연구논문 「환경정책」 제26권 제4호 2018. 12: 71-103
DOI http://dx.doi.org/10.15301/jepa.2018.26.4.71
ISSN 1598-835X

에머지를 활용한 금강유역의 지속가능성 평가*

Emergy-based Sustainability Assessment of Geum River Watershed

이승준**
Seungjun Lee

요약: 본 연구는 유역을 기준으로 하는 포괄적 환경관리의 필요성을 바탕으로 최근 세종특별자치시의 출범과 더불어 행정 중심지로서 개발 압력이 높아지고 있는 금강유역의 지속가능성을 평가하고자 하였다. 자연환경과 사회경제환경의 연계성을 바탕으로 지속가능성을 평가하기 위한 수단으로 시스템 접근법의 대표적 방법론이라 할 수 있는 에머지 개념을 활용하여 금강유역의 지속가능성을 평가하였다. 금강유역의 에머지 지속가능성을 평가한 결과, 낮은 에머지 생산율과 높은 환경부하 비율에 의해 에머지 지속가능성이 국가 전체에 비해 낮게 나타났다. 유역이 내륙에 속해있어 재생가능 자원으로 조석의 혜택을 받지 못하는 점과 사회경제활동을 영위하는 데 있어 내부의 자원보다 외부에서 유입된 자원에 크게 의존하는 데 주요 원인이 있었다. 금강유역의 지속가능성을 높이기 위해서는 자원안보를 높이고 환경부담을 낮추는 차원에서라도 외부자원에 대한 의존도를 낮추고 내부자원을 개발하고 활용하기 위한 정책적 노력이 필요하다.
핵심주제어: 에머지, 지속가능성, 금강유역, 정량적 가치평가

Abstract: The purpose of this study was to assess the sustainability of the Geum River watershed, which has been under development pressure because of its location in an area created for government administration, the Sejong Special Autonomous City. Sustainability of the watershed was assessed using the "emergy concept," which was developed from a systems approach that investigated the relationships between the natural and socio-economic environments. The results showed that the Emergy Sustainability Index (ESI) of the watershed was lower than that of the Korean Peninsula due to the low Emergy Yield Ratio (EYR) and the high Environmental Loading Ratio (ELR). The low EYR and the high ELR were caused by the inland location of the watershed, which is far from a tidal energy source, and thus requires a high dependence on external energy sources. The watershed management policy should focus on reducing economic dependence on external energy sources by developing internal sources, which may eventually increase energy security and reduce environmental loading, to improve the overall sustainability of the watershed.
Key Words: Emergy, Sustainability, Geum River Watershed, Quantitative Valuation

* 본 논문은 한국환경정책·평가연구원 보고서인 '에머지 방법론을 활용한 유역의 지속가능성 평가: 금강유역을 중심으로'를 학술논문 형태로 재구성한 글임을 밝힙니다.

** 한국환경정책·평가연구원 연구위원

I. 서론

최근 4대강 사업이나 설악산 케이블카 사업 등 국책사업 추진 문제로 인해 다양한 사회적 갈등이 발생하였다. 이러한 개발사업 논의의 초점이 비용과 편익 산정을 중심으로 하는 경제성에 치우치면서, 개발에 따른 환경영향이나 자연환경과 사회경제환경의 상호작용 및 지속가능성에 대해 충분히 고려하지 못하는 실정이다. 브룬트란트 보고서(Our Common Future)에서 언급한 지속가능발전의 핵심개념은 현 세대와 미래 세대의 삶을 위한 필수 요건을 지속적으로 충족하는 동시에 환경의 유한성을 고려한 발전을 이루는 것이다(UN, 1987). 이런 지속가능발전의 개념 속에는 경제, 환경, 사회적 측면을 균형 있게 고려하는 발전이 이루어져야 한다는 의미가 함축되어 있다.

지속가능성 평가를 통해 경제, 환경, 사회적 측면을 균형 있게 고려하기 위해서는 자연환경과 사회경제환경에 대한 포괄적인 평가가 요구된다. 특히 자연환경은 그동안 시장경제에서 다루는 영역이 아니었기 때문에 경제적 논리로는 그 가치를 충분히 고려하기 어려웠다. 또한 가치평가가 이루어졌더라도 경제학적 가치평가가 자연환경 그 자체의 가치를 실제로 평가하기보다는 자연환경을 가공함에 따라 인간의 노동력에 의해 발생하는 부가가치의 합으로 산정하는 경향이 있었다. 자연환경을 실제 가치에 비해 과소평가할 경우 이는 곧 자연환경의 무분별한 남용으로 이어진다. 자연환경은 사회경제활동을 가능하게 하는 자원을 제공하는 주체로서 사회경제환경과 밀접한 연계성을 가지며, 이러한 연계성 속에서 가치를 동일한 잣대로 평가할 수 있는 체계가 필요하다.

유역(watershed)은 “호수와 강, 하구, 습지, 지류를 포함하는 수체로 배수가 이루어지는 지역과 그 지역을 둘러싼 경관”으로 정의된다(이도원, 2004, p.22). 즉, 유역은 강수 등을 통해 유입된 물이 한 곳으로 모이는 지역 전체를 의미하며, 유역 내에서 강수를 통해 물의 유입이 발생하고 유입된 물은 그 자체로 생태계를 구성하는 데 필요한 기본적인 요소로 작

용한다. 또한 유역 내의 물은 각종 물질의 운반체로서 작용하며 서식처를 구성하는 요소로 작용하기도 한다. 물의 순환과 작용은 큰 강과 호수, 하구, 습지, 지류 등을 중심으로 주변지역의 자연환경에 영향을 미치며 동시에 사회경제환경에도 영향을 미친다. 따라서 자연환경과 사회경제환경의 연계성을 바탕으로 지속가능성을 고려할 때, 행정구역 단위가 아닌 유역 단위로 고려하는 것은 매우 의미 있는 시도라 할 수 있다(오정학 등, 2007; 이승호·박성제·김현정, 2008 등 참고). 자연환경과 사회경제환경을 포괄하는 환경의 중요성이 커짐에 따라 장기적으로는 유역을 기준으로 하는 환경관리가 지속가능발전에 크게 기여할 것이다.

본 연구는 유역을 기준으로 하는 포괄적 환경관리의 필요성을 바탕으로 최근 세종특별자치시의 출범과 더불어 행정 중심지로서 개발 압력이 높아지고 있는 금강유역의 지속가능성을 평가하고자 하였다. 특히 자연환경과 사회경제환경의 연계성을 바탕으로 지속가능성을 평가하기 위한 수단으로 시스템 접근법(systems approach)을 고려하고, 가치평가와 지속가능성 평가를 위한 시스템 접근법의 대표적 방법론이라 할 수 있는 에머지(emergy) 개념(Odum, 1996)을 활용하여 금강유역의 지속가능성을 평가하였다. 한강유역을 대상으로 유역 단위 에머지 평가를 수행한 선행연구(강대석, 2007)를 바탕으로 본 연구에서는 일부 방법론을 개선 및 보완하여 유역 단위 에머지 평가방법을 마련하고, 그에 따라 금강유역의 지속가능성을 평가하여 지속가능한 유역환경관리에 대한 정책적 시사점을 도출하였다.

II. 에머지 방법론과 금강유역의 개요

1. 에머지의 개요

현대사회에서 가치를 측정하는 주요 수단으로 화폐가 사용되면서 화폐단위로 측정하기 어려운 환경자원의 가치가 실제 가치에 비해 저평가되는 경향이 있었다. 자연환경에서 생산되어 가공된 재화의 화폐가치는 원료로

부터 가공되어 시장에서 판매되기까지 전 과정에 투입된 노동력의 가치를 모두 더한 값이다. 화폐는 원료나 생산물에 지불하는 것이 아니라 원료를 발굴 및 취득하고 가공하여 판매하는 과정에 들인 노동력의 가치로서 지불한다는 점에서 화폐가치는 생산물의 원료인 자연자원 그 자체가 담고 있는 가치를 충분히 반영하기 어렵다.

화폐가치를 기준으로 할 때 희소한 자원은 가치가 높게 매겨지고 풍부한 자원은 희소성이 낮아 가치가 낮게 매겨지는 경향을 보인다. 풍부한 자연환경이 높은 생태계 건전성(integrity)을 유지하고 양질의 생태계서비스를 제공함에도 불구하고, 풍부하고 값싼 자원으로 인식되어 무분별하게 남용되기도 한다. 아마존 열대우림의 파괴가 대표적인 예이다.

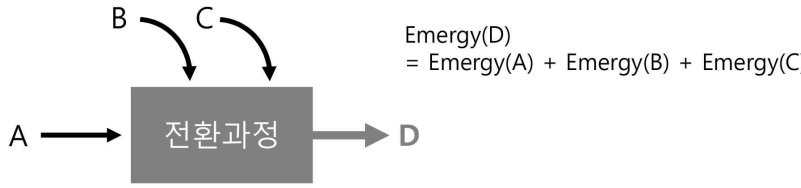
지속가능성을 고려할 때 환경의 가치를 적절하게 평가하는 일이 그 어느 때보다 중요해졌으나 화폐가치 기준에서는 환경이 가진 고유의 가치를 평가하는 데 분명히 한계가 있다. 생태계서비스를 제공받는 수요자 입장에서 화폐가치를 측정할 때는 환경 자체가 가진 가치를 충분히 반영하기 어려우며, 화폐중심의 가치평가를 보완할 수 있는 방법으로 공급자 입장의 가치평가 방법을 고려해 볼 수 있다. 대표적인 예로 에머지 방법론을 들 수 있는데, 에머지 방법론은 특정 재화나 용역을 생산하는 데 투입된 자원을 중심으로 그 가치를 평가한다.

“에머지(emergy)”의 어원은 에너지 기억(energy memory)인데, “재화나 용역을 생산하는 데 직간접적으로 이용된 한 종류의 이용 가능한 에너지”로 정의된다(Odum, 1996, p.7). 에머지는 해당 재화나 용역을 만드는 데 과거에 투입된 물질, 에너지, 정보 등 여러 자원을 공통의 에너지 단위로 환산한 양의 총합을 의미한다. 특정 재화나 용역을 만드는 과정에는 다양한 물질, 에너지, 정보 등이 투입되고 그 과정에서 에너지 전환이 발생하는데, 과거에 이용된 투입물의 총합을 산정하기 위해서는 서로 다른 투입요소 간 공통의 단위가 필요하다. 또한 서로 다른 투입 자원이 동일한 단위를 가지더라도 종류에 따라 일할 수 있는 능력이 서로 다르기 때문에 그러한 능력의 차이를 가중치로 반영해야 한다. 물질, 에너지, 정보 등 다

양한 투입 자원이 만들어지는 과정을 각각 추적하면 가장 근원적인 에너지이면서 동시에 생태계 에너지 흐름의 출발점이 태양에너지임을 알 수 있다. 에머지 방법론에서는 공통에너지를 태양에너지로 정의하고, 에너지 단위(joule)에 에머지를 의미하는 접두어 'em'을 붙여 solar emjoule, 즉 sej를 에머지의 단위로 활용한다.

에머지는 해당 재화나 용역을 생산하는 데 이용된 모든 에머지를 합하여 산정한다. 〈그림 1〉에서와 같이 생산물 D의 에머지는 D를 만드는 데 이용된 A, B, C의 에머지를 합하여 산정한다. A, B, C가 물질, 에너지, 정보 등 어떤 형태를 가지더라도 각각의 에머지가 sej라는 동일한 단위로 산정되기 때문에 합산할 수 있다.

〈그림 1〉 에너지 전환과정에서 생산물의 에머지 산정



특정 재화나 용역의 에머지를 산정할 때 직간접적으로 투입된 모든 자원의 에머지를 합하여 총 에머지를 산정할 수도 있지만, 이러한 방식으로 접근할 경우 에머지 산정과정이 실제로 매우 복잡하고 난해해진다. 이런 이유로 에머지 방법론에서는 해당 재화나 용역의 흐름(flow)을 알고, 단위 흐름을 만드는 데 필요한 에머지를 뜻하는 단위 에머지값(Unit Emergy Value, UEV) 정보를 알 경우 두 값을 곱하여 에머지를 산정한다. 에머지 활용을 위해 그동안 자연환경 및 사회경제환경의 많은 요소들에 대한 UEV 값이 연구되었다(이승준, 2016, pp.22-30).

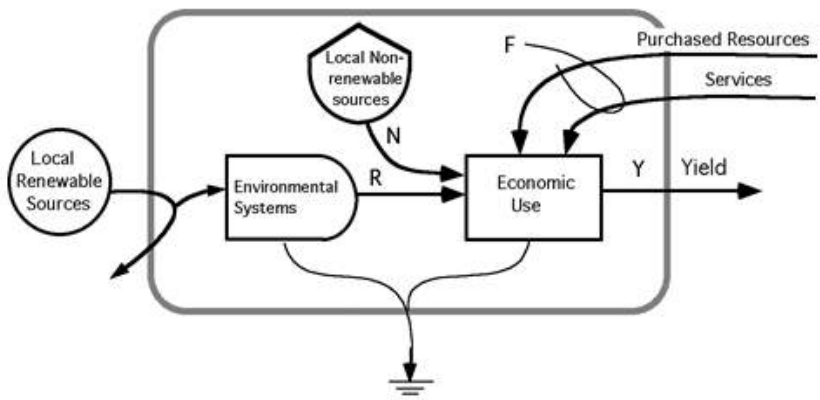
에머지 산정은 먼저 대상 시스템의 개념모형을 작성하여 생산물을 만드는 데 투입된 요소들을 파악하고, 이들이 어떤 관계를 갖는지에 대해 이해한 후, 투입 자원을 중심으로 에머지 표를 작성하여 흐름과 단위 에머지값

을 구해 최종적으로 에머지를 산정한다(Odum, 1996, pp.73-87). 그동안 국외에서 다양한 시스템에 대한 에머지 산정 연구가 이루어져왔으며, 국내에서도 에머지 방법론을 활용한 개발사업이나 특정 시스템에 대한 평가 연구가 지속되어왔다(강대석, 2017; 남정호·강대석, 2016; 이우성·정성관·유주한, 2006; 정화숙 등, 2013 등 참고).

2. 에머지 지속가능성 지수

에머지 표가 완성되면 주요 항목들의 에머지를 활용하여 에머지 지수를 산정할 수 있다. 현재 에머지 방법론에서는 Brown and Ulgiati(1997)가 제시한 지수들이 가장 보편적으로 활용되고 있다. 사회경제활동을 중심으로 하는 국가나 지역의 시스템을 〈그림 2〉와 같이 환경자원(Environmental systems), 시스템 내의 비재생자원(Local Non-renewable sources), 그리고 외부에서 구매한 자원(Purchased Resources & Services)을 활용하여 생산활동하는 모형으로 나타낼 수 있다. 국가나 지역 단위 사회는 자연에서 투입되는 재생자원(R)과 내부의 비재생자원(N), 그리고 외부에서 구매하여 유입되는 자원(F)을 활용하여 생산 활동을 한다.

〈그림 2〉 사회경제활동을 중심으로 하는 시스템의 에머지 투입과 산출 모형



자료: Brown and Ulgiati(1997)

〈표 1〉 에머지 지수체계

지수	계산 방법	의미
Y	R+N+F	에머지 생산(Yield)을 의미하며, 시스템의 총 에머지 생산은 재생자원 에머지(R), 내부 비재생자원 에머지(N), 외부로부터 구매한 에머지(F)의 합
%Renew	R/(R+N+F)	에머지 생산에 있어서 재생자원 에머지가 차지하는 비율
EYR	Y/F	에머지 생산율(Emergy Yield Ratio)을 의미하며, 시스템 차원에서 외부로부터 구매한 에머지(F) 대비 시스템의 총 에머지 생산(Y)의 비율
EIR	F/(R+N)	에머지 투자율(Emergy Investment Ratio)을 의미하며, 무료로 얻는 에머지 대비 외부로부터 구매한 에머지의 비율
ELR	(F+N)/R	환경부하 비율(Environmental Loading Ratio)을 의미하며, 재생자원 에머지(R) 대비 비재생자원 에머지(F+N)의 비율로 환경에 부담이 되는 정도를 측정
ESI	EYR/ELR	에머지 지속가능성 지수(Emergy Sustainability Index)를 의미하며, EYR이 높을수록 ELR이 낮을수록 높은 ESI를 나타냄

자료: Brown and Ulgiati(1997)

〈그림 2〉와 같은 에머지 투입과 산출 모형을 활용하여 환경, 경제, 지속가능성에 관한 에머지 지수를 산출할 수 있다(〈표 1〉 참조). 에머지 생산(Y)은 생산과정에 투입된 모든 에머지를 의미하므로 R, N, F의 합으로 정의된다. 재생자원 비율(%Renew)은 총 에머지 생산 중 재생자원의 에머지가 차지하는 비율을 의미하며, 해당 시스템이 생산과정에서 재생자원에 어느 정도 의존하고 있는지 보여 주는 척도가 된다. 에머지 생산율(EYR)은 들인 비용 대비 얻는 에머지 생산의 정도를 나타내며, 시스템 관점에서 해당 시스템이 지불한 비용은 외부에서 구매한 자원(F)에 대한 비용이므로 Y와 F의 비율로 산정한다. 시스템이 생산과정에 있어서 극단적으로 외부로부터 구매한 자원(F)에만 의존할 경우 EYR값은 1이 된다. 시스템이 대부분 N과 R에만 의존할 경우 EYR이 무한대에 가까워지므로 EYR이 가질 수 있는 최솟값은 1이며, F의 비율에 따라 1보다 큰 값을 갖게 된다. 에머지 지수체계에서는 R을 재생자원으로, F와 N을 비재생자원으로 가정하고, 화석연료를 포함한 비재생자원 활용이 늘어날수록 환경오염을 포함해 환경에 대한 부담이 커지는 것으로 가정한다. 이에 따라 환경부하 비율(ELR)은 (F+N)과 R의 비율로 산정한다. 에머지 지수체계에서는 경제적으로 효율이 높고 환경적으로 부담이 적을 경우 지속가능성이 높은 것으로

간주하여, 지속가능성 지수(ESI)는 EYR과 ELR의 비율로 나타낸다.

에머지 지수를 활용한 일부 지속가능성 연구는 행정구역 단위로 수행되어 왔다. 중국 범주강 삼각주 지역의 지속가능성을 연구한 Li et al.(2014)의 연구에서는 지리정보시스템을 활용하여 해당 지역 내의 9개 지방에 대한 에머지 지속가능성 지수를 도출하여 비교하였다. 각 지방은 전반적으로 개발에 따라 낮은 지속가능성을 보였지만, 하이난 지역의 경우 2.145의 에머지 지속가능성 지수를 보이며 유일하게 1이 넘는 지역으로 평가되었다. 이 연구는 자연환경과 사회경제환경을 통합적으로 고려해 지역 간 지속가능성을 비교했다는 데 의의가 있으나, 행정구역 단위로 에머지 지속가능성을 평가하여 본 연구에서 시도하는 유역단위 평가와는 차이점을 보인다. 유역단위 데이터를 얻기 위해서는 기존 행정구역 단위로 구성된 통계자료를 유역단위로 추정하는 방법이 필요하다.

에머지 접근은 아니지만 김대환·민동기(2017)는 금강하구역 생태계의 지속가능성을 평가하기 위한 단일 지수 추출 방안을 제시하였다. 지속가능성을 평가하는 다양한 지표체계를 지수로 전환함으로써 종합적인 접근방식을 제시하였다는 점에서 의미 있는 연구결과라 할 수 있다. 또한 문순홍·정규호(2000)는 지속가능성 관점에서 환경정책을 평가하기 위한 기본 모형을 제시하였는데, 해당 연구에서는 다양한 정책 영역에서 지속가능성의 기준이 되는 미래성, 형평성, 생태성을 고려하였다.

3. 금강유역의 개요 및 유역평가

총 면적 9,901.21km^{2}인 금강유역은 행정구역으로는 대전광역시 전체와 충청남도, 충청북도, 전라북도, 세종특별자치시, 경상북도, 경기도의 일부 지역을 포함한다(〈그림 3〉 참조). 금강유역을 이루는 기본 골격인 금강은 전라북도 장수군 신무산에서 발원하여 충청북도와 충청남도를 거쳐 서해로 흘러들어가며, 총 길이(유로연장)은 388km이다(WAMIS 2011년 데이터 기준). 또한 유역 내 지류를 포함한 하천 총 길이는 24,889.11km이다(WAMIS 2011년 데이터 기준). 금강유역은 면적비로 볼 때 충청남도와 충

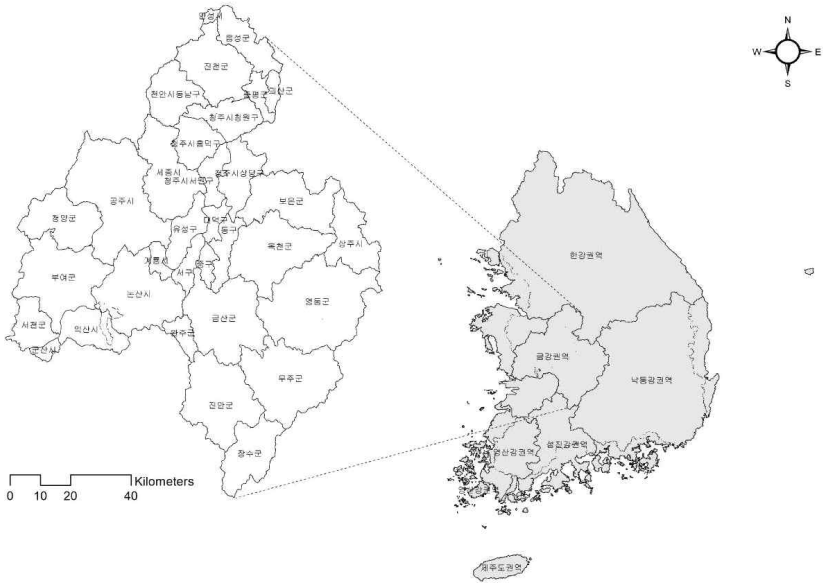
청북도가 각각 34.53%와 33.95%로 가장 많은 면적을 차지하고 있다. 2013년 기준 시·군·구별 지역내총생산(GRDP) 자료(KOSIS '지역계정')을 바탕으로, 금강유역 내에 속하는 시·군·구별 면적비를 활용하여 산정한 금강유역의 총 생산은 81조 8,000억 원에 달했다.

금강유역 전체의 지속가능성을 정량적으로 산정한 연구는 거의 없으나, 금강유역 내에서 가장 큰 면적을 차지하는 충청남도의 현황을 평가한 연구를 통해 금강유역의 현황을 간접적으로 살펴볼 수 있다. 생태발자국 모델을 활용하여 충청남도 환경용량을 평가한 주용준·사공희 등(2014)에 따르면, 충청남도에서 지속적인 개발을 바탕으로 2001년부터 2011년까지 생태발자국이 약 50% 증가하여 환경부하가 커지고 있음을 알 수 있다. 충청남도의 소비부문 생태발자국 값에서는 에너지가 약 86%로 상당 부분을 차지하였다. 시·군·구별로 금강유역에 일부 속하는 천안시는 충청남도 시·군·구 중 가장 큰 생태적자(1,707%)를 나타냈고, 계룡시(853%)는 충청남도 평균보다 높은 생태적자를 기록하였다. 생산토지에 대해 환경 이용률 100%를 적절한 기준으로 볼 때 이들 지역에서는 개발에 따른 환경부하가 높은 것으로 판단된다. 금강유역에 속한 지역들의 행정 중심지로서 역할이 점차 증대됨에 따라, 개발이 활발해지고 에너지를 포함한 자원이용이 늘어나 앞으로 이 지역의 환경부하는 더욱 커질 것으로 예상된다.

유역단위 평가 연구 중 Blancher et al.(2007)은 미국 사우스알라바마 지역의 두 유역에 관한 에머지 가치 평가를 수행하였는데, 지리정보를 이용하여 재생자원과 비재생자원의 에머지 가치를 산정하였다. 행정구역 중심의 통계와 달리 지리정보는 물의 흐름으로 구분되는 유역환경을 연구하기에 좋은 도구이지만, 자연환경에 대해 적용이 유리한 반면 사회경제적 재화나 용역의 이동에 대해서는 에머지 산정이 쉽지 않다는 단점을 지닌다. 해당 연구에서도 외부에서 구매한 에머지에 대해서는 다양한 재화와 용역을 포함하지 못하고 연료 사용만 고려하여 평가에 한계를 나타내었다. 국내 타 지역 혹은 외국과의 교역이 경제의 큰 부분을 차지하는 우리나라의 경우 외부에서 구매한 에머지를 유역단위에서 평가하는 것이 무엇

보다 유역단위 지속가능성 평가에서 중요하며, 기존 데이터를 최대한 활용하여 추정의 정확성을 높이는 방법의 개발이 요구된다.

〈그림 3〉 금강유역에 포함되는 시·군·구 행정구역 지도



주: WAMIS 2013년 기준 데이터를 활용하여 지도 작성
자료: WAMIS, [2017.9.15]

Ⅲ. 연구방법

1. 유역단위 에머지 평가

에너지시스템다이어그램(Odum and Odum, 2000, pp.20-38)으로 금강유역의 개념모형을 작성하여 투입되는 주요 요소를 파악하고, 에머지 평가를 위해 필요한 요소인 금강유역의 재생자원, 유역 내 비재생자원 이용, 수입과 수출, 이입과 이출 에머지를 다음의 방법을 통해 산정하였다. 데이터는 2013년을 기준으로 하였다.

1) 재생자원 에머지

재생자원(renewable resource)은 태양에너지, 바람에너지, 물에너지 등을 포함한다. 자연환경을 만드는 과정에서 이러한 재생자원들은 독립적으로 작용하지 않고 서로 연계성을 갖고 작용한다. 예를 들어, 바람은 태양에너지가 지표를 불균형적으로 가열함에 따라 발생하는 기압차에 의해 일어난다. 비가 내리거나 물이 증발하는 현상도 태양에너지와 바람의 영향을 받는다. 따라서 재생자원에 포함된 태양에너지, 바람에너지, 물에너지 등의 각 에머지를 모두 합산할 경우 중복계산(double counting) 오류가 발생하기 때문에, 재생자원의 총 에머지는 서로 독립적이지 않은 재생자원들 중에서는 가장 큰 값을 갖는 에머지를 선택한다.

태양에너지의 양으로는 기상청 기상연보의 일사량 데이터를 활용하였는데, 2013년 기준으로 금강유역 인근 관측소 중 일사량 데이터를 제공하는 지역은 대전, 청주, 전주였다. 따라서 유역에 속하는 각 시·군·구별 일사량은 가까운 지역의 일사량 데이터를 활용하여 추정하였다. 그리고 유역 전체의 면적과 일사량, 반사율을 활용하여 연간 태양에너지의 양을 구하였다.

바람에너지는 바람이 갖는 운동 에너지를 의미하며, 유역 전체 면적과 평균 풍속을 활용하여 산정하였다. 지면의 풍속을 산정할 때는 기상청 기상연보의 평균 풍속 자료를 활용하였는데, 유역 내 해당 시·군·구의 풍속 자료가 없을 경우 인접 지역의 풍속 데이터를 활용하여 추정하였다.

물에너지는 비로 인해 유입되는 물이 지형의 높이 차에 의해 흘러 작용하는 위치에너지(geopotential energy)와 해수의 염도에 대한 빗물의 상대적인 농도 차이에 따른 화학에너지(chemical energy)로 나뉜다. 강수량 데이터를 산정할 때는 기상청 기상연보의 지역별 연간 강수량 데이터를 활용하였고, 유역 내 시·군·구 지역 중 강수량 데이터가 없는 경우는 인접 지역의 강수량 데이터를 활용하여 추정하였다. 위치에너지를 계산하려면 유역의 높은 지역과 낮은 지역 간 평균적인 표고 차에 관한 정보가 필요한데, 유역의 평균표고와 출구점 표고의 차이를 평균적인 표고 차로 간주하

여 계산하였다.

2) 유역 내 비재생자원 이용 에머지

유역 내 비재생자원 이용(indigenous nonrenewable extraction)은 유역 내에서 생산되어 활용되는 비재생자원을 포함한다. 유역 내에서 생산되는 대표적인 비재생자원으로는 금속과 비금속을 포함한 광물이 있다. 광물자원은 생성에 소요되는 시간이 사회경제계의 변화 시간에 비해 훨씬 길다는 점에서 비재생자원으로 간주할 수 있다. 또한 토양은 지질학적 과정을 거쳐 생성되는데, 생성되는 시간에 비해 사회경제활동을 통해 유실되는 속도가 훨씬 빠르다는 점에서 표층토양(topsoil)의 유실도 비재생자원의 활용으로 간주할 수 있다. 표층토양은 유기물을 함유하고 있는데 경작 등의 토지이용을 통해 유실될 때 그 속에 포함된 유기물도 함께 유실된다. 따라서 논, 밭, 산림 등 토지이용 시 유실되는 토양 내의 유기물은 비재생자원에 포함되며, 각 토지 용도별로 면적과 토양 유실률, 유기물 함량에 관한 데이터를 활용하여 연간 유실되는 유기물의 양을 산정할 수 있다.

광물이나 토양과 같은 비재생자원 활용 외에 수자원, 어업생산물, 임업생산물 등은 적절한 수준에서 사용할 경우 재생자원으로 간주할 수 있다. 그러나 임계치를 넘는 수준으로 사용할 경우 임계치를 초과하는 부분은 비재생자원의 활용으로 간주해야 한다. 대표적으로 수자원의 경우 생태계 기능을 유지하기 위한 재생가능한 수자원 활용의 임계치를 최대 25% 정도로 간주하기도 한다(Acreman et al., 2008). 이 경우 재생가능한 수자원의 25%를 초과하는 이용에 관해서는 비재생자원의 이용으로 간주할 수 있다.

본 연구에서는 수자원과 관련하여, 강우를 통한 총 유입량 중 자연적으로 흐르는 수자원 양의 25%를 초과하는 물이용 부분에 대해서는 비재생자원의 활용으로 간주하여 산정하였다. 금속과 비금속 광물의 생산에 관한 데이터로는 각 광역시·도에서 제공하는 광물 생산량 데이터를 활용하였다. 광물 생산량 데이터는 시·군·구별로 주요 광물별 생산량에 관한 정

보를 제공한다. 각 시·군·구별로 광종별 생산량에 유역 내에 포함되는 면적비율을 곱하여 유역 내 해당 시·군·구의 광종별 생산량을 계산하였다.

3) 수입과 수출 에머지

국가 단위에서 발생하는 수출입 에머지는 표준국제무역분류(SITC: Standard International Trade Classification)에 따라 각 무역상품별 거래량에 해당 상품의 UEV를 곱하여 산정할 수 있다. 유역 단위 산정에서 유역 내에 포함되는 행정구역이 시·군·구 단위로 세분화되지만, 관세청에서 제공하는 시·군·구 행정 단위별 수입과 수출 자료는 총 화폐량으로만 제공하기 때문에 각 시·군·구 단위 무역 분류에 따른 거래량 데이터는 활용이 불가능하다. 따라서 유역 내에 속하는 시·군·구 지역의 수출입 금액에 에머지/화폐 비율을 곱하여 에머지를 산정한다. 또한 시·군·구의 일부만 유역에 포함될 경우, 현재 통계자료상 지역별 총 생산 정보가 시·군·구 단위로 제공되기 때문에 유역 내에 속하는 지역의 에머지를 경제생산 비율로 산정하는 데 어려움이 있다. 따라서 유역 내에 포함되는 지역의 수출입량은 해당 시·군·구의 면적비율로 산정하였다.

수출입 에머지를 산정하는 과정에서 활용하는 에머지/화폐 비율은 수입의 경우 국외에서 들여오는 에머지이므로 국가별로 구분되어 있다면 해당 국가의 에머지/화폐 비율을 사용할 수 있다. 그러나 현재 시·군·구 단위 수출입량에는 국가 구분이 없기 때문에 전 세계의 에머지/화폐 비율을 활용한다. 이 때 전 세계의 에머지는 지구에 연간 투입되는 에머지로 산정하고, 화폐량은 세계총생산(GWP)을 활용한다. 수출의 경우에는 유역 에머지와 총생산을 먼저 산정한 후 유역 에머지/화폐 비율을 구하여 수출 에머지를 산정하는 데 활용한다. 이때 수출은 유역의 총 에머지량 산정에 포함되지 않기 때문에 유역 에머지 산정 결과를 바탕으로 수출 에머지를 산정할 수 있다.

수출입 데이터와 관련하여 본 연구에서는 관세청에서 제공하는 시·군·구별 수출입 자료를 활용하였는데, 제공되는 시·군·구별 수출입 총액에

에머지/화폐 비율을 곱하여 에머지를 산정하였다.

4) 이입과 이출 에머지

국내 지역 간 재화와 용역의 이동에 따른 이입과 이출은 각 지역의 경제에서 큰 부분을 차지한다. 각 지역은 자연환경과 사회경제환경의 특징을 살려 지역적으로 비교우위에 있는 제품과 서비스를 생산하여 타 지역으로 판매하며, 타 지역으로부터 필요한 재화와 용역을 구매하여 경제생활을 영위한다. 국내의 타 지역과 교류에 의해 발생하는 이입과 이출을 에머지로 산정하기 위해서는 각 재화와 용역별 교역량과 UEV가 필요하다. 그러나 현실적으로 물량을 기준으로 하는 국내의 지역 간 이입과 이출에 관한 데이터가 없는 실정이며, 한국은행에서 발행하는 지역산업연관표를 통해 지역 간 이출입 정보를 추정할 수 있다. 지역산업연관표는 화폐 단위로 산정된 값만 제공하므로, 에머지 산정을 위해서는 화폐 단위로 표현된 지역 간 이출입 정보를 바탕으로 에머지/화폐 비율을 활용하여 에머지를 추정해야 한다.

해당 유역의 이출입에 관해서는 유역으로부터 타 지역으로 이출되는 부분의 경우 해당 유역의 에머지/화폐 비율을 활용할 수 있다. 그러나 타 지역으로부터 이입되는 부분에 대해서는 타 지역의 에머지/화폐 비율을 활용하거나, 관련 데이터가 없을 경우 한국 전체의 에머지/화폐 비율을 활용할 수 있다.

한국은행에서 발행하는 지역산업연관표의 지역 간 이출입 정보는 광역시·도 단위로 제공되므로 유역 단위로 에머지를 계산하기 위한 산정 방식을 마련할 필요가 있다. 지역산업연관표를 활용한 특정 광역시·도에 관한 이출입량 데이터에서 유역 내 서로 다른 광역시·도 간 이루어지는 교역은 유역 내 교역이므로, 중복산정을 피하기 위해 산정 과정에서 이를 제외해야 한다. 예를 들어, 〈그림 4〉과 같이 특정 유역(W)의 경계와 해당 유역에 일부 속하는 광역시·도 A, B, C, D가 있고, 유역에 속하지 않는 E, F, G 등 그 외의 광역시·도가 있다고 가정할 때, 광역시·도 A 중 유역(W) 내에

포함되는 A´의 타 지역으로부터 이입은 먼저 광역시·도 A의 타 지역으로부터 이입을 합한 값에서 유역 내의 B´, C´, D´로부터의 이입을 제외함으로써 광역시·도 A의 타 지역으로부터 이입을 구한다. 그리고 A´가 A에서 차지하는 경제규모(지역 총생산)의 비율로 이입($DI_{A'}$)을 유추하는 방식을 활용할 수 있다. 이러한 방식으로 유역의 국내 타 지역으로부터 총 이입량은 $DI_{A'}$, $DI_{B'}$, $DI_{C'}$, $DI_{D'}$를 합하는 방식으로 산정하였다.

$DI_{A'} = r(A)\cdot(\Sigma DM_{iA} - \Sigma DM_{iA}\cdot r(j))$

$DI_{A'}$: 유역 내 A´지역의 총 국내 이입

$r(A)$: A지역의 총 생산 중 유역 내에 속하는 지역의 총 생산 비율

DM_{iA}: 국내 이출입을 통한 i지역으로부터 A지역으로 이동량(화폐량)

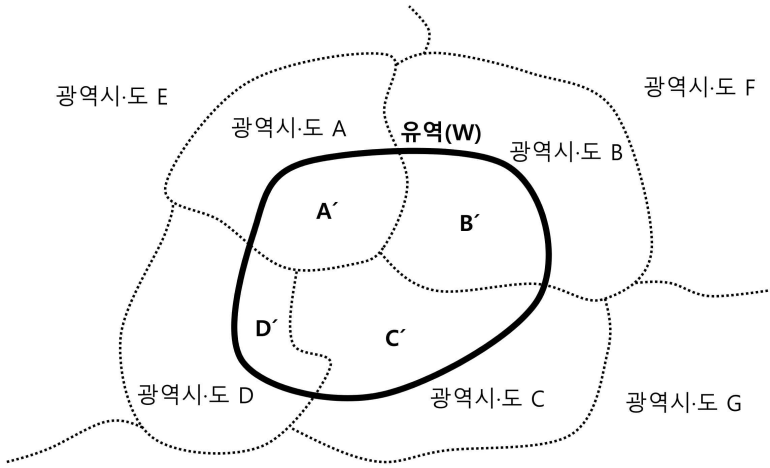
i: A를 제외한 각 광역시·도

j: 유역 내에 속하는 지역 중 A를 제외한 광역시·도(B, C, D)

$DI_W = DI_{A'} + DI_{B'} + DI_{C'} + DI_{D'}$

2017년 현재 지역산업연관표는 2013년 기준 자료를 가장 최신 데이터로 제공하고 있다. 따라서 본 연구에서는 재생자원, 비재생자원, 수출입 및 이출입 데이터의 일치되는 시점으로 2013년을 기준으로 삼고, 2013년 금강유역의 에머지를 산정하였다. 지역산업연관표를 이용하여 이출입을 산정하는 방식은 본 연구에서 개발한 것으로 산업별 취업자와 생산을 기준으로 이출입을 산정한 강대석(2007)의 방식과 차별화 된다.

〈그림 4〉 유역과 광역시·도 경계의 모형



2. 유역의 지속가능성 평가

금강유역의 지속가능성은 평가된 에머지 표를 바탕으로 Brown and Ulgiati(1997)가 제시한 에머지 생산율(EYR), 환경 부하 비율(ELR), 에머지 지속가능성 지수(ESI) 등을 산정하였다. 도출된 2013년 기준 금강유역의 에머지 지수들은 기존 국내 전체와 한강유역의 에머지를 평가한 Kang (2016) 및 강대석(2007)의 결과와 비교·분석하여 정책적 시사점을 도출하였다. 강대석(2007)의 한강유역 분석 결과는 본 연구에서 수행한 금강유역 분석결과와 시간적으로 8년의 차이가 있으므로 두 값을 비교하기에는 무리가 있으며, 시간에 따른 변화를 고려하여 Kang(2016)의 한국 전체 에머지 지수의 추이와 상대적으로 비교하는 것이 바람직하다.

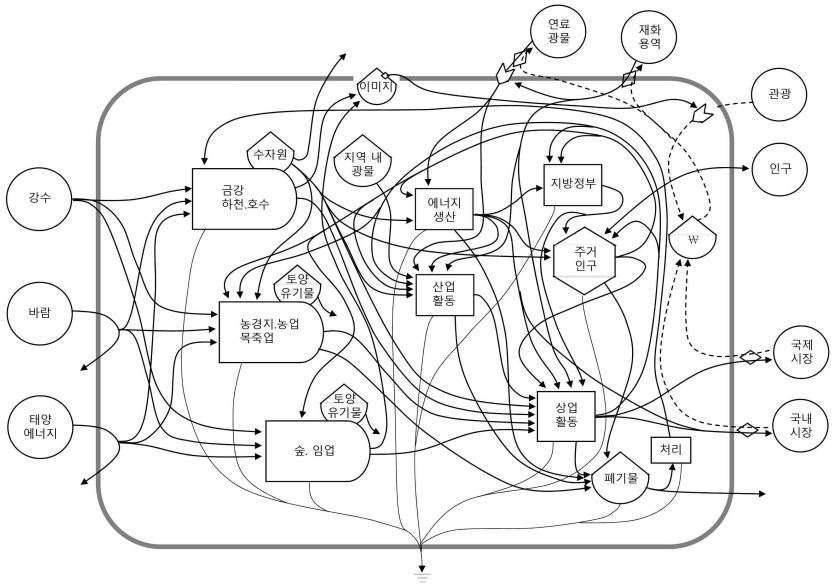
Ⅳ. 금강유역의 에머지와 지속가능성 평가 결과

1. 금강유역의 개념모형

에머지 평가를 위한 단계로 먼저 금강유역의 개념모형을 작성하였다

(〈그림 5〉 참조).

〈그림 5〉 에너지시스템다이어그램을 활용한 금강유역의 개념모형



한강, 낙동강, 금강 등 주요 권역의 자연환경과 사회경제환경의 경우 세부적인 특성은 다를지라도 유역 시스템을 이루는 기본 요소들은 대부분 유사하다. 태양에너지, 바람, 강수와 같은 기본적인 재생가능 자원을 바탕으로 금강의 하천과 호수 생태계와 수자원이 유지되고, 농업, 목축업, 산림 생태계, 임업이 유지된다. 농경지나 산림에서는 농업이나 임업활동을 통해 토양이 유실되고 여기에 포함된 유기물도 함께 유실된다. 이러한 자연환경에서 얻는 생산물은 산업활동이나 상업활동을 통해 가공되어 유역 내의 주거나 행정, 산업을 유지하기 위한 재화나 용역으로 공급된다. 한편 산업활동이나 상업활동에 따른 생산물은 국내 타 지역이나 국외로 수출되고, 이는 화폐량의 증가로 곧 유역의 생산이 증가함을 의미한다. 유역은 지역 내의 광물을 이용하거나 외부에서 구매한 연료나 광물을 활용하여 에너지를 생산하고 산업활동과 상업활동을 활성화한다. 이러한 활동을 위

해 필요한 것은 인력이며, 지방정부는 경제활동이 원만하게 이루어질 수 있도록 인구나 주거 등과 관련된 다양한 문제를 해결한다. 유역 내의 자원만으로는 경제활동을 활성화하기에 부족하므로, 생산과 외부 판매를 통해 얻은 경제력을 활용하여 외부로부터 재화와 용역, 연료, 광물 등을 구매하고 이를 생산과정에 활용한다. 강을 중심으로 하는 유역은 다양한 자연환경을 창출하는데, 이는 곧 그 지역 특유의 이미지로 자리 잡아 관광 수단으로 활용되기도 한다. 에머지는 투입물을 기준으로 산정하기 때문에 유역의 사회경제활동을 이루기 위해 투입된 재생가능 자원, 내부 비재생자원, 외부로부터 구매한 자원을 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다. 유역 경계 내부에서 일어나는 자연환경과 사회경제활동의 다양한 요소들 간 상호작용과 변화는 투입된 에머지를 기반으로 이루어진다.

2. 금강유역의 에머지 평가

에머지 평가 절차에 따라 각 지역 단위 데이터를 활용하여 항목별로 에머지를 산정하였다(〈표 2〉 참조). 각 항목의 에머지 산정 방법이나 과정은 표 아래 각주에 표시하였다. 평가 결과 2013년 기준 금강유역에 투입된 총 연간 에머지는 3.82E+23sej로 나타났다. 금강유역에 투입된 총 연간 에머지는 재생자원, 유역 내 비재생자원 이용, 국내외 교역에 따른 유입의 에머지를 합하여 산정하였다.

재생자원의 에머지 중 강수에너지는 태양에너지와 바람에너지의 작용으로부터 발생하기 때문에, 중복산정을 피하기 위해 재생자원의 총 연간 에머지는 강수의 위치에너지와 화학에너지의 합으로 산정하였으며 2.48E+21sej로 나타났다. 이는 금강유역에 투입된 총 연간 에머지의 0.65%를 차지하는 값이다. 재생자원 에머지에서 강수의 위치에너지와 화학에너지의 에머지 기여 비율이 각각 27%와 73%로 나타났는데, 유역 전체의 완만한 경사로 상대적으로 위치에너지가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

유역 내 비재생자원은 수자원과 표토유실, 광물 및 금속에 대해 산정하였는데, 총 연간 에머지가 8.58E+21sej로 나타났다. 이는 금강유역에 투입

된 총 연간 에머지의 2.25%가 되는 값으로, 재생자원에 비해 상대적으로 흐름의 양은 적더라도 높은 비재생자원의 UEV가 기여하는 바가 크다고 볼 수 있다.

유역 외부와 교류하는 유입 및 유출에 있어서 금강유역의 연간 에머지 흐름은 국제적으로는 수출이 수입의 3.6배를 차지하였는데, 흐름에 있어서는 수출과 수입의 비율이 1.7배였으나 국제 수입의 에머지/화폐 비율(UEV)보다 국제 수출, 즉 금강유역의 에머지/화폐 비율이 2배 이상 높게 산정되어 수출이 수입보다 에머지에 있어서 3.6배 높게 나타났다. 국내 이입의 에머지는 국내 이출 에머지의 0.98배로 유사하게 나타났다. 또한, 국제교역에서 나타난 에머지 흐름보다 국내교역에서 나타난 에머지 흐름이 더 높게 나타났는데, 유입에 관한 연간 에머지 흐름은 국내 이입이 국제 수입의 14.9배였고 유출에 있어서는 국내 이출이 국제 수출의 4.2배로 나타났다. 최종적으로 국내외 교역에 따른 에머지 유입량은 금강유역에 투입된 총 연간 에머지의 97.1%를 차지하여, 금강유역에서 97% 이상의 에머지를 국내외 타지역과의 교류에 따른 유입에 의존하고 있음이 드러났다.

〈표 2〉 금강유역의 에머지 평가 결과

번호	항목	흐름	단위 (/yr)	UEV[a] (sej/Unit)	Emergy (sej/yr)	Emvalue[b] (Em₩/yr)
재생자원						
1	태양에너지	3.94E+19	J	1	3.94E+19	8.44E+09
2	바람에너지	6.85E+15	J	2,450	1.68E+19	3.60E+09
3	강수(위치에너지)	1.46E+16	J	46,600	6.80E+20	1.46E+11
4	강수(화학에너지)	5.89E+16	J	30,500	1.80E+21	3.85E+11
				소계	**2.48E+21**	5.31E+11
유역 내 비재생자원 이용						
5	물	4.91E+15	J	81,400	4.00E+20	8.57E+10
6	표토유실	3.77E+15	J	12,300	4.64E+19	9.94E+09
7	광물	-		-	8.14E+21	1.74E+12
8	금속	-		-	1.53E+16	3.28E+06
				소계	**8.58E+21**	1.84E+12
유입						
9	국제 수입	1.02E+10	$	2.29E+12	2.33E+22	4.99E+12
10	국내 이입	8.53E+13	₩	4.07E+09	3.47E+23	7.44E+13
				소계	**3.71E+23**	7.94E+13
유출						
11	국제 수출	1.71E+10	$	4.92E+12	8.40E+22	1.80E+13
12	국내 이출	7.61E+13	₩	4.67E+09	3.55E+23	7.61E+13
				소계	**4.39E+23**	9.41E+13

주: a) UEV는 전 지구적 에머지 15.83E+24sej/yr를 기준값으로 산정

b) Emvalue는 에머지를 화폐단위로 전환한 값으로, 에머지에 해당 시스템의 화폐/에머지 비율을 곱하여 산정

1) 태양에너지(Area: WAMIS 2013년 자료 기준; Insolation: 기상청, 2013)
= Area × Insolation × (1−albedo)
= (9,901,210,000m^2) × (4,972,110,348J/m^2/yr) × (1−0.2); 육지의 albedo를 0.2로 가정
= 3.94E+19J/yr

2) 바람에너지(Area: WAMIS 2013년 자료 기준; Air density & drag coefficient: NEAD; wind speed: 기상청, 2013)
= Area × Air density × drag coefficient × (wind speed)^3
= (9,901,210,000m^2) × (1.23kg/m^3) × 0.001 × (1.568/0.6)^3; 지면 바람속도를 상층의 60%로 가정
= 6.85E+15J/yr
UEV(wind) = 2,450sej/J(Odum et al., 2000)

3) 강수(위치에너지)(Area & Elevation gradient: WAMIS 2013년 자료 기준; Annual rainfall: 기상청, 2013; Runoff rate: 국토교통부, 2013, p.12)
= Area × Annual rainfall × Runoff rate × Elevation gradient × (1,000kg/m^3) × (9.8m/s^2)
= (9,901,210,000m^2) × (1.203m/yr) × (0.58) × (223.9m−8.35m) × (1,000kg/m^3) × (9.8m/s^2)
= 1.46E+16J/yr
UEV(water, rain geopotential) = 46,600sej/J(Odum et al., 2000)

4) 강수(화학에너지)(Area: WAMIS 2013년 자료 기준; Annual rainfall: 기상청, 2013)
= Area×Annual rainfall×(1,000kg/m^3)×(4,940J/kg)
= 5.89E+16J/yr
UEV(water, rain chemical) = 30,500sej/J(Odum et al., 2000)
5) 물
(1) Total renewable water(Area: WAMIS 2013년 자료 기준; Annual rainfall: 기상청, 2013; Runoff rate: 국토교통부, 2013, p.12)
= (Area×Annual rainfall)×(Runoff rate)
= (9,901,210,000m^2)×(1.203m/yr)×(0.58)
= 6.91E+09m^3/yr
(2) Total water use(WAMIS 2013년 자료 기준)
= 2.72E+09m^3/yr
(3) Nonrenewable use
= (2.72E+09−0.25×6.91E+09)m^3/yr×(1,000kg/m^3)×(4,940J/kg)
= 4.91E+15J/yr
UEV(water extraction, 지표수 기준) = 81,400sej/J(Odum et al., 2000)
6) 표토유실(Area: WAMIS 2013년 자료 기준; erosion rate: 농업과학기술원, 2005; OM%: 국립농업과학원, 2009)
(1) Paddy field OM loss
= (paddy field area)×(paddy field erosion rate)×(paddy field OM%)
= (1,321,740,000m^2)×(1MT/ha/yr)×(0.0243)
= 3,212MT/yr
(2) Dry field OM loss
= (dry field area)×(dry field erosion rate)×(dry field OM%)
= (814,150,000m^2)×(37.7MT/ha/yr)×(0.0217)
= 66,605MT/yr
(3) Forest OM loss
= (forest area)×(forest erosion rate)×(forest OM%)
= (6,169,990,000m^2)×(3.5MT/ha/yr)×(0.0449)
= 96,961MT/yr
Total soil OM loss
= (3,212MT/yr+66,605MT/yr+96,961MT/yr)×(1,000,000g/MT)×(5.4kcal/g)×(4,186J/kcal)
= 3.77E+15J/yr
UEV(topsoil loss) = 12,300sej/J(Brown and Ulgiati, 2011)
7 & 8) 광물 및 금속
광종별 광물생산량 자료(광업, 제조업 및 에너지)
- 충청남도(2015)
- 충북통계정보시스템
- 전라북도(2015)
- 경상북도통계포털
- 경기통계

항목	생산량 (g/yr)	UEV (sej/g)	emergy (sej/yr)
비금속 광물			
고령토	5.50E+10	2.90E+09	1.59E+20
규석	8.77E+10	1.68E+09	1.47E+20
석회석	8.00E+11	9.50E+09	7.60E+21
장석	1.37E+11	1.68E+09	2.30E+20
		Total	8.14E+21
금속			
금	2,846	5.04E+11	1.43E+15
은	30,985	4.48E+11	1.39E+16
		Total	1.53E+16

UEV(minerals & metals): Cohen et al.(2007)

9 & 11) 수입과 수출(국제) (관세청, 2013)
시·군·구별 수출입 금액을 바탕으로 각 시·군·구별 유역 면적비로 환산
유역의 총 수입금액 = $10,162,049,762/yr
유역의 총 수출금액 = $17,050,148,865/yr
10 & 12) 이입과 이출(국내) (한국은행, 2015)
유역 외의 지역과 유역 내의 지역 간 이출입 산정

이입(단위: 조원/yr)

행정구역	수도권	충청권	호남권	대경권	동남권	강원	제주	유역이입
대전광역시	17.0	8.4	3.0	2.5	4.3	0.7	0.3	33.54
충청북도	27.2	9.3	5.2	4.5	6.0	1.1	0.2	24.33
충청남도	59.3	10.8	9.8	11.6	15.0	1.4	0.3	20.93
전라북도	20.1	7.4	7.2	4.1	6.7	0.6	0.7	5.89
경상북도	41.9	19.3	17.6	11.0	21.5	1.5	0.3	0.45
경기도	123.5	50.2	27.3	29.3	41.2	5.0	2.0	0.20
							총합	85.34

이출(단위: 조원/yr)

행정구역	수도권	충청권	호남권	대경권	동남권	강원	제주	유역이출
대전광역시	9.9	6.7	2.2	2.4	3.1	0.6	0.1	22.88
충청북도	24.4	8.5	3.8	6.5	6.0	1.1	0.4	23.14
충청남도	56.6	13.3	16.1	16.5	22.0	2.5	1.0	24.64
전라북도	16.5	6.7	5.1	3.8	5.6	0.7	0.6	4.87
경상북도	41.8	15.0	9.1	7.7	27.5	2.1	0.6	0.42
경기도	92.4	54.6	25.0	28.4	36.2	6.8	1.9	0.17
							총합	76.14

자료: 각 광역시·도 및 시·군·구의 GRDP: KOSIS '지역계정'을 바탕으로 산정

3. 금강유역의 지속가능성 평가

금강유역의 에머지 평가 결과를 활용하여 환경, 경제 그리고 지속가능성 등에 관한 에머지 지수를 산정하였다(〈표 3〉 참조).

〈표 3〉 금강유역의 에머지 지수

번호	지수	의미	지수값	단위
1	R	Renewable flow (외부에서 유입된 재생자원 에머지)	2.48E+21	sej/yr
2	N	Indigenous nonrenewable extraction (내부 비재생자원 활용)	8.58E+21	sej/yr
3	F	Purchased resources (외부로부터 구매한 자원)	3.71E+23	sej/yr
4	Y	Emergy yield (에머지 생산) = R+N+F	3.82E+23	sej/yr
5	EYR	Emergy Yield Ratio (에머지 생산율) = Y/F	1.03	-
6	%Renew	Percent renewable (에머지 생산 중 재생자원 비율) = R/Y	0.0065	-
7	ELR	Environmental Loading Ratio (환경부하 비율) = (N+F)/R	153.18	-
8	EIR	Emergy Investment Ratio (에머지 투자비율) = F/(N+R)	33.52	-
9	ESI	Emergy Sustainability Index (에머지 지속가능성 지수) = EYR/ELR	0.0067	-

금강유역의 에머지 생산을 의미하는 Y는 3.82E+23sej/yr 였고, 외부로부터 구매한 자원 F는 3.71E+23sej/yr로 최종적으로 에머지 생산율(EYR) 값은 1.03을 나타냈다. EYR값이 1에 가까울수록 R, N, F 중 F의 비율이 크다고 볼 수 있으며, 외부로부터 구매한 자원인 F만 에머지 생산에 활용할 경우 EYR값은 1이 된다.

%Renew값은 0.0065로 나타났다. 값이 클수록 재생자원에 의존하는 경제로 볼 수 있고, 값이 작을수록 비재생자원이나 구매한 자원을 활용한다는 의미로 볼 수 있다. 재생자원만 활용할 경우 값은 1이 되고 비재생자원이나 외부로부터 구매한 자원의 이용 비율이 늘어날수록 값은 작아진다.

금강유역의 ELR값은 153.18로 나타나, 재생자원에 비해 상대적으로 비재생자원의 활용 비율이 높아 환경부하가 높은 것으로 나타났다.

EIR은 에머지 투자율로 외부로부터 구매한 자원(F)의 비중을 나타내는데, 금강유역의 EIR값은 33.52로 나타났다. 이는 시스템 차원에서 비용이 들지 않는 자원의 에머지에 비해 외부로부터 구매하는 자원의 에머지가 33.52배라는 의미이다.

2013년 금강유역의 ESI(에머지 지속가능성 지수)는 낮은 에머지 생산율(EYR)과 높은 환경부하 비율(ELR)로 인해 값이 0.0067로 나타났다.

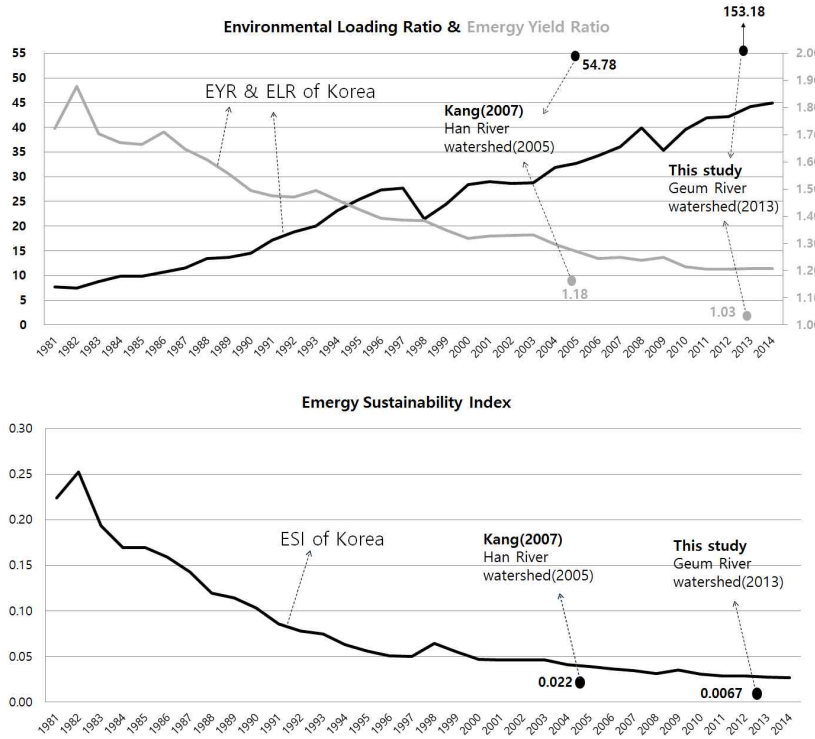
금강유역의 에머지 지수 중 지속가능성과 관련된 핵심지수인 EYR, ELR, ESI를 기존 연구결과와 비교해 보았다(〈그림 6〉 참조). 비교자료로는 2005년 기준 한강유역의 지속가능성을 평가한 강대석(2007)의 연구결과와 1981년부터 2014년까지 매년 한국의 에머지를 평가한 Kang(2016)의 연구결과를 활용하였다.

먼저 한국의 국가 에머지 지수의 경우 1981년 이후 일부 큰 경제적 변동(예: 1997년 IMF 위기 등)을 제외하고 ELR은 지속적으로 증가하는 추세를 보였으며, EYR은 반대로 지속적으로 감소하는 추세를 보였다. 즉, 경제개발에 따라 소득수준은 높아졌으나 환경부하 비율은 증가하였고 에머지 생산율은 감소하였다. 그 결과 에머지 지속가능성 지수(ESI)가 지속적으로 감소하였다.

강대석(2007)의 연구결과에서 2005년 기준 한강유역의 ELR은 한국 전체의 ELR인 32.73보다 높은 54.78로 나타났고, EYR은 한국 전체의 EYR인 1.27보다 낮은 1.18로 나타났다. 2005년 한국의 ESI는 0.04인데 비해 강대석(2007)의 연구에서 도출한 한강유역의 2005년 기준 ESI는 0.022로 더 낮게 나타났다.

본 연구에서 산정한 2013년 기준 금강유역의 에머지를 바탕으로 한 ELR은 한국 전체의 ELR인 44.19보다 높은 153.18로 나타났고, EYR은 한국 전체의 EYR인 1.21보다 낮은 1.03으로 나타났다. 결과적으로 2013년 기준 금강유역의 ESI는 한국 전체의 ESI인 0.03보다 낮은 0.0067을 나타냈다.

〈그림 6〉 기존 연구결과와 금강유역 에머지 지수의 비교



주: 그래프 선은 한국 전체의 에머지를 바탕으로 하는 각 에머지 지수를 나타내고, 2005년 점으로 나타난 데이터는 강대석(2007)의 2005년 기준 한강유역 에머지 지수이며, 2013년 점으로 나타난 데이터는 본 연구에서 도출한 금강유역 에머지 지수임

자료: 강대석(2007); Kang(2016)

4. 금강유역 지속가능성 평가 결과의 정책적 시사점

금강유역의 에머지 지수를 한국 전체의 에머지 지수와 비교한 결과(〈그림 6〉 참조), 2013년 기준 금강유역의 환경부하 비율은 한국 전체의 환경부하 비율에 비해 3배 이상 높은 수치를 나타냈고, 금강유역의 에머지 생산율은 한국 전체의 에머지 생산율보다 더 낮은 수치를 나타냈다. 결과적으로 금강유역의 에머지 지속가능성 지수도 한국 전체의 값보다 낮게 나타났다.

금강유역의 에머지 지수가 한국 전체의 에머지 지수에 비해 환경부하

비율이 높고 에머지 생산율과 에머지 지속가능성 지수가 낮게 나타나는 주요 원인 중 하나로 조석(tide)을 들 수 있다. 금강유역에 대한 에머지 평가에서는 조석이 포함되지 않았지만, 한국 전체의 에머지를 산정하는 데 있어서는 물 에너지와 조석이 재생가능 자원에 포함되며 독립적인 요소로 산정된다. 2013년 기준 한국의 에머지 평가에서는 재생가능 자원의 총 에머지 중 조석의 비중이 86.2%를 차지하였다(Kang, 2016). 삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라에서는 이와 같이 재생가능 자원 중 조석의 역할이 매우 큰 편이다. 여러 에머지 요소들이 자연 및 사회경제적 상황을 기준으로 산정되므로 특정 요소를 제외하여 가정하기에는 무리가 있지만, 만약 2013년 한국의 에머지 평가 결과(Kang, 2016)에서 조석을 제외할 경우 환경부하 비율은 321.29로 나타났고 에머지 생산율 지수는 1.18, 에머지 지속가능성 지수는 0.0037로 나타났다. 한국의 에머지 평가에서 조석을 제외한 이 값을 기준으로 할 경우 금강유역의 환경부하 비율은 한국 전체의 환경부하 비율보다 낮고, 금강유역의 에머지 생산율 지수는 한국 전체의 지수보다 낮으며, 금강유역의 에머지 지속가능성 지수는 한국 전체보다 높게 나타난다.

금강유역과 같이 내륙에 포함된 유역의 경우 우리나라 전체의 에머지와 달리 재생가능 자원에서 물에너지가 차지하는 비중이 대부분이기 때문에, 물에너지가 차지하는 에머지 비중이 어느 정도인지에 따라 재생자원 유입의 에머지가 달라지고, 에머지 생산율이나 환경부하 비율, 에머지 지속가능성 지수가 달라진다. 물에너지의 양을 결정하는 주요 변수는 강수량인데, 재난으로 이어지지 않는 범위에서 강수량이 증가하면 재생가능 자원의 에머지 유입량이 커진다. 실제로 활발한 강수활동은 유역 내 물질과 에너지의 이동이 더욱 활발해지는 것을 의미한다. 그리고 물의 이용과 증발산에 따른 생산량 증가도 뒤따라 전반적으로 자연환경의 생산성 향상을 유도하며, 이러한 1차 생산의 증가는 사회경제적 생산의 증가로 이어진다.

우리나라는 자원이 풍부하지 못한 국가로 많은 자원을 수입에 의존하고

있다. 따라서 에머지 결과에서도 보듯이 외부로부터 구매한 자원의 비율이 매우 높은 편이다. 한국 전체의 에머지를 산정할 경우 재생가능 자원 중 조석이 차지하는 비율이 높으므로, 환경부하 비율을 낮추고 에머지 지속가능성 지수를 높이는 데 해양 부문이 큰 역할을 하는 셈이다. 해양 부문은 환경부하에 있어서 완충역할을 하며 전반적인 환경 부담을 줄여 주는 역할을 한다. 유역의 경우 주로 내륙의 자원이나 외부로부터 수입한 자원을 활용하여 사회경제활동을 영위한다는 점에서 환경부하 비율이 높고 에머지 지속가능성 지수가 낮게 나타나는 경향이 있다.

우리나라 환경 특성상 외부로부터 수입한 자원에 대한 의존도가 높기 때문에, 단순히 에머지 지속가능성 지수만을 바탕으로 유역이 지속가능한가의 문제에 대한 답을 확고하게 얻기는 어렵다. 다만 국외로부터 수입되는 자원 혹은 국내 타 지역으로부터 유역으로 이입되는 자원의 비율이 높을수록 지속가능성이 낮게 나타나는 점이 시사하는 바는 분명히 있다. 자원안보(resource security) 측면에서 자원 수입에 의존하는 것이 과연 지속가능성을 보장할 것인지 고민해 볼 필요가 있다. 국내 사정도 마찬가지이지만 전 세계적으로도 예상치 못한 재난이 빈번히 발생하고 국제정세도 빠르게 변화하고 있다. 국제정세의 변화로 어느 날 갑자기 현재 수입되는 자원 공급이 하루아침에 중단될 가능성도 배제할 수 없으며, 국내의 물자 이동도 물가의 급상승이나 재난의 발생으로 중단될 가능성을 배제할 수 없다. 이러한 점을 상기할 때 현재와 같이 국가나 유역으로 투입되는 에머지에서 국외로부터 수입 혹은 국내 타 지역으로부터 이입되는 양이 상당 부분을 차지하는 현실을 개선할 필요가 있다. 지역에서 부족한 자원을 외부로부터 구매하고 지역에서 생산되는 재화나 용역을 외부로 수출하는 것은 현대사회에서 어느 정도 거스를 수 없는 현상이다. 그러나 지역의 환경용량을 초과하는 자원을 외부로부터 들여올 경우 발생하는 환경오염 문제나 자원의 외부 의존에 따른 자원안보 약화는 지속가능성을 보장할 수 없게 하는 요인이 될 것이다. 〈표 2〉에서 나타난 외부로부터의 유입량을 줄이고 내부 비재생자원을 효율적으로 활용하는 방안을 고민해 볼 필요가

있다.

본 연구에서는 데이터의 한계로 2013년 기준으로 금강유역의 지속가능성을 평가하였다. 2012년 7월 1일 금강유역에 속하는 세종특별자치시가 출범한 이후 6년이 넘게 지난 현재 여전히 개발은 진행 중이다. 2013년은 세종특별자치시가 출범한 초창기로 금강유역 일대에 어느 정도 변화가 일어났는지 알기 어려운 시기이다. 따라서 본 연구에서 제시한 금강유역의 에머지 지속가능성은 현재의 상황을 충분히 반영하고 있다고 말하기는 어렵다. 그럼에도 불구하고 향후 유역의 지속가능성 평가를 위한 방향과 시사점을 제시한다는 점에서 본 연구의 의의를 찾을 수 있을 것이다. 또한 세종특별자치시의 초기 상황을 바탕으로 향후 지속적인 평가를 통해 변화하는 상황을 모니터링 할 수 있는 발판을 마련하였다고 평가할 수 있다.

기존의 국가 단위 혹은 행정구역 단위 에머지 평가와 달리 유역의 에머지 평가는 현재의 데이터 체계를 고려할 때 다소 불확실성을 포함할 수밖에 없다. 현재 국가 혹은 행정구역으로 구분된 지역 중심으로 대부분의 통계 데이터를 수집하고 관리한다. 자연환경 중 기상 관련 데이터도 행정구역으로 구분된 지역별 관측소를 기준으로 제공하며, 광물이나 에너지 등 지역의 비재생자원 생산이나 수출입 및 이출입 통계도 행정구역 단위의 데이터로 관리한다. 따라서 행정구역 단위의 데이터를 유역 단위 데이터로 전환하는 과정이 다소 까다로우며, 그 과정에서 일부 값들을 추정하기 때문에 결과의 불확실성이 발생한다. 특히 유역 경계와 행정구역 경계가 일치하지 않기 때문에 유역 내에 포함되는 행정구역의 자연환경 및 사회경제환경 데이터를 얻기 위해서는 면적비, 인구비, 혹은 경제생산량비 등을 활용하게 된다. 면적비를 사용하는 것에는 자연환경과 사회경제환경의 자산이 땅에 기초한다는 철학이 담겨 있고, 인구비를 사용하는 것에는 인간의 노동력을 중심으로 추정하는 개념이 녹아 있다. 경제생산량비는 경제활동이 지역의 총 경제생산량에 비례한다는 가정을 포함한다. 본 연구에서는 사회경제활동에 연관해서는 주로 경제생산량비를 활용하였고, 자연환경과 연관해서는 주로 면적비를 활용하였다.

데이터 가공 과정에서 어느 정도 불확실성이 발생함에도 불구하고 유역 단위 지속가능성 평가는 나름대로 의의가 있다. 우리나라는 외국과의 수출입 혹은 지역 간 이출입이 경제의 큰 부분을 차지하기 때문에 행정구역 단위의 관리가 가능하기도 하지만, 지속가능성 측면에서 환경, 경제, 사회가 균형 있게 발전하기 위해서는 재생가능한 자원과 에너지를 활용하여 사회경제활동을 영위할 필요가 있다. 국가 차원에서는 외부에 변화가 있더라도 국가 내에서 지속가능한 사회경제활동을 유지할 수 있도록 내부 자원의 개발 및 활용과 순환이 필요하다. 그리고 지역 차원에서는 외부에 변화가 있더라도 지역 내에서 지속가능한 사회경제활동을 유지할 수 있는 내부 자원의 개발 및 활용과 순환이 필요하다. 즉, 지속가능한 사회를 위해서는 자연환경과 사회경제환경의 연계성을 고려하여 자연환경을 적절히 활용함으로써 내부 자원에 대한 의존도를 높일 필요가 있다. 자연환경으로부터 얻는 자원의 양과 질은 지리적, 환경적 조건에 매우 큰 영향을 받는다. 특히 유역은 수자원을 바탕으로 물질과 에너지가 이동하는 단위이므로 지속가능한 환경관리에 있어서 유역 단위 관리의 중요성이 높아질 것이다. 미래사회에서 유역 단위 환경관리가 중요해질수록 행정구역도 유역 단위로 재편할 것을 고려해 볼 필요가 있다.

Ⅴ. 결론

지속가능성이 환경, 경제, 사회를 포괄하는 개념인 만큼 본 연구에서는 유역환경의 지속가능성 평가에 있어서 환경과 경제, 사회의 연계성을 고려하는 시스템적 접근 기반의 에머지 방법론을 유용하게 활용할 수 있는 가능성을 제시하였다. 특히 환경이 사회 및 경제와 연계성을 가질 때, 사회경제계가 환경의 가치를 어느 정도 충실히 평가하고 정책에 반영할 수 있는가는 지속가능성을 위한 중요한 문제이다. 에머지 방법론은 투입물을 중심으로 자원의 고유 가치를 평가할 수 있는 도구이고, 자연환경 및 사회

경제환경의 다양한 요소들의 질적 차이를 고려하는 동시에 동일한 에머지 단위로 가치를 산정한다. 따라서 전체적인 지속가능성을 평가하는 데 정량적인 방법론으로서 유용하게 활용될 수 있다.

금강유역의 에머지 지속가능성을 평가한 결과 낮은 에머지 생산율과 높은 환경부하 비율에 의해 에머지 지속가능성이 국가 전체에 비해 낮게 나타났다. 이는 유역이 내륙에 속해 있어 재생가능 자원으로 조석의 영향을 받지 못하는 점과 사회경제활동을 영위하는 데 있어 내부의 자원보다 외부에서 유입된 자원에 크게 의존하는 데 주요 원인이 있었다. 금강유역의 지속가능성을 높이기 위해서는 자원안보를 높이고 환경부담을 낮추는 차원에서라도 외부자원에 대한 의존도를 낮추고 내부자원을 개발하고 활용하기 위한 정책적 노력이 필요하다.

서론에서 언급한 최근의 국책사업들과 관련한 논의에서는 경제성 기반의 평가가 초점이 되어 왔다. 즉, 어느 정도 비용을 들여서 어느 정도 수익을 얻을 수 있는지에 대한 평가가 주를 이루었다. 물론 비용이라는 항목에 환경비용도 어느 정도 포함은 될 것이다. 그러나 자원 활용에 대한 평가에 있어서 자원이 가진 고유의 가치를 반영하지 못하거나 여러 요소들의 질적 차이, 즉 가중치를 적용하지 않거나 적용하더라도 정성적인 방식으로 적용하여 여전히 객관성이 결여되는 결과를 낳았다. 에머지 방법론이 기존 의사결정을 위한 평가방법론들 중에 비교적 정량적이고 객관적인 잣대를 바탕으로 가치를 산정하는 방식이라는 점에서 여타의 방법론에서 도출된 결과들과 함께 정책 의사결정의 도구로 활용할 가치가 있다. 국책사업이나 환경영향 평가, 생태계서비스 평가 등에 두루 활용함으로써 여타의 방법론들이 평가하지 못하는 환경자원 고유의 가치를 보다 정량적으로 평가하여 기존의 정성적 방식을 보완할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구 결과를 바탕으로 향후에는 에머지 방법론을 활용한 유역 단위의 지속가능성 평가를 다른 권역에도 적용하여 연구할 필요가 있다. 해양환경으로 인해 유역 환경과 우리나라 국토 전체의 환경 조건이 달라 금강유역을 국토 전체와 비교하는 데는 무리가 있었다. 본 연구와 같이 우리나

라의 유역별로 에머지 평가와 지속가능성 평가를 수행하여 유역 간 비교·분석한 결과를 바탕으로, 각 권역별로 환경이나 경제 측면에서 지속가능성을 높이기 위한 다양한 정책적 시사점을 얻을 수 있을 것이다. 보다 면밀한 비교·분석을 위해서는 데이터를 개선할 필요가 있고, 연구를 통해 환경부하 비율과 같은 에머지 지수체계도 보다 정교하게 활용할 수 있도록 개선이 필요하다.

장기적으로는 자연환경과 사회경제환경의 연계성 속에서 지속가능발전을 이루어 나갈 수 있도록 유역 중심의 환경평가와 관리체계를 구축하기 위한 정책적 지원과 노력이 필요하다.

▌참고문헌 ▐

강대석, 2007, "한강유역의 자연환경과 사회경제활동에 대한 에머지 평가: 한강유역 및 한강하구 관리를 위한 정책제언,"『한국해양환경공학회지』, 10(3), pp.138-147.

_____, 2017, "한국 농업의 에머지 평가,"『한국환경과학회지』, 26(9), pp.1087-1099.

국립농업과학원, 2009,『농업환경변동조사사업』, 수원: 국립농업과학원.

국토교통부, 2013,『수자원장기종합계획(2011-2020)』, 과천: 국토교통부.

기상청, 2013,『기상연보』, 서울: 기상청.

김대환·민동기, 2017, "DPSIR 지속가능성 지표의 지수 전환 방법에 대한 연구 및 금강하구역 사례 분석",『환경정책』, 25(4), pp.241-272, DOI :10.15301/jepa.2017.25.4.241.

남정호·강대석, 2016, "에머지 방법론을 이용한 갯벌생태계의 가치 평가: I. 에머지 유입 특성,"『바다:한국해양학회지』, 21(4), pp.134-143.

농업과학기술원, 2005,『비점오염원 관리와 국토 보전을 위한 전국 토양 침식 위험성 평가』, 수원: 농업과학기술원.

문순홍·정규호, 2000, "생태근대화론을 활용한 환경정책의 지속가능성평가 기본모형 연구,"『환경정책』, 8(1), pp.113-131.

오정학·정성관·권진오·박경훈, 2007, "경관생태학적 유역관리를 위한 토지이용 유형 분류,"『한국지리정보학회지』, 10(4), pp.22-34.

이도원, 2004,『한국의 전통생태학』, 서울: 사이언스북스.

이승준, 2016,『시스템과 네트워크 이론을 활용한 미래 환경정책 방향 연구』, (KEI Working Paper; 2016-01), 세종: 한국환경정책·평가연구원.

이승호·박성제·김현정, 2008, "외국의 유역통합관리 제도에 관한 소고,"『환경법연구』, 30(1), pp.1-36.

이우성·정성관·유주한, 2006, "지속가능한 개발을 위한 대구광역시의 에머지 평가,"『대한국토계획학회지』, 41(3), pp.137-150.

전라북도, 2015,『제54회 전북통계연보』, 전주: 전라북도.

정화숙·이석모·손형식·손희종, 2013, "환경 생태학적 개념을 이용한 낙동강 하류의 에머지 비용-편익 평가,"『한국환경과학회지』, 22(4), pp.507-514.

주용준·사공희·이상윤·맹준호·최준규·전동준 등, 2014,『충청남도 환경용량 평가 연구』, 홍성군: 충청남도.

충청남도, 2015,『제54회 충남통계연보』, 홍성군: 충청남도.

한국은행, 2015,『지역산업연관표(2013)』, 서울: 한국은행.

Acreman, M., M. Dunbar, J. Hannaford, O. Mountford, P. Wood, and N. Holmes et al., 2008, "Developing environmental standards for abstractions from UK rivers to implement the EU water framework directive," *Hydrological Sciences*, 53(6), pp.1105-1120, DOI:10.1623/hysj.53.6.1105.

Blancher Ⅱ, E. C. and Y. J. Etheredge, 2007, "Emergy analysis of two watersheds in the mobile bay national estuary program's area," In M. T. Brown, E. Bardi, D. E. Campbell, S. L. Huang, E. Ortega, T. Rydberg, D. Tilley, and S. Ulgiati (eds.), *Proceedings of the 4th biennial emergy research conference*, Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL, USA.

Brown, M. T. and S. Ulgiati, 1997, "Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: Monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation," *Ecological Engineering*, 9, pp.51-69.

_____, 2011, *Handbook of emergy evaluation folio #6: The global emergy budget and the emergy of global processes revisited*, Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL, USA.

Cohen, M. J., S. Sweeney, and M. T. Brown, 2007, "Computing the unit emergy value of crustal elements," In M. T. Brown, E. Bardi, D. E. Campbell, S. L. Huang, E. Ortega, T. Rydberg, D. Tilley, and S. Ulgiati (eds.), *Proceedings of the 4th biennial emergy research conference*, Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL, USA.

Kang, D., 2016, *Emergy evaluation database for Korea*, Unpublished.

Li, G., Y. Kuang, N. Huang, and X. Chang, 2014, "Emergy synthesis and regional sustainability assessment: Case study of pan-pearl river Delta in China," *Sustainability*, 6, pp.5203-5230, DOI:10.3390/su6085203.

Odum, H. T., 1996, *Environmental accounting: Emergy and environmental decision*

making, New York: Wiley.

Odum, H. T., M. T. Brown, and S. Brandt-Williams, 2000, *Handbook of emergy evaluation folio #1: Introduction and global budget,* Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL, USA.

Odum, H. T. and E. C. Odum, 2000, *Modeling for all scales: An introduction to system simulation*, CA: Academic Press.

United Nations (UN), 1987, *Our common future – Brundtland report*, Oxford University Press.

경기통계, "경기통계연보 2014," http://stat.gg.go.kr/statgg/kr/dataMng/PublicationForm.html?pub_seq=568, [2017.10.15]

경상북도통계포털, "2014 통계연보," http://www.gb.go.kr/open_content/stat/index.jsp, [2017.10.15]

관세청, "지역별 무역통계," https://unipass.customs.go.kr:38030/ets, [2017.10.15]

충북통계정보시스템, "2014 통계연보," http://stat.chungbuk.go.kr/stat/index.do, [2017.10.15]

KOSIS(통계청 국가통계포털), "국내통계," http://www.kosis.kr, [2017.9.20]

NEAD(National Environmental Accounting Database), https://cep.ees.ufl.edu/nead, [2017.9.20]

WAMIS(국가수자원관리종합시스템), "지도로 검색", http://wamis.go.kr/watermap2013/watermap.aspx?paramTab=searchmap, [2017.9.15]

이승준: 미국 University of Florida에서 환경공학 박사학위를 취득하고 현재 한국환경정책·평가연구원에 재직 중이다. 기후변화 정책, 환경가치 평가, 시스템 관점의 환경정책 등에 관심을 갖고 해당 분야를 연구하고 있다(leesj@kei.re.kr).

투 고 일: 2018년 09월 03일
심 사 일: 2018년 09월 18일
게재확정일: 2018년 11월 01일