



Original Article

갯벌생태계의 에머지 유입 특성과 생태계서비스의 관계 분석

김나령¹ · 류중성² · 강대석^{1,†}

¹부경대학교 생태공학과

²안양대학교 해양바이오시스템공학과

Relationship Between Renewable Emergy Inflow and Ecosystem Service Provision of Tidal Flat Ecosystems in Korea

Naryeong Kim¹, Jongseong Ryu², and Daeseok Kang^{1,†}

¹Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

²Department of Marine Biotechnology, Anyang University, Incheon 23038, Korea

요 약

에머지 평가 자료 가운데 비교적 손쉽게 확보할 수 있는 자연환경 요소의 에머지량 자료를 갯벌의 생태계서비스 관리 측면에서 신속한 의사결정에 활용할 수 있는 지 알아보기 위해 갯벌생태계로 유입하는 재생가능에너지의 에머지량 평가, 수산물 생산량 및 총일차생산량 추정, 에머지 유입량과 일부 갯벌 생태계서비스(공급서비스인 수산물 생산과 지원 서비스인 총일차생산) 사이의 상관관계를 분석하였다. 이를 위해 환경 및 생태 자료의 가용 여부, 지형적 특성, 하천 유입 여부, 조차 환경 등을 종합적으로 고려하여 13개 갯벌을 연구대상으로 선정하였다. 단위면적당 연간 재생가능에너지 유입량은 서해 중부의 강화남단 갯벌에서 남해 동부의 낙동강하구 갯벌로 가면서 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 단위면적당 연간 수산물생산량은 갯벌 수산물 생산량 추정에 내재한 한계 때문에 명확한 분포 특성을 파악하기는 힘들었지만 남해안 갯벌 보다는 서해안 갯벌에서 단위면적당 수산물 생산이 더 많았다. 총일차생산의 경우 강화남단 갯벌에서 낙동강하구 갯벌로 가면서 증가하는 경향을 보였다. 단위면적당 연간 재생가능에너지 유입량은 단위면적당 연간 수산물 생산량과 유의한 양의 상관관계를 보였지만, 단위면적당 연간 총일차생산량과는 유의한 음의 상관관계를 보였다. 이 연구는 우리나라 갯벌생태계의 재생가능에너지 유입량 정보를 이용하여 갯벌이 제공하는 생태계서비스의 잠재력을 신속하게 평가할 수 있는 가능성을 보여주었다.

Abstract – Annual emergy inflow from environmental sources were evaluated, annual fishery production and gross primary production were estimated, and correlation analyses between emergy input from environmental sources and selected ecosystem services (fishery production and gross primary production) were carried out to test the possibility of using emergy inflow to tidal flats of Korea in rapid assessment for decision-making regarding their ecosystem services. Thirteen tidal flats were selected based on the availability of environmental and ecological parameters, physical characteristics (degree of openness and tidal heights), and freshwater inflow from rivers and streams. Annual renewable emergy inflow per unit area to the tidal flats decreased from southern Kangwha tidal flat in the mid-west coast to Nakdong River estuary tidal flat in the southeastern coast. Even though it was difficult to find any clear trend in the distribution of fishery production per unit area among the tidal flats due to the limitations inherent in the estimation of fishery production, tidal flats in the west coast showed higher fishery production on average than those in the south coast. Annual gross primary production per unit area showed an increasing trend along the Korean coast from the mid-west to the southeast coast. There was a positive correlation between annual renewable emergy inflow per unit area and annual fishery production per unit area, while a negative correlation was observed between annual renewable emergy inflow per unit area and annual gross primary production per unit area. These suggest a possibility for using emergy inflow as an indirect measure of the potential for ecosystem service provision of tidal flat ecosystems in Korea.

Keywords: Tidal flat(갯벌), Renewable emergy inflow (재생가능에너지 유입), Ecosystem service(생태계서비스)

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

1. 서 론

갯벌생태계는 육상과 해양을 연결하는 전이지대로서 다양한 생태학적 과정을 통해 연안생태계의 생산성과 생물종 다양성을 유지하는데 중요한 역할을 한다(Levin *et al.*[2001]). 갯벌에 서식하는 저서미세조류의 일차생산은 연안생태계 일차생산에서 10~70%를 차지하는 것으로 알려져 있다(Koh *et al.*[2006]). 갯벌생태계는 공급서비스(수산물 공급 등), 조절서비스(오염정화, 재해피해 저감, 기후변화 영향 저감 등), 문화서비스(여가, 관광, 역사유산 등), 지원서비스(서식지 제공, 일차생산 등) 등 다양한 생태계서비스를 제공하고 있다(MOF[2016a]). 갯벌이 제공하는 생태계서비스 일부 항목에 대한 경제학적 가치 평가에 따르면 우리나라 갯벌은 연간 약 16조원(2012년 기준)의 경제적 가치를 제공하고 있다(MOF[2013a]).

그러나, 우리나라의 갯벌은 매립, 연안 이용에 따른 서식지 훼손, 육상기인 오염물질의 유입, 해수면 상승 등으로 인해 면적이 지속적으로 감소하고 있으며 갯벌의 건강성 또한 악화하고 있다. 2013년 기준 우리나라 갯벌의 면적은 약 2,487 km²인데, 1987년 이후부터 2013년까지 26년 동안 간척과 매립 등으로 1987년 기준 전체 갯벌(약 3,204 km²)의 22.4%에 달하는 약 716 km²의 갯벌이 사라졌다(MOF[2016b]).

갯벌자원의 지속가능한 이용을 실현하기 위해서는 다양한 이용행위가 생태계에 미치는 영향을 객관적으로 파악하고, 관리우선순위, 보호대상의 선정 등 효과적인 관리정책이 수립되어야 한다. 갯벌생태계의 생태계서비스에 대한 가치 평가는 갯벌생태계의 이용과 보전을 조화하기 위한 합리적 의사결정 자료를 제공할 수 있다. UNEP-WCMC[2011]는 해양생태계가 제공하는 생태계서비스의 가치 평가는 해양생태계로부터 발생하는 편익을 평가할 수 있는 수단이며 생태계가 사람들에게 제공하는 혜택의 가치에 대한 이해를 높임으로써 해양생태계 관리 의사결정에 도움을 줄 수 있다고 주장하였다. 남과 강[2016]은 현재 우리나라 해양생태계의 관리 방향이 공간관리로 전환하고 있는데, 갯벌생태계가 제공하는 생태계서비스에 대한 체계적이고 종합적인 가치 평가는 해양공간의 이용 또는 보존과 관련된 의사결정에 중요한 기초 정보를 제공할 수 있을 것으로 보았다.

갯벌생태계가 제공하는 생태계서비스의 가치를 종합적으로 평가하기 위해서는 생태계서비스 목록의 구축이 선행해야 하지만 아직까지 이에 대한 국내 연구는 미흡한 상태이다. 국내에서 해양생태계의 생태계서비스 목록을 구축하기 위한 시도는 국립공원 해양생태계(KNP[2015]), 새만금 해역(MOF[2016a]), 남해 강진만(NIFS[2016]), 경기만 해역(MOF[2016b]) 등을 대상으로 한 연구가 있으며, 갯벌생태계의 생태계서비스 목록을 종합적으로 제시하고자 한 시도는 무안 갯벌을 대상으로 한 연구(NMBIK[2016])가 유일하다. 해양생태계서비스 목록 작성과 관련한 연구 미흡을 반영하여 우리나라 갯벌을 대상으로 가치평가를 수행한 연구들(MOMAF[2007]; Choi *et al.*[2009]; Park *et al.*[2011]; Kang[2001]; Kang *et al.*[2006]; Kang[2013]; Nam and Kang[2016])은 갯벌 생태계서비스의 일부

만을 대상으로 하였기 때문에 이들 연구의 평가 결과를 갯벌생태계 관리를 위한 합리적, 과학적 의사결정에 적용하는 데는 한계가 있다.

갯벌생태계가 제공하는 생태계서비스의 목록이 확정되고, 이를 토대로 다양한 생태계서비스 가치 평가 자료를 축적하기 전까지 갯벌의 생태계서비스 제공능력이나 가치를 간접적으로 판단하는데 활용할 수 있는 정량 자료가 있다면 갯벌생태계 관리에 유용한 정보를 제공할 것이다. 이와 관련하여 Nam and Kang[2016]은 갯벌생태계로 유입하는 자연환경에너지의 에머지량을 갯벌의 생태계서비스 잠재력 파악에 활용할 수 있을 것으로 판단하였다. Nam and Kang[2016]의 결론은 Odum[1996]이 제안한 최대 에머지흐름의 원리(Maximum empower principle, MEPP)와 관련이 있다. MEPP는 “다른 시스템과 경쟁에서 우세하게 되는 시스템은 최적의 효율로 자원 유입을 강화함으로써 에머지 유입량을 최대로 하는 디자인을 가지고 있는 시스템”이라고 주장한다. 소규모 실험실이나 시뮬레이션 모델을 이용해 MEPP를 증명하기 위한 연구들이 수행되었지만, 이용 가능한 자료의 한계 때문에 실제 생태계 자료를 이용해 MEPP의 타당성을 체계적으로 입증하기 위한 연구는 아직 없다.

이 연구는 갯벌의 생태계서비스 가치에 대한 체계적이고 종합적인 평가 결과가 축적되기 전까지 우리나라 갯벌의 생태계서비스 제공능력과 생태계 구조를 나타내는 간접 지표로서 비교적 쉽게 산정할 수 있는 에머지 유입량의 적용 타당성을 분석하는 것을 목적으로 하였다.

2. 연구방법

2.1 평가 대상

우리나라 갯벌의 에머지 유입 특성과 생태계서비스 사이의 관계를 살펴보기 위해 서해 중부의 강화남단 갯벌에서 남해 동부의 낙동강하구 갯벌까지 13개 갯벌을 연구대상으로 선정하였다(Fig. 1). 연구대상 갯벌은 갯벌과 갯벌 사이에 육지 또는 바다가 놓여 있어 주변 갯벌과 지리적 구분이 뚜렷한 갯벌로 하였고, 에머지 평가 자료의 가용 여부, 지형적 특성, 하천 유입 여부, 조차 환경 등을 종합적으로 고려해 선정하였다. 연구대상 13개 갯벌 가운데 7개는 서해안에 있으며, 6개는 남해안에 분포하고 있다. 지형적 특성 측면에서는 개방형 갯벌 4개, 반폐쇄성 갯벌 9개로 구성되어 있으며, 하천 유입 측면에서는 뚜렷한 하천 유입이 없는 갯벌 4개와 하천을 통한 담수 유입이 있는 갯벌 9개를 포함하였다. 또한 연구대상 13개 갯벌은 면적을 기준으로 크게 소규모 갯벌과 대규모 갯벌로 구분(절대적 구분이 아닌 연구대상 갯벌 사이의 상대적 구분)할 수 있는데, 면적이 30 km² 미만인 소규모 갯벌 8개와 60 km² 이상인 대규모 갯벌 5개를 포함하고 있다.

2.2 에머지 평가 절차

에머지 평가는 Odum[1996]이 제시한 일반적인 절차를 따라 평가대상 선정, 평가 경계 설정, 평가 모델 작성, 기초 자료 수집, 에



Fig. 1. Location of thirteen tidal flats selected for this study along the Korean coast.

머지량 계산의 순으로 진행하였으며, 기존 국내 평가 사례(Kang and Nam[2003]; Kang[2013]; Kang[2015])를 참고하였다. 기초 자료를 이용해 에머지량을 계산하기 위해서는 이들 자료를 에머지량으로 변환할 수 있는 환산인자가 필요한데, 에머지 평가법에서는 이를 에머지 원단위(Unit Energy Value, UEV)라고 부른다. 기초 자료(단위는 J/yr, g/yr 등)와 에머지 원단위(단위는 sej/J, sej/g 등)를 곱하여 각 평가항목의 에머지량을 계산하였다. 이 연구에서 사용한 UEV는 기존 문헌에 제시된 값을 이용하였으며, 갯벌의 일차생산 UEV는 평가 자료를 이용하여 직접 계산(에머지량을 에너지량으로 나눈 값)하였다.

2.3 에머지 평가 자료

이 연구에서 선정한 13개 갯벌생태계의 연간 재생가능에머지 유입량 계산은 태양, 바람, 강수, 파도, 조석, 하천 유입 담수 등 여섯 가지 자연환경 요소를 대상으로 하였다. 태양, 바람, 강수는 갯벌과 인접한 기상관측소에서 2015~2016년 동안 측정된 자료의 평균값을 이용하였다. 파도가 공급한 에머지량은 국립해양조사원의 파고 측정 지점 가운데, 13개 갯벌에서 가장 인접한 지점의 2014~2015년 유의파고 자료의 평균값을 이용하였다. 또한 파도에너지의 계산에 필요한 직선 해안선 길이는 각 갯벌의 바다쪽 경계의 직선 길이를 이용하였다. 조석 에너지량 계산에 필요한 평균 조차는 국립해양조사

Table 1. Type of data and their sources that were used to calculate emergy inflows to the tidal flats selected for this study from environmental sources

Environmental sources	Data type	Sources	Time period
Sun	Solar insolation	KMA[2016, 2017]	2015~2016
Wind	Average wind velocity	KMA[2016, 2017]	2015~2016
Rain	Annual precipitation	KMA[2016, 2017]	2015~2016
Wave	Wave height	KHOA[2015~2016] (http://www.khoa.go.kr)	2014~2015 & real time data
Tide	Average tidal range	KHOA[2012]	2012
Freshwater inflow	Flow rate, conductivity, TDS, salinity	WIS [2015~2016] (http://www.water.nier.go.kr) MEIS [2015~2016] (http://www.meis.go.kr)	2015~2016

원[2012]의 ‘조석·조류 조화상수집’ 자료를 이용하였다.

하천을 통해 유입하는 담수의 양은 13개 갯벌의 대조염분(reference salinity)과 갯벌염분(tidal salinity)을 이용해 추정하였다. 대조염분은 국립수산물품질관리원의 정선해안관측자료에서 갯벌과 인접한 정선의 가장 외해역에 위치한 정점에서 2015~2016년에 측정된 값의 평균을 이용하였다. 갯벌염분은 해양환경관리공단의 해양환경측정망 자료에서 갯벌과 가장 인접한 정점에서 2015~2016년에 측정된 값의 평균을 이용하였다. 갯벌에 유입한 담수의 양은 만조시 갯벌을 덮고 있는 해수의 부피(조석영향부피)와 담수가 차지하는 비율을 곱해 계산하였다. 갯벌로 유입하는 하천 담수의 화학에너지 계산에 필요한 총용존고형물(total dissolved solid, TDS) 농도는 환경부 물환경 측정망 자료의 전기전도도를 이용해 추정하였다. 전기전도도는 각 갯벌로 흘러드는 하천 및 소하천의 가장 하류 정점에서 2015~2016년에 매월 측정된 값의 평균을 이용하였다. 가로림만, 근소만, 고군산군도, 득량만, 보성·별교 갯벌의 경우 유량이 측정된 소하천이 없어 인근 소하천의 유량 자료를 이용하였다.

본 연구에서는 갯벌의 다양한 생태계서비스 가운데 공급서비스인 수산물 생산과 지원서비스인 일차생산에 대한 에머지 평가만 수행했다. 갯벌이 제공하는 대표적인 공급서비스인 수산물 생산량은 갯벌에서 생산된 수산물 통계가 별도로 구축되어 있지 않기 때문에 기존 통계자료(Statistics Korea[2015~2016])를 이용하여 추정했다. 갯벌 수산물 생산량 추정에는 갯벌에서 주로 양식하는 패류와 마을 어장의 2015~2016년 통계 자료를 이용했다. 연구대상 13개 갯벌의 수산물 생산량은 단위면적당 광역지방자치단체 수산물 생산량에 해당 갯벌면적을 곱해 산출하였다. 단위면적당 광역지방자치단체 수산물 생산량은 연평균 수산물 생산량에 생산면적을 나누어 구하였다. 수산물 생산량은 연평균 일반 해면어업 생산량과 연평균 천해 양식업 생산량을 더한 값이며, 수산물 생산면적은 천해양식업 면적과 마을 어업 면적의 합이다. 굴의 경우 일반해면업 생산량과 바닥식 어업권 자료를 이용해 조간대 갯벌 생산량을 추정하였다.

갯벌의 연간 총일차생산량은 기온, 광량, 엽록소-a 농도, 노출시간을 입력값으로 하는 변형된 Jassby 모델을 이용하여 계산했으며, 계산식은 다음과 같다(Kwon *et al.*[2018]). 각 갯벌의 총일차생산량은 연간 생산량으로 계산하였다.

$$\text{Daily pp} = \int_{ebb}^{flood} P_c(t) dt$$

$$P_c(t) = Chl_a(t) \times \left[P_{max}^b(t) \times \tanh \left[\frac{\alpha^b(t) \cdot I(t)}{P_{max}^b(t)} \right] \right]$$

$$P_{max}^b = 0.2156e^{0.0484 \cdot T}$$

$$I_k = 5.0670 \cdot T + 434.5538$$

$P_c(t)$: Gross primary productivity at time t (mmol O₂ m⁻² h⁻¹)

$P_{max}^b(t)$: Maximum photosynthetic rate, normalized with Chl-a concentration at time t (mmol O₂ mg Chl-a⁻¹ h⁻¹)

$\alpha^b(t)$: chlorophyll-specific photosynthetic efficiency at time t (mmol O₂ mg Chl-a⁻¹ h⁻¹ (μmol photons m⁻² s⁻²)⁻¹)

I(t): Irradiance at time t (light intensity)

$I_k(t)$: saturated light intensity at time t

T: Temperature at time t

기온과 광량은 갯벌에 인접한 기상관측소에서 2016년 매시간 측정된 자료를 이용하였다. 노출시간은 갯벌의 중간지점 고도를 기준으로 이보다 조위가 높으면 일차생산량이 중지되고 조위가 이보다 낮으면 일차생산이 개시된다고 가정하여 계산했다. 조위는 2016년 조석표의 매시간 자료를 이용해 구하였다.

갯벌의 엽록소-a 농도를 구하기 위해 공간 해상도가 30m인 미국 NASA/USGS의 Landsat 8 인공위성 자료를 이용하였다. 2016년에 촬영된 Landsat 8 영상 가운데 맑은 날과 간조시 촬영되어 분석이 가능한 영상을 13개 갯벌별로 3~6장 확보하였다. 엽록소-a 농도를 계산하기 위해 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)를 다음과 같은 식을 이용해 계산하였다(Weier and Herring[2000]).

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

NIR: Optical reflectivity of the near-infra red band(0.845-0.885 μm, band 5) of Landsat 8 images

Red: Optical reflectivity of red visible band(0.630-0.680 μm, band 4) of Landsat 8 images

각 갯벌의 엽록소-a 농도는 위에서 계산한 NDVI 값을 바탕으로 다음 식을 이용해 계산했다(Kwon *et al.*[2016]).

$$\text{Chl-a (mg/m}^2\text{)} = e^{3.6 \cdot \text{NDVI} + 1.1}$$

13개 갯벌의 개별 NDVI 영상으로부터 연구대상 갯벌의 공간범위 안에 위치하는 pixel의 NDVI 값을 평균하여 해당 영상의 NDVI

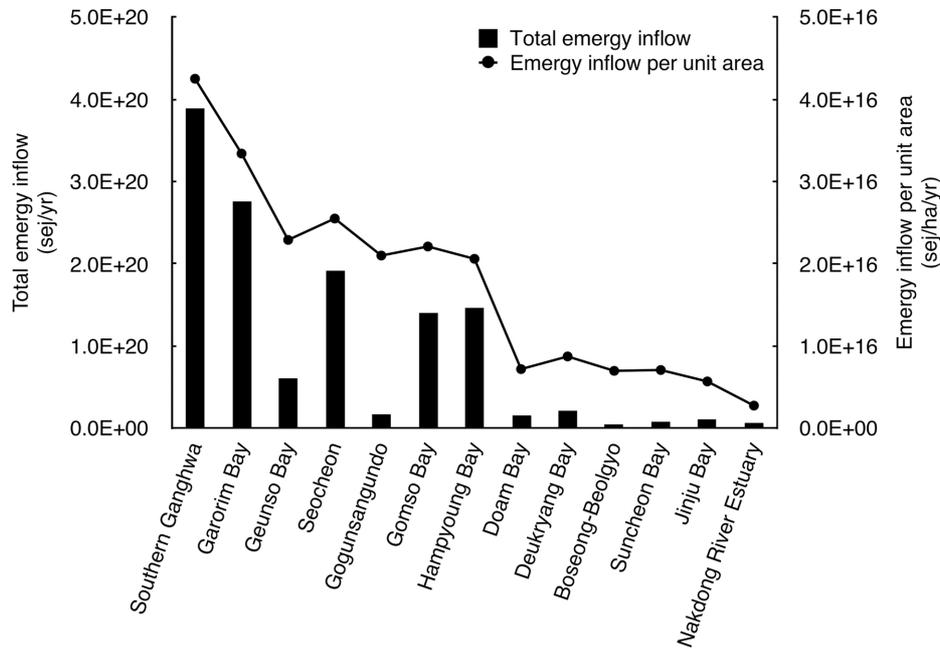


Fig. 2. Total annual renewable energy inflow and annual renewable energy inflow per unit area of the Korean tidal flats selected for this study.

값을 구한 후 위에 제시한 식을 이용하여 업록소-a의 평균값을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 재생가능에너지 유입 특성

이 연구의 분석대상으로 선정한 13개 갯벌로 유입하는 재생가능 에너지를 대상으로 한 에너지 평가 결과는 Fig. 2에 제시하였다. 갯벌로 유입하는 재생가능에너지는 태양, 바람, 강수, 파도, 조석, 하천유입 담수인데, 에너지 방법론에서 규정하는 바와 같이 중복계산의 문제를 피하기 위해 태양, 바람, 강수, 파도, 조석의 경우 각 갯벌별

로 에너지 유입량이 가장 큰 항목만 연간 총 에너지 유입량 계산에 이용하였다. 낙동강하구 갯벌을 제외한 12개 갯벌은 조석의 에너지량이 가장 많았으며, 낙동강하구 갯벌의 경우 강수가 공급하는 에너지량이 가장 많았다. 하천유입 담수가 공급하는 에너지는 갯벌 주변 유역에 내린 강수에서 기원한 것이어서 별도의 에너지 공급원에 해당하므로 연간 총 에너지 유입량 계산에 포함하였다.

면적 차이를 고려하지 않은 상태에서 각 갯벌별 연간 에너지 유입량을 비교할 경우 면적이 가장 넓고 조차와 담수 유입량이 가장 큰 강화남단 갯벌의 에너지 유입량이 3.89×10^{20} sej/yr로 가장 많았다. 크기가 가장 작은 보성-별교 갯벌의 연간 에너지 유입량은 4.68×10^{18} sej/yr에 불과하였다. 면적이 넓고 조차가 큰 서해안 갯벌로 유입하는

Table 2. Summary of emergy evaluation of annual fishery production per unit area of the Korean tidal flats selected for this study

Tidal flats	Annual fishery production		Solar Emery (sej/ha/yr)
	ton/ha/yr	J/ha/yr	
Southern Ganghwa	1.34	3.48×10^9	2.93×10^{16}
Garorim Bay	0.67	1.74×10^9	1.46×10^{16}
Geunso Bay	0.67	1.74×10^9	1.46×10^{16}
Seocheon	0.67	1.74×10^9	1.46×10^{16}
Gogunsangundo	1.25	3.25×10^9	2.73×10^{16}
Gomso Bay	1.25	3.25×10^9	2.73×10^{16}
Hampyoung Bay	0.05	1.30×10^8	1.09×10^{15}
Doam Bay	0.05	1.30×10^8	1.09×10^{15}
Deukryang Bay	0.05	1.30×10^8	1.09×10^{15}
Boseong-Beolgyo	0.05	1.30×10^8	1.09×10^{15}
Suncheon Bay	0.05	1.30×10^8	1.09×10^{15}
Jinju Bay	0.29	7.54×10^8	6.33×10^{15}
Nakdong River Estuary	0.14	3.64×10^8	3.06×10^{15}

*Annual production as the average production during 2015~2016

에머지 총량이 남해안 갯벌로 유입하는 에머지량보다 더 많았다.

연간 총 에머지 유입량을 갯벌 면적으로 나누어 단위 면적당 연간 재생가능에머지 유입량을 계산한 결과 서해 중부 강화남단 갯벌에서 남해 동부의 낙동강하구 갯벌로 가면서 단위 면적당 유입량이 감소하는 패턴이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 2). 강화남단 갯벌의 단위 면적당 에머지 유입량이 4.25×10^{16} sej/ha/yr으로 가장 많았으며, 낙동강하구 갯벌의 단위면적당 에머지 유입량은 2.75×10^{15} sej/ha/yr에 불과하였다. 단위면적당 재생가능에머지 유입량 계산식은 갯벌의 형태(개방형 또는 반폐쇄형)나 크기(소형 또는 대형)가 아니라 평균 조차의 함수이기 때문에 우리나라 연안의 전형적인 조석 패턴을 반영하여 서해 중부 연안에 있는 강화남단 갯벌에서 남해 동부의 낙동강하구 갯벌로 가면서 단위면적당 에머지 유입량이 감소하였다.

3.2 수산물 생산 추정 및 에머지 평가

연구대상 갯벌별 연간 수산물 생산량 추정값과 이를 토대로 계산한 에머지량은 Table 2에 제시하였다. 강화남단 갯벌의 단위면적당 수산물 생산량이 1.34 ton/ha/yr로 가장 많았으며, 고군산군도 갯벌과 곰소만 갯벌의 단위면적당 수산물 생산량(1.25 ton/ha/yr)도 높았다. 연구대상 갯벌 가운데 전라남도에서 있는 모든 갯벌(함평만 갯벌, 도암만 갯벌, 득량만 갯벌, 보성-별교 갯벌, 순천만 갯벌)의 단위면적당 수산물 생산량은 0.05 ton/ha/yr으로 가장 적었는데, 이는 광역지방자치단체의 수산물 통계를 바탕으로 갯벌 수산물 생산량을 추정한 이 연구의 한계에 기인한다. 서해안 갯벌의 평균 생산량은 0.84 ton/ha/yr, 남해안 갯벌의 평균 생산량은 0.11 ton/ha/yr으로, 서해안에 있는 갯벌의 수산물 생산량이 남해안 갯벌의 생산량보다 더 많았다. 단위면적당 수산물 생산량과 갯벌 면적을 모두 고려할 경우 강화남단 갯벌의 연간 수산물 생산량이 12,267 ton/yr으로 가장 많았으며, 곰소만 갯벌(7,902 ton/yr), 가로림만 갯벌(5,572 ton/yr), 서천 갯벌(5,057 ton/yr)의 수산물 생산량이 많았다. 갯벌 면적이 가

장 작은 보성-별교 갯벌(36 ton/yr)의 연간 수산물 생산량이 가장 적었다.

각 갯벌에서 생산한 수산물의 에머지량은 연간 수산물 생산량과 마찬가지로 강화남단 갯벌에서 2.93×10^{16} sej/ha/yr로 가장 높았으며, 전라남도 갯벌(함평만 갯벌, 도암만 갯벌, 득량만 갯벌, 보성-별교 갯벌, 순천만 갯벌)에서 1.09×10^{15} sej/ha/yr로 가장 낮았다. 이는 앞에서 언급한 갯벌 수산물 생산량 추정에 내재한 문제와 우리나라 갯벌에서 생산한 수산물 품종별로 에머지 원단위 데이터베이스가 아직 구축되어 있지 않아 외국 사례의 수산물 평균값을 이용한 한계를 반영한다. 각 갯벌에서 생산하는 수산물 품종별 에머지 원단위를 이용하여 계산한다면 갯벌별 수산물의 에머지량 분포는 달라질 수 있다.

3.3 일차생산량 추정 및 에머지 평가

Landsat 8 위성 영상을 이용해 계산한 총일차생산량 추정 및 에머지 평가 결과는 Table 3에 요약하였다. 연구대상 13개 갯벌의 단위면적당 총일차생산량은 평균 188.2 gC/m²/yr이었다. 진주만 갯벌의 단위면적당 총일차생산량이 367.1 gC/m²/yr로 가장 높았으며, 근소만 갯벌의 단위면적당 총일차생산량이 116.7 gC/m²/yr로 가장 낮았다. 전체적으로는 강화남단 갯벌에서 낙동강하구 갯벌로 가면서 총일차생산량이 증가하는 경향을 보였지만, 단위면적당 재생가능에머지 유입량 변화만큼 뚜렷하지는 않았다.

반폐쇄성 갯벌의 단위면적당 총일차생산량(197.6 gC/m²/yr)이 개방형 갯벌(167.0 gC/m²/yr)보다 더 높고, 대규모 갯벌(152.5 gC/m²/yr)보다는 소규모 갯벌(210.5 gC/m²/yr)의 단위면적당 총일차생산량이 더 높았다. 소규모 반폐쇄성 갯벌의 단위면적 총일차생산량이 평균 215.7 gC/m²/yr로 가장 높았으며, 규모가 큰 개방형 갯벌의 단위면적당 총일차생산량이 138.9 gC/m²/yr로 가장 낮았다. 해안별로 연간 총일차생산량을 비교할 경우 남해안 갯벌의 총일차생산량(평균 227.5 gC/m²/yr)이 서해안 갯벌의 총일차생산량(평균 154.5 gC/m²/yr)보

Table 3. Summary of emergy evaluation of annual gross primary production per unit area that was estimated using satellite images for the Korean tidal flats selected for this study

Tidal flats	Gross Primary Production		Solar Emergy (sej/m ² /yr)	Unit Emergy Value (sej/J)
	gC/m ² /yr	J/m ² /yr		
Southern Ganghwa	134.1	5.61×10^6	4.25×10^{12}	7.58×10^5
Garorim Bay	162.8	6.81×10^6	3.34×10^{12}	4.90×10^5
Geunso Bay	116.7	4.89×10^6	2.29×10^{12}	4.69×10^5
Seocheon	143.7	6.02×10^6	2.55×10^{12}	4.24×10^5
Gogunsangundo	202.7	8.49×10^6	2.10×10^{12}	2.48×10^5
Gomso Bay	132.2	5.53×10^6	2.21×10^{12}	4.00×10^5
Hampyoung Bay	189.6	7.94×10^6	2.06×10^{12}	2.60×10^5
Doam Bay	242.5	1.02×10^7	7.19×10^{11}	7.09×10^4
Deukryang Bay	199.2	8.34×10^6	8.73×10^{11}	1.05×10^5
Boseong-Beolgyo	178.1	7.46×10^6	6.98×10^{11}	9.36×10^4
Suncheon Bay	190.5	7.97×10^6	7.08×10^{11}	8.88×10^4
Jinju Bay	367.1	1.54×10^7	5.69×10^{11}	3.70×10^4
Nakdong River Estuary	187.4	7.84×10^6	2.75×10^{11}	3.50×10^4

다 높았다.

갯벌의 지형적 특성(개방 또는 반폐쇄)에 따른 단위면적당 연간 총일차생산량의 차이는 갯벌 퇴적물의 부유와 침식에 기인하는 것으로 판단된다. 개방형 갯벌의 경우 파랑과 조류 때문에 갯벌 퇴적물이 재부유해 침식에 의한 생물량 유출이 크게 발생할 수 있다는 것이 알려져 있다(Underwood and Paterson[1993]; de Jonge and Colijn [1994]; Barmgust *et al.*[1997]). Yoo[2017]는 개방형 갯벌인 강화남단 갯벌을 대상으로 한 연구에서 수층으로 재부유한 저서미세조류가 썰물 때 연안해역으로 빠져나가며, 한강에서 유입하는 부유퇴적물로 인해 탁도가 높아 광합성이 제한될 수도 있음을 밝혔다.

갯벌 크기에 따른 단위면적당 연간 총일차생산량의 차이는 갯벌 퇴적상의 구성비율에 의한 것으로 여겨진다. 갯벌의 일차생산은 일반적으로 니질퇴적상이 사질퇴적상 보다 높은 것으로 알려져 있는데(Kwon *et al.*[2016]), 대규모 갯벌의 경우 일차생산이 낮은 사질퇴적상의 구성비율이 상대적으로 높아 전체적인 일차생산값이 낮게 나온 것으로 보인다. 본 연구에서 선정된 소규모 갯벌은 낙동강하구 갯벌, 근소만 갯벌을 제외하면 대부분 니질퇴적상이 우세한 갯벌이다.

각 갯벌로 유입하는 재생가능에너지량이 연구대상 갯벌 일차생산의 에너지량인데, 갯벌로 유입하는 모든 자연환경 요소의 상호작용을 통해 일차생산이 가능하기 때문에 총 에너지 유입량이 일차생산의 에너지 토대에 해당한다. Fig. 2에 제시한 바와 같이 강화남단 갯벌의 단위 면적당 에너지 유입량이 가장 많았으며, 낙동강하구 갯벌의 단위면적당 에너지 유입량이 가장 적었다.

Table 3은 각 갯벌의 단위면적당 연간 재생가능에너지 유입량을 단위면적당 총일차생산량(에너지량 기준)으로 나누어 구한 일차생산의 UEV값을 포함하고 있다. 연구대상 13개 갯벌의 일차생산 UEV 평균은 2.68×10^5 sej/J인데, 낙동강하구 갯벌 일차생산의 UEV (3.50×10^4 sej/J)가 가장 작았으며 강화남단 갯벌 일차생산의 UEV (7.58×10^5 sej/J)가 가장 컸다. 서해 중부의 강화남단 갯벌에서 남해 동부의 낙동강하구 갯벌로 가면서 총일차생산의 UEV 감소 경향이

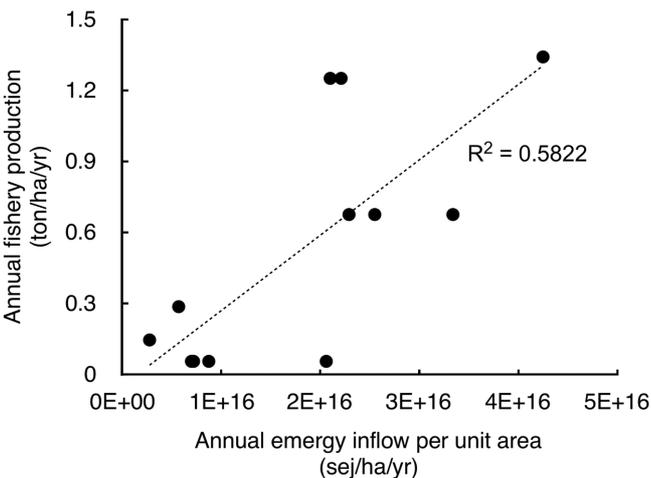


Fig. 3. Relationship between annual renewable energy inflow and annual fishery production of the Korean tidal flats selected for this study, on a per unit area basis.

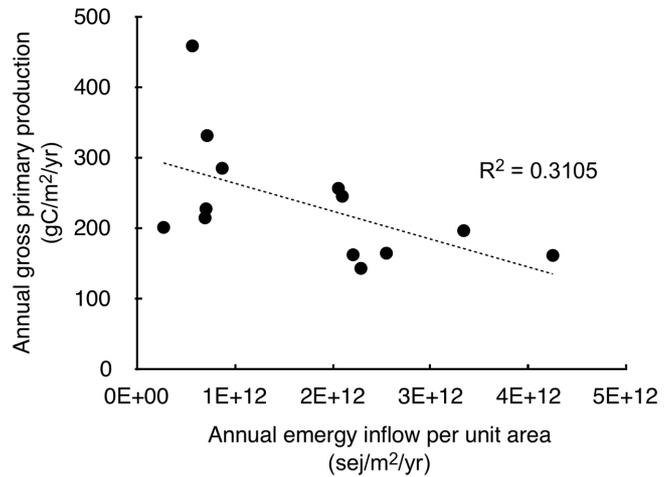


Fig. 4. Relationship between annual renewable energy inflow and annual gross primary production of the Korean tidal flats selected for this study, on a per unit area basis.

뚜렷하였다. 이들 UEV 값은 향후 우리나라 갯벌생태계의 일차생산을 대상으로 한 에너지 평가에 직접 활용할 수 있는 에너지 원단위 자료로서 가치가 있는 자료이다.

3.4 에너지 유입량과 생태계 서비스의 관계

연구대상 갯벌로 유입하는 재생가능에너지와 수산물 생산량의 유의한 상관관계($r=0.763$, $p=0.002$)를 보였다(Fig. 3). 즉, 단위면적당 에너지 유입량이 많은 갯벌에서 단위면적당 연간 수산물 생산량이 증가하는 관계를 보였다. 남과 강[2015]은 서해안과 남해안으로 구분한 광역적 차원에서 단위면적당 에너지 유입량이 더 많은 서해안 갯벌의 수산물 생산량이 남해안 갯벌보다 더 많다는 것을 보여준 바 있는데, 이 연구는 개별 갯벌 측면에서도 에너지 유입량과 수산물 생산량 사이에 유의한 상관관계가 있음을 확인하였다. Lee [2014]는 간단한 생산자-소비자 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 소비자의 생물량(에너지량으로 표현)과 단위시간당 에너지 유입량 사이에 강한 상관관계가 있음을 보여준 바 있다. 갯벌의 수산물 생산은 대부분 저서동물과 어류 등 갯벌생태계의 소비자를 대상으로 한다는 점에서 재생가능에너지 유입량과 수산물 생산 사이의 유의한 상관관계는 Lee[2014]의 시뮬레이션 결과를 뒷받침하는 것으로 볼 수 있다.

갯벌의 수산물 생산은 태양, 바람, 파도, 강수, 조석 등 자연환경 요소와 생산과정에 투입하는 어획노력이 복합적으로 작용한 결과이지만, 이상의 결과는 갯벌생태계로 유입하는 재생가능에너지(자연환경 요소가 공급한 에너지)의 양이 각 갯벌의 수산물 생산 잠재력을 간접적으로 나타내는데 이용할 수 있는 에너지 자료임을 나타낸다. 그러나 각 갯벌별로 단위면적당 수산물 생산량을 추정하는 과정에서 광역지방자치단체의 수산물 생산량 자료를 이용하였기 때문에 동일한 광역지방자치단체에 속하는 갯벌은 단위면적당 생산량이 같아 갯벌별 특성을 충분히 반영한 상관관계 분석이 이루어지지 못한 한계가 있다.

지원서비스에 해당하는 총일차생산과 재생가능에머지 유입량 사이의 상관관계 분석 결과는 Fig. 4에 제시하였다. 단위면적당 연간 재생가능에머지 유입량과 단위면적당 연간 총일차생산량은 음(-)의 유의한 상관관계($r=-0.557$, $p=0.048$)를 보였다. 즉, 단위면적당 재생가능에머지 유입량이 증가할수록 단위면적당 총일차생산량은 감소하는 관계를 보였다. 이는 앞에서 제시한 바와 같이 갯벌로 유입하는 재생가능에머지의 양은 중서부 연안의 강화남단 갯벌에서 남동부 연안의 낙동강하구 갯벌로 갈수록 감소하는 반면(Fig. 2), 총일차생산은 강화남단 갯벌에서 낙동강하구 갯벌로 갈수록 증가하는 경향(Table 3)을 반영한다. 앞에서 인용한 Lee[2014]의 시뮬레이션 결과에서는 단위시간당 에머지 유입량과 생산자의 생물량(에너지량으로 표현) 사이에 유의한 상관관계가 나타나지 않았지만, 에머지 유입량이 증가할수록 생산자의 생물량이 감소하는 추세를 보여주었다.

4. 결 론

본 연구는 에머지 평가 자료 가운데 비교적 손쉽게 확보할 수 있는 자연환경 요소의 에머지량 자료를 갯벌의 생태계서비스 관리 측면에서 신속한 의사결정에 활용할 수 있는 지 알아보기 위해 갯벌생태계로 유입하는 재생가능에너지의 에머지량 평가, 수산물 생산량 및 총일차생산량 추정, 에머지 유입량과 일부 갯벌 생태계서비스(공급서비스인 수산물 생산과 지원서비스인 총일차생산) 사이의 상관관계를 분석을 수행하였다.

단위면적당 연간 재생가능에머지 유입량은 서해 중부의 강화남단 갯벌에서 남해 동부의 낙동강하구 갯벌로 가면서 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 단위면적당 연간 수산물생산량은 갯벌 수산물 생산량 추정에 내재한 한계 때문에 명확한 분포 특성을 파악하기는 힘들었지만 남해안 갯벌 보다는 서해안 갯벌에서 단위면적당 수산물 생산이 더 많았다. 총일차생산의 경우 강화남단 갯벌에서 낙동강하구 갯벌로 가면서 증가하는 경향을 보였다. 단위면적당 연간 재생가능에머지 유입량은 단위면적당 연간 수산물 생산량과 유의한 양의 상관관계를 보였지만, 단위면적당 연간 총일차생산과는 유의한 음의 상관관계를 보였다. 이러한 결과는 갯벌의 재생가능에머지 유입량 정보를 갯벌 생태계서비스 잠재력에 대한 신속 평가에 이용할 수 있는 가능성을 시사한다.

그러나 갯벌생태계의 에머지 유입량과 생태계서비스 사이의 관계를 더 명확하게 규명하고 이를 갯벌생태계 관리에 활용하기 위해서는 다음과 같은 사항에 대한 보완이 필요하다. 우선 갯벌 수산물 생산량 추정방법을 보완하여 더 정확한 수산물 생산 자료를 확보할 필요가 있다. 또한 갯벌에서 생산하는 다양한 수산물의 에머지 원단위 데이터베이스를 구축하여 갯벌별로 다른 수산물 생산 특성을 에머지 평가에 반영할 필요가 있다. 마지막으로 에머지 유입량과 더 다양한 생태계서비스 사이의 상관관계를 파악할 필요가 있으며, 이들 사이의 인과관계를 과학적으로 설명하기 위한 에머지 평가 자료의 형태와 분석 방법에 대한 개선이 필요하다.

후 기

이 논문은 2018년 해양수산부의 “하구역 종합관리시스템 개발 연구(20140431)”, “새만금 주변해역 해양환경 및 생태계관리 연구 개발(20140257)”, “생태계기반 해양공간분석 및 활용기술 개발(20170325)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Barranguet, C., Herman, P.M.J. and Sinke, J.J., 1997, Microphytobenthos biomass and community composition studied by pigment biomarkers: importance and fate in the carbon cycle of a tidal flat, *Journal of Sea Research*, 38, 59-70.
- [2] Choi, S.H., Kwon Y.D., Lee, H.S. and Park, S.C., 2009. Estimation of the Goseong tideland value. *Korea Journal of Agricultural Management and Policy*, 36, 117-136.
- [3] de Jonge, V. N. and Colijn, F., 1994, Dynamics of microphytobenthos biomass in the Ems estuary, *Marine Ecology Progress Series*, 104(1/2), 185-196.
- [4] Kang, D., 2001, Emery evaluation of the Kangwha tidal flat, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 36(2), 51-58.
- [5] Kang, D., 2013, Emery-based value of the contributions of the Youngsan River estuary ecosystem to the Korean economy, *The Sea*, 18(1), 13-20.
- [6] Kang, D., 2015, Emery evaluation of the Korean economy and environment: implications for the valuation of marine ecosystem services, *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 18(2), 102-115.
- [7] Kang, D. and Nam, J., 2003, Emery-based valuation of marine environmental resource and policy implications, *Korea Maritime Institute*, Seoul.
- [8] Kang, D., Nam, J. and Lee, S., 2006, Emery 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.
- [9] KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Agency), 2012, Harmonic constants for tide and tidal current of the Korean coast.
- [10] KHOA, 2015~2016, Report of Real-time Korea Oceanographic Observations, http://www.khoa.go.kr/koofs/kor/observation/obs_real.do
- [11] KMA (Korea Meteorological Administration), 2016, Annual Climatological Report, Korea Meteorological Administration, Seoul.
- [12] KMA, 2017, Annual Climatological Report, Korea Meteorological Administration, Seoul.
- [13] KNP (Korea National Park), 2015, Valuation of marine ecosystem services of the Korean national parks, Korea National Park, Seoul.
- [14] Koh, C.H., Khim, J.S., Araki, H., Yamanishi, H., Mogi, H. and Koga, K., 2006, Tidal resuspension of microphytobenthic chlorophyll a in a Nanaura mudflat, Saga, Ariake Sea, Japan: flood-ebb and spring-neap variations, *Marine Ecology Progress Series*,

- 312, 85-100.
- [15] Kwon, B.O., Lee, Y., Park, J., Ryu, J., Hong, S., Son, S., Lee, S.Y., Nam, J., Koh, C.H. and Khim, J.S., 2016, Temporal dynamics and spatial heterogeneity of microalgal biomass in recently reclaimed intertidal flats of the Saemangeum area, Korea, *Journal of Sea Research*, 116, 1-11.
- [16] Kwon, B.O., Kim, H.C., Koh, C.H., Ryu, J., Son, S., Kim, Y.H. and Khim, J.S., 2018, Development of temperature-based algorithms for estimation of microphytobenthic primary production in a tidal flat: A case study in Daebu mudflat, Korea, *Environmental Pollution* (in press).
- [17] Lee, S., 2014, Resource pulses can increase power acquisition of an ecosystem, *Ecological Modelling*, 271, 21-31.
- [18] Levin, L.A., Boesch, D.F., Covich, A., Dahm, C., Erseus, C., Ewel, K.C., Kneib, R.T., Moldenke, A., Palmer, M.A., Snelgrove, P., Strayer, D. and Weslawski, J.M., 2001, The function of marine critical transition zones and the importance of sediment biodiversity, *Ecosystems*, 4, 430-451.
- [19] MEIS (Marine Environmental Information System), 2015~2016, Marine Environmental Monitoring Network, http://www.meis.go.kr/rest/obj_koem_port_new/obj
- [20] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), 2013a, Main results of national marine ecosystem surveys, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong.
- [21] MOF, 2016a, Integrated management of marine environment and ecosystems around Saemangeum, Korea Institute of Marine Science and Technology, Seoul.
- [22] MOF, 2016b, Establishment of marine spatial planning framework.
- [23] MOMAF (Ministry of Maritime Affairs and Fisheries), 2007, Environmental valuation of Garorim Bay, Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, Seoul.
- [24] 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.
- [25] NIFS (National Institute of Fisheries Science), 2016, Valuation of marine ecosystem services of Namhae-Gangjin Bay in Korea, National institute of Fisheries Science, Busan.
- [26] NMBIK (National Marine Biodiversity Institute of Korea), 2016, A case study of ecosystem services valuation with spatial data, National Marine Biodiversity Institute of Korea, Seocheon.
- [27] Odum, H.T., 1996, *Environmental Accounting, Emergy and Environmental Decision Making*, John Wiley & Sons, New York.
- [28] Park, S.Y., Yoo, S.H. and Gu, S.J., 2011, Assessment of the non-market value of Boseong tidal flat, *Ocean Policy Research*, 26, 47-73.
- [29] Statistics Korea, 2015~2016, Fishery production survey, Korean Statistical Information Service. <http://kosis.kr>.
- [30] UNEP-WCMC (UNEP World Conservation Monitoring Centre), 2011, Marine and coastal ecosystem services: Valuation methods and their application, UNEP-WCMC Biodiversity Series.
- [31] Underwood, G.J.C. and Paterson, D.M., 1993, Seasonal changes in diatom biomass, sediment stability and biogenic stabilization in the Severn Estuary, *Journal of the Marine Biological Association United Kingdom* 73, 871-887.
- [32] WIS (Water Information System), 2015~2016, Water environmental Data, <http://water.nier.go.kr/waterMeasurement/selectWater.do>
- [33] Weire, J. and Herring, D., 2000, Measuring vegetation (NDVI & EVI), Earth Observatory, https://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_1.php
- [34] Yoo, M.H., 2017, Ecological characteristics of microphytobenthos in the macrotidal Han River estuary, Yellow Sea, Ph.D. dissertation, Dept. Oceanography., Inha Univ., Incheon, Korea.

Received 12 April 2018

Revised 10 May 2018

Accepted 15 May 2018