

Study Note

생태계 보호지역 평가에서 생태공학 도입과 활용

구경아

한국환경정책·평가연구원

Application of An Ecological Engineering Approach in Evaluating Protected Area at Local Scales

Kyung Ah Koo

Korea Environment Institute

요약: 본 연구에서는 다양한 생태계의 보전 및 생물다양성 보전과 증진을 통한 생태계의 지속가능한 이용을 위하여 우리나라 생태계 보호지역 확대를 위한 평가기법과 이의 정책적 활용 방향을 제시하였다. 이를 위하여 첫째, 생태계 보호지역 평가기법 활용 현황을 분석하였고, 둘째, 생태공학 기법을 기반으로 지역 규모의 생태계 보호지역 평가를 위한 개념 모형을 제시하였으며, 셋째, 이러한 분석 결과의 활용 방안을 제안하였다. 국외에서 보호지역 지정 시 다양한 분석 모형을 활용하고 있는 것과 달리, 우리나라의 경우 장기 생태계 모니터링 및 생태연구 자료가 부족하여 보호지역 지정 분석기법의 개발 및 적용이 미흡한 상태이다. 특히 미소 규모나 지역 규모보다는 국가 규모의 분석에 기반한 보호지역 지정이 주를 이루고 있어 지역 규모의 다양한 생태계가 반영되지 못하고 있다. 보호지역의 합리적인 지정과 효과적인 관리를 위해서는 다양한 인자들과 인자들 간의 상호작용을 고려한 지역 규모의 종합분석이 필요하며, 이를 위하여 본 연구에서는 생태공학 기법을 토대로 한 보호지역 분석의 개념 모형을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 생태계 보호지역 분석은 다양한 생물 인자 및 비생물 인자, 그리고 이들의 상호작용 및 미래 환경변화를 고려한 각 지역 생태계의 특성을 반영하기 때문에 현재 우수한 생태계뿐만 아니라 앞으로 중요하게 보호해야 할 생태계를 보호지역으로 편입할 수 있는 근거를 제시하였다. 그러나 본 연구에서 제시한 분석 기법의 충분한 활용을 위해서는 각 지표항목과 지표항목에 속하는 인자들에 대한 개별 생태연구 자료 및 공간자료가 필요하다. 이러한 분석의 한계를 해결하기 위해서는 장기간의 생태자료와 종별 서식지 환경조건에 대한 연구 자료가 필요하며 서식지 모형, 생태모형, hybrid 모형 등 경관생태모형을 활용한 분석이 필요하다.

주요어: 보호지역, 생태공학, 지역 생태계, 환경변화, 개념 모형

Abstract: This research developed an approach to identify ecologically important areas at local scales and explained how the results of this approach could contribute to extend the protected areas in the Republic of Korea (ROK). While most developed countries have considered various biotic and abiotic factors, ecological processes, migration routes, habitat connectivity, ecosystem services, and etc. to determine the protected areas, ROK has considered a few factors focusing on biodiversity,

landscape, and the habitats of endangered organisms. However, for sustainable management of our nature, we need comprehensive understanding of various ecosystem factors and interactions among them at local scales in designating protected areas. For this, we developed a conceptual model based on the ecological engineering approach and then explained how the results of this approach could contribute to extend the protected areas. In particular, we considered future land-use and climate change in determining the priority areas for novel protected areas. Our research suggested an effective methodology 1) to include various ecosystem factors and 2) to consider future environmental changes as well as current environmental conditions in finding the ecologically important areas and prioritizing these areas. However, our approach has limitations on the real-world applications due to the lack of fundamental information and data on our ecosystems. To improve the effectiveness of our approach in the real-world applications, we need various long-term ecological research results, environmental and ecological monitoring data, and both current and future spatial environmental data.

Keywords : Protected area, Ecological engineering, Environmental change, Conceptual model, Local-scale

I. 서론

생물다양성은 변화하는 환경에 대한 생태계 적응력을 높여 인간사회에 지속적이고 안정적인 생태계서비스 제공을 가능하게 한다(Walker & Salt 2006). ‘생물다양성협약(Convention on Biological Diversity)’에서는 생물다양성을 “육상·해양 및 그 밖의 수중생태계와 이들 생태계가 부분을 이루는 복합생태계 등 모든 분야의 생물체 간의 변이성을 말하며, 이는 종내 다양성, 종간의 다양성 및 생태계의 다양성을 포함”이라고 정의하고 있다(<https://www.cbd.int/convention/articles/default.shtml?a=cbd-02>). 생물다양성의 보전 및 증진을 위하여 생물다양성협약에서는 보호지역의 지정 및 확대를 추진해 왔으며, 2020년까지 육상면적의 17%를 보호지역으로 지정할 것을 당사국에 권고하고 있다(<https://www.cbd.int/sp/targets/>). 우리나라의 경우 육상 보호지역 면적은 약 15.5%로, 보호지역 확대를 위하여 중요한 생태계 보호지역의 발굴을 위한 연구가 필요하다. 그러나 국내 대부분의 보호지역 관련 연구는 보호지역 자체의 관리와 유지 등에만 집중되어 있어 보호지역의 확대를 위한 다양한 생태보전지역 발굴 연구가 미흡한 실정이다.

국외의 경우, 근래 생태계 보호지역의 지정을 위하

여 환경변화, 생태계 연결성 및 생태계서비스 등을 고려한 다양한 연구들이 소개되고 있다. 이러한 연구에서는 서식지 모형, 생태계서비스 평가 모형, 생태경로 모형 등 다양한 평가방법들을 활용하여 생태적으로 중요한 지역을 도출하고 있다(Onal & Wang 2008; Giakoumi et al. 2013; Levin et al. 2013; Dickson et al. 2017). 이 연구들의 공통점은 다양한 인자들 간의 상호작용을 고려한 서식지 단위의 종합 평가를 통해 생태적으로 중요한 지역을 도출하고 보호지역으로 선정할 것을 제시한다는 것이다. 예를 들어, 희귀 야생동·식물 유무와 환경 인자들과의 상호작용과 함께 서식하는 다른 종들과의 상호작용, 그리고 환경 인자들 간의 상호작용을 고려하여 생태적으로 중요한 지역을 도출하고 있다. 이뿐만 아니라 기후변화 및 토지이용변화 등 미래 환경변화 등을 종합적으로 고려하여 서식지 단위 중요 생태계를 도출하고 이를 보호지역으로 선정할 것을 제시하고 있다.

국외 연구들이 다양한 인자들의 상호작용을 고려하는 것과 달리 우리나라의 보호지역 지정을 위한 분석기법들은 희귀 야생동·식물의 유무나 경관의 심미적인 가치, 지형적 가치 및 생태계의 원시성 등 여러 가지 요소를 각각의 독립적인 인자들로 고려하여 단순 중첩과 가중치를 부여한 산술적인 계산을 통한 평

가에 기반을 두고 있다(Ministry of Environment 2007 & 2008). 특히 미소 규모(fine scale)나 지역 규모(local scale)의 분석보다는 국가 규모(national scale)의 분석을 통한 보호지역 지정이 이루어지고 있어 지역 규모의 다양한 생태계가 반영되지 못하고 있다. 대부분의 야생동·식물 서식지가 지역 규모에서 설명되며 서식지 생태계가 복잡적응체인 것을 고려할 때, 지역 규모 종합분석을 통해 생태계 보호지역을 선정해야 하며, 이를 위하여 다양한 평가방법의 도입 및 적용이 필요하다.

자연생태계의 훼손에 따른 자연의 기능 저하와 환경문제가 심각해지면서 이를 극복하기 위한 다양한 방안들이 모색되어왔다(Kim & Lee 2015). 이러한 모색들은 환경 및 생태 관련 분야에서 이루어졌으며, 대표적인 분야는 환경공학으로 다양한 기술적인 대안들을 제시해왔다(Odum & Odum 2003). 그러나 공학적 대안들은 환경문제의 근간을 이루는 자연생태계에 대한 이해의 부족으로 한계점을 드러냈다(Odum & Odum 2003). 자연생태계는 다양한 생물적, 비생물적 인자들로 구성되어 있으며, 이 인자들의 복잡한 상호작용에 의해 설명되는 복잡적응계다(Mitsch & Jørgensen 2003). 생태계에 대한 근본적인 이해에 바탕을 두지 않은 환경공학은 자연생태계 보전과 이에 따라 제공되는 생태계서비스의 지속적인 공급을 위한 적절한 대안을 제시하지 못하였다. 이를 극복하기 위하여 자연생태계에 대한 이해를 바탕으로 환경문제의 해결책을 찾고자 생태공학이 대안으로 제시되었다(Odum & Odum 2003). 생태공학은 오덤(Odum)에 의해 처음으로 제시되었으며, 생태학과 공학을 결합한 학문으로 생태학 이론에 계량화된 환경공학 모형들을 결합한 분야이다(Odum 1989). 생태공학이 가장 많이 활용되고 있는 분야는 생태계복원이며, 우리나라에서도 생태계복원 연구에 생태공학의 도입 필요성이 강조되어왔다. 이에 더하여 근래에는 다양한 모형 개발과 컴퓨터 등 기술의 발전에 따라 광범위한 생태 및 환경 관련 분야 연구에 생태공학 기법의 활용이 확산되고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 우리나라 생태계 보호지역 확대를 위하여 생태적으로 중요한 지역을 도출하

는 데 있어서 다양한 인자들의 상호작용을 종합적으로 고려하는 생태공학 기법의 도입 및 활용 방안을 제시하고 이를 바탕으로 지역 규모의 분석 개념도를 제시하고자 한다. 본 연구의 주요 내용은 생태계 보호지역 평가기법 활용 현황, 생태공학 소개, 보호지역 지정에 있어서 생태공학의 도입 필요성 및 분석 개념 모형 제시, 마지막으로 정책적 활용 방안 제언이다. 본 연구에서 사용하고 있는 생태계 보호지역이라는 용어에서 생태계는 “연구지역 내에 있는 모든 생물과 환경 인자 및 이들 사이의 상호작용을 포함하는 시스템”을 의미한다(<https://www.biology-online.org/dictionary/Ecosystem>). 그러므로 생태계 보호지역은 한 지역에 서식하는 생물 및 환경 인자의 보전을 통해 생태계의 구조와 기능을 지속가능하게 유지하기 위하여 지정된 지역을 의미한다.

II. 생태공학이란?

1. 생태공학 정의

생태공학(ecological engineering)은 생태학(ecology)과 공학(engineering)을 결합한 학문의 한 분야로 오덤(H. T. Odum)에 의해서 중요한 연구 분야로 소개되었다(Odum 1989). 생태공학은 다양한 환경문제를 해석하고 해결방안을 찾는 데 있어 환경공학 접근법과 비교됐다. 지금까지 환경공학 접근법이 공학적 방법에 근거하여 기술 발전 등을 통해 다양한 환경오염 문제를 해결하고자 하였다면, 생태공학 접근법은 생태계의 이해에서 문제의 해결방법을 찾고자 하였다. 이처럼 생태공학이 생태계의 이해를 연구의 근간으로 삼고 있기에 생태공학 연구방법을 이해하기 위해서는 생태공학의 정의와 더불어 생태학의 이론과 연구 원리에 대한 이해가 필수적이다.

생태공학의 정의는 시스템 생태학자인 오덤에 의하여 최초로 제시되었으며, 이후 요르겐센(S. E. Jørgensen), 미치(W. J. Mitsch), 버건(S. D. Bergen) 등 다양한 분야(시스템 생태학, 환경공학, 생태복원 등)의 연구자에 의해서 정리되었다. 오덤은 생태공학을 “공동의 이익을 위하여 인간사회와 자연환경을 통

합하는 지속가능한 디자인”이라고 정의했으며, 국제 생태공학회에서 이를 공식적으로 채택하여 사용하고 있다(<https://www.iees.ch/ecological-engineering/>). 생태공학과 오랫동안 비교되어 온 환경공학은 사회와 환경을 연결하는 기술을 개발하는 분야로 환경문제의 해결에 중요한 역할을 하나, 이러한 역할은 온전한 해결방안을 제시하기에 부족하다(Odum & Odum 2003). 인간사회를 포함하는 모든 생태계는 환경의 조건에 적응해 가는 자기조직 시스템으로, 생태계에 발생한 문제는 생태계의 기본 특성을 이해하고 이러한 이해를 바탕으로 공학 기술을 적용하는 것이 필요하다(Odum & Odum 2003). 특히 생태계는 복잡계(complex system)이므로 생태계 인자들의 복잡한 상호작용을 이해하고 반영하는 것이 중요하며(Mitsch & Jørgensen 2003), 이러한 생태공학 연구들을 위하여 공학, 생태학, 자연과학, 경제학 등 다양한 학문 간의 통합이 중요하다(<https://www.iees.ch/ecological-engineering/>).

2. 생태공학 연구 특성

생태공학 연구를 설명하는 가장 중요한 두 개념은 생태계가 자기조직화 시스템이라는 것과 생태공학 연구는 시스템 접근법을 근간으로 수행된다는 것이다(Mitsch & Jørgensen 2003). 생태계가 자기조직화 시스템이라는 것은 생태계가 스스로 가장 최적화된 상태로 적응·발전해 간다는 것이다. 그러므로 생태공학 연구는 생태계에서 발생하는 모든 현상에 대하여 생태계의 적응 및 최적화 능력을 전제로 한다. 예를 들어, 기후변화에 대응한 멸종위기종 보존 연구는 생물에 대한 기후변화 영향만을 고려하는 것이 아니라 생물의 적응 메커니즘을 충분히 고려해야 함을 의미한다.

생태공학 연구가 시스템 접근법을 토대로 수행된다는 것은 하나의 생태계 시스템을 이해할 때 생태계를 구성하는 개별 인자들에 대한 부분적인 특성뿐만 아니라 이들의 상호작용으로 구성된 전체 시스템을 전체론적 관점에서 종합적으로 이해하는 것이 필요함을 의미한다(Woo et al. 2017). 생태계는 복잡계이기 때문에 단순한 분석과 부분적인 현상만을 다루는 실

험들로 전체 생태계를 설명하는 것은 불가능하며, 이는 생태공학 연구 시 부적절한 방법이다(Woo et al. 2017). 복잡한 생태계를 설명하기 위하여 생태공학 연구에서는 시스템 전체를 설명할 수 있는 다양한 생태 모델링과 실험의 중요성을 강조하고 있다.

3. 생태공학 모형

생태계를 전체론적 관점에서 바라보는 생태공학은 부분적이고 직접 관찰·측정되는 현상들로 파악할 수 없는 복잡한 생태계 현상(indirect dominance)을 이해하고 밝힘으로써 현실 세계를 더 잘 설명할 수 있다. 직접 관찰되거나 실험으로 측정되지 않는 관계들과 복잡한 상호작용들, 그리고 그들 속에서 일어나는 창발성(emergent property)과 유용성을 이해하기 위해서는 모델링이라는 인간의 인식 과정이 필수적이다(Woo et al. 2017). 그러므로 생태공학 연구는 생태계 인자들 간의 직·간접적인 상호작용을 고려하는 다양한 모형들을 사용한다.

생태학 및 생태공학에 적용된 다양한 모형은 시대에 따른 과학 기술 발달과 연구 흐름에 따라 변화하였다(Jørgensen & Fath 2011). 생태연구에 사용된 주요 모형을 9개로 분류하면 동적 생지화학 모형(dynamic biogeochemical models), 정상 생지화학 모형(steady-state biogeochemical models), 개체군 동적 모형(population dynamics models), 공간 모형(spatial models), 구조적 동적 모형(structurally dynamic models), 개체기반 모형(individual-based models), 생태독성 모형(ecotoxicological models), 퍼지 모형(fuzzy models), 인공신경망 모형(artificial neural networks models) 등으로 분류된다(Jørgensen & Fath 2011). 특히, 1980년대 생태연구에 사용되지 않았던 공간 모형의 사용이 2000년대 현저히 증가하였으며, 이러한 모형들은 각각의 연구에서 단독으로 사용되거나 좀 더 복잡한 시스템을 분석하고 예측하기 위하여 몇 개의 모형이 함께 사용되기도 하였다. 이러한 모델링 접근법을 Hybrid Modeling Approach라고 한다(Jørgensen & Fath 2011). 복잡한 생태계를 설명하기 위하여 Hybrid Modeling Approach의 적용이 증가하고 있으며, 보

호지역 평가 시에도 공간 모형에 다양한 생태모형을 결합한 모형들이 활용될 수 있다.

III. 생태계 보호지역 평가기법 활용 현황

생태계 보호지역에 사용되는 모형들은 공간 모형이나 공간 모형에 다양한 생태모형을 결합한 형태의 hybrid 모형들이다. 생태계 보호지역 지정 관련 최근 국의 연구들을 살펴보면 장기적으로 수집된 생태자료 및 기초 생태연구를 바탕으로 환경변화, 생태계 연결성 및 생태계서비스 등을 고려한 다양한 평가기법들-적합 서식지 모형(niche model), 생태계서비스 평가 모형(ecosystem service assessment models), 생태경로모형(ecological flow model) 등-이 적용되고 있다(Onal & Wang 2008; Giakoumi et al. 2013; Levin et al. 2013; Duarte et al. 2016; Dickson et al. 2017; Kukkala 2017).

서식지 모형은 공간 모형만을 활용하거나 공간 모형에 개체군 동태 모형 등을 결합하여 활용한다. 서식지 모형을 활용한 연구는 야외실험, 자료 수집, 실내실험을 통한 각 생물종-특히 멸종위기종이나 기후변화 민감종-의 적합 서식지의 환경조건을 분석·구명하고 기후변화 및 토지이용변화 등 환경변화에 따른 적합 서식지 분포 변화를 예측한다. 이를 통해 연구종의 보호를 위하여 중요한 서식지를 예측하고 예측된 주요 서식지들을 보호지역으로 지정할 것을 제안하고 있다. 이와 더불어 서식지 모형은 다양한 종들의 적합 서식지 분석 및 예측을 통하여 생물다양성의 핫스팟(hot spot)을 결정하고 환경변화에 따른 영향을 예측하여 보호지역을 선정하는 데 활용되기도 한다. Loyola et al.(2013)은 대서양 산림 생물다양성 핫스팟을 대상으로 양서류 444종에 대한 적합 서식지 모형 결과를 사용하여 지역별 종 풍부도를 평가하였다. 또한, 미래 기후변화에 따른 종분포 변화에 따른 종다양성 변화율을 분석하고 분석 지역의 미래 종 풍부도 보전을 위하여 보호지역 확대가 필요한 지역을 제시하였다. 연구 결과, 대상 지역 중 북부와 남서부 지역에서 종 풍부도 변화율이 높은 것으로 분석되

었고, 현재 보호지역(21 cell)보다 2배 이상 많은 지역(51 cell)이 보호지역으로 지정되어야 함을 제안하였다.

이외 인위·자연적 환경변화에 따라 식생 구조의 분포 및 시·공간적 분포 변화를 분석·예측하여 보호지역을 선정하는 연구도 수행되었다. Levin et al.(2013)은 Marxan with Zone Model을 활용하여 연구지역(이스라엘)의 식생을 유형별로 분류하였고, 유형별 식생분포의 시·공간적 변화를 예측하였다. 이를 통해 이스라엘 생물다양성 보전을 위하여 국립공원으로 지정되어야 할 지역의 우선순위를 도출하였다. 이와 더불어 다양한 관리 시나리오에 따른 미래 식생분포의 변화를 예측하여 효과적인 관리방안을 제시하였다.

서식지 모형은 종의 서식지 적합성을 예측하고 이를 바탕으로 보호지역 선정 기준을 제시하는 데 중요한 기초 자료를 제공한다. 그러나 적합 서식지 분석만으로 종 서식지를 예측하는 것은 생물 서식지 접근 능력을 고려할 때 예측 정확도가 낮다(Engler & Guisan 2009). 이를 보완하기 위하여 종 이동 경로를 고려하여 서식지 적합성을 고려해야 하고, 멸종위기종 등의 보전을 위하여 이동 경로가 되는 서식지에 대한 우선적인 보호지역 지정이 이루어져야 한다는 연구들이 진행되고 있다. 이러한 연구들에 주로 사용되고 있는 모형은 종분포 모형과 산포 모형의 hybrid 모형으로 다양한 모형이 개발 적용되고 있다. Dickson et al.(2017)은 생태경로모형을 활용하여 미국 서부 11개 주의 보호지역 간의 생물학적 연결성을 분석하여 미국 서부의 보호지역 확대를 위한 연구방안을 제시하였다. 연구대상지에 생태경로모형을 사용하여 주요 생물종의 서식지 간 연결에 필요한 지역을 도출하고 이러한 지역을 우선 보호지역으로 지정할 것을 제안하였다. Onal & Wang(2008) 연구에서는 서식지 파편화가 종의 지속성과 생존능력에 많은 영향을 준다는 점을 인식하고 graph theory 접근법을 적용하여 파편화되어 있는 서식지를 연결할 수 있는 지역을 도출하였다. 이 연구는 미국 일리노이 지역을 대상으로 수행되었고 생물다양성 보전을 위하여 파편화되어 있는 서식지의 연결성 향상을 위한 지역을 우선 보호지역으로 지정할 것을 제시하였다.

근래 생태계 보호지역 지정 연구들에 새롭게 도입

되고 있는 기법은 생태계서비스 평가기법으로 다양한 모형을 적용하여 국가 및 지역 규모에서 연구들이 수행되고 있다. Kukkala(2017)는 생물다양성과 생태계서비스를 위한 공간 보전 계획을 위한 모형인 Zone Software를 개발하고, 이를 유럽연합 단위에 적용하였다. 본 연구에서는 생태계서비스, 생물다양성, 보호지역 및 정책 결정 변수를 종합적으로 고려하여 보호지역 선정 우선순위를 제시하고, 생물다양성 보전과 생태계서비스의 극대화를 위한 개별 지역에 적합한 토지이용 방향성을 제시하였다. Duarte et al.(2016)은 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoff) 모형과 GIS 분석을 통해 브라질 남부에 있는 Iron Quadrangle을 대상으로 생태계서비스를 평가하였다. 이를 바탕으로 Iron Quadrangle 지역의 생태계서비스 유지에 중요한 지역을 도출하고, 신규 보호지역으로 지정할 것을 제안하였다. Giakoumi et al.(2013)은 지중해 연안 지역을 8개 생태권역으로 구분하고 지중해 해양 생태계에 큰 영향을 주는 해양식물과 경관을 중심으로 사회·경제적 가치평가를 수행하였다. 이와 더불어 미래에 예측되는 사회·생태 시나리오를 가정하고 시나리오에

따라 연안별 생태계서비스 유지를 위해 보전이 필요한 지역을 도출하여 보호지역으로 선정할 것을 제시하였다.

국내 보호지역 지정을 위한 기존 분석기법은 서식지 모형으로 Marxan with Zone Model을 활용한 경우가 드물게 있으나, 희귀 야생동·식물의 서식지, 경관의 심미적 가치, 지형 가치 및 생태계 원시성과 같은 요소들의 단순 중첩이 대부분이다(Ministry of Environment 2007, 2008, 2019; Mo et al. 2013). 생태계 보호지역 지정을 위한 국내 대표적인 연구는 국립공원, 습지보호지역, 야생동·식물보호구역, 생태·경관보전지역을 대상으로 한 「생태계 보호지역 지정기준 객관화 연구」이다(Ministry of Environment 2007). 이 연구는 선진 사례 분석을 토대로 국내 보호지역 지정기준을 검토하고 객관화하였다. 이를 위해 환경부가 지정·관리하는 보호지역을 중심으로 지정에 관한 문제점을 분석하고, IUCN, UNESCO, NATURA 2000 및 랍사르협약에 제시된 보호지역 지정기준과 미국, 영국, 독일, 일본 등의 국가에서 적용되고 있는 보호지역 지정기준을 조사·분석하였다. 분석 결과, 보호지역 지정 타당성 평가를 위한 평가

Table 1. Feasibility assessment items for designating protected areas

Item		Ecological landscape protection area	Wetland protected area	Critical island	Wild life protected area
Naturality	Originality	◎	◎	×	×
	Topography & Landscape	◎	◎	◎	×
	Vegetation	◎	○	◎	×
Biodiversity	Biodiversity	◎	◎	○	×
	Endangered species	○	◎	◎	◎
	Rare species	○	◎	◎	×
	Endemic species resource	×	×	◎	×
	Animal habitat	○	○	○	×
Ecosystem	Representative	◎	×	×	×
	Diversity	◎	×	×	×
	Rareness	○	○	×	×
	Resilience	○	○	×	×
	Disturbance	○	○	×	×
	Academic value	◎	○	◎	◎

Source: Ministry of Environment (2007)

◎: Items that have evidences for designation or highly related with the evidences, ○: Items that have no evidence for designation or need assessments, ×: Items that have no relationship with protected areas or don't need assessments.

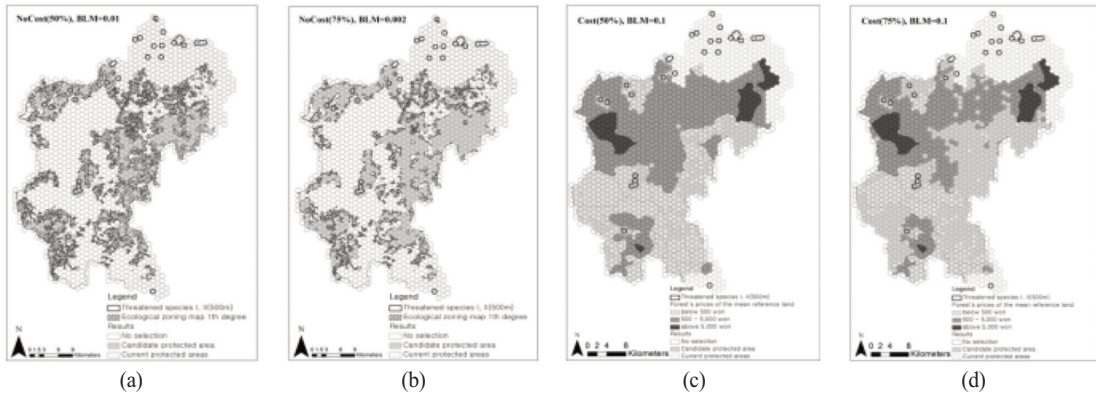
지표로 자연성, 생물다양성, 생태계, 학술 가치의 대항목 및 소항목을 제시하였다(Table 1). 또한, 각 평가지표를 등급화하고 등급별 생태적 특성을 제시하여 보호지역 지정을 위한 객관적인 평가 기준을 제시하

고자 하였다(Table 2). 이 연구에서 제시된 평가지표는 제2차와 제3차 국립공원의 타당성 기준의 생태 기반 평가체계에 활용되었다(Ministry of Environment 2008, 2019).

Table 2. Evaluation indicators and grades for each feasibility assessment item

Item		Assessment indicator	Assessment rating		
			High	Medium	Low
Naturality	Originality	Originality	High originality	Partial originality	Almost no originality
	Topography & Landscape	Topographic rating	Most areas with I-II rating	Most areas with III rating	Most areas with IV rating
	Vegetation	Vegetation conservation rating	Most areas with IV-V rating	Most areas with higher than III rating	Most areas with higher than II rating
Biodiversity	Biodiversity	Vegetation, Mammalia, Birds, Amphibia, Reptile, Freshwater fish, Insect (land), Insect (aquatic), Marine organism	Most taxa show high species diversity	A few taxa show high species diversity	Most taxa show low species diversity
	Endangered species	Endangered animals and plants with the rating of I, II	Many endangered species inhabit	Endangered species exist	No endangered species
	Habitat	Areas required special protection	Areas required protection	Areas required no protection	
	Rare species	Specific species presenting floristic region and rare species	Many Specific species and rare species inhabit	Specific species and rare species inhabit	No specific species and rare species inhabit
	Endemic species resource	Endemic species resource	Critical habitat for endemic species	Habitat for endemic species with potential value as a natural resource	No endemic species
	Animal habitat	Habitat for wild and migratory lives	Critical habitat	Important habitat	Occasional habitat
	Representativeness	Ecosystem representativeness	High	Medium	Low
Ecosystem	Diversity	Diversity of community and habitat	High	Medium	No difference with around areas
	Rareness	Distribution	Critical areas distribution	Regional distribution	Nation-wide distribution
	Resilience	Resilience from disturbance	Impossible to recover	Long-term	Short-term
	Disturbance	Human disturbances	Few	Possible in the future	Sever disturbances
	Academic value	Endemic species with academic value	Academic value with the level of Order, family, genera	Academic value with species	No academic value

Source: Ministry of Environment (2007)



(a) Considering only ecological characteristics in selecting projected areas (conservation goal: 50%)
 (b) Considering only ecological characteristics in selecting projected areas (conservation goal: 75%)
 (c) Considering ecological characteristics and land price in selecting projected areas (conservation goal: 50%)
 (d) Considering ecological characteristics and land price in selecting projected areas (conservation goal: 75%).

Figure 1. Application of Marxan with Zone Model to identify priority conservation areas in selecting protected areas.

Source: Mo et al. 2013

이외 생태모형을 활용하여 지역적인 규모에서 보호지역 설정 근거를 제시하고자 한 연구들이 일부 이루어졌다. Jung et al. (2005)은 삶, 멧돼지, 수달에 관한 서식모형을 개발하여 서식지 적합성 지도를 작성하였고, 동 자료가 보호지역 선정을 위한 판단 근거자료로 활용될 수 있음을 제안하였다. Mo et al. (2013)은 Marxan with Zone Model에 토지비용, 생태자연도, 멸종위기종 출현 지역 등을 변수로 적용하여, 생태적으로 중요한 서식지와 토지비용을 고려한 보호지역 선정기준을 제시하였다(Figure 1).

IV. 생태공학의 도입 필요성 및 분석 개념모형

앞서 살펴본 바와 같이 외국 연구들이 다양한 분석모형을 활용하고 있는 것과 달리, 우리나라의 경우 장기 생태계 모니터링 자료와 기초생태연구 자료의 부족으로 다양한 분석기법의 개발 및 적용이 미흡한 상태이다. 특히 미소 규모나 지역 규모의 분석보다는 주로 국가 규모의 분석을 통해 보호지역 지정이 이루어지고 있어 지역 규모의 다양한 생태계를 반영하고 있지 못하다. 보호지역 지정 시 지도 자료의 중첩분석 기법을 적용하고 있으나, 자료들 사이의 생태적으로

의미 있는 관계에 대한 고려가 부족하다. 보호지역의 합리적인 지정과 효과적인 관리를 위해 보호지역 지정에 사용된 인자들에 대한 생태적 설명과 그들 사이에 존재하는 상호작용에 대한 이해가 필수적이다. 특히 야생동·식물 서식지는 지역 또는 그 이하 규모에서 다양한 생물 및 비생물 인자들의 복잡한 상호작용으로 설명되며, 환경변화에 따라 상호작용들이 적응하는 동적 시스템이라는 점을 고려할 때 지역 규모의 종합분석을 통해 생태계 보호지역을 선정해야 한다.

지역 규모의 종합분석을 위해 전체론적 관점에 바탕을 둔 시스템 접근법을 활용하여 지역 생태계를 분석·평가하는 것이 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 생태계 보호지역 지정을 위해 기존 연구들이 제시한 다양한 평가지표 중 자연성과 생태계·생물다양성을 상위 지표로 제시하고, 각 지표를 설명하는 하위 지표들(멸종위기종, 원시성 등)과 생물 및 비생물 인자들 사이의 복잡한 상호작용, 토지이용변화 등 인간의 간섭에 의한 환경변화를 반영한 분석을 위한 개념모형을 제시하고자 한다(Figure 2).

상위 지표항목인 자연성과 생태계·생물다양성은 환경부(Ministry of Environment 2007) 연구를 참조하여 선정하였다(Table 1, Table 2). 자연성 항목은 원시성, 독특성, 경관으로 구성되며, 생물 인자와

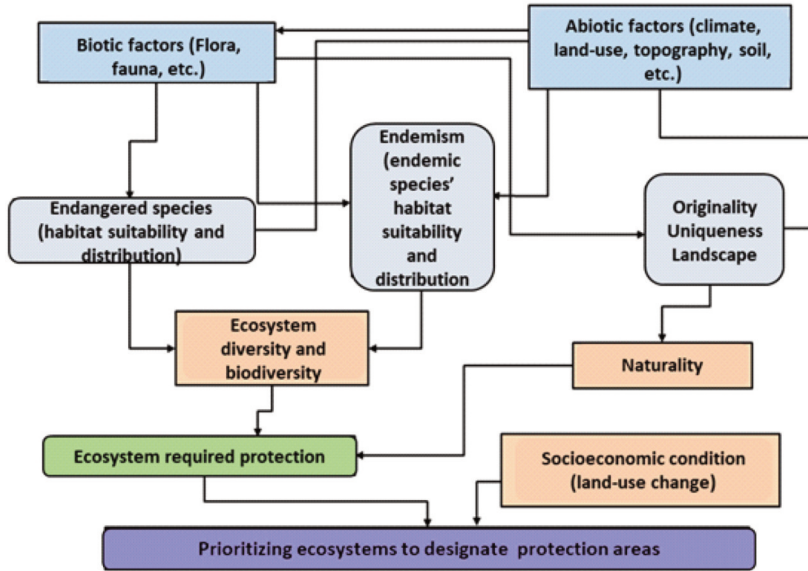


Figure 2. A conceptual model to apply ecological engineering approach to identify and prioritize ecologically important areas in designating protected areas.

비생물 인자의 상호작용으로 형성된 지역의 원시적이거나 독특한 생태계 및 대표 자연경관을 평가한다. 생태계·생물다양성은 고유 및 멸종위기종의 서식지 단위 다양성을 평가한다. 서식지 단위에서 이루어지는 평가는 멸종위기종 서식지를 구성하는 다양한 생물 및 비생물 환경 인자의 상호작용과 종 자체의 적응 능력을 고려하여 이루어져야 한다. 따라서 멸종위기종 서식지 연구는 장기적이고 지속적인 생태연구의 결과 및 다양한 생태모형을 결합한 서식지 모형의 활용이 필요하다.

본 연구에서 제시하고자 하는 분석 방법의 가장 중요한 특징은 첫째, 각 지표가 독립적으로 고려되는 것이 아니라 지표들 사이의 상호작용을 고려하여 간접적인 영향들이 분석에 포함된다는 것이다. 생태계 보호지역 평가 시 생물 인자와 비생물 인자는 여러 경로를 통해 영향을 미친다. 먼저, 비생물 인자는 보호 대상 생태계를 선정할 시 4단계 경로를 거쳐 영향을 미친다(Figure 2); ① 비생물 인자-생물 인자-멸종위기종 서식지-생태계·생물다양성-보호 대상 생태계, ② 비생물 인자-생물 인자-고유생물 서식지-생태계·생물다양성-보호 대상 생태계, ③ 비생물 인자-생물 인자-원시성, 독특성, 경관-자연성-보호 대상

생태계. 또한, 생물 인자와 비생물 인자는 3단계의 경로로 보호 대상 생태계 선정에 영향을 미친다(Figure 2); ④ 생물 인자-멸종위기종 서식지-생태계·생물다양성-보호 대상 생태계, ⑤ 생물 인자-고유생물 서식지-생태계·생물다양성-보호 대상 생태계, ⑥ 생물 인자-원시성, 독특성, 경관-자연성-보호 대상 생태계. 특히 원시성, 독특성, 경관을 개별적으로 고려하면 더 많은 경로로 생태계 보호지역에 영향을 미치게 된다. 구체적인 예를 들면, 기후변화는 멸종위기종 및 주요 고유생물 서식지 변화에 직접적인 영향을 미치며, 이들과 함께 서식하는 다른 종들의 서식지에 영향을 미침으로써 멸종위기종의 서식지 분포에 간접적으로 영향을 미친다. 그러므로 본 분석 개념모형을 활용할 경우 멸종위기종 서식지 분포에 미치는 기후변화 영향은 시스템 내에서 간접적인 영향들을 통해 증폭된다. 그러므로, 본 분석 모형을 적용할 경우, 대상 멸종위기종 서식지 분포에 기후변화의 직접적인 영향만 고려할 때보다 다른 인자들을 통해 발생하는

기후변화의 간접적인 영향이 분석 및 예측에 포함되어 보다 현실적인 예측을 할 수 있다.

본 분석의 또 다른 중요한 특징은 둘째, 각 지표항목을 구성하는 인자에 관한 개별적인 연구가 수행되어야 하고, 연구 결과들은 본 틀 안에서 계층적으로 연결되어 통합된다는 것이다. 예를 들어, 기후변화에 따른 식생분포 변화 연구가 수행되면 본 연구 결과는 멸종위기종의 분포 변화 및 보호 대상 생태계 분석 입력 자료로 사용된다. 국내에서 기존에 수행된 보호지역 분석 연구와 비교하여 다른 특징은 셋째, 생태계 보호지역을 선정하고 지수화하는 데 현재의 환경 상황뿐만 아니라 미래의 환경변화를 고려할 수 있다는 점이다. 환경변화를 고려한다는 것은 지역 생태계를 변화에 적응하는 동적 구조 시스템의 관점에서 분석·평가한다는 의미이다.

V. 보호지역 지정에서 생태공학 기법의 활용 방안

현재 우리나라 보호지역 지정기준과 방법은 매우 서술적이다. 대부분 전문가 의견이나 관찰 및 자연적 지형을 기준으로 보호지역 경계를 설정하는 등 분석 기법을 활용한 예는 매우 드물다. 우리나라 국립공원 경우 대부분 등고선 등 지형을 기준으로 임의로 경계를 설정하였으며, 특정 목적을 가진 보호지역의 경우에도 각 보호지역 생태계 특성을 충분히 반영하지 않은 채 지형 등을 기준으로 경계를 설정하였다. 이러한 과정에서 멸종위기종의 서식지 분포, 생태계 특성을 설명할 수 있는 생물 인자와 비생물 인자 그리고 인자들 사이의 상호작용에 대한 충분한 고려가 국립공원을 포함한 대부분의 보호지역 지정 과정에서 이루어지지 않았다. 이에 보호지역 밖의 생태적으로 우수한 지역에 대한 편입 근거를 제시하기 힘들었다. 멸종위기종 서식지를 보호지역으로 지정할 때도 대상종의 서식지 적합도가 충분히 분석되지 않은 채 경계가 설정된 것이 현실이다. 야생동물 서식지 연결성도 중요한 쟁점이나 이에 대한 충분한 관찰과 실험 및 모형을 통한 분석이 이루어지지 않아 실제 보호지역 지정 과정에 고려되지 못하고 있다. 또한, 기존 자료를

통합하여 생태계 보호지역을 분석할 때에도 다양한 인자들과 인자들 사이의 상호작용 및 미래 환경변화가 고려되지 않은 것이 현실이다.

본 연구에서 제시한 생태계 보호지역 분석 개념모형은 다양한 생물 인자 및 비생물 인자 그리고 이들의 상호작용 및 미래 환경변화를 고려하여 각 지역 생태계의 특성을 반영하기 때문에, 현재에 우수한 생태계뿐만 아니라 앞으로 중요하게 보호되어야 할 생태계를 보호지역으로 편입할 수 있는 근거를 제시할 수 있다. 그러나 본 연구에서 제시한 생태공학적인 분석의 충분한 활용을 위해서는 각 지표항목과 지표항목에 속하는 인자들에 대한 개별 공간자료가 필요하다. 이와 동시에 인자들의 상호작용을 설명할 수 있는 연구 자료와 분석 결과 등이 필요하다. 예를 들어, 멸종위기종 서식지 분포를 생태계 보호지역 분석에서 적용하기 위해서는 각 지역에서 조사된 멸종위기종 목록과 각 종의 서식지 적합도 분석 결과가 있어야 하며, 분석을 위한 공간화된 환경자료가 필요하다. 그러나 현재 이러한 자료들이 구축되어 있지 않아 각 지표항목에 속하는 하위 항목들에 대한 공간자료 구축 및 각 서식 종들에 관한 생태연구가 시급하다. 이와 더불어 식생도를 포함한 각 항목에 해당하는 30m 이하의 고해상도 자료가 구축되어야 지역 규모에서 분석이 가능하다.

VI. 결론

국외에서 보호지역 지정 시 다양한 분석 모형을 활용하고 있는 것과 달리, 우리나라의 경우 장기 생태계 모니터링 및 생태연구 자료가 부족하여 보호지역 지정 분석기법의 개발 및 적용이 미흡한 상태이다. 특히 미소 규모나 지역 규모보다는 국가 규모의 분석에 기반한 보호지역 지정이 주를 이루고 있어 지역 규모의 다양한 생태계가 반영되지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 생태계 보호지역 확대를 위하여 생태적으로 중요한 지역을 도출하기 위한 생태공학 기법의 도입 및 활용 방안을 제시하고 이를 바탕으로 지역 규모의 분석 개념모형을 제시하고자 하였다.

본 연구에서는 생태계 보호지역 확대를 위하여 기존 연구들이 제시한 다양한 평가지표를 검토하여 자연성

과 생태계·생물다양성을 상위 지표로 제시하였고, 각 지표를 설명하는 하위 지표(멸종위기종, 원시성 등)와 생물 및 비생물 인자들 사이의 복잡한 상호작용 및 토지이용변화 등 인간 간섭에 의한 환경변화를 고려할 수 있는 보호지역 분석 개념도를 제시하였다. 또한, 본 연구에서 제시한 분석은 다양한 생물 인자 및 비생물 인자의 상호작용뿐만 아니라 미래 환경변화를 고려하기 때문에, 현재의 우수한 생태계뿐만 아니라 앞으로 중요하게 보호되어야 할 생태계를 보호지역으로 편입시킬 수 있는 근거를 제시할 수 있다. 그러나 제시된 분석 개념모형을 충분히 활용하기 위해서는 각 지표항목과 그 지표항목에 속하는 인자에 대한 개별 공간자료가 필요하나 현재 이러한 자료들이 구축되어 있지 않아 각 지표항목들에 대한 공간자료 구축 및 서식 종들에 관한 생태연구가 시급하다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 장기간의 생태자료와 종별 서식지 환경 조건에 관한 연구 자료가 필요하며, 서식지 모형 및 다양한 생태모형을 결합한 hybrid 모형을 활용한 분석이 필요하다.

사 사

본 연구는 2018년 한국환경정책·평가연구원(KEI)의 지원을 받아 수행된 「생태공학적 기법을 활용한 지역단위 생태계 보호지역 확대방안(RE2018-08)」의 연구결과이다.

References

- Choung HL, Rho P, Song JY. 2005. Study on the Improvement of Ecological Naturality Survey System. National Institute of Environmental Research.
- Dickson BG, Albano CM, McRae BH, Anderson JJ, Theobald DM et al. 2017. Informing Strategic Efforts to Expand and Connect Protected Areas Using a Model of Ecological Flow, with Application to the Western United States. *Conservation Letters* 10(5): 564-571.
- Duarte GT, Ribeiro MC, Paglia AP. 2016. Ecosystem Services Modeling as a Tool for Defining Priority Areas for Conservation. *PLoS One* 11(5): e0154573.
- Engler R, Guisan A. 2009. MigClim: Predicting Plant Distribution and Dispersal in a Changing Climate. *Diversity and Distributions* 15(4): 590-601.
- Giakoumi S, Sini M, Gerovasileiou V, Mazor T, Beher J, Possingham HP et al. 2013. Ecoregion-based Conservation Planning in the Mediterranean: Dealing with Large-scale Heterogeneity. *PLoS One* 8(10): e76449.
- Hall LS, Krausman PR, Morrison ML. 1997. The Habitat Concept and a Plea for Standard Terminology. *Wildlife Society Bulletin* 25(1): 173-182.
- IUCN. 2013. Guidelines for Applying Protected Area Management Categories.
- Jørgensen SE, Fath BD. 2011. Fundamentals of Ecological Modelling: Applications in Environmental Management and Research 4th ed. Amsterdam: Elsevier.
- Kim J, Lee W. 2015. Task and Curriculum Contents of Applied Ecological Engineering Education. *Ecology and Resilient Infrastructure* 2(1): 1-11.
- Kukkala A. 2017. Spatial Conservation Planning for Biodiversity and Ecosystem Services—from Concepts and Methods to Policy Agendas in the European Union. Department of Geosciences and Geography A49, Helsingki.
- Levin NJ, Watson EM, Joseph LN, Grantham HS, Hadar L, Apel N et al. 2013. A Framework for Systematic Conservation Planning and Management of Mediterranean Landscapes.

- Biological Conservation 158: 371-383.
- Loyola RD, Lemes P, Nabout JC, Trindade-Filho J, Sagnori MD, Dobrovolski R, Diniz-Filho JAF. 2013. A Straightforward Conceptual Approach for Evaluating Spatial Conservation Priorities under Climate Change. *Biodiversity and Conservation* 22(2): 483-495.
- Ministry of Environment. 2007. Study on objectification of designation criteria for ecosystem protection area. Sejong.
- Ministry of Environment. 2008. The Second National Park Feasibility Study Criteria and Natural Park System Improvement. Sejong.
- Ministry of Environment. 2019. The Third National Park Feasibility Study Criteria and Natural Park System Improvement. Sejong.
- Mitsch WJ, Jørgensen SE. 2003. Ecological Engineering: A Field Whose Time Has Come. *Ecological Engineering* 20(5): 363-377.
- Mitsch WJ, Jørgensen SE. 2004. *Ecological Engineering and Ecosystem Restoration*. John Wiley & Sons.
- Mo YW, Lee DK, Kim HG, Baek GH, Nam SJ. 2013. Efficient Establishment of Protected Areas in Pyoungchang County, Kangwon Province to Support Spatial Decision Making. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 16(1): 171-180.
- Odum HT. 1989. *Ecological Engineering: An Introduction to Ecotechnology*. Ecological Engineering and Self-Organization, pp. 79-101.
- Odum HT, Odum B. 2003. Concepts and Methods of Ecological Engineering. *Ecological Engineering* 20(5): 339-361.
- Onal H, Wang Y. 2008. A Graph Theory Approach for Designing Conservation Reserve Networks with Minimal Fragmentation. *Networks* 51(2): 142-152.
- Riahi K, Vuuren DP, Kriegler E, Edmonds J, O'Neill B, Fujimori S et al. 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their Energy, Land use, and Greenhouse Gas Emissions Implications: An Overview. *Global Environmental Change* 42: 153-168.
- Sharp R, Tallis HT, Ricketts T, Guerry AD, Wood SA, Chaplin-Kramer R et al. 2016. *InVEST User's Guide, The Natural Capital Project*, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, USA.
- Swetnam RD, Fisher B, Mbilinyi BP, Munishi PK, Wilcock S, Ricketts T et al. 2011. Mapping Socio-economic Scenarios of Land Cover Change: A GIS Method to Enable Ecosystem Service Modelling. *Journal of Environmental Management* 92(3): 563-574.
- Vigerstol KL, Aukema JE. 2011. A Comparison of Tools for Modeling Freshwater Ecosystem Services. *Journal of Environmental Management* 92(10): 2403-2409.
- Walker B, Salt D. 2006. *Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*. Island Press.
- Woo H, Jung J, Kim J, Nam K. 2017. *Ecological Engineering: Principle and Application*. Seoul. Cheong Moon Gak.