의 18%(2016년 기준)를 차지하는 중요한 단백질

†Corresponding author: dskang@pknu.ac.kr

공급원이다(KREI[2017]). 2013~2015년 기준 우리나라의 일인당 연간 수산물 소비량은 58.4 kg으로 주요 국가 가운데 가장 많았다(MOF[2017]).

국가경제에서 수산업이 차지하는 비중이 감소하고 있으며(Kim *et al.*[2017]), 연안 개발, 해양오염, 기후변화, 소비패턴 변화, 어업 자원 감소, 어업인구 감소 및 고령화, 어선 노후화, 통상환경 변화 등 수산물 생산 여건이 악화하고 있다(Kim *et al.*[2017]; Ma *et al.*[2017]; Um *et al.*[2018]). 우리나라 수산업의 생산성과 지속가능성은 환경적 조건과 사회경제적 여건이 복잡하게 상호작용하여 나타난 결과이다. 따라서 수산업의 생산성과 지속가능성을 적절하게 평가하려면 자연환경의 일과 인간의 노력을 통합적으로 평가할 필요가 있다. 그러나 기존의 수산업 또는 어업 평가(Nam *et al.*[2010]; Zhang *et al.*[2017]; Kim[2019])는 수산물 생산의 생물리학적 토대와 인간의 노력을 동일한 기준에서 과학적으로 평가하지 못한 한계가 있다.

자연의 일과 사람의 노력을 공통의 기준에서 통합해 시스템 평가를 수행하는 에머지 평가법(Odum[1996])은 기존의 자연과학적 또는 경제학적 관점의 수산업 평가와 다른 관점에서 수산업의 지속가능성을 높이기 위한 정책방향 도출에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 에머지 평가법은 1990년대 중반 국내에 도입(Lee and Odum[1994])된 이후 다양한 분야에 적용되었다(Kang and Park[2002]; Kang[2007]; Nam *et al.*[2010]; Kang[2013]; Hong *et al.*[2015]; Kang[2015]; Kang *et al.*[2015]; Nam and Kang[2016]; Kang[2017]). 에머지 평가법을 수산 분야에 적용한 국내외 연구는 많지 않은데, 대부분 패류, 갑각류, 어류를 대상으로 하는 양식업(Odum and Ardning[1991]; Eum *et al.*[1996]; Kim *et al.*[2001]; Oh *et al.*[2008]; Vassallo *et al.*[2007, 2009]; Lima *et al.*[2012]; Wilfart *et al.*[2013]; Zhao *et al.*[2013]; Williamson *et al.*[2015])의 환경영향과 지속가능성을 평가하였다. Eum *et al.*[1996]은 수산물 생산량의 관점에서 특정 해역의 환경용량을 평가한 사례에 해당한다.

한 국가의 수산업 전체를 대상으로 에머지 평가를 수행한 연구는 우리나라 수산업을 평가한 Sohn *et al.*[1996]이 유일하다. 이 연구는 자연환경에너지가 우리나라 수산업의 주된 생산 기반이고, 투입 비용보다 더 많은 혜택을 제공하는 시스템이며, 에머지 관점에서 보았을 때 수산물의 가치는 시장가격이 제시하는 것보다 더 높다고 평가하였다. Sohn *et al.*[1996]의 연구가 기존의 전통적인 평가와는 다른 관점에서 우리나라 수산업의 특성을 평가한 첫 시도로서 의미가 크지만, 사회경제활동이 생태계에 미치는 영향과 지속가능성을 평가할 수 있는 방법이 개발되기 이전에 수행된 연구여서 수산업의 환경영향과 지속가능성을 평가하지 못한 한계가 있다. Sohn *et al.*[1996]의 연구 이후 우리나라 전체 수산업에 대한 에머지 평가는 더 이상 수행되지 않았고, 그 사이 에머지 평가법에도 큰 변화가 있었다. 따라서 Sohn *et al.*[1996]의 평가 이후 20년 이상이 지난 시점에서 우리나라 수산업의 환경영향과 지속가능성을 평가하고 향후 수산업의 지속가능성을 높이는 데 활용할 만한 정보를 확보할 필요가 있다.

현재 우리나라 수산업이 처한 환경을 고려할 때 수산업의 지속가능성을 높이기 위한 다양한 정책 방향과 대안이 필요한 시점이다. 에머지 평가가 우리나라 수산업의 지속가능성을 높이기 위한 정책 방향을 체계적으로 제시하는 데 활용되기 위해서는 수산업의 생물리학적 기반, 국가 경제 기여가치, 투입비용 대비 성과, 해양생태계 영향, 지속가능성 평가와 시계열 분석 및 모델링 등을 포함하는 통합적 연구를 진행할 필요가 있다. 이 연구는 이러한 통합적 연구의 출발점으로서 수산물 생산에 유입하는 자연환경에너지, 재화와 용역 등 우리나라 수산업의 생물리학적 기반을 평가하고, 수산물 생산의 환경영향과 지속가능성을 시스템 관점에서 평가하는 것을 목적으로 하였다.

2. 연구 방법

2.1 에머지 개념 및 평가 절차

시스템생태학자인 Howard T. Odum은 에너지량, 물질량, 정보량, 화폐량과 같은 생물리 자료를 이용해 생태계, 경제시스템 등과 같은 다양한 시스템의 특성을 평가하기 위한 방법으로 에머지(emergy) 평가법을 개발하였다(Odum[1996]). Energy memory를 줄여 나타난 용어인 에머지는 “한 가지 서비스나 생산물을 만드는 과정에 직접 그리고 간접으로 이미 소모한 한 종류의 이용 가능한 에너지”를 뜻한다(Odum[1996]). Odum[1996]은 에머지 평가법을 생산 관점의 시스템 평가법으로 구분했는데, 에머지 평가법에서는 다양한 종류의 재화와 용역이 인간의 삶에 기여하는 역할과 가치는 이들을 생산하는 데 투입된 모든 요소를 더함으로써 평가할 수 있다고 주장하기 때문이다. 이러한 점에서 에머지 평가법은 재화와 용역을 이용하는 소비자의 선호도에 기반을 두고 역할과 가치를 판단하는 경제학적 방법과 대비된다.

생태적 또는 경제적 재화와 용역의 생산은 성격이 다른 다양한 요소들이 투입되는 과정이다. 따라서 성격과 단위가 다른 요소들을 더해 재화와 용역의 역할과 가치를 평가하려면 평가의 기준이 필요한데, 에머지 정의에 포함된 “한 종류의 이용 가능한 에너지”라는 표현이 이를 의미한다. 시스템 평가에 필요한 계산을 수행하기 위해서는 재화와 용역의 생산 과정에 참여하는 모든 요소의 생물리 자료를 이 기준으로 먼저 환산해야 한다(Odum[1996]). 현재 에머지 평가법에서는 태양에너지를 비교의 기준으로 채택하고 있다. 즉, 생산 과정에 참여하는 모든 요소의 생물리 자료를 태양에너지 기준으로 먼저 환산해야 시스템 평가에 필요한 계산을 수행할 수 있게 된다. 이를 반영하여 에머지를 원칙적으로는 태양에머지(solar emergy)로 불러야 하지만, 대부분의 문헌에서는 에머지라는 용어를 사용한다. 에머지의 단위는 emjoules인데, 태양에너지를 기준으로 사용한 이후 solar emjoules(sej)을 이용한다.

전형적인 에머지 평가는 평가 대상 선정, 평가 경계 설정, 에머지 평가 모델 작성, 평가 기초 자료 수집(평가항목의 생물리 자료, UEV 등), 에머지 평가표 작성, 에머지 지수 계산으로 이루어진 절차를 따라 이루어진다(Odum[1996]). 에머지 평가의 기본 개념과 절차는

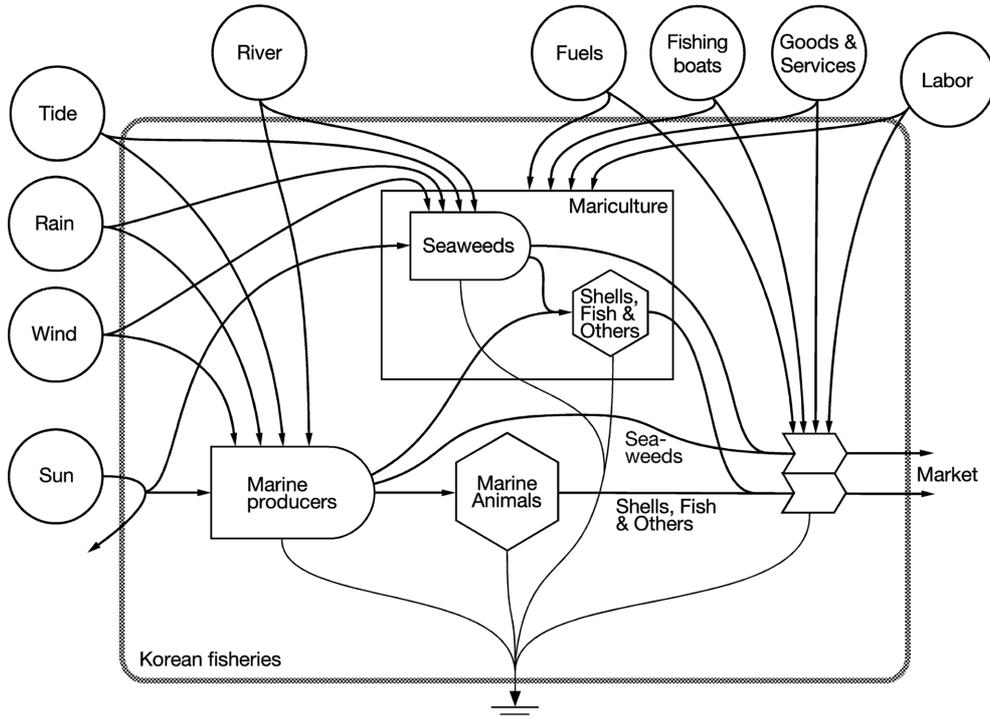


Fig. 1. Energy systems diagram for the Korean fisheries.

Odum[1996]을 따랐으며, 해양생태계를 대상으로 한 국내 연구(Kang and Nam[2003]; Kang[2013]; Kang[2015])를 참고하였다. 에너지시스템언어를 이용해 작성한 우리나라 수산업의 에머지 평가 모델은 Fig. 1에 제시하였다.

에머지 평가표의 일차적인 목적은 평가대상 항목의 생물리 자료(에너지량, 물질량, 정보량, 노동 투입량, 화폐량 등)를 이용해 각 항목의 에머지량을 계산하는 것이다(Odum[1996]). 따라서 각 항목별 생물리 자료를 에머지량으로 변환하기 위한 환산인자가 필요하다. 이 환산인자는 위에서 언급한 바와 같이 모든 항목의 생물리 자료를 태양에너지 기준으로 바꾸기 위한 값이다. 평가대상 항목의 에머지량은 각 항목의 생물리 자료와 환산인자를 곱해 구한다. 이때 생물리 자료와 환산인자의 단위가 서로 맞아야 한다. 에머지량 계산에 이용하는 환산인자를 통칭하여 에머지 원단위(unit emergy value, UEV)라고 하며, 생물리 자료의 단위가 에너지량일 경우 에너지변환도(transformivity; 단위는 sej/J), 질량일 경우 specific emergy(단위는 sej/g), 화폐일 경우 에머지-화폐비율(emergy money ratio; 단위는 sej/₩, sej/\$ 등)로 부르기도 한다.

Nam and Kang[2016]이 지적한 바와 같이 에머지 평가에서 계산하는 에머지량은 값이 아주 크고 에머지량의 단위는 흔히 볼 수 있는 단위가 아니기 때문에 에머지 평가 개념과 절차에 익숙하지 않은 일반인, 정책결정자, 전문가 등은 의미 파악이 쉽지 않을 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 에머지 평가법은 에머지량을 모든 사람에게 익숙한 화폐량으로 환산하여 제시하는 방법을 제안하고 있다. 에머지량(sej/yr 등)을 에머지-화폐비율(sej/\$, sej/₩ 등)로 나누면 에머지량을 화폐량으로 바꿀 수 있다(Odum[1996]). 이 연

구에서는 Kang[2019]이 우리나라 경제를 대상으로 계산한 에머지-화폐비율인 3.79×10^9 sej/₩을 이용하였다. Kang[2019]이 계산한 에머지-화폐비율은 우리나라 경제가 2015년 일 년 동안 사용한 총 에머지량(sej/yr)을 그 해의 국내총생산(₩/yr)으로 나눈 값이다.

2.2 에머지 지수

우리나라 수산업 시스템의 특성을 파악하기 위한 에머지 지수로 에머지산출비율(emergy yield ratio, EYR), 환경부하비율(environmental loading ratio, ELR), 에머지지속성지수(emergy sustainability index, ESI)를 계산하였다. 이 지수들을 계산하기 위해서는 평가대상 시스템으로 유입하는 에머지를 크게 세 가지로 구분하는데, 평가대상 시스템에 유입하는 자연환경의 재생가능요소가 공급한 에머지(R), 평가대상 시스템 내부의 재생불가능자원이 공급한 에머지(N), 그리고 시스템 외부에서 구입하여 투입한 에머지(F)이다. 평가대상 시스템의 에머지 생산량은 이들 세 가지 종류의 에머지량을 더해 구한다($Y=R+N+F$). Odum[1996]에 따르면 에머지 지수는 에머지 평가 자료를 통합하여 평가 대상의 시스템 특성에 관한 다양한 정보를 제공하는 역할을 한다.

에머지산출비율(EYR)은 특정 시스템이 생산한 재화와 용역에 내재한 에머지량(Y)과 이러한 재화와 용역을 생산하기 위해 시장에서 구입해 투입한 에머지량(F) 사이의 비율이다(Odum[1996]). EYR은 재화와 용역의 생산 과정에 투입한 에머지 비용(즉, 외부에서 구입해 투입한 에머지) 대비 생산시스템의 성과를 평가하는 데 이용한다. EYR이 클수록 투입 비용 대비 성과가 크기 때문에 시스템의 경쟁력이 더 높거나 투자효율이 더 좋은 것으로 평가한다.

즉, 생산물에 내재한 에머지량에서 생산 비용(시장에서 비용을 들여 구입한 에머지)이 차지하는 비중이 적을수록 생산 활동의 경쟁력이 더 높은 것으로 판단한다. EYR의 최소값은 1인데, 이는 비용(외부구입 에머지량)과 성과(생산물에 내재한 에머지량)가 같아 평가 대상 생산 활동이 경제시스템에 기여하는 순편익이 없다는 것을 의미한다.

환경부하비율(ELR)은 특정 시스템의 생산 활동이 생태계에 미치는 부정적인 영향을 평가하는 에머지 지수로, 생산 과정에 투입한 재생불가능 에머지량(N)과 외부구입 에머지량(F)을 더한 뒤 이를 재생가능 에머지량(R)으로 나누어 계산한다(Brown and Ulgiati[2004]). ELR은 재생불가능 에머지와 외부구입 에머지의 이용량이 증가할수록 환경에 미치는 부정적 영향이 클 것이라는 가정에 기반을 두고 있는 에머지 지수이다. ELR이 클수록 생산 활동이 평가대상 시스템에 미치는 부정적 영향이 크다. Brown and Ulgiati[2004]는 ELR이 10보다 크면 생산 활동이 생태계에 미치는 부정적 영향이 아주 크고, 3~10의 범위에 있을 경우 중간 정도의 영향을 미치며, 3보다 작을 때는 영향이 적은 생산 활동으로 구분하였다.

에머지지속성지수(ESI)는 에머지산출비율(EYR)을 환경부하비율(ELR)로 나눈 값으로, 평가대상 생산 활동이 얼마나 지속가능한지 판단하는 데 이용한다(Brown and Ulgiati[2004]). ESI는 평가대상 생산 활동이 생산에 투입한 에머지 비용보다 더 많은 에머지를 경제에 공급하고(즉, EYR이 크고) 환경에 미치는 영향이 적다면(즉, ELR이 작다면) 지속할 가능성이 더 높다는 개념에 기반을 두고 있다. Brown and Ulgiati[2004]는 ESI가 10보다 크면 장기적으로 지속가능한 생산 활동이며, 1보다 작다면 지속가능하지 않은 생산 활동으로 구분하였다.

2.3 에머지 평가 자료

우리나라 수산업 에머지 평가의 공간적 범위는 배타적경제수역 바깥쪽 경계 이내의 해역(면적 374,934 km²; MOLIT[2018])으로 하였다. 이 연구의 평가대상은 일반해면어업과 천해양식어업 등 우리나라 해역에서 발생하는 수산물 생산만을 대상으로 하였으며, 육상에서 이루어지는 수산가공업과 우리나라 해역 바깥에서 일어나는 원양어업은 평가에서 제외하였다. 에머지 평가의 기준 연도는 2015년으로 설정하였다.

수산업의 에머지 평가에 필요한 자료는 통계청, 해양수산부, 기상청, 국립해양조사원이 발간하는 국가 통계와 정부 보고서 및 학술문헌을 이용하였다. 에머지 평가에 필요한 자료는 모두 연간 자료를 이용했으며, 연간 자료가 없는 경우에는 각 평가 항목별 관련 자료를 토대로 연간 자료를 계산했다.

우리나라 수산물 생산에 투입되는 요소는 크게 재생가능 에머지와 외부구입 에머지로 구분해 평가 자료를 수집했다. 일반적으로 경제 활동을 포함하는 시스템 평가에 포함하는 내부의 재생불가능 에머지 유입은 수산업의 특성상 없는 것으로 간주하였다. 수산물 생산에 투입하는 인간의 노력은 노동(labor)과 서비스(services)로 구분해 자료를 수집했다. 노동은 수산물 생산에 직접 참여하는 사람들의

일에 해당하며, 서비스는 수산물 생산에 이용하는 다양한 재료, 장비, 연료 등의 생산 과정에 투입한 노동으로 수산물 생산에 필요한 간접 노력(즉, 인건비를 제외한 어업생산비용)을 뜻한다. 이 연구에서는 우리나라 농업을 평가한 Kang[2017]과 마찬가지로 기존 연구(Ulgiati et al.[1994]; Martin et al.[2006]; Ghisellini et al.[2014])를 따라 노동과 서비스를 재생가능 부분과 재생불가능 부분으로 분리해 평가하였다. 우리나라 경제가 일 년 동안 사용하는 총 에머지량에서 재생가능 에머지가 차지하는 비율은 2.1%이며, 내부의 재생불가능 에머지와 외부구입 에머지는 97.9%를 차지하였다(Kang[2019]). 이에 따라 수산물 생산에 필요한 노동 및 서비스의 2.1%는 재생가능 에머지, 97.9%는 외부구입 에머지에 포함하였다.

우리나라 수산물 생산 과정에 유입하는 재생가능 요소 및 외부구입 요소의 에머지량 계산에 필요한 UEV는 문헌 자료를 이용했다. 이 연구에서 사용한 모든 UEV는 지구생태계로 유입하는 연간 재생가능 에머지 유입량이 15.83×10²⁴ sej/yr(Odum et al.[2000])인 경우를 기준으로 계산된 값이거나 환산한 값을 이용했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수산물 생산의 에머지 유입 특성

우리나라 해양생태계에서 수산물을 생산하는 데 투입된 에머지는 2015년 기준 연간 1.53×10²³ sej/yr(Table 1)로 계산되었는데, 자연 환경이 공급한 재생가능에머지량(Table 1의 5~8번 항목 에머지량 합계)과 시장에서 구입하여 투입한 외부구입 에머지량(Table 1의 9~12번 항목 에머지량 합계)을 더한 값이다. 재생가능에머지량이 수산물 생산에 유입한 에머지 총량의 96.2%로 대부분을 차지하였으며, 외부구입 에머지는 3.8%에 불과하였다. 이는 시장에서 구입한 재화와 용역의 에머지가 대부분을 차지하는 농업(Kang[2017])과 달리 수산업은 우리나라 해양생태계로 유입하는 재생가능에너지에 의존하고 있음을 보여준다.

2015년 약 273만톤(일반해면어업과 천해양식어업 생산량의 합계; MOF[2018])의 수산물을 생산하는 데 투입된 에머지량(1.53×10²³ sej/yr)을 화폐 단위로 환산하면 40조 3,065억원/년이었다. 이는 2015년 수산물 생산에 투입한 에머지 관점의 비용에 해당한다. 2015년 어가경제통계(Statistics Korea[2016]) 자료를 이용해 추정된 총 어업비용은 1조 5,105억원/년인데, 에머지 관점의 수산물 생산 비용은 이보다 약 27배 더 많았다. 이러한 차이는 수산물 생산 비용 통계에 포함되지 않는 자연환경 요소의 역할과 수산물 생산에 투입되는 에너지와 물질 자체의 에머지량까지 에머지 평가에 포함하였기 때문이다.

Table 1에 포함된 재생가능에머지 공급원은 자연환경에너지(태양, 바람, 강수, 파도, 조석, 하천 담수)와 인간 노력(노동 및 서비스)의 두 가지 유형으로 구분하였다. 어업활동이 이루어지는 해양생태계로 유입하는 자연환경에너지 가운데 연간 에머지 공급량이 가장 많은 것은 조석에너지(1.11×10²³ sej/yr)이며, 해양유입 하천 담수의 화학에너지, 강수, 파도, 태양, 바람의 순으로 연간 에머지 유입량이 감소하였다. 수산물 생산에 직접(Table 1의 8번 항목,

Table 1. Emergy evaluation table for the Korean fisheries

No	Item	Raw Data	Unit Emergy Value (UEV) ^a	UEV Source ^b	Solar Emergy (sej/yr)	Emvalue ^c (2015 em₩/yr)
Renewable inputs						
1	Sunlight	1.64×10^{21} J/yr	1 sej/J	a	1.64×10^{21}	4.32×10^{11}
2	Wind	5.46×10^{17} J/yr	2450 sej/J	a	1.34×10^{21}	3.53×10^{11}
3	Rain	1.90×10^{18} J/yr	1.25×10^4 sej/J	a	2.38×10^{22}	6.28×10^{12}
4	Wave	3.15×10^{17} J/yr	5.10×10^4 sej/J	a	1.60×10^{22}	4.23×10^{12}
5	Tide	1.50×10^{18} J/yr	7.39×10^4 sej/J	a	1.11×10^{23}	2.93×10^{13}
6	River, chemical	4.40×10^{17} J/yr	8.13×10^4 sej/J	a	3.58×10^{22}	9.45×10^{12}
7	Services, renewable	2.45×10^{10} ₩/yr	3.79×10^9 sej/₩	b	9.29×10^{19}	2.45×10^{10}
8	Labor, renewable	7.20×10^9 ₩/yr	3.79×10^9 sej/₩	b	2.73×10^{19}	7.20×10^9
Purchased inputs						
9	Fuels	3.32×10^{13} J/yr	varies sej/J	c	6.28×10^{18}	1.66×10^9
10	Fishing boats	6.80×10^9 g/yr	2.22×10^{10} sej/J	d	1.51×10^{20}	3.99×10^{10}
11	Services, nonrenewable	1.14×10^{12} ₩/yr	3.79×10^9 sej/₩	b	4.33×10^{21}	1.14×10^{12}
12	Labor, nonrenewable	3.35×10^{11} ₩/yr	3.79×10^9 sej/₩	b	1.27×10^{21}	3.35×10^{11}
Production						
18	Fishery production	2.73×10^{12} g/yr 6.05×10^{15} J/yr	(wet weight)		1.53×10^{23} 1.53×10^{23}	4.03×10^{13} 4.03×10^{13}
	UEV with services		5.60×10^{10} sej/gWW 2.53×10^7 sej/J			
	UEV without services		5.39×10^{10} sej/gWW 2.43×10^7 sej/J			

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

^bUEV sources: a) Odum *et al.*[2000], b) Kang[2019], c) Brown *et al.*[2011], d) Brown and Arding[1991]

^cEmvalues were calculated with the emergy-money ratio of the year 2015 for Korea.

*Detailed calculations for line items are given in Appendix.

Labor) 및 간접(Table 1의 7번 항목, Services)으로 투입한 인간의 노력은 각각 2.73×10^{10} sej/yr, 9.29×10^{19} sej/yr의 에머지를 공급하였다. 2015년 기준 수산물 생산에 이용된 재생가능에너지 총량은 1.47×10^{23} sej/yr인데, 조석, 하천 담수, 노동 및 서비스의 에머지량을 더하여(Table 1의 5~8번 항목 에머지량 합계) 구했다. 조석이 공급한 에머지량은 재생가능에너지 유입량의 75.6%, 하천 담수는 24.3%를 공급하였으며, 인간의 노력(노동 및 서비스)이 공급한 에머지량은 0.1%에 불과하였다.

태양, 바람, 강수, 파도, 조석의 에머지량을 모두 더한다면 중복 계산이 되는데, 이들 자연환경에너지는 생물권의 에너지 흐름과 물질 순환 과정에서 아주 밀접하게 결합되어 있기 때문이다(Odum *et al.*[2000]). 이러한 중복계산을 피하기 위해 에머지 평가법에서는 중복 계산 우려가 있는 항목의 경우 에머지 유입량이 가장 큰 요소만 에머지 유입량 합계에 포함한다. 하천을 통해 해양생태계로 유입하는 담수의 에머지는 육상에 내린 강수에서 기원한 것이기 때문에 해양생태계로 직접 유입하는 태양, 바람, 강수, 파도, 조석과 중복계산의 우려가 없어 재생가능에너지 유입량 합계에 포함하였다.

수산물 생산에 투입된 재생가능에너지 총량을 화폐 단위로 환산하면 2015년 기준 38조 7,862 억원/년이었다(Table 1). 재생가능에너지 유입량 합계에 포함된 조석과 하천 담수의 에머지는 각각 29조 3,068 억원/년, 9조 4,477 억원/년의 가치에 해당하였다. 이는 2015년의 수산물 생산(약 273만톤)에 기여한 자연환경요소의 가치에 해

당한다.

수산물 생산을 위해 시장에서 구입해 투입한 요소에는 연료, 어선, 서비스 및 노동(재생불가능 부분의 네 가지 항목(Table 1의 9~12번 항목)을 포함하였다. 외부구입 요소를 통해 수산물 생산에 유입한 총 에머지량은 5.76×10^{21} sej/yr이었다. 외부구입 요소 가운데 간접 노동에 해당하는 서비스(즉, 수산물 생산에 필요한 재료, 연료, 어선 등의 생산 과정에 투입된 노동력)가 외부구입 에머지의 대부분을 차지하였는데, 연간 4.33×10^{21} sej/yr(외부구입 에머지의 75.2%)의 에머지를 공급하였다. 이외에도 노동(수산물 생산에 직접 투입한 인간의 노력)이 22.1%의 에머지를 공급하였으며, 어선(2.6%)과 연료(0.1%)가 공급한 에머지량은 미미하였다.

위에서 계산한 외부구입 에머지 총량은 연료와 어선 이외에 일반해면어업과 천해양식어업에 투입하는 재화(어구, 양식시설 등)를 구성하는 물질에 내재한 에머지량을 포함하지 못한 외부구입 에머지의 기여량을 저평가한 것으로 판단한다. 작물별로 에너지, 물질(비료, 농약 등), 노동 투입량 등에 관한 구체적인 자료를 제시하는 농업 통계와 달리 수산 통계는 수산물 생산에 투입하는 재화의 물질량에 관한 구체적인 통계가 없다. 따라서 연료와 어선을 제외한 재화의 물질에 내재한 에머지량은 평가에 포함하지 못했다. 아직까지 국가 차원의 수산업에 관한 국내외 에머지 평가 연구가 거의 없어 어구, 양식시설 등을 제외한 수산업의 에머지 평가가 외부구입 에머지를 얼마나 저평가하는지 판단하기는 힘들다. Sohn *et al.*[1996]

의 경우에도 국내 수산업에 투입한 외부구입 에머지 가운데 물질이나 에너지 자체의 에머지량을 계산한 항목은 연료만 포함하였다. 따라서 향후 수산물 생산에 투입하는 물질에 대한 구체적인 자료를 포함하여 우리나라 수산업에 투입되는 연간 에머지량에 대한 더 정확한 계산을 수행하는 방안을 찾을 필요가 있다.

우리나라 수산물 생산에 투입한 외부구입 에머지량을 회계 단위로 환산하면 2015년 기준 1조 5,203억원/년이었다. 외부구입 에머지 가운데 연료와 어선이 공급한 에머지량은 에너지와 물질에 내재한 에머지량을 계산하였기 때문에 수산물 생산 비용 통계에 포함되지 않는 항목으로, 이들이 수산물 생산에 기여한 가치는 연간 415억 원에 해당하였다. 그러나 앞서도 언급한 바와 같이 현행 수산 통계의 문제 때문에 수산물 생산에 투입하는 재화의 물질량이 Table 1의 에머지 평가에 모두 포함되지 않아 재화의 기여 가치를 저평가한 한계가 있다.

2015년 수산물 생산에 투입된 총 에머지량(1.53×10^{23} sej/yr)을 수산물 생산량(습중량 기준)과 단위중량당 열량 자료(NAAS[2016])를 이용해 계산한 에너지량으로 나누어 우리나라 수산물의 평균 UEV를 계산하였다(Table 1). 질량 기준 UEV는 수산물 생산 통계가 습중량으로 제시되어 있어 습중량 기준 UEV를 계산하였다. 노동과 서비스를 포함할 경우 수산물의 평균 UEV는 5.60×10^{10} sej/g, 2.53×10^7 sej/J이었으며, 노동과 서비스를 제외할 경우에는 5.39×10^{10} sej/g, 2.43×10^7 sej/J이었다. 이는 기존 국내 연구(예를 들어, Kang[2015])에서 인용한 외국 문헌의 평균 UEV(노동과 서비스를 제외하더라도 8.40×10^6 sej/J; Brown *et al.*[1993])보다 약 2.9배 더 높다. Sohn *et al.*[1996]은 우리나라에서 생산한 수산물의 UEV를 계산하지 않았다. 이는 외국 문헌의 UEV를 이용하여 기존 국내 연구에서 계산한 수산물의 가치가 과소평가되었을 가능성을 시사한다. 노동과 서비스를 제외하고 계산한 UEV는 자연환경이 순수하게 기여한 가치를 계산할 때 이용하는데, 이 연구에서 계산한 2015년 생산 수산물의 가치는 38조 7,960억원/년이었다. 그러나 위에 제시한 외국 문헌의 UEV를 이용해 계산한 2015년 생산 수산물의 가치는 13조 4,017억원/년으로, 이 연구에서 계산한 2015년 수산물의 가치의 35%에 불과하였다. 우리나라 해양생태계에서 생산한 수산물의 가치를 에머지 관점에서 더 정확하게 계산하기 위해서는 향후 수산물 품종별 UEV를 계산하기 위한 연구를 진행할 필요가 있다.

3.2 수산물 생산의 지속가능성 평가

Table 1의 에머지 평가 결과를 이용하여 우리나라 수산업의 지속가능성을 평가하는데 활용할 수 있는 에머지 지수를 Table 2에서 계산하였다. 수산물 생산에 투입된 에머지에서 재생가능 에머지가 차지하는 비율은 수산물 생산의 지속가능성을 판단하는데 이용할 수 있는데, 2015년의 경우 96.2%에 이르렀다. 경제활동에 필요한 에머지를 대부분 수입하는 우리나라 경제(2015년 기준 재생가능에머지 비율 2.1%; Kang[2019])나 시장에서 구입한 에머지에 주로 의존하는 농업(2013년 기준 재생가능에머지 비율 9.7%; Kang[2017])과 달리 수산업의 경우 재생가능 요소가 대부분의 에머지를 공급

Table 2. Emergy indices for the Korean fisheries

Emergy indices	Value
Renewable sources, R	1.47×10^{23} sej/yr
Local nonrenewable sources, N	-
Purchased inputs, F	5.76×10^{21} sej/yr
Total emery use, Y=R+N+F	1.53×10^{23} sej/yr
Fraction of renewable emery input, R/Y	96.2%
Emergy yield ratio, EYR=Y/F	26.51
Environmental loading ratio, ELR=(N+F)/R	0.04
Emergy sustainability index, ESI=EYR/ELR	676.41

해 재생가능에머지 비율만 고려할 때 지속가능성이 아주 높은 시스템으로 평가할 수 있다.

2015년 기준 우리나라 수산물 생산 시스템의 EYR은 26.51로 계산되었다. 이는 2015년 생산한 수산물에 내재한 총 에머지량이 외부구입 에머지의 약 27배에 이르러 투입 에머지 비용 대비 생산 효율성이 아주 높다는 것을 의미한다. 농산물 생산의 EYR은 2013년 기준 1.11(Kang[2017])에 불과하였으며, 우리나라 전체 경제의 EYR(2015년 기준)도 1.21(Kang[2019])로 수산물 생산의 EYR에 비해 아주 낮았다.

수산물 생산이 해양생태계에 미치는 부정적 영향을 나타내는 ELR은 0.04로 아주 낮았다. 농작물 생산의 ELR은 9.30(Kang[2017])으로 수산물 생산보다 환경에 미치는 영향이 컸으며, 우리나라 경제의 ELR(2015년 기준)은 45.68(Kang[2019])로 환경에 미치는 영향이 아주 컸다. Brown and Ulgiati[2004]는 환경부하비율이 10보다 크면 환경에 미치는 영향이 아주 큰 것으로 분류한 바 있다.

2015년 기준 우리나라 수산물 생산의 ESI는 676.41로, 지속가능성이 아주 높은 시스템으로 평가할 수 있다(Table 2). 이는 농산물 생산의 ESI(0.12; Kang[2017])나 우리나라 경제의 ESI(2015년 기준 0.03; Kang[2019])보다 훨씬 높은 값으로, 넓은 면적에 걸쳐 자연환경 요소가 공급하는 에머지에 크게 의존하는 수산물 생산의 특성을 반영한다.

Table 2에 제시한 우리나라 수산물 생산의 에머지 지수를 Sohn *et al.*[1996]의 자료를 이용하여 계산한 결과와 Table 3에서 비교하였다. Sohn *et al.*[1996]은 Table 2의 에머지 지수 가운데 ELR과 ESI를 계산하지 않았지만, Sohn *et al.*[1996]이 제시한 에머지 평가표를 이용하여 계산한 자료를 Table 3에 추가하였다. 이 연구는 Sohn *et al.*[1996]의 평가보다 우리나라 수산물 생산의 투입 비용 대비 효율성(EYR)과 지속가능성(재생가능에머지 비율, ESI)이 더 높고, 해양생태계에 미치는 영향(ELR)이 더 낮은 것으로 평가하였다. 수산가공업과 원양어업 생산량을 포함한 Sohn *et al.*[1996]과 달리 이 연구의 내용적 경계는 일반해면어업과 천해양식어업을 통한 수산물 생산만 포함하고 수산가공업과 원양어업은 포함하지 않은 차이가 있다.

에머지 지수의 차이는 일차적으로 두 연구에서 계산한 조석에너지량과 에머지량 계산에 사용한 조석의 UEV값 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 이 연구에서 계산한 조석에너지량(1.50×10^{18} J/

Table 3. Comparison of emergy indices for the Korean fisheries

Emergy indices	Sohn <i>et al.</i> [1996]	This study
Renewable fraction in the total annual emergy use	0.67	0.96
Emergy yield ratio (EYR)	2.98	26.51
Environmental loading ratio (ELR)	0.50	0.04
Emergy sustainability index (ESI)	5.92	676.41

*Environmental loading ratio and emergy sustainability index of Sohn *et al.*[1996] were calculated based on data in their tables.

yr)은 Sohn *et al.*[1996]이 제시한 조석에너지량(2.89×10^{17} J/yr)보다 약 52배 더 많았다. 조석에너지가 해양생태계에 기여하는 에머지량은 대륙붕에서 흡수되는 조석에너지량으로 계산하는데 (Odum[1996]), 우리나라 대륙붕 면적을 고려했을 때 Sohn *et al.*[1996]이 계산한 조석에너지량은 지나치게 낮은 것으로 보인다. Sohn *et al.*[1996]은 연구의 공간적 경계로 배타적 경제수역을 설정한 것으로 기술하였지만, 조석에너지량 계산 시 사용한 면적은 배타적 경제수역이나 대륙붕 면적이 아니라 더 작은 면적을 이용한 것으로 추정된다. 그 결과 조석에너지가 기여하는 에머지량이 지나치게 과소평가되었다. 또한 두 연구에서 사용한 모든 항목의 UEV(기준이 되는 태양에너지의 UEV 제외)가 다른데, UEV 계산의 기초가 되는 지구생태계 차원의 연간 재생가능에머지 유입량 (Odum[1996]; Odum *et al.*[2000])이 새로운 자료와 방법을 적용하여 2000년을 기준으로 그 값이 달라진 데 기인한다. 이 연구에서 사용한 조석에너지의 UEV는 Sohn *et al.*[1996]이 사용한 값보다 약 4.4배 크다.

앞에서도 언급한 바와 같이 수산물 생산에 투입하는 외부구입 요소 가운데 연료와 어선을 제외한 재화의 물질에 내재한 에머지량을 Table 1의 평가에 포함하지 못하였기 때문에 Table 2의 에머지 지수는 가용 자료의 한계에 따른 불확실성을 내포하고 있다. 미국 체사피크만 부유식 굴양식의 경우 노동과 서비스가 외부구입 에머지에서 차지하는 비율이 49%(Williamson *et al.*[2015])였으며, 브라질 새우양식장의 경우 43%(Lima *et al.*[2012])였다. 우리나라 농업(Kang[2017])의 경우 노동과 서비스의 에머지는 외부구입 에머지의 약 43%에 해당하였다. 이 사례들이 평가한 시스템은 국가 전체의 수산물 생산 시스템과 규모나 성격에서 현저히 달라 이 자료를 적용해 수산물 생산의 ESI를 추정하는 데는 큰 한계가 있다. 그러나 이들 연구의 결과를 감안하여 노동과 서비스가 수산물 생산에 투입하는 외부구입 에머지의 50%, 재화를 구성하는 에너지와 물질 자체의 에머지량이 50%를 차지한다고 단순하게 가정하고 수산물 생산의 ESI를 다시 계산하면 185.1로 대폭 감소하였지만, 여전히 수산물의 생산의 지속가능성은 아주 높게 평가되었다. 향후 우리나라 수산물 생산의 지속가능성 평가의 불확실성을 줄이기 위해서는 어선과 연료를 제외한 재화의 물질 에머지량 계산에 필요한 자료의 추정방법을 개발할 필요가 있다.

Table 2에 제시한 에머지 지수가 우리나라 수산물 생산 시스템의 지속가능성이 높다는 것을 보여주었지만, 이는 우리나라 해양생태계를 대상으로 하는 전체 시스템의 평균적 특성만을 나타낸다. 해역

별, 어업유형별, 어법별 또는 품종별 수산물 생산 시스템의 투입 비용 대비 성과, 환경영향, 지속가능성은 Table 2에 제시한 것과 다른 특성을 보일 수 있다. 특히 육지와 인접한 해역에서 이루어지는 수산물 생산의 경우 연안개발, 남획, 과밀 양식 및 양식어장 환경 악화 등 지역 차원의 요인과 기후변화로 대표되는 지구적 차원의 요인이 복합적으로 작용하여 수산물 생산 여건이 악화하고 있기 때문에 이 연구에서 평가한 수산업 전체의 특성과 많이 다를 수 있다. 따라서 수산업의 지속가능성을 높이기 위한 정책방향 제시에 더 유용한 정보를 확보하기 위해서는 해역, 어업유형, 어법 또는 생산 품종별로 에머지 평가를 수행할 필요가 있다.

4. 결 론

자연의 일과 사람의 노력을 동시에 고려하는 에머지 평가법을 이용하여 우리나라 수산물 생산 시스템(원양어업 및 수산물공업 제외)의 생물리적 기반을 살펴보고 에머지 지수를 계산해 수산물 생산 시스템의 지속가능성을 평가하였다. 일 년 동안 수산물 생산에 유입하는 에머지 총량은 2015년 기준 1.53×10^{23} sej/yr이었는데, 조석, 하천 담수 등 자연환경 요소를 통해 공급된 재생가능에머지가 에머지 총량의 96.2%(1.47×10^{23} sej/yr)로 대부분을 차지했다. 외부구입 에머지가 에머지 유입량에서 차지하는 비율은 3.8%에 불과했다. 수산물을 생산하는 데 투입된 연간 에머지 총량의 회파 환산 가치는 40조 3,065억원/년으로, 에머지 관점에서 평가한 수산물 생산 비용은 어업경영비를 이용해 추정한 수산물 생산 비용보다 약 27배 많았다. 우리나라 수산물의 평균 UEV는 노동과 서비스의 에머지를 제외할 경우 2.43×10^7 sej/J 또는 5.39×10^{10} sej/g(습중량 기준으로 계산되었다. 이는 지금까지 국내 연구에서 활용한 외국 문헌의 UEV보다 약 2.9배 높아 기존 연구에서 수산물의 사회경제적 가치를 저평가하였다. 에머지 지수 계산 결과 우리나라 수산물 생산 시스템은 투입 비용 대비 효율성(EYR=26.51)이 높고 해양생태계에 미치는 영향(ELR=0.04)이 아주 적었다. 그 결과 수산물 생산 시스템의 지속가능성(ESI=676.41)은 아주 높은 것으로 나타났다.

이 연구에서 계산한 에머지 지수가 우리나라 수산물 생산 시스템의 지속가능성이 높다는 것을 보여주었지만, 이는 우리나라 해양생태계를 대상으로 하는 전체 시스템의 평균적 특성만을 나타낸다. 해역별, 어업유형별, 어법별 또는 품종별 생산 시스템의 에머지 투입 비용 대비 성과, 환경영향 및 지속가능성은 전체 시스템과 다를 수 있다. 따라서 수산업의 지속가능성을 높이기 위한 정책방향 제

시에 더 유용한 정보를 확보하기 위해서는 해역, 어업유형, 어법 또는 생산 품종별로 에머지 평가를 수행하고, 수산업의 지속가능성을 높이기 위한 실용적인 시사점을 도출할 필요가 있다. 또한 수산물 생산 시스템 에머지 평가의 객관성과 정확성을 높이기 위해서 수산물 생산에 투입하는 물질(어구, 양식시설 등)에 관한 구체적인 자료의 확보, 에머지량 평가의 기초 자료인 수산물 품종별 UEV 데이터베이스의 구축을 우선적으로 추진할 필요가 있다.

후 기

이 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)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] BOK (Bank of Korea), 2019, Economic Statistics System, <http://ecos.bok.or.kr> (accessed 2019.06.01.)
- [3] Brown, M.T. and Arding, J., 1991, Transformities working paper, Center for Wetlands, University of Florida, Gainesville, USA.
- [4] Brown, M.T. and Ulgiati, S., 2004, Emergy analysis and environmental accounting, *Encyclopedia of Energy*, 2, 329-354.
- [5] 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(3), 879-887.
- [6] Brown, M.T., Woithe, R.D., Odum, H.T., Montague, C.L. and Odum, E.C., 1993, Emergy analysis perspectives of the Exxon Valdez oil spill in Prince William Sound, Alaska, Center for Wetlands and Water Resources, University of Florida, Gainesville, FL.
- [7] 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.
- [8] Garratt, J.R., 1992, *The Atmospheric Boundary Layer*, Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press, Cambridge.
- [9] Ghisellini, P., Zucaro, A., Viglia, S. and Ulgiati, S., 2014, Monitoring and evaluating the sustainability of Italian agricultural system: an emergy decomposition analysis, *Ecol. Model.*, 271, 132-148.
- [10] Hong, S., Lee, J. and Kang, D., 2015, Emergy evaluation of management measures for derelict fishing gears in Korea, *Ocean Sci. J.*, 50(3), 603-613.
- [11] Kang, D. and Nam, J., 2003, Emergy-based valuation of marine environmental resources and policy implications, Korea Maritime Institute, Seoul.
- [12] Kang, D. and Park, S.S., 2002, Emergy evaluation perspective of a multipurpose dam proposal in Korea, *J. Environ. Manage.*, 66(3), 293-306.
- [13] Kang, D., 2007, Emergy evaluation overview of the natural environment and economy of the Han River basin in Korea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, 10(3), 138-147.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Kang, D., 2017, Emergy evaluation of Korean agriculture, *J. Evn. Sci. Intern.*, 26(9), 1087-1099.
- [17] Kang, D., 2019, Emergy evaluation database for Korea, unpublished manuscript.
- [18] Kang, D., Nam, J., Choi, H.W. and Son, K., 2015, Spatial valuation map for Gyeonggi Bay in Korea based on emergy methodology, 8th International Ecosystem Services Partnership Conference 2015, 9~13 November, Stellenbosch, South Africa.
- [19] KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Administration), 2012, Harmonic constants for tide and tidal current of the Korean coast, Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, Busan.
- [20] Kim, D.-H., 2019, A study on an offshore fishery model for maximum sustainable yield(MSY), *J. Kor. Island*, 31(1), 83-99.
- [21] Kim, D.Y., Ryu, J.G., Park, S.W., Kim, S.H., Lee, H.D., Ha, H.S. and Ha, H.J., 2017, A study on policy direction for the development of the fisheries industry and fishing communities of the future, Korea Maritime Institute, Busan.
- [22] 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.
- [23] KMA (Korea Meteorological Administration), 2016, Annual Climatological Report, Korea Meteorological Administration, Seoul.
- [24] KREI (Korea Rural Economic Institute), 2017, Food Balance Sheet, Korea Rural Economic Institute, Naju.
- [25] Lee, S.M. and Odum, H.T., 1994, Emergy analysis overview of Korea, *J. Korean Env. Sci. Soc.*, 3, 165-175.
- [26] 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.
- [27] Ma, C.M., Lee, S.C., Jung, S.B., Yoon, M.K. and Hwang, S.Y., 2017, Research on the establishment of a roadmap for sustainable fisheries at mudflats – shellfish aquaculture, Korea Maritime Institute, Busan.
- [28] Manwell, J.F., McGowan, J.G. and Rogers, A.L., 2010, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons, New York.
- [29] Martin, J.F., Diemont, S.A.W., Powell, E., Stanton, M. and

- Levy-Tacher, S., 2006, Emergy evaluation of the performance and sustainability of three agricultural systems with different scales and management, *Agr. Ecosyst. Environ.*, 115(1-4), 128-140.
- [30] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), 2017, Fishery product consumption of Korea, <http://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey=15063&boardKey=10&menuKey=376¤tPageNo=1> (accessed 2019.06.20.)
- [31] MOF, 2018, Statistical Yearbook of Oceans and Fisheries, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong.
- [32] MOF, 2019, Marine Statistical Information System, <http://www.mof.go.kr/statPortal/main/portalMain.do> (accessed 2019.03.11).
- [33] MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2016, Korea Annual Hydrological Report, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong.
- [34] MOLIT, 2018, Coastal information Q&A, http://www.molit.go.kr/USR/policyTarget/m_24066/dtl.jsp?idx=203 (accessed 2018.05.12.)
- [35] NAAS (National Academy of Agricultural Science), 2016, Food Composition Table, NAAS, Suwon.
- [36] Nam, J. and Kang, D., 2016, Emergy valuation of tidal flat ecosystems in Korea: I. Characteristics of environmental emergy inputs, *The Sea*, 21(4), 134-143.
- [37] Nam, J.O., Choi, J.D., Cho, J.H. and Lee, J.S., 2010, A study on the optimal production using discrete time bio-economic model: a case of the large purse seine fisheries in Korea, *Environmental and Resource Economics Review*, 19(4), 771-804.
- [38] Nam, J., Chang, W. and Kang, D., 2010, Carrying capacity of an uninhabited island off the southwestern coast of Korea, *Ecol. Model.*, 221(17), 2102-2107.
- [39] Odum, H.T. and Arding, J.E., 1991, Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador, Center for Wetlands, University of Florida, Gainesville, FL.
- [40] Odum, H.T., 1996, *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*, John Wiley & Sons, New York.
- [41] 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.
- [42] Oh, H.T., Lee, S.M., Lee, W.C., Jung, R.H., Hong, S.J., Kim, N.K. and Tilburg, C., 2008, Sustainability evaluation for shellfish production in Gamak Bay based on the systems ecology: 1. emergy evaluation for shellfish production in Gamak Bay, *J. Env. Sci.*, 17(8), 841-856.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] Statistics Korea, 2016, Fishery Household Economy Survey Report, Statistics Korea, Daejeon.
- [46] Ulgiati, S., Odum, H.T. and Bastianoni, S., 1994, Emergy use, environmental loading and sustainability: an emergy analysis of Italy, *Ecol. Model.*, 73, 215-268.
- [47] Um, S.H., Ryu, J.G., Lee, J.S., Lee, D.L. and Lee, W.S., 2018, Improvement measures of coastal and offshore fishing permit system corresponding to fishing condition changes, Korea Maritime Institute, Busan.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] Williamson, 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.
- [52] Zhang, C.-I., Seo, Y.-I. and Kang, H.-J., 2017, Estimation of the exploitable carrying capacity in the Korean water of the East China Sea, *JFMSE*, 29(2), 513-525.
- [53] 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 8 July 2019

Revised 12 August 2019

Accepted 13 August 2019

Appendix. Notes to Table 1.

1. Sunlight

Area = 3.75×10^{11} m² (MOLIT[2018]); Insolation = 4.85×10^9 J/m²/yr (KMA[2016]); Albedo = 0.1 (assumed)

Energy = (Area)×(Insolation)×(1- Albedo) = 1.64×10^{21} J/yr

2. Wind

Average wind speed = 7.4 m/s (KMA[2016]); Air density = 1.23 kg/m³; Drag coefficient = 0.00126 (Garratt[1992])

Geostrophic wind = (Reference velocity)×(Height/Reference height)^{0.5} 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) = 3.1 m/s

Energy = (Area)×(Air density)×(Drag coefficient)×(Wind absorbed)³ × (3.1536×10⁷ sec/yr) = 5.46×10^{17} J/yr

3. Rain

Rain = 1.03 m/yr (KMA[2016])

Energy = (Area)×(Rain)×(1000 kg/m³)×(4940 J/kg) = 1.90×10^{18} J/yr

4. Wave

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

Energy = (Wave energy potential)×(1×10⁶ J/sec/MW)×(3.1536×10⁷ sec/yr) = 3.15×10^{17} J/yr

5. Tide

Continental shelf area = 2.45×10^{11} m² (Kang[2015]); Average tidal range = 1.86 m (KHOA[2012]); Percent absorbed = 50%

Energy = (Density×Area×Tidal range)×(9.8 m/s²)×(0.5×Tidal range)×(706 cycles/yr)×(Percent absorbed) = 1.50×10^{18} J/yr

6. River, chemical

Inflow = 8.97×10^{10} m³/yr(MOLIT[2016]); Gibbs free energy of river water = 4.91 J/g

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

7. Services, renewable fraction

Annual cost = 1.17×10^{12} ₩/yr (data from item number 11 below); Renewable fraction = 0.021 (Kang[2019])

Renewable service input = 2.45×10^{10} ₩/yr

8. Labor, renewable fraction

Annual cost = 3.43×10^{11} ₩/yr (data from item number 12 below); Renewable fraction = 0.021 (Kang[2019])

Renewable labor input = 7.20×10^9 ₩/yr

9. Fuels

Gasoline use = 1.10×10^5 L/yr (MOF[2019])

Energy = Use×(3.70×10⁷ J/L) = 4.07×10^{12} J/yr

UEV of gasoline = 1.95×10^5 sej/J (Brown et al.[2011])

Emergy = Annual use×UEV = 7.94×10^{17} sej/yr

Diesel use = 9.13×10^5 L/yr (MOF[2019])

Energy = Use×(3.03×10⁷ J/L) = 2.77×10^{13} J/yr

UEV of diesel = 1.89×10^5 sej/J (Brown et al.[2011])

Emergy = Annual use×UEV = 5.23×10^{18} sej/yr

Bunker use = 3.10×10^4 L/yr (MOF[2019])

Energy = Use×(3.64×10⁷ J/L) = 1.13×10^{12} J/yr

UEV of bunker = 1.80×10^5 sej/J (Brown et al.[2011])

Emergy = Annual use×UEV = 2.03×10^{17} sej/yr

Lubricants use = 8.00×10^3 L/yr (MOF[2019])

Energy = Use×(3.70×10⁷ J/L) = 2.96×10^{11} J/yr

UEV of bunker = 1.80×10^5 sej/J (Brown et al.[2011])

Emergy = Annual use×UEV = 5.33×10^{16} sej/yr

LPG use = 2.00×10^3 L/yr (MOF[2019])

Energy = Use×(9.09×10⁴ J/L) = 1.82×10^8 J/yr

UEV of LPG = 1.77×10^5 sej/J (Brown et al.[2011])

Emergy = Annual use×UEV = 3.22×10^{13} sej/yr

Total fuel energy use = 3.32×10^{13} J/yr

Total emergy use = 6.28×10^{18} sej/yr

10. Fishing boats

Total weight of boats used = 2.89×10^5 tons/yr (MOF[2019]);

Useful life = 20 years (assumed); Fishing days = 172 days/yr (MOF[2019])

Annual use in weight = (Total weight)×(Fishing days/Useful life in days) = 6.80×10^9 g/yr

11. Services, nonrenewable fraction

Fishery households = 54,793 households in 2015 (MOF[2018]); Fishing cost per household = 2.13×10^7 ₩/household/yr (excluding labor cost; Statistics Korea[2016])

Annual cost = (Number of households)×(Fishing cost) = 1.17×10^{12} ₩/yr; Nonrenewable fraction = 0.979 (Kang[2019])

Nonrenewable service input = 1.14×10^{12} ₩/yr

12. Labor, nonrenewable fraction

Fishery households = 54,793 households in 2015 (MOF[2018]); Labor cost per household = 6.25×10^6 ₩/household/yr(Statistics Korea[2016])

Annual cost = (Number of households)×(Labor cost) = 3.43×10^{11} ₩/yr; Nonrenewable fraction = 0.979 (Kang[2019])

Nonrenewable labor input = 3.35×10^{11} ₩/yr

13. Fishery production

Annual production = 2.73×10^{12} g/yr (in wet weight; MOF[2018])

Energy = 6.05×10^{15} J/yr (calculated based on annual production and unit energy content of each fishery product in NAAS[2016])