

유전알고리즘을 이용한 지속가능 공간최적화 모델 기초연구*
- 선행연구 분석을 중심으로 -

윤은주¹⁾ · 이동근²⁾

¹⁾ 서울대학교 협동과정 조경학 · ²⁾ 서울대학교 조경지역시스템공학부

Basic Study on Spatial Optimization Model for
Sustainability using Genetic Algorithm*

- Based on Literature Review -

Yoon, Eun-Joo¹⁾ and Lee, Dong-Kun²⁾

¹⁾ Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University,

²⁾ Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University.

ABSTRACT

As cities face increasing problems such as aging, environmental pollution and growth limits, we have been trying to incorporate sustainability into urban planning and related policies. However, it is very difficult to generate a 'sustainable spatial plans' because there are trade-offs among environmental, society, and economic values. This is a kind of non-linear problem, and has limitations to be solved by existing qualitative expert knowledge. Many researches from abroad have used the meta heuristic optimization algorithms such as Genetic Algorithms(GAs), Simulated Annealing(SA), Ant Colony Optimization(ACO) and so on to synthesize competing values in spaces. GAs is the most frequently applied theory and have been known to produce 'good-enough plans' in a reasonable time. Therefore we collected the research on 'spatial optimization model based GAs' and analyzed in terms of 'study area', 'optimization objective', 'fitness function', and 'effectiveness/efficiency'. We expect the results

* 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경정책기반공공기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.
(과제번호: 2016000210004)

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

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

Received : 8 December, 2017. **Revised** : 27 December, 2017. **Accepted** : 28 December, 2017.

of this study can suggest that ‘what problems the spatial optimization model can be applied to’ and ‘linkage possibility with existing planning methodology’.

Key Words : *Heuristic algorithms, Fitness function, Constraints, Effectiveness, Efficiency, Spatial optimization, Spatial planning*

I. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

전 세계가 주력했던 성장 중심의 도시정책은 고령화, 환경오염, 성장 한계 등의 문제를 초래하였고, 이를 배경으로 1987년 ‘환경과 개발에 관한 세계위원회(WCED)’ 이후 지속가능성의 개념이 공식적으로 사용되어 왔다. 국내에서 역시 많은 연구자가 도시계획 및 정책 등에 반영할 필요가 있는 지속가능성 관련 요소를 지속적으로 제시해 왔다(정은주 등, 2016). 그러나 이러한 지속가능성 관련 가치 및 요건을 제한된 공간에 동시적으로 반영하기 위한 계획방법에 대한 논의는 상대적으로 미흡하다. 지속가능성은 ‘환경’, ‘사회’, ‘경제’의 균형을 추구하는데, 각 가치의 상반된 특성상 발생할 수 있는 상충효과(Trade offs)와, 필요 면적, 외부 효과, 법적 규제 등의 요건을 함께 반영하기 위해서는 객관적·정량적 계획 도구(기존의 방법과는 차별화되는)가 필요하다(Neema and Ohgai, 2010; Gong et al. 2012; Haque and Asami, 2014; Eikelboom et al. 2015). 그러나 국내의 경우, 개별 입력 자료의 구축, 평가의 단계에서는 GIS, 통계 등의 정량적 도구를 이용하고 있으나, 이를 토대로 계획안을 도출하는 과정은 전문가·정책결정자 판단, 원칙 등과 같은 정성적 도구에 한정되어 있다.

국외에서는 공간계획에 다양한 가치를 객관적·정량적으로 반영하기 위하여 ‘다목적 최적화 알고리즘(Multi-objective Optimization)’에 주목하고 있다(Figure 1). 유전알고리즘(Genetic

Algorithms, GAs)은 그 중에서도 가장 역사가 길고, 빈도 높게 적용되는 방법론으로(Matthews et al. 2000; Stewart et al. 2004; Matthews et al. 2006; Cao et al. 2011; Cao et al. 2012; Porta et al. 2013; Cao and Ye, 2013; Zhang and Huang, 2015), 가치 간 상충효과가 반영된 계획안을 합리적 시간 내에 작성함으로써 즉각적 피드백 역시 가능하다는 장점이 있다. 국내에서는 트러스 혹은 돔 구조물, 회로의 2차원 배열, 최적의 모델 파라미터 결정 등 공학 분야에 GAs를 활용해 온 반면, 공간계획 관련 분야에서는 양평을 대상으로 토지이용계획에 GAs를 적용한 연구(박윤선 등, 2017) 외에는 거의 전무하다.1)

국외의 연구에서 제시하는 GAs에 기반한 공간계획 최적화 모델은 널리 알려진 SWAT(수문 분석), MaxEnt(종의 잠재서식지 분석)와는 달리, 특정 모델 패키지로 개발되어 공유되지 않다. 대부분 공간계획 최적화모델이 공통적으로 GAs를

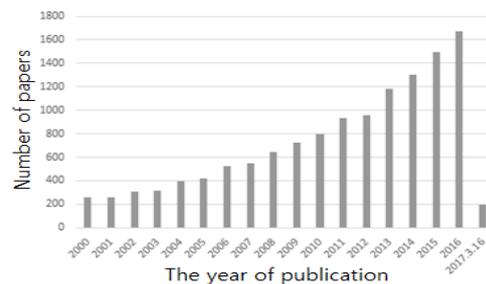


Figure 1. Published studies related to spatial optimization(Web of Science)

1) 다목적 최적화 알고리즘을 적용한 연구로 확대하면, 선거구의 구획에 파레토 담금질 기법(simulated annealing)을 적용한 연구가 있다(김명진, 2015).

이용하여 최적의 계획안을 탐색하나 해결하고자 하는 대상, 모델구축에 활용한 프로그래밍 언어, 모델의 기술적 고도화 부분은 각기 다르다. 이러한 특성으로 인하여 연구자가 공간계획 모델과 GAs 관련 선행연구를 수집 및 종합하는 데에는 상대적으로 많은 시간과 비용이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 GAs 기반 공간계획 최적화모델을 제시한 국외 연구를 수집 및 분석함으로써, 국내에 그 연구동향을 소개하고, 해당 모델이 ‘어떤 문제에 적용가능한지’ 혹은 기존의 평가 자료 방법론과 ‘연계 가능한지’를 판단하기 위한 기초자료를 제시하였다. 관련 연구 질문은 다음과 같으며, 수집된 연구의 분석역시 같은 측면에서 수행되었다.

첫째, 공간계획 최적화모델을 이용하여 어떠한 가치/문제를 반영 혹은 해결하였는가.

둘째, 공간계획 최적화모델 내에 해당 가치/문제를 어떠한 방법으로 구현하였는가.

셋째, 공간계획 최적화모델의 효과성 및 효율성이 어떠한 것인가.

2. 이론적 토대

GAs는 자연선택(Natural selection)에 기초하여 광역적 최적해(Global optimum)를 찾는 휴리스틱 알고리즘이다. GAs 작동원리는 초기해의 생성(Initialization), 적합도 값 평가(Fitness value), 선택(Selection), 교차 및 변이(Crossover/Mutation)로 구분되는데, 해당 과정을 공간계획안에 적용한 개념도는 (Figure 2)와 같다. GAs는 적합한 대안에 수렴할 때까지 ‘② 적합도 값 평가 - ③ 선택 - ④ 교차 및 변이’의 과정을 반복한다. ‘② 적합도 값 평가’부분에서 다양한 가치와 문제 등이 모델 내에 반영되며, ‘③ 선택’ 부분에서는 가치 간의 상쇄효과를 고려하는 방법이 결정된다.

① 초기해 생성(Initialization): (Figure 2)에서 ‘1st iteration’을 생성하는 단계로 최적화의 시작점이다. 유전 알고리즘에서 한 세대는 n개의 대

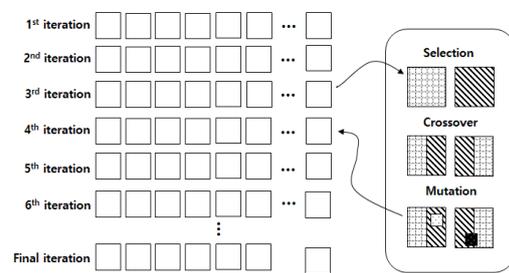


Figure 2. The process of GAs

안으로 구성된다.

② 적합도 값 평가(Evaluation): 반영하는 가치(해결해야 하는 문제)를 정량적 평가할 수 있는 수식을 ‘적합도함수(fitness function)’라 한다. ‘하나의 가치’에 ‘하나의 적합도 함수’가 대응되며 기존의 수식 및 평가자료 등을 이용할 수 있다. ①, ④ 단계에 의해 새롭게 생성된 각 대안은 이 적합도 함수의 값(이하 적합도 값)을 기준으로 평가된다.

③ 선택(Selection): 적합도 값에 근거하여 우수한 대안을 확률적으로 선택한다. 여러 가치를 동시에 반영하는 경우 하나의 대안에는 여러 적합도 값이 도출된다. 이 때 각 적합도 값을 합산하여 상대적 우수성을 판단하거나, 각 적합도 값으로 파레토 최적을 구할 수 있다. (Figure 3)은 파레토 최적 개념을 표현한 것으로, 각 점은 대안을, 각 축은 적합도 값을 의미한다. 파레

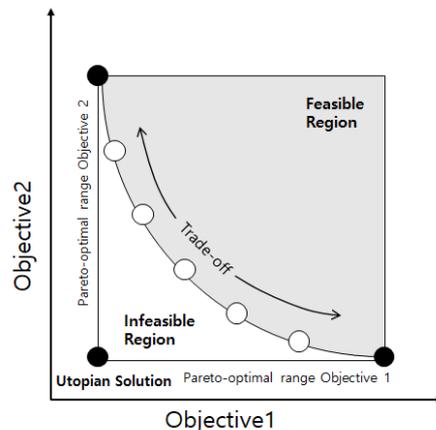


Figure 3. Pareto-optimality (Mattews et al. 2006 revised)

토 최적에 해당하는 대안은 우열을 가릴 수 없으며 하나의 측면에서 이익을 얻을수록 다른 측면에서는 손해가 발생하는 상쇄효과가 발생한다.

④ 교차/변이(Crossover/Mutation): 선택된 대안을 보다 나은 안으로 변화시키는 과정이다. 두 개의 대안이 지닌 속성을 교환하는 ‘교차’와 새로운 속성을 추가하는 ‘변이’의 개념을 적용한다.²⁾

II. 연구방법

1. 자료수집

본 연구의 목적은 GAs 기반 공간계획모델을 제시한 국외 연구를 수집 및 분석하는 데 있다. 자료 수집은 학술검색엔진인 ‘Web of Science (www.webofscience.com, 2017년 3월 16일 기준)’를 이용하였으며, 주요 검색어로서 ‘Land use Allocation’, ‘Genetic Algorithms’를 선택하였다. 공간최적화 분야에서 ‘Land use Allocation’은 국내의 토지이용계획 수준 외에도 다양한 공간규모에서의 용도 배분, 특정 시설물의 적지 선정, 보전계획 등을 포함하는 개념으로 활용되고 있다. 또한 GAs의 이론적 기반은 1975년에 이미 수립되었으나 공간계획에 활용되기 시작한 시기는 2000년 이후임을 고려하여 논문 검색 기간은 2000년에서부터 2017년 3월 사이로 제한하였으며, 89건의 논문이 수집되었다.

89건의 논문이 게재된 학술지의 분야 및 특성과, 논문의 초록·본문을 검토하여 아래의 조건을 만족하는 논문을 최종적으로 선정하였다. 첫째, 개별 논문에서 다루고 있는 주제와 목표가 공간계획과 직접적으로 관련 있어야 한다. 둘째, 주요 방법론으로 유전알고리즘 혹은 수정된 유전알고리즘을 적용하여야 한다. 셋째, 주요 결과가 공간 구성을 나타내는 도면으로 표출되어

야 하며 적합도 값 역시 제시되어야 한다. 넷째, 인용영향지수(impact factor)가 공시된 SCI/SCIE 급 전문 학술지에 게재된 논문이어야 한다.

위의 조건을 만족하는 논문을 선정하는 과정에서 알고리즘 개발 자체에 집중하는 컴퓨터 공학계열의 학회지가 제외되었고, 도시계획, 토지이용계획, 환경계획 및 관리, 지리정보시스템 등 응용 분야 학회지에 게재된 논문이 선택되었다. 이에 따라 관련 선행연구 중 40건을 최종 선정되었다.

2. 수집된 연구의 분석

수집된 연구에는 내용분석(content analysis)의 방법론을 적용하였다. 내용분석이란 데이터의 다양한 원문을 비교, 분석, 범주화함으로써 텍스트로부터 타당한 추론을 이끌어내기 위한 일련의 절차를 의미한다(Weber, 1990). 다만, 공간계획과 GAs를 다루는 연구를 대상으로 한 내용분석의 사례가 없고, 다루고자 하는 내용적 범위가 한정되어 있기 때문에 기존의 일반적인 내용 분석 틀을 수정하여 적용하였다.

① 연구대상지(Study area): 수집된 연구는 실제하는 공간에 대한 적용연구가 대부분이므로, 개별 연구의 연구대상지를 종합하였다. 또한 이와 함께 문제 및 적용가능 데이터의 종류, 모델의 연산 구조, 결과의 활용 등에 폭넓게 영향을 주는 분석단위에 대해서도 종합하였다.

② 최적화 목적(Optimization objectives): 수집된 연구는 공간계획 최적화 모델을 통해 해결하고자 하는 문제를 구체화 하여 ‘최적화 목적’으로서 설정하였다. 최적화 목적을 분류 및 종합함으로써, 지속가능성 개념을 구체적으로 어떻게 반영하고 있는지 유추할 수 있다. 이와 함께 공간계획 최적화 모델에서 최소/최대 면적, 법적 규제, 비용과 같이 실제 공간에 발생하는 여러 제약 사항을 어떻게 반영하였는지 분석하였다. 이 부분은 본 연구의 첫 번째 연구 질문인 “공간계획 최적화 모델을 이용하여 어떠한 가치

2) 주2. 교차는 기존의 속성을 이용하는 내삽 (exploitation)으로, 변이는 새로운 속성을 이용하는 외삽 (exploration)으로 이해할 수 있다.

/문제를 반영 혹은 해결하였는가.”에 대한 답을 탐색하는 과정에 해당한다.

③ 적합도함수(Fitness function): 수집된 연구에서 설정된 ‘최적화 목적’은 공간계획 최적화 모델 내에서 ‘적합도함수(fitness function)’로 구현된다. 적합도함수는 공간 계획을 정량적으로 평가하는 방법으로, 본 연구는 이러한 적합도함수를 구축하는 방법에 따라 분류 및 종합하였다. 이 부분은 본 연구의 두 번째 연구 질문인 “공간계획 최적화 모델 내에 해당 가치/문제를 어떠한 방법으로 구현하였는가.”에 대한 답을 탐색하는 과정에 해당한다.

④ 효과성/효율성(Effectiveness/Efficiency): 수집된 연구에서는 공간계획 최적화 모델에서 도출된 계획안이 당초 설정된 ‘최적화 목적’을 달성하였는지를 평가하는 과정과, 더 나아가 계획안을 보다 효과적으로 활용하기 위한 추가적인 기법을 분석하였다. 본 연구는 수집된 연구에서의 표현과 동일하게 이 부분을 ‘효과성(effectiveness)’으로 분류하여 분석하였다. 또한 해당 연구결과를 도출하는데 소요되는 연산시간, 혹은 연산시간을 저감하기 위한 노력을 ‘효율성(efficiency)’ 측면에서 종합하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 연구대상지

동아시아에 속하는 14건(전체 연구의 35%)의 연구 모두 중국을 대상으로 하고 있다. 중국은 뉴타운과 같은 대규모 개발 사업과 빠른 도시화로 자연환경이 저해되고 있어 지속가능성을 반영하기 위한 방법론에 집중되기 때문인 것으로 판단하였다. 유럽에 속하는 연구 중에는 독특한 수 경관 등으로 공간계획에 고려해야 할 가치가 상대적으로 다양한 네덜란드를 대상으로 한 연구가 많았다. 중동에서는 대부분 이란 지역을 대상으로 하고 있으며, 그 외 대상지역 없이 최적화 기법에 집중하는 개념적 연구는 5건(Ho-

Table 1. Related research outline

Spatial unit			Study area			
Vector	Grid	etc.	East Asia	Europe	Middle East	etc.
19	19	2	14	11	7	8

lkammer and seppelt, 2007; Eldrandaly, 2010; Zhao et al. 2010; Karakostas 2017, etc.로 분류)이 있다(Table 1).

수집된 연구는 연구대상지를 작은 공간으로 구분하여 분석 및 용도 배분의 단위로 적용하였다. 상대적으로 작은 공간적 범위를 다루거나 특정 시설의 네트워크를 다루는 연구는 필지, 블록, 도로 등과 같이 실제 계획요소와 직접적인 연계가 가능한 벡터(vector)를 적용하는 경우가 많았다(19건, Table 1). 반면 광범위한 공간적 범위를 다루는 지역계획 혹은 국토계획의 경우에는 동일한 크기와 형태로 구분하는 그리드(grid)를 적용하는 경우가 많았다(19건, Table 1). 그리드 단위는 광범위한 규모의 계획에 활용되는 다양한 주제도를 종합할 수 있고, 공간의 분포패턴을 다루기가 쉽다는 점 외에도 연산과정에 대한 직관적인 이해가 용이하다는 장점이 있다.(Stewart and Janssen, 2014). 수집된 문헌은 벡터와 그리드 기반의 모델에 고르게 분포하고 있으며, 공간단위에 대한 언급이 없는 2건은 기타로 분류하였다(Table 1)

2. 최적화 목적

1) 최적화 목적(Optimization objective)
 유전알고리즘을 다루는 선행연구들은 공통적으로 최적화 목적을 크게 부가적 목적(Additive objective)과 공간적 목적(Spatial objective)로 구분하여 적용하고 있다. 또한 연구대상지의 특성 및 문제에 따라 목적들을 다르게 조합하여 반영하였는데, 일부는 이질적인 목적을 통합적으로 반영하였다는 측면에서 지속가능성의 달성을 직접적으로 언급하였다(Chen and Chang, 2006; Cao et al., 2011; Cao et al. 2012; Cao and Ye,

Table 2. Additive objectives for optimization model

Year	Author	Suitability	Environment	Society	Economic
08'	Datta et al.		carbon/soil erosion		economical benefit
09'	Parolo et al.		species	landscape, road	
10'	Zhang et al.			accessibility	conversion cost
11'	Cao et al.			accessibility	conversion cost
	Roberts et al.		landscape ecology		
12'	Ahmadi et al.		pollutant	employment	crop yield
	Cao et al.	○		nimbi	GDP, conversion cost
	Gong et al.		ecological service		economical benefit
	Huang & Zhang		pollutant	population, employment	
	Panagopoulos et al.		water consumption		crop yield
13'	Cao and Ye	○		accessibility	
	Yazdi et al.			safety(disaster)	measurement cost
14'	Jankowski et al.		radiation		development cost
	Shaygan et al.	○	soil erosion		economical benefit
	Yuan et al.		carbon		GDP
	Zhang et al.		pollutant		GDP, conversion cost
15'	Eikelboom et al.		soil erosion, natural value		crop yield
	Beheshtifar et al.			equity	travel/conversion cost
	Mi et al.		green area, soil erosion		economical benefit
16'	Li & Parrott	○	natural value		economical benefit
	Mohammadi et al.	○	green area	land use types	FAR
	Zhang et al.			accessibility	development cost

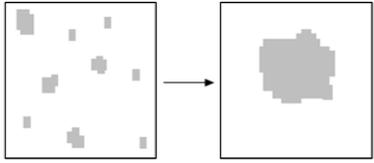
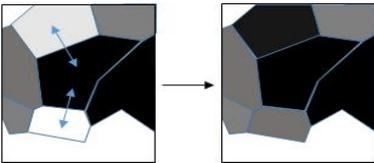
2013; Morio et al. 2013; Li and Parrott, 2016; Mohammadi et al. 2016). 지속가능성의 맥락에서 ‘환경’, ‘사회’, ‘경제’의 어느 한 가지에 치우치지 않고 각 가치를 균형 있게 달성하는 것이 중요한데, 각 가치의 상반된 특성으로 인해 기존의 정성적 접근방법으로 공간계획에 반영하는데 한계가 존재하였다.

예를 들어, 생물종 다양성을 증진을 목표로 공간계획을 한다면, 그 달성 수준에 따라 개발 규제, 산지 관리 등으로 인한 비용 역시 달라지는 데, 계획안 작성의 과정에 이를 정량적·반복적으로 피드백하기 위한 방법론이 미흡하였다. 이에 따라 일부 선행연구에서는 이러한 기존 접근방식의 한계점을 GAs를 이용하여 해결하고, 지속가능성을 달성했음을 강조하였다. 전체적

으로 수집된 연구의 85%(34/40건)이 지속가능성의 환경, 사회, 경제 중 2개 이상의 가치를 ‘최적화 목적(optimization objective)’로 설정하여 종합적으로 반영하였다. 따라서 본 연구에서는 수집된 연구의 부가적 목적을 지속가능성의 개념에 따라 환경, 사회, 경제 측면으로 구분하여 정리하였다.

지속가능성 개념을 직접 언급하지 않은 연구도 다수 있었으나, 공통적으로 ‘다목적’(Multi objective)을 강조할 뿐만 아니라, 다양한 논문 구조의 선행연구를 분석하기 위한 공통의 분석틀이 필요하기 때문이다. 먼저 환경적 측면에서는 ‘자연성 혹은 자연지역의 최대화(Eikelboom et al. 2015)’, ‘토양침식의 최소화(Datta et al. 2008; Eikelboom et al, 2015)’, ‘오염물질의 최

Table 3. Spatial objectives for optimization model

Categories	Concept	References
Compactness		Chen et al. 2000; Eldrandaly, 2010; Roberts et al. 2011; Porta et al. 2013; Fotakis and Sidiropoulos, 2014; Shaygan et al. 2014; Yuan et al. 2014; Eikelboom et al. 2015; Liu et al. 2015a; Liu et al. 2015b; Li and Parrott, 2016; Mohammadi et al. 2016; Karokostas, 2017
Compatibility		Zhang et al. 2010; Cao et al. 2011; Ahmadi et al. 2012; Cao et al. 2012; Huang and Zhang, 2012; Cao and Ye, 2013; Haque and Asami, 2014; Shaygan et al. 2014; Zhang et al. 2014; Beheshtifar et al. 2015; Mohammadi et al. 2016; Karokostas, 2017

소화(Ahmadi et al. 2012; Huang and Zhang, 2012)’ 등과 같은 기준에 전통적으로 다루었던 가치 외에도 ‘탄소 저장량의 최대화(Datta et al. 2008)’, ‘생태계 서비스의 최대화(Gong et al. 2012)’등으로 다양하게 확대될 수 있음을 보여 주고 있다. 사회적 측면에서는 ‘형평성의 최대화(Beheshtifar et al. 2015)’, ‘접근성의 최대화(Zhang et al. 2010; Cao et al. 2011; Cao et al. 2012; Cao and Ye, 2013)’가 가장 빈도 높게 반영되었으며 특정 용도배분과 관련하여 ‘고용의 최대화(Ahmadi et al. 2012)’, ‘수용인구의 최대화(Huang and Zhang, 2012)’를 반영하거나, 지역의 지형적 특수성을 반영하여 ‘재해위험의 최소화(Yazdi et al. 2013)’를 반영하였다. 경제적 측면은 수집된 연구에서 가장 빈도 높게 반영되었는데(Datta et al., 2008; Cao et al. 2011; Eldrandaly, 2010; Fotakis and Sidiropoulos, 2014; Jankowski et al. 2014; Karokostas, 2017, etc. Table 2참조) 이것은 경제적 비용의 최소화 혹은 이익의 최대화 등이 공간계획안의 현실성을 제고하기 위해 필수적으로 고려되어야 하는 부분인 동시에, 환경적·사회적 측면과 대표적인 상쇄 관계에 있기 때문으로 판단하였다.

그 외에 수집연구 중 9건은 ‘적합성의 최대화(Chen et al. 2000; Cao et al. 2012; Cao and Ye, 2013; Porta et al. 2013; Shaygan et al. 2014; Li

and Parrott, 2016; Liu et al. 2015a; Liu et al. 2015b; Mohammadi et al. 2016)’를 부가적 목적으로 반영하였는데, 대부분의 연구에서 적합성을 판단하는 데에는 인구의 분포, 지형 및 토양 특성, 현재의 토지피복, 보전가치 등 환경, 사회, 경제적 측면을 종합적으로 고려하므로 별도로 구분하여 정리하였다(Table 2).

반면 공간적 목적은 각 계획요소의 공간적 패턴 혹은 분포를 조절하기 위하여 추가적으로 설정되는 것이나, 간접적으로는 특정 용도와의 접근성, 형평성, 큰 규모의 자연지역 확보, 관리의 용이성 등과 같은 지속가능성의 개념과 간접적으로 연계되어 있다(Cao et al. 2012; Li and Parrott, 2016). 수집된 연구 중 25건의 연구에서 공간적 목적을 최적화 목적 중 하나로 설정한 것으로 나타났다. 이 중 12건의 연구는 공간적 패턴과 함께 인접한 용도와의 외부효과를 고려하는 ‘정합성(compatibility)의 최소화’로서 반영하였다. 공간적 목적은 경관생태학 개념에 근거하여 개념적으로 컴팩트니스(compactness)와 연결성으로(contiguity)로 구분되나, 실제로는 적은 둘레의 형태를 선호하는 컴팩트니스로 통합하여 적용되고 있다(Table 3).

2) 제약요건(Constraint)

수집된 연구 중 35%(14/40건)가 최적화 목적

Table 4. Constraints for optimization model

Categories	References
Minimum/Maximum area	Datta et al. 2008; Karamouz et al. 2010; Yuan et al. 2011; Gong et al. 2012; Shaygan et al. 2014; Zhang et al. 2014; Liu et al. 2015a; Mi et al. 2015
Spatial range for each land use type	Datta et al. 2008; Shaygan et al. 2014; Mi et al. 2015
Fixed areas	Parolo et al. 2009; Panagopoulos et al. 2012; Yuan et al. 2011; Zhang et al. 2014; Li and Parrott, 2016; Liu et al. 2015a
Conversion ratio	Yuan et al. 2011; Haque and Asami, 2014; Zhang et al. 2016
Maximum cost	Yim et al. 2011

외에 그 외에 대상지 내에서 기본적으로 만족시켜야 하는 조건은 제약요건(constraints)으로서 반영하였다. 해당 연구 중 용도별 최소-최대면적을 제한한 연구와 법적·사회적으로 변경이 불가능한 지역을 최적화에서 제외한 연구가 가장 많았으며, 그 외에 각 용도별로 지형과 토양 특성에 따른 입지를 제한하거나 전환되는 면적 혹은 전환에 소요되는 비용을 일정 범위내로 제한한 연구가 있었다(Table 4). 위에서 언급한 최적화 목적이 최소화/최대화의 방식으로 조금 더 나은 대안을 탐색할 수 있도록 한다면, 제약요

건은 탐색의 범위를 사회·경제적으로 허용 가능한 범위 내로 제한하는 효과가 있다. 이것은 GAs에 기반 한 공간계획 최적화 모델의 실효성을 높이는 데에도 기여할 것으로 판단하였다.

3. 적합도 함수

최적화 목적은 공간계획 최적화모델에서 적합도함수(fitness function)로 표현되는데, 이것은 모델에서 최적의 계획안을 탐색할 때 방향설정의 기준인 동시에, 최적화 목적 측면에서 각 계획안을 평가하여 우열을 판단하는 기준이기도 하다. 또한 공간계획 최적화 모델은 각 최적화 목적에 대응하는 적합도 함수만 구명한다면 기본적인 형태로 구축 가능하다. 적합도함수는 계획안의 구성에 따라 전체 대상지가 얻는 이익이나 비용을 평가하는데, 일반적으로 수익 (1)과 같이 표현된다. 전체 대상지는 벡터 혹은 그리드로 표현되는 작은 공간단위로 구분되며, 각 공간단위별 이익/비용인 α_{uk} 를 도출한 다음 전체 대상지에 대해 합산한 f_{OBJ_o} 의 값을 판단기준으로 적용한다.

$$f_{OBJ_o} = \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^K \alpha_{uk} x_k \quad \text{수식 (1)}$$

U=공간단위의 수, K=계획유형(용도 등)의

Table 5. Fitness function based on look-up table

		Method for loop-up table			
		Statistic	Expert	Related research	GIS
Environment	Nature value	-	-	Li and Parrott, 2016	-
	Carbon	-	-	Yuan et al. 2014	-
Economy	Crop yield	Karamouz et al. 2010	-	-	Panagopoulos et al. 2012
	GDP	Zhang et al. 2014 Li and Parrott, 2016	-	Yuan et al. 2014	Zhang et al. 2014
	Conservation cost	Li and Parrott, 2016	Zhang et al. 2010 Liu et al. 2015a Li and Parrott, 2016	-	-
	Measurement cost	Yazdi et al. 2013	Yazdi et al., 2013	Yazdi et al. 2013	-

Table 6. Fitness function based on model coupling

Objectives		Model	References
Environment	Water quality	load-resistance model(Mays, 1989)	Ahmadi et al. 2012
		ECM model	Huang and Zhang 2012
		Revised ECM model(+rainfall, topography) (Liu et al. 2009; Ding et al. 2010)	Zhang et al. 2014
	Run off	MIKE-11 (Danish Hydraulic Institute)	Yazdi et al. 2013
Society	Accessibility	Marginal benefit of improving accessibility (Mansfield and Yohe 1988)	Zhang et al. 2016
		Accessibility (Wang and Tang 2013)	
		Inevitable of accessibility (Wang and Tang 2013)	
Economy	Crop yield	Crop yield model (Graham and Sepaskhah 2004)	Karamouz et al. 2009; 2010
		SWAT	Panagopoulos et al. 2012
	Irrigation	Cropwat(FAO 1999)	Karamouz et al. 2010
		SWAT	Panagopoulos et al. 2012

수, O=목적의 수 또한 수집된 연구 중 5건은 수식 (2)와 같이 최적화 목적에 대한 목표치(I_o)를 이용하여 f_{OBJ_o} 를 표준화한 값 판단기준으로 적용하였는데, Goal programming이라 하였다 (Cao et al. 2012; Cao and Ye, 2013; Eikelboom et al. 2015; Li and Parrott, 2016; Mohammadi et al. 2016). 이 방법은 목표치에 가까운 계획안과 그렇지 않은 계획안과의 격차를 확대하는 방식으로 사용자의 선호도를 반영할 수 있다는 장점이 있다.

$$f_{OBJ} = \sum_{o=1}^O \alpha_o \left[\frac{f_{OBJ_o} - I_o}{T_o - I_o} \right]^p \text{ 수식 (2)}$$

O=목적 수, α_o 는 목적별 가중치, f_{obj_o} =적합도 값, I_o =최고값(ideal valu/reference point), T_o =가능한 최저값(worst value) 해당 α_{uk} 혹은 f_{OBJ_o} 을 도출하기 위해 적합도함수를 구성하는 방법은 위의 ‘최적화 목적’ 부분과 동일하게 부가적 목적(additive objective)와 공간적 목적(spatial objective)로 구분하여 분석하였다.

1) 부가적 목적(Additive objective)

환경, 사회, 경제 측면에서 설정된 부가적 목적에 따라 각 공간단위별 α_{uk} 혹은 f_{OBJ_o} 를 도출하는 적합도 함수는 사전에 look-up table을 작성하여 색인하는 방법과, 기존에 신뢰도가 검증된 타 모델과 연계하는 방법으로 구축될 수 있다. 첫 번째 방법인 look-up table을 활용하여 적합도함수를 구축하는 경우, 테이블의 구축과정에 상당한 시간과 비용이 소요될 수 있으나 공간계획 최적화모델의 구동에는 별도의 복잡한 계산이 요구되지 않는다는 장점이 있다. 수집된 연구 중 19건이 지역적 통계, 전문가 판단, 관련 연구의 인용, GIS기법을 이용하여 구축된 도면을 활용하여 look-up table을 구축하였다 (Table 5). 경제적 측면에서 지역 통계를 이용하는 경우가 가장 빈도 높게 나타났는데, 환경관련 조치 비용, 용도 전환에 따른 비용 혹은 GDP 상승률, 특정 여건에서의 작물 생산량 등을 산출함으로써 지역적 특수성을 반영하였다. 부가적 목적으로서 적합성을 고려한 연구는 일반적인 적지분석 과정과 유사하게 GIS기법으로 특정 용도에 대한 적합성 도면을 구축하였으며,

해당 도면을 참조하여 공간단위별 α_{uk} 를 산출하였다(Chen et al. 2000; Cao et al. 2012; Cao and Ye, 2013; Mohammadi et al. 2016; Zhang et al. 2016).

두 번째 방법으로서 타 연구에서 개발되어 신뢰도가 검증된 모델과 연계하여 수식 (1)의 α_{uk} 혹은 f_{OBJ_o} 을 도출하는 적합도함수를 구축하는 방법(이하 모델 커플링)은 전체, 환경, 사회, 경제의 광범위한 연구 영역을 전문적으로 다룰 수 있다는 장점이 있다. 수집된 연구 중 9건이 이러한 모델 커플링 방법을 적용하였는데(Table 6), 수질 혹은 유출량, 접근성, 농업생산량, 관개수량 등 환경, 사회, 경제 측면에서 고르게 활용되었다. 계획안을 정량적으로 평가하여 수식 (1)의 α_{uk} 혹은 f_{OBJ_o} 을 도출하는 방법이라면 어느 것이든 적합도 함수로서 활용될 수 있으며, 수집된 연구에서 역시 ‘지역적 통계’ 혹은 ‘전문가 판단’에서부터 ‘기존의 검증된 모델과의 연계’에 이르기까지 매우 다양하게 나타났다. 이와 같은 공간계획 최적화모델의 확장성과 응용성을 고려했을 때, 해당 모델은 지역적 특수성뿐만 아니라 각 연구 분야에서의 전문성을 담보함으로써 다양한 대상지의, 다양한 문제에 적용될 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

2) 공간적 목적(Spatial objective)

수집된 연구 중 18건은 공간 파편화를 직접적으로 반영하고 있으며, 이 중 14건이 ‘공간 파편화의 최소화’를 독립적인 적합도함수로서 설정하였고, 13건은 교차 및 변이 작동자(operator), 제약조건(constraint), 혹은 다른 부가적 목적의 적합도함수에 간접적으로 반영하였다(Table 7). 앞서 언급한 바와 같이 공간적 목적은 대부분 ‘컴팩트니스의 최대화’로 설정되는데, 계획안의 공간단위별 컴팩트니스를 평가하여 α_{uk} 를 도출하는 적합도 함수로서 Neighbor method를 가장 빈도 높게 적용하였다(Table 7). Neighbor method는 공간단위 A 주변의 8개의 그리드(Figure 4, Moor method) 혹은 폴리곤 중 A와 동일한 속성이 많을수록 컴팩트니스를 높게 평가하는 방법이다(Eldrandaly, 2010; Cao et al. 2011; Cao et al. 2012; Eikelboom et al. 2015; Li and Parrot, 2016; Karakostas, 2017). Neighbor method외에도 패치의 둘레 길이, 형태(둘레의 길이와 면적의 비)를 평가하는 수식 역시 컴팩트니스 평가하는 적합도함수로서 적용하였다(Chen et al. 2010; Porta et al. 2013; Liu et al. 2015) Roberts et al.(2011)은 패치의 연결성, 이질성 개념과 함께 공간자기상관성을 이용한 적합도함수를 적용하였다. 이와 같이 대부분의 적합도 함수는 계획안 공간패턴이 원형에 가깝게

Table 7. Methods to adjust spatial pattern

Method		References
Fitness function	Neighbor method	Cao et al. 2011; Cao et al. 2012; Eikelboom et al. 2015; Eldrandaly, 2010; Karakostas, 2017; Li and Parrott, 2016; Liu et al. 2015b; Mohammadi et al. 2016; Shaygan et al. 2014; Yuan et al. 2014
	Boundary length	Chen et al. 2010
	Landscape index	Liu et al. 2015a; Porta et al. 2013; Roberts et al. 2011
Operator	Crossover	Cao et al. 2011; Karakostas, 2017; Li and Parrott, 2016; Liu et al. 2015a; Liu et al. 2015b
	Mutation	Cao et al. 2011; Fotakis and Sidiropoulos, 2014; Li and Parrott, 2016; Liu et al. 2015a; Liu et al. 2015b
etc.	Modified function	Huang and Zhang, 2012
	Proximate analysis	Stewart and Janssen, 2014
	Constraints	Zhang et al. 2010

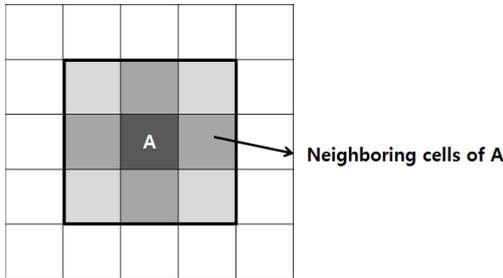


Figure 4. The concept of neighbor method

나타날수록 좋은 α_{uk} 혹은 f_{OBJ_o} 가 도출되었는데, 지속가능성의 다양한 측면, 즉 생물종 이동을 위한 선형적 연결성이나, 사회적 형평성을 고려한 균등한 공간적 분포를 다룰 수 있는 적합도 함수는 거의 없었다는 점은 한계점으로서 판단되었다.

4. 효과성과 효율성

수집된 연구 대부분이 공간계획 최적화 모델에서 지속가능성의 각 측면과 관련하여 설정된 최적화 목적이 최종적으로 도출된 계획안에서 어느 정도 달성되었는지 평가함으로써 공간계획 최적화 모델 혹은 도출된 계획안의 효율성을 논의하였다. 적합도함수는 최적화 목적의 달성 수준을 정량적으로 평가하기 위한 것이기 때문에 수집된 연구의 85%(35/40건)가 최종적으로 도출된 계획안 역시 적합도함수의 값(이하 적합도 값)을 기준으로 비교 및 평가함으로써 해당

연구가 당초 규명한 문제를 해결하였음을 강조하였으며, 효과성(effectiveness)으로 표현하였다. 구체적으로는 적합도 값을 기준으로 현재 수준과 비교했을 때 도출된 계획안을 적용함으로써 어느 정도 개선할 수 있는지 평가하거나, 도출된 여러 계획안을 비교평가 하였다. 뿐만 아니라 최적화 과정 내에서의 적합도 값의 변화를 분석함으로써 최적화 목적간의 상쇄효과를 정량적으로 평가하기도 하였다(Datta et al. 2008; Parolo et al. 2009; Chen et al. 2010; Karamouz et al. 2010; Zhang et al. 2010; Gong et al. 2012; Huang and Zhang, 2012; Yazdi et al. 2013; Haque and Asami, 2014; Stewart and Janssen, 2014; Eikelboom et al. 2015; Li and Parrott 2016; Zhang et al. 2016). 특히, 적합도 값이 화폐, 수량, 농업생산량, 토양유실량과 같이 해석가능한 단위로 도출한 경우에는(Karamouz et al. 2009; 2010; Yazdi et al. 2013; Shaygan et al. 2014; Panagopoulos et al. 2012; Zhang et al. 2014), 공간계획안에 대한 이해도가 높아질 뿐만 아니라 다분야의 전문가가 협의할 때에도 매우 효과적이다.

그 외에 도출된 공간 계획안을 적절하게 추가 분석함으로써 효율성을 개선한 연구가 있다. 구체적으로는 적합도 값의 변화에 따른 면적의 변화를 가시적으로 보여주거나(Datta et al. 2008; Haque and Asami, 2014; Yuan et al. 2014; Mi

Table 8. Methods to adjust spatial pattern

Coupling structure	Explanation	References
Cellular Automata->GAs	Analysing spatial scope	Huang and Zhang, 2012
GAs->Ant Colony Algorithm	Re-optimize the result of GAs	Mi et al. 2015
GAs->Game model	Select alternatives	Liu et al. 2015a
GAs->FRAGSTATS 4.1	Analysing spatial pattern of result	Liu et al. 2015b Yuan et al. 2014
GRASP->GAs->TS(LLTGRGATS) Greedy->GAs->TS	Initialization for GAs Re-optimize the result of GAs	Mohammadi et al. 2016
Multi-Agent System+GAs	Coordinate agents(government, residents) for GAs	Yuan et al. 2014 Zhang et al. 2010
Cellular Automata+ Bid-rent agent model->GAs	Analysing land use change, Analysing residential area choice trend	Zhao and Peng, 2010

Table 9. Researches focused on efficiency

Year	Author	Explanation	M*	R**
08'	Datta et al.	Initialization satisfy constraints	○	○
10'	Chen et al.	Comparison with Simulated Annealing(SA)		○
13'	Cao and Ye	Development of CGPGA(Coarse-Grained Parallel Genetic Algorithm)	○	○
	Porta et al.	Development of Multi core/cluster parallelism	○	○
14'	Stewart and Janssen	Comparison by model parameters		○
15'	Mi et al.	Development of GACA (GA coupled with ACA) Initialization satisfy constraints	○	○
16'	Mohammadi et al.	Comparison with LLTGRGATS and SVNS		○

* 연산시간을 저감하기 위한 방법론 제시

** 연산시간 비교를 통한 공간계획안의 효율성 강조

et al. 2015) 도출된 수십-수백개의 계획안(대안)을 몇 개의 대표적인 대안으로 축소하여 제시하였다(Yarzdí et al. 2013; Haque and Asami, 2014; Karakostas, 2017; Jankowski et al. 2014).³⁾

또한 다른 평가모델과 결합(model coupling, 적합도 함수부분은 앞부분에서 서술하였으므로 제외)하여 효율성을 개선한 연구가 8건 있었다(Table 8). 대부분이 공간계획 최적화 모델의 입출력자료를 타 모델의 입출력에 활용하는 형태였으며, 구체적으로는 도출된 계획안을 공간패턴 평가 모델을 이용하여 평가하거나(Yuan et al. 2014; Liu et al. 2015b), 또 다른 최적화 모델의 입력 자료로 활용한(GAs와 다른 특성의 최적화 과정을 한 번 더 적용함으로써) 연구가 있었다(Mi et al. 2015; Mohammadi et al. 2016). 이와 같이 수집된 연구는 적합도함수, 모델의 입출력 자료에 대한 추가 분석 부문에서 기존의 방법론과 적극 연계함으로써 모델의 효율성을 개선하였다. 이러한 점을 고려했을 때, GAs에 기초한 공간계획 최적화 모델은 기존의 방법을

대체하기 위한 방법이기 보다는 기존의 방법을 보완하는 측면에서 적용할 필요가 있다.

수집된 연구 중 7건은 위의 효과성과 함께, 연산시간 측면에서 공간계획 최적화 모델의 우수성을 강조하였으며, 효율성(efficiency)으로 표현하였다(Table 9). GAs와 같은 AI계열이 해답을 탐색하는 과정에서 소요되는 연산시간은 문제에 따라 급증할 가능성이 있다(Huang and Zhang, 2012). 또한 환경, 사회, 경제와 관련된 다양한 가치를 복합적으로 적용하여 계획안을 도출하는 경우 이용자가 결과를 사전에 예측하기 어렵기 때문에 반복적인 파라미터 조정을(피드백)을 통해 계획안을 원하는 방향으로 수정해야 하므로 연산시간이 매우 중요하다. 수집된 연구 중 4건의 연구는 연산시간 단축과 관련된 방법론을 제시하였는데, 병렬연산 이용한 연구(Cao and Ye, 2013; Porta et al. 2013), GAs의 각 단계(초기해의 구성, 교차, 변이 단계)를 개선한 연구 등이 있다(Datta et al., 2008).

IV. 결론

GAs에 기초한 공간계획 최적화모델의 특성을 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 공간계획 최적화모델은 빠른 도시화, 지형적 특수성 등으로 인해 지속가능한 공간계획이 요구되는 대상

3) 다목적 최적화는 '파레토 최적'에 따라 한 세대의 크기(수십-수백개)와 동일한 수의 non-dominated alternatives가 도출되어 몇 가지 안으로 축소는 과정이 요구된다. 계획안을 하위 그룹으로 구분하여 그룹별 대표안을 선정하거나, 공간단위별 유형별 할당된 빈도수로 종합하는 경우, 상쇄효과 그래프의 변곡점에 해당하는 계획안을 선정하는 경우가 있다.

지를 중심으로 활용되고 있다. 둘째, 대부분의 연구에서는 공간계획 최적화모델을 이용하여 상쇄효과가 발생할 수 있는 두 개 이상의 목적(최적화 목적, 환경, 사회, 경제적 측면과 연계)을 달성하고자 하였으며, 그 조합은 대상지의 특성에 따라 다양하게 나타났다. 셋째, 공간계획 최적화모델은 각 최적화 목적에 대응하는 적합도 함수만 규명한다면 기본적인 형태로 구축 가능하다. 적합도 함수는 지역의 통계자료, 전문가 판단, 기존의 모델과의 연계 등 다양한 방법을 통해 구성될 수 있으므로 응용성 및 확장성이 우수한 것으로 나타났다. 넷째, 대부분의 연구에서 당초 설정된 최적화 목적 측면에서 공간계획 최적화모델의 결과가 현재의 공간 혹은 기존의 계획안에 비해 효용성이 높은 것으로 나타났다. 또한 기존의 분석 및 평가 방법과 연계하거나 최적화 과정을 개선하여 효용성과 효율성을 증진하였다.

이렇듯 GAs를 이용함으로써 다양한 목적을 달성할 수 있는 계획안을 정량적·객관적으로 작성할 수 있는 모델을 구축할 수 있다. 일반적인 공간계획의 과정은 정량적 평가자료 및 다양한 이해관계자의 의견에 기초하여 초안을 작성하고, 이후 수정 및 토의를 반복해 나가는 과정으로 이루어진다. 공간계획에 적용되는 GAs는 이와 같은 일반적인 계획 과정을 자동화하여 수없이 반복하고, 그 과정에서 생성된 많은 대안들을 정량적으로 비교해 나감으로써 가장 좋은 계획안을 제공하는 역할을 한다. 따라서 여기에 필수적으로 요구되는 것은 알고리즘 상에서 ‘더 좋은 계획안’을 정량적으로 판단하는 기준(적합도 함수)이며, 다양한 공간단위 및 해상도, 제약조건 등은 알고리즘을 일부 수정함으로써 반영 가능하다.

구체적인 예를 든다면, 도시스케일에서 중장기적인 지속가능성을 위한 토지이용계획을 하는 것에서부터 (Cao et al. 2012; Zhang et al. 2014), 농경지의 필지 단위로 적절한 작물을 결

정하는 것(Karamouz et al. 2009), 소유역 단위로 비용 대비 유출량을 가장 크게 저감할 수 있는 LID 적용 계획(Giacomini and Joseph, 2017)에 이르기까지, GAs를 통하여 다양한 공간크기에서의 다양한 문제를 해결하는 것이 가능하다. 또한, 적합성 함수로서 GIS를 이용하여 구축한 다양한 형태의 적합성지도를 참조한 선행연구를 고려했을 때(Cao and Ye, 2013; Shaygan et al. 2014; Li and Parrott, 2016; Mohammadi et al. 2016), 국내에서 기존에 구축된 국토환경성 평가도, 생태자연도, 다양한 재해위험 평가도 및 기후변화 영향평가도 역시 연계 가능할 것으로 기대된다.

기존에는 공간계획에 고려되는 주제도가 정량적 방법론으로 구축되어 온데 반하여, 공간계획 자체는 전문가와 관련 이해관계자들에 의해 정성적인 방법론으로 작성되어왔다. 그러나 최근에는 장기적인 지속가능성, 기후변화 등 공간계획 시 고려해야 할 요소가 증가하고 있을 뿐만 아니라, 복합적으로 작용하기 때문에 공간계획을 정량적으로 지원할 수 있는 GAs 등의 최적화 알고리즘이 필요하다 (Caparros-Midwood and Dawson, 2015). 따라서 본 연구의 결과는 국내의 계획가 혹은 의사결정자의 GAs 이용 시, ‘적합도 함수와 같이 필수적으로 요구되는 부분’, ‘실제 활용 가능한 유사 선행연구’ 탐색 등에 유용한 기초자료로서 활용될 것으로 판단하였다.

그러나 한편으로는 모델의 결과는 설정된 적합도 함수와 제약조건만을 고려했을 때 ‘충분히 좋은 계획안’임을 고려할 필요가 있다. 즉 일반적인 모델인 그렇듯 공간계획 최적화모델 역시 실제 공간에서 나타나는 다양하고 복잡한 특성을 반영하는 데에는 한계가 존재한다. 따라서 공간계획 최적화 모델은 기존의 계획모델을 대체하기 보다는, 기존의 모델을 통해 계획안 작성이 어려운 경우에 다양한 선호도를 지닌 이해관계자가 수정해나갈 수 있는 계획안 혹은 시나

리오를 작성할 수 있는 도구로서 활용될 필요가 있다 (Stewart et al. 2004; Ligmann-Zielinska et al. 2008). 또한 공간계획 최적화 모델의 결과는 전체 대상지에 대한 적합도 값(수식 (1)의 f_{OBJ_o} 에 해당)에 근거하여 작성되므로 개별 공간 단위를 다루기 위해서는 관련 전문가 지식이나 기존의 계획 방법론을 통해 보완할 필요가 있다.

References

- Kim, M. J. 2015. Multiobjective optimization problems to redistricting plans. The geographical journal of Korea 49(2) : 173-185. (In Korean)
- Park, Y. S. · D. K. Lee · E. J. Yoon · Y. W. Mo and J. H. Leem. 2017. Land Use Optimization Using Genetic Algorithm-Focused on Yangpyeong-eup-. J. Environ. Impact Assess 26(1) : 44-67. (In Korean)
- Jung, E. J. · B. H. Jeong and J. M. Na. 2016. A study on the sustainability and resilience of city. Journal of The Korean Regional Development Association 28(4) : 87-108. (In Korean)
- Ahmadi, A. · M. F. Karamouz · A. Moridi and D. Han. 2012. Integrated planning of land use and water allocation on a watershed scale considering social and water quality issues. J Water Resour Plan Manag 138 : 671-681.
- Beheshtifar, S. and A. Alimoahmadi. 2015. A multiobjective optimization approach for location-allocation of clinics. Int Trans Oper Res 22 : 313-328.
- Cao, K. · M. Batty · B. Huang · Y. Liu · L. Yu and J. Chen. 2011. Spatial multi-objective land use optimization: extensions to the non-dominated sorting genetic algorithm-II. Int J Geogr Inf Sci 25 : 1949-1969.
- Cao, K. · B. Huang · S. Wang and H. Lin. 2012. Sustainable land use optimization using Boundary-based Fast Genetic Algorithm. Comput Environ Urban Syst 36 : 257-269.
- Cao, K. and X. Ye. 2013. Coarse-grained parallel genetic algorithm applied to a vector based land use allocation optimization problem: The case study of Tongzhou Newtown, Beijing, China. Stoch Environ Res Risk Assess 27 : 1133-1142.
- Caparros-Midwood, D. and S. B. R. Dawson. 2015. Optimised spatial planning to meet long term urban sustainability objectives. Computers, Environment and Urban Systems 54 : 154-164.
- Chen, H. W. and N. Chang. 2006. Decision support for allocation of watershed pollution load using grey fuzzy multi objective programming. J Am Water Resour Assoc 42 : 725-745.
- Chen, Y. · X. Li · X. Liu and Y. Liu. 2010. An agent-based model for optimal land allocation (AgentLA) with a contiguity constraint. Int J Geogr Inf Sci 24 : 1269-1288.
- Chen, W. · G. J. Carsjens · L. Zhao and H. Li. 2014. A spatial optimization model for sustainable land use at regional level in China: A case study for Poyang lake region. Sustainability 7 : 35-55.
- Datta, D. · C. M. Fonseca and K. Deb. 2008. A multi-objective evolutionary algorithm to exploit the similarities of resource allocation problems. J Sched 11 : 405-419.
- Ding, X. W. · Z. Y. Shen · Q. Hong · Z. F. Yang · X. Wu and R. M. Liu. 2010. Development and test of the Export Coefficient

- Model in the Upper Reach of The Yangtze River. *J Hydrol* 383 : 233 - 244.
- Duh, J. and D. G. Brown. 2007. Knowledge-informed Pareto simulated annealing for multi-objective spatial allocation. *Comput Environ Urban Syst* 31 : 253-281.
- Eikelboom, T. · R. Janssen and T. J. Stewart. 2015. A spatial optimization algorithm for geodesign. *Landsc Urban Plan* 144 : 10-21.
- Eldrandaly, K. 2010. A GEP-based spatial decision support system for multisite land use allocation. *Appl Soft Comput J* 10 : 694-702.
- Fotakis, D. · E. Sidiropoulos. 2014. Combined land-use and water allocation planning. *Ann Oper Res* 219(1) : 169-185.
- Giacomoni, M. H. · J. Joseph. 2017. Multi-objective evolutionary optimization and monte carlo simulation for placement of Low Impact Development in the Catchment Scale. *J. Water Resour. Plann. Manage* 143(9) : 04017053.
- Ghahraman, B. and A. R. Sepaskhah. 2004. Linear and nonlinear optimization models for allocation of a limited water supply. *J. Irrig. Drain. Eng* 124 : 138-149.
- Gong, J. · Y. Liu and W. Chen. 2012. Optimal land use allocation of urban fringe in Guangzhou.. *J Geogr Sci* 22 : 179-191.
- Haque, A. · Y. Asami. 2014. Optimizing urban land use allocation for planners and real estate developers. *Comput Environ Urban Syst* 46 : 57-69.
- Holzkämper, A. and R. Seppelt. 2007. A generic tool for optimising land-use patterns and landscape structures. *Environment Modelling & Software* 22 : 1801-1804.
- Huang, B. and W. Zhang. 2012. Sustainable land-use planning for a downtown lake area in central China: Multiobjective optimization approach aided by urban growth modeling. *J. Urban Plann. Dev* 140(2).
- Jankowski, P. · G. Fraley and E. Pebesma. 2014. An exploratory approach to spatial decision support. *Comput Environ Urban Syst* 45 : 101-113.
- Karakostas, S. M. 2017. Bridging the gap between multi-objective optimization and spatial planning: a new post-processing methodology capturing the optimum allocation of land uses against established transportation infrastructure. *Transp Plan Technol* 40 : 305-326.
- Karamouz, M. · A. Ahmadi and S. Nazif. 2009. Development of management schemes in irrigation planning: Economic and crop pattern consideration. *Trans A Civ Eng* 16 : 457-466.
- Karamouz, M. · B. Zahraie · R. Kerachian · A. Eslami. 2010. Crop pattern and conjunctive use management: A case study. *Irrig Drain* 59 : 161-173.
- Li, X. and L. Parrott. 2016. An improved Genetic Algorithm for spatial optimization of multi-objective and multi-site land use allocation. *Comput Environ Urban Syst* 59 : 184-194.
- Ligmann-Zielinska, A. · R. Church and P. Jankowski. 2008. Spatial optimization as a generative technique for sustainable multi-objective land-use allocation. *Int. J. Geogr. Inf. Sci* 22 : 601-622.
- Liu, Y. · W. Tang · J. He · Y. Liu · T. Ai and D. Liu. 2015a. A land-use spatial optimization model based on genetic optimization and game theory. *Comput Environ Urban Syst* 49 : 1-14.

- Liu, Y. · M. Yuan and J. He. 2015b. Regional land-use allocation with a spatially explicit genetic algorithm. *Landscape Ecol Eng* 11 : 209-219.
- Mansfield, E. and G. W. Yohe. 1988. *Microeconomics: Theory, applications*. New York: Norton.
- Matthews, K. B. · S. Craw · S. Elder · A. R. Sibbald and I. MacKenzie. 2000. Applying Genetic Algorithms to multi-objective land use planning. *Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference (GE CCO 2000)*
- Matthews, K. B. · K. Buchan · A. R. Sibbald and S. Craw. 2006. Combining deliberative and computer-based methods for multi-objective land-use planning. *Agric Syst* 87 : 18-37.
- Mays, L. W. 1989. *Reliability analysis of water distribution systems*, ASCE, Reston, VA.
- Mi, N. · J. Hou · W. Mi and N. Song. 2015. Optimal spatial land-use allocation for limited development ecological zones based on the geographic information system and a genetic ant colony algorithm. *Int J Geogr Inf Sci* 29 : 2174-2193.
- Mohammadi, M. · M. Nastaran and A. Sahebgarani. 2016. Development, application, and comparison of hybrid meta-heuristics for urban land-use allocation optimization : Tabu search , genetic , GRASP , and simulated annealing algorithms. *Comput Environ Urban Syst* 60 : 23-36.
- Morio, M. · S. Schädler and M. Finkel. 2013. Applying a multi-criteria genetic algorithm framework for brownfield reuse optimization: Improving redevelopment options based on stakeholder preferences. *J Environ Manage* 130 : 331-346.
- Neema, M. N. and A. Ohgai. 2010. Multi-objective location modeling of urban parks and open spaces: Continuous optimization. *Comput Environ Urban Syst* 34 : 359-376.
- Panagopoulos, Y. · C. Makropoulos and M. Mismikou. 2014. Decision support for agricultural water management. *Glob Nest J* 14 : 255-263.
- Parolo, G. · A. Ferrarini and G. Rossi. 2009. Optimization of tourism impacts within protected areas by means of genetic algorithms, *Ecol Modell* 220 : 1138-1147.
- Porta, J. · J. Parapar · R. Doallo · F. F. Rivera · I. Santé and R. Crecente. 2013. High performance genetic algorithm for land use planning. *Comput Environ Urban Syst* 37 : 45-58.
- Roberts, S. A. · G. B. Hall and P. H. Calamai. 2011. Evolutionary Multi-objective Optimization for landscape system design. *J Geogr Syst* 13 : 299-326.
- Shaygan, M. · A. Alimohammadi · A. Mansourian · Z.S. Govara and S.M. Kalami. 2014. Spatial multi-objective optimization approach for land use allocation using NSGA-II. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens* 7 : 873-883.
- Stewart, T. J. · R. Janssen and M. Van Herwijnen. 2004. A genetic algorithm approach to multiobjective land use planning. *Comput Oper Res* 31 : 2293-2313.
- Stewart, T. J. and R. Janssen. 2014. A multi-objective GIS-based land use planning algorithm. *Comput Environ Urban Syst* 46 : 25-34.
- Wang, F. and Q. Tang. 2013. Planning toward equal accessibility to services: A quadratic

- programming approach. *Environment and Planning B: Planning and Design* 40 : 195-212.
- Weber, R. P. 1990. *Basic content analysis*, Sage.
- Yazdi, J. · S. A. A. alehi Neyshabouri · M. H. Niksokhan · S. Sheshangosht and M. Elmi. 2013. Optimal prioritisation of watershed management measures for flood risk mitigation on a watershed scale. *J Flood Risk Manag* 6 : 372-384.
- Yim, K. K. W. · S. C. Wong · A. Chen · C. K. Wong and W. H. K. Lam. 2011. A reliability-based land use and transportation optimization model. *Transp Res Part C Emerg Technol* 19 : 351-362.
- Yuan, M. · Y. Liu · J. He and D. Liu. 2014. Regional land-use allocation using a coupled MAS and GA model: from local simulation to global optimization, a case study in Caidian District, Wuhan, China. *Cartogr Geogr Inf Sci* 41 : 363-378.
- Zhang, H. H. · Y. N. Zeng and L. Bian. 2010. Simulating multi-objective spatial optimization allocation of land use based on the integration of multi-agent system and genetic algorithm. *Int J Environ Res* 4 : 765-776.
- Zhang, W. · H. Wang · F. Han · J. Gao · T. Nguyen and Y. Chen. 2014. Modeling urban growth by the use of a multiobjective optimization approach : Environmental and economic issues for the Yangtze watershed , China. *Environ Sci Pollut Res* 21 : 13027-13042.
- Zhang, W. and B. Huang. 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.
- Zhang, W. · K. Cao · S. Liu and B. Huang. 2016. A multi-objective optimization approach for health-care facility location-allocation problems in highly developed cities such as Hong Kong. *Comput Environ Urban Syst* 59 : 220-230.
- Zhao, L. and Z.R. Peng. 2010. Integrated Bilevel Model to Explore Interaction Between Land Use Allocation and Transportation. *Transp Res Rec J* 2176 : 14-25.
- Web of Science: www.webofscience.com