

Research Paper

유전 알고리즘을 적용한 토지이용 최적화 배분 연구

- 양평군 양평읍 일대를 대상으로 -

박윤선 · 이동근 · 윤은주 · 모용원 · 임지훈

서울대학교 대학원

Land Use Optimization using Genetic Algorithms

- Focused on Yangpyeong-eup -

Yoonsun Park · Dongkun Lee · Eunjoo Yoon · Yongwon Mo · Jihun Leem

Seoul National University

요약 : 지속가능한 발전은 도시의 효율적인 개발과 경제, 사회, 환경적 측면의 보전을 목표로 하기 때문에 중요하다. 그러나 우리나라의 빠른 도시화로 경제적 발전은 이루었지만 자원의 비효율적인 배분현상을 경험하게 되었고 이는 토지이용 배분도 예외가 아니다. 토지이용 배분의 문제가 어려운 이유는 다양한 목적을 고려해야하기 때문이며 이는 다목적 최적화의 방법에서 그 해결책을 찾을 수가 있다. 본 연구에서는 생태적으로 보존이 잘 되어있으며 인구 증가가 일어나고 있는 경기도 양평지역의 양평읍과 그 일대를 대상지로 선정하였다. 그리고 넓은 공간 탐색에 유리하고 토지이용 배분의 문제에서 널리 사용되고 있는 유전 알고리즘을 사용하였다. 유전알고리즘(GA)는 더 좋은 자손을 얻기 위하여 염색체의 교차 및 돌연변이의 과정을 거치는 적자생존의 원리가 작용하는 진화의 단계가 그 출발점이다. 본 연구는 변이의 방식에 변화를 주었으며 공간적 목적, 토지이용 전환 최소화, 생태계 보전 최대화, 경제적 이익 최대화라는 네 가지 목적과 특정 토지이용의 면적제한과 고정지역 설정이라는 제약요건을 두고 최적 안을 도출해내었다. 생태적으로 보존시켜야 할 곳에는 시가지가 형성되지 않았고, 시가지 면적 증가율이 높은 결과는 최적화의 방향인 '경제적 이익의 최대화'라는 점과 상응하였다. 적합도 값이 최소인 지점이 수렴지점임을 고려했을 때, 1500세대 부근에서 최적화가 일어났음을 알 수 있었다. 본 연구의 결과는 양평읍과 그 일대에 적용시킬 수 있는 효과적인 지원방안을 마련하는데 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 도시계획, 토지관리, 진화 알고리즘

First Author: Yoonsun Park, Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Tel:+82-2-880-4885, E-mail: ysunparc@snu.ac.kr

Corresponding Author: Dongkun Lee, Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, +82-2-880-4875, E-mail: dklee7@snu.ac.kr

Co-Authors: Eunjoo Yoon, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University, E-mail: youn1@snu.ac.kr

Yongwon Mo, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University, E-mail: webzin12@gmail.com

Jihun Leem, Petroleum&Natural Gas Engineering Lab, Seoul National University, E-mail: dlawlgns11@snu.ac.kr

Received: 23 May, 2016. Revised: 26 December, 2016. Accepted: 28 December, 2016.

Abstract : Sustainable development is important because the ultimate objective is efficient development combining the economic, social, and environmental aspects of urban conservation. Despite Korea's rapid urbanization and economic development, the distribution of resources is inefficient, and land-use is not an exception. Land use distribution is difficult, as it requires considering a variety of purposes, whose solutions lie in a multipurpose optimization process. In this study, Yangpyeong-eup, Yangpyeong, Gyeonggi-do, is selected, as the site has ecological balance, is well-preserved, and has the potential to support population increases. Further, we have used the genetic algorithm method, as it helps to evolve solutions for complex spatial problems such as planning and distribution of land use. This study applies change to the way of mutation. With four goals and restrictions of area, spatial objectives, minimizing land use conversion, ecological conservation, maximizing economic profit, restricting area to a specific land use, and setting a fixed area, we developed an optimal planning map. No urban areas at the site needed preservation and the high urban area growth rate coincided with the optimization of purpose and maximization of economic profit. When the minimum point of the fitness score is the convergence point, we found optimization occurred approximately at 1500 generations. The results of this study can support planning at Yangpyeong-eup. a positive relationship between the perception of improving odor regulation and odor acceptance.

Keywords : Urban planning, land management, heuristic method, evolution algorithm

I. 서론

토지이용 계획은 지속가능한 발전의 일차적 목표라 여겨지고 있다(Cao et al, 2012). The World Commission on Environment and Development (WCED)(1987)에 따르면 지속가능한 발전이란 '미래세대의 필요와 욕구를 충족시킬 수 있는 용량을 저해하지 않고, 현재 세대의 필요와 욕구를 충족시키는 행위'이다. 하지만 지금까지 식량난 및 거주지 문제 해결 등 경제적 문제를 우선적으로 고려, 미래 세대를 위한 자연보호를 소홀히 하고, 지속가능한 발전을 간과하여 균형이 깨진 토지이용 계획이 이루어져 왔다(Morio et al, 2013). 이로 인하여 도시화와 자연자원 보호를 공간적으로 균형 있게 배분된 토지이용 계획이 요구되고 있다(Chen et al, 2015).

토지이용 배분과 관련한 연구들은 공통적으로 개별토지이용 단위가 이용자를 만족시킴과 동시에 전체적 토지이용 구성도 고려해야 한다는 점, 다양한 토지이용간의 경합 문제, 다양한 이해관계자들의 요구를 만족시켜야 한다는 점 등 다양한 목적을 지녀, 비선형의 문제로 복잡하고 해결하기 어려운 양상을 띠고 있다. 따라서 하나의 정확한 해를 구하기보다는

trade-off 해법을 얻을 수 있는 다목적 최적화 문제로 간주하여 그 해답을 구할 수가 있다(Ma and Zhao 2015).

최적화 기법은 오랫동안 복합적인 토지이용계획 해결을 위하여 사용되어 왔다. 1960년대에 Linear Programming(LP)최적화 모델이 도시계획 시스템 문제를 해결하는데 사용되었다(Guldman 1979; Aerts et al, 2003a). 그러나 선형모델의 단점은 1) 토지이용에서 중요하게 여기는 공간적인 상호작용 문제를 다룰 수 없어서 복잡한 도시문제를 다룰 수 없으며, 2) 다양한 목적을 고려하기 어렵다는 점이다(Stewart et al, 2004).

이러한 이유로 비선형 모델의 도입이 제안되었고 진화의 방식을 차용한 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA), 광역적 공간 탐색에 유리하고 물리적 현상을 모방한 담금질 기법(Simulated Annealing, SA), 새 군집을 모방한 개체 군집 최적화 방법(Particle Swarm Optimization, PSO), 개미가 분비된 페로몬을 따라 랜덤으로 이동한다는 이론을 기반으로 한 개미 군집 최적화 방법(Ant Colony Optimization, ACO) 등이 개발되었다.

알고리즘의 선택은 탐색의 능력 및 활용, 주어진 문제의 목적함수의 수나 제약요건에 따라서 달라지는데(Mohamed-Mahmoud, 2015), 그 중에서도 공간탐색능력이 우수한(Cao et al. 2011; Liu et al. 2013) 유전알고리즘이 토지이용 최적화 배분연구에서 많이 사용되고 있다.

Janssen et al.(2008)은 GA를 이용하여 네덜란드 일부지역에 최적화를 통한 토지이용 배분을 실제 적용함으로써 현실 적용가능성 있음을 나타냈다. 최근 토지이용 배분 최적화 연구는 현실을 더 잘 반영할 수 있고 합리적인 토지이용계획안을 도출하기 위하여 기술적인 측면에서 개선을 시도한 연구가 많다. Cao et al.(2012)는 BFGA(Boundary-fast GA) 모델을 개발하여 토지이용 최적화의 속도를 개선시킨 연구를 진행하였다. 이 모델은 유전알고리즘의 교차와 변이과정에 패치단위로 적용시킴으로서 개선을 시도하였다. Liu et al.(2015)는 유전알고리즘과 게임이론을 결합시킴으로써 알고리즘의 개선을 시도하였고 이로서 파편화된 결과를 효과적으로 개선시킨 계획안을 얻었다. Stewart et al.(2014)의 최근 연구에서는 래스터 기반으로 이루어지던 기존의 연구방식을 폴리곤 단위로 전환하여 해상도의 제약에서 벗어날 수 있었다. 이는 더욱 더 현실을 잘 반영할 수 있는 필지단위의 토지이용 계획안을 제시함으로써 GA를 이용한 토지이용 배분 연구의 정확도를 높여 주었다.

하지만 국내에서는 토지이용 경합에 영향을 미치는 다양한 목적들을 고려한 토지이용 배분 계획 연구는 미진한 상황이다. 일례로 주거지역 배분을 위한 토지이용 배분 연구에서는 군집분석과 회귀분석 등 통계적인 방법을 이용하여 수요예측모형을 만들어 결과를 도출해내었다(Chung & Jeong 2014). 그러나 이러한 방식은 다양한 목적간의 경합을 고려하지 않았기에 현실에 반영하기에 한계가 있는 방법이라고 여겨진다.

따라서 본 연구에서는 유전 알고리즘을 사용하여 다양한 목적들을 달성하기 위하여 종합적으로 판단하여 최적의 토지이용 배분 안을 제안하고자 하였다. 본 연구에서 고려한 목적은 총 4 가지로, 1) 지속가능

한 발전의 취지와 맞는 자원의 효율적 배분을 고려한 군집성이 있는 토지이용, 2) 토지이용 전환의 최소화, 3) 환경적인 측면을 생각한 생태계의 보전 최대화, 그리고 4) 경제적 발전의 요소를 고려하여 경제적 이익의 최대화이다. 본 연구에서 도출된 결과는 대상지역에 적용시킬 수 있는 지속가능한 발전을 위한 균형 잡힌 토지이용 계획을 수립하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

II. 연구 범위 및 방법

1. 연구 범위

1) 연구 대상지

연구 대상지는 양평군 양평읍과 그 일대를 포함하는 95km² 면적에 해당하는 지역으로 하였다(Figure 1). 양평군은 경기도에서 상대적으로 개발이 덜 이루어진 지역으로 상수원 보호구역, 개발제한구역이 양평군 상당부분 차지하고 있다. 반면에 출산장려 정책 등 인구증가 정책을 시행하고 있으며(Yang-pyeonggun 2016), 용문산, 유명산 등 관광객이 많이 찾는 지역들이 존재한다. 이처럼 생태계 보전과 인간의 이용이라는 상충되는 특징이 함께 일어날 것으로 예상되는 지역이다.

2) 내용적 범위

본 연구에서는 토지 이용을 분류하는데 있어 Ministry of Environment(2009)에서 제공하는 7 가지 대분류로 구성된 토지 피복지도를 사용하였

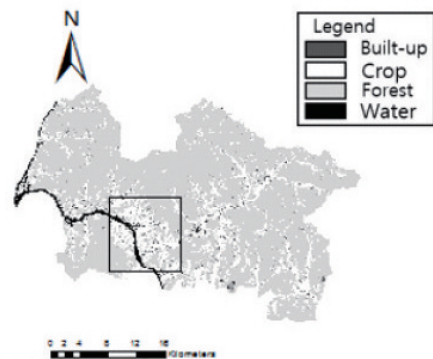


Figure 1. The site of this research

다. 그 중 나지, 초지 그리고 습지를 제외한 4가지 분류로 토지이용분배 최적화를 진행하였다.

2. 연구 방법

1) 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 더 좋은 자손을 얻기 위하여 염색체의 교차 및 돌연변이의 과정을 거치는 적자생존의 원리로부터 착안된 알고리즘이다. 이는 적자생존의 원칙하에 살아남은 최적의 부모세대의 능력이 교차와 변이를 통해 다음세대에 전해짐으로써 적응과 진화를 통해 살아남기 위한 생명체들의 능력을 반영하려고 노력한다(Moon 2009). 유전 알고리즘은 무작위로 초기 해집단을 생성하고 각각의 해들은 ‘염색체’라 불리며 또 염색체는 ‘유전자’로 구성되어 있다.

또한 유전 알고리즘은 ‘교차’와 ‘돌연변이’라는 생명체의 특징을 그대로 컴퓨터의 언어로 표현한다. ‘교차’는 두 염색체 간의 유전자를 교환함으로써 해의 다양성을 늘려주는 현상이며, ‘돌연변이’는 인체를 예로 든다면 방사선을 쬐었을 때 유전자의 염기에 무작위

로 변형이 일어나 담고 있는 특징이 변화하듯, 유전자 특징이 변하는 것이다. 해의 다양성이 클수록 좋은 이유는 마치 전염병이 돌았을 때 단일의 유전자를 가진 집단이 있을 때 더 불리하며 다양한 유전자 집단일수록 생존확률이 높은 것과 같은 이유이다. 즉 최적화된 토지 이용안을 도출할 때 교차나 변이가 없다면 초기해 에서 많이 변형되지 못하므로 개선의 여지가 매우 적어진다. 하지만 도면의 적절한 변형은 점점 더 강력한 해법을 제공하게 된다.

초기 해 집단은(적합도)평가를 통해 현 상태를 진단하고 교차 및 변이를 통해 특징을 변화시켜간다. 이러한 과정을 거치는 GA는 공학 분야를 비롯하여 매우 널리 쓰이는 방법이고 본 연구에서는 토지이용을 배분함에 있어 다양한 목적을 가지고 있을 때 최적 안을 도출해 내기 위하여 사용하고자 한다. 진화는 반복적인 과정을 거쳐 적합도를 높여가며 최적해 집단으로 변화해나간다. 이 과정은 수렴조건에 이를 때까지 이루어지며 수렴이 되었다면 마지막 세대가 최적 안 집단이 된다.

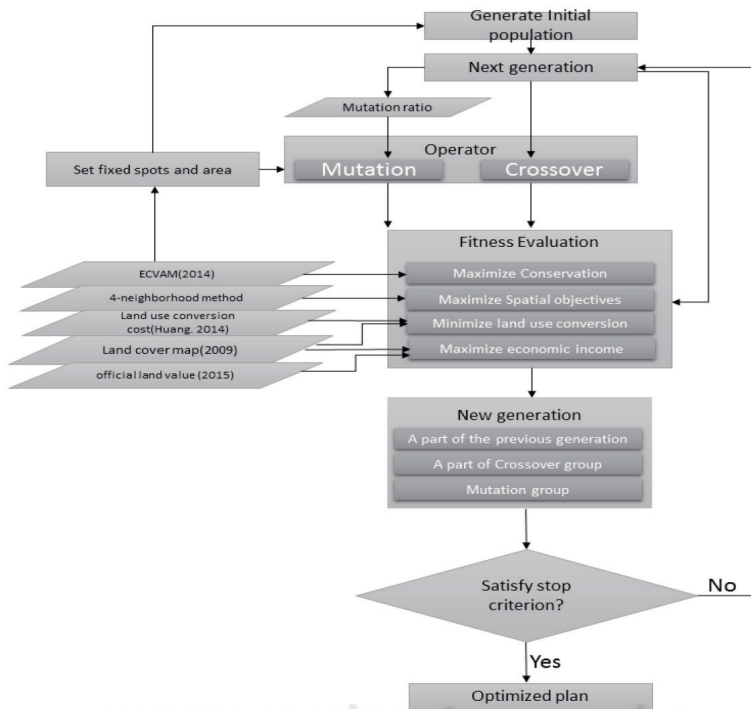


Figure 2. Flow chart of the research

2) 최적의 토지이용 배분

GA은 무작위로 생성된 초기해로부터 시작된다. 초기 해는 현재의 해로 지정이 되고 돌연변이와 교차를 통해 염색체를 변형시킨다. 고정지역은 이 과정에서 자신의 자리를 유지한다. 변형된 염색체들은 각 목적을 대표하는 적합도 식과 입력된 매트릭스를 통해 적합도 값이 계산된다. 적합도 값이 낮은 순으로 염색체들이 배열되어 새로운 세대가 생성되고, 이때 최종적으로 종료조건을 만족시키는데 성공하면 이는 최적 안으로 판별된다. 이 중에서 가장 최적인 해가 도출된다(Figure 2).

(1) 토지이용 배분 목적

① 균집성(compactness) 최대화

균집성은 하나의 패치를 같은 토지이용으로 구성하는 것을 의미하는데, 이는 종이 받는 생존에 대한 위협을 줄이고 에너지 소비를 감소시킬 뿐만 아니라 도시내부로의 접근을 용이하게 하여 사회 구성원의 동등성을 확보해준다(Masnavi 2000; Cao et al. 2012; Liu et al. 2015). 이 목적은 셀 기반으로 토지이용 최적화 문제를 해결하는 과정에서 매우 중요한 요소 중 하나인데, 최적화 과정에 있어 균집성 목적이 없는 압축성이 있는 합리적인 계획안 도출이 어렵다. 따라서 많은 연구들에서 균집성에 관한 방법론들이 제시되어 왔고(Wardoyo & Jordan 1996; Aerts & Heuvelink 2002; Stewart et al. 2004; Ligmann-Zielinska et al. 2008), 본 연구에서는

‘주변부가 중심과 같은 토지이용으로 되어있는 셀 수를 세어보는 방법’ 그리고 ‘도면 내에서 전체 클러스터의 수를 세는 방법’ 이 두 가지 방법을 기준으로 균집성의 정도를 계산하였다(eqn 1 & eqn2).

$$\max F_{com}(x) = \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C B_{rck} x_{rck}$$

eqn 1. Maximization of compactness

$$\max F_{cluster}(x) = \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C C_{rck} x_{rck}$$

eqn 2. Minimization of number of Clusters

② 토지이용 전환 최소화

‘토지이용 전환 최소화’는 토지이용이 변할 때 투입되는 자원의 최소화를 의미하며(Zhang & Huang 2014), 토지이용 전환의 최소화는 변화를 최소화 한다는 의미로 단순화시킬 수 있으며(Cao et al. 2012) 현실성을 고려하고 자원낭비를 최소화하기 위하여 목적으로 제안하였다. 이 값의 정확한 수치를 추정하는 데에 한계가 있었기 때문에 Zhang & Huang (2015)의 연구에서 인용하되 본 연구의 범위에 한정하여 GA의 투입자료로 입력하였다(Table 2).

③ 생태계 보전 최대화

‘생태계 보전 극대화’의 목적은 개발로 인한 생태계의 피해를 최소화하기 위하여 설정되었다. 본 목적의 달성을 위해 참조 도면으로 입력되는 자료인 국토환

Table 1. Objectives for land use optimization

Objectives	compactnes	Land use conversion	Ecological conservation	Economic benefit
Meaning	<ul style="list-style-type: none"> compactness Minimize the number of clusters 	<ul style="list-style-type: none"> Minimize land use conversion: Minimize wasting resources 	<ul style="list-style-type: none"> Minimize harmful impact to ecosystem by development 	<ul style="list-style-type: none"> Minimize economic losses by land use types

Table 2. Metrics of the cost of land use conversion(referred to Zhang & Huang 2015)

before \ after	Built-up	Crop	Forest	River
Built-up	0	7	10	-
Crop	3	0	7	-
Forest	8	2	0	-
River	-	-	-	0

Table 3. Metrics of the relationship between ECVAM and land use

landuse \ grade	5	4	3	2	1
Built-up	1	2	3	4	5
Crop	3	2	1	2	5
Forest	5	4	3	2	1
River	-	-	-	-	-

경성평가지도(Figure 3)는 법적 항목 및 자연 생태적 항목을 더해 65개에 이르는 지도의 중첩으로 만들어져 국토의 전반적인 자연환경에 대하여 5등급으로 나눈 지도이다(Kim et al, 2012). 국토환경성 평가지도가 국토환경을 통합적으로 평가하여 그 등급을 매겨놓은 지도임은 물론, 개발 및 보전지역을 구분해 놓았기 때문에 이를 토지이용분배의 참조 도면으로 사용할 경우 생태계 보전 목적에 부합하는 목적을 달성할 수 있음을 가정하였다. 그리고 국토환경성평가지도와 생성된 가상의 계획안을 견주어 봄으로서 적합도 값이 계산되고 최적화 정도를 가늠할 수 있다.

이 지도를 입력 자료로 사용한 것은 본 연구와 다른 토지이용 분배연구와의 차별점으로 간주될 수 있는 점이고, 연구목적과 재료가 같은 목적을 추구하기에 적절하게 사용되었다고 판단된다. Table 3은 국토 환경을 고려하여 등급이 낮은 곳에 시가화지가 위치하도록 하는 등 합리적인 토지이용계획안이 도출되도록 매트릭스를 구성하였다.

④ 경제적 이익 최대화

‘경제적 이익 최대화’는 토지이용이 변함에 따라 경제적 가치가 변한다는 점에서 제안되었다. 이 목적은 생태계 보전 목적과 상충된다는 점에서 다목적 최적화 방법이 본 문제를 해결함에 있어 적절함을 보여준다. 경제적 가치를 추정하기 위한 공시지가 관련 매트릭스 도출은 다음과 같은 순서로 이루어졌다. 양평읍 일대의 피복별 공시지가를 조사하여 그 평균을 구했다. 그리고 각 토지피복별로 전환 시 생기는 이익 혹은 손실 값의 차이를 계산해 주었다. 가령 Table 4.를 기준으로 보았을 때, 농경지에서 시가화지로 변할 때는 3876원의 이득을 볼 수 있다는 것을 의미한다. 처음으로 생성된 매트릭스는 다음과 같다(Table

Table 4. Metrics of the processed official land value(Korea Appraisal Board 2015)-before normalization

after \ before	Built-up	Crop	Forest	River
Built-up	-	-3786	-3960	-
Crop	+3876	-	-84	-
Forest	+3960	+84	-	-
River	-	-	-	-

Table 5. Metrics of the processed official land value(Korea Appraisal Board 2015)

after \ before	Built-up	Crop	Forest	River
Built-up	-	1	0	-
Crop	100	-	50	-
Forest	100	50	-	-
River	-	-	-	-

4). 이 값에서 음수 값 제거를 위해 전체적으로 최소값을 더해주었다. 이 과정은 추후 오로지 덧셈으로만 이루어지는 적합도 값 계산 과정을 고려했을 때 적합한 방법이라는 가정 하에 이루어졌다. 값을 단순화시키기 위한 다음 과정으로, 계산된 값을 적당한 숫자로 나누어준 후 이를 반올림하였다. 그리고 최종적으로 나온 단위 값을 분석 scale과 일치시키기 위하여 10의 배수를 곱하는 선에서 값을 재조정해주었다. 양평읍의 토지이용이 주거, 상업지역 및 농림지역과 임야, 수역 등이 주라는 점에서 초지, 습지, 나지는 제외하였다(Table 5).

(2) 적합도 함수 생성

적합도란 해의 품질을 평가하기 위한 기준 값으로 경우에 따라 최대값 혹은 최소값이 최적해일 수 있다. 본 연구는 최소값이 최적해가 되도록 설계되었다.

적합도 값이 결정되는 원리는 다음과 같다.

첫 번째, 이미 만들어진 계획안에 대해 한 격자 내의 국토환경성 평가 지도 등급을 확인한다. 두 번째, 국토환경성평가지도와 토지피복 지도와의 상관관계를 나타내는 점수 매트릭스 내에서(Figure 5) 점수를 확인한다. 세 번째, 위의 작업이 모든 격자에서 이루어진 값들을 모두 더한다. 이 값의 의미는 1population(1개의 유전자 혹은 개체)의

1generation(1세대)에 대한 적합도 값이다. 이는 계획안이 얼마나 효율적으로 만들어졌는지 알 수 있게 해준다. 최적화 작업이 다양한 목적을 고려하였을 때 최상의 대안을 얻는 것이므로 적합도 값을 최종적으로 계산하여 이중 가장 작은 값을 찾는다면 의도한 바에 부합하는 계획안 도출이 가능하다.

본 연구의 목적은 토지이용의 압축적인 배분, 토지이용 전환 최소화, 생태계 보전 최대화, 경제적 이익 최대화로 이루어져있다. 이는 특정한 제약조건 하에 성립된다. 계획 지역(Planning area)은 행렬로 나타내었을 때 N열과 M행으로 이루어진 격자로 구성될 수가 있다. 여기에는 K개의 서로 다른 토지이용 종류가 이진수로서 들어가게 되는데, 만일 셀(i, j)에 토지이용 k가 할당된다면 숫자 1을 취하고, 토지이용 분배가 이루어지지 않는다면 0을 갖는 구조이다. 더욱이 B_{ijk} 는 서로 다른 목적을 가진 변수이다. 따라서 각 목적함수들은 다음과 같은 일반형으로 표현될 수 있다.

Minimize:

$$- \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M B_{ijk} x_{ijk} \quad (1)$$

위의 식은 아래와 같은 조건에 있을 때 만족한다.

$$\sum_{k=1}^K x_{ijk} = 1, \forall k=1, \dots, K; i=1, \dots, N; j=1, \dots, M$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad (2)$$

$$L_k \leq S_k \leq U_k$$

이는 다음에서 성립한다.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ijk} = S_k, \forall k=1, \dots, K; i=1, \dots, N; j=1, \dots, M$$

$$\sum_{k=1}^K S_k = N \cdot M \quad (3)$$

B는 각 토지이용 타입에 상응하는 각 셀에 기반한 변수이다.

식(1)과(2)는 각 셀에는 무조건 하나의 토지이용 타입이 할당되어야 함을 의미하는데, 왜냐하면 결정변수 x_{ijk} 는 0 혹은 1이기 때문이다. 식(3)은 S_k 의 상한선과 하한선을 제한해주는 역할을 한다.

$$f_{obj} = - \sum_{o=1}^O \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \alpha_o B_{ijk} x_{ijk} \quad (4)$$

위 식은 조건(2), (3)에서, 그리고 $\forall o=1, \dots, O$ 의 범위에서 성립한다.

B_{oijk} 는 목적 o에 따라서 각 셀에 부여되는 토지이용 타입이다.

α_o 는 목적o에 대한 가중치를 의미하는데 본 연구에서는 모든 목적의 가중치가 등가중치로 적용되었기 때문에 이는 큰 의미를 가지지 않는다. 하지만 이 가중치의 변화로 각 목적들이 반영되는 비율이 달라질 수 있음을 염두에 두어야 한다.

(3) 토지이용 분배에서 교차와 변이

유전 알고리즘의 핵심인 교차 및 변이는 해의 다양성을 늘려준다. 이 특징은 토지이용에 도입 시 다양한 안을 제공하는데 기여한다. 변형된 작동자(operator)들이 선행연구에서 개발된 바 있으며 이는 해의 품질 및 수렴시간단축에 일조한다. 본 연구에서는 일점교배방식을 이용한 교차 및 작동자(operator)를 변형시킴으로서 품질이 좋은 자손(offspring)이 생성되도록 하였다. 무작위로 돌연변이가 일어날 경우 교차에서 발생한 문제를 수정할 수 있는 확률이 낮아지므로 최적화의 질 및 수렴의 강도에 좋지 못한 영향을 미칠 수 있다.

따라서 본 연구에서는 최적화의 과정 중에 일어나는 파편화 현상을 감소시키고자 Cao et al.(2012)이 제안한 패치 기반 돌연변이 방식을 수정, 적용하였다(Figure 3). 패치 기반의 돌연변이는 4*4 셀로 이루어진 window단위로 토지이용을 탐색하다가 내부 시가지 셀 개수가 5개 이하인 패치를 발견할 경우 시가지 및 농경지로 이루어진 4*4크기의 패치로 그 구역을 대체시켜주는 방식이다. 이는 패치의 모양 및 내부 토지이용을 사용자 임의로 바꾸어줄 수 있기 때문에 특정 토지이용의 증가 및 파편화 현상을 개선시켜주는 효과적인 방법이다. 오퍼레이터를 도입할 때 판단 기준설정을 위해 시뮬레이션을 통해 기준설정을 시도하였다. 오퍼레이터 없이 셀끼리 잘 뭉쳐서 나온 경우, 셀 수가 5개였기 때문에 이를 토대로 오퍼레이터에서 기준을 5개로 잡았다. 16개의 셀 중 산림이나

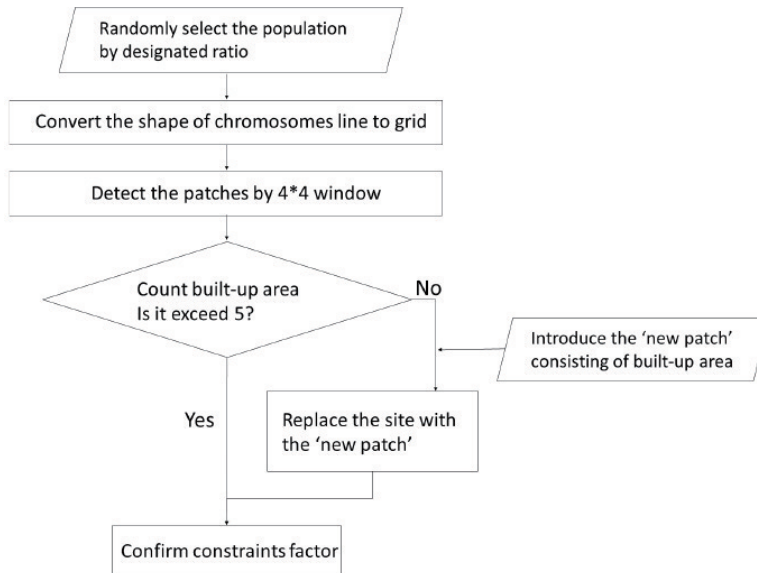


Figure 3. Patch-based mutation

수역이 많을 수도 있는데 시가지나 농경지로 대체하는 이유는 오퍼레이터를 통하여 시가지 및 농경지의 면적을 증가시키기 위해서였다. 그리고 수역은 그 위치가 고정되어 있고, 산림의 경우 최소치와 최대치를 설정해 놓았기 때문에 특정 면적이하로 떨어지거나 올라갈 위험이 없어서 오류 발생의 위험이 적다고 판단된다.

(4) 분석환경 및 제약조건

본 연구는 선행연구를 통하여 교차 및 변이의 비율을 지정해주었다. 그리고 수렴의 조건은 분석해야하는 셀의 개수, 분석의 도구, 적합도 함수를 이루는 목적의 수에 따라서 달라지므로 최적 해를 얻기 위한 세대수 및 개체수를 조절해가면서 분석을 수행하였다. 일반적으로 목적의 수가 증가할수록 최적화에 걸리는 시간이 길어지며 해의 품질이 좋지 않다는 점을 참고하였다. 반복횟수는 15000번, 세대수는 1000, 그리고 교차와 변이의 비율은 각각 0.6, 0.3으로 진행하였다. 분석은 Matlab을 통해 이루어졌고, Matlab의 최적화 특성이 적합도 값이 최소화되는 조건임을 감안하여 코드구성이 이루어졌다.

본 연구의 제약조건은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 특정 토지이용 셀 개수 제한 및 고정지역의

설정이다.

분석 시 시가지역, 산림 및 농지 면적의 범위를 특정 수치 이상 및 이하로 제약조건을 걸어주었다. 출산장려정책이 발달되어 있는(Yang-pyeonggun 2016) 양평군의 특징으로 짐작하건데 향후 인구 증가가 가속될 것이라고 가정하고 양평읍의 토지이용상한선을 높게 설정해주었으며, 앞으로 산림 면적증가가 일어나기에는 어려울 것으로 예상하여 특정면적구간으로 설정하여 제한해주었다.

두 번째 제약조건은 국토환경성평가지도의 1등급 지역이 절대보전지역으로서 일체의 개발이 허용되지 않는 영역이므로 분석 초기단계에서 1등급지역을 도면에 고정시켜줌으로써 최적화의 범위에서 제외시켰다는 점이다. 이 과정을 통하여 국토환경성평가지도 활용의 실효성을 높여주었다. 또한 결과 해석에 있어 양평군의 수역은 상수원보호구역이므로 도시 계획적 차원에서 현실성이 높은 안이 도출되도록 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 최적화를 통한 토지이용의 배분 변화

최적화 기법을 이용하여 얻게 된 양평읍과 그 일대 지역의 토지이용 최적 계획안은 대체적으로 상충하

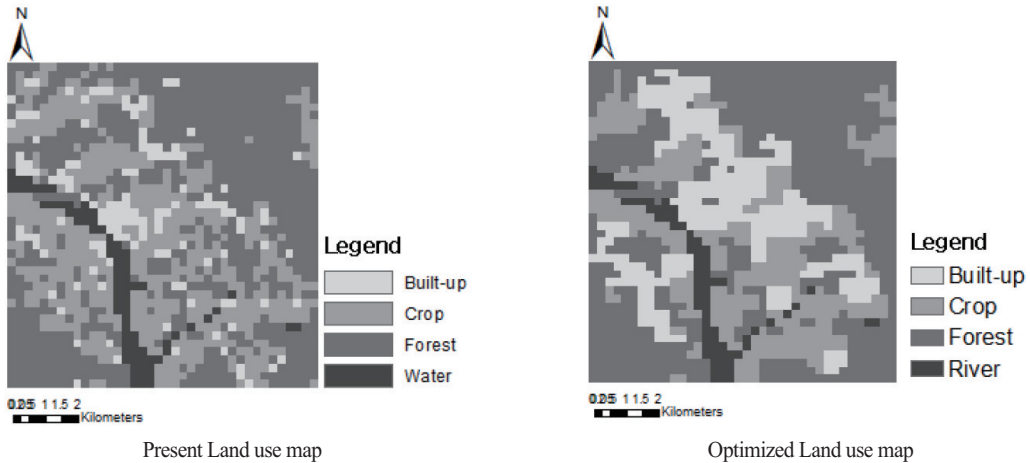


Figure 4. Difference between present land use map and optimized map

는 목표를 합리적으로 해결하고 있다. Figure 4의 왼쪽 도면은 최적화되기 전 상태를 나타내며, 오른쪽 도면은 알고리즘을 이용한 결과이다. 최적화 판단 기준은 적합도 값의 오름차순 배열을 통하여 가장 작은 값을 갖는 도면이 최적 계획안으로 선택된 것이다.

양평읍과 그 주변지역의 토지이용을 위한 본 연구는 네 가지 목적을 기반으로 수행되었다. 에너지 상에서 불이익을 갖는 파편화된 토지이용을 방지하고자 도입한 목적인 '군집성 극대화'와 '클러스터 수 최소화'는 연속된 패치의 개수가 5개로 줄어들어 양호한 수준의 목적 달성율을 보인다. 다음 토지이용 전환 최소화의 목적 또한 경제적이고 에너지 측면에서 손실을 방지하기 위한 목적으로 달성 시 자원낭비를 최소화시킨다. 이는 적합도 값의 하락으로 목적 달성 여부를 확인할 수 있다. 생태계가 받게 되는 나쁜 영향을 최소화하고자 도입한 '생태계 보전' 목적은 두가지 측면에서 목적달성 여부를 보여준다. 적합도 값의 하락 및 도면에서 국토환경성평가지도의 1,2등급 지역에 시가지가 배치되지 않았다는 점이다. 마지막 목적인 '경제적 가치 하락 최소화'는 개발면적 증가 시 양평군 전반적 지가상승을 예측할 수 있어 본 결과는 양평군의 경제 활성화에 기여할 수 있다.

2. 최적화를 통한 토지이용의 면적변화

최적화의 코드 작성에 있어 제약조건의 적용을 통

해 산림이 특정면적 이상으로 늘어나지 못하도록 제한을 해주었고, 시가지는 오퍼레이터의 도움을 받아 현재보다 면적이 늘어나도록 유도하였다. 그 결과 시가지 면적의 비약적인 증가가 일어났고, 산림 면적은 소폭 감소하였다(Table 6). 양평군의 도시 계획적 차원에서, 본 계획안은 상수원 보호구역으로 많은 부분이 할당되어 있는 양평군의 특징을 반영하기 위하여 수역을 분석 시에 고정하는 등의 조치를 취해주었기 때문에 수역은 그 이용이 변하지 않았다. 또한 양평군은 펜션이 밀집되어 있고, 음식점이 많으며 산림이 대부분을 차지하고 있는 만큼 많은 관광객이 이곳을 방문한다. 관광산업지로서의 가치가 큰 곳으로 물리적인 압력을 가해서 인위적 개발을 한다기 보다는, 경관과 조화를 이루며 관광지로서 더 높은 가치를 지닐 수 있도록 개발을 유도한다면 지속가능한 토지이용의 취지와 부합할 것으로 예상된다.

최적화의 결과 도면이 연결성이 증대되고 압축된 양상으로 변화했기 때문에 이를 실제 계획에 적용시킨다면 생태적인 면에서 가치가 상승할 것이다. 무엇보다도 국토환경성평가지도의 높은 등급을 차지하는 곳은 산림과 농지 그리고 수역 일부이므로, 생태계 서비스의 측면에 있어 인간이 제공받을 수 있는 이득이 상당하고 그 잠재력이 큰 지역이므로 지속가능성을 고려한 개발이 가져다주는 의미는 다각적인 분석이 가능하다.

Table 6. Change of Land use area(scale: 1km²)

Land use	Present Land use	Optimized Land use	Area fluctuation(m ²)	Area fluctuation(%)
Built-up	8,500	18,750	+10,250	221%
Crop	33,625	24,125	-9,500	72%
Forest	48,000	47,250	-750	98%
River	4,875	4,875	0	0%

본 연구는 국토환경을 고려하여 지속가능한 토지 이용 분배가 그 목적인만큼 자연으로부터 얻을 수 있는 이익의 정량화를 통하여 공간계획과 환경계획의 연계를 도모하고(Choi 2013), 이를 토지이용 변화 시에 나타나는 결과로 가시화하는 단계에서 직접적인 가치판단이 이루어진다면 사람과 기계가 제시하는 조화로운 계획안 도출이 가능할 것이다. 본 연구에서는 토지이용의 틀을 바꾸는 계획을 제안함으로써 더 근본적인 해결책을 찾으려하였다.

3. 토지이용 배분 최적화의 함의 및 평가

본 연구에서 최적안에 도달하였음을 알려주는 지표는 '적합도 값'이다. 수렴지점의 세대수가 적을수록 효율적인 코딩이 이루어졌다고 유추해 볼 수 있는데, 본 연구는 반복횟수가 양호한 편인 1500세대 부근에서 수렴을 함을 알 수가 있었다. 총 적합도 값은 약 4000으로 수렴하는 결과를 나타내고 있다(Figure 5). 적합도 값 4000은 각 목적들로부터 도출된 적합도 값을 합산한 값이다. Matlab으로 프로그래밍 할 경우 값이 작을수록 최적화가 진행된 것이다. 또한 그래프에서 알 수 있듯이 500세대를 전후로 하여 곡선의 가파른 정도가 다른데, 이 부분이 의미하는 바는 적합도 값이 급격하게 감소하는 500세대 전에는 모든 목적들이 최적화되어가는 과정이라는 뜻이다. 500세대가 지난 다음부터는 서로 상충하는 목적들 간에 경쟁이 일어나는 상황이다. 서로 상충하는 목적이 상생하는 경우는 불가능하며 최종적으로는 모든 목적들의 값이 수렴하는 결과로 이어진다.

다음으로, 초기해와 마지막 해의 적합도 값 비교를 통하여 각 목적이 최적화에 기여하는 정도를 파악해 보고 가장 많은 기여를 한 목적을 도출하였다. '클러

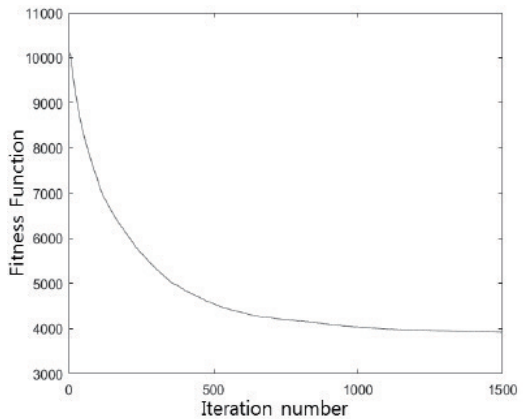


Figure 5. Convergence curve of the optimization process

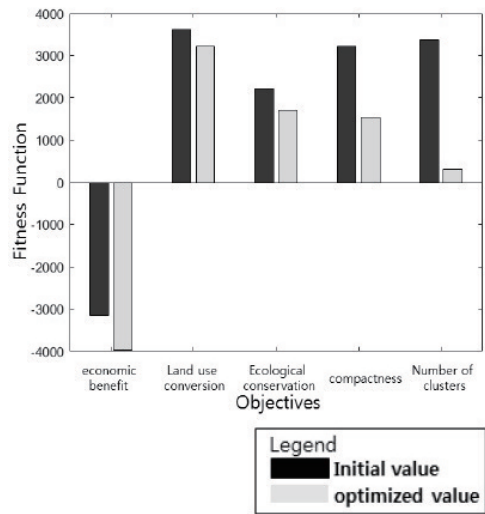


Figure 6. Fitness value of each objectives

스터 수 최소화' 목적의 적합도는 3369점에서 310점으로 떨어졌고(Figure 5), 최적화에 기여하는 정도가 가장 크다.

첫 번째 목적인 군집성 최대화는 클러스터 수를 줄이고 파편화된 토지피복 감소를 통하여 목적달성이

이루어졌으며 이는 반복된 알고리즘의 시행으로 인하여 적합도 값이 낮아져서 최적화에 기여하고 있음을 보여준다. 두 번째 토지이용 전환 최소화 또한 최적화에 기여하고 있다. 적합도 값 변화양상을 고려하였을 때 소폭 감소한 것으로 추정컨대 이는 최적화에 기여하는 바가 다른 요소에 비하여 적음을 알 수가 있다. 다음으로 생태계 보전을 극대화하는 목적으로 본 연구의 가장 큰 목적이 달성되었다. 마지막으로 공시지가의 감소 최소화 목적을 고려하여 토지이용 재분배가 이루어짐으로서 토지이용 분배 시 토지의 금전적 가치 또한 고려되었다.

IV. 결론

본 연구에서는 개발이 예상되는 지역의 토지이용 계획 지침을 제공하고자 네 가지 목적을 바탕으로 토지이용 최적 분배 안을 제안하였다. 서로 상충하는 목적들을 달성하고자 토지피복지도를 기준으로 제약요건을 도입하여 분석하였다. 이때 유전 알고리즘은 다양한 목적함수를 종합적으로 판단할 수 있는 기틀을 마련해주었다.

결과에서 현실 반영을 위한 1등급 지역의 고정, 등급이 낮은 곳을 개발, 파편화의 감소로 인하여 토지이용의 생태계 보전 극대화의 목적에 상응되는 결과임을 보여주었고, 시가지의 면적 증가율이 가장 크다는 점은 경제적 이익 극대화의 목적을 달성하였다는 것을 시사한다. 무엇보다도 세대수를 1500번으로 한정할 수 있었던 이유는 설정한 1500의 세대수 이전에 적합도 값이 크게 변동하지 않는 최적수준에 도달하였다는 것을 의미한다. 만일 기본적인 GA였다면 더 많은 시간과 세대수를 요했을지 모른다. 실제로 Huang et al.(2012)의 연구에서는 오퍼레이터 없이 순수한 GA만으로 분석했을 경우, 45.5시간, 300,000세대를 거쳐야 최적 안을 도출할 수 있었다고 언급하고 있다. 본 연구에서 시간과 세대수의 단축으로 미루어 봤을 때, 오퍼레이터 및 공간적 목적을 극대화시키는 '클러스터 수의 최소화'가 최적화로 이끄는 원동력으로 크게 작용하였다고 해석할 수 있다. 생태적인 측면에서 바라보았을 때, 개발과 보전이 대립하는 상황

에서 파편화를 감소시켜주는 오퍼레이터의 도입은 개발 하에서 생태적 가치를 높여주는 역할을 할 수 있다고 여겨진다.

토지이용 분배의 연구에서 무엇보다도 중요한 점은 도출해 낸 계획안의 정책반영 가능성이다. 정책결정자들의 의사결정을 돕기 위하여 최적화의 방법을 택하였을 때, 다양한 선택 안들이 있을 것이나 수학적인 최적화 접근을 적용하기에는 사용자와의 연계성이 떨어진다. 이러한 이유로 '지도'의 적극적인 개입이 필요하며, 이에 유전알고리즘 뿐 아니라 셀 기반 분석방식을 취하는 다양한 알고리즘이 공간계획에 시도되고 있다.

본 연구는 넓은 지역을 다루지 못하여 양평군의 중심이 되는 지역인 양평읍과 그 일대만을 대상으로 연구를 진행했다는 점, 기술적인 한계로 분석단위를 250m로 설정하였다는 점 등 대부분 해상도 및 셀 수와 관련된 한계점이 있다. 무엇보다도 토지피복을 기반으로 한 65가지 법제적항목 및 자연생태적 지도를 중첩하여 만든 국토환경성평가지도의 활용 적절성이 떨어진다는 점 또한 한계점의 대상이 될 수 있다. 이는 본 연구를 진행함에 있어 최선의 선택이었으나 오류의 발생은 배제할 수가 없었다. 또한 최적화의 대상으로서 총 네 분류의 토지이용만을 고려하여 현실을 그대로 반영하지 못하였고 기반시설에 대한 고려가 없다. 이러한 한계에도 불구하고, 본 연구는 실제 더 넓은 지역의 토지이용 분배 최적 안을 도출해 낼 수 있는 근간이 되었으며 이는 향후 연구에서 알고리즘을 구현하는 코딩의 개선을 통하여 나은 결과를 도출해 낼 수 있을 것이라 예상된다.

사사

이 연구는 2016년도 환경부 기후변화대응 환경기술개발사업(과제번호: 2014-001-310007)의 지원을 받아 수행된 연구임

References

Aerts JCJH, Eisinger E, Heuvelink GBM., Stewart

- TJ. 2003. Using linear integer programming for multi-site land use allocation. *Geographical Analysis*. 35: 148-169.
- Aerts JCJH, Heuvelink GBM. 2002. Using simulated annealing for resource allocation. *International Journal of Geographical Information Science*. 16(6): 571-587.
- Balling RJ, Brown MR, Day K. 1999. Multiobjective urban planning using genetic algorithm. *Journal of Urban Planning and Development*. 125(2): 86-99.
- Cao K, Batty M, Huang B, Liu Y, Yu L, Chen J. 2011. Spatial multi-objective land use optimization: extensions to the non-dominated sorting genetic algorithm-II. *International Journal of Geographical Information Science*. 25(12): 1949-1969.
- Cao K, Huang B, Wang S, Lin H. 2012. Sustainable land use optimization using Boundary-based Fast Genetic Algorithm. *Computers, Environment and Urban Systems*. 36(3): 257-269.
- Choi YG. 2013. The research of finding Cooperation of Land Use and Environment policy for 『Developing land harmonized with the environment』. KRIHS POLICY BRIEF. 425. [Korean Literature]
- Chung SS, Jeong SC. 2014. A Study on Urban Land use Drafting Plan Improvement Method through a Comparison Analysis of the Current Residential Area Status and the Demand Forecast Model -With a Focus on a Residential Area Example-. *Korea Real Estate Academy*. 57: 195-209. [Korean Literature]
- Guldmann JM. 1979. Urban land use allocation and environmental pollution control: an intertemporal optimization approach. *Socio-Economic Planning Sciences*. 13(2): 71-86.
- Huang B, Zhang W. 2014. Sustainable land-use planning for a downtown lake area in central China: multiobjective optimization approach aided by urban growth modeling. *Journal of Urban Planning and Development*. 140(2): 04014002.
- Janssen R, Van Herwijnen M, Stewart TJ, Aerts JC. 2008. Multiobjective decision support for land-use planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 35(4): 740-756.
- Kim EY, Jeon SW, Song WK, Gwack JR, Lee J. 2012. Application of ECVAM as a Indicator for Monitoring National Environment in Korea. 11(2): 3-16. [Korean Literature]
- Ligmann-Zielinska A, Church RL, Jankowski P. 2008. Spatial optimization as a generative technique for sustainable multiobjective land-use allocation. *International Journal of Geographical Information Science*. 22(6): 601-622.
- Liu X, Ou J, Li X, Ai B. 2013. Combining system dynamics and hybrid particle swarm optimization for land use allocation. *Ecological Modelling*. 257: 11-24.
- Liu Y, Tang W, He J, Liu Y, Ai T, Liu D. 2015. A land-use spatial optimization model based on genetic optimization and game theory. *Computers, Environment and Urban Systems*. 49: 1-14.
- Liu Y, Yuan M, He J, Liu Y. 2015. Regional land-use allocation with a spatially explicit genetic algorithm. *Landscape and*

- Ecological Engineering. 11(1): 209–219.
- Masnavi MR. 2000. The new millennium and the new urban paradigm: the compact city in practice. Achieving sustainable urban form, 64-73.
- Ma X, Zhao X. 2015. Land Use Allocation Based on a Multi-Objective Artificial Immune Optimization Model: An Application in Anlu County, China. Sustainability. 7(11): 15632-15651.
- Memmah MM, Lescouret F, Yao X, Lavigne C. 2015. Metaheuristics for agricultural land use optimization. A review. Agronomy for Sustainable Development. 35(3): 975–998.
- Moon BR. 2008. Easy Classing Genetic Algorithm. Hanbit Media. Seoul. [Korean Literature]
- Morio M, Schadler S, Finkel M. 2013. Applying a multi-criteria genetic algorithm framework for brownfield reuse optimization: Improving redevelopment options based on stakeholder preferences. Journal of Environmental Management. 130: 331–346.
- Park CS. 2005. The Research of Considering Ecological Efficiency of Urban Land Use. [Korean Literature]
- Stewart TJ, Janssen R. 2014. A multiobjective GIS-based land use planning algorithm. Computers, Environment and Urban Systems. 46: 25–34.
- Stewart TJ, Janssen R, Van Herwijnen M. 2004. A genetic algorithm approach to multiobjective land use planning. Computers and Operations Research. 31(14): 2293–2313.
- Wang X, Yu S, Huang GH. 2004. Land allocation based on integrated GIS optimization modeling at a watershed level. Landscape and Urban Planning. 66: 61–74.
- Wardoyo W, Jordan GA. 1996. Measuring and assessing management of forested landscapes. The Forestry Chronicle. 72(6): 639-645.
- WCED. 1987. Our common future. Oxford: Oxford University Press.
- Yang-pyeonggun. 2016. Hope&Happiness Yang-pyung. [Korean Literature]
- Zhang W, Huang B. 2014. Land Use Optimization for a Rapidly Urbanizing City with Regard to Local Climate Change: Shenzhen as a Case Study. Journal of Urban Planning and Development. 141(1).