

개선 클러스터링 화음탐색법 개발 및 다양한 최적화문제에 적용

최지호¹, 정동휘², 김종훈^{3*}

¹고려대학교 건축사회환경공학과, ²계명대학교 건축토목공학부, ³고려대학교 건축사회환경공학부

Development of Improved Clustering Harmony Search and its Application to Various Optimization Problems

Choi, Jiho¹, Jung, Donghui², Kim, Joong Hoon^{3*}

¹School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University

²Department of Civil Engineering, Keimyung University

³Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University

요약 본 연구에서는 최적화 기법의 하나인 화음탐색법 (HS: Harmony Search)에 클러스터링 기법을 적용하여 개선된 형태의 HS를 제안하였다. HS는 음악의 즉흥연주를 모방하여 개발되었으며 무작위선택, 기억회상, 음조조정의 세 가지 연산을 이용하여 최적해를 반복적으로 탐색해 나간다. 기존의 HS의 경우, 세 가지 연산 중 기억회상을 진행할 때 해집단의 저장 공간인 해저장소 (HM: Harmony Memory)에 있는 해를 선택하는데, 이 과정에서 적합도를 정량화한 목적함수 값에 상관없이 모두 동일한 확률로 해의 선택이 이루어지고, 이에 따라 최적의 해를 탐색하는 속도가 상대적으로 낮다. 본 연구에서 제안한 개선 클러스터링 화음탐색법 (ICHS: Improved Clustering Harmony Search)는 HM에서 목적함수의 값을 기준으로 클러스터링 기법을 적용하여 목적함수 값이 유사한 솔루션들이 하나의 해집단을 형성하도록 클러스터링을 수행한다. 이를 통해 만들어진 클러스터 중 상대적으로 목적함수 값이 우수한 클러스터에는 더 높은 선택 확률을 부여하여, 적합도가 높은 클러스터에 포함된 해의 결정변수가 선택될 확률을 높게 하는 역할을 한다. 본 연구에서는 ICHS의 효율성을 검증하기 위하여 개발 기법을 기존 논문에서 제시된 수학적 최적화 문제에 적용하였고 우수한 해탐색 성능을 확인할 수 있었다. 또한 실제 공학 문제에 대한 적용성 평가를 위해 개발 기법을 대규모 상수도관망 환경최적화 문제에 적용하였다. 상수도관망 최적설계에 대한 ICHS의 적용 결과, 기존 최적화 기법에 비해 우수한 해를 안정적으로 도출할 수 있는 것으로 나타났다.

Abstract Harmony search (HS) is a recently developed metaheuristic optimization algorithm. HS is inspired by the process of musical improvisation and repeatedly searches for the optimal solution using three operations: random selection, memory recall (or harmony memory consideration), and pitch adjustment. HS has been applied by many researchers in various fields. The increasing complexity of real-world optimization problems has created enormous challenges for the current technique, and improved techniques of optimization algorithms and HS are required. We propose an improved clustering harmony search (ICHS) that uses a clustering technique to group solutions in harmony memory based on their objective function values. The proposed ICHS performs modified harmony memory consideration in which decision variables of solutions in a high-ranked cluster have higher probability of being selected than those in a low-ranked cluster. The ICHS is demonstrated in various optimization problems, including mathematical benchmark functions and water distribution system pipe design problems. The results show that the proposed ICHS outperforms other improved versions of HS.

Keywords : Harmony Search, Improved Clustering Harmony Search, Metaheuristic, Optimization, Water Distribution System

This work was supported by a grant from The National Research Foundation (NRF) of Korea, funded by the Korean government (MSIP) (No. 2016R1A2A1A05005306).

*Corresponding Author : Kim, Joong Hoon(Korea Univ.)

Tel: +82-2-3290-4724 email: jaykim@korea.ac.kr

Received October 18, 2017

Revised (1st January 12, 2018, 2nd February 21, 2018)

Accepted March 9, 2018

Published March 31, 2018

1. 서론

1.1 연구배경

1970년대 이후 자연현상에 기초한 최적화 알고리즘들이 개발되기 시작했으며, 이후 전자계산기의 발달로 실제 공학문제에도 적용 되었다. 이런 종류의 발견적 탐색법 중 널리 알려진 것들은 입자 군집 최적화 (PSO: Particle Swarm Optimization) [1], 담금질 기법 (SA: Simulated Annealing) [2], 타부서치 (TS: Taboo Search) [3], 개미 집단 최적화 (ACO: Ant Colony Optimization) [4], 유전자 알고리즘 (GA: Genetic Algorithm) [5], 화음탐색법 (HS: Harmony Search) [6] 등이 있다.

유전자 알고리즘이 ‘적자생존’의 진화론에 기인한 것처럼 대부분의 발견적 탐색법이 자연현상의 원리에 기반하여 만들어 졌지만, 화음탐색법은 화음 (Harmony)이라는 인공적인 현상에서 영감을 얻어 만들어진 알고리즘으로 Geem 등 (2001) [6]에 의해 처음 제안되었다. 여러 가지 악기가 소리를 내 화음을 만들 때, 각 악기에서 나오는 여러 소리는 하나의 화음을 생성하게 되며 화음 중에는 잘 어울리는 화음이 있을 수도 있고, 불협화음을 나타내는 경우도 있을 것이다. 연습과정을 통해 불협화음은 점차 사라지게 되고, 화음으로서 적합한 화음 (Local optimum) 중에서도 가장 아름다운 화음 (Global optimum)을 찾을 수 있다. 화음탐색법은 이러한 반복 연습과정을 통해 최적 화음을 발견하는 원리를 알고리즘화한 최적화 기법이다.

화음탐색법에서 사용하는 대표적인 매개변수로는 해저장소 크기 (HMS: Harmony Memory Size), 해저장소 고려율 (HMCR: Harmony Memory Considering Rate), 음조 조절율 (PAR: Pitch Adjusting Rate)이 있다.

해저장소 (HM: Harmony Memory)란 연습과정을 통해 경험한 화음 중에서 좋았다고 생각되는 화음들을 모은 집합으로 새로이 나타난 화음이 기존 해저장소 내 가장 나쁜 화음보다 좋다면 이 화음이 해저장소에 추가되며 기존의 화음 중 가장 나쁜 것은 해저장소에서 탈락하게 된다.

해저장소 고려율 (HMCR)이란 새로운 화음을 만들 때, 해저장소에 있는 화음을 참조하여 만들어 낼 것인가 (해저장소 고려), 아니면 무작위로 만들어 낼 것인가를 정하는 확률 값이다. 해저장소를 고려하는 것을 편의상 HMCR이라고 하기도 한다. HMCR은 적합도가 높은 해

근방을 탐색하는 기능을 하며 GA의 교배과정과 유사한 것이라고 할 수 있다.

음조 조절율 (PAR)이란 좋은 화음을 만들기 위해 각 악기의 음조 (Pitch)를 조절하는 것과 같이 우수한 해를 찾기 위해 기존 해를 미세하게 조정하는 음조 조정 과정에 대한 확률 값이다 (그 과정을 PAR이라고도 함). HMCR을 통해 기존의 해를 그대로 사용할 수도 있지만 PAR을 거치면 기존의 해에서 약간의 조정을 거친 값을 사용한다. 화음탐색법의 임의발생 과정은 새로운 해를 무작위로 생성하며 전역탐색력 (Exploration)을 확보한다.

1.2 연구동향

기존의 화음탐색법에서 발전된 형태의 알고리즘이 꾸준히 발표되고 있다. MHS (Modified Harmony Search) [7]는 발전된 화음탐색법의 한 형태로 Paik 등 (2001)에 의해 고안되었다. Paik 등은 PAR의 적용방법에 따라 화음탐색법을 HS1, HS2, HS3와 같이 세 가지로 구분하였으며 HS2의 PAR 변화를 기본으로 하여 화음탐색법의 기본적인 틀은 유지하되 주요 인자인 HM, HMCR, PAR의 적용에 변화를 주었다.

ReHS (Revised Harmony Search) [8]는 최적해 탐색 속도와 정확도를 향상시킨 개선된 화음탐색법 형태의 하나로 Baek 등 (2002)에 의해 연구되었다. HS와 MHS가 갖는 후반기의 최적해 탐색 속도와 관련된 문제를 해결하기 위해 ReHS에서는 HMCR과 PAR 적용 방법에 변화를 주었다. ReHS의 가장 큰 특징은 반복계산과정이 진행됨에 따라 HMCR과 PAR에 점차 변화를 주는 것과 개별 화음에 대해 HMCR과 PAR을 적용한다는 것이다.

IHS (Improved Harmony Search) [9]는 Mahdavi 등 (2006)이 제안한 것으로, 개선된 형태의 화음탐색법 중 하나이다. 주된 개선 사항은 PAR과 음조조정 폭 (BW: Bandwidth)을 각각 PARmax, PARmin, BWmax, BWmin과 같이 최댓값과 최솟값을 설정하여 최적화의 반복계산 과정을 거치면서 수치가 동적으로 변하도록 하였다.

1.3 연구 내용 및 목적

기존의 화음탐색법은 해저장소 고려 과정을 통해 해저장소 내 존재하는 해들의 결정변수를 무작위로 선택하여 하나의 해를 생성하였다. 기존의 방법은 적합도가 높은 해들을 해저장소에 모아둔 것이지만, 그 중에서 무작

위로 결정변수를 조합하는 방법이 최선이라 할 수 없다. 해저장소 내 해들 중에서도 적합도가 높은 해들의 결정 변수들이 새로운 해를 생성할 때 고려될 확률이 크다면 전역탐색력을 확보하면서도 초기에 전역해로 빠른 접근성을 나타낼 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 개선 클러스터링 화음탐색법 (ICHS: Improved Clustering Harmony Search)을 제안한다.

본 연구에서 개발한 ICHS는 화음탐색법의 발전된 형태의 하나로 이와 유사한 기존 알고리즘으로는 GHS (Grouping Harmony Search) [10], GGHS (Grouping-based Global Harmony Search) [11] 등이 있다.

GHS (Gil-Lopez, 2010) [10]는 해저장소에 적합도에 따라 집단을 만들어 해의 구조를 S_x, S_y, S_n 과 같이 세 가지로 나누어 각각 해, 목적함수 값, 집단번호로 나타내었다. GGHS (Askarzadeh, 2011) [11]는 PAR과 이에 따른 BW를 IHS와 유사한 형태로 개선하였다. 또한, 해저장소 내 집단이 선택되는 확률을 MSE (Mean Square Error)를 사용하여 계산하였다. EH (Excellent Harmony), OH (Ordinary Harmony), WH (Weak Harmony)와 같이, 세 가지 그룹으로 나누어진 해저장소에서 토너먼트 선택 기법을 사용하여 기억회상을 하는 방식이 GGHS에 도입되었다.

2. 본론

2.1 개선 클러스터링 화음탐색법

ICHS는 자연현상의 관찰을 통해 만들어진 기존의 메타 휴리스틱 기법과 달리, 화음이라는 인공적인 현상에 기반을 두고 있는 화음탐색법의 발전된 형태의 최적화 알고리즘이다. 기존 화음탐색법에서는 HMCR을 통해 전체 해저장소 내 결정변수 값을 무작위로 선택하며 상대적으로 적합도가 높은 해의 결정변수라고 해도 선택될 확률은 동일하다. ICHS의 주요 개선사항은 새로운 해를 생성할 때 무작위 확률을 통한 기억회상에서 벗어나 우수한 해의 결정변수가 더 높은 확률로 선택되도록 하는 것이다. 이를 위해 ICHS는 클러스터링을 통해 해저장소 내에서 목적함수 값에 따른 집단을 형성하고 목적함수 값이 더 좋은 집단에는 해당 집단 해의 결정변수가 기억회상 될 확률을 더 높게 부과한다. 그 결과 더 좋은 품질의 새로운 해를 만들게 될 가능성이 더 높아진다. GA의 룰렛휠 기법과 유사도 측정 방법 중 하나인 유클리디안

제곱거리 (Squared euclidean distance)를 이용하여 앞서 설명한 메카니즘을 구현하였다.

본 연구에서 제시하는 ICHS는 매트랩 (Matlab) 컴퓨터 언어를 기반으로 개발하였다. 목적함수 값을 기반으로 각 해저장소 내 해들 간의 유사도를 측정하기 위해 Matlab의 Kmeans 함수를 이용하였으며 유사도 측정방법은 유클리디안 제곱거리를 채택하였다. 앞서 설명한 방법으로 2차원 데이터를 기반으로 유사도를 측정하여 2개의 집단을 형성할 경우, 아래의 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

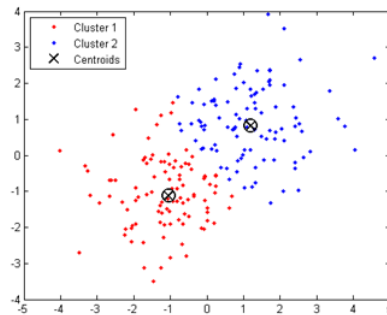


Fig. 1. 2D clustering method into two clusters

Fig. 1에서 X로 표시된 지점은 각 집단을 형성하는 중심점을 나타낸다. 해당 중심점을 기준으로 일정 수준 이상의 유사도를 갖는 경우 그 집단에 속하게 된다. 목적함수 값의 유사도를 기준으로 해저장소를 나누어 집단을 만들고, 다음으로는 HMCR 및 PAR 과정에서 더 좋은 집단에 더 높은 확률을 부과한다.

2.2 클러스터 기반 룰렛휠 기법

기억회상 과정에 있어 상위 집단에 더 많은 기회를 제공하기 위해 ICHS에서는 새로운 확률매개변수 P_c 를 추가하였다. P_c 는 해저장소로 이루어진 각각의 집단이 선택될 확률을 나타낸다.

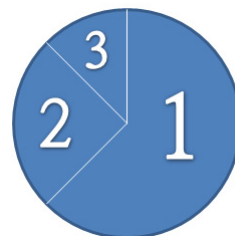


Fig. 2. Roulette wheel method with three clusters

ICHS는 HMCR에 의한 기억회상 과정에 들어가기 전에 P_c 에 대한 룰렛휠을 이용한다. 이를 통해 어느 집단에서 기억회상할 해집단을 불러올지 결정한다. Fig. 2는 집단의 개수가 3개일 경우의 P_c 룰렛휠의 예시이다. 1번 집단은 목적함수 값이 좋은 해집단의 개체들로 이루어져 룰렛휠에서도 차지하는 비율이 크며 높은 선택 확률을 갖는다. 그에 반해 하위해집단의 개체들을 갖고 있는 2, 3번 집단은 룰렛휠의 영역이 비교적 좁다.

만약 P_c 에 대한 룰렛휠에서 가장 영역이 넓은 1번 집단이 선택되었다고 가정하자. 그 다음으로는 1번 집단에 속해 있는 해들 중에 기억회상할 것이 선택된다. ICHS는 이 과정에서는 기본 화음탐색법과 동일하게 무작위 확률로 기억회상할 대상을 고르게 된다. 이후에 PAR을 적용여부 또한 기본 화음탐색법과 동일하게 이루어진다. 이러한 과정을 통해 기억회상을 할 경우 목적함수 값이 좋은 해집단이 선택될 확률이 높아지는 것이다.

앞서 설명한 룰렛휠을 거쳐 새로운 해를 생성하게 되며 이후의 과정은 기존 화음탐색법과 동일하다. 새롭게 얻은 해가 기존의 해보다 좋을 경우 해저장소에 편입시키고 기존의 가장 적합도가 떨어지는 해는 해저장소에서 탈락된다. 새롭게 구성된 해저장소를 기반으로 집단을 형성하고 그에 따른 확률을 부과하여 다음 반복계산 과정을 계속한다.

ICHS를 통해 개선될 것으로 예상하는 것은 최적해를 찾는 과정 중, 초기의 수렴성을 높여 더욱 빠르게 최적해와 가까운 해를 찾는 알고리즘의 능력 (Performance)이다.

3. 적용결과

ICHS의 성능을 검토하기 위하여 결정변수 개수 및 복잡성, 난이도가 상이한 최적화문제에 적용하였다. 결정변수의 개수가 2개인 수학적 벤치마킹 문제 2개, 결정변수의 개수가 30개인 수학적 벤치마킹 문제 2개, 그리고 상수도관망 최적설계 문제 1개에 적용하였다. 각각의 수학적 벤치마킹 문제 최적값과 변수의 개수는 다음의 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of benchmark functions

Benchmark problems	Optimal value	Number of decision variables
Rosenbrock (BF1)	0	2
Eason (BF2)	-1	2
Griewank (BF3)	0	30
Ackley (BF4)	0	30

수학적 벤치마킹 문제에서 비교한 최적화 알고리즘은 HS, IHS이며 각 대상 문제의 목적함수 및 결정변수의 범위는 Table 2와 같다.

Table 2. Definition of benchmark functions

BF1 : Rosenbrock
$Min f(x) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (x_1 - 1)^2$ $-2.048 < x_1, x_2 < 2.048$
BF2 : Eason
$Min f(x, y) = -\cos(x)\cos(y)\exp(-((x-\pi)^2 + (y-\pi)^2))$ $-100 \leq x, y \leq 100$
BF3 : Griewank
$Min f(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^{30} x_i^2 - \sum_{i=1}^{30} \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$ $-600 \leq x_i \leq 600$
BF4 : Ackley
$f(x) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} x_i^2}\right)$ $- \exp\left(\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$ $-32 \leq x_i \leq 32$

적용결과는 문제의 최적값과의 오차를 통해 최적값에 얼마나 가까운 솔루션인지를 나타내었다. 즉, 오차가 작을수록 최적값에 가까운 솔루션이라고 할 수 있다. 성공 확률 (Success rate)은 50회의 독립된 최적화 중에서 정해진 기준보다 작은 값의 오차를 갖는 경우의 비율을 나타낸 것이다. BF1, BF2의 오차 기준은 10^{-10} 이며 BF3, BF4의 오차 기준은 10^{-5} 이다. NFEs란 Number of function evaluations의 약자로 1회의 반복시산에서 검토되는 목적함수의 계산 횟수와 설정된 전체 반복시산 횟수를 곱하여 나타내는 값으로, 얼마나 빨리 최적해를 산출해낼 수 있는지를 정량적으로 나타내는 지표이다. Mean NFEs는 Success rate의 오차 기준을 만족하는 경우, 즉 수렴한 솔루션에 대하여 나타내었다. 따라서 Success rate가 0인 경우, 수렴하지 않았다고 판단하여 Mean NFEs는 계산되지 않는다.

Table 3. Optimization results comparison of benchmark functions

BF1 : Rosenbrock			
	HS	IHS	ICHS
Mean error	7.88E-10	2.56E-13	3.29E-21
Best error	1.63E-11	2.16E-14	1.91E-22
Worst error	3.12E-09	5.08E-13	1.10E-20
Error's SD	1.17E-09	1.48E-13	3.78E-21
Success rate	40	100	100
Mean NFEs	45,250	32,228	18,710
BF2 : Easom			
	HS	IHS	ICHS
Mean error	1.10E-06	4.00E-01	0.00E+00
Best error	2.10E-09	3.33E-16	0.00E+00
Worst error	9.44E-06	1.00E+00	0.00E+00
Error's SD	1.76E-06	5.16E-01	0.00E+00
Success rate	0	50	100
Mean NFEs	-	28,202	8,303
BF3 : Griewank			
	HS	IHS	ICHS
Mean error	1.45E+00	4.94E-01	0.00E+00
Best error	1.31E+00	3.47E-01	0.00E+00
Worst error	1.52E+00	6.08E-01	0.00E+00
Error's SD	6.63E-02	8.74E-02	0.00E+00
Success rate	0	0	100
Mean NFEs	-	-	328
BF4 : Ackley			
	HS	IHS	ICHS
Mean error	2.29E+00	2.74E-05	1.11E-09
Best error	5.26E-05	2.48E-05	4.44E-15
Worst error	4.97E+00	3.00E-05	1.01E-08
Error's SD	1.99E+00	1.84E-06	3.04E-09
Success rate	0	0	100
Mean NFEs	-	-	146

ICHS는 BF1에서 평균오차 (Mean error), 가장 좋은 오차 (Best error)에서 가장 작은 값을 기록해 HS, IHS보다 우수한 솔루션을 갖는 것으로 나타났다. 오차의 표준편차 (Error's SD) 또한 ICHS가 가장 작은 값을 기록하여 솔루션의 편차가 가장 작았다. ICHS의 Mean NFEs는 HS의 절반보다 작은 것으로 나타나, 더 적은 목적함수의 계산으로 우수한 솔루션을 도출하였다.

BF2에서 ICHS는 100의 Success rate를 보였지만 IHS와 HS는 각각 50과 0으로 나타났다. ICHS는 IHS, HS와 달리 50회의 최적화 탐색에서 모두 최적해를 갖는 솔루션을 도출하여 0의 평균오차를 기록하였다.

BF3에서도 ICHS는 최적화 탐색 50회에서 모두 최적해를 갖는 솔루션을 도출하여 0의 평균오차, 100의 Success rate를 갖는 것으로 나타났다. 반면에 IHS와 HS는 0의 Success rate를 기록하여 솔루션의 수렴성이 ICHS보다 낮음을 보였다.

BF4에서도 ICHS의 결과가 가장 우수한 것으로 나타났다. IHS는 HS에 비해 솔루션이 갖는 오차에서는 우수한 결과를 기록했으나 HS와 동일하게 0의 Success rate로 ICHS의 결과에는 미치지 못하는 양상을 보였다.

본 연구에서 개발된 ICHS는 클러스터링 기반 선택을 통해 적합도가 높은 해의 결정변수가 새로운 해 생성 시 선택될 확률이 상대적으로 만든다. 단순 수학문제 최적화에서의 결과를 바탕으로 본 개선 사항의 공학문제에서의 효과를 검증하기 위해 대규모 실제 공학 문제의 하나인 상수도 관망의 최적 관경 설계에 ICHS를 적용하였다. 상수도 관망은 인간의 활동에 필수적인 가장 기본적인 사회기반시설의 하나로 안전하고 신뢰할 수 있는 물 공급을 위해 필요한 요소이다. 상수도 관망의 주요 목적은 수원으로부터 수용가에 이르기까지 요구되는 유량을 적절한 수질과 수압을 만족시키며 공급하는 것이다. 일반적으로 상수도 관망의 구성에는 매우 큰 비용이 발생하며, 따라서 설계조건을 만족시키는 다양한 설계안 중 가장 낮은 비용을 나타내는 대안을 찾아내는 최적설계 과정이 필요하다.

관망의 설계에 사용되는 상업용 관의 경우 그 관경과 비용 사이의 관계가 비선형성을 나타내고, 수리해석 과정에 포함되는 요소 중 각 관로에서 흐르는 유량과 손실 수두를 산정하는 에너지 방정식의 경우에도 비선형성을 갖는다. 실제 상수도 관망의 경우 매우 방대한 경우의 수에 해당하는 가능 설계안이 존재하며, 각 관로에 흐르는 유량의 방향 또한 유동적이기 때문에 최적설계 과정에 어려움을 지닌다. 이에 다양한 메타휴리스틱 최적화 알고리즘들이 상수도 관망의 최적설계 문제에 적용되고 있다 [12-16].



Fig. 3. Layout of Balerna network

본 연구에서는 스페인에 위치한 농업용 상수도 관망 시스템인 **Balerna network**를 적용 대상을 선정하였다. 본 관망은 4개의 저수지와 8개의 회로, 454개의 관로, 443개의 수요절점으로 구성되어 있으며 Fig. 4와 같다. **Balerna network**의 경우 **Reca and Martinez [17]**의 연구에서 최초로 상수도 관망 최적설계의 대상으로 선택되었으며 이후 많은 연구자들이 다양한 최적화 알고리즘 적용, 동일한 종결조건 (목적함수 값 계산 45,400회)을 통해 최적설계안을 제시, 결과를 비교하고 있다.

Balerna network의 최적설계에 적용한 10 종류의 상업용 관의 단위길이별 비용은 Table 4와 같다.

Table 4. Commercial pipe diameters and costs

Pipe diameter (mm)	Cost (€/m)
113.0	7.22
126.6	9.10
144.6	11.92
162.8	14.84
180.8	18.38
226.2	28.60
285.0	45.39
361.8	76.32
452.2	124.64
581.8	215.85

총 454개의 관로로 구성된 **Balerna network**의 최적 설계에는 총 10^{454} 개의 가능해가 존재한다. 최적설계에 적용한 목적함수는 식 (1)과 같이 관경과 관로의 길이에 대한 함수로 구성된다. 수리학적 제한조건인 절점의 최소수압 (Minimum required pressure) 기준은 20m이다. 따라서 이러한 기준을 만족시키지 못하는 설계안에 대해서는 식 (2)와 같은 벌점함수를 적용하여 목적함수에 이를 합산, 해당 설계안이 도태되도록 한다.

$$Min. Cost = \sum_{i=1}^N C_c(D_i) \times L_i + \sum_{j=1}^M P_j \quad (1)$$

$$P_j = \alpha(h_{min} - h_j) + \beta, \text{ if } h_{min} > h_j \quad (2)$$

여기에서, $C_c(D_i)$ 는 관로 i 의 길이당 비용함수를 의미하며, L_i 는 관로의 길이, D_i 는 관로 i 의 관경을 의미한다. N 과 M 은 상수도 관망에 존재하는 관로와 절점의 수를 의미한다. P_j 의 경우 절점의 제한조건을 만족하지 못할 경우 부가되는 벌점함수이며 h_j 는 절점의 수압, h_{min} 은 절점의 최소수압 기준을 의미한다. α 와 β 의 경우 벌점

함수에 적용되는 상수를 의미하며 주어진 문제의 특성에 따라 제한조건을 위배하는 설계안을 도태시킬 수 있도록 충분한 값을 적용하며 본 연구에서는 각각 10^7 , 10^8 적용하였다.

기존 문헌들에서 적용한 해탐색 조건과 동일한 조건 하에서 **ICHS**의 성능을 평가하기 위해 45,400회의 목적함수 값 계산 횟수를 종결조건으로 적용하였으며, 총 50회의 독립적인 최적설계안 탐색을 수행하였다. Table 5는 **ICHS**를 적용한 **Balerna network**의 최적설계안 탐색 결과이다. 50회의 최적설계안 탐색 중 가장 우수한 설계안의 경우 €2,225,195의 비용을 나타냈으며 이를 기존 문헌에서 각각의 최적화 알고리즘으로 도출된 **Balerna network** 최적설계 결과와 비교하였다.

Table 5. Comparison of optimization results

Applied algorithm	Minimum cost (€M)	NFE
GA (Reca et al. [18])	3.738	45,400
SA (Reca et al. [18])	3.476	45,400
MSATS (Reca et al. [18])	3.298	45,400
HS (Geem [19])	2.601	45,400
PSHS (Geem [19])	2.633	45,400
ICHS (This study)	2.225	45,400
IMBA (Sadollah et al. [21])	2.064	45,400

45,400회의 NFE를 갖는 기존 문헌의 알고리즘들과 결과를 비교해 보면, 본 연구에서 개발한 **ICHS**는 **Sadollah et al. [21]**의 **IMBA (Improved Mine Blast Algorithm)**에 이어 두 번째로 우수한 최적설계 결과를 갖는 것으로 나타났다. **Geem [15]**의 **HS**, **PSHS** 등 **HS**에서 변형된 최적화 알고리즘의 결과에서는 **MLHS**에 이어 두 번째로 우수한 결과를 기록했다. **HS**의 결과와 비교하면 약 14.4%의 비용을 감소시킨 것으로 나타났다. 따라서 **HS**가 갖고 있는 해탐색의 성능을 효과적으로 개선했다고 판단된다.

3. 결론

기존의 **HS**가 **HMCR**을 통한 기억회상 과정에서 **HM**에 저장된 솔루션을 무작위로 불러왔다면, **ICHS**는 이를 각각의 솔루션이 갖는 목적함수 값으로 유사도를 측정하여 집단을 형성하고 이를 통해 더 좋은 목적함수 값을 갖는 집단에게 기억회상이 발생하는 확률을 더 높게 부

과하였다. 이를 통해 최적해 탐색과정 중 초기의 수렴성을 높여 최적해에 가까운 해를 빠르게 찾으려 하였다. 또한 선택된 해당 집단에서 기억회상에 사용할 솔루션을 HM에서 고르는 과정에서는 목적함수 값이 우수한 경우만을 고려하지 않고 무작위로 선택하여 우수한 솔루션에만 확률 비중이 집중되는 것을 방지하여 다양성을 함께 고려하였다.

실질적으로 개발 후 모의를 거치기 이전에는 좋은 집단에서만 기억회상 및 화음조정이 빈번하게 일어나, 지역해에서 전역해를 향해 더 이상 나아가지 못하게 되는 경우를 염려하였지만, 초기의 빠른 수렴성을 확보하여 이와 같은 문제는 거의 일어나지 않는 것으로 확인되었다.

ICHS의 성능을 평가하기 위해 기존 문헌들에서 최적화의 적용 대상으로 사용되는 네 가지 수학적 벤치마킹 문제에 개발 알고리즘을 적용하였고, HS, IHS와의 결과 비교를 통해 우수성을 확인하였다. 또한 ICHS의 적용성을 평가하기 위해 대규모 상수도 관망 최적 관경 설계 문제에 적용하였으며, 기존 문헌에서 제시된 알고리즘 대비 우수한 해를 도출할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 같은 연산과정을 포함하고 있는 HS, PSHS와의 비교에서 관로비용을 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 또한 이어지는 연구에서는 개발한 ICHS를 다목적 최적화 기법으로 확장하여 실무분야에서 다양한 설계인자를 동시에 포함하는 최적화 문제의 해결에 적용될 수 있도록 구현할 예정이다.

References

- [1] R. Eberhart, and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory", *In Micro Machine and Human Science*, 1995. MHS'95, Proceedings of the Sixth International Symposium, pp. 39-43, 1995.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MHS.1995.494215>
- [2] S. Kirkpatrick and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671-680, 1983.
DOI: <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
- [3] F. Glover, "Heuristics for integer programming using surrogate constraints", *Decision Sciences*, vol. 8, no. 1, pp. 156-166, 1977.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1977.tb01074.x>
- [4] M. Dorigo, "Optimization, learning and natural algorithms", *Ph. D. Thesis*, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
- [5] J. H. Holland, "Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence", U Michigan Press, 1975.
- [6] Z. W. Geem, J. H. Kim and G. V. Loganathan, "A new heuristic optimization algorithm: harmony search", *Simulation*, vol. 76, no. 2, pp. 60-68, 2001.
DOI: <https://doi.org/10.1177/003754970107600201>
- [7] K. R. Paik, J. H. Jeong, and J. H. Kim. "Use of a harmony search for optimal design of coffer dam drainage pipes", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, vol. 21, no. 2-B, pp. 119-128, 2001.
- [8] C. W. Baek, "Development of Optimal Decision-Making System for Rehabilitation of Water Distribution Systems Using ReHS", *Master degree thesis*, Korea University, 2002.
- [9] M. Mahdavi, Mohammad Fesanghary, and E. Damangir, "An improved harmony search algorithm for solving optimization problems", *Applied mathematics and computation*, 188.2, pp. 1567-1579, 2007.
- [10] Gil-Lopez, Sergio and I. Landa, "On the application of a novel grouping harmony search algorithm to the switch location problem", *International Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 662-672, 2010.
- [11] A. Askarzadeh, and A. Rezaazadeh "A grouping-based global harmony search algorithm for modeling of proton exchange membrane fuel cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, 36.8, pp. 5047-5053, 2011.
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.070>
- [12] A. Simpson, G. Dandy and L. Murphy "Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimisation", *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 120, no. 4, pp. 423-443, 1994.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1994\)120:4\(423\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(423))
- [13] H. Maier, A. Simpson, A. Zecchin, W. Foong, K. Phang, H. Seah and C. Tan "Ant colony optimization for design of water distribution systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 129, no. 3, pp. 200-209, 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129:3\(200\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:3(200))
- [14] I. Montalvo, J. Izquierdo, R. Perez and M. M. Tung, "Particle swarm optimization applied to the design of water supply systems", *Computers and Mathematics with Applications*, 56 pp. 769-776, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2008.02.006>
- [15] Z. W. Geem, "Optimal cost design of water distribution networks using harmony search", *Engineering Optimization*, vol. 38, no. 3, pp. 259-277, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1080/03052150500467430>
- [16] A. Vasan and S. P. Simonovic, "Optimization of water distribution network design using differential evolution", *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 136, no. 2, pp. 279-287, 2010.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2010\)136:2\(279\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2010)136:2(279))
- [17] J. Reca and J. Martínez "Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks", *Water resources research*, vol. 42, no. 5, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1029/2005WR004383>
- [18] J. Reca, J. Martínez, C. Gil, and R. Baños. "Application

of several meta-heuristic techniques to the optimization of real looped water distribution networks", *Water Resources Management*, vol. 22, no. 10, pp. 1367-1379, 2008.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-007-9230-8>

[19] Z. W. Geem "Particle-swarm harmony search for water network design", *Engineering Optimization*, vol. 41, no. 4, pp. 297-311, 2009.

DOI: <https://doi.org/10.1080/03052150802449227>

[20] A. Bolognesi, C. Bragalli, A. Marchi and S. Artina, "Genetic heritage evolution by stochastic transmission in the optimal design of water distribution networks", *Advances in Engineering Software*, 41 pp. 792-801, 2010.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.12.020>

[21] A. Sadollah, D. G. Yoo and J. H. Kim, "Improved mine blast algorithm for optimal cost design of water distribution systems", *Engineering Optimization*, vol. 47, no. 12, pp. 1-17, 2015.

DOI: <https://doi.org/10.1080/0305215X.2014.979815>

김 중 훈(Kim Joong Hoon)

[정회원]



- 1984년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 1986년 12월 : Virginia Polytechnic Institute & State Univ. (공학석사)
- 1992년 2월 : Univ. of Texas at Austin (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

최 지 호(Choi Jiho)

[준회원]



- 2014년 8월 : 고려대학교 건축사회 환경공학부 (공학사)
- 2017년 2월 : 고려대학교 건축사회 환경공학과 수자원공학 (공학석사)

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

정 동 휘(Jung Donghwi)

[정회원]



- 2009년 2월 : 고려대학교 사회환경 시스템공학과 (공학사)
- 2011년 2월 : 고려대학교 건축사회 환경공학과 수자원공학 (공학석사)
- 2013년 2월 : Univ. of Arizona (공학박사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 건축토목공학부 조교수

<관심분야>

상수관망 설계, 운영, 관리 최적화