

## 공간최적화 모델을 활용한 환경계획의 공간화 방안\*

윤은주<sup>1)</sup> · 이동근<sup>2)</sup> · 허한결<sup>1)</sup> · 성현찬<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 서울대학교 협동과정 조경학 · <sup>2)</sup> 서울대학교 조경지역시스템공학부 · <sup>3)</sup> 고려대학교 환경 GIS/RS 센터

## Suggestion for Spatialization of Environmental Planning Using Spatial Optimization Model\*

Yoon, Eun-Joo<sup>1)</sup> · Lee, Dong-Kun<sup>2)</sup> · Heo, Han-Kyul<sup>1)</sup> and Sung, Hyun-Chan<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University,

<sup>2)</sup> Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University,

<sup>3)</sup> Environmental GIS/RS Center, Korea University.

### ABSTRACT

Environmental planning includes resource allocation and spatial planning process for the conservation and management of environment. Because the spatialization of the environmental planning is not specifically addressed in the relevant statutes, it actually depends on the qualitative methodology such as expert judgement. The results of the qualitative methodology have the advantage that the accumulated knowledge and intuition of the experts can be utilized. However, it is difficult to objectively judge whether it is enough to solve the original problem or whether it is the best of the possible scenarios. Therefore, this study proposed a methodology to quantitatively and objectively spatialize various environmental planning. At first, we suggested a quantitative spatial planning model based on an optimization algorithm. Secondly, we applied this model to two kinds of environmental planning and discussed about the model performance to present the applicability. Since the models were developed based on conceptual study site, there was a limitation in showing possibility of practical use. However,

\* 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 “기후변화 영향 및 취약성 통합평가 모델” 지원을 받아 연구되었습니다. (과제번호: 2014001310007)

**First author** : Yoon, Eun-Joo, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University,

Tel: +82-2-880-4885, Email: youn01@snu.ac.kr

**Corresponding author** : Lee, Dong-Kun, Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University,

Tel: +82-2-880-4885, Email: dklee7@snu.ac.kr

**Received** : 9 March, 2018. **Revised** : 24 April, 2018. **Accepted** : 20 April, 2018.

we expected that this study can contribute to the fields related to environmental planning by suggesting flexible and novel methodology.

Key Words : *heuristic optimization algorithms; Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II(NSGA II); Ant Colony Optimization(ACO); Spatial Decision-making Support System(SDSS)*

## I. 서 론

환경계획은 환경의 보전과 관리를 목적으로 공간 및 다양한 환경자원을 대상으로 계획하는 것을 의미한다(Korean Environment Institute, 2017). 환경계획의 범위는 환경일반에서부터 대기, 수질, 토양, 자연환경 등 매우 폭넓기 때문에 이를 뒷받침하기 위한 다양한 주제도와 실측기반 데이터베이스가 객관적·정량적으로 구축되고 있다. 국가차원에서 종합적인 환경적 가치를 평가한 국토환경성평가지도(ECVAM), 생태자연도, 전국을 대상으로 구축되는 자연환경조사자료 등이 그 대표적 예이며(Kim et al., 2012), 그 외에 학술 분야에서 역시 검증된 정량적 모델패키지를 이용하여 잠재적인 중 서식처 평가, 홍수 및 산사태와 같은 재해의 발생가능성 평가, 잠재적인 생산량 평가 등을 수행하고 있다(Kim and Park, 2017; Kim et al., 2009; Park et al., 2017). 최근에는 미래의 기후변화 영향을 고려한 평가자료 역시 구축하고 있다(Kim et al., 2013; Lee et al., 2016).

반면에 이러한 다양한 자료를 이용하여 실제의 환경을 지속가능하게 보전 및 관리하기 위한 환경계획을 공간화하는 방법론은 상대적으로 미흡하다(Bae, 2017). 기존의 선행연구에는 이를 보완하기 위하여 통계 등을 활용한 지표 및 가중치의 선정 및 결합(Eum, 2016; Lee, 2011) 환경계획안의 정량적인 평가(Kim and Cho, 1998), 공간분석 활용영역의 확대(Kim, 2015), 지자체 단위에서 환경계획의 공간화 관련 가이드라인 등을 제안하고 있다(Bae, 2017; Choi and Kwan,

2009). 그러나 계획의 대상 용도를 할당하는, 이른바 실제 공간 위에 각 용도의 경계를 그려 내는 과정 자체는 여전히 정성적인 부분이 많이 관여한다. 정성적인 방법론은 정량화하기 어려운 대상지 여건과 축적된 전문적 지식, 직관을 활용한다는 장점이 있다. 그러나 이것은 문제를 해결하는데 충분한지, 다양한 시나리오 중에서 가장 좋은 대안이었는지를 객관적으로 판단하기 어렵기 때문에, 실제의 환경에 얽혀 있는 다양한 이해관계자의 협의를 이끌어내기에 충분하지 않다(Zhang and Chi, 2018, Mo et al., 2013). 기존 환경계획 공간화의 미흡은 실제 공간 적용의 한계점으로서 거론되고 있으며, 최근의 국토-환경 계획 연동제 역시 그 배경이 같다(Korean Environment Institute, 2017; Bae, 2017).

따라서 현 시점에서는 환경계획의 공간화 과정을 어떻게 하면 객관화·정량화할 수 있는가에 대한 고민이 필요하다. 국외에서는 최근 공학계열에서 적용되던 최적화 이론을 이용하여 정량적 계획모델을 구축하는 시도가 많다. 정량적 계획 모델은 작성된 계획안의 문제해결 및 목표달성 수준을 기존의 평가방법에 기초하여 정량화하고, 더 나은 방향으로 수정해 나가는 과정을 반복하여(positive feedback loop) 여러 이해관계자가 충분히 만족할 수 있는 공간 계획안을 작성할 수 있다(Figure 1, Neema and Ohgai, 2010; Eikelboom et al., 2015). 본 연구에서는 이와 관련하여 첫째, 기존의 다양한 환경계획을 분석하고 이를 보완하기 위한 정량적 계획모델 개념을 제시하였고 둘째, 환경계획 중 중 보전계획, 기후변화 영향에 대응한 용도계획을 선정하여 개

념적으로 구성된 가상의 공간에 정량적 계획모델을 시범 적용함으로써 해당 모델의 활용 가능성을 제시하였다.

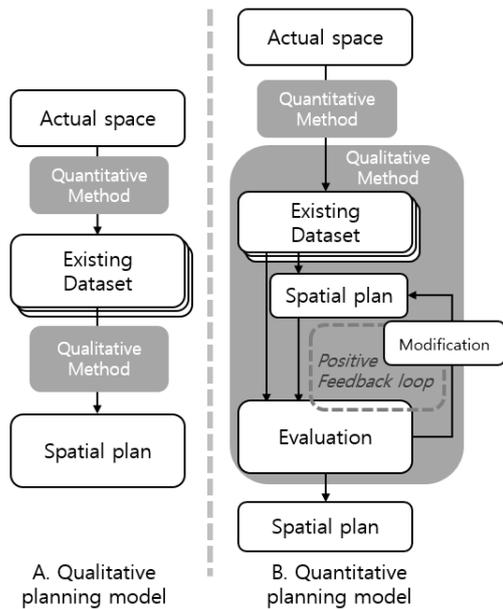


Figure 1. Comparison between Qualitative and Quantitative planning model

## II. 환경계획의 정량화 방향

### 1. 환경계획 개요와 공간화과정의 문제점

환경계획은 환경일반, 기후·대기, 수질·상하수도, 토양, 자연환경, 자원순환과 관련된 환경계획을 포함하는 것으로서, 환경부에서 직접 수립하는 「국가환경종합계획」과 「환경보전중기종합계획」 등의 53개 분야별 환경계획과 광역 및 기초자치 단위에서 계획하는 환경보전계획으로 구성된다. 이중 공간화에 대한 부분을 포함하고, 국토·도시계획의 수준에서 반영 가능한 계획은 16개로 아래의 Table 1과 같다(Korean Environment Institute, 2017, revised).

그러나 각 환경계획에서 공간화하기 위해 공식적으로 명시된 내용에는 특정지역의 보전·복원 혹은 확대와 같은 개략적인 방향만을 포함하고

있다. 도심재생사업경관지침에서 제시하는 “바람길 및 보행녹도를 위해 공동주택단지 간 10미터 이상의 폭을 확보” 등 일부를 제외하고는, 대부분의 환경계획에서 녹지축·생태축의 보전·복원·조성, 하천, 산림 등 특정 지역 간의 연결성 확보, 각종 보호구역의 지정 혹은 확대 비율, 변형 및 영향의 최소화, 수질 및 대기오염, 온실가스 등의 저감 목표수치 등으로 계획지표를 표현하고 있다(Table 2). 즉, 대부분 “충분한”, “최소화”와 같은 정성적인 어휘를 사용하는 경우가 많아 객관화하기가 어려우며, 일부에서 제시된 정량적 수치 역시 공간 계획안을 통해 최종적으로 달성해야 하는 목표치로서 공간을 계획하는 과정에서 적용하기에는 어려움이 있다.

환경계획을 공간화하는 과정은 점·선·면의 다양한 계획요소를 어디에(when), 얼마만큼(how much) 배치하는가의 문제이며, 이를 통해 궁극적으로 환경계획 목표를 달성해야 한다. 그러나 기존의 법·제도 내에서는 목표치 혹은 방향에 대한 것만 명시하고 있으며, 실제 공간을 변화 및 개선하기 위한 구체적 방법론은 포함하지 않는다. 이러한 공간화 방법론의 부재는 최종적으로 달성해야 하는 목표치 달성을 어렵게 하는 원인 중 하나가 될 수 있다. 물론 실제 공간은 지역 및 규모에 따라 여건 및 제약이 다르므로 일부를 제외하고는 구체적인 계획요소, 그 위치와 크기를 사전에 명시하기는 어렵다. 따라서 객관성을 담보하는 동시에, 다양한 대상지 및 환경계획 목표에 적용 가능한 공간계획의 과정 자체를 제안하는 접근방식이 필요하다.

### 2. 정량적 계획모델을 통한 해결방법 제안

위에서 언급한 환경계획의 구성을 고려했을 때, 본 연구에서 제시하고자 하는 공간계획의 과정은 첫째, 객관성을 담보하여야 하고 둘째, 환경계획의 정량적 목표치를 달성해야 하며 셋째, 다양한 대상지 및 환경계획에 적용할 수 있는 유연한 구조여야만 한다. 이러한 조건을 충족하

**Table 1.** Environmental planning including spatialization(Korean Environment Institute, 2017, revised)

Environmental Planning	Relevant statutes	Interval
자연환경보전기본계획 (Basic Plan for Natural Environment)	자연환경보전법 (NATURAL ENVIRONMENT CONSERVATION ACT)	10
국가환경종합계획 (Comprehensive Plan for National Environment)	환경정책기본법 (FRAMEWORK ACT ON ENVIRONMENTAL POLICY)	20
지속가능발전기본계획 (Basic Plan for Sustainable Development)	저탄소녹색성장기본법 (FRAMEWORK ACT ON LOW CARBON, GREEN GROWTH)	20
환경보전중기종합계획 (Mid-Term Comprehensive Plan for Environmental Preservation)	환경정책기본법 (FRAMEWORK ACT ON ENVIRONMENTAL POLICY)	5
환경보건종합계획 (Comprehensive Plan for Environmental Health)	환경보건법 (ENVIRONMENTAL HEALTH ACT)	10
기후변화대응기본계획 (Basic Plan for Coping with Climate Change)	저탄소녹색성장기본법 (FRAMEWORK ACT ON LOW CARBON, GREEN GROWTH)	5
대기환경개선종합계획 (Comprehensive Plans for Clean Air Conservation)	대기환경보전법 (CLEAN AIR CONSERVATION ACT)	10
수도권대기환경관리 기본계획 (Basic Plan for Improvement of Air Quality in Seoul Metropolitan Area)	수도권대기환경개선에 관한 특별법 (SPECIAL ACT ON THE IMPROVEMENT OF AIR QUALITY IN SEOUL METROPOLITAN AREA)	10
물환경관리기본계획 (Basic Plan for Management of Water Environment)	물환경보전법 (WATER ENVIRONMENT CONSERVATION ACT)	10
물재이용기본계획 (Basic Plans for Water Reuse)	물의재이용촉진및지원에관한법률 (ACT ON PROMOTION AND SUPPORT OF WATER REUSE)	10
토양보전기본계획 (Basic Plan for Soil Conservation)	토양환경보전법 (SOIL ENVIRONMENT CONSERVATION ACT)	10
지하수관리기본계획 (Master Plan for Management of Groundwater)	지하수법 (GROUNDWATER ACT)	10
습지보전기본계획 (Master Plan for Wetland Conservation)	습지보전법 (WETLANDS CONSERVATION ACT)	5
야생동식물보호기본계획 (Master Plan for Protection of Wildlife)	야생생물보호및관리에관한법률 (WILDLIFE PROTECTION AND MANAGEMENT ACT)	5
경관정책기본계획 (Master Plan for Landscape Policies)	경관법 (LANDSCAPE ACT)	5
빛공해방지계획 (Light Pollution Prevention Plans)	인공조명에 의한 빛공해 방지법 (ACT ON THE PREVENTION OF LIGHT POLLUTION DUE TO ARTIFICIAL LIGHTING)	5

**Table 2.** Strategies and objectives for spatialization of environmental planning

Strategies/objectives	Contents
The conservation of ecological axis	4대 핵심 생태축 보전, 이와 연결되는 광역권내 생태축, 생태거점 보전, Conservation of core ecological area/axis in national and metropolitan city scale
Improvement of connectivity	녹지 간 연결녹지, 건물의 입체녹화, 녹지와 하천의 연결, 하천 간 연결 Connection between green spaces, green space and water body, and water bodies. three-dimensional greening of buildings
Protection area ratio	육상보호지역, 연안/해양보호구역, 산림유전자원보호구역, 자연공원, 야생동식물보호구역, 습지보호지역의 확대 비율 등 Protection area ratio for terrestrial ecosystem, coast/ocean, forest genetic resources, natural parks, wildlife, wetland, and etc.
Water quality target	한강, 낙동강, 금강, 영산강·섬진강별 수질목표, 도심하천등급별 수질목표 등 Water quality targets of Han River, Nakdong River, Yeongsan River, Seomjin River Water quality targets by grades of urban stream
Air quality target	PM2.5, PM10, NOx, VOCs, 온실가스의 감축목표량, 공공충전망 확충비율 등 Reduction target of PM2.5, PM10, NOx, VOCs, and greenhouse gas. expansion ratio of public charging network
Landscape conservation	자연경관변형의 최소화, 자연친화적 소재의 적용, 방음벽 주위에 충분한 녹지, 조명환경관리구역의 지정/운영 등 Minimization of natural landscape transform, application of nature-friendly materials, sufficient green space surrounding the sound barrier, formulation/operation of light environment management area

는 공간계획의 과정을 이하 정량적 계획모델로 지칭하였다. 다음에서는 최적화 이론(optimization theory)과 그 필요성을 소개한 다음, 이를 기반으로 한 정량적 계획모델 체계를 제안하였다.

### 1) 최적화 알고리즘

환경계획에서 명시하는 녹지 간 연결성 확보, 우수의 재활용비율 확대, 수질의 개선 등을 위한 기법 혹은 계획요소들은 LID(Low Impact Development), BMP(Best management practices), GI (Green Infrastructure) 관련하여 다수 개발되어 왔다. 이러한 기법/계획요소의 효과를 극대화하기 위해서는 어디에 설치하는가가 매우 중요하나, 대상지마다 여건이 다양하고 이해관계가 복잡하게 얽혀있기 때문에 그 위치와 구성을 결정하는 것은 매우 도전적인 과제이다(Zhang and Chi, 2018).

특히, 토지이용계획의 수준에서는 토지이용

간 경험과 경우의 수 증가로 인해 한층 더 복잡해진다(Stewart et al., 2004). 이러한 문제를 해결하기 위하여 기존의 연구에서는 대표적인 시나리오를 설정 및 평가하여 선택하는 trial-and-error approaches를 적용하고 있다. 그러나 설정된 시나리오가 대표성이 있는지, 선택된 시나리오가 최선의 대안인지에 대해 확신할 수 없기 때문에 최근의 연구에서는 공간계획의 과정을 최적화 알고리즘과 접목하고 있다(Zhang and Chi, 2018; Schwaab et al., 2017).

공간계획을 지지하는 최적화 알고리즘은 대부분 가능한 경우의 수 일부를 효율적으로 탐색함으로써 충분히 좋은 대안을 얻는다. 그 중 가장 많이 적용되는 것은 진화론적 전략을 채택한 알고리즘으로 유전 알고리즘(Genetic Algorithms), PSO (Particle Swarm Optimization)가 적용빈도가 가장 높고(Duan et al., 2016; Porta et al., 2013),

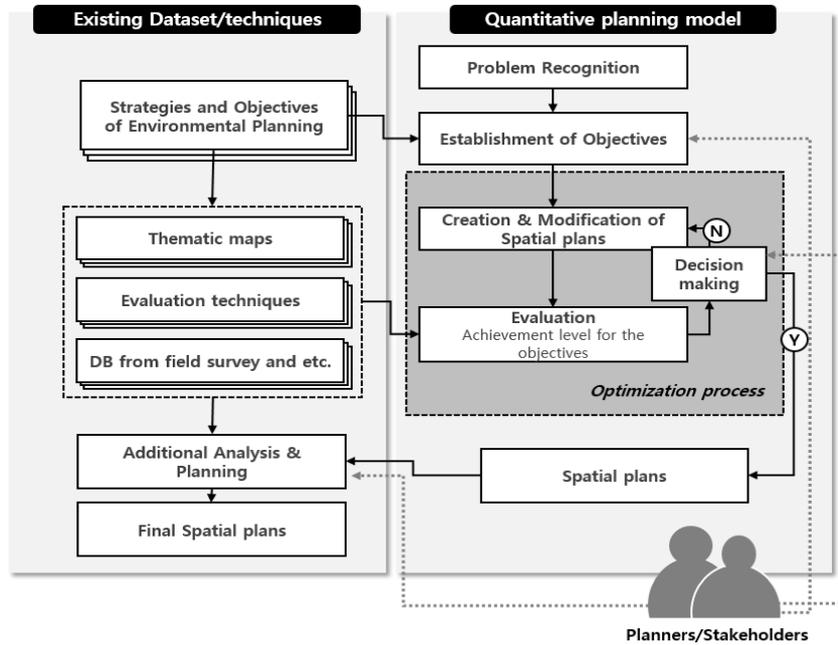


Figure 2. Quantitative planning system for the spatialization of environmental planning

ACO(Ant Colony Optimization)가 최근 다수 적용되고 있다. 공통적으로는 선택(selection, 대안을 어떻게 선택)과 변화(variation, 대안을 어떻게 더 나은 방향으로 수정)의 구조를 가지는데(Zitzler et al., 2004), 알고리즘의 종류에 따라 선택과 변화의 전략이 다르게 구성된다. 아직 상업적으로 개발된 공간최적화 모델 패키지는 없으며, 개별 연구에 따라 최적화 이론을 수정 및 편집하여 적용하고 있다(Zhang and Chi, 2018; Yoon and Lee, 2017). 그러나 공간계획에 적용되는 최적화 알고리즘은 매우 유연한 구조로서 일부의 수정을 통해 다양한 문제에 적용 가능한 것으로 알려져 있다(Yoon et al., 2017). 또한 공간계획의 과정에 최적화 알고리즘을 접목하는 것은 4차 산업혁명 혹은 AI(Artificial Intelligence)와의 접목으로도 해석할 수 있다.

## 2) 정량적 계획모델 제안

환경계획의 공간화를 위해 본 연구에서 최적화 이론에 기초하여 제안한 정량적 계획모델의 체계

는 Figure 2와 같다. 환경계획 근거법에서 제시하는 다양한 목표치와 전략, 이해관계자의 요구 등을 고려하여 목표를 설정하고, 공간계획의 초안을 작성하여 의사결정을 통해(선택, selection) 더 나은 방향으로 수정해 나가는 과정(변화, variation)은 기존의 계획과정과 동일하다. 그러나 정량적 계획모델에서는 해당 과정(positive feedback loop)을 정량화·자동화하여 합리적인 시간 내에 수십 번~수만 번 이상을 반복함으로써(Figure 2의 회색영역에 해당, 계획가/이해관계자가 만족하거나 수렴할 때까지 반복) 기존에 알려진 대안 보다 훨씬 다양한 경우의 수를 탐색할 수 있다. 최근 컴퓨터 연산기능의 향상으로 인해 모의 시간이 크게 저감되고 있으며 사례연구 중 첫 번째 문제는 한번 모의에 1분 내의 시간이 소요되었다.

또한 매번 반복되는 의사결정은 목표의 달성 수준에 근거하기 때문에, 최종적으로 도출된 공간계획이 목표에 부합할 가능성이 매우 높다. 이때 목표의 달성 수준의 평가는 기존에 개발 및 구축된 다양한 주제도, 평가기법(모델), 관측/통

계자료 등을 이용할 수 있다(Yoon and Lee, 2017). 한편으로는 이러한 반복적인 수정 과정에도 불구하고 목표를 달성할 수 없는 경우, 환경계획 목표 조정의 근거가 될 수도 있다.

해당 과정을 통해 출력된 대안은 계획가/이해관계자가 협의하기 위한 기초시나리오로서 활용될 수 있으며, 계획가는 이를 토대로 추가적인 분석 등을 이용하여 구체적인 공간계획을 확정할 수 있다.

### III. 모델 시범적용

모델 시범적용 부분에서는 본 연구에서 제안한 정량적 계획모델의 모의 과정을 제시함으로써 문제해결의 과정을 비교적 쉽게 설명하고자 하였다. 이를 위해 그 개념과 모의 과정을 잘 설명할 수 있는 단순한 가상의 공간을 20×20 크기(400개 격자)로 설정하였다. 이것은 최적화 알고리즘을 적용할 수 있는 최소 단위이기도 하다. 모델 시범적용의 주제는 환경계획의 다양한 주제 중 보호지역이라는 특정 용도를 배분하는 종보전계획과, 다양한 용도를 동시에 고려하고 미래에 대한 불확실성으로 다양한 선택지가 필요한 기후변화 대응 용도계획의 두 가지를 선택하였다. 이 두 가지 문제는 “선택(selection)”과 “변화(variation)”를 반복하는 구조는 동일하나, 정량적 계획모델의 활용가능성을 보여주기 위해 계획의 목적, 계획의 범위, 이용 가능한 데이터 목록, 정량적 모델의 용도, 출력자료의 형태 등은 상이하게 설정하였다(Table 3).

#### 1. 시범적용1: 두 가지 종의 보전계획

시범적용1에서는 환경계획 중 야생동식물보호기본계획과 같이, 종에 대한 다양한 평가 자료를 수집하여 보호지역을 선정하는 부분에 대해 모의하였다. 이를 위해 종A, B의 서식지 분포도와 지가 분포도를 가상으로 작성하였다(Table 4). 학술분야에서는 종 보호에 중요한 지역을 공

간화하기 위하여 MaxEnt 등으로 잠재적 서식확률을 모의하고 임계값을 활용하여 서식/비서식 지역으로 구분하는 경우가 많은데 (Cho et al., 2015; Park et al., 2014), 이를 통해 도출되는 결과와 유사하게 설정하였다. 정량적 계획모델의 문제해결 능력을 보기위해 A와 B의 잠재적 서식지역이 일정면적 비율 이상 겹치지 않도록 설정하였다. 또한 지가 부분은 근거법에서 다루고 있지는 않으나, 실제 공간에서 보호지역 선정이 개발규제 등 다양한 비용과 맞물려 있다는 사실을 감안하여 추가하였다. 보전계획 분야에서 전문가의 판단에서 벗어나 정량적·객관적인 모델로 다양한 측면을 고려하는 과정을 체계적 보전계획(Systematic Conservation Planning)이라고도 한다(Mo et al., 2016).

이상의 자료를 토대로 A와 B종 각각의 잠재적 서식면적을 최대한 많이 보전하는 동시에 비용을 최소화하기 위한 보전지역의 위치(정해진 면적을 할당한다면)는 어디인지를 정량적 계획모델을 이용하여 해결해 보았다. 격자별로 보전지역을 할당했을 때 A와 B종의 서식지포함 면적과 비용이 계산되며, 각 총합이 이전보다 개선될 때 할당이 확정되었다. 모든 격자에 대해 이러한 과정이 반복된 후 계획안이 한번 업데이트되며, 해당 업데이트 과정 역시 더 이상 좋은 계획안이 도출되지 않을 때까지 반복되었다. 다만, A와 B종의 서식지 포함면적, 비용을 합산할 때 각 측면에 대한 가중치는 의사결정자에 의해 조정될 수 있으므로 의사결정자의 피드백을 반영하고, 선호도를 공간화하는 과정으로도 해석하였다.

의사결정자의 피드백으로 가중치를 조정한다면 다음 모의를 반복하는 과정은 Table 5와 같다. 예를 들어, 의사결정자는 첫 번째 공간계획안이 달성한 목표별 수준을 기준으로, 높이거나 낮추고 싶은 정도에 따라 가중치를 조정할 수 있다. 예를 들어, 모의1은 등가중치를 설정하여 모의한 결과인데, 의사결정자는 A와 B종 서식지의

**Table 3.** Outline of the case study

	Case study1 (야생동식물보호 기본계획)	Case study2 (국가기후변화 적응대책)
Objectives	Maximization of species conservation Minimization of cost	Minimization of climate change impact
Scope	Allocate protected area	Allocate urban, agricultural, natural areas
Algorithms	Ant Colony Algorithm (ACO)	Non dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II)
Input	Potential habitat maps of species A and B	Maps of climate change impact C and D
Characteristic	Spatialization by weight adjustment	Various scenarios for decision making
output in single running	1 plan	100 plans
Number of cases	2 <sup>400</sup>	3 <sup>400</sup>

**Table 4.** Potential habitats and land price  
(unit: 10,000won)

	Species A	Species B	Land price
Map			
Legend	habitat		

보전비율은 60%이상으로 만족스러우나 비용이 너무 높다고 평가할 수 있다. 그렇다면, 비용 부분에 대한 가중치를 0.1 상향 조정하여 모의2를 수행함으로써, 모의1보다 낮은 비용이 소요되는 결과를 얻을 수 있다(대신 다른 목적부분에서는

**Table 5.** Selection of protected area  
(3times simulation)(unit: 10,000won)

	→ →		
	Simulation 1	Simulation 2	Simulation 3
Map			
Species A	67.1%	63.8%	80.4%
Species B	74.9%	70.6%	57.7%
Cost	4110	3520	3940
Feedback	Reduce cost	Conserve more of A	-

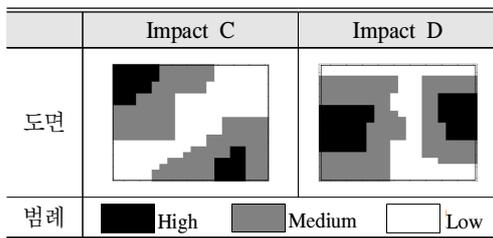
달성 수준이 낮아지는 경향인 상쇄효과가 나타난다). 또한 종A가 종 B에 비해 생태적으로 중요한 종이기 때문에 보전비율을 높이고 싶다면, 모의3에서 종A의 가중치를 0.1 상향조정, 종B의 가중치를 0.1 하향조정할 수 있다. 결과적으로 모의3에서는 종A의 보전비율이 모의2에 비해 16.6% 증가하여 의사결정자가 만족할 것으로 예상할 수 있다.

**2. 시범적용2: 기후변화영향에 대한 용도계획**

환경계획 중 국가기후변화적응계획과 같이, 다양한 기후변화 영향을 최소화하고 이에 적응할 수 있는 공간의 구성을 결정하는 부분에 대해 모의하였다. 이를 위해 개발지, 농경지 각각에 특히 부정적인 영향을 미칠 수 있는 기후변화 영향 C, D의 공간분포도를 가상으로 작성하였다(Table 6). 또한 각 기후변화 영향이 발생했을 때 토지이용 유형에 따라 발생할 수 있는 피해비용 역시 가상으로 작성하였다(Table 7 and 8). 실제 기후변화 취약성평가에서는 기후변화 시나리오가 진행되었을 때, 현재의 토지이용을 기준으로 발생할 수 있는 피해비용을 평가하며 (MOE, 2017), 이를 종합하여 대상지의 토지이용별, 기후변화영향별 피해비용 표를 작성할 수

있다. 그러나 본 연구에서는 가상의 공간을 대상으로 하기 때문에 피해비용을 산정하는 구체적 과정을 생략하였으며 가상의 값을 적용하였다는 한계가 있다. 실제의 대상지에 정량적 계획모델을 적용하는 경우에는 현재의 토지이용을 입력 자료로 활용함으로써 전환의 최소화를 별도의 목적으로 설정하는 예가 많다.

**Table 6.** Climate change impact of C and D



**Table 7.** Damage costs of impact C  
(unit: 1,000,000won)

Categories	High impact	Medium impact	Low impact
Urban	10	5	1
Agricultural	5	3	2
Natural	1	1	1

**Table 8.** Damage costs of impact D  
(unit: 1,000,000won)

Categories	High impact	Medium impact	Low impact
Urban	4	3	2
Agricultural	7	4	2
Natural	1	1	1

1회 모의로 100개의 토지이용시나리오가 작성되었으며 그 중 대표적인 시나리오 세 가지를 선정하였다(Table 9). 각 시나리오는 개발지, 농업지, 자연지로 구성되며 각 면적은 동일하다. 시나리오1은 100개의 토지이용시나리오 중 영향C에 대한 피해비용이 가장 적은 안이며, 시나리오2는 영향D에 대한 피해비용이 가장 적은 안이다. 반면에 시나리오3은 시나리오1, 2보다 영향C, D에 대한 피해비용은 각각 더 높으나 총

비용은 더 적다. 이와 같이 정량적 계획모델을 통해 도출된 100개의 시나리오는 모든 항목에서 월등히 좋은 시나리오가 존재하기 보다는, 한 가지 항목에서 이익을 얻으면 다른 한 가지 항목에서는 손해를 보는 관계에 있는 다양한 선택지에 해당한다(유사한 모델을 적용한 연구들에서는 Pareto-optimal solution 혹은 Non dominated solutions라고 표현함).

계획가 혹은 관련 이해관계자들은 여러 토지이용시나리오의 비용수준과 토지이용의 공간적 패턴을 비교하며 협의할 수 있다. 예를 들어, 기후변화 영향C에 대한 신뢰도가 높은 반면 영향D는 불확실성이 높다면 시나리오1이 이상적인 대안이 될 수 있다. 또는 총 비용의 수준과 실제 지역의 여건 등을 고려하여 시나리오3 혹은 다른 시나리오를 선택할 수도 있다.

**Table 9.** Land-use scenarios considering the climate change impact  
(single running, unit: 1,000,000won)

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Map			
Legend			
Cost C	665	825	758
Cost D	978	841	870
Total cost	1,643	1,666	1,628

본 연구에서는 정량적 계획모델에 대한 독자의 이해를 돕기 위해 복잡한 실제 공간보다는, 구동원리와 결과를 명확하게 보여줄 수 있는 단순한 가상의 공간을 대상으로 시범적용 하였다. 그러나 이것은 실제 의사결정자가 정량적 계획모델의 결과를 다양한 측면에서 분석하고 그 의견을 피드백하는 과정을 보여주기 어렵다는 한계가 있다. 따라서 향후 연구에서는 실제 대상지에 정량적 계획모델을 적용하고, 관련 의사결정

자와 함께 대상지의 현안을 해결하는 과정을 제시함으로써 이해를 도울 필요가 있다(Janssen and Herwijnen, 2008). 또한 2010년 이후부터는 컴퓨터 연산능력의 고도화로 인해, 관련 선행연구에서는 30m에서 1km에 이르는 다양한 해상도와, 지역적 수준에서 도시 수준에 이르는 다양한 공간범위에서 최적화 모델을 적용하고 있으므로(Yoon et al., 2017; Eikeboom et al., 2015; Zhang and Huang, 2015; Porta et al., 2013), 이를 뒷받침 할 수 있을 것으로 기대된다.

#### IV. 결 론

환경계획은 경제성 논리 하에 훼손되었던 국토의 환경을 보전하고, 더 나아가 지속가능성을 실현하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 설정되었던 다양한 목표와 전략 등이 효과를 발휘할 수 있는가는 실제 공간을 어떻게 변화시켜 나가는가, 즉 환경계획의 공간화에 달려있다. 그럼에도 현 시점에서 관련 방법론이 미흡한 실정이므로, 본 연구에서는 정량적·객관적으로 환경계획을 공간화 할 수 있는 계획모델을 제시하였다. 또한 해당 모델의 이해를 돕기 위하여 두 가지 구체적인 사례를 선정하여 적용결과를 도출하였다. 제안된 정량적 계획모델은 Figure 2에 제시된 구조도 중 목표, 평가 부분을 수정함으로써 사례적용에서 다루지 않은 다양한 환경계획의 공간화에 역시 적용될 수 있다.

정량적 계획모델에서 도출된 결과는 최종적인 결과, 또는 기존의 정성적 계획 과정을 대체하는 개념으로 보기는 어렵다. 그보다는 기존의 정량적·정성적인 계획과정을 지원하기 위한 도구로서 필수적으로 충족해야 하는 환경계획의 목표에 따라 다양한 이해관계자의 선호도를 공간화한 초안(draft)을 작성하는 도구(Yoon et al., 2017), 또는 환경계획의 목표를 실현가능한 범위 내로 조정하기 위한 도구로서 이해할 필요가 있다. 계획가는 해당 초안을 기반으로 다양한 지

식, 추가적 분석과 결합함으로써 보다 구체적이고 합리적인 환경계획을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

- Bae, M. 2017. A Study on Environmental Conservation Plan Based on Spatialization Method in Local Governments. *Environmental Policy* 25(2): 25-60.
- Cho, H.J. · Kim, D.H. · Shin, M.S. · Kang, T. and Lee, M. 2015. Predicting the Goshawk's habitat area using Species Distribution Modeling: Case Study area Chungcheongbuk-do, South Korea. *Korean J. Environ Ecol.* 29(3): 333-343.(In Korean)
- Choi, H.S. and Kwan, Y.H. 2009. Improving of Planning System for Sustainable Urban Development: Focus on Introducing Environmental and Ecological Planning. *Environmental Policy* 8(3): 27-51.
- Eum, J.H. 2016. Vulnerability Assessment to Urban Thermal Environment for Spatial Planning: A Case Study of Seoul, Korea. *J. KILA* 44(4): 109-120.(In Korean)
- Kim, E.Y. · Jeon, S.W. · Song, W.K. and Kwak, J.Y., Lee, J. 2012. Applilcation of ECVAM as a indicator for monitoring national environment in Korea. *Environmental Policy* 11(2): 3-16.(In Korean)
- Kim, H.J. and Cho, S.K. 1998. Applicaton of Hemeroby for Environmental Assessment with Environmental Planning: Focused on the Case "LG Village". *Kor. J. Env.* 12(3): 253-258.(In Korean)
- Kim, J.S. and Park, S.Y. 2017. Landslide susceptibility mapping using ensemble FR and LR models at the Inje area, Korea. *The*

- Korea Society For Geospatial Information System 25(1): 19-27.(In Korean)
- Kim, C.S. · Lee, Y.D. and Lee, H.W. 2009. A case study of calculating flood inundation area by HEC-GeoRAS. Korean Society of Disaster & Security 2(4): 43-48.(In Korean)
- Kim, H. · Lee, D.K. · Mo, Y. · Kil, S. and Park, C., Lee, S. 2013. Prediction of landslides occurrence probability under climate change using MaxEnt model. Journal of Environmental Impact Assessment 22(1): 39-50.(In Korean)
- Kim, T.H. 2015. Linking and Utilizing Urban, Environmental, Disaster Prevention Spatial Data for a Climate Change Adaptation Spatial Planning. Environmental Policy 14(1): 85-112.
- Lee, W.S. An Evaluation of Natural-Ecological Function for Planning and Management on Forest. J. KILA 39(5): 1-11.
- Ministry of Environment. 2017. Developemnt of Economic Assessment Technique for Climate Change Impact and Adaptation Considering Uncertainties. R&D report(Development of technology in integrated management of climate change adaptation)(In Korean)
- Mo, Y.W. · Park, J.H. · Son, Y.H. and Lee, D.K. 2016. Technical Articles: Eastablishment of additional protected areas and applying payment for ecosystem services(PES) for sustainability of Suncheonman-Bay. The Korea Society of Environmental Restoration Technology 19(1): 171-184.(In Korean)
- Mo, W.Y. · Lee, D.K. · Kim, H.G. · Baek, G.H. and Nam, S.J. 2013. Efficient establishment of protected areas in Pyoungchang county, Kangwon province to support spatial decision making. The Korea Society of Environmental Restoration Technology 16(1): 171-180.(In Korean)
- Park, H. · Lim, J. · Lee, J. and Lee, G. 2017. Predicting the potential distributions of invasive species using the Landsat imagery and MaxEnt: Focused on “*Ambrosia trifida* L. var. *trifida*” in Korean Demilitarized zone. The Korea Society of Environmental Restoration Technology 20(1): 1-12.(In Korean)
- Park, H.C. · Lee, J.H. and Lee, G.G. 2014. Predicting the suitable habitat of the *Pinus pumila* under climate change. Journal of Environmental Impact Assessment. 23(5): 379-392.(In Korean)
- Yoon, E.J. and Lee, D.K. 2017. Basic study on spatial optimization model for sustainability using Genetic Algorithm: Based on literature review. The Korea Society of Environmental Restoration Technology 20(6): 103-119.(In Korean)
- Lee, Y.H. · Hong, S.H. · Na, C.S. · Sohn, S.I. · Kim, M.H. · Kim, C.S. and Oh, Y. 2016. Predicting the suitable habitat of *Amaranthus viridis* based on climate change scenarios by MaxEnt. Korean Journal of Environmental Biology 34(4): 240-245.(In Korean)
- Korean Environment Institute. 2017. A study on development of evaluation indicators for the development-environmental plan linkage system(In Korean)
- Duan, H.F. · Li, F. and Yan, H. 2016. Multi-objective optimal design of detention tanks in the urban stormwater drainage system: LID implementation and analysis. Water Resour. Manag. 30: 4635-4648.
- Eikelboom, T. · Janssen, R. and Stewart, T.J. 2015. A spatial optimization algorithm for geodesign. Landsc Urban Plan 144: 10-21.

- Janssen, R. and Herwijnen, M. 2008. Multiobjective decision support for land-use planning. *Environment and Planning B: Planning and Design* 35: 740-756.
- Neema, M.N. and Ohgai, A. 2010. Multi-objective location modeling of urban parks and open spaces: Continuous optimization. *Comput Environ Urban Syst* 34: 359-376.
- Porta, J. · Parapar, J. · Doallo, R. · Rivera, F. F. · Santé, I. and Crecente, R. 2013. High performance genetic algorithm for land use planning. *Computers, Environment and Urban Systems* 37: 45-58.
- Schwaab, J. · Deb, K. · Goodman, E. · Lautenbach, S. · Van Strien, · M.J. and Grêt-Regamey, A. 2017. Improving the performance of genetic algorithms for land-use allocation problems. *International Journal of Geographical Information Science* (DOI:10.1080/13658816.2017.1419249)
- Stewart, T.J. · Janssen, R. and Van Herwijnen, M. 2004. A genetic Algorithm approach to multi objective land use planning. *Computers & Operations Research* 31(4): 2293-2313.
- Yoon, E.J. · Lee, D.K. · Kim, H.G. · Kim, H. R. · Jung, E. and Yoon, H. 2017. Multi-objective land use allocation considering landslide risk under climate change: Case study in Pyeongchang-gun, Korea. *Sustainability* 9(12).
- Zhang, K. and Chui, T.F.M. 2018. A comprehensive review of spatial allocation of LID-BMP-GI practices: Strategies and optimization tool. *Science of the Total Environment* 621: 915-929.
- Zhang, W. and Huang, B. 2015. Soil erosion evaluation in a rapidly urbanizing city (Shenzhen, China) and implementation of spatial land-use optimization. *Environ Sci Pollut Res* 22: 4475-4490.
- Zitzler, E. · Laumanns, M. and Bleuler, S. 2004. A tutorial on evolutionary multiobjective optimization. Technical Report. Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Zurich, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology (ETH) ZURICH.