



# 유전자 알고리즘을 이용한 관수 저류조의 공간배치 최적화

## Optimization of Storage Tank Installation Locations for Pipeline Water Supply Using Genetic Algorithm

홍록기<sup>a</sup> · 박진석<sup>b</sup> · 장성주<sup>c</sup> · 이혁진<sup>d</sup> · 송인홍<sup>e†</sup>

Hong, Rokgi · Park, Jinseok · Jang, Seongju · Lee, Hyeokjin · Song, Inhong

### ABSTRACT

Rice paddy has been actively converted into upland crop fields as more profitable upland crop cultivation are encouraged along with the decrease in rice consumption. However, the current water supply system remains mainly for paddy water supply, so research on pipeline water supply for upland cultivation is needed. The objective of this study was to optimize storage tank installation locations for pipeline water supply in reservoir irrigation districts. Five of reservoir irrigation districts were selected as the study sites and gridded of 10×10 m in size. Then genetic algorithm was adopted to evaluate the effects of spatial storage tank allocation on total pipeline cost. The lengths of the main and branch pipelines were considered as the objective cost function for the optimization of storage tank installation. Overall the shorter the branch pipeline and the longer the main pipeline, as the number of storage tanks increase. The minimal pipeline cost, i.e., optimal condition was reached when approximately 10% of the storage tank numbers to total upland plots were installed. The methodology presented in this study can be applied to determine the number and spatial arrangement of storage tanks for upland pipeline irrigation system design.

**Keywords:** Storage tank; water supply; genetic algorithm; upland

## 1. 서론

농업환경과 식생활의 변화로 인해 2000년대 이후 농경지 면적이 꾸준히 감소하고 있다 (Park et al., 2017). 2021년 경지 면적 조사결과 (KOSTAT, 2022)에 따르면 2012년 논 면적 966천 ha (55.8%), 밭 면적 764천 ha (44.2%)에서 논 면적은 5.3% 감소, 밭 면적은 5.3% 증가하여 2021년 기준 논 면적 780천 ha (50.5%), 밭 면적 766천 ha (49.5%)로 밭 면적이 논 면적에

근접하는 추세를 나타내고 있다. 이는 논 면적이 감소하고, 감소한 면적의 일부가 밭으로 전환되었음을 의미한다. 특히, 현재 밭이 논으로 전환되는 것에 비해 논이 밭으로 전환되는 면적이 2.5배가량 높으며, 농지 범용화 사업 등으로 인해 이러한 전환은 더욱 활발해질 것이다 (Kim et al., 2019).

한편, 현재의 용수공급 체계는 논 용수공급 위주로 관리되고 있어 밭지대 용수공급에 관한 연구가 부족한 실정이다. 대부분 밭 관개용수는 개별적으로 지하수를 개발하여 이용하고 있으며, 이러한 방식은 개별 농가에서의 관정 설치비용 및 용수이용 측면에서 효율성이 낮다. 또한, 지하수는 전국적으로 수위가 낮아지고 있으며, 가뭄 시 지하수위 저하에 따라 용수 공급이 어려워질 수 있다 (Shin et al., 2019a). 지표수의 경우 저수지, 하천을 주요 용수원으로 개수로로 통해 공급되는데, 밭 용수공급을 위해서는 오염물질 대책이나 관수로 기반의 시스템 적용 등의 대책이 필요하다.

농업용 저수지와 같은 기존 용수원에 인접한 지역에서 논의 밭으로의 전환도 활발한 추세다. Kwon et al. (2021)은 전국적으로 분포한 한국농어촌공사 관리 하의 3,400개 저수지 중에서 수혜면적 200 ha 이상의 비교적 규모가 큰 605개 수혜 구역에 대해 2007년부터 2019년까지 밭작물 재배 면적 전환 추이를 분석하여, 논 면적은 17.8 % 감소하고, 밭 면적이 4.9 % 증가하였음을 제시했다. 저수지 수혜구역 내 밭작물 재배 면

<sup>a</sup> Undergraduate Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

<sup>b</sup> Ph.D Student, Department of Rural Systems Engineering, Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National University

<sup>c</sup> Ph.D Student, Department of Rural Systems Engineering, Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National University

<sup>d</sup> MS Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

<sup>e</sup> Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Global Smart Farm Convergence Major, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4581, Fax: +82-2-873-2087

E-mail: [inhongs@snu.ac.kr](mailto:inhongs@snu.ac.kr)

Received: August 30, 2022

Revised: September 13, 2022

Accepted: September 26, 2022

적의 지속적 증가는 기존 논 용수공급 위주 방식에서 밭작물에 대한 안정적 용수공급 방안 마련을 요구한다.

최근에는 밭 지대 용수 확보를 위한 방안으로 저류조 기반 집단 용수공급 방식이 제안되고 있다 (Shin et al., 2019b). 이는 지표수와 지하수를 동시에 밭 관개용수로 공급할 수 있는 방법의 하나로, 저수지나 양수장을 통해 취수한 물을 저류조를 기반으로 하는 관수로 시스템을 통해 집단 관개 지구로 급수하는 방식이다. 저류조 기반 용수공급의 효율성은 관개 지구 내 저류조 수와 공간적 배치, 이에 따른 관로 배치 등에 따라 달라지지만, 이에 관한 연구는 부족한 실정이다.

용수공급 시스템 내 저류조와 같이 시스템 내 설비를 배치하는 문제는 시스템의 효율성, 경제성 등과 긴밀한 관련이 있다. 예를 들어, 저류조 용수공급 시스템에서 관망을 경제적으로 배치하고자 한다면, 저류조로의 용수공급을 위한 관로와 저류조에서 대상 필지로 용수를 공급하기 위한 말단 관로의 설치비용을 최소화할 수 있도록 저류조 설비를 배치하는 것을 목표로 해야 하고, 용수 공급망의 총비용을 최소화하는 것이 설비배치문제의 목표가 된다. 이러한 문제를 다루기 위해 정수 선형계획법 (Chakrabarty et al., 2002; Wang and Zhong, 2006), 혼합 정수 계획법 (Fagerfjäll, 2010), 기하계획법 (Nandigam and Dhali, 2008)과 이외 근사적 알고리즘 (Lloyd and Xue, 2007; Tang et al., 2006)을 적용하는 방법이 제시되어 왔다. 하지만, 설비배치 최적화 문제는 대부분 높은 차원의 조합 최적화 문제로, 모든 가능해를 탐색하여 전역적 최적해를 도출하는 것이 어렵다. 이러한 이유로 최근에는 진화적 알고리즘 (Evolutionary Algorithm, EA) (Gong et al., 2015; González et al., 2010; Lee, 2001), 군집지능(Swarm Intelligence, SI) (Kennedy, 2006; Chen et al., 2011; Park and Lee, 2014)과 같은 메타 휴리스틱 탐색 기법을 적용하여 최적해를 도출하는 방법이 주목받고 있다.

본 연구에서는 저류조와 관수로 기반 밭 용수공급을 위한 저류조 설치지점 수와 공간적 배치를 최적화하는 방법론을 제시하고자 했다. EA에 속하는 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm, GA)을 적용하여 저수지에서 대상지구로 연결된 용수간선으로부터 저류조에 용수를 공급하는 주 관로와 저류조에서 개별 밭 필지로 용수를 공급하는 말단 관로로 구성되는 관로의 총비용을 최소화하는 저류조의 최적 설치지점 수와 그 공간적 배치를 도출하였다.

## II. 재료 및 방법

저류조-관수로 기반 밭 용수공급을 위한 저류조 최적 공간 배치를 위해, 밭 필지의 공간적 분포를 바탕으로 관로 비용을

최소화하는 저류조 설치지점을 GA의 적용으로 도출했다.

### 1. 대상지구 및 공간정보 수집

대상지구 선정을 위해 Kwon et al. (2021)에 제시된 방법에 따라 한국농어촌공사에서 관리하는 저수지 중 수혜면적 200 ha 이상의 605개 수혜지구 중에서 2007년에 대해 2019년 지구 내 밭 면적 비율이 증가한 383개 지구를 고려하였다. 이들 중 면적이 감소하면서 밭 면적이 증가하는, 전작이 일어나는 364개 지구를 밭의 Largest Patch Index (LPI) 변화율을 기준으로 집단·개별화 전작 지구의 2개 클러스터로 구분하였다. LPI는 지구 내에서 대상 클래스의 가장 큰 패치로 이루어진 패치 면적이 지구 면적에서 점유하는 비율로, LPI가 작아질수록 지구 내 대상 클래스의 파편화 정도가 커지고, LPI가 커질수록 집단화 정도가 커짐을 의미한다 (MaGarigal and Mark, 1995). 또한, 383개 지구 중 논과 밭 면적이 함께 증가해 총 농지 면적이 증가하는 19개 지구를 추가 1개 클러스터로 구분했다.

본 연구에서 대상지역은 집단화 전작지구에서 신흥, 거여 2개 지구, 개별화 전작지구에서 화정, 신곡 2개 지구, 논·밭 증가지구에서 진두 1개 지구로 총 5개 지구를 선정하였다. (Table 1, Fig. 1).

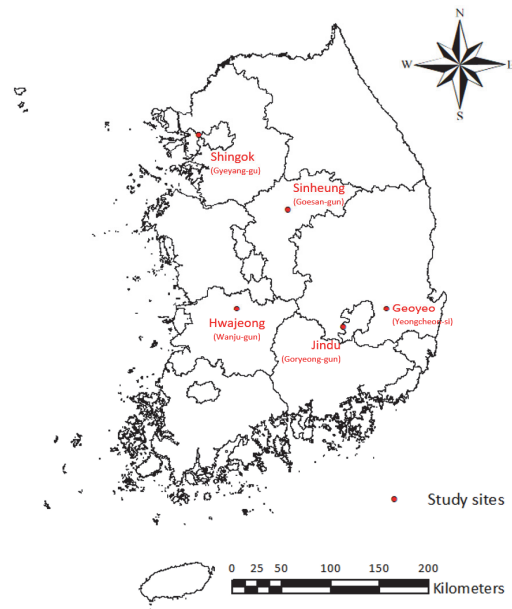


Fig. 1 Location of the study sites

용수공급이 이루어지는 필지의 공간적 배치와 토지이용을 바탕으로 저류조 최적 공간배치를 도출하기 위해 농림축산식품교육문화정보원에서 제공되는 대상지구의 스마트팜맵 정보를 수집했다. 스마트팜맵은 2017~2018년 촬영된 항공 영

**Table 1** Statistics of cultivation area and change trend for the study sites

Study site	Cultivation area									LPI			Remark
	Area (ha)						Change rate (%)			2007	2019	Change rate (%)	
	2007			2019									
	Paddy	Upland	Sum	Paddy	Upland	Sum	Paddy	Upland	Sum				
Sinheung	170.8 (92.5)	13.9 (7.5)	184.7	21.8 (15.9)	115.5 (84.1)	137.3	-87.2	729.7	-25.7	0.83	1.80	118.2	Collective conversion
Geoyeo	159.7 (94.2)	9.9 (5.8)	169.5	24.8 (15.0)	140.8 (85.0)	165.6	-84.4	1,328.1	-2.3	1.01	3.71	268.4	Collective conversion
Hwajeong	309.1 (93.1)	22.7 (6.9)	331.8	148.5 (59.5)	101.0 (40.5)	249.5	-51.9	344.0	-24.8	1.04	0.92	-11.7	Separate conversion
Shingok	915.1 (99.0)	9.4 (1.0)	924.5	312.0 (58.5)	221.5 (41.5)	533.6	-65.9	2,258.9	-42.3	0.34	0.29	-13.8	Separate conversion
Jindu	161.5 (89.0)	20.0 (11.0)	181.5	166.5 (80.4)	40.5 (19.6)	206.9	3.1	102.2	14.0	3.01	0.61	-79.6	Cultivation area increasing

\* The values in ( ) represent percent of respective categories as to total cultivation area

상을 바탕으로 2019년 제작된 것으로, 농업지역의 토지이용이 논, 밭, 과수, 시설재배지로 구분되어 있다.

## 2. 저류조 최적 공간배치 생성 알고리즘 개발

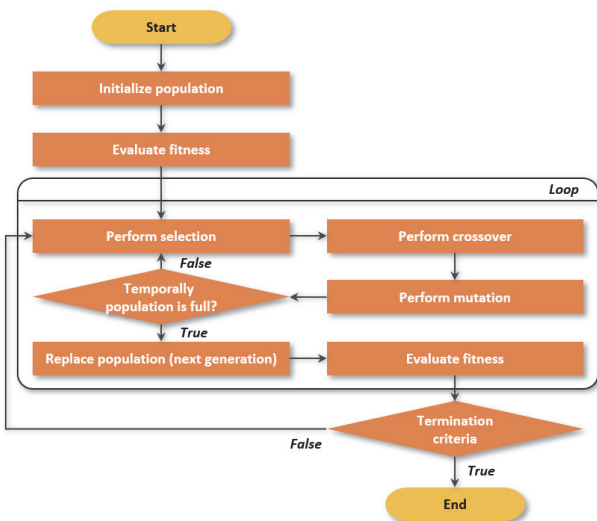
GA는 모든 생물이 주어진 환경에 적응하여 살아남는다는 다윈의 적자생존 이론을 바탕으로 한 자연 선택 (natural selection)의 원리와 자연의 진화 현상에 기반한 전역적 병렬 탐색 최적화 알고리즘이다 (Melanie, 1996). GA는 문제 상황에 대한 가능해를 적절한 자료구조로 표현하고, 이들을 점차

변형하여 최적해를 도출하게 된다.

GA에서는 생물학적 유전자인 염색체 (chromosome)에 해당하는 문자열, 혹은 배열을 가지고, 생명 현상에서와 같은 재생산 (reproduction), 교차 (crossover), 돌연변이 (mutation)를 거쳐 다음 세대의 자손을 인공적으로 생성하고, 이들 세 가지 연산을 반복 적용해 적합도가 높은 해를 탐색할 수 있게 된다 (Fig. 2).

GA는 탐색 공간의 한 점에서 경사 값이나 기타 보조 정보에 기반해 확정론적 전이 규칙에 따라 최적해를 찾는 경사 하강법 (gradient descent), Levenberg-Marquardt 알고리즘 (Levenberg, 1944) 등과 달리, 점들의 집단에서 적합도 함수 (fitness function)만을 이용해 확률론적 전이 규칙으로 최적해를 탐색하는 기법이다. 따라서 미분 가능성, 연속성 등 최적화 함수에 대한 정보가 요구되지 않으며, 병렬 탐색으로 인해 다수의 봉우리 (multimodal)로 이루어진 탐색 공간에서 전역 최적해를 찾는 데 적용성이 있다 (Lee, 2001).

본 연구는 저류조의 공간배치를 최적화하는 알고리즘을 구축하고자 했다. 이를 위해 저류조 공간배치의 적정성을 평가하는 기준이 필요한데, 그 기준으로 용수 관로의 총비용을 목적함수로 이용하였다. GA를 이용하여, 저류조의 공간배치를 정하고 각 배치에 대한 총 관로 비용을 최소화하는 방법으로 최적배치를 결정하였다 (Fig. 2).



**Fig. 2** Flow chart of the optimization procedure with genetic algorithm

### 가. 적합도 함수

저류조의 공간적 배치를 평가하는 목적함수로 관로 연장, 지형 요소, 저류조의 수, 용수공급 안정도 등 다양한 인자를

고려할 수 있다. 하지만 많은 인자를 적용하기에는 계산량에 따른 제약이 있어 경제성에 영향이 큰 관수로의 길이를 주요 인자로 활용하였다. 본 연구에서는 저류조에서 필지로 용수를 공급하기 위한 말단 관로 비용 (식 (1))과 저수지에서 대상지구로 연결된 용수 간선으로부터 저류조로의 주 관로 비용 (식 (2))을 고려하여 목적함수를 식 (3)과 같이 표현하였다. 저류조에서 필지로 용수를 공급하기 위한 관로 비용의 역수를 적합도 함수  $f$ 로 설정하여 관로 비용이 낮아질수록 높은 적합도를 갖도록 하였다.

$$\text{cost}_{\text{branch}} = w_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j \in T_i} d_{ij} \quad (1)$$

$$\text{cost}_{\text{main}} = w_2 L_{\text{MST}} \quad (2)$$

$$f = \frac{1}{\text{cost}_{\text{branch}} + \text{cost}_{\text{main}}} \quad (3)$$

여기서,  $\text{cost}_{\text{branch}}$ 은 저류조에서 개별 필지로의 용수공급을 위한 말단 관로 비용,  $\text{cost}_{\text{main}}$ 은 저류조로의 용수공급을 위한 주 관로 비용,  $N$ 은 저류조의 수,  $d_{ij}$ 는 저류조  $i$ 와 이로부터 용수를 공급받는 필지  $j$  사이의 관로 길이 (m),  $T_i$ 는 저류조  $i$ 에서 용수를 공급 받는 필지의 집합,  $L_{\text{MST}}$ 는 지구 내 저류조 상호를 연결하는 총 관로 연장의 최솟값 (m),  $w_1$ 은 저류조와 필지 사이 관로의 길이당 비용 가중치,  $w_2$ 는 저류조 간 관로의 길이당 비용 가중치,  $f$ 는 적합도 함수이다.

용수 관로 총비용은 저류조에서 필지로 용수를 공급하기 위한 말단 관로의 비용과 저수지에서 대상지구로 연결된 용수 간선으로부터 저류조로의 용수공급을 위한 주 관로의 비용 합으로 구성된다. 두 인자의 관로 길이에 대한 비용 가중치로  $w_1 = 1$ ,  $w_2 = 7.5$ 를 적용하였는데, 이는 말단 관로로 상용 PVC관, 주 관로로 강관을 적용한다고 가정하고 이들의 지름을 고려한 길이당 단가 비로 설정하였다. 두 인자의 세부 사항은 다음과 같다.

저류조와 필지를 연결하는 말단 관로의 길이는 저류조와 필지 중심점 간 직선거리로 적용하였다. 개별 필지는 지구 내에 설치된 저류조 중 최단 거리에 있는 저류조로부터 용수를 공급받는다고 가정했다.

저수지에서 대상지구로 연결된 용수 간선에서 저류조로 용수를 공급하기 위한 주 관로의 총연장은 지구 내 모든 저류조를 최소한 번씩 연결하는 최소 신장 트리 (Minimum Spanning Tree, MST)의 에지(edge) 길이 합으로, Kruskal 알고리즘 (Kruskal, 1956)을 적용해 산정하였다. 설계 단계에서 용수 간선의 경로가 결정되지 않았을 때 저류조에 용수를 공급하기

위한 주 관로 연장으로 근사적으로 적용될 수 있다.

#### 나. 염색체 구성 및 초기해 생성

GA에서는 해를 직접 탐색하는 것이 아닌, 가능해 (feasible solution)를 염색체로 표현 (encoding)하여 이들에 유전 연산자를 적용해 최적해 (optimal solution)를 탐색한다. 문제 상황의 가능해를 어떻게 염색체로 표현하는가에 따라 해의 형태와 유전 연산자의 종류가 달라지기 때문에 해를 염색체로 표현하는 방법이 중요하다.

한편, 저류조 최적 설치지점으로, 실수로 표현되는 좌표계에서 가능한 설치지점을 모두 고려하는 것은 연산 시간에 제약이 따르므로, 염색체를 실수 대신 격자 좌표로 구성하였다. 이에 대상지구를 가로 10 m, 세로 10 m의 격자로 나누고, 각 격자 축에 번호를 부여하고, 저류조는 격자 상에 설치된다고 가정했다. 본 연구에서는 가능해를 Fig. 3과 같이  $N$ 개 저류조가 설치되는 격자의  $x, y$  방향 인덱스를 나열한 길이  $2N$ 의 배열로 염색체를 표현하였다.

초기 염색체는 이전 세대 염색체가 존재하지 않으므로 알고리즘의 초기 조건으로 별도로 정의되어야 한다. 본 연구에서 초기 염색체는 대상지구가 속한 격자 번호 범위 내에서 임의로 생성하였다.

#### 다. 유전 연산자

GA에 사용되는 유전 연산자에는 선택, 교차, 돌연변이가 있다. 각각의 세대 (generation)에서 선택된 부모 염색체들은 교차 연산을 통해 교배되어 다양한 자손 (offspring)을 생성한다. 돌연변이 연산은 더욱 다양한 염색체를 생성하는 기능을 한다. 본 연구에서는 다음과 같은 선택, 교차, 돌연변이 연산이 자손을 생성하는데 적용되었다.

##### 1) 선택 연산 (selection)

선택 연산은 자손으로 재생산 (reproduction)될 부모 개체를 선택하는 것으로, 적합도가 높은 염색체의 유전자는 유지하고, 그렇지 않은 유전자는 도태되도록 하는 자연 선택 현상을 모형화한 것이다. 단순히 적합도가 가장 높은 두 염색체를 선택할 수 있지만, 이러한 방법은 염색체 다양성을 크게 훼손하기 때문에 전역 최적해를 탐색하기에 부적합하다.

본 연구에서는 비교적 단순하고 GA에서 널리 사용되는 roulette wheel selection (Goldberg, 1989)을 적용하였다. 이는 적합도가 높은 염색체가 더 높은 확률로 선택되도록 동작하며 (식 (4)), 동시에 적합도가 낮은 염색체에도 선택 가능성을 부여함으로써 세대 내 염색체의 다양성을 유지한다.



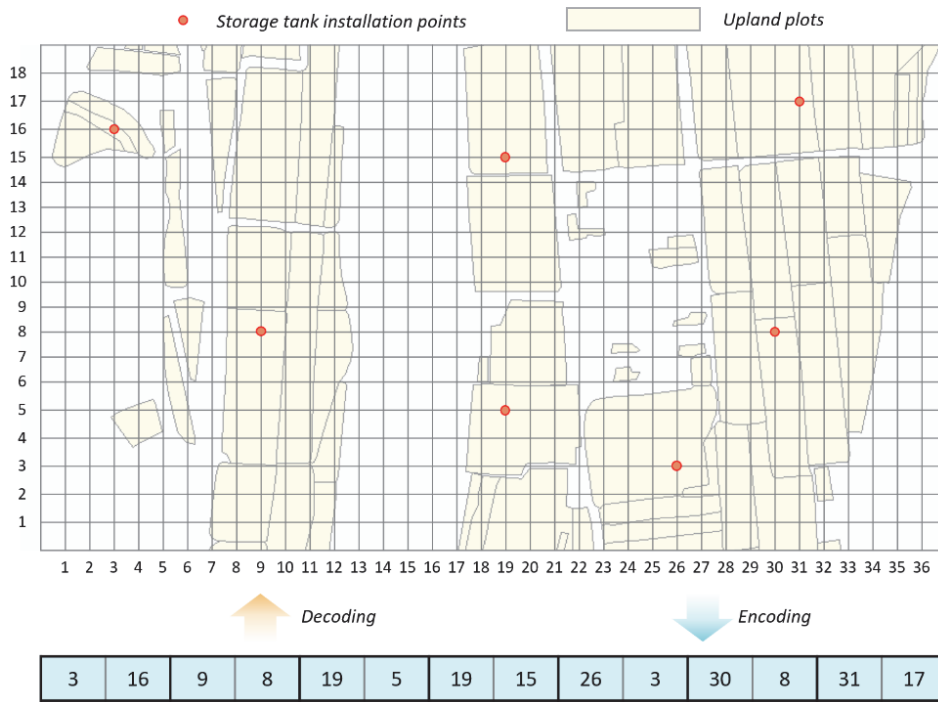


Fig. 3 Encoding and decoding processes of spatial storage tank locations to or from gene construction

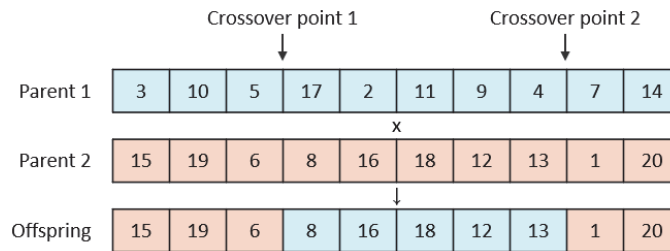


Fig. 4 Example of a two-point crossover operation

$$P(Ch_i) = \frac{f(Ch_i)}{\sum_{k=1}^N f(Ch_k)} \quad (4)$$

여기서,  $P(Ch_i)$ 는 염색체  $i$ 의 선택 확률,  $N$ 은 세대 내 염색체 수,  $f$ 는 염색체의 적합도를 구하는 함수이다.

### 2) 교차 연산 (crossover)

교차 연산은 선택 연산을 통해 선택된 두 개의 부모 염색체의 부분 결합을 통하여 하나의 자손 염색체를 생성하는 연산이다. 높은 적합도를 갖는 부모 염색체의 유전자 보존과 동시에 해의 다양성을 넓히는 역할을 한다.

교차의 유형에는 단일점 교차, 두 점 교차, 균등 교차, 산술

교차 등 다양한 방식이 존재하며, 유전자의 인코딩과 문제 상황에 따라 적용하는 유형이 달라진다. 본 연구에서는 두 점 교차를 적용하였다 (Fig. 4). 이는 2개의 교차점을 설정하고, 교차점 사이의 유전자를 교환하여 자손 염색체를 생성하는 방식이다. 두 염색체의 교차점은 무작위로 결정되었다.

### 3) 돌연변이 연산 (mutation)

교차 연산은 집단 내 개체들이 지닌 유전자를 결합하면서 해를 탐색하므로, GA는 가능해를 지역 최적해로 수렴시킨다. 돌연변이 연산은 새로 생성된 염색체에 돌연변이를 발생시켜 GA가 지역 최적해에서 벗어나는 가능성을 부여해 전역적 탐색 성능을 향상시킨다.

본 연구에서의 돌연변이 연산은 교차를 통해 생성된 염색

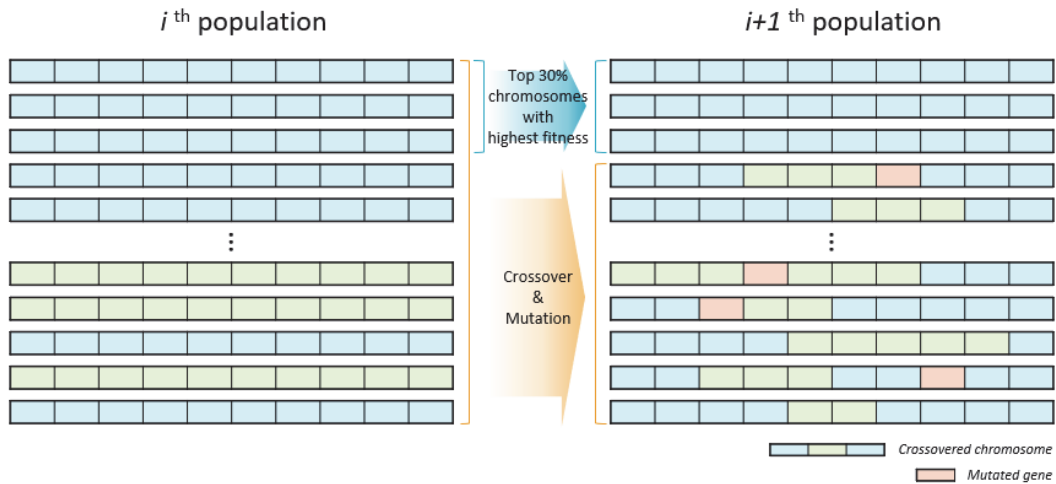


Fig. 5 Gene evolution schematics of selection, crossover, and mutation operations to generate a next generation chromosome

체상에서 돌연변이율 만큼에 해당하는 유전자들을 초기해를 생성한 것과 같은 방법으로 대상지구가 속한 좌표 범위 내의 난수로 교체하는 것으로 설정하였다.

라. 알고리즘 종료 조건

GA의 수행을 종료하기 위한 조건은 새로운 세대를 생성하는 전체 횟수를 제한하는 방법과 일정 횟수 반복 후에 해의 개선이 이루어지지 않을 때 종료하는 방법, 계산 소요시간을 제한하는 방법이 널리 이용되고 있다 (Goldberg, 1989). 본 연구에서는 두 가지 방법을 혼합하여 최대 탐색 반복횟수를 초과하거나 일정 횟수 동안 적합도가 개선된 해가 도출되지 않으면 동작을 종료하게 했다.

3. 저류조 최적 공간배치 도출

GA를 기반으로 대상지구별로 저류조 설치 최적 지점을 도출하였다. GA에서 한 세대의 염색체 수 ( $p$ )는 200개로 설정하였다. 매 세대에서 적합도가 높은 상위 30%의 염색체 60개는 변형 없이 다음 세대로 전달되게 하고, 나머지 70%에 해당하는 140개 염색체는 교차 연산을 통해 다음 세대로 전달되도록 하였다 (Fig. 5). 그리고 교차 연산으로 생성된 자손 염색체의 유전자 중 5%는 돌연변이 연산을 수행하여 초기 세대를 생성한 것과 같이 격자 번호를 무작위로 교체하였다. 이를 통해 생성된 200개의 자손 염색체가 다음 세대의 염색체를 구성하고 반복 연산에 적용되었다. 최대 반복횟수 100,000세대에 도달하거나, 50세대 반복 연산에서 평균 적합도가 1% 이상 향상되지 않는 경우 알고리즘이 종료되도록 하고, 전 세대를 거치면서 최대 적합도를 나타낸 염색체를

최적해로 결정하였다.

대상지구별로 저류조의 수를 최소 지점 수인 1부터 최대 지점 수인 지구 내 필지 수까지로 하여 각 경우에 대해 공간배치를 최적화하고, 이때의 총 관로 비용과 저류조 설치지점의 좌표를 산정했다.

III. 결과 및 고찰

1. 저류조 최적 설치지점 수

GA에 의해 산정된 저류조 설치지점 수에 따른 비용과 이 값이 최소가 되는 저류조 설치 최적 지점 수를 도출한 결과는 Fig. 6 및 Table 2와 같다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 저류조 설치지점 수가 증가하여 개별 필지단위 용수공급 형태로 됨에 따라 말단 관로 비용은 감소하는 반면, 주 관로 비용은 증가한다. 특히, 저류조 설치 최적 지점 수보다 작은 저류조가 설치된 구간에서 그 변화가 급격하고, 저류조 설치지점 수 증가에 따른 말단 관로 비용 감소율이 주 관로 비용 증가율에 비해 크게 나타났다. 이에 따라 하나의 저류조가 대상지구 전체에 용수를 공급하는 완전 집단화 시스템에서 저류조 수가 증가함에 따라 저류조에서 개별 필지로 용수를 공급하는 총 관로가 급격히 단축되며 용수공급 네트워크 총비용이 감소하여 최적 시스템에 도달하게 된다.

최적 시스템보다 더 많은 저류조를 설치하여 개별 용수공급 시스템화 되는 경우, 저류조에서 말단 필지로 용수를 공급하는 말단 관로 비용은 지속해서 감소하지만, 저류조로 용수를 공급하는 주 관로 비용이 더욱 큰 폭으로 증가함에 따라

용수공급 네트워크 총비용은 증가하게 된다.

대상지구별로 용수공급 네트워크 비용을 최소화 하는 저류조 설치지점 수는 대상지구 내 용수공급 대상 필지 수의  $9.6 \pm 1.3\%$  범위에 속하며,  $R^2=0.978$ 로 높은 상관성을 보인다 (Fig. 6f, Table 2). 이는 한 지점에 설치된 저류조가 평균적으로 인접 위치의 10.4개 필지에 용수를 공급할 때에 네트워크 비용이 최소가 됨을 의미한다.

## 2. 저류조 최적 배치 결과

대상지구 별 저류조 최적 설치지점 수에서의 저류조 배치 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 8은 Fig. 7의 저류조별 용수를 공급해야 하는 필지 면적 합과 수의 분포를 나타낸 것이며, 이들의 최댓값, 평균값, 최솟값, 변동계수 (Coefficient of Variation, CV)는 Table 3과 같다.

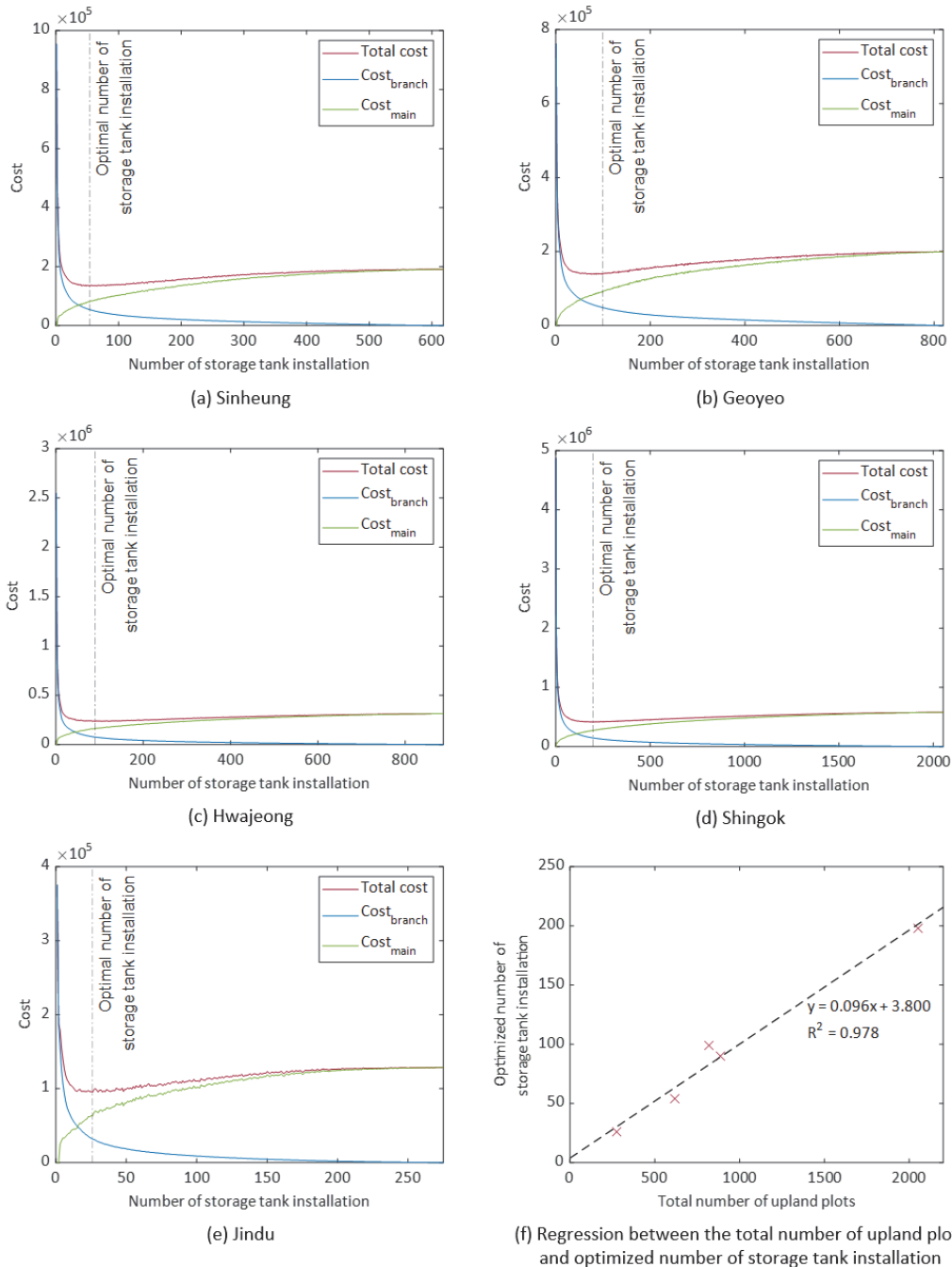
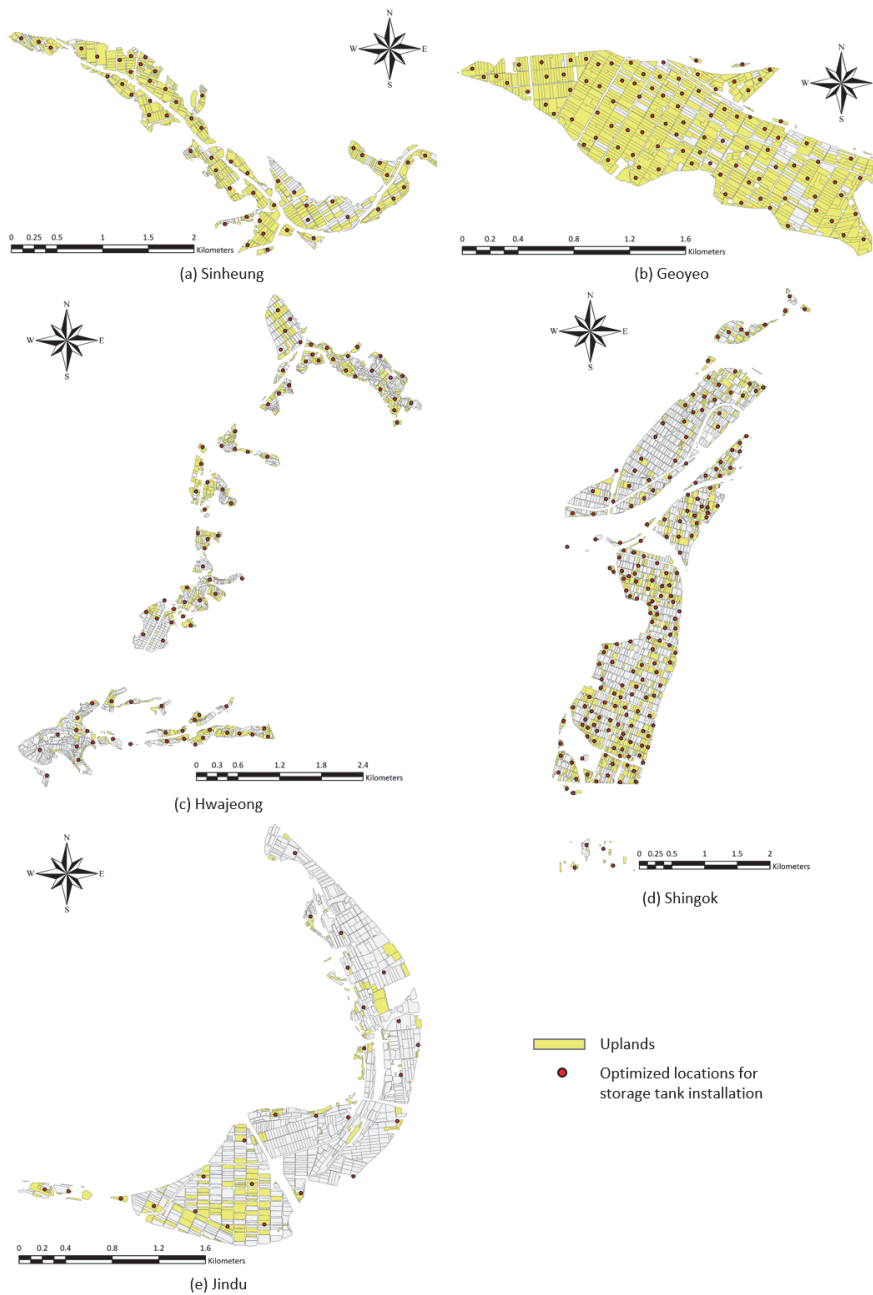


Fig. 6 Relationship between the number of storage tanks and installation cost for the five study sites

**Table 2** Optimized number of storage tanks and the resulting pipeline installation costs

Study site	Total number of upland plots (A)	Optimized number of storage tank installation (B)	B/A (%)	Cost ( $\times 10^4$ )		
				Main pipeline	Branch pipeline	Sum
Sinheung	618	54	8.74	5.40	8.02	13.42
Geoyeo	819	99	12.09	4.83	8.97	13.80
Hwajeong	887	90	10.15	7.56	15.67	23.23
Shingok	2,052	198	9.65	14.46	26.65	41.11
Jindu	275	26	9.45	3.18	6.29	9.47
Mean			10.02			



**Fig. 7** Optimized locations for storage tank installation for the respective study sites



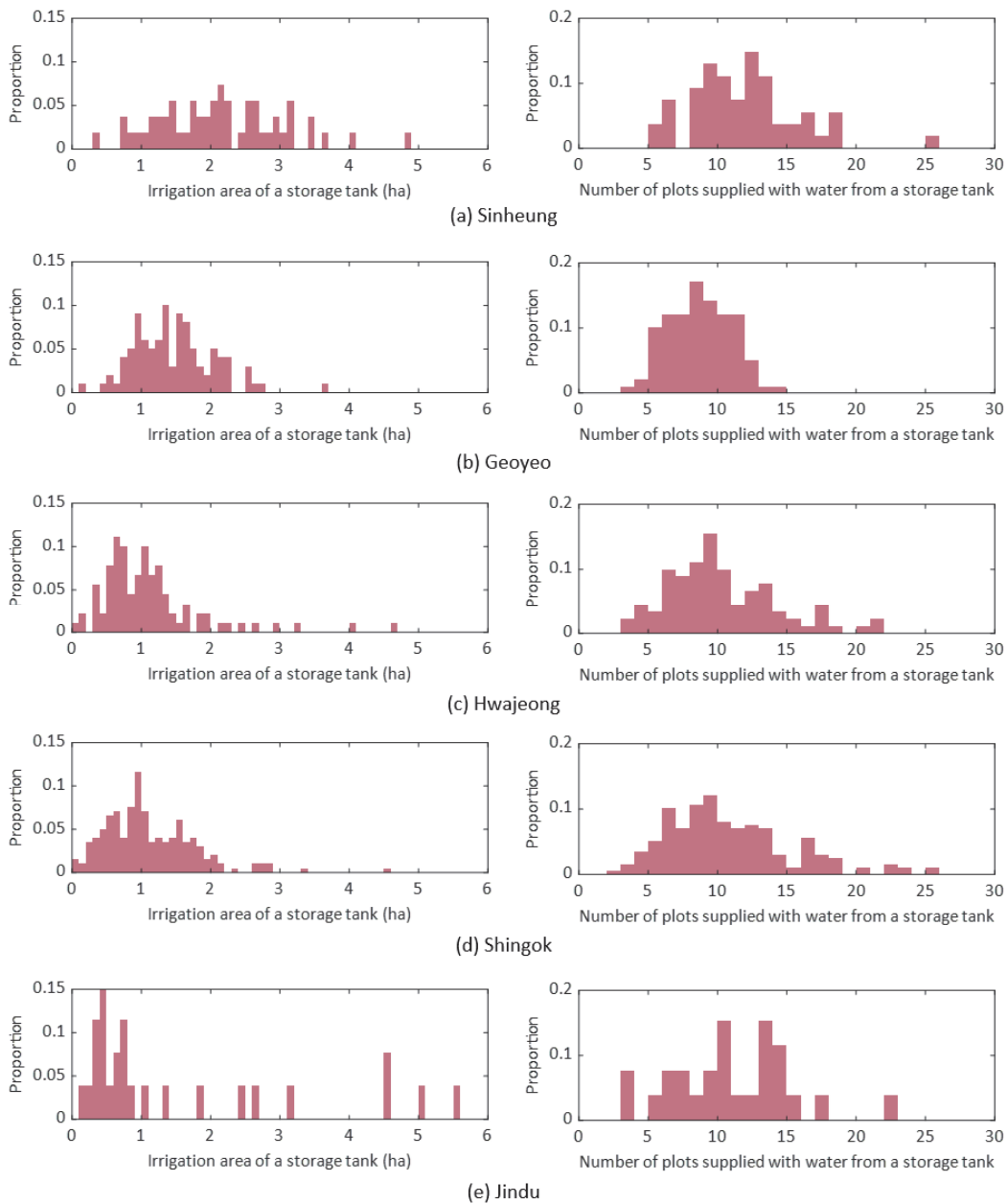


Fig. 8 Proportion of irrigation area and number of upland plots of a single storage tank coverage

Table 3 Statistics of the irrigation area and the number of upland plots under a single storage tank coverage

Study site	Irrigation area of a storage tank (ha)				Number of plots supplied with water from a storage tank			
	Max	Min	Mean	CV	Max	Min	Mean	CV
Sinheung	4.89	0.35	2.14	0.42	26	5	11.44	0.34
Geoyeo	3.61	0.13	1.46	0.39	15	3	8.27	0.28
Hwajeong	4.63	0.04	1.12	0.69	22	3	9.86	0.41
Shingok	4.56	0.04	1.12	0.58	26	2	10.36	0.44
Jindu	5.60	0.19	1.56	1.07	23	3	10.58	0.42
Mean	4.66	0.15	1.48		23	3	10.10	

Fig. 7에서 신흥, 거여 지구는 집단 전작으로 인해 밭 필지가 지구 내에 균일하게 밀집된 양상을 보이고, 이에 따라 저류조 최적 설치지점이 비교적 균일하게 나타났다. 반면, 개별 전작특성을 나타내는 화정, 신곡 지구의 경우 밭 필지가 부분적으로 밀집되어 있거나, 다른 필지에 대해 독립적으로 분포함에 따라 저류조의 최적 설치지점도 불규칙적으로 분포한다. 밭이 밀집된 영역에 저류조가 주로 배치되고, 밭이 독립적으로 위치한 경우 주변 밭의 중간 지점이나 해당 필지 내에 저류조가 설치되는 양상을 보였다. 전작화 특성에 따른 이러한 저류조 분포로 인해 개별 전작 지구보다 집단 전작 지구에서 저류조 주변의 용수공급 대상 필지가 평균적으로 면적이 넓은 구간에 분포하는 것으로 나타났다 (Fig. 8, Table 3). 또한, 집단 전작 지구 내의 밭 필지 분포 균일성으로 인해 개별 전작 지구와 비교하여 저류조당 용수공급 대상 필지 면적과 수의 변동계수가 작게 나타났다 (Table 3).

진두 지구의 경우 상대적으로 남서 방향의 밭은 집단 전작, 북동 방향은 개별 전작특성을 나타낸다 (Fig. 7). 이에 따라 남서 측에는 용수공급 대상 영역 내에 저류조가 비교적 균일하게 위치하고, 북동 측에는 개별 밭 필지 외부의 중간 지점에 저류조가 위치하는 경향을 보인다. 개별 필지에서 용수공급 대상인 밭 필지 외부에 저류조가 설치되는 양상은 식 (3)의 최소화를 목적으로 하여, 주 관로와 말단 관로 길이를 최소화하는 것이 상충된 결과이다. 지구 내에서 집단, 개별 전작특성이 혼합됨에 따라 저류조당 용수공급 대상 필지 면적은 집단 전작, 개별 전작 지구에 대한 값의 중간 지점에 있으며, 변동계수는 비교적 크게 나타났다 (Table 3).

#### IV. 결론

본 연구는 저류조와 관수로를 연계한 밭 용수공급을 위해 저류조 최적 설치지점 수와 공간배치를 도출하고자 GA를 적용한 방법론을 제시하였다. 스마트팜맵의 공간정보를 격자로 구성하여 검색체의 형태로 가능해를 표현하고, GA를 적용하여 저류조 개소수에 따른 최적해를 도출했다. 해의 적합성은 용수 관로의 길이를 바탕으로 계산되었다.

최적해 분석결과, 저류조의 최적 설치지점 수는 대상지구 내 용수공급 대상이 되는 밭 필지 수의 대략 10%로 나타났다. 저류조의 분포는 대상지구의 전작특성에 따라 다르게 나타났는데, 밭 필지가 분산된 개별 전작 지구보다 집단화된 전작 지구에서 저류조가 균일하게 배치되는 특성을 나타냈다. 저류조별 용수공급 대상 필지 면적과 수를 비교한 결과, 필지가 밀집된 집단 전작 지구는 한 저류소에서 용수를 공급하는 필지 면적이 개별 전작 지구에 비해 0.3~1.0 ha 가량 넓었다.

용수공급 대상 필지 면적과 수의 변동계수가 개별 전작 지구에서 상대적으로 높게 나타나, 개별 전작 지구에서의 용수공급 시스템 설계의 불확실성이 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

본 연구는 용수 관망의 비용을 최소화하는 저류조의 설치지점을 GA 기법을 적용하여 최적화하는 방법론을 제시했는데 의의가 있다. 스마트 농업과 함께 관수로를 통한 농업용수 공급이 강조되는 시점에서 본 연구의 핵심 결과는 저류조 기반의 관개 시스템 설계에 활용될 수 있을 것이다. 본 연구에서 제시된 방법론은 용수 관로의 길이만을 핵심 변수로 활용하였는데, 저류조 설치비용이나 용수공급 안정성, 지형 요소 등을 추가로 목적 함수에 포함하는 것이 향후 과제로 요구된다.

#### 감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반 및 재해 대응기술 개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다 (320051-3).

#### REFERENCES

1. Chakrabarty, K., S. S. Iyengar, H. Qi, and E. Cho, 2002. Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks. *IEEE Transactions on Computers* 51(12): 1448-1453. doi:10.1109/TC.2002.1146711.
2. Chen, H., Y. Zhu, K. Hu, and T. Ku, 2011. RFID network planning using a multi-swarm optimizer. *Journal of Network and Computer Applications* 34(3): 888-901. doi:10.1016/j.jnca.2010.04.004.
3. Fagerfjäll, P., 2010. Optimizing wind farm layout: more bang for the buck using mixed integer linear programming. Master's diss., Göteborg: Chalmers University of Technology and Gothenburg University.
4. Goldberg, D. E., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Boston, MA: Addison Wesley. doi:10.5555/534133.
5. Gong, Y. J., W. N. Chen, Z. H. Zhan, J. Zhang, Y. Li, Q. Zhang, and J. J. Li, 2015. Distributed evolutionary algorithms and their models: a survey of the state-of-the-art. *Applied Soft Computing* 34: 286-300. doi:10.1016/j.asoc.2015.04.061.

6. González, J. S., A. G. G. Rodriguez, J. C. Mora, J. R. Santos, and M. B. Payan, 2010. Optimization of wind farm turbines layout using an evolutive algorithm. *Renewable Energy* 35(8): 1671-1681. doi:10.1016/j.renene.2010.01.010.
7. Kennedy, J., 2006. Swarm Intelligence. In Handbook of Nature-Inspired and Innovative Computing, ed. A. Y. Zomaya, 187-219. Boston, MA.: Springer. doi:10.1007/0-387-27705-6\_6.
8. Kim, S. H., M. S. Kang, K. Kim, and H. Lee, 2019. The analysis of land use change impact in agriculture land on hydrology and water quality. *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference 2019*: 37. (in Korean).
9. KOSTAT (Statistics Korea), 2022. Agricultural area survey in 2021.
10. Kruskal, J. B., 1956. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. *Proceedings of the American Mathematical Society* 7(1): 48-50. doi: 10.1090/S0002-9939-1956-0078686-7.
11. Kwon, C., J. Park, S. Jang, H. Shin, and I. Song, 2021. Analysis of land cover change from paddy to upland for the reservoir irrigation districts. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 63(6): 27-37. doi:10.5389/KSAE.2021.63.6.027. (in Korean).
12. Lee, Y. W., 2001. A study on optimal facility layout of block facility using Hybrid GA. Master's diss., Yeongdo-Gu, Busan: Korea Maritime & Ocean University (in Korean).
13. Levenberg, K., 1944. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of Applied Mathematics* 2(2): 164-168. doi:10.1090/qam/10666.
14. Lloyd, E. L., and G. Xue, 2007. Relay node placement in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Computers* 56(1): 134-138. doi:10.1109/TC.2007.250629.
15. McGarigal, K., and B. J. Marks, 1995. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure, 122. PNW-GTR-351. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. doi:10.2737/PNW-GTR-351.
16. Melanie, M., 1996. An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge, MA: MIT Press. doi:10.5555/230231.
17. Nandigam, N., S. K. Dhali, 2008. Optimal design of an offshore wind farm layout. In Proc. 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 1470-1474. Ischia, Italy: IEEE. doi:10.1109/SPEEDHAM.2008.4581308.
18. Park, P. J., C. J. Lee, 2014. Study of multi floor plant layout optimization based on particle swarm optimization. *Korean Chemical Engineering Research* 52(4): 475-480. doi:10.9713/kcer.2014.52.4.475. (in Korean).
19. Park, S., M. Jung, and K. Min, 2017. The current status of changes in Korean rural villages and direction for mid- and long-term development (Year 3 of 5), 174. R830, No. 17-35-01. Korea Rural Economic Institute (in Korean).
20. Shin, H. J., C. G. Park, J. N. Lee, K. Han, and M. S. Kang, 2019a. Supply of Water in a Field Area using a Storage tank. *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2019*: 182. (in Korean).
21. Shin, H., C. Park, J. Lee, I. Song, and M. Kang, 2019b. A study on securing irrigation water in the cultivation of other crops in paddy field using a storage tank. *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference 2019*: 90. (in Korean).
22. Tang, J., B. Hao, and A. Sen, 2006. Relay node placement in large scale wireless sensor networks. *Computer Communications* 29(4): 490-501. doi:10.1016/j.comcom.2004.12.032.
23. Wang, J., and N. Zhong, 2006. Efficient point coverage in wireless sensor networks. *Journal of Combinatorial Optimization* 11: 291-304. doi:10.1007/s10878-006-7909-z.