

에머지 방법론을 이용한 영산강 하구생태계의 기여 가치 평가

강 대 석*
부경대학교 생태공학과

Emergy-Based Value of the Contributions of the Youngsan River Estuary Ecosystem to the Korean Economy

DAESEOK KANG*

Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

에너지 관점에서 생태계의 가치를 평가하는 에머지 개념과 방법론을 이용하여 영산강 하구해역 생태계가 우리 경제에 기여하는 가치를 시스템 관점과 생태계 서비스 관점에서 평가하였다. 하천과 바다가 만나서 형성되는 하구생태계의 특성을 반영하여 하천의 화학에너지가 유입에머지 총량(9.42×10^{20} sej/yr)의 73%로 가장 많은 에머지를 공급하였으며, 조석에너지는 27%를 기여하였다. 영산강 하구생태계로 유입하는 자연환경에너지를 이용하여 시스템 관점에서 영산강 하구가 경제에 기여하는 가치를 평가한 결과 약 1,799억 emW/yr(1,491만 emW/ha/yr 또는 13,526 em\$/ha/yr)으로 나타났다. 영산강 하구생태계가 제공하는 서비스의 가치는 수산물생산, 오염정화, 심미 기능, 과학연구의 네 가지만을 대상으로 평가하였다. 이 가운데 심미 기능의 가치가 1,799억 emW/yr으로 가장 높았으며, 수산물생산(1,011억 emW/yr), 오염정화(326억 emW/yr), 과학연구(9.3억 emW/yr)의 순으로 나타났다. 에너지를 이용하여 자연환경과 경제활동을 평가하는 에머지 방법론의 특성을 반영하여 이 연구에서 평가한 영산강 하구의 생태계 서비스 가치는 경제학적 방법을 이용한 평가보다 높았다.

An emergy concept was used to evaluate the contributions of the Youngsan River Estuary to the Korean economy from systems and ecosystem service perspectives. Total emergy input to the estuary was 9.42×10^{20} sej/yr with the chemical potential of river inflow accounting for 73% of the total and tidal energy for the remaining 27%, reflecting the unique environmental characteristics of estuaries where rivers meet sea. From the systems perspective, the estuary ecosystem contributed 179.9 billion emW/yr (14.91 million emW/ha/yr or 13,526 em\$/ha/yr). Four ecosystem services of the Youngsan River Estuary were selected for the emergy evaluation: fishery production, pollutant removal, aesthetic function, and scientific research information. Aesthetic function contributed the most to the Korean economy with 179.9 billion emW/yr, followed by fishery production (101.1 billion emW/yr), pollutant removal (32.6 billion emW/yr), and scientific research information (934 million emW/yr). Emergy-based values of the selected ecosystem services of the estuary were higher than those calculated by economic methodologies.

Key words: Youngsan River Estuary, emergy value, ecosystem services

서론

해수와 담수가 만나 만들어내는 독특한 물리·화학·생물 환경 때문에 생산성이 아주 높은 전형적인 전이생태계인 하구는 오래 전부터 인간 활동의 중심 공간으로 기능하고 있다. 하구는 많은 동식물의 산란·서식처, 토양침식이나 해일과 같은 자연재해 피해저감

기능, 수산물생산이나 해상운송과 같은 경제적 기능, 아름다운 경관과 삶의 역사가 만들어내는 심미문화적 기능과 같은 다양한 생태적·사회경제적 가치를 가지고 있는 것으로 알려져 있다(MEA, 2005; Barbier *et al.*, 2011). 이러한 생태적·사회경제적 기능의 중요성 때문에 하구의 경제기여 가치는 지구 생태계 가운데서도 가장 높은 것으로 평가받고 있다. 전 세계의 생태계가 경제에 기여하는 가치를 생태계 유형별로 평가한 Costanza *et al.* (1997)에 따르면 하구생태계의 연간 기여가치는 \$22,832 (1994년 기준)로 평

가대상 생태계 가운데 가장 높았다.

그러나 우리나라 하구는 지난 반세기 동안의 고도 성장과정에서 진행된 매립·간척, 하구둑 건설 때문에 대부분 훼손되어 자연성을 유지하고 있는 하구를 찾아보기 힘든 상태이다(Lee *et al.*, 2001, 2004). 최근 하구생태계의 중요성에 대한 인식을 바탕으로 하구관리에 특화된 법률의 제정 등 국가 차원의 하구환경관리체계를 수립하기 위한 다양한 연구 및 조사가 진행되고 있다(Cho *et al.*, 2011). 하구생태계가 우리 경제에 기여하는 진정한 가치에 대한 과학적이고 명확한 평가는 관리 우선순위의 설정, 이용 또는 보전사이의 선택 등과 같이 하구생태계의 이용 및 보전의 정책방향을 설정하는데 필수적인 기초 자료에 해당한다. MLTM(2009)은 하구생태계 환경가치 평가의 활용 분야로 하구 개발의 피해평가, 하구환경 보전정책 평가, 하구환경 보전정책방향 설정, 국민의 의사에 근거한 개발 대 보존의 선택 등을 제시하였다.

하구관리와 관련한 하구생태계 가치 평가의 필요성을 반영하여 경제학적 평가 방법을 이용한 연구가 최근에 우리나라 주요 하구를 대상으로 수행되었다. Kwak *et al.* (2006)은 컨조인트 분석법을 이용하여 한강하구의 속성별 가치를 평가하였으며, Yoo (2007a), Yoo (2007b), Yoo and Lee (2011)는 각각 섬진강하구, 낙동강하구, 영산강 하구를 대상으로 다속성 효용이론에 근거한 조건부 가치측정법을 적용하여 하구 기능별로 환경가치를 추정하였다. 이들 연구는 모두 설문조사를 통해 얻은 응답자의 지불의사에 근거하여 각 하구의 기능별 가치를 평가하였다.

에머지(emergy) 방법론을 이용하여 시스템 관점에서 하구해역의 자연환경이 기여하는 가치를 평가한 기존 사례는 섬진강하구(Lee *et al.*, 2001)와 낙동강하구(Song and Je, 2004)가 있다. 이외의 연구는 하구생태계의 일부인 하구 갯벌(Lee, 2001; Kang *et al.*, 2006)을 포함하거나, 하구의 해역과 육역을 포함하는 하구역(Lee and Kang, 2008)의 가치를 평가하였다. 그러나 아직까지 하구생태계가 우리 경제에 기여하는 가치를 생태계 서비스별로 평가한 사례는 없다. 특히 영산강하구를 대상으로 에머지 개념과 방법론을 이용하여 하구의 자연환경이 기여하는 시스템 관점의 가치를 평가하거나 생태계 서비스별 가치를 평가한 경우는 아직 없다.

다양한 이용 수요의 지속적인 존재, 4대강 사업의 완공으로 인한 담수유입 환경의 변화, 기후변화에 따른 강수패턴 변화, 하구생태계의 가치에 대한 인식 증가 등으로 인해 하구생태계의 체계적인 관리 필요성은 커지고 있다. 영산강 하구의 경우 영산호, 금호호, 영암호 등 담수호의 수질문제에 기인한 해역환경 악화, 하구주변에서 이루어지는 지역개발사업이 하구에 미칠 영향, 영산강 뱃길 복원을 포함한 역사문화 복원 등 하구의 이용과 보전을 둘러싼 다양한 현안이 존재하고 있다(MLTM, 2009). 이런 점에서 영산강 하구생태계가 사회경제활동의 유지에 기여하는 가치에 대한 과학적 평가는 영산강 하구의 생태적 및 사회경제적 생산성을 회복하고 유지하기 위한 정책의 수립에 필요한 기초 자료를 제공할 수 있을 것이다.

따라서 이 연구는 생태계가 경제에 기여하는 진정한 가치를 과학적으로 평가하고자 하는 노력의 하나인 에머지 개념과 방법론을 이용하여 영산강 하구생태계의 기여 가치를 시스템 관점 및 생태계 서비스 관점에서 평가하고자 하였다.

연구방법

에머지 개념

미국의 시스템생태학자인 Howard T. Odum이 제안한 에머지 개념과 방법론은 지불의사와 화폐를 이용하는 경제학적 평가방법과 달리 가치 평가의 매개체로 에너지를 사용한다. 에머지는 energy memory를 줄여서 만든 용어로, “한 가지 서비스나 생산물을 만드는 과정에 직접 그리고 간접으로 이미 소모된 한 종류의 이용 가능한 에너지”(Odum, 1996)를 이른다. 즉, 에너지 관점에서 자원의 가치를 평가할 때 이 자원에 현재 남아 있는 에너지량을 이용하는 것이 아니라 이 자원이 만들어지는 동안 필요하였던 모든 에너지를 더한 값(중복계산을 하지 않도록 고려하여 더한 총에너지량)을 이용한다. 에너지 단위를 가치 평가에 이용함으로써 자원의 개발과 거래에 투입한 인간의 노동력뿐만 아니라 이 자원이 만들어지는 과정에서 자연환경이 기여한 부분까지 동일한 기준에서 비교할 수 있다. 에머지의 단위는 emjoule을 사용한다.

에머지 방법론에서 가장 중요한 개념가운데 한 가지가 에너지의 질(energy quality)이다. Odum(1996)은 에너지 단위(예를 들어, Joule 또는 칼로리)로 나타낸 에너지량이 같더라도 에너지(또는 자원의) 종류가 다르면 일을 할 수 있는 능력(에너지의 질)이 다르다고 주장하였다. 예를 들어 태양에너지 1J과 사람의 에너지 1J은 일반적인 에너지 단위로 나타내었을 때 그 양은 같지만, 수행할 수 있는 일의 종류와 성격이 다르기 때문에 동일하게 취급해서는 안 된다. 일을 할 수 있는 능력이 서로 다른 에너지를 비교할 때는 그 능력의 차이를 고려해주어야만 한다. 이에 따라 에머지 방법론에서는 성격이 다른 에너지를 비교할 때 각 에너지를 기준으로 삼은 ‘한 가지 종류의 에너지’로 먼저 환산한다. 현재 에머지 방법론에서 서로 다른 종류의 에너지를 비교하기 위해 기준으로 사용하는 에너지는 태양에너지이다. 태양에너지를 기준으로 계산한 에머지를 태양에머지(solar emergy)라 부르며, solar emjoules (sej)을 단위로 사용한다(Odum, 1996).

자원마다 일을 할 수 있는 능력의 차이를 나타내는 값(즉, 기준 에너지 환산인자)을 unit emergy value라 하며, 환산인자를 구하는데 사용한 자료의 단위에 따라 에너지변환도(transformity), specific emergy, 에머지화폐비율(emergy-money ratio) 등으로 부른다. 에너지변환도는 한 가지 자원이 만들어지는데 직접 및 간접으로 소모된 에너지의 합계(즉, 에머지량)를 이 자원에 현재 남아 있는 에너지량으로 나눈 값이다(Odum, 1996). 태양에너지가 현재 에머지 방법론에서 사용하는 기준 에너지이기 때문에 에너지변환도를 태양에너지변환도(solar transformity)라 부르며, 단위는 sej/J를 사용한다. 하구생태계의 먹이사슬을 예로 들면 태양에너지, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 어류로 갈수록 태양에너지변환도가 커진다. Specific emergy는 평가대상 자원의 에머지량을 그 자원의 질량으로 나눈 값(단위: sej/g)이며, 에머지화폐비율은 에머지량을 화폐량으로 나누어 구한 값(단위: sej/\$, sej/W 등)이다. 에너지량, 질량, 화폐량을 이용하여 계산한 unit emergy value가 에머지 방법론에서 가장 일반적으로 사용하는 자료이지만, 필요에 따라 다양한 단위를 이용하여 unit emergy value를 구해 에머지 평가에 활용할 수 있다. 평가하고자 자원에 현재 남아있는 에너지량(또는 질량, 화폐량 등)과 unit emergy value를 곱한 값이 그 자원의 에머지량이다.

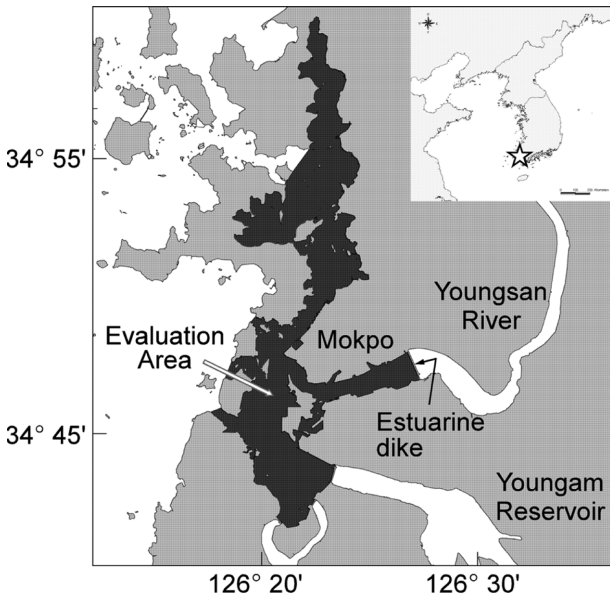


Fig. 1. System boundary for the energy evaluation of the Youngs River Estuary ecosystem in Korea.

에머지 평가

에머지 평가를 수행하기 위해 먼저 평가 모델을 작성하였다. 에머지 평가 모델은 Howard T. Odum이 개발한 에너지시스템언어

(energy systems language)를 이용하여 작성하였다(Odum, 1983, 1994). 에너지시스템언어는 특별한 의미를 부여한 기호를 이용하여 평가대상 시스템의 구조와 기능을 전체적인 관점에서 파악할 수 있도록 한다. 에머지 평가 모델을 작성하기 위해서는 먼저 평가대상 시스템의 경계를 설정해야 한다. 이 연구에서는 영산강 하구생태계의 에머지 평가를 수행하기 위한 공간적 경계로 Lee *et al.* (2004)이 영산강 하구역의 관리범위로 제안한 영역의 해면부(면적: 120.6 km²)를 선택하였다(Fig. 1). 에너지시스템언어를 이용하여 작성한 영산강 하구생태계의 에머지 평가 모델은 Fig. 2와 같다.

Fig. 2의 평가 모델을 이용하여 에머지 평가표를 만드는데, 전형적인 에머지 평가표의 형태는 Table 1과 같다.

- No.: 평가항목의 에머지 계산과정을 나타내기 위한 주석 번호
- Items: 평가항목의 명칭. 평가대상 시스템으로 유출입하거나 시스템 내부에서 일어나는 에너지, 물질, 화폐, 정보 등의 흐름(flow) 또는 저장고(storage)를 포함한다.
- Raw data: 평가항목의 에머지를 계산하는데 필요한 기초 자료이며, 일반적인 에머지 평가표에서는 연간 에너지 흐름량(J/yr), 물질 흐름량(g/yr), 화폐량(\$/yr 또는 ₩/yr) 등과 같이 연간 자료를 이용한다.
- Unit energy value: 평가항목의 태양에너지 기준 환산인자(단위: sej/J, sej/g, sej/\$, sej/₩ 등)로, 환산인자의 계산에 사용한 자료의 단위에 따라 unit energy value의 단위가 달라진다.
- Solar energy: 평가항목의 태양에머지량으로, Raw data와 Unit

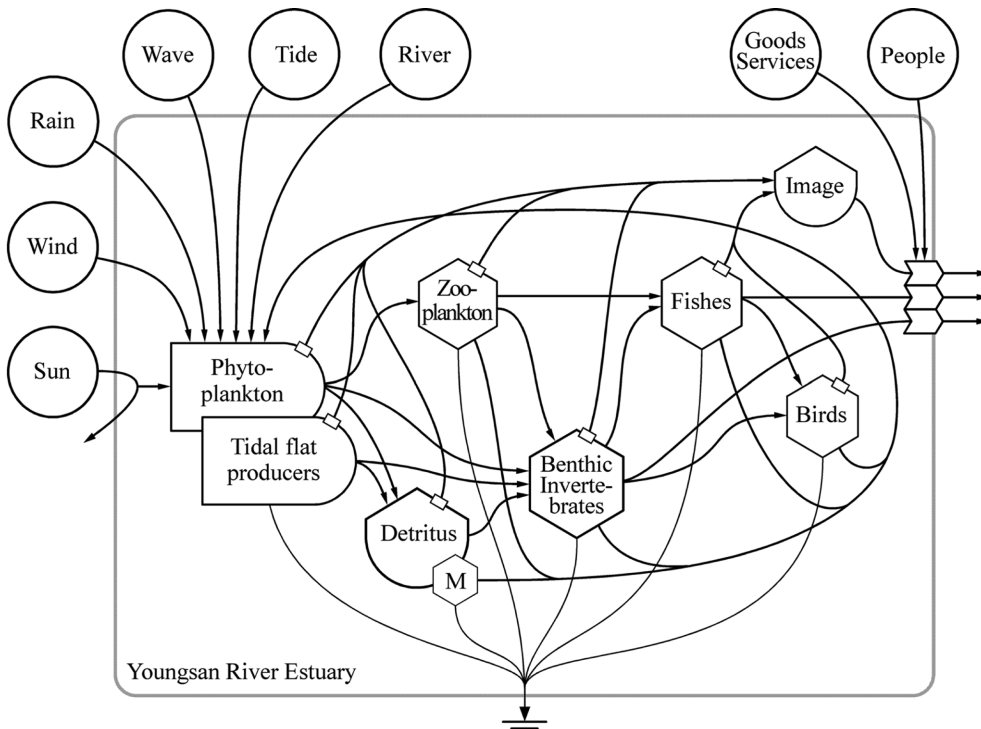


Fig. 2. Energy systems diagram for the Youngs River Estuary ecosystem in Korea. M=Microorganisms.

Table 1. Typical format for an energy evaluation table

No	Items	Raw data	Unit Energy Value (UEV)	Solar energy (sej/yr)	Emvalue
1		J/yr, g/yr, \$/yr, ₩/yr, etc	sej/J, sej/g, sej/\$, sej/₩, etc	Raw data×UEV	Solar energy/Emergy-money ratio (em\$/yr, em₩/yr, etc)

emergy value를 곱하여 얻은 값이다. 단위: solar emjoules/yr(sej/yr)

- Emvalue: 태양에너지량을 에너지화폐비율(단위: sej/\$, sej/W 등)로 나눈 값으로, 기준 화폐의 단위에 따라 emdollar(em\$/yr), emwon(emW/yr) 등의 단위를 사용한다. 즉 Emvalue는 에너지량을 화폐단위로 환산한 값이며, 이렇게 함으로써 화폐단위를 사용하는 다른 방법의 결과와 에너지 평가 결과를 비교할 수 있다. 에너지화폐비율은 우리나라 경제가 일 년 동안 사용한 에너지량(sej/yr)을 연간 국내총생산(GDP/yr)으로 나누어 구한다.

에너지 가치 평가

에너지 방법론을 이용한 영산강 하구생태계의 기여 가치 평가는 두 가지 관점에서 수행하였다. 우선 외부에서 유입하는 에너지나 물질의 흐름을 이용하여 하구생태계의 기여 가치를 시스템 관점에서 평가하였다. 영산강 하구생태계의 자연환경이 우리 경제에 기여하는 순수한 가치를 평가하기 위해 경제시스템이 공급하는 에너지량(즉, 영산강 하구생태계의 사회경제활동을 가능하게 하는 비용)을 제외하고 자연환경에너지가 공급하는 에너지량만 고려하였다.

영산강 하구가 제공하는 생태계 서비스의 에너지 가치는 수산물생산, 오염정화, 심미 기능, 과학연구의 네 가지를 대상으로 평가하였다. 수산물생산의 평가에는 영산강 하구를 대상으로 하는 어촌계의 수산물 생산량 통계를 이용하였다. 하구의 생태적 과정을 통한 오염물질 제거는 그 만큼 하수처리 비용을 절감한다. 따라서 오염정화 서비스를 평가하기 위해 3차 처리가 가능한 하수처리장의 건설 및 운영에 필요한 재화와 용역의 에너지량을 이 처리장의 질소제거량으로 나누어 단위질소제거량당 에너지 비용을 계산하였다. 우리나라의 하수처리시설에 대한 에너지 평가 사례가 없어 여기에서는 스웨덴의 사례(Geber and Bjorklund, 2002)를 참고하였다. 오염정화 서비스의 평가에는 영산강 하구의 용존무기질소 순제거량을 이용하였는데, 이 연구에서 참고한 하수처리장이 고도처리시설이기 때문에 유기물과 영양염류 제거를 모두 고려할 경우 중복계산을 유발하게 된다. 따라서 이 연구에서는 질소제거량을 오염정화 서비스를 대표하는 항목으로 간주하고 에너지 평가를 수행하였다. 심미 기능의 경우 영산강 하구로 유입한 자연환경에너지의 총량을 이용하였는데, 지역주민이나 관광객이 즐기는 영산강 하구생태계의 경관은 하구생태계로 유입하는 자연환경에너지가 종합적으로 작용하여 나타난 이미지라는 점을 고려하였다. 영

산강 하구생태계의 교육적 활용에 관한 자료가 부족하여 과학연구 서비스와 연계되어 있는 교육 기능은 제외하였으며, 1972~2008년 기간 동안 영산강 하구를 대상으로 한 논문 및 보고서 발행편수를 이용하여 과학연구 서비스를 평가하였다.

영산강 하구생태계의 시스템 관점 가치 및 생태계 서비스 가치 평가에 필요한 자료는 국가기관 통계자료, 자연환경 조사 보고서와 학술 논문 등을 이용하였으며, 평가 기준연도는 2008년으로 하였다. 수산물 생산의 경우 2006년 생산량 자료를 이용하였다.

결과 및 고찰

시스템 관점의 기여 가치

Fig. 2에 제시한 모델을 바탕으로 시스템 관점에서 영산강 하구생태계의 가치를 평가하기 위해 Table 2와 같이 에너지 평가표를 작성하였다. Table 2는 영산강 하구생태계의 자연환경이 순수하게 기여하는 가치(즉, 인간의 활동을 배제한 기여 가치)를 판단하기 위하여 하구생태계의 평가 경계 바깥에서 유입하는 자연환경에너지만 포함하였다.

각 유입에너지별로 살펴보았을 때 하천이나 담수호를 통해 영산강 하구로 유입하는 담수의 화학에너지가 가장 많은 6.91×10^{20} sej/yr의 에너지를 공급하였으며, 조석에너지(2.52×10^{20} sej/yr)와 강우 화학에너지(2.11×10^{19} sej/yr)의 에너지 기여도가 높았다. 태양 에너지가 에너지량으로는 영산강 하구생태계에 가장 많이 기여(5.56×10^{17} J/yr)하였지만, 에너지 기여도 측면에서는 아주 미미하였다. 영산강 하구생태계로 일 년 동안 유입한 총 에너지량은 9.42×10^{20} sej/yr이었다. 총 유입 에너지량을 계산할 때 중복계산을 피하기 위하여 조석에너지와 하천의 화학에너지만 더하였다. 태양 에너지, 바람에너지, 파도에너지, 강수에너지, 조석에너지는 지구의 에너지 및 물질 순환을 통해 아주 밀접하게 연결되어 있기 때문에 이들을 단순히 더하는 것은 중복계산을 유발한다. 따라서 에너지 방법론에서는 이들 항목 가운데 에너지 기여도가 가장 큰 것만 고려한다. 총 유입에너지량에서 하천의 화학에너지가 차지하는 비율은 73%였으며, 조석에너지가 나머지 27%의 에너지를 공급하였다. 이러한 결과는 해수와 담수가 만나 형성되는 하구의 생태계 특성을 뚜렷하게 보여주고 있다.

영산강 하구생태계로 연간 유입하는 총 에너지량(9.42×10^{20} sej/yr)을 2008년 에너지화폐비율인 5.24×10^9 sej/W (Kang and Brown, 2012a)로 나누어 구한 emvalue는 1,799억 emW/yr이었다. 이 값이 영산강 하구생태계가 우리 경제에 기여하는 시스템 관점의 가치에

Table 2. Emergy contributions of the environmental sources that sustain the Youngsan River Estuary ecosystem in Korea

Item ^a	Raw Data (J/yr)	Solar Transformativity ^b (sej/J)	Solar Emergy (sej/yr)	Emvalue (emW/yr)
1. Sunlight	5.56×10^{17}	1	5.56×10^{17}	1.06×10^8
2. Wind	1.34×10^{15}	2,450	3.29×10^{18}	6.27×10^8
3. Rain, chemical potential	6.93×10^{14}	30,500	2.11×10^{19}	4.04×10^9
4. Wave	2.54×10^7	51,000	1.29×10^{12}	2.47×10^2
5. Tide	3.41×10^{15}	73,900	2.52×10^{20}	4.80×10^{10}
6. River, chemical potential	8.49×10^{15}	81,300	6.91×10^{20}	1.32×10^{11}
Total			9.42×10^{20}	1.80×10^{11}

^aData sources and calculations are given in Appendix A.

^bSolar transformativities from Odum *et al.* (2000)

해당한다. 이를 단위면적당으로 나타내면 1,491만 emW/ha/yr (13,526 em\$/ha/yr)인데, Lee and Kang (2008)이 영산강하구 유역 생태계(하구육역+하구해역)의 자연환경(재생가능자원 및 재생불가능자원)이 경제에 기여하는 잠재력으로 계산한 729만 emW/ha/yr (2003년 기준)보다 약 2배 높은 값이다. 이는 영산강 하구유역의 사회경제활동에서 하구해역의 생태계가 가지는 에머지 관점의 중요성을 반영하는 결과이다.

또한 이 연구에서 계산한 영산강 하구해역 생태계의 기여 가치는 전 세계 하구생태계의 평균보다 높았다. Brandt-Williams and Brown(2011)은 전 세계의 생물군계를 대상으로 자연환경에너지의 에머지 기여 가치를 평가하였다. 이들에 따르면 하구생태계의 경우 단위면적당 연간 9.45×10^{15} sej/ha/yr의 에머지가 유입하였으며, 이는 3,527 em\$/ha/yr (2000년 기준)의 가치에 해당하였다. 전 세계 하구생태계로 유입한 에머지량을 2008년 세계 경제의 에머지 화폐비율(2.46×10^{12} sej/\$, Kang and Brown (2012b))로 나누면 3,841 em\$/ha/yr에 해당한다. 영산강 하구생태계의 기여 가치가 전 세계 평균보다 3.5배나 커 영산강 하구생태계가 에머지 측면에서 경제 기여 잠재력이 아주 높다는 것을 알 수 있다.

생태계 서비스별 기여 가치

영산강 하구생태계가 제공하는 생태계 서비스의 에머지 평가는 Table 3에 제시하였다. 이 연구에서 평가한 네 가지 서비스 가운데 심미 기능이 1,799억 emW/yr으로 에머지 관점에서 가장 가치 있는 서비스로 나타났으며, 수산물생산(1,011억 emW/yr), 오염정화(326억 emW/yr), 과학연구(9.3억 emW/yr)의 순으로 기여 가치가 높았다. 이들 네 가지 서비스의 가치를 더한 연간 기여가치는 3,145억 emW/yr이었다. 이 연구에서 평가하지 못한 다른 서비스들이 있기 때문에 이 값이 영산강 하구생태계의 최종적인 총 기여가치를 의미하지는 않는다.

에머지 관점에서 계산한 수산물생산 서비스의 기여가치는 영산강 하구 어촌계의 2006년 수산물 생산액인 131.7억원(NFFC, 2007)보다 7.7배 높았다. 이는 영산강 하구에서 생산된 수산물의 시장 가치가 하구생태계의 자연환경이 이러한 생산에 기여한 바를 저평가하고 있다는 것을 의미한다. 따라서 생태계의 이용, 개발, 보전과 관련된 정책 결정을 위해 생태계의 기여 가치를 평가하고자 할 경우 일반적으로 활용하고 있는 경제학적 평가이외에 에머지 개념과 같이 다른 관점에서 생태계의 기여가치를 평가하는 방법론을 같이 활용할 필요가 있다.

이러한 차이는 이 연구와 동일한 공간을 대상으로 영산강 하구의 환경가치를 경제학적 방법을 이용하여 평가한 연구(Yoo and Lee, 2011)와 비교에서도 나타났다(Table 4). Yoo and Lee (2011)는 영

Table 4. Comparison of energy and economic valuations on the selected ecosystem services of the Youngsan River Estuary in Korea

Ecosystem services	This study (billion emW/yr)	Yoo and Lee (2011) (billion W/yr) ^a
Fishery production	101.13	-
Pollutant removal	32.61	7.95
Recreational/aesthetic value	179.86	6.32
Education and scientific research	0.93	6.28
Spawning ground & habitat	-	7.90
Total	314.53	28.45

^aEconomic values for each service were calculated using data in Yoo and Lee (2011).

산강 하구의 동식물 산란지 및 서식지 기능, 오염정화 기능, 여가 및 심미적 기능, 교육/과학연구 기능 등 네 가지를 대상으로 다속성 효용이론에 근거한 조건부가치측정법을 이용하여 경제적 가치를 평가하였다. 이 가운데 이 연구에서 평가한 서비스와 중복되는 오염정화 기능, 여가 및 심미적 기능, 교육/과학연구기능을 비교하면 오염정화 기능과 여가 및 심미적 기능(에머지 평가의 경우 여가 기능은 미포함)은 에머지 측면의 기여 가치가 각각 4.1배, 28.5배 더 높았다. 그러나 교육/과학연구 기능의 경우 경제학적 평가 결과가 에머지 가치보다 6.8배 높았다. 에머지 평가의 서비스 항목별 가치 차이(최대 193배)는 설문조사에 바탕을 둔 Yoo and Lee (2011)의 항목별 가치 차이(최대 1.3배)보다 훨씬 더 컸다.

Table 3에 제시한 에머지 평가의 경우 일차적으로 가치 평가에 사용한 unit energy value가 모두 외국 자료라는 한계가 있다. 또한 과학연구기능은 연구진이 연구에 투입한 시간과 장비 등을 고려하여 계산하는 방법이 더 타당한 것으로 판단되지만, 이 연구에서는 영산강 하구생태계의 연구에 투입된 연구진, 연구기간, 연구비 등의 구체적인 정보를 확보하지 부족하여 Appendix B에 제시한 방법을 활용할 수밖에 없었다. 경제학적 평가의 경우 일반인에 대한 설문조사가 가지고 있는 한계를 고려할 때 설문조사 대상 항목과 다른 방법을 사용할 항목을 구분하여 평가를 진행할 필요가 있는 것으로 판단된다. 특히 오염정화 기능 및 교육/과학연구 기능 등과 같이 과학적인 조사 자료나 정보가 이용 가능한 경우 설문조사가 아닌 다른 방법을 사용하여 평가한다면 에머지 평가 결과와 더 의미 있는 비교를 할 수 있을 것으로 판단된다.

영산강 하구 어촌계의 2006년 수산물생산액을 인플레이션을 고려하지 않고 Yoo and Lee(2011)의 결과에 단순히 더할 경우 다섯 가지 서비스의 총 합계는 416.2억원/yr에 해당한다. 동식물 산란지 및 서식지 기능에 대한 평가를 포함하지 않은 상태에서도 에머지 측면의 기여 가치 합계가 7.6배 더 높았다.

Table 3. Emergy evaluation of selected ecosystem services provided by the Youngsan River Estuary ecosystem in Korea

Ecosystem services [†]	Raw data	Unit emergy value [*]	Solar emergy (sej/yr)	Emvalue (emW/yr)
1. Fishery production	6.31×10^{13} J/yr	8.40×10^6 sej/J ^a	5.30×10^{20}	1.01×10^{11}
2. Pollutant removal	1.64×10^9 gN/yr	1.04×10^{11} sej/gN ^b	1.71×10^{20}	3.26×10^{10}
3. Aesthetic service	-	-	9.42×10^{20}	1.80×10^{11}
4. Scientific research	9.41×10^5 J/yr	5.20×10^{12} sej/J ^c	4.89×10^{18}	9.34×10^8

[†]Data sources and calculations are given in Appendix B

^{*}Unit emergy values from a) Brown *et al.* (1993), b) Geber and Bjorklund (2002), and c) Tilley (1999), adjusted to the global emergy baseline of 15.83×10^{24} sej/yr

각 서비스별 에머지 측면의 기여 가치를 단위면적당(ha)으로 환산하면 심미 기능은 1,491만 emW/ha/yr, 수산물생산은 839만 emW/ha/yr, 오염정화는 270만 emW/ha/yr, 과학연구는 7.7만 emW/ha/yr이었다. 네 가지 서비스의 단위면적당 기여 가치의 합을 달러로 환산(2008년 평균 환율 1,102.59원/\$)하면 23,653 \$/ha/yr에 이른다. Costanza *et al.*(1997)이 전 세계 하구생태계가 제공하는 다양한 서비스의 경제적 가치를 더한 값(\$22,832/ha/yr)을 2008년 기준 달러로 환산하면 44,784 \$/ha/yr에 해당하는데, 에머지 측면의 가치 합계는 이 값의 53%에 불과하다. 그러나 Costanza *et al.*(1997)의 경우 영양염류 순환, 식량공급 등 8가지 서비스를 평가하였고, 영산강 하구의 경우 하구둑 때문에 담수와 해수의 자유로운 혼합이 차단되어 있기 때문에 Costanza *et al.*(1997)의 자료와 이 연구의 결과를 직접 비교하는데 한계가 있다는 점을 감안하여야 한다. 이 연구의 평가와 겹치는 항목인 식량생산의 2008년 기준 가치는 1,022 \$/ha/yr로, 영산강 하구생태계의 수산물생산 서비스에 대한 에머지 측면의 가치(7,605 em\$/ha/yr)가 7.4배 더 높았다. 따라서 에머지 방법론을 이용한 기여 가치 평가는 영산강 하구생태계가 우리 경제에 기여하는 잠재력이 아주 높다는 것을 제시하고 있다.

결 론

에머지 방법론을 이용하여 영산강 하구해역 생태계의 기여 가치를 시스템 관점과 생태계 서비스 관점에서 평가한 결과 하구생태계가 우리 경제에 기여하는 가치가 아주 높은 것으로 나타났다. 시스템 관점에서 평가한 영산강 하구생태계의 기여가치는 1,491만 emW/ha/yr으로, 영산강 하구생태계의 생태적·사회경제적 잠재력을 반영한다. 이 연구에서 평가한 네 가지 생태계 서비스의 경우 심미 기능이 1,491만 emW/ha/yr으로 에머지 측면의 가치가 가장 높았으며, 수산물생산, 오염정화, 과학연구의 순으로 나타났다. 에머지 측면의 기여 가치는 경제학적 방법론에 근거한 가치보다 더 높아 자연환경과 인간 활동을 에너지를 이용하여 평가하고자 하는 에머지 개념과 방법론의 특성을 잘 보여주었다. 영산강하구의 이용·개발시 이러한 생태경제적 가치를 충분히 고려할 필요가 있다. 또한 이 연구의 결과는 지금까지 개발 일변도의 하구 이용에서 벗어나 영산강 하구생태계가 가지고 있는 생태적·경제적 잠재력을 유지하고 회복하기 위한 정책의 추진 필요성을 뒷받침하는 자료를 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구에서는 에머지 평가에 필요한 관련 자료 부족으로 교육 기능을 제외하고 과학연구 기능만 평가하였으며, 과학연구의 경우도 영산강 하구관련 연구에 투입된 연구진, 연구기간, 연구비 등의 세부 정보가 부족하여 외국 사례에 제시된 에너지변환도로 에머지 측면의 가치를 평가한 한계가 있다. 또한 오염정화 서비스의 경우도 국내 하수처리장에 대한 에머지 평가 사례가 없어 외국의 자료를 사용하였다. 영산강 하구생태계가 제공하는 생태계 서비스는 이 연구에서 평가한 네 가지이외에도 서식지 제공, 자연재해 저감 등 다양한 서비스가 있지만 평가에 필요한 자료가 충분하지 못하여 이 연구에서는 평가 대상에서 제외하였다. 따라서 향후 연구에서는 하구생태계 서비스의 기여 가치평가에 필요한 자료를 확보하기 위한 선행 연구를 먼저 진행할 필요가 있다.

사 사

이 연구는 국토해양부 지원 ‘하구역 관리체제 구축 연구(II)-영산강 하구’의 일부분으로 수행하였으며, 최근 자료를 이용하여 수정·보완하였습니다. 이 논문을 검토하고 조언을 해주신 심사위원들께 감사드립니다.

참고문헌(References)

- Barbier, E.B., S.D. Hacker, C. Kennedy, E.W. Koch, A.C. Stier, and B.R. Silliman, 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, **81**(2): 169–193.
- Barry, R.G. and R.J. Chorley, 1992. *Atmosphere, Weather and Climate*. Routledge, London. 392pp.
- Brandt-Williams, S. and M.T. Brown, 2011. Renewable energy in earth's biomes. In: *Proceedings of the 6th Biennial Energy Conference*. pp.93–104.
- Brown, M.T., R.D. Woithe, C.L. Montague, and E.D. Odum, 1993. Energy analysis perspectives of the Exxon Valdez oil spill in Prince Williams Sound, Alaska. Report to the Cousteau Society. Center for Wetlands, University of Florida. CFW-93-01.
- Cho, H.-J., J. Ryu, K.-H. Lee, B.-Y. Lee, D. Kang, J.S. Khim, J. Nam, and C.-H. Lee, 2011. Suggestions on the estuarine research projects for integrated estuarine management in Korea. *The Sea*, **16**(4): 212–222.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Gaskin, P. Sutton, and M. van den Belt, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, **387**: 253–260.
- DBPia, 2009. www.dbpia.co.kr. accessed on 1/7/2009.
- Geber, U. and J. Bjorklund, 2002. The relationship between ecosystem services and purchased input in Swedish wastewater treatment systems - a case study. *Ecological Engineering*, **19**: 97–117
- Kang, D. and M.T. Brown, 2012a. Environmental accounting of the resource basis of the Korean economy during 1981–2010. (Unpublished manuscript)
- Kang, D. and M.T. Brown, 2012b. Energy basis of the global economy during 1981–2010. (Unpublished manuscript)
- Kang, D., J. Nam, and S. Lee, 2006. Energy valuation of a tidal flat ecosystem in the southwestern coast of Korea and its comparison with valuations using economic methodologies. *Journal of the Environmental Sciences*, **15**(3): 243–252.
- KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Administration), 2009. Bench mark data sheets. www.khoa.go.kr, accessed on 9/20/2009.
- KISS (Koreanstudies Information Service System), 2009. kiss.ksstudy.com.accessed on 1/7/2009.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 1981–2010. Annual Climatological Report. Korea Meteorological Administration. Daejeon, Korea.
- Kwak, S.-J., S.-H. Yoo, and J.-In. Chang, 2006. Valuing the Han-river Estuary: using conjoint analysis. *Kyong Je Hak Yon Gu*, **54**(4): 141–161.
- Lee, C. and D. Kang, 2008. Energy evaluation of the estuarine areas

- of Yeongsan River, Seomjin River, and Han River in Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, **14**(2): 135–143.
- Lee, C.-H., J. Nam, S.H. Kim, S.D. Park, B.H. Rho, T.H. Noh, S.J. Lee, H.J. Moon, Y.J. Choi, K.M. Huh, D.W. Kim, S.J. Kang, and S.S. Bang, 2004. Development of sustainable estuary management strategy in Korea. Korea Environment Institute. 646pp.
- Lee, C.-H., D. Kang, J. Nam, B.G. Lee, and H.J. Yu, 2001. Integrated management strategies for estuarine environments in Korea. Korea Environment Institute and Korea Maritime Institute. 369pp.
- Lee, S.M., 2001. Environmental accounting for Saemangeum tideland reclamation project. In: *Proceedings of 2001 Spring Meeting of the Korean Society of Marine Environmental Engineering*. pp.1–14.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment), 2005. *Ecosystems and human well-being: current state and trends*. Island Press, Washington D.C., USA. 917pp.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2009. *Establishment of the management strategies for estuarine areas(II) - Youngsan River Estuary*. 619pp.
- NFFC (National Federation of Fisheries Cooperatives), 2007. *Evaluation and status of fisheries cooperatives*. National Federation of Fisheries Cooperatives. 455pp.
- Odum, H.T., 1983. *Systems Ecology*. Wiley, New York. 644pp.
- Odum, H.T., 1994. *Ecological and General Systems*. University Press of Colorado, Niwot. 644pp.
- Odum, H.T., 1996. *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*. John Wiley & Sons, New York. 370pp.
- Odum, H.T., M.T. Brown, and S. Brandt-Williams, 2000. Folio #1: *Introduction and Global Budget*. Handbook of Emergy Evaluation. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL.
- Rhew, H. and G.-H. Lee, 2011. Relationships on magnitude and frequency of freshwater discharge and rainfall in the altered Yeongsan estuary. *The Sea*, **16**(4): 223–237.
- Song, K. and Y. Je, 2004. *Ecological economic evaluation and management strategies for the Nakdong River Estuary*. Busan Development Institute. 125pp.
- Tilley, D.R., 1999. *Emergy basis of forest systems*. PhD. Dissertation, University of Florida, Gainesville, USA. 296pp.
- Yoo, S.-H. and J.-S. Lee, 2011. Assessment of economic value of Youngsan River Estuary. *Journal of Korea Water Resources Association*, **44**(8): 629–637.
- Yoo, S.-H., 2007a. Measurement of the environmental value of the Seomjin-River Estuary. *Journal of Environmental Policy*, **6**(2): 1–25.
- Yoo, S.-H., 2007b. Using the contingent valuation method based on multi-attribute utility theory to measure the environmental value of the Nakdong-River Estuary. *Ocean and Polar Research*, **29**(1): 69–80.

2013년 2월 3일 원고접수

2013년 2월 13일 수정본 접수

2013년 2월 13일 수정본 채택

담당편집위원: 조양기

Appendix A. Footnotes to Table 2

1. Sunlight

Total Area = $1.21 \times 10^8 \text{ m}^2$ (Lee et al., 2004)

Insolation = $5.12 \times 10^9 \text{ J/m}^2/\text{yr}$ (KMA, average of 1981~2010)

Albedo = 0.1 (Barry and Chorley, 1992)

Energy = (Area) × (Insolation) × (1-albedo) = $5.56 \times 10^{17} \text{ J/yr}$

2. Wind

Area = $1.21 \times 10^8 \text{ m}^2$ (Lee et al., 2004)

Average wind speed = 3.89 m/s (KMA, average of 1981~2010)

Geostrophic wind = (Average wind speed) × (10/6) = 6.48 m/s

Energy = $(1.3 \text{ kg/m}^3) \times (0.001) \times (\text{Geostrophic wind})^3 \times (3.14 \times 10^7 \text{ s/yr})$
 × (Area) = $1.34 \times 10^{15} \text{ J/yr}$

3. Rain, chemical potential

Rain = 1.16 m/yr (KMA, average of 1981~2010)

Energy (J/yr) = (Area) × (Rain) × $(1000 \text{ kg/m}^3) \times (4940 \text{ J/kg})$
 = $6.93 \times 10^{14} \text{ J/yr}$

4. Wave

Shore length = 51,000 m

Wave height = 0.2 m (assumed)

Wave velocity = $(\text{gravity} \times \text{depth})^{1/2} = (9.8 \text{ m/sec}^2 \times 10 \text{ m})^{1/2} = 9.9 \text{ m/sec}$

Energy = (Shore length) × (1/8) × (Density) × (Wave height)²
 × (Wave velocity) = $2.54 \times 10^7 \text{ J/yr}$

5. Tide

Average tidal height = 3.15 m (KHOA, 2009)

Area = $1.21 \times 10^8 \text{ m}^2$ (Lee et al., 2004)

Energy = (Area) × (0.5) × $(706/\text{yr}) \times (\text{Tidal height})^2 \times (1025 \text{ kg/m}^3)$
 × $(9.8 \text{ m/s}^2) = 3.41 \times 10^{15} \text{ J/yr}$

6. River, chemical potential

River inflow = $1.80 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{yr}$ (average of 1997~2010, Rhew and Lee (2011))

Gibbs free energy = 4.73 J/g

Energy = (Inflow) × (Density) × (Gibbs free energy) = $8.49 \times 10^{15} \text{ J/yr}$

Appendix B. Footnotes to Table 3

1. Fishery production

Production = 18,333 MT/yr (NFFC, 2007)

Energy = (Production) × $(1 \times 10^6 \text{ g/MT}) \times (4 \text{ kcal/g}) \times (4186 \text{ J/kcal})$
 × (0.20) = $6.31 \times 10^{13} \text{ J/yr}$

2. Pollutant removal (nitrogen reduction)

Net removal of dissolved inorganic nitrogen = $3.21 \times 10^8 \text{ mmol/day}$
 (MLTM, 2009)

Annual nitrogen removal = $(3.21 \times 10^8 \text{ mmol/day}) \times (365 \text{ days})$
 × $(14.0067 \text{ gN/mol}) = 1.64 \times 10^9 \text{ gN/yr}$

Unit energy value = Total purchased energy/Nitrogen removed
 = $6.21 \times 10^{10} \text{ sej/gN}$

· Total energy in purchased goods and services for a conventional tertiary wastewater treatment plant in Sweden = $2.51 \times 10^{18} \text{ sej/yr}$ (Geber and Bjorklund (2002), adjusted to the global energy baseline of $15.83 \times 10^{24} \text{ sej/yr}$)

· Annual nitrogen removal = 24,150 kg/yr (Geber and Bjorklund, 2002)

3. Aesthetic service

Total energy input from Table 2

4. Scientific research information

Number of papers/reports published (1972~2008) = 4.4 papers/yr
 (DBPia, 2009; KISS, 2009)

Energy = (Average papers) × $(14.6 \text{ pages/paper}) \times (1 \text{ g/page})$
 × $(3.5 \text{ kcal/g}) \times (4186 \text{ J/kcal}) = 9.41 \times 10^5 \text{ J/yr}$