

유휴지를 활용한 최적의 도시 녹지 공간 탐색*

- 녹지연결성과 열 환경 개선을 목적으로-

김은섭¹⁾ · 이동근²⁾ · 윤은주³⁾ · 박채연⁴⁾

¹⁾ 서울대학교 대학원 생태조경·지역시스템공학부 · ²⁾ 서울대학교 조경·지역시스템공학부 ·

³⁾ 일본국립환경연구소 기후변화적응센터 · ⁴⁾ 서울대학교 농업생명과학연구원

Exploration of Optimal urban green space using unused land*

- To improve green connectivity and thermal environment -

Kim, Eun-Sub¹⁾ · Lee, Dong-Kun²⁾ · Yoon, Eun-Joo³⁾ and Park, Chae-Yoen⁴⁾

¹⁾ Graduate School of Seoul National University, South Korea,

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

³⁾ Center for Climate Change Adaptation, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan,

⁴⁾ Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University.

ABSTRACT

Urban green areas are generally composed of relatively small and fragmented patches, but it is a critical factor for the quality of an urban environment. They have positive effects such as increasing green connectivity, reducing runoff, and mitigating urban heat. But, there is a lack of urban greening plans that consider the comprehensive effects of green space in real urban areas. To fill this gap in this literature, this study identifies a planning model that determines the optimal locations for maximizing green areas' multiple effects(e.g., heat mitigation and enhancement of connectivity) by using unused lots. This model also considers minimizing costs using meta-heuristic optimization algorithms. As a results, we finds 50 optimal plans that considers two effects within the limited cost in Nowon-gu. The optimal plans show the trade-off effect between connectivity, heat mitigation and cost. They also show the critical unused land lots for urban greening that are commonly selected in various plans. These optimal plans can effectively inform quantitative effectiveness of green space and their trade-off. We expect that our model will contribute to the improvement of green planning processes in reality.

Key Words : *Urban heat island, Connectivity, Optimization, NSGA II, Urban green space*

* 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.
(과제번호: 2019002760002).

First author : Kim, Eun-Sub, Graduate School of Seoul National University, Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Landscape Architecture Major, Tel: +82-2-880-4885, Email: Mr.solver92@snu.ac.kr

Corresponding author : Lee, Dong-Kun, Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Tel: +82-2-880-4875, Email: dklee7@snu.ac.kr

Received : 26 September, 2019. **Revised** : 30 October, 2019. **Accepted** : 18 October, 2019.

I. 서 론

도시 과밀화가 진행됨에 따라 서울시 내 녹지 공간이 감소하고 도로 포장률이 증가하는 등 토지피복이 변화되고 있다(Lee et al. 2010). 이로 인해 생물들이 서식지 침해를 입는 등의 직접적인 문제뿐 아니라 도시 열섬현상, 공기 순환 감소 등으로 인해 주거 쾌적성이 악화되는 도시환경 문제가 발생하고 있다(Kong et al. 2015).

서울시의 환경문제를 해결하기 위해 현재 「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」에 따라 1인당 6 m² 이상의 도시공원을 확보하도록 하고 있으나, 도시공원은 기존 산지에 조성되고 있으며 재원확보의 어려움으로 인해 근린생활권 내 녹지가 부족한 실정이다. 따라서 도시 열섬문제를 해결하거나, 생물의 서식지로 활용될 수 있는 도시녹지 확보가 추가적으로 필요한 실정이다.

서울시는 재정형편상 지가가 높은 시가지내에 새로운 공원녹지를 확보하기가 어렵기 때문에 소규모 공지나 유휴지 등의 잠재공간에 소공원을 조성하여 도시녹지를 확충하는 방안을 제기하고 있다(Kim et al. 2015). 특히 유휴지에 도시녹지를 조성하는 것은 일상생활권에서 가까운 곳에 조성되기 때문에 시민의 일상적인 휴식뿐만 아니라 열 환경 개선, 종 서식처, 대기 질 개선 등 다원적 기능을 제공할 수 있어 중요한 자원이 될 수 있다(Lee et al. 2016).

따라서 도시녹지로 변화하였을 때 도시의 환경문제를 가장 효과적으로 해결할 수 있는 유휴지를 찾는 연구가 필요하다. 그러나 지금까지 선행연구에서는 도시의 녹지가 얼마나 도시 열환경을 개선하고 녹지 연결성을 증진시키는지 평가했을 뿐 (Park et al. 2016; Du et al. 2017; Nor et al. 2017), 가장 효과적인 녹지의 위치를 선정하는 연구는 부족하였다.

특히, 도시의 복합적인 문제를 해결해줄 수 있는 대책이 되기 위해서는 한 가지 이상의 녹지 효과를 복합적으로 고려하는 것이 필요하다.

또한, 계획단계에서 이해당사자의 주관적인 의견만 반영되는 점을 보완하기 위해 정량적인 계획안을 제시하는 것이 필요하다. 국외 연구에서는 녹지의 복합적인 효과를 고려하여 최대의 효율을 가지는 공간을 탐색하기 위해 공간 최적화 기법을 활용하고 있다. 관련 연구로는 열 환경 개선과 홍수 문제를 해결하기 위한 공간 최적화(Caparrós-Midwood et al. 2015), 녹지의 쿨링효과와 연결성을 고려한 공간 최적화(Yoon et al., 2019a), 도시의 미시적 기후 조건을 고려한 도시녹지 배치(Fintikakis et al., 2011) 등 녹지의 복합적인 효과를 고려한 연구가 진행되었다. 국내의 연구 경우, 보전과 개발의 문제(Yoon et al. 2018), 물 사용 및 CO₂ 배출량(García et al. 2017) 등 공간 최적화에 대한 연구가 진행되고 있으나 실제장소를 대상으로 녹지의 복합적인 효과를 고려한 공간 최적화를 적용한 연구는 미흡하기 때문에 실제 계획이나 설계에 활용될 수 있는지 파악되지 못했다는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 서울시의 환경문제 중 ‘도시 열 환경 개선’과 생물 서식지 확보를 위한 ‘녹지 연결성 증대’를 정량적으로 평가하고, 가장 효율적인 도시녹지를 탐색하기 위해 유휴지를 대상으로 최저의 비용으로 최대의 효과를 나타낼 수 있는 공간을 확인하였다. 본 연구는 정량적인 녹지의 효과를 바탕으로 실제 유휴지의 녹지조성 계획안을 제공 할 것이며, 서울시의 도시문제를 해결할 수 있는 효율적인 유휴지 활용을 지원할 수 있을 것으로 예상된다.

II. 연구범위

2.1 연구 대상지

본 연구 대상지는 서울특별시의 북동부에 위치한 노원구로 설정하였다. 도시환경문제를 해결할 수 있는 도시녹지를 파악하기 위하여 연구 대상지역을 시가지 지역으로 제한하였다. 서울시의 행정구역간 환경적 문제를 비교하여 시가

화지역의 1) 표면온도가 높고, 2) 생태축이 단절된 지역, 3) 유휴지가 고르게 분포하고 있는 지역을 기준으로 노원구가 선정되었다. 2018년 07월 28일 landsat8 영상 자료를 통해 서울시 시가화 지역을 대상으로 지표면온도를 도출한 결과 노원구의 평균온도는 32.4°C로 다른 행정구역에 비해 낮게 나타났으나 최고 온도 값은 41.9°C로 높게 나타났다. 낮은 평균온도의 경우 동쪽에 위치한 불암산, 수락산 등 넓은 녹지의 영향으로 추정되며, 최고온도가 높은 원인은 대규모 문화단지 조성사업, 상업시설 조성 정책이 진행되고 있는 서쪽지역에서 확인할 수 있다. 개발 사업은 온도상승뿐 아니라 파편화된 산림 녹지로 인한 생태축을 단절 시킨다. 특히 노원구의 경우 총 산림면적률은 높은 편이나 대규모 개발이 진행 중인 서쪽지역과의 생태축이 단절되어 있다. 이 같은 노원구의 환경적인 문제를 해결할 수 있는 유휴지가 다른 지역보다 적은 편이나 밀집되어 있지 않고, 고르게 분포하고 있어 유휴지의 도시녹지화를 통해 문제를 효과적으로 해결할 수 있을 것이라 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 세 가지 측면을 고려하여 대상지를 선정하였다.

2.2 유휴지

녹지와 같은 도시 내 휴식공간에 대한 시민의 요구가 증가함에 따라 서울시는 「도시공원 및 녹지 등에 관한 법」에 따라 소규모 공간 활용 전략을 제시하며 쾌적한 도시환경을 조성을 추진하고 있다. 지가가 높은 시가지에 대규모 공원을 조성하는 것은 재정과 현실여건을 감안할 때 거의 불가능하기 때문에 소규모 공지나 자투리땅을 활용하여 녹지를 확충하는 것이 현실적인 방안이다. 특히 「도시재생 활성화 및 지원을 위한 특별법」을 통해서 유휴지는 잠재력을 지니는 중요한 공간으로 자리매김하게 되었다 (Jang and Kim, 2011).

도시 내 유휴지는 지역 주민의 생활공간에 위

치함에 따라 향후 활용 가능성을 잠재적으로 내포하고 있는 공간이라 할 수 있다. 하지만 기존의 철거비, 용도변경시 소요되는 준비기간, 소유권의 이해관계, 관련 법·제도 등의 문제들이 수반하게 됨에 따라 유휴지를 적극 활용하기 위한 복잡한 운영절차를 밟아야 하는 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 유휴지 23개소(9931.27)를 대상으로 녹지 계획의 현실적인 측면을 고려하여(비용, 간편한 절차) 도시 내 소규모 유휴지를 활용하고자 하였다.

III. 연구방법

3.1 녹지의 복합적인 효과를 고려한 공간 계획

본 연구에서 고려할 녹지의 복합적인 효과는 녹지 연결성 증진과 도시 열 환경 개선 효과이다. 추가로, 도심지 녹지 선정의 경우 그 지역의 경제적 가치가 주요한 선택의 기준이 될 수 있기 때문에(Lee et al. 2016), 녹지 선정의 기준으로 공시지가를 최소화시키는 것을 추가적으로 고려하였다.

다기준 최적화를 활용해서 녹지의 두 가지 효과를 보는 이유는, 녹지 선정의 위치에 따라서 녹지 연결성 증진효과와 열 환경 개선 효과가 다르게 나타나기 때문이다. 예를 들어 기존의 녹지 공간에서 인접한 지역에 녹지를 도입했을 때 연결성 효과를 크게 기대할 수 있는 반면, 전체적인 열 환경을 개선하기 위해서는 주변에 녹지가 없는 지역에 녹지를 도입하는 것이 효과적일 수 있다. 녹지 선정 위치에 따라 두 가지 효과 수준이 달라지는 것을 고려해 볼 때 녹지의 복합적인 효과와 비용을 고려한 공간 최적화 계획은 중요하다. 본 연구에서는 녹지 조성의 공간을 기존의 유휴지로 설정하였으며 실제 공간 적용을 위해 각 목표에서 정량적인 평가 도면을 구축하여 녹지의 효과에 대해 분석하였다.

3.1.1 녹지 연결성 증진

노원구는 동쪽의 산림지역으로부터 남측지역의 연결녹지가 서쪽 중랑천까지 연결되어 생태축이 조성되어있는 도시형태를 가지고 있었으나, 대규모 아파트 단지 조성사업, 전철노선 등 인공화로 인해 야생 동, 식물의 서식지가 파편화되어 생태계가 훼손되고 있다. 파편화된 서식처는 생물다양성을 증진시키지 못하며, 생태계 회복에 어려움이 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 파편화된 도시 내 녹지 간 연결성을 평가하고 생태적으로 중요한 위치에 효율적으로 연결하는 방안 마련이 필요하다.

선행연구에서는 도시화로 인한 파편화된 서식지를 경관적으로 연결하여 서식지의 질 및 종다양성을 향상시키는 방법으로 생태네트워크 구축에 관한 연구가 수행되고 있다. 그 중 회로이론에 기초한 써킷스케이프(circuitscape)는 개별 격자 내에 위치한 토지이용을 종 이동에 대한 저항으로 간주하여 선정한 목표 지점들 간에 연결된 모든 격자에 대해 종의 이동 확률을 계산하여 연결성을 나타낸다(McRae et al. 2008).

써킷스케이프는 최소비용 방법과 종의 무작위적 움직임을 결합함으로써 파편화된 서식처 간 전반적인 녹지 연결성을 평가하고, 생태흐름이 집중되는 지역을 생태축 보전 및 관리방안을 제안하는데 유용한 도구로 활용되고 있다.

본 연구에서는 녹지의 연결성을 증진하기 위해 써킷스케이프를 활용하여 전류의 흐름이 높게 나타나는 지역에 녹지 조성이 필요한 곳으로 설정하였다. 써킷스케이프의 입력 자료로 활용되는 저항값 산출은 개별적인 서식지나 생물종을 목표로 하지 않고, 지역 전반적인 연결성 평가를 바탕으로 저항값을 설정한 선행연구를 참고하여(Pelletier et al. 2014; Yoon et al., 2019b), 토지피복에 동일 한 값을 부여하였다(Table 1). 최종적으로 다음과 같은 식을 통해 녹지우선순위를 부여하였다(식 1).

R_j = value of resistance surface

G_j = value of green connectivity

$X_j = \begin{cases} 1 & \text{if area } j \text{ converted to green space} \\ 0 & \text{if not} \end{cases}$

Maximize Green Connectivity $\sum R_j G_j X_j$

식1

3.1.2 도시 열 환경 개선

도시 열 환경 악화의 주된 원인 중 하나인 인공구조물의 증가는 토지이용 및 토지피복의 변화와 연관된다. 이는 태양에너지가 도시지역의 표면 피복에 따라 저장된 후 복사열로 방출되는 양에 차이가 발생하기 때문에 도시열섬 완화를 위해서는 낮은 기온을 방출하는 자연피복을 조성하는 것이 중요하다(Jee et al., 2016). 서울시는 도시 열 환경을 개선하기 위한 주요 대책으로 인공배열 억제와 지표면 피복 개선을 고려하고 있으며, 콘크리트 및 아스팔트를 자연토양과 녹지로 변형시키거나 소규모 및 자투리공간을 활용한 녹지조성을 통해 기온을 낮추는 효과를 기대하고 있다.

특히 녹지는 그림자 효과와 증산작용을 통해 표면 온도를 포함하여 주변 지역의 온도를 저감시킨다(park et al. 2016). 표면 온도는 평균 복사 온도를 결정하는데 사용되며(Andreas et al., 1999), 인간의 편안함 수준에 영향을 미치는 주요 요인으로 거시규모에서 열 환경을 평가하기 위해 활용 하고 있다(Lu et al., 2001). 원격탐사를 활용한 지표면 온도(LST, Land Surface Temperature) 데이터는 도시 열 환경에 영향을 미치는 중요한 지표로 활용되고 있기 때문에 본 연구에 활용되기 적합하다고 할 수 있다(Li. et al 2018).

본 연구에서 녹지의 LST 저감효과를 정량화하기 위하여, 연구 대상 유희지의 평균 면적과 유사한 녹지의 효과를 평가한 선행연구를 조사하였다(Table 2). 선행연구 조사 결과, 녹지 규모에 따른 녹지의 LST(Land Surface Temperature) 값, 주변 LST 저감량 및 저감 범위가 균일하게

Table 1. Resistance values according to land cover in analysis extent

Index	Land cover	Resistance	Reference	Area(km2,%)
1	Forest	1	Desrochers et al. 2011	14.0(39.3%)
2	Grass	14	Pelletier et al. 2014	3.2(9.0%)
3	Agriculture	27	Pelletier et al. 2014	0.5(1.4%)
4	Wetland	27	Yoon et al., 2019b	0.1(0.3%)
5	Water body	27	Yoon et al., 2019b	0.4(1.1%)
6	Bare land	50	Yoon et al., 2019b	1.7(4.8%)
7	Urban	100	Desrochers et al. 2011	15.7(44.1%)
Total				35.6(100%)

Table 2. Local mitigation surface temperature

Reference	greenspace area (m ²)	City	LST of vegetation	Cooling extent	Mitigation range(m)	Green space type
kim et al. 2018	200,000	Seoul/ korea	31	2.3	200	park
Lin et al. 2015	100,000	Beijing/ China	30	3.5	100	park
Yu et al. 2017	10,000	Fuzhou/ China	31.178	3.3	30	park
Du et al. 2017	10,000	Shanghai/ China	39.12	2	90	park
Li et al. 2018	4,300	Harbin/ China	29	1.1	30	park
Li et al. 2018	7,700	Harbin/ China	30	0.14	90	park
Cheng et al. 2015	9,300	Shanghai/ China	30.5	2.3	91	park

나타나지 않았으나, 본 연구에서의 연구 대상 유휴지 평균 면적이 6,000m²임을 고려하여 녹지가 갖게 되는 표면온도 저감효과를 1°C, 효과범위를 30m로 설정하였으며(Li et al. 2018), 2개 이상의 녹지의 효과범위가 겹치는 곳은 시너지 효과가 발생한다고 가정하여 1.5°C 감소 효과를 설정하였다(Yoon et al. 2019a; Zhang et al., 2017). 또한 도시녹지로 바뀐 유휴지에 대해서는, 기존의 노원구 지표면 온도자료(Landsat 8, 2018 7.28일 영상) 에서 나타나는 도시 녹지의 지표면 온도인 31°C로 부여하였다(해당 영상에서 시가지 지역의 온도는 35°C로 나타남). 최종적으로 녹지에 대한 온도저감 효과에 대해서 다음과 같이 계산하였다(식 2).

j = index of potential green space area
 i = index of area
 k = number of neighboring green spaces
 β_j = direct cooling benefit for converting area j to green space
 δ_{ik} = indirect cooling single benefit area i received from k neighboring green space
 γ_{ik} = indirect cooling multi benefit area i received from k neighboring green space

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{if area j converted to green space} \\ 0 & \text{if not} \end{cases}$$

$$Y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{if area i neighbors k green spaces} \\ 0 & \text{if not} \end{cases}$$

$$Z_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{if surrounding area of multi lots} \\ 0 & \text{if not} \end{cases}$$

Minimize urban heat (식 2)

$$\sum \beta_j X_j + \sum$$

3.1.3 비용 최소화

서울시 도시녹지 조성에 있어 가장 큰 문제점 중 하나는 재원확보이다. 서울시의 지자체들은 타지방에 비해 높은 수준의 재정 자립도를 보여 주고 있지만, 보건, 복지, 교육 분야 등에 많은 예산이 확보되어 있으며, 과도한 토지 매입비, 관리 유지비 등의 문제로 도시 녹지 조성에 대한 예산이 부족한 실정이다. 또한 서울시 내 행정 구역별 재정 자립도가 큰 편차를 나타내고 있으며, 동일한 행정구역에서도 토지 가격의 편차가 크게 나타나 도시 녹지가 부족한 행정구역임에도 불구하고 도시녹화 사업을 진행하기 어려운 형편이다. 따라서 유휴공간을 도시녹지로 선정할 때에도 적은 비용으로 조성할 수 있도록 도입 시 공시지가가 낮은 위치에 우선순위를 부여하였으며 다음과 같이 계산하였다(식 3).

$$\begin{aligned}
 C_j &= \text{cost of land purchase} \\
 A_j &= \text{area of green space} \\
 X_j &= \begin{cases} 1 & \text{if lot with green spaces} \\ 0 & \text{if not} \end{cases} \\
 \text{Minimize Cost} &= -\sum C_j A_j X_j \\
 \text{식 3}
 \end{aligned}$$

3.2 최적화 과정

공간계획분야에서는 다양한 가치를 객관적·정량적으로 평가하고 이해관계자들의 요구를 만족시켜 도시 공간 내 상호작용하는 복잡한 환경 문제를 해결하기 위해 '다목적 최적화 알고리즘 (Multi-objective Optimization)을 활용하고 있다 (Gwak et al. 2017). 본 연구에서는 녹지 연결성 증진과 열 환경 개선 효과를 최대화 하고, 비용을 최소화 하는 목적 하에 최적의 녹지 공간을 찾고자 다목적 최적화 알고리즘인 NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm II)를 사용했다.

NSGA-II는 다수의 목적을 가진 최적화 문제에서 생물의 진화 과정을 모방하여 비지배해를 탐색하는 기법으로 밀집거리(crowding distance)와 비지배 등급(non-dominated rank)를 활용하여 녹지 계획안의 다양성을 보존한다(Deb et al.,

2002). 최적화 과정의 초기단계에서는 임의성을 부여한 계획안(녹지 위치 선정안)을 만든다. 이후 적절한 변형(교차, 변이)과정을 반복해 각 목적에 대한 적합도를 점차 높이는 과정을 반복해 목적을 가장 크게 만족시키는 최적의 계획안들을 도출한다(Figure 1). 본 연구에서는 초기 계획안을 40개로 하였으며, 50번의 반복 횟수를 지정하여 파레토 최적의 계획안을 제시하였다. 파레토 최적이란 각 목적에 대해 가장 효율적으로 해결된 상태를 의미하며(Deb et al., 2002), 각 목적 간 최대의 효과를 나타내는 계획들을 비교할 수 있다는 장점이 있다.

IV. 연구결과

4.1 최적의 유휴녹지 위치 선정 결과

파레토 최적에 40개의 녹지 위치 선정 계획안이 도출되었다. 파레토 최적 그래프를 보면 목표 간에 상충효과를 보이고 있다. 도시 열 환경개선과 비용간의 관계, 녹지 연결성과 비용간의 관계에서는 녹지 증가에 따라 비용이 증가함으로 설명할 수 있다. 녹지 연결성과 열 환경 완화의 경우 기존의 녹지 공간에서 근접한 위치에 녹지를 도입했을 때 연결성의 효과를 크게 기대할 수 있으나 열 환경 완화의 경우 기존녹지에서 멀리 떨어진 시가지 지역에서 효과가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 파레토 최적에 해당하는 계획안들은 3가지 목표(녹지 연결성 증진, 도시 열 환경 개선, 비용 최소화)를 최대로 달성하는 계획안 이지만, 그중에서도 특정 목표에 치우치거나 (e.g., 3th, 38th) 모든 목표를 비슷하게 만족하는 (e.g., 8th) 계획안이 존재하게 된다 (Table 3).

연결성 증진을 가장 크게 만족시키는 계획안 (18th)과 열 환경 개선효과를 가장 크게 만족시키는 계획안(6th)을 비교해보았다. 녹지 연결성 증진에 큰 효과를 가져 오는 (18th) 계획안의

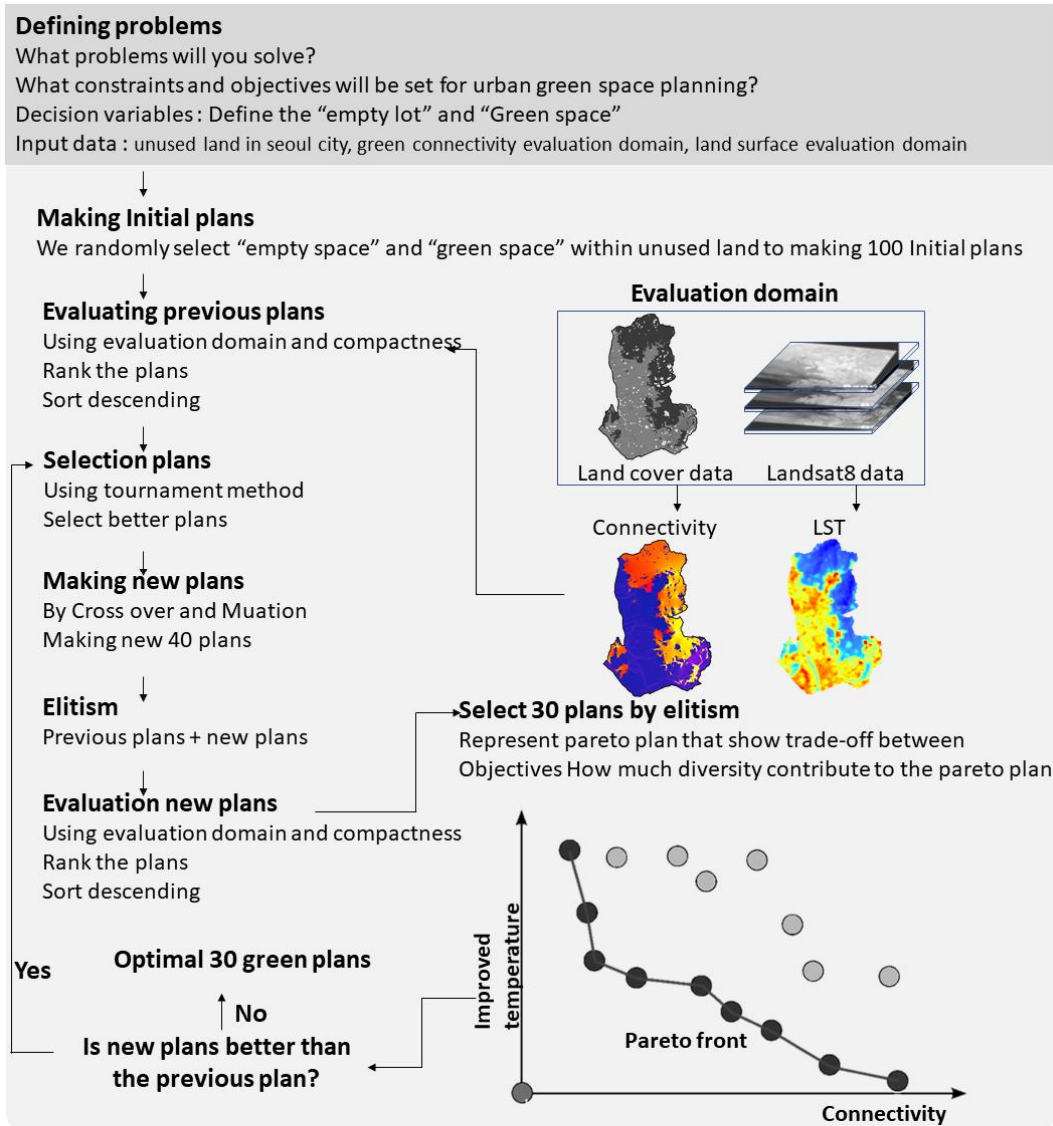


Figure.1. Process of the multi-objective planning model for urban greening

Table 3. Fitness values of the selected plans (the gray boxes indicate a performance better than the mean of each objectives)

Objectives	3th	6th	8th	18th	38th	Mean
heat mitigation (°C)	-0.7668	-1.6953	-1.1940	-1.1096	-1.1096	-1.17506
Connectivity	-11.7582	-9.8822	-9.1801	-13.6433	-9.4444	-10.78164
Cost (₩)	106,937,400	135,495,300	99,980,100	139,339,400	96,367,400	115,623,920
New green (lot)	84	92	75	75	75	80.2

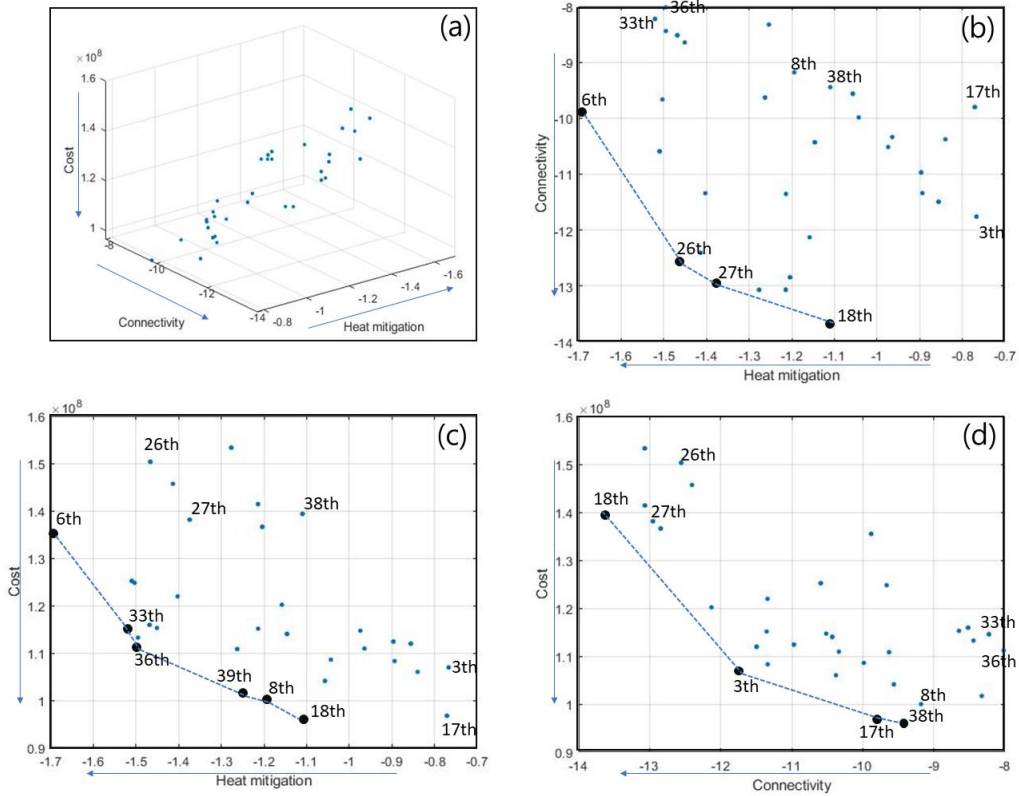


Figure. 2. Trade-offs between the Pareto-plans for urban greening: (a) Pareto-optimal plans on three dimensions, (b) relationship between heat mitigation effect and connectivity, (c) relationship between heat mitigation effect and cost, and (d) relationship between connectivity and cost (the black arrows on each figure indicate the direction to a better performance of each objective).

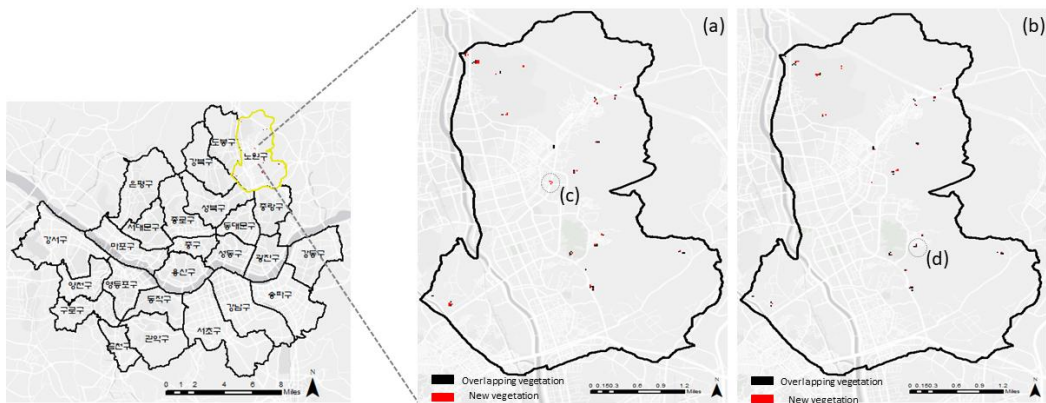


Figure3. Selected plans for greening : (a)6th, high performance plan for heat mitigation (b) 18th, high performance plan for connectivity (black spots:overlapping spots for both plans, red spots: a or b single spots) (c) New vegetation for heat mitigation (d) New vegetation for connectivity

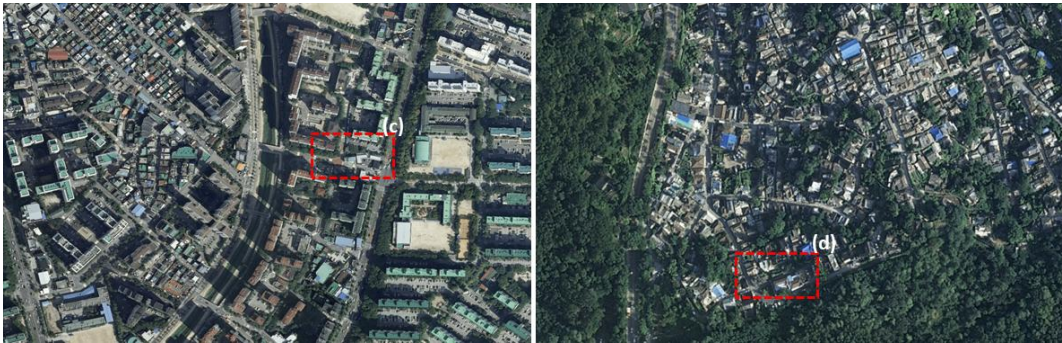


Figure4. (c) New vegetation located at Wonkwang Elementary School Intersection (d) New vegetation located between Bulam Mountain and Chungbuk Park

경우 기존녹지와 인접한 지역에 새로운 녹지가 위치하고 있다. 특히 삼육대 옆, 이상길 묘역, 불암산 공원, 수락산과 인접한 지역에 녹지가 도입되었으며, 다른 녹지의 경우 작은 공원 주변에 새로운 녹지가 도입됨을 확인할 수 있다 (Figure3.b, Figure4.d). 반면에 열환경 개선에 효과를 가져 오는 (6th) 계획안의 경우 기존녹지와 멀리 떨어진 지역에 위치하고 있으며, 주거지역/상업지역 주변에 위치하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 남서쪽에 위치한 월계테크노타운, 서울과학기술대학, 중계로길, 북서쪽에 위치한 수락중 근교에 새로운 녹지가 위치해 있음을 확인할 수 있다(Figure3.a, Figure4.c).

각 목적에 큰 효과를 기대할 수 있는 두 계획안은 기존녹지의 위치에서 인접한 지역에 조성되어 있는지 혹은 멀리 떨어진 지역에 위치하는지에 따라 효과가 상이하게 나타났다. 반면 기존의 녹지에 인접한 지역이나 주거지역, 상업지역으로 밀폐되어 있는 지역에 대해서는 동일한 녹지위치를 확인할 수 있다. 즉, 이러한 유휴지 위치는 두 가지 효과가 모두 높게 나타날 수 있는 중요한 지역이라고 할 수 있다.

V. 고 찰

녹지의 효과와 비용 등 녹지계획에서 고려해

야할 공통적인 요소로 객관적이고 정량적인 기준이 필요하다. 그러나 실제지역을 대상으로 녹지계획을 할 때는 대부분이 해당사자의 주관적인 의견이 반영되어 수행되고 있다. 본 연구에서의 무작위 변경(교차 및 변이)과 정량적 평가(적합성평가), 더 나은 계획의 선택을 위해 반복함으로써 녹지의 복합적이고 정량적인 효과가 반영된 계획과정을 만들고자 하였다.

본 연구에서 제시한 파레토 계획안은 어떤 계획을 선택하느냐에 따라 생물의 서식지(생태적 혜택)와 도시민의 열 쾌적성 향상(인간의 혜택)간에 trade-off 효과를 보임을 밝혔다. 개선된 계획안 중 18th 대안을 보면, 연결성-비용 그래프, 연결성-열 환경 개선 그래프에서 녹지 연결성이 개선되는 방향으로 경사가 급변하는 변곡점에 위치하고 있어, 최대의 녹지 연결성 효과를 기대할 수 있는 대안이라고 할 수 있다. 이는 연결성 증진을 가장 큰 목표로 생각하는 이해당사자에게 도움이 될 수 있으나, 타-목적에 대한 효과가 다른 계획안보다 낮게 된다. 그에 반해 6th 대안은 열 환경 개선에 대한 목표가 크게 반영된 것으로, 18th보다 녹지 연결성 개선 값이 3.76 낮지만 표면 온도는 0.59를 더 낮출 수 있다.

기존 녹지에서 멀리 떨어진 지역 혹은 밀폐된 주거/상업지역에 주로 새로운 녹지가 위치하게 된다. 이는 주계주공단지에는 수락산, 불암산과 인

접한 지역처럼 높은 표면온도를 보이는 곳에 도시녹지가 위치하게 만들어 도시민에게 큰 효과를 기대할 수 있다.

또 하나의 목적인 비용 측면에서도 타 목적들과 trade-off 관계를 보인다. 위에서 언급한 6, 18th대안은 각각 열 환경 개선과 녹지 연결성 증진에 효과가 가장 크지만, 그만큼 비용이 많이 드는 것을 확인할 수 있다(Table 3). 이러한 대안들은 의사결정자에게 폭 넓은 선택지를 제공할 수 있다. 특히 공간 계획은 일반적으로 한 사람에게 의해서 선택이 되지 않기 때문에, 여러 사람들의 목적을 만족시킬 수 있는 협의점을 도출하는데 위와 같은 대안들의 제공이 도움이 될 수 있을 것이다.

본 논문에서 개발한 최적화 계획 모형은 각 환경에 대한 정량적인 평가도면을 통해 문제를 해결 할 수 있는 최적의 녹지 위치 도출에 초점을 맞추어 구축하였다. 최적화 기법의 특성 상 목표를 평가할 때 계산 시간이 지연될 경우 분석과정에서 어려움이 있기 때문에 본 연구에서는 열 환경과 녹지 연결성을 평가할 때 단순하지만 계산속도가 빠른 방법을 활용하였다. 그러나 실제 열 평가의 경우 복합적인 주변 환경적 요인에 따라 그 결과가 다르게 나타날 수 있으며, 동일한 규모의 녹지라도 온도저감 효과 범위와 강도가 다르게 나타나므로 개별적 녹지에 대한 온도저감 효과 산정 방법이 추가되어야 할 것이다. 또한 녹지 연결성의 경우 써킷스케이프를 통한 결과물을 바탕으로 낮은 전류값을 가진 지역에 녹지도입의 우선순위를 부여하였으나, 이 또한 하나의 녹지가 도입될 때 기대되는 효과를 반영한 평가가 필요하다. 향후 더 정확하고 효율적으로 평가할 수 있는 녹지의 정량 효과 산정방법이 개발된다면 위 논문에서 갖는 한계를 극복할 수 있을 것이다. 더 나아가 실제 계획에서 고려되는 형평성 문제, 유동인구, 비오류지도, 소유주 등 다양한 범주 문제가 다목적 계획에 고려된다면 확장성이 넓은 최적의 계획 모

델을 제시할 수 있을 것이다.

VI. 결 론

본 연구는 도시개발로 인한 복합적인 환경문제가 예상되는 노원구 지역을 대상으로 두 가지 환경문제(도시 열 환경, 녹지연결성)와 비용을 고려한 최적의 녹지 공간 계획 모델을 제시하였다. 소규모 유휴지를 도시 녹지로 조성함에 따라 각 효과간에 trade-off 효과가 나타났으며 계획안에 따라 환경 문제 해결정도가 다르게 나타났다. 녹지 조성을 통한 환경문제 해결은 비용과 상충효과가 나타나며 유전알고리즘은 세 가지 목적을 종합적으로 판단할 수 있는 파레토 계획안을 제시하였다. 도시 녹지는 다원적 기능을 보유하고 있음에도 불구하고, 도시 녹지 도입으로 다양한 효과를 최대화 할 수 있는 계획 모델이 미흡하다는 점에서 본 연구의 기여도가 클 것으로 예상된다. 특히 본 연구에서 제안한 최적화 모델은 목표 간 가치에 가중치를 부여하지 않고 파레토 계획안을 제시하여 이해당사자가 원하는 계획안을 선택할 수 있다. 본 연구에서 제시한 최적화 계획 모델은 최적화 알고리즘과 적합도 분석을 위한 평가도면(도시 열 환경, 녹지연결성)을 결합한 구조로 활용성이 높다. 이는 해결 하고자 하는 목적을 세우고, 정량적인 평가도면을 구축한다면 다양한 분야에서 적용이 가능할 것으로 예상된다.

Reference

- Andreas, M. · M. Helmut and I. Moses G. 1999. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *Journal of Physics D: Applied Physics* 43 : 76-84
- C. Y. Park · D. K. Lee · H. G. Kim and J. H. Park. 2016. Urban Heat Mitigation Effect of Tree on Microscopic Scale. *Journal of*

- Korean Society for People Plants and Environment 19(4) : 305-315.
- Caparros-Midwood, D. · S. Barr and R. Dawson. 2015. Optimised spatial planning to meet long term urban sustainability objectives. Computers, Environment and Urban Systems 54 : 154-164. Elsevier B.V.
- Cheng, X. · B. Wei · G. Chen · J. Li and C. Song. 2015. Influence of park size and its surrounding urban landscape patterns on the park cooling effect. Journal of Urban Planning and Development 141(3) : 1-10.
- Desrochers A, Belisle M, Morand-Ferron J, Bourque J. 2011. Integrating GIS and homing experiments to study avian movement costs. Landscape Ecology. 26: 47-58.
- Du, H. · W. Cai · Y. Xu · Z. Wang · Y. Wang and Y. Cai. 2017. Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing Data. Urban Forestry and Urban Greening 27(February) : 24-31. Elsevier.
- Fintikakis, N. · N. Gaitani · M. Santamouris · M. Assimakopoulos · D. N. Assimakopoulos · M. Fintikaki · G. Albanis · K. Papadimitriou · E. Chrysoschoides · K. Katopodi and P. Doulas. 2011. Bioclimatic design of open public spaces in the historic centre of Tirana, Albania. Sustainable Cities and Society 1(1) : 54-62. Elsevier B.V.
- García, G. A. · E. P. Rosas · A. García-Ferrer and P. M. Barrios. 2017. Multi-objective spatial optimization: Sustainable land use allocation at sub-regional scale. Sustainability (Switzerland) 9(6) .
- Gwak, J.H., Lee, B.K., Lee, W.K., Sohn, S.Y., 2017. Optimal location selection for the installation of urban green roofs considering honeybee habitats along with socioeconomic and environmental effects. J. Environ. Manage. 189, 125-133
- Jang, N-J and J. Kim. 2011. “A Study on the Urban Park Management System with Special Use Permits in Seoul”. Seoul Development Institute
- Jee, J.-B. · B.-Y. Kim · I.-S. Zo · K.-T. Lee and Y.-J. Choi. 2016. Retrieval of Land Surface Temperature based on High Resolution Landsat 8 Satellite Data. Korean Journal of Remote Sensing 32(2) : 171-183. (In Korean)
- Kim, D-H · T-S. Seo · M-Y. Lee · W-S.Han · J-Y. Im · H-A. Kim. 2015. “A Study on the Analysis of Vacant and Underutilized Land”. (In Korean)
- Kim, G. · Y. Lee · J. H. Kim · H. Choi and B. Kim. 2018. Analysis of the Cooling Effects in Urban Green Areas using the Landsat 8 Satellite Data 34(2) : 167 - 178. (In Korean)
- Kong, H. · S. Kim · S. Park · S. Lee · Y. Shin · J. Kil · J. Lee · T. Choi · S. Park · H. Yun · K. Shim · J. Go and S. Park. 2016. Effect of Land Use on Urban Thermal Environment in Incheon, Korea 3(4) : 315-321. (In Korean)
- Lee, J-M · M-K.Lee and S-H.Oh. 2016. “Tactical Utilization System of Vacant Urban Space”. (In Korean)
- Lee, W-S, S-G.Jung · K-H.Park and K-T. Kim. 2010. Analysis of Urban Thermal Environment for Environment-Friendly Spatial Plan. The Korean Association of Geographic Information Studies 13(1) : 142 - 154. (In Korean)
- Li, H. · Y. Zhou · X. Li · L. Men · X. Wang · S. Wu and S. Sodoudi. 2018. A new method to quantify surface urban heat island intensity. Science of the Total Environment

- 624 : 262 - 272. The Authors.
- Lin, W. · T. Yu · X. Chang · W. Wu and Y. Zhang. 2015. Calculating cooling extents of green parks using remote sensing: Method and test. *Landscape and Urban Planning* 134 : 66-75. Elsevier B.V.
- Lu, S. · W. Wang · S. Wang and E. C. Hameen. 2019. Thermal comfort-based personalized models with non-intrusive sensing technique in office buildings. *Applied Sciences (Switzerland)* 9(9) .
- McRae BH. · Dickson, BG. · Keitt. TH and Shah. VB. 2008. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*. 89(10): 2712-2724
- Nor, A. N. M. · R. Corstanje · J. A. Harris · D. R. Grafius and G. M. Siriwardena. 2017. Ecological connectivity networks in rapidly expanding cities. *Heliyon* 3(6) : e00325. Elsevier Ltd.
- Pelletier D, Clark M, Anderson MG, Rayfield B, Wulder MA, Cardille JA. 2014. Applying circuit theory for corridor expansion and management at regional scales: Tiling, pinch points, and omnidirectional connectivity. *PLoS ONE*. 9(1): E84135.
- Yoon, E.-J. · E.-J. Song · Y.-H. Jeung · E.-Y. Kim and D.-K. Lee. 2018. Spatial Decision Support System for Development and Conservation of Unexecuted Urban Park using ACO. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 21(2) : 39-51. (In Korean)
- Yoon, E. · E. Kim · J. Kim and D. K. Lee. 2019b. Connectivity Assessment Based on Circuit Theory for Suggestion of Ecological Corridor. *J. Environ. Impact Assess.* 28(3): 275~286. (In Korean)
- Yoon, E. J. · B. Kim and D. K. Lee. 2019a. Multi-objective planning model for urban greening based on optimization algorithms. *Urban Forestry and Urban Greening* 40 (February 2018) : 183-194. Elsevier.
- Yu, Z. · X. Guo · G. Jørgensen and H. Vejre. 2017. How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities? *Ecological Indicators* 82(July) : 152-162. Elsevier.
- Zhang, Y. · A. T. Murray and B. L. Turner. 2017. Optimizing green space locations to reduce daytime and nighttime urban heat island effects in Phoenix, Arizona. *Landscape and Urban Planning* 165(April) : 162-171. Elsevier *Aboveground Biomass(AGB)*