농업용 관수로의 최적관경 선정을 위한 개선방안 연구

Improved Approach for Optimal Design of Agricultural Irrigation System

김경완* · 이영진** · 강두선*** · 김영화****

Kim, Kyungwan · Lee, Youngjin · Kang, Doosun · Kim, Younghwa

Abstract

Traditionally, open channel flow systems have been mainly utilized for agricultural irrigation water supply. To date, a pipe network system is gaining spotlight as an alternative in this field for reliable and efficient water supply. Optimization techniques are beneficial for least-cost design of large-scale irrigation systems. Previous optimization techniques, however, had drawback in terms of computational efficiency when applied to a large scale system with lots of decision variables, and often provided solutions not applicable to real network design. In this study, an improved approach for determining optimal diameter of agricultural pipe systems are proposed. The model consists of a heuristic search approach, Genetic Algorithm (GA), and a hydraulic simulator, EPANET. Instead of using random initial population for GA, a strategic initial population was constructed and provided from a pre-processing based on iterative hydraulic analyses. The proposed approach enabled the optimal design to be found and improved computational efficiency of GA. The developed model was applied to a large-scale irrigation network and optimal designs were obtained with lower economic cost yet better hydraulic performances. This paper describes the proposed approach utilizing the strategic initial population and the application procedures and results are discussed.

Key words : Agricultural irrigation system, Strategic initial population, Optimization, Least-cost design

요 지

전통적으로 농업용수 공급시설은 개수로의 형태가 대부분이었으나 비효율적이고 운영 및 관리에 어려움이 있다는 단점이 지적되어 왔다. 최근 들어 이러한 단점을 보완하기 위해, 안정적인 용수공급과 시스템 관리가 용이한 관수로 시스템으로의 전환이 모색되고 있다. 경제성을 고려한 농업용 관수로 시스템의 설계를 위해서는 최적화 기법의 적용이 반드시 필요하다. 하지만, 기존의 최적화 기법들은 결정변수가 많은 대규모 시스템에 적용할 경우 계산효율이 떨어지고, 실무에 사용이 가능한 해를 제시하지 못하는 경우가 많았다. 본 연구에서는 기존의 최적화 기법이 가지는 이러한 문제점을 개선할 수 있는 방안을 개발하고 적용하였다. 적용 모형은 관망 수리해석 프로그램인 EPANET 모형과 군탐색 최적화 기법인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 연계하도록 구성되었다. 기존의 유전자 알고리즘이 초기해(Initial Population)로 무작위해(Random Solution)를 사용하는 것과 달리, 본 연구에서는 수리해석을 이용한 전처리과정을 통해 선정된 초기전략해(Strategic Initial Population)를 사용함으로써 최적화 알고리즘의 계산효율을 높이고 동시에 전역해(Global Optimum)에 근접한 최적설계가 가능하도록 하였다. 개발된 모형을 대규모 농업단지에 적용한 결과 기존의 최적화 기법에 비해 경제적, 수리학적으로 개선된 설계결과를 얻을 수 있었다. 본 논문에서는 초기전략해를 이용한 농업용 관수로 시스템의 최적화기법을 상세히 설명하고, 그 적용절차 및 결과를 제시하였다.

핵심용어 : 농업용 관수로 시스템, 초기전략해, 관경 최적화, 최소비용설계

1. 서 론

관수로 시스템(Pipe Network System)은 분기(Branch) 혹은 망(Loop)의 형태로 구성된 용수공급 시스템으로 안정적인

고 효율적인 물 공급을 목표로 하는 사회기반시설이다. 과거 농업용수의 공급은 주로 개수로(혹은 수로 혹은 콘크리트 수로)를 통하여 이루어졌으나, 비효율적이고 운영 및 관리에 어려움이 있어 점차 관수로 시스템을 이용한 방안이 모색되고 있

*정회원. 경희대학교 사회기반시스템공학부 석사과정 (E-mail : kyungwan1024@gmail.com)

Member. Department of Civil Engineering, Kyung Hee University

**정회원. 경희대학교 사회기반시스템공학부 석사과정

Member. Department of Civil Engineering, Kyung Hee University

***교신저자. 정회원. 경희대학교 사회기반시스템공학부 교수 (Tel: +82-31-201-2513, Fax: +82-31-202-8854, E-mail: doosunkang@khu.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Professor, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University

****한국농어촌공사 농어촌연구원 생산기반연구팀 수석연구원

Head Researcher, Rural Research Institute Korea Rural Community Corporation

다. 농업용수의 사용목적 및 형태 등은 지역 및 재배작물의 종류에 따라 다르므로 해당지역에 적합한 농업용 관수로 시스템을 고려하는 것이 중요하다. 관수로 시스템은 송수손실이 비교적 적고 지형적인 제약조건이 적은 반면, 초기 설치비 및 유지관리비용이 높은 단점이 있다(농림수산식품부, 2009). 최근 새만금과 고흥만 간척지 등 대규모 농업지역에 관수로 이용된 용수공급 시설의 설치가 이루어지면서 농업용 관수로 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 이와 같은 대규모 농업지역의 관수로 시스템은 초기 설치비용이 대단히 높기 때문에 경제적인 최적 설계를 위한 연구가 필요하다.

과거 관수로 시스템의 최적 관경 선정에 관한 연구를 크게 농업용수 시스템과 상수관망 시스템으로 구분하여 살펴보았다. 먼저 상수관망 시스템의 관경 최적화 연구는 이미 다수의 연구가 이루어진바 있으며, 본 연구에서는 최근 연구사례를 중심으로 기존의 최적화 기법을 개선한 연구를 살펴보았다. Van Zyl *et al.* (2004)은 효율성이 높은 검색 전략과 유전자 알고리즘을 결합하여 유전자 알고리즘의 연산속도를 향상시키는 방안을 제안하였으며 이를 상수관망 최적화를 통해 검증하였다. Zheng *et al.* (2013)은 매개변수의 조정을 통하여 작업속도를 향상시켜주는 일명 Self-Adaptive Differential Evolution(SADE) 알고리즘을 개발하여 상수관망 최적화에 적용한 바 있다. 신현곤 (2000)은 전형적인 유전자 알고리즘의 매개변수 외에 교배 확률의 변이인 재조합 확률을 도입하여 상수관망 최적화 분야에서의 이용 가능성을 제시하였다. Vairavamoorthy and Ali (2005)는 유전자 알고리즘을 기반으로 한 상수관망 시스템의 최소비용 설계에 있어, 결정변수인 관경의 불필요한 검색범위를 조정함으로써 계산효율을 높일 수 있음을 증명하였다.

상수관망 분야에 비해 농업용 관수로 시스템의 최적화에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 최근, 황일환 등(2010)이 실제 농업용 관수로 시공지구를 대상으로 화음탐색법(Harmony Search, HS)을 적용한 농업용 관수로 최적화 모형을 구축한 바 있다. 수요절점의 유량 및 압력, 그리고 관내 유속을 제약조건으로 사용하여 설계비용을 최소화함과 동시에 수리학적으로 안정적인 시스템을 제시하였다. 정건희 등(2012)은 효과적이고 경제적인 농업용수 공급을 위해 이진정수법을 이용한 시스템 설계방안을 제안하였다. 해당 연구에서는 대규모 농업단지의 계획형태에 따른 용수사용량별, 시점의 수두별, 동수구배별 최적 관경을 산정하여 그 분포를 파악하고 민감도 분석을 수행하여 경제적인 시스템을 구축하도록 하였다.

앞서 서술한 바와 같이, 기존의 연구는 대부분 상수관망 시스템을 중심으로 이루어졌으며, 농업용 관수로 시스템의 설계에 적합한 최적화 연구는 최근에야 이루어지고 있음을 알 수 있다. 농업용 관수로 시스템은 경제성을 고려하여 분기형 관로가 대부분이고, 따라서 관내 유속이 높으며 수요절점의 요구수압이 상수관에 비하여 낮은 특징을 갖고 있다. 본 연구에서는 이러한 농업용 관수로 시스템의 특징을 고려한 최적설계 방안을 제시하였다. 먼저, 비선형 최적화 기법인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)과 관수로 수리해석 프로그램인 EPANET모형을 연계하여 모형을 구성하였다. 본

연구의 차별성은 기존 군탐색 최적화 기법의 단점을 보완하기 위한 개선방안으로 최적화 연산의 수행에 앞서 수리해석을 통한 초기전략해(Strategic Initial Population)를 구성하는데 있다. 일반적으로 유전자 알고리즘을 포함한 군탐색 최적화 기법은 초기해(Initial Population)를 무작위로 선정하여 반복연산을 수행하는데, 결정변수가 많은 문제의 경우에는 최적해에 도달하기까지 반복 연산수(Iteration)가 증가하고(따라서, 계산시간이 증가하고), 종종 알고리즘을 통해 구해진 최적해가 실무에 직접 적용하기 어려운 경우가 발생하기도 한다. 본 연구에서는 최적화 연산에 앞서, 수리해석을 통해 유속조건을 만족하는 초기해를 발생시킨 후, 구성된 초기해를 이용하여 최적화 연산을 수행하는 2단계 기법을 제안하였다. 무작위해가 아닌 검증된 초기해를 유전자 알고리즘에 제공함으로써 계산효율을 높이고 실무에 직접 적용이 가능한 설계가 이루어지도록 하였다. 본 연구에서 제안된 2단계 최적화 기법을 관로의 수가 많은 대규모 농업용 관수로 시스템에 적용하고 적용 결과를 토의하였다.

2. 연구방법

2.1 유전자 알고리즘을 이용한 관경 선정

유전자 알고리즘은 “세대를 거치는 동안 우수한 개체만 살아남는다”는 생물의 진화과정에 착안하여 개발된 최적화 기법으로 복잡하고 결정변수가 많은 최적화 문제에 널리 사용되고 있으며, 특히 관수로의 관경결정에 있어 적용성이 뛰어난 것으로 알려져 있다(Dandy *et al.*, 1996; Savic and Walters, 1997; Gupta *et al.*, 1999;). 유전자 알고리즘은 문제 해결을 위한 세대(Generation)를 형성하는 개체군(Population) 중에서 환경에 대한 적합도(Fitness)가 높은 개체가 살아남아 교배(Crossover) 및 돌연변이(Mutation) 등의 진화과정을 거친 후, 다음 세대에 전달하여 수많은 반복계산을 통해 최적해에 근접한 결정변수를 선택하게 된다. 최적화를 수행하기 위해서는 먼저 목적함수와 제약조건 그리고 결정변수를 설정하여야 한다. 본 연구에서는 농업용수의 수요지점과 수요량 그리고 노선의 배치가 결정된 상황에서 관경을 결정변수로 설정하였으며, 관수로의 초기 설치비용(시공비, 재료비)과 유지관리비용의 최소화를 목적으로 하였다. 목적함수는 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Min. Cost} = \sum_{i=1}^N (C_c(D_i) + C_M(D_i) + C_p(D_i))L_i \quad (1)$$

여기서, $C_c(D_i)$, $C_M(D_i)$, $C_p(D_i)$ 는 각각 관경별 단위길이(m)당 시공비, 유지관리비, 그리고 재료비를 나타낸다. L_i 는 관로 길이(m)이고, D_i 는 관경(mm)이며, N 은 관로의 총 개수이다. 시스템의 설계 제약조건으로 수요절점의 압력과 관내 유속이 적정 범위 내에 유지되도록 하였으며, 각각의 제약조건식은 다음 식 (2), (3)과 같다.

$$H_{\min} \leq H_f \leq H_{\max} \quad (2)$$

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (3)$$

Table 1. Parameters Used for the Genetic Algorithm Simulation

매개변수	모형 적용 값
집단 크기(Population)	600
세대 크기(Generation)	300
우수해 비율(%)	20
교배 비율(%)	60
제약조건(압력수두, m)	$5 \leq P \leq 35$
제약조건(유속, m/s)	$0.01 \leq V \leq 2.3$

여기서, 식 (2)는 수요절점의 압력조건으로 최소, 최대 허용 압력수두를 각각 5 m, 35 m로 설정하였다. 식(3)은 관내 유속조건으로 최소, 최대 허용 유속을 각각 0.01 m/s, 2.3 m/s로 설정하였다. 제약조건을 만족하지 못하는 해는 벌칙비용(Penalty Cost)을 아래의 식 (4), (5)와 같이 계산하여 목적함수 식 (1)에 가산함으로써 전체 비용을 증가시켜 생존가능성을 줄이도록 하였다. 여기서 M 은 수요절점의 수이고, α 는 벌칙계수이다. 최적화에 사용된 매개변수는 Table 1에 정리하였다.

$$P_1 = \alpha \sum_{j=1}^M [\max(H_j - H_{\max}, 0) + \max(H_{\min} - H_j, 0)] \quad (4)$$

$$P_2 = \alpha \sum_{i=1}^N [\max(V_i - V_{\max}, 0) + \max(V_{\min} - V_i, 0)] \quad (5)$$

2.2 초기전략해 생성 방법

앞서 소개한 유전자 알고리즘은 복잡한 비선형문제를 해결하는데 유용한 기법이지만, 결정변수가 매우 많은 문제에 있어서는 계산효율이 떨어지고 전역해(Global Optima)를 찾을 확률도 낮아지는 문제점이 있다. 특히, 대규모 농업단지에 조성될 관수로 시스템은 결정변수의 수가 수백 혹은 수천개가 넘는 경우도 있으므로 그에 대비한 설계기법을 개발할 필요가 있다. 일반적인 유전자 알고리즘은 초기해를 무작위로 선정하여 반복계산을 수행하기 때문에 계산효율이 저하되는 단점이 있다. 본 연구에서는 유전자 알고리즘의 초기해를 설계자가 임의로 조작하여 연산의 효율성을 높이고 전역해에 근사한 해를 구할 수 있는 초기전략해(Strategic Initial Population) 생성 기법을 개발하였다. Kang *et al.* (2012)은 상수 관망 시스템의 최적화를 위해 초기전략해의 활용 가능성을 제안한 바 있다. 본 연구는 Kang *et al.* (2012)의 알고리즘을 개선하여 보다 논리적이고 효율적인 방법으로 초기전략해를 생성하는 방법을 제안하였다.

초기전략해의 생성 과정은 다음과 같다. 먼저 적용하고자 하는 관수로 시스템의 최소, 최대 경계유속을 설정하고, 시스템의 모든 관을 상업용 최소관경(예, 80 mm)으로 설정한다. 최소 관경으로 설정된 각 관의 유속을 수리해석모형(EPANET)을 이용하여 계산한 후, 관내 유속이 최소 경계유속 보다 낮은 관은 관경을 한 단계 줄이고(즉, 수두손실 증가에 따른 압력수두 감소), 최대 경계유속을 초과하는 관은 관경을 한 단계 증가(즉, 수두손실 감소에 따른 압력수두 증가)시킨다. 이때 최소 경계유속조건을 만족하지 못하는 관 중 최소관경

(80 mm)으로 설정된 관은 더 낮은 관경을 선택 할 수 없기 때문에 최소관경을 유지한다. 이렇게 관경을 재설정한 후, 수리해석을 실시하여 관내 유속을 계산하고, 경계유속의 만족여부를 다시 검사한다. 모든 관이 경계유속 조건을 만족하거나 적용 가능한 최대관경이 적용될 때까지 위의 과정을 반복 수행한다. 위의 반복 연산을 통해 마지막에 구해진 관경의 조합이 바로 초기전략해가 된다. 서술한 초기전략해 생성 절차는 Fig. 1에 모식도로 나타내었다. 초기전략해 생성에 앞서 설정하는 최소, 최대 경계유속값을 조정함으로써 다양한 초기전략해 집단(Set)을 구성할 수 있으며, 이렇게 구성된 집단이 바로 유전자 알고리즘의 초기해(Initial Population)로 사용되게 된다. 이처럼 수리해석을 통한 전처리과정(Pre-processing)을 거친 초기해는 무작위해에 비해 신뢰성이 높고 최적화 계산효율을 향상시킬 것으로 기대할 수 있다.

Fig. 2는 초기전략해 계산과정을 3-pipe 시스템에 실제로 적용한 것으로 관경의 변화과정을 계산을 통해 나타내고 있다. 먼저 적용할 시스템에 적당한 경계유속($V_{\max}=1.5$ m/s)과 관경의 범위(80 mm~150 mm)를 설정한다. 적용 시스템의 경

Fig. 1. Generation of Strategic Initial Population

Fig. 2. Pipe Diameter Transition

우, 세 개 수요절점의 수요량은 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 로 일정하므로 각 노선의 유량을 먼저 계산할 수 있다. 분기형 시스템이므로 환경의 변화와 무관하게 각 노선에 흐르는 유량은 항상 일정하다. 먼저 각 노선의 직경을 최소관경(80 mm)으로 설정하고, 수리계산을 통해 관내유속을 계산한다(Iteration ①). 계산결과 첫 번째와 두 번째 노선의 경우 유속이 각각 2.49 m/s , 1.66 m/s 로 계산되어 설정한 경계유속(1.5 m/s)을 초과하므로 해당 관의 관경을 한 단계 증가(100 mm)시킨 후 수리계산을 실시한다(Iteration ②). 계산 결과, 두 번째 노선은 관경이 증가함에 따라 유속이 감소(1.06 m/s)하여 경계유속보다 낮아진 것을 확인 할 수 있다. 하지만 첫 번째 노선은 여전히 경계유속보다 큰 유속값(1.59 m/s)을 갖기 때문에 한 단계 높은 관경(150 mm)을 재설정한다. 재설정 후 수리계산을 실시한 결과(Iteration ③), 모든 관에서 경계유속조건을 만족함을 확인할 수 있으며 계산을 종료한다.

3. 적용 결과

3.1 적용 네트워크

대규모 농업용 관수로로 대상으로 개발된 모형을 적용하였다. 적용 네트워크는 분기형 시스템으로 각각 274개의 관과 절점으로 구성되며, 274개의 절점 중 수요절점은 242개로 일 최대 수요량(daily peak demand)은 $173,205 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다. 총 관로 길이는 31,135 m이며, 관의 조도계수(Hazen-Williams roughness coefficient, CHW)값은 주철관 및 강관을 사용한다는 가정 하에 100~110의 값을 적용하였다. 수요지점의 표고는 모든 절점에서 0 m로 평야지대이며, 배수지의 수위는 29 m로 자연유하에 의한 용수 공급이 가능하다. 적용 네트워크의 모식도는 Fig. 3에 도시하였고, 시스템의 제원은 Table 2에 정리하였다.

설계에 적용한 상업용 관경은 모두 16종이며, 관경 별 비용은 한국수자원공사에서 발행한 “수도시설 개략공사비 산정서(2010)”를 참고하였다. 단위길이당 공사비, 재료비, 유지관리비용 자료를 Table 3에 수록하였다.

Fig. 3. Application Network

Table 2. Application Network Data

구 분	제 원
총 절점 수	274
수요절점 수	242
연결절점 수	32
관로 수	274
배수지 수위(m)	29
관의 총 길이(m)	31,135

Table 3. Commercial Pipe Cost Per Unit Length

관경(mm)	비용(원/m)		
	공사비	재료비	유지관리비
80	65,000	15,000	6,500
100	65,999	27,583	6,600
150	76,410	40,686	7,641
200	86,028	58,716	8,603
250	96,135	81,160	9,614
300	105,325	103,231	10,533
350	113,818	125,107	11,382
400	126,797	148,836	12,680
450	136,250	155,522	13,625
500	147,729	181,823	14,779
600	171,991	211,396	17,199
700	211,413	273,528	21,141
800	307,640	339,740	30,764
900	359,048	384,619	35,905
1,000	415,702	451,932	41,570
1,100	482,074	547,224	48,207

출처) 한국수자원공사 개략공사비 산정서(2010)

3.2 초기전략해 생성

초기전략해는 앞 절에서 설명한 바와 같이 설계자에 의하여 초기해를 설정함으로써 무작위로 초기해가 선정되는 기존의 최적화 방법을 보완한다. 무작위 초기해를 사용하여 최적화를 수행할 경우, 최적해에 도달하기 위한 계산시간이 길어지고, 전역해를 찾을 가능성이 낮아지는 등 연산의 효율성이 떨어지는 것으로 알려져 있다. 또한 일부 분기형 구간에서 하류구간의 관경이 상류구간의 관경보다 오히려 증가하는 최적해를 발생시킴으로써 실무에서 설계자료로 활용하기 어려운 경우도 종종 발생한다. 본 연구에서 제안한 초기전략해는 2.2절에서 설명한 바와 같이 경계유속조건을 만족하도록 수리해석을 통해 구해지기 때문에, 분기형 시스템의 경우 상류에서 하류로 용수의 흐름을 따라 관경이 감소하는 적절한 설계안을 제시한다. 적용 네트워크의 초기전략해가 생성되는 과정을 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4의 경우 최소 및 최대 경계유속을 각각 0.5 m/s 와 1.4 m/s 로 설정하였을 때의 초기전략해 생성 결과이며, 경계유속을 변화시킬 경우, 최종적으로 구해지는 해도 역시 변화하게 된다. 만일, 경계유속을 상향조정하면, 전체적으로 시스템의 관경이 감소하게 되고, 반대로 경계유속을 하향조정하면, 관경이 전반적으로 증가하게 된다. 이와 같이, 경계유속 조건을 달리함으로써 다양한 초기전략해를

Fig. 4. Procedure for Generating Strategic Initial Population for the Application Network ($V_{\min} = 0.5 \text{ m/s}$, $V_{\max} = 1.4 \text{ m/s}$)

생성할 수 있으며, 생성된 전략해를 유전자 알고리즘의 초기 해로 활용할 수 있다.

3.3 최적설계 비교

모두 세 가지 기법을 이용하여 시스템 설계를 실시하였으며, 각각의 최적설계안을 비교하였다. 적용된 세 가지 기법은 1) 무작위 초기해를 사용한 일반적인 유전자 알고리즘, 2) 경계유속조건을 고려한 초기전략해, 그리고 3) 초기전략해를 사용한 유전자 알고리즘이다. 세 가지 기법을 동일한 네트워크에 적용하여 최소비용, 유속 및 수압조건 등 다양한 항목에 대하여 비교, 검토하였다. Fig. 5에는 세 가지 기법을 이용한 적용 네트워크의 최적화 결과를 도시하였다. Fig. 5(a)는 일반적인 유전자 알고리즘을 이용한 최적 설계 결과로써 적용된 압력 및 유속 제약조건은 모두 만족하나, 일부 구간에서 환경의 변화가 불규칙적인 것을 확인할 수 있다. 즉, 용수의 흐름방향에 따라 분기구간의 하류쪽에서(유량이 감소하므로) 환경이 감소하는 것이 정상적이나, 일부 구간에서 환경이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 무작위로 추출된 초기해를 이용하는 유전자 알고리즘의 특성에 기인한 것으로 최적해에 도달하지 못하였음을 나타낸다. Fig. 5(b)는 최적화 기법을 사용하지 않고 앞서 설명한 초기전략해 생성 기법만을 이용하여 분기형 시스템을 설계한 결과이다. 수리해석을 통해 관내 경계유속조건을 만족하도록 하였기 때문에 관망의 변화가 규칙적이며 경계유속을 변화하여 얻어진 여러 설계안 중 최소압력수두 조건과 유속조건을 모두 만족하면서 비용이 최소가 되는 해를 최적설계안으로 선정하였다. Fig. 5(c)는 초기전략해를 생성한 후 이를 유전자 알고리즘에 적용하여 구한 최적설계안으로 Fig. 5(b)의 결과가 더욱 개선되었음을 알 수 있다. Table 4는 세 가지 기법에 의해 구해진 최적설계 결과를 비교하여 정리한 표이다.

Table 4에 제시된 결과를 정리해 보면 다음과 같다. 먼저

Fig. 5. Optimal Designs by (a) Random Initial Population + GA, (b) Strategic Initial Population without GA Run, and (c) Strategic Initial Population + GA

설계비용을 비교해 보면, 무작위 초기해를 이용한 유전자 알고리즘의 경우(설계1) 설계비용은 약 103억원, 초기전략해를 이용한 경우(설계2) 설계비용은 약 82억원, 초기전략해를 적용한 유전자 알고리즘(설계3)의 설계비용은 약 76억원으로 초기전략해를 적용한 유전자 알고리즘의 설계비용이 무작위 초

Table 4. Optimal Designs Comparison

구 분		무작위초기해 + 유전자알고리즘 (설계1)		초기전략해 (설계2)		초기전략해 + 유전자알고리즘 (설계3)	
설계비용(백만원)		10,346		8,278		7,573	
관경별 노선연장 (m,%)	80~100mm	1,315m	4%	4,885m	16%	5,085m	16%
	150~300mm	11,225m	36%	18,760m	60%	18,715m	60%
	350~500mm	11,125m	36%	2,205m	7%	2,330m	8%
	600~800mm	4,135m	13%	2,060m	7%	2,280m	7%
	900~1,100mm	3,335m	11%	3,225m	10%	2,728m	9%
평균관경(mm)*		449.6		316.1		298.1	
최소압력수두(m)		5.1		5.6		5.1	
최대압력수두(m)		25.4		25.4		25.4	
평균압력수두(m)**		12.1		17.7		14.0	
최소유속(m/s)		0.03		0.42		0.29	
최대유속(m/s)		2.22		2.11		2.18	
계산 소요시간(min)		1,320		1		1,380	

*평균관경 = $\sum_{i=1}^N (D_i \times L_i) / \sum_{i=1}^N (L_i)$, 여기서 D_i 는 관경, L_i 는 관로 길이

**평균압력수두 = $\sum_{j=1}^M (H_j \times q_j) / \sum_{j=1}^M q_j$, 여기서 H_j 는 절점의 압력수두, q_j 는 절점의 수요량

기해를 이용한 유전자 알고리즘의 설계비용보다 약 30% 절감된 것을 알 수 있다. 전체 시스템의 관경별 노선연장과 평균 관경을 비교해보면 설계비용의 차이가 발생한 이유를 확인할 수 있을 것이다. 먼저, 설계1의 경우, 전체 노선의 72%가 150~500 mm의 관으로 구성된 것에 비해, 설계2와 설계3의 경우, 80~300 mm의 작은 관이 전체 노선의 76%를 차지함을 알 수 있다. 즉, 설계2와 설계3의 경우 설계1에 비해 작은 관경의 설치비용이 높은 것을 확인 할 수 있다. 따라서, 세 가지 설계안의 평균 관경을 비교해 보면, 설계1의 평균관경은 449.6 mm인 반면, 설계2와 설계3의 평균 관경은 각각 316.1 mm, 298.1 mm인 것으로 계산되었다. 즉, 평균 관경이 낮아짐에 따라 전체 설계비용도 감소함을 알 수 있다. 다음으로 세 가지 설계안에 대한 수리해석 결과를 비교하였다. 먼저, 평균 압력수두의 경우, 설계1이 12.1 m로 가장 낮음을 알 수 있는데, 이는 평균 관경이 다른 두 설계안에 비해 높음에도 불구하고 최적 설계가 이루어지지 않아 평균 압력수두는 오히려 가장 낮은 결과를 나타내고 있다. 관내 유속의 경우, 세 가지 설계 모두 유사한 결과를 나타내고 있다. 다만, 설계1의 최소유속이 0.03 m/s로 가장 낮은 결과를 보이는 이유는 평균 압력수두의 결과와 마찬가지로 최적 설계가 이루어지지 않아 특정 구간에서 관경이 필요이상으로 크게 선정되어 유속이 낮게 계산되었기 때문이다. 세 가지 기법별로 계산 소요시간을 비교해 보면, 동일한 집단크기와 세대크기의 유전자 알고리즘을 사용하는 설계1과 설계3은 유사한 것을 알 수 있으며, 설계2의 경우 유전자 알고리즘을 사용하지 않고, 반복 수리계산을 통해 설계가 이루어지므로 다른 두 기법에 비하여 계산시간이 짧은 장점이 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 경제성을 고려한 농업용 관수로 시스템의 최소비용 설계방안을 제시하였다. 결정변수가 많은 관수로 최적화의 경우, 무작위로 생성된 초기해를 사용하는 기존의 최적화 기법들은 계산효율이 떨어지고, 전역해를 찾을 확률이 낮은 단점이 지적되어 왔다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하고 대규모 관수로 시스템의 설계 효율성을 개선하기 위하여 군탐색 최적화 기법의 초기전략해를 선정하는 방법을 제안하였다. 즉, 반복적인 수리해석을 통해 유속조건을 만족하는 검증된 초기해를 생성하고 이를 최적화 모형에 적용함으로써 기존 최적화 모형의 단점을 보완하고자 하였다. 실제 시스템을 대상으로 실시한 연구결과를 요약하고 분석된 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 대규모 농업용 관수로 시스템의 최소비용 설계를 목적으로 유전자 알고리즘과 초기전략해를 이용한 최적화 기법을 제안하였다. 적용결과, 무작위 초기해를 이용하는 기존의 유전자 알고리즘에 비해 경제적, 수리학적으로 개선된 설계안을 제시하는 것으로 나타났다.
- 2) 최적화 알고리즘을 사용하지 않고 반복적인 수리해석만을 통해 계산된 초기전략해의 경우, 계산시간이 짧으면서도 최적해에 근사한 설계비용, 압력분포, 유속분포를 미리 확인 할 수 있는 장점이 있어, 예비 설계방법으로 활용이 가능할 것으로 보이며, 실제 설계업무에도 널리 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구에서 제안한 초기전략해 생성 방법은 절점의 표고 혹은 압력수두를 고려하지 않고, 개개 관의 유속을 기준으로 관경의 증감 여부를 결정한다. 따라서 생성된

초기해가 모두 최소 압력조건을 만족할 수는 없으며, 따라서 경계유속 조건을 적절히 변경하여 다양한 초기해 집단(Set)을 구성한 후, 이를 최적화 알고리즘의 초기해로 사용하도록 한다.

- 4) 본 연구에서 제안한 초기전략해 산정 및 적용방법은 유전자 알고리즘 뿐만 아니라 여타 군탐색 최적화 기법에도 동일한 절차를 통해 적용이 가능할 것으로 판단된다.
- 5) 본 연구에서는 농업용 관수로가 대부분 분기형임을 감안하여 분기형 시스템을 대상지역으로 국한하여 연구를 수행하였다. 분기형 관수로와 망형 관수로의 가장 큰 차이는 환경의 변화에 따른 유량 및 흐름방향의 변화 여부인데, 망형의 경우 환경 선정에 따라 유량과 용수의 흐름방향이 변화하므로 초기해 생성에 있어 추가적인 제약조건이 필요하다. 앞으로의 연구에서는 본 연구에서 제안된 기법을 보다 개선하여, 대규모 망형 시스템 및 상수관망 시스템으로 적용범위를 확대할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 농식품부 “첨단생산기술개발사업(312070-03)”으로 지원받은 과제입니다.

References

Chung, G., Kim, Y., Jeon, G., and Kim, J. (2012) “Determination of the Optimal Pipe Diameter for Irrigation Network using Binary Integer Programming and Development of the Database for Design Standard”, Korean Society of Hazard Mitigation Vol. 12 No. 5, 225-231 (in Korean).

Dandy, G.C., Simpson, A.R., and Murphy, L.J. (1996) “An improved genetic algorithm for pipe network optimization”, Water Resources Research, Vol. 32, No. 2, pp. 449-458.

Gupta, I., Gupta, A., and Khanna, P. (1999) “Genetic algorithm for optimization of water distribution systems”.

Hwang, I. and Kim, B. (2010) “Optimization algorithm for the optimal design techniques in agricultural irrigation”, International commission on irrigation and drainage, pp. 35-40 (in Korean).

K-water, Approximate of Cost Estimating of Water Service Facilities (2010).

Kang, D. and Lansey, K. (2012) “Revisiting Optimal Water-Distribution System Design: Issues and a Heuristic Hierarchical Approach”, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, ASCE, Vol. 138, No. 3, pp. 208-217.

Korea Institute of Planning & Evaluation for Technology in Food (2009) Optimum Design System for Agricultural Improvement Project Planning and Design Standards for Pipe Network.

Savic, D. and Walters, G. (1997) “Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks”, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, ASCE, Vol. 123, No. 2, pp. 67-77.

Sin, H. (1999) Reliability constrained optimal design of water distribution networks using the genetic algorithm and hydraulic-connectivity. Ph.D.dissertation, KAIST, pp. 13-43 (in Korean).

Van Zyl, J., Savic, D., and Walters, G. (2004) “Operational optimization of water distribution system using a hybrid genetic algorithm”, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, ASCE, Vol. 130, No. 2, pp. 160-170.

Vairavamoorthy, K. and Ali, M. (2005) “Pipe index vector: a method to improve genetic algorithm based pipe optimization”, *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol. 131, No. 12, pp. 1117-1125.

Zheng, F., Zecchin, A., and Simpson, A. (2013) “Self-Adaptive differential evolution algorithm applied to water distribution system optimization”, *J. Comput. Civ. Eng.*, ASCE, Vol. 27, No. 2, pp. 148-158.

© Received October 24, 2013

© Revised October 28, 2013

© Accepted November 11, 2013